



Volumen 3, Número 1, Junio 2024

## “Herramientas prácticas para comprender el origen de la vida”

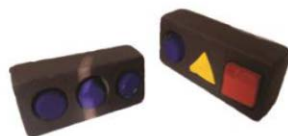
Síntesis



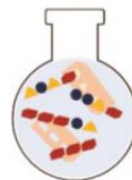
Concentración



Selección



Polimerización



Plegamiento y propiedades emergentes



Valderrama-Méndez *et al.*, 2024



---

## IMAGEN DE LA PORTADA

Propuesta didáctica de química prebiótica para evidenciar los pasos interconectados entre moléculas orgánicas y minerales que antecedieron al origen de la vida.

Figura de Valderrama-Méndez *et al.*, 2024.

## CONTRAPORTADA

Divulgación de la ciencia en la Escuela Primaria "Ignacio Zaragoza", PeñaMiller, Querétaro.

Figura 1 de Cid-Villegas, 2024. p. 5-10

---



Esta obra está bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución No Comercial 4.0

ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS, Revista electrónica, Año 3, No.1, Junio de 2024, es una publicación semestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla-UNAM, Querétaro, Estado de Querétaro, a través del Instituto de Geociencias, Boulevard Juriquilla No. 3001, Colonia Jurica La Mesa, Juriquilla, Querétaro, Qro., C.P. 76230, Tel. (+52) (442) 2381104, exts. 177 y 196,

**<http://encomunicacionct.geociencias.unam.mx> ; [encomunicacionct@geociencias.unam.mx](mailto:encomunicacionct@geociencias.unam.mx)**

Editora responsable: Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez. Certificado de Reserva de Derechos de Autor número: 04-2022-110710533300-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Instituto de Geociencias, Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez, Boulevard Juriquilla No. 3001, Colonia Jurica La Mesa, Juriquilla, Querétaro, Qro., C.P. 76230. Fecha de la última modificación, 19 de junio de 2024.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros, del editor o de la UNAM. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.



## EDITORES EN JEFE

### Sección Enseñanza

Dr. Alexis Del Pilar Martínez  
adel pilar@geologia.unam.mx  
Instituto de Geología,  
Universidad Nacional Autónoma de México

### Sección Comunicación

Dr. Rodrigo Gutiérrez Navarro  
rgutierrez@geociencias.unam.mx  
Instituto de Geociencias  
Universidad Nacional Autónoma de México

### Dirección de Gestión Editorial

Dra. Susana A. Alaniz Álvarez  
alaniz@geociencias.unam.mx  
Instituto de Geociencias  
Universidad Nacional Autónoma de México

---

## EDITORES ASOCIADOS

Dra. Dalila Aldana Aranda  
daldana@cinvestav.mx  
CINVESTAV  
Instituto Politécnico Nacional, Mérida México

Dra. Laura Mori  
mori@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Thierry Calmus  
arnithy@gmail.com  
Instituto de Geología  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Ángel F. Nieto Samaniego  
afns@geociencias.unam.mx  
Instituto de Geociencias, campus Juriquilla  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Claudia C. Mendoza Rosales  
claus@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Gilberto Silva Romo  
silvarg@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

M. en C. Mónica G. Ramírez Calderón  
monicald@ciencias.unam.mx  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Planeteando

Dr. Yadira H. Hernández Pérez  
yadira.hernandez@enp.unam.mx  
Escuela Nacional Preparatoria  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Enrique A. González Torres  
eagtgaia@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Anthony Ramírez Salazar  
r.s.anthonyy@gmail.com  
Instituto de Geología  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Bernardo A. Bastien Olvera  
bastien@ucdavis.edu  
University of California, San Diego, EUA.

Dr. Saul A. Villafañe Barajas  
saul.villafane@correo.nucleares.unam.mx  
Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad  
Nacional Autónoma de México

## Enseñanza y Comunicación de las Geociencias

Instituto de Geociencias, campus Juriquilla UNAM | Boulevard Juriquilla núm. 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México [encomunicacionct@geociencias.unam.mx](mailto:encomunicacionct@geociencias.unam.mx)



Dr. Roberto Greco  
greco@unicamp.br  
Universidad Estadual de Campinas (Unicamp),  
SP, Brasil

MSc. Néstor Damian Salinas Franco  
nestorsalinas@facen.una.py  
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de  
Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de  
Geología, Paraguay

Dr (c). Marcelo Darío Bazan  
marcelo.bazan@unahur.edu.ar  
Universidad Nacional de Hurlingham, Argentina

Lic. Geól. Romina M. Celabe Gaona  
rominacelabe@facen.una.py  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,  
Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Dr. Richard Serrano-Agila  
rgserrano@utpl.edu.ec  
Departamento de Geociencias, Facultad de  
Ingenierías y Arquitectura, Universidad Técnica  
Particular de Loja, Ecuador

Dra. Sandra Villacorta Chambi  
sandra.villacortachambi@csiro.au  
Australian Resources Research Centre,  
Australia

Ing. Geol. Angel E. Espinosa Borges  
angeleduardoespinosaborges@gmail.com  
Universidad de Desarrollo e Innovación de la  
Universidad de las Tunas, Cuba

Geóloga D.Sc. Anna Paula Lima Costa  
anna.costa@ifrn.edu.br  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

Dra. Amelia Calonge García  
a.calonge@uah.es  
Departamento de Geología, Geografía y  
Medio Ambiente, Universidad de Alcalá,  
España

M. en C. Ana Cecilia Lopera Gasca  
analopera.pueis@cic.unam.mx  
Programa Universitario de Estudios  
Interdisciplinarios del Suelo, PUEIS  
Universidad Nacional Autónoma de México

#### EDITORAS TÉCNICAS

Dra. Marina Vega González  
mvega@geociencias.unam.mx  
Instituto de Geociencias, campus Juriquilla  
Universidad Nacional Autónoma de México

Mtra. Sandra Fuentes Vilchis  
sandra.fuentes@dgenp.unam.mx  
Escuela Nacional Preparatoria  
Universidad Nacional Autónoma de México

Ilse Elbjorn Flores  
ilse1394@gmail.com  
Instituto de Geociencias,  
Universidad Nacional Autónoma de México



## CONTENIDO

Pág.

**CUENTO PARA INTRODUCIR A LOS NIÑOS EN EL  
CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE** **1**

Eduardo Jaime-Muñoz

Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

**Palabras clave:** Algarrobos, geología, aluvión, fenómenos atmosféricos, tormenta.  
(Mayores de 8 años)

**DE MI AULA DE INGENIERÍA A TU AULA DE PRIMARIA; UNA  
EXPERIENCIA DE DIVULGACIÓN DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA** **5**

Gonzalo Cid-Villegas

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Palabras clave:** Divulgación de la ciencia, Ciencias de la Tierra, educación primaria,  
Sierra Gorda.  
(Mayores de 12 años)

**¿EL AGUA DE LLUVIA SIN TRATAR ES APTA PARA SU CONSUMO?** **10**

Rocío García-Martínez, Daniela K. Calvo-Ramos, Carolina Muñoz-Torres,  
Alejandro Carrillo-Chávez, José M. Hernández-Solís y Moisés López-Carrasco  
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional  
Autónoma de México.

**Palabras clave:** Cambio climático, sequía, agua de lluvia, nubes, metales pesados.  
(Mayores de 15 años)



**RECURSO DIDÁCTICO SOBRE QUÍMICA PREBIÓTICA: HERRAMIENTAS  
PRÁCTICAS PARA COMPRENDER EL ORIGEN DE LA VIDA** **15**

Ana Elisa Valderrama-Méndez, Luan Xanath Castillo-Alcalá y  
Saúl Alberto Villafañe-Barajas

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Palabras clave:** Origen de la vida, química prebiótica, minerales, propuesta didáctica.

(Mayores de 15 años)

**CORRECCIONES UTILIZADAS EN EL PROCESAMIENTO DE DATOS  
MAGNÉTICOS: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN EN GEOCIENCIAS** **19**

Timoteo Gómez-Sánchez, Miguel Ángel Guzmán-De la Cruz,  
Gelder Éneo Cámara-Beauregard y Adriana Guadalupe Jiménez-Vázquez  
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

**Palabras clave:** Magnetometría, correcciones, potenciales, campo magnético.

(Mayores de 18 años)

**PROCESO DIAGENÉTICO DEL CARBÓN Y SU RELACIÓN CON LA  
GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS** **26**

Eduardo González-Partida, Juan Josué Enciso-Cárdenas, Sumit Mishra,  
Joseph Madondo, Genaro de la Rosa-Rodríguez, José Abdón Gauna-Arista y  
Alejandro Carrillo-Chávez

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México

**Palabras clave:** Carbón, kerógeno tipo III, diagénesis, gas.

(Mayores de 18 años)

**MODELOS SIMPLES DE CRECIMIENTO POBLACIONAL DESDE LA PERSPECTIVA  
DE FLUJOS- RESERVORIOS EN LA PLATAFORMA STELLA COMO  
HERRAMIENTA PARA VISUALIZAR ELEMENTOS QUE REGULAN A LOS  
SISTEMAS DINÁMICOS** **33**

Israel Medina-Gómez

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, Universidad Nacional  
Autónoma de México

**Palabras clave:** Sustentabilidad, crecimiento, modelos, recursos, formación educativa.

(Mayores de 18 años)



## EDITORIAL

Nos complace anunciar en este nuevo número de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias importantes cambios y avances que reflejan nuestro compromiso continuo con la excelencia académica y la difusión del conocimiento en nuestra área.

En primer lugar, queremos dar la bienvenida al Dr. Alexis Del Pilar-Martínez quien se une a nosotros como editor en jefe de la sección de Enseñanza, aportando su vasta experiencia y conocimiento en el campo educativo. Por otro lado, el Dr. Rodrigo Gutiérrez Navarro seguirá con la responsabilidad de la sección de Comunicación, trayendo consigo su perspectiva fresca y valiosa para enriquecer nuestras publicaciones.

Además, la Dra. Susana Alaniz ha sido designada como la responsable de la Dirección de Gestión Editorial, asegurando que todos nuestros procesos editoriales se realicen con la máxima eficiencia y calidad. También estamos muy contentos de contar con el apoyo de Ilse Elbjorn Flores, quien nos está ayudando en la formación y diseño de la revista, mejorando así la presentación y accesibilidad de nuestros contenidos.

Nos enorgullece informar que nuestra revista cuenta ahora con el ISSN y el DOI, dos identificadores de publicaciones de uso internacional que nos consolidan aún más como una revista académica formal.

El ISSN (*International Standard Serial Number*) es un código de ocho dígitos que ayuda a identificar las publicaciones seriadas, aquellas que se difunden regularmente en secuencia, como revistas, diarios, periódicos y bases de datos. Este identificador es crucial para la catalogación y búsqueda de nuestras publicaciones en bibliotecas y bases de datos internacionales.

Por otro lado, el DOI (*Digital Object Identifier*) es un identificador único utilizado principalmente en revistas científicas. Cada artículo publicado en nuestra revista tendrá su propio DOI, compuesto por una combinación de números y letras que incluye el ISSN, el año y un número de seguimiento. Este sistema permite una identificación precisa y permanente de nuestros artículos, facilitando su localización y citación en el ámbito académico.

Con estos avances, reafirmamos nuestro compromiso de seguir consolidándonos como una revista académica de referencia en el campo de las geociencias. Agradecemos a todos nuestros colaboradores, autores y lectores por su continuo apoyo y confianza en nuestro trabajo.

¡Esperamos que disfruten de este nuevo número y de los contenidos que hemos preparado con tanto esmero!

**Atentamente,**

El equipo editorial de Enseñanza y Comunicación de las Geociencias

# CUENTO PARA INTRODUCIR A LOS NIÑOS EN EL CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE

Eduardo Jaime Muñoz

Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes, Universidad Nacional de San Juan, Av. José Ignacio de la Roza Oeste 230, J5400 San Juan, Argentina.

ejaime18@gmail.com

## RESUMEN

Se presenta un cuento para introducir a los niños en el cuidado del medio ambiente, en el que se entrelazan la biología con la importancia de los algarrobos, la geología con el aluvi3n, los fenómenos atmosféricos con la tormenta y la vida cotidiana del poblado.

**Palabras clave:** Algarrobos, geología, aluvi3n, fenómenos atmosféricos, tormenta.

## ABSTRACT

*A tale is presented to introduce children to environmental care, which combines biology with the importance of meadows, geology with alluvium, silt flow, atmospheric phenomena with storms and the daily life of the population.*

**Keywords:** Mesquite, geology, alluvium, atmospheric phenomena, storm.

## INTRODUCCIÓN

Los cuentos permiten a los niños y niñas abrir sus sentidos, imaginar el mundo de una manera distinta y lograr aprendizajes significativos a través de lecturas inspiradas en historias de personajes. Escribir un cuento para la enseñanza de las ciencias de la Tierra representa un desafío. Emprender el estudio de las geociencias de una manera didáctica y entretenida resulta fascinante y a la vez enriquecedor. Buscando orientar de una mejor manera este trabajo científico, a partir del cuento "Los algarrobos que salvaron al poblado de Pedregal", escrito por el autor del presente artículo, se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo utilizar la narrativa del cuento en el aula escolar con fines educativos?

Para iniciar el trabajo en el aula e introducir el tema a tratar, se proponen actividades didácticas de inicio con los estudiantes, luego se organiza una salida a terreno (en campo abierto) para observar

y analizar los fenómenos naturales en el paisaje y después ellos realizan fichas educativas relacionadas con el cuento.

La importancia de poner en práctica estas estrategias de trabajo educativo en las escuelas rurales permite fortalecer la enseñanza de las ciencias de la Tierra en escuelas aisladas de la ciudad e innovar con actividades que despierten la motivación de los estudiantes. El trabajo está dividido en la presentación de la metodología de trabajo, los resultados, una discusión, las conclusiones y las referencias.

## METODOLOGÍA

Con la ayuda del docente, los niños leen "Los algarrobos que salvaron el poblado de Pedregal" y en sus libretas de notas escriben cinco palabras clave (es decir las más importantes y redundantes) que aparecieron en el cuento.

Luego de esta actividad, los estudiantes realizan una salida a terreno, al entorno natural de la escuela, para identificar el aluvi3n, los tipos de árboles de la comunidad y aprender cómo los algarrobos pueden evitar que se desborde el río, la importancia de construir casas lejos de los márgenes de los ríos e identificar el tipo de sedimento del aluvi3n.

## RESULTADOS

### Cuento

Los algarrobos que salvaron el poblado de Pedregal

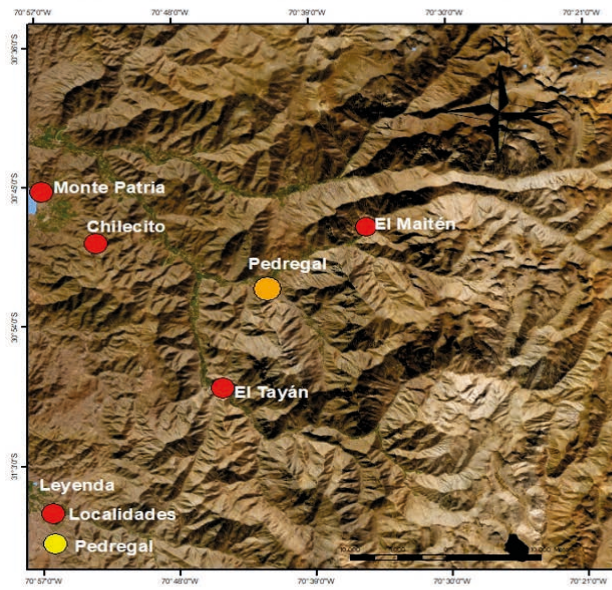
Autor: Eduardo Antonio Jaime Muñoz

¿Te gustaría saber cómo los algarrobos salvaron al poblado de Pedregal?

Pedregal era un pueblo rural ubicado en la Precordillera de la provincia del Limari en Chile (Figura 1). Esta localidad estaba atravesada por un camino que dividía el pueblo en dos; allí vivían diversas familias dedicadas a la agricultura que cultivaban uvas, tunas, paltos (aguacates) y naranjas.



Pueblo de Pedregal, comuna de Monte Patria, provincia del Limari, región de Coquimbo, Chile.



Pedregal en América Latina

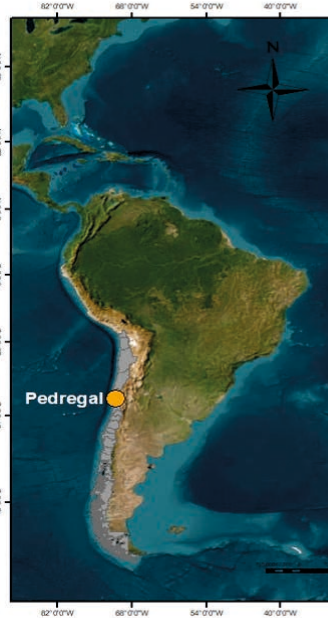


Figura 1. Ubicación de las localidades y del Pueblo del Pedregal en Chile y America Latina.

¡Pedregal era un pueblo maravilloso! El agua brotaba de las montañas y el estero de Tulahuencito era un río de aguas cristalinas donde, cada verano, los lugareños de la zona usaban inmensas lagunas para bañarse.

Cada año, los niños y niñas que vivían en las orillas observaban las truchas, peces enormes y muy rápidos, que cruzaban las cascadas del río. Ver una trucha era un espectáculo: era sorprendente observarlas cuando saltaban en las lagunas para comerse los insectos que se acercaban a estas pozas de agua.

El pueblo conectaba con el sector de Las Carpas por medio de un puente. En ese trayecto había algarrobos que hermozeaban el paisaje del lugar.

Los algarrobos son árboles frondosos, verdaderos tesoros de estas zonas semiáridas (Figura 2). Las personas del pueblo de Pedregal respetaban mucho los algarrobos: para ellos eran los que anunciaban los años buenos y malos.



Figura 2. Fotografía de un algarrobo en la cercanía del Pedregal.

Los ancianos del pueblo visitaban cada año los algarrobos para registrar la presencia de flores: ellos contaban a los habitantes del pueblo que cuando los algarrobos florecían en verano era una señal de un año sin o con escasas lluvias, y cuando los algarrobos florecían en primavera habría un invierno lluvioso.

Transmitir el mensaje de la llegada de lluvias alegraba a todos, ya que en Pedregal había mucha agricultura y ganadería caprina.

Todas las personas del pueblo sabían que no se debía dañar un algarrobo; aquí estaba prohibido quitar esos árboles que se consideraban los ojos de la naturaleza. No se les podía ofender ni tampoco enojarse con ellos. Aunque no se ha probado que tales comportamientos humanos afecten el desarrollo de estos árboles, la costumbre ha permitido que en esta región los algarrobos sean numerosos.

Un día, un lugareño del pueblo ofendió a los algarrobos. Todas las personas del pueblo estaban muy asustadas porque sabían que esto no se podía hacer aunque no sabían por qué no.

Llegada la noche, la luna se escondió, el cielo de Pedregal se nubló por completo, las tinieblas se extendieron, un viento helado remecía los techos de las casas y la lluvia llegó al poblado. ¡Los lugareños estaban muy asustados por la llegada de una tormenta!

De repente, una luz se avistó en la punta del cerro La Olla. El pánico cundió entre todos los habitantes, un inmenso flujo material, barro y suelo arrastrado por una corriente de agua (aluvión) se acercaban al pueblo.

Todos los lugareños corrieron al lugar donde estaban los algarrobos, esperando que los árboles los salvaran de ser golpeados por el aluvión. Un sonido extraño se oyó en todo el pueblo, una mezcla de agua y barro se divisaba viniendo en dirección hacia Pedregal... fue en ese momento que los algarrobos, que se alzaban como formando una pared, protegieron al pueblo de la fuerza del aluvión. Era sorprendente ver cómo el agua no podía pasar hacia las

casas porque los algarrobos, con sus ramas y raíces, le impedían el paso.

Los habitantes estaban sorprendidos y agradecidos por la utilidad de los algarrobos, que salvaron al pueblo de Pedregal de ser destruido por los aluviones. Al notar su utilidad, las personas tomaron semillas de los algarrobos y los sembraron por toda la zona de riesgo en las márgenes de los ríos, para que el pueblo pudiera estar seguro ante un nuevo aluvión (Figura 3).

Y desde entonces, nadie nunca más ha vuelto a ofender ni a maltratar a los algarrobos.



Figura 3. Fotografía del puente del poblado El Pedregal, se observan algarrobos en las inmediaciones de los arroyos.

### Planteamiento pedagógico e interacción docente-estudiante

En la Tabla 1 se describen los objetivos de la clase, la ubicación curricular así como las habilidades del siglo XXI y la planeación docente para llevar a cabo la actividad en el aula. En la Tabla 2 se destaca la interacción docente-estudiante así como el proceso de evaluación sugerido con esta actividad.

Tabla 1. Planteamiento pedagógico	
Objetivo de la clase	Ubicación curricular
1. Analizar un cuento con el fin de comprender la relación e importancia que existen entre las ciencias de La Tierra y la sociedad.	Subsector: Historia, Geografía y Ciencias Sociales Unidad: La diversidad geográfica de Chile Temática: Los riesgos naturales en Chile.
Habilidades del siglo XXI	Planeación del docente
1. Investigar a nivel escolar las implicaciones del cuento en las manifestaciones del espacio geográfico donde viven los estudiantes. 2. Despertar emociones positivas para concientizar sobre el cuidado de los recursos naturales de la comunidad.	El docente entrega a los estudiantes materiales de trabajo como hojas, gomas, lápices de colores, papel lustre, goma Eva/ foamy, pegamento y tijeras para que realicen productos como afiches/posters, fichas didácticas y representaciones asociadas al cuento.

Tabla 2. Interacción docente-estudiante	
Inicio de la clase	Desarrollo de la actividad
1. Los estudiantes leen con la ayuda del docente el cuento "Los algarrobos que salvaron el pueblo de Pedregal".  En la libreta de notas del taller de ciencias y medio ambiente escriben cinco palabras clave relacionadas con el cuento.	Los estudiantes realizan una salida a terreno / de campo con el fin de reconocer y analizar los aspectos tratados en el cuento: a) Tipos diferentes de árboles. b) Tipos de sedimentos: grava, sedimentos de flujo de lodo fino, bordes principales y secundarios del río. c) Planicie de inundación (marcas de cuando ha habido lluvias fuertes y se ha desbordado el río.  Una vez terminada esta actividad, los estudiantes elaboran las fichas didácticas ocupando los materiales entregados por el docente.
Final de la clase	Proceso de evaluación
1. Los estudiantes realizan una exposición relacionada con el cuento, donde presentan sus fichas, los aprendizajes obtenidos y las proyecciones del trabajo realizado.	El proceso de evaluación de la actividad se realiza a través de una ficha de trabajo evaluativo que debe contener: 1. Detectar información relevante. 2. Identificar palabras clave. 3. Releer partes confusas. 4. Resumir información y 5. Distinguir entre ideas principales y secundarias.

### DISCUSIÓN

Las propuestas educativas enfocadas en el trabajo con cuentos permiten a los estudiantes poder lograr aprendizajes utilizando obras literarias ambientadas en su propia realidad. García-González y Pérez-Martín (2016) concluyen que "resulta una experiencia enriquecedora que relaciona las asignaturas de Lengua Castellana y de Plástica con las Ciencias Naturales, generando una visión transversal que potencia el interés por la ciencia, además de permitir integración de los contenidos a través de preguntas de proceso".

Sin duda, el cuento es un recurso relevante en la enseñanza escolar: permite, a través de su lectura, iniciar un trabajo pedagógico que puede, a su vez, integrar otras asignaturas del currículum escolar permitiendo nutrir los aprendizajes obtenidos. De esta manera, un estudiante puede aprender de la biología de los algarrobos al reconocer sus ramas, raíces, tallos, hojas y flores y, al mismo tiempo, puede aprender que el algarrobo tiene una historia de vida asociada con los orígenes del pueblo.

En la cosmovisión de los pueblos andinos existe una relación muy estrecha entre la naturaleza y los seres humanos: así queda establecido en el manuscrito de Mamani (2009). El trabajo plantea una relación mediada simbólicamente por tres animales no domésticos propios del lugar: el zorro, el cóndor y el águila. Estos animales representan la buena o la mala suerte, lo que permite a los lugareños entender desde sus propias creencias el mundo natural.

En el cuento presentado aquí también se observan estos conocimientos populares que reflejan el lenguaje que los pueblos rurales entienden, los orígenes de los pueblos y los saberes locales volcados en el manejo de los recursos naturales. Considerando estas características, el cuento es un recurso educativo que permite implementar secuencias didácticas innovadoras con las que el docente y los estudiantes pueden poner en práctica los conocimientos aprendidos en el aula escolar, estimulando en los estudiantes la búsqueda de oportunidades de indagación. En el manual publicado por Wallberg (2023), se menciona que “Cuando investigamos primero observamos todo a nuestro alrededor para entenderlo mejor”.

Generar este tipo de habilidades en un modelo de competencias permite a los estudiantes, a través de un cuento, buscar en el mismo espacio donde viven plantear preguntas que contribuyan a comprender de mejor manera fenómenos naturales y culturales que se dan en el mismo territorio. Castillo-Duarte (2016) afirma que “La estrategia educativa implementada permitió que los estudiantes abandonaran los temores que produce la necesidad de preguntar”. La implementación de estas estrategias en el aula contribuyó a crear ambientes propicios para la enseñanza y para el desarrollo de la capacidad de los estudiantes para hacer preguntas relacionadas con el cuento.

Dulsat-Ortiz y Rodríguez-Machado (2020) establecen que “Los resultados obtenidos permiten concluir que la actividad fue interesante para el aprendizaje, porque se consiguió que todos los conceptos tratados los asimilaran los estudiantes”. En consecuencia, el recurso del cuento para la enseñanza contribuye a comprender de mejor manera los conceptos tratados en clase. Lo interesante es que, a través del cuento, el docente puede articular relaciones de conocimiento con otras disciplinas del programa de estudios.

Por último, se quiere resaltar que el Ministerio de Medio Ambiente (2018) propone que “Apoyar la incorporación del cuidado del medio ambiente a través del cuento promueve un enfoque integral en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los niños de los distintos centros educativos a lo largo del país”. Incentivar prácticas pedagógicas que contribuyan a fortalecer la educación ambiental en escuelas, es indispensable para poder conseguir una sociedad que sea responsable y adquiera un compromiso en cuidar nuestra naturaleza.

## CONCLUSIÓN

El cuento titulado “Los algarrobos que salvaron el pueblo de Pedregal”, enfocado en la enseñanza de las ciencias de la Tierra, propone una metodología que permite, desde una mirada territorial, dar valor a los elementos del paisaje para llegar a comprender cómo las geociencias pueden verse ilustradas en una narración como el cuento. Escribir y emplear en clase un cuento integrando el medio ambiente donde los niños y las niñas viven junto a sus familias facilita la enseñanza de los conocimientos científicos y genera aprendizajes significativos sobre el ecosistema del ámbito rural. Formar conciencia ambiental a partir de los cuentos y de las salidas a terreno contribuye a comprender las problemáticas ambientales que se dan en los procesos de la Tierra, con el fin de valorar de mejor manera los recursos naturales. Buscar nuevas estrategias pedagógicas vinculadas a la lectura y a las innovaciones pedagógicas ayuda a fortalecer los procesos educativos, reforzando la comprensión de la lectura y la comprensión del medio natural y cultural. Innovar en las geociencias desde la educación es una tarea permanente que, sin duda, ayuda a replantear los vínculos con el mundo escolar, para poder entender las oportunidades que ofrecen las geociencias a la sociedad actual.

## GLOSARIO

- Algarrobo:** nombre de árbol nativo que crece en zonas áridas y semiáridas.
- Estero:** pequeño riachuelo o curso de agua natural que emerge de las montañas.
- Sector Las Carpas:** zona poblada que se ubica en la ladera de un cerro en forma de carpa.
- Semiáridas:** espacio geográfico donde las condiciones ambientales se caracterizan por la falta de agua.
- Tormenta:** tipo de lluvia que se destaca por su gran intensidad.
- Aluvión:** material que se concentra en los bordes de ríos y riachuelos por el escurrimiento de agua sobre la superficie.

## REFERENCIAS

- Castillo-Duarte, C. E. (2016). El cuento como estrategia pedagógica para desarrollar la indagación en Ciencias Naturales. *Educación y Ciencia*, (20), 71-76. DOI: 10.19053/0120-7105.eyc.2017.20.e8898.
- Dulsat-Ortiz, C. y Rodríguez-Machado, R. E. (2020). El cuento: experiencia de aprendizaje y enseñanzas de las ciencias en E. De la Torre Fernández (Ed). *Contextos universitarios transformadores. Boas prácticas no marco dos GID. IV Jornadas de Innovación Docente* (pp. 71-82). Universidad de Coruña.
- García-González S. y Pérez-Martín, J. M. (2016). Enseñanza de las ciencias naturales en Educación primaria a través de cuentos y preguntas mediadoras. *Revista Internacional de Investigación e Innovación en Didáctica de las Humanidades y las Ciencias*, (3), 101-122.
- Ministerio de Medio Ambiente (2018). *Guía de educación parvularia, valorando y cuidando el medio ambiente desde la primera infancia*. División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Chile.
- Mamani, L. M. (2009). *Entre el zorro y el cóndor: producción ganadera y simbolismo en la quebrada Humahuaca*. Cuadernos de La Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales. Universidad Nacional de Jujuy.
- Wallberg B. (2023). *Modelo de competencias para explorar, presentación para primer y segundo ciclos básicos*. Ministerio de Ciencia Tecnología Conocimiento e Innovación. Gobierno de Chile. Explora Región de Coquimbo. Cazalac. Unesco. Programa Hidrológico Intergubernamental, Chile

Manuscrito recibido: 10 de febrero de 2024

Manuscrito corregido recibido: 30 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 3 de junio de 2024

# DE MI AULA DE INGENIERÍA A TU AULA DE PRIMARIA; UNA EXPERIENCIA DE DIVULGACIÓN DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

**Gonzalo Cid-Villegas**

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,  
Boulevard Juriquilla No. 3001, C.P. 76230, Querétaro, México.

[gcvillegas@geociencias.unam.mx](mailto:gcvillegas@geociencias.unam.mx)

## RESUMEN

Al final del cuarto semestre, los alumnos del curso de Geología de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Querétaro realizaron una práctica de campo en la Sierra Gorda como parte integrante de la asignatura. Aprovechando su estancia en Camargo, Peñamiller, organizaron e implementaron algunos talleres de divulgación de las Ciencias de la Tierra dirigidos a los niños de la Escuela Primaria "Ignacio Zaragoza", ubicada en el mismo poblado. Los talleres se enfocaron en la divulgación de aspectos geológicos muy atractivos para los niños, como la paleontología, la vulcanología y la sismología. Asimismo, se realizaron experimentos diseñados para entender conceptos fundamentales de física y se explicaron algunos aspectos clave del trabajo de los ingenieros civiles. Mediante juegos, cuentos y otras dinámicas, los expositores atendieron aproximadamente a 140 niños.

**Palabras clave:** Divulgación de la ciencia, Ciencias de la Tierra, educación primaria, Sierra Gorda.

## ABSTRACT

*At the end of the fourth semester, the students of Geology in the Civil Engineering program at the Autonomous University of Querétaro carried out a field practice in the Sierra Gorda as an integral part of the course. Taking advantage of their stay in Camargo, Peñamiller, the Engineering students organized and implemented some Earth Sciences dissemination workshops aimed at the children of the Ignacio Zaragoza primary school, located in the same town. The workshops focused on the dissemination of geological aspects that are very attractive to children, such as paleontology, volcanology, and seismology. Likewise, experiments designed to understand fundamental physics concepts were carried out and some key aspects of the work of civil engineers were explained. Through games, stories, and other dynamics, the exhibitors served approximately 140 children.*

**Keywords:** Science dissemination, Earth Sciences, primary education, Sierra Gorda.

## INTRODUCCIÓN

Las Ciencias Naturales dentro de la educación básica en México han jugado un papel secundario en el desarrollo infantil, siendo las Matemáticas y las lenguas en los que se hace mayor énfasis en la educación básica (Flores-Camacho, 2012). Si bien las reformas educativas han intentado resarcir las carencias, no ha sido suficiente (Flamand *et al.*, 2020; Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2023). Las Ciencias Naturales son una de las materias que los niños disfrutaban más en las clases (Cuevas *et al.*, 2016). No obstante, en la educación básica se sigue dando poco impulso a aquellas actividades que enriquecen el desarrollo de esta materia, como la realización o asistencia a ferias de ciencia, o visitas a museos (Cuevas *et al.*, 2016). Si a esto se le añade el difícil acceso a estas actividades, ya sea por cuestiones económicas o por su ubicación complicada, principalmente en zonas rurales, mayor es la dificultad que tienen los niños de entender los fenómenos que se abordan en las clases de ciencias naturales.

Para resarcir esta brecha del conocimiento, las universidades y centros de investigación se han involucrado y comprometido en actividades de divulgación de las ciencias, lo que permite acercar las ciencias y el conocimiento científico al público en general.

De acuerdo con Tagüeña *et al.* (2006), la divulgación es recrear el conocimiento científico por algún medio de difusión. Dicha difusión se debe realizar con un lenguaje claro y sencillo, de tal manera que todo público sea capaz de entenderlo (Suárez-Rodríguez *et al.*, 2016). La divulgación de la ciencia puede utilizar medios masivos, como la televisión, el radio, la prensa y las redes sociales, o puede llevarse a cabo por medio de conferencias, seminarios o talleres presenciales (Suárez-Rodríguez *et al.*, 2016), estos últimos son un excelente medio para llevar la ciencia directamente a los salones de clase.

Como parte de la práctica de campo final de la clase de Geología de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Querétaro, los alumnos realizaron varias actividades de divulgación de la ciencia en la comunidad de Camargo en Peñamiller, Querétaro. La práctica de campo tuvo como objetivo conocer la litología y la deformación presentes en la Sierra Gorda de Querétaro e inició justo en el poblado de Camargo. Este poblado se localiza

aproximadamente a 100 km al NE de la ciudad de Querétaro y allí se encuentra la escuela primaria "Ignacio Zaragoza", que atiende a cerca de 140 niños, quienes participaron en diferentes dinámicas y juegos de divulgación de las Ciencias de la Tierra.

## METODOLOGÍA

La clase de Geología es impartida a los alumnos de cuarto semestre de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Querétaro. Durante el semestre 2023-1, en el cual se realizó esta actividad de divulgación, el curso contaba con 40 alumnos inscritos. Los talleres de divulgación se enfocaron en tres tópicos principales: Ciencias de Tierra, "Experimentos simples para entender una Tierra complicada" e ingeniería civil. El primer tópico, Ciencias de la Tierra, se dividió a su vez en paleontología, vulcanología y sismología, ya que estos temas despiertan el interés de los niños.

El segundo tópico, "Experimentos simples para entender una Tierra complicada", es una serie de libros dirigidos a niños que explican fenómenos físicos: la presión atmosférica y la gravedad (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2012), la luz y los colores (Barrientos-García, 2007), la flotabilidad y densidad (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2008a), el clima (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2008b), la propagación de las ondas (Gómez-González y Alaniz-Álvarez, 2008), el tamaño de la tierra (Cerca-Martínez y Carreón-Freyre, 2009), la edad de la Tierra (Nieto-Samaniego y Alaniz-Álvarez, 2013) y electricidad y magnetismo (Fernández-Escobar y Alaniz-Álvarez, 2015). En estos libros, los autores buscan explicar estos fenómenos mediante experimentos sencillos, claros y precisos para que los niños puedan replicarlos.

En el tercer tópico, ingeniería civil, los alumnos mostraron a los niños algunas de las actividades que hacen los ingenieros civiles. Todos los equipos tuvieron libertad para crear su taller, salvo en el tópico de Experimentos simples para entender una tierra complicada donde los experimentos ya estaban elaborados y solo tenían que recrearlos y explicarlos.

La actividad de divulgación se realizó en el patio de la escuela en donde se colocaron un total de ocho estands en los cuales los niños podían seguir el desarrollo de los experimentos, escuchar las explicaciones y hacer preguntas. En esta actividad participaron todos los niños de la escuela, que fueron divididos en dos grandes bloques, pasando en primer lugar los niños de primero a tercer grado y posteriormente los niños de cuarto a sexto grado. La escuela contaba con aproximadamente 140 alumnos, por lo que cada stand recibía grupos de un máximo de 10 niños que pudieron ser atendidos adecuadamente por los expositores. El tiempo de exposición en cada stand era de 15 minutos y al concluir cada grupo iba pasando al siguiente stand. De los ocho estands colocados, tres fueron para el tópico Ciencias de la Tierra (paleontología, sismología, vulcanología), tres para el tópico Experimentos Simples para entender una Tierra complicada (densidad, electricidad y magnetismo, fluidos no newtonianos y óptica) y dos para el tópico de Ingeniería Civil (puntos cardinales, fuerzas de compresión y extensión en puentes).

La actividad duró en total cuatro horas. Varios ejemplares de "Experimentos simples para entender una Tierra complicada" se otorgaron como premios para los niños que participaron en las dinámicas de los estands; asimismo, otros ejemplares se donaron a la biblioteca de la escuela para futuras consultas.

## RESULTADOS

En el taller de paleontología, los expositores escribieron y leyeron un cuento sobre dinosaurios llamado "Mateo el paleontólogo" y crearon un juego que consistía en buscar fósiles en una caja de arena. El cuento fue la actividad inicial que se realizó de manera general ante cada uno de los dos bloques (Figura 1a). En el stand de sismología, los expositores crearon diferentes modelos que explicaban cómo se propagan las ondas sísmicas a través del subsuelo (Figura 1b). Para ello se apoyaron del libro no. 5 de la serie "Experimentos simples para entender una Tierra complicada" que trata de las ondas sísmicas. También se realizaron maquetas sobre construcciones antisísmicas y explicaron cómo actuar ante un sismo.

Por su parte en el stand de vulcanología, los expositores crearon una maqueta de un volcán y, mediante una reacción de vinagre y bicarbonato de sodio, simulaban una erupción volcánica explosiva (Figura 1c). De igual forma, les mostraron un video sobre las erupciones volcánicas y les regalaron un pequeño volcán a los niños más participativos.

Con respecto al segundo tópico, "Experimentos simples para entender una Tierra complicada", los expositores escogieron diferentes experimentos y se centraron en los temas sobre: densidad, electricidad/magnetismo y fluidos no newtonianos/óptica. En el stand de densidad los expositores construyeron balanzas con ganchos de ropa, colgaban diversos objetos para comparar su peso fuera y dentro del agua y les preguntaban a los niños: qué objeto pesaba más (Figura 1d).

Para el taller de electricidad y magnetismo, los expositores enseñaron a los niños cómo cargar globos con electricidad estática al frotar los globos contra la ropa o el cabello (Figura 1e). De igual forma les mostraron cómo la reacción química del ácido fosfórico de una papa puede encender una luz LED.

De forma paralela, en el stand de fluidos no newtonianos los expositores prepararon una mezcla de fécula de maíz con agua e hicieron que los niños metieran la mano a esta mezcla de maneras rápida y lenta (Figura 1f). En este mismo stand los expositores también explicaron conceptos de óptica, con hojas de colores les mostraron la capacidad de reflejar o absorber la luz en las hojas mediante el uso de una lupa (Figura 1g).

En el tercer tópico, ingeniería civil, los expositores explicaron el trabajo topográfico previo que se tiene que hacer en una obra civil y les enseñaron también como usar la brújula para identificar los puntos cardinales (Figura 1h). Mediante el uso de mangueras con agua, les enseñaron a identificar la ubicación del nivel hidrostático. En otro stand con apoyo de modelos a escala, los expositores explicaron el uso de fuerzas de compresión y tensión en el diseño y construcción de puentes (Figura 1i).

En algunos de los talleres, para incentivar la participación, los expositores regalaban dulces a aquellos niños que más preguntaban o respondían las preguntas que se hacían al finalizar cada taller. La Tabla 1 muestra de manera breve la organización de la actividad de divulgación.

Tabla 1. Estandos colocados en la actividad de divulgación en la primaria "Ignacio Zaragoza, Camargo, Qro."

Tópico	Nombre del estand	Concepto que se explica	Descripción
Ciencias de la Tierra	Mateo el paleontólogo	Paleontología	Mediante la narración de un cuento, los expositores les hablaban a los niños quiénes eran los dinosaurios y donde vivían. Al final los niños buscaban a los personajes dentro de una caja de arena, simulando que buscaban fósiles.
	¡Qué onda!	Sismología	Con el uso de diversos modelos, los expositores explicaban qué son los sismos, las ondas sísmicas y cómo se propagan estas ondas. De igual forma, explicaron cómo actuar ante un sismo.
	¡Volcanes!	Vulcanología	Mediante una maqueta, los expositores explicaban qué es un volcán mientras la reacción de bicarbonato y vinagre simulaba una erupción volcánica.
Experimentos simples para entender una Tierra complicada	¿Qué pesa más?	Densidad	Con el uso de ganchos de ropa e hilos, los expositores construyeron balanzas con las que comparaban el peso de diversos objetos fuera y dentro del agua, explicando con esto el concepto de la densidad.
	La magia de la electricidad	Electricidad y Magnetismo	Mediante el uso de globos frotados en la ropa o el cabello, los expositores mostraron la estática a los niños. Asimismo, mostraron que el ácido fosfórico de una papa puede encender una luz LED.
	Maizena y colores	Fluidos no newtonianos y óptica	Con ayuda de una mezcla de fécula de maíz y agua, los expositores demostraron cómo en los fluidos no newtonianos la viscosidad varía dependiendo de la presión que se le aplica. De igual manera, se mostró cómo las hojas de color negro son más susceptibles a quemarse con una lupa que las hojas blancas (tienen mejor absorción del calor).
Ingeniería Civil	¿Cómo nos orientamos?	Puntos cardinales	Mediante el uso de la brújula, los expositores marcaron en el piso una rosa de los vientos y enseñaron a los niños los puntos cardinales.
	Palitos y puentes	Fuerzas de compresión y extensión en puentes	Con ayuda de modelos de puentes hechos con palos de madera, los expositores mostraron cómo en Ingeniería Civil aprovechan las fuerzas compresivas y extensivas en la construcción de puentes.

De acuerdo con los comentarios de la directora de la escuela, Maestra Andrea Aria Sánchez, es muy complicado que este tipo de actividades de divulgación se lleven a cabo en su plantel. Si bien, por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro se realizan campañas de divulgación científica en varias escuelas urbanas y rurales de todo el Estado, son pocas las escuelas seleccionadas para estos eventos. Todo el personal docente, así como los niños se encontraban muy contentos por participar este tipo de actividades que los saca de la rutina dentro de sus aulas. Incluso algunos padres de familia que habían llegado a dejar el almuerzo a sus hijos se quedaron a ver los talleres, al finalizar expresaron su agradecimiento por realizar esta actividad.

El lunes posterior a la actividad de divulgación se les pidió a los maestros de la primaria que preguntaran a los niños cual de los talleres fue el que más les agradó. Siendo el taller de volcanes (35 %) el que más votos recibió, seguido de los experimentos en la maizena y las hojas de colores (29 %) y los puentes (14 %) en tercer lugar.

Es importante mencionar que los alumnos de la clase de Geología jamás habían realizado una actividad de este tipo, por lo que muchos de ellos no tienen la habilidad de expresarse adecuadamente ante un público, ni tampoco cuentan con cursos pedagógicos que les brinden herramientas para poder transmitir el conocimiento de manera sencilla y clara hacia los niños.

No obstante, hicieron su mayor esfuerzo y utilizaron los medios que tuvieron a la mano para desarrollar la actividad de divulgación. Las herramientas que los expositores utilizaron fueron carteles llamativos, videos, premios o ponerlos a jugar. Los talleres que tuvieron la mayor votación aplicaron más efectivamente todas estas herramientas.

Al preguntar a los alumnos de la clase de Geología sobre su experiencia de ser expositores, muchos admitieron estar muy nerviosos o su miedo al hablar ante el público, pero poco a poco fueron perdiendo el miedo y se sintieron muy contentos con el resultado final. De igual forma expresaron sorpresa sobre la inteligencia de algunos niños que conocían el resultado de los experimentos, ya sea por su conocimiento empírico o porque ellos mismos habían encontrado información sobre el fenómeno explicado mediante redes sociales (aquellos que podían tener acceso a ellas). Ejemplo de que la divulgación de la ciencia de manera masiva está obteniendo resultados.



Figura 1. Divulgación de la ciencia en la escuela primaria "Ignacio Zaragoza". a) Lectura del cuento "Mateo el Paleontólogo". b) Modelo que explica la propagación de las ondas sísmicas. c) Explicación de las erupciones volcánicas mediante una maqueta de volcán. d) Explicación del concepto de densidad mediante la comparación de diferentes masas en una balanza. e) Demostración de la electricidad estática: ¿cómo mover pequeños objetos sin tocarlos? f) Explicación de fluidos no newtonianos mediante fécula de maíz. g) Explicación: cómo el color de los objetos permite absorber o reflejar la luz usando hojas de colores. h) Identificación de los diferentes puntos cardinales con el uso de la rosa de los vientos. i) Modelos de puentes que usan fuerzas de compresión y extensión para sostenerse.

## CONCLUSIONES

La divulgación de la ciencia en un excelente medio para acercar los descubrimientos científicos al público en general, buscando diseminar el conocimiento de una manera clara y usando un lenguaje coloquial. En este caso, la actividad de divulgación se llevó a cabo en la escuela primaria rural "Ignacio Zaragoza" en Camargo, Querétaro, lo que permitió llevar el conocimiento de las ciencias de la Tierra hasta las aulas de los niños de una comunidad de la Sierra Madre Oriental en el estado de Querétaro.

La divulgación de las ciencias permite a los niños tener una noción sobre diferentes fenómenos físicos. Mediante esta actividad de divulgación los niños entendieron por qué tiembla, cómo se propagan las ondas sísmicas y como actuar ante un sismo, así como qué son los volcanes y su formación, los dinosaurios; conceptos físicos como la densidad, electricidad/magnetismo, óptica; así como las actividades que realizan los ingenieros civiles y la construcción de puentes. Por otro lado, los alumnos de la clase de Geología pudieron experimentar ser expositores, estar del otro lado, y ahora ser ellos quienes debían transmitir el conocimiento de manera clara. Esta actividad les permitió buscar y aplicar herramientas que le facilitó transmitir el conocimiento que han adquirido en la clase de Geología y a lo largo de la carrera de Ingeniería Civil.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por brindar el vehículo; al M. en C. Gerardo Medellín Aguilar coordinador de la carrera, quien gestionó el espacio para acampar de los alumnos de Ingeniería Civil. Se agradece al Lic. J Guadalupe Cruz Pacheco quien apoyó en la logística de encontrar la escuela para hacer la actividad de divulgación, así como conseguir el contacto con la dirección de la escuela. Se agradece a la Maestra Andrea Aria Sáchez directora de la escuela "Ignacio Zaragoza" por todas las facilidades otorgadas durante la actividad de divulgación. De igual manera se le agradece a los revisores de este artículo, Marcelo Darío Bazan y a un revisor anónimo por las valiosas aportaciones que mejoraron en gran medida este artículo. Por último, se agradece al grupo de alumnos de la clase de Geología, por su esfuerzo, ánimo y creatividad durante la actividad de Divulgación de la Ciencias.

## REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S.A. y Nieto-Samaniego, A.F. (2008a). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 3 ¡Eureka! Los continentes y los océanos flotan (1da ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alaniz-Álvarez, S.A. y Nieto-Samaniego, A.F. (2008b). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 4 El Clima pendiente de un hilo (1da ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alaniz-Álvarez, S.A. y Nieto-Samaniego, A.F. (2012). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 1 La presión atmosférica y la caída de los cuerpos (2da ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barrientos-García B. (2007). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 2 La luz y los colores (1er ed.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cerca-Martínez, L.M. y Carreón-Freyre, D.C. (2009). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 6 La medición de la tierra (1er ed.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cuevas, A., Hernández, R., Leal, B. E. y Mendoza, C. P. (2016). Enseñanza-aprendizaje de ciencia e investigación en educación básica en México. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 18(3), 187-200.
- Fernández-Escobar, F.F. y Alaniz-Álvarez, S.A. (2015). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 8 ¡A la carga! Experimentos sobre electricidad y magnetismo (1er ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flamand, L., Arriaga, R. y Santiago, C. (2020). Reforma Educativa y políticas de evaluación en México, ¿Instrumento para abatir el rezago escolar y promover la igualdad de oportunidades? *Foro Internacional*, 2 (240), 717-753. DOI: 10.24201/fi.v60i2.2737
- Flores Camacho, F. (Coord.) (2012). La enseñanza de la ciencia en la educación básica en México. INEE.
- Gómez-González, J.M., Alaniz-Álvarez S.A. (2008). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 5 La tierra y sus ondas (1er ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nieto-Samaniego, A.F. y Alaniz-Álvarez, S.A. (2013). Experimentos simples para entender una tierra complicada Vol. 7 La edad de la tierra (1er ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2023), PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education, PISA, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/53f23881-en>.
- Tagüeña, J., Rojas, C. y Reynoso, E. (2006). La divulgación de la ciencia en México en el contexto de la América Latina en 1er Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación CTS+1. Dirección General de Divulgación de la Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México.

Manuscrito recibido: 2 de abril de 2024

Manuscrito corregido recibido: 22 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 28 de mayo de 2024



# ¿EL AGUA DE LLUVIA SIN TRATAR ES APTA PARA SU CONSUMO?

Rocío García-Martínez<sup>1\*</sup>, Daniela K. Calvo-Ramos<sup>2</sup>, Carolina Muñoz-Torres<sup>2</sup>,  
Alejandro Carrillo-Chávez<sup>2</sup>, José M. Hernández-Solís<sup>1</sup> y Moisés López-Carrasco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

\*gmrocio@atmosfera.unam.mx

## RESUMEN

La escasez de agua amenaza el desarrollo la calidad de vida y la salud de los habitantes del mundo. El fenómeno de cambio climático ha acelerado exponencialmente el problema de sequías prolongadas, periodos de lluvia más cortos o lluvias intensas. La necesidad de captar la lluvia y utilizarla para su consumo, aumenta la presión sobre los países para que implementen prácticas más sostenibles e innovadoras. El objetivo general de este trabajo consistió en estudiar la composición química de agua de lluvia colectada durante el periodo 2015-2019 en el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria UNAM, Ciudad de México) y en el Observatorio Atmosférico Alzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), pertenecientes a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Se obtuvo el factor de enriquecimiento (FE) utilizando, como valor de referencia análisis químicos de relación metal/Al y ión/Ca, obtenidos a partir de la concentración promedio ponderada de los metales analizados. Los FE altos sugirieron que, en general, los metales tienen un origen antropogénico ligado al cambio de uso de suelo y a la deforestación indiscriminada de sitios boscosos adyacentes a los sitios de estudio. Las concentraciones de Al, Cd, Fe, Pb y V fueron consistentes con una contribución antropogénica importante, debido probablemente al transporte desde diferentes ciudades del país, y a la contribución intrínseca de cada sitio de muestreo. El estudio de la persistencia, la presencia y la permanencia de metales pesados en agua de lluvia es necesario para promover proyectos actuales y futuros sobre su tratamiento y uso.

**Palabras clave:** Cambio climático, sequía, agua de lluvia, nubes, metales pesados.

## ABSTRACT

*Water scarcity threatens the development, quality of life, and health of the inhabitants of this world. The phenomenon of climate change has exponentially accelerated the problem of prolonged droughts, shorter periods of rain, or intense rains. The need to capture rain and use it for consumption increases pressure on countries to implement more sustainable and innovative practices. The general objective of this work was to characterize the chemical composition of rainwater collected in the period 2015- 2019 at the UNAM Atmospheric Observatory (Ciudad Universitaria UNAM, Mexico City) and Alzomoni Atmospheric Observatory (Izta-Popo National Park, State of Mexico), belonging to the University Network of Atmospheric Observatories (RUOA) of the Institute of Atmospheric Sciences and Climate Change. The concentration of heavy metals (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, and V) was determined. The enrichment factor (EF) was calculated using chemical analysis of the metal/Al and ion/Ca ratio as a reference value, obtained from the weighted average concentration. The high EF suggested that in general, metals have an anthropogenic origin linked to land use change and indiscriminate deforestation of forested sites adjacent to the study sites. The Al, Cd, Fe, Pb, and V concentrations were consistent with an important anthropogenic contribution, due to possible transport from Mexico City and the intrinsic contribution of each sampling site. To the above, it must be added that, in mountainous regions, there are considerable variations in the direction of the winds over relatively small distances. The study of the persistence, presence and permanence of heavy metals in the study of rainwater is necessary to promote current and future projects in the treatment and use of rainwater.*

**Keywords:** Climate change, drought, rainwater, clouds, heavy metals.

## INTRODUCCIÓN

La sequía y la escasez de agua son dos de los problemas más alarmantes de nuestro siglo, las necesidades de agua son crecientes y resulta un recurso cada vez más escaso, como un fenómeno del cambio climático se están presentando con mayor frecuencia intensos eventos de lluvia y sequías prolongadas (Velasco *et al.*, 2005). Se conoce que la lluvia es un fenómeno atmosférico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes, derivado de los cambios de presión y temperatura en la atmósfera. Para que se produzca la condensación del vapor de agua, el aire debe estar saturado de humedad; este fenómeno se presenta por dos causas diferentes: a) cuando el aire se enfría hasta alcanzar la temperatura del punto de rocío, o b) cuando el aire tiene suficiente vapor de agua. Para que la condensación se produzca en el aire, debe haber partículas microscópicas conocidas como núcleos de condensación (Figura 1).

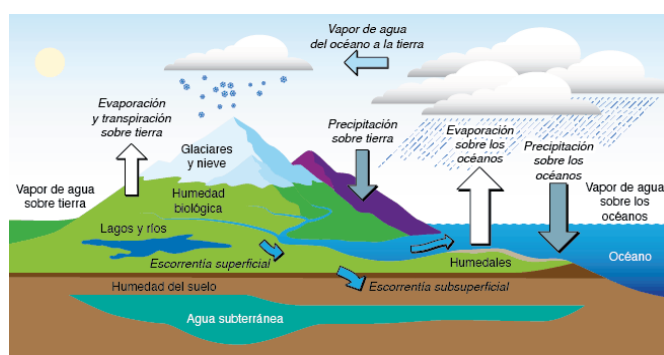


Figura 1. La lluvia es el resultado de la condensación del vapor de agua en la atmósfera que se forma tras la evaporación del agua en la superficie terrestre por la condensación de las gotas, Instituto del agua (Tomada del sitio web del Instituto del Agua)

### Núcleos de condensación

Una gota de nube generalmente tiene un diámetro de entre 5  $\mu\text{m}$  y 30  $\mu\text{m}$ , y una gota de lluvia alrededor de 2000  $\mu\text{m}$  (Beard, 1976; Horn *et al.*, 1988). El crecimiento de las pequeñas gotas de nube puede ser por colisión directa entre las gotas o por coalescencia. El agua de la lluvia, desde su formación en las nubes hasta que cae en el suelo, limpia la atmósfera barriendo una gran cantidad de elementos, desde aquellos que podemos ver a simple vista como tierra, partes de plantas o animales, hasta cosas que son invisibles para nuestros ojos como gérmenes, hongos, bacterias, virus. ¿Pero de dónde provienen toda esta tierra y microorganismos que se encuentran en el aire de la atmósfera? De hecho, en la atmósfera no existen microorganismos propios; la tierra y los microorganismos que se encuentran en la atmósfera provienen del suelo o del agua y son transportados por los vientos a grandes distancias.

Todos estos elementos no son perjudiciales para las plantas, pero sí pueden serlo para los seres humanos o para los animales que lleguen a beberla de manera cotidiana. Es por ello que el agua de lluvia se tiene que potabilizar, es decir purificar, para el consumo humano. Las gotas de lluvia también absorben gases, como el dióxido de carbono o el ácido sulfúrico, y le confieren un carácter ácido al agua de lluvia, lo cual se conoce como lluvia ácida. La lluvia ácida no tiene efectos directos sobre las personas, pero sí en los ecosistemas: los bosques del mundo están muriendo y los cuerpos de agua no

pueden sostener a poblaciones normales de peces, y en los océanos afecta a las poblaciones de los arrecifes coralinos, así como, a una gran diversidad de especies acuáticas.

Es importante recordar que las primeras lluvias ensucian notablemente las ventanas de los vehículos y en las calles se puede llegar a formar una desagradable espuma blanca. Las heces de los perros son un problema de salud, aunque no haya contacto directo con ellas. ¿Cómo es posible? Los huevos de los parásitos en las heces pueden flotar en el ambiente debido al viento y ser absorbidos por una persona al respirar. El viento es entonces el principal vehículo y diseminador de infinidad de microorganismos presentes en el suelo, en el agua o en el aire mismo. Si bien hay que apostar por la diversidad de nuevas alternativas para la colecta y uso de agua de lluvia, debemos partir de varios pasos: la recolección, la decantación, la filtración, la purificación y el almacenamiento. En la recolección, el agua de lluvia se almacena en grandes cantidades en contenedores mediante formas de escurrimiento que no permitan una gran contaminación; en la decantación se permite que se asienten en el fondo de los contenedores la tierra y todo aquello que sea más pesado que el agua.

En la filtración se eliminan partículas, partes de animales y plantas mediante sistemas de colado que se venden para ello, o bien de manera doméstica usando arena, carbón y arcillas. En la purificación, la parte más importante de la potabilización del agua de lluvia, se eliminan los microorganismos mediante procedimientos de limpieza del agua como la ebullición, la exposición a la luz ultravioleta, la ozonificación o la ósmosis inversa, entre otros. En el almacenamiento, el agua de lluvia se guarda a la sombra en contenedores limpios y libres de todo mecanismo de contaminación probable. Las características fisicoquímicas del agua de lluvia son importantes para entender la función del transporte de los componentes solubles de la atmósfera, comprender su contribución a las diferentes fuentes de contaminación atmosférica y conocer el grado de deterioro ambiental de una región (García *et al.*, 2006; García *et al.*, 2018; García-Martínez *et al.*, 2020). Por consiguiente, la química de los depósitos húmedos puede proporcionar ideas sobre el desarrollo temporal de la atmósfera y el grado de contaminación de la misma. De igual modo, puede emplearse como indicador en la evaluación de los procesos naturales contra los influjos antropogénicos (Wetangula y Wamalwa, 2015).

Los componentes disueltos en el agua de lluvia se dividen generalmente en tres grupos: aerosoles de sal marina, aerosoles terrestres (suelo, polvo y emisiones biológicas) y aerosoles antropogénicos. Este último grupo está estrechamente relacionado con procesos industriales, quema de combustibles fósiles, incineración de residuos, agricultura, fertilizantes, emisiones vehiculares, actividades mineras y otras prácticas humanas (Salvador, 2005). El agua de lluvia funciona como un importante sumidero para la materia en forma de gases y partículas, las cuales incluyen metales y metaloides en la atmósfera. (Samara *et al.*, 1992). El depósito húmedo es el sumidero dominante de partículas de modo de nucleación Aitken y de acumulación. Se divide en remoción por nucleación (*in-cloud scavenging*), que sólo tiene lugar en la nube, y en remoción por impacto, que tiene lugar dentro y debajo de la nube (*below-cloud scavenging*, Lohmann *et al.*, 2016).

Ambos procesos son descritos a continuación: ***In-cloud scavenging***: proceso de incorporación y remoción de partículas como núcleos de condensación durante la formación de nubes

(Lohmann *et al.*, 2016). Este mecanismo es responsable de eliminar entre el 75 % y el 90 % de la masa total de los aerosoles (Flossmann y Pruppacher, 1988).

**Below-cloud scavenging:** mecanismo de difusión y gravedad mediante el cual el material atmosférico se incorpora por absorción por debajo de la nube a medida que la precipitación cae a través de ella (Lohmann *et al.*, 2016), determinando la concentración química del agua de lluvia (Hutchinson y Havas, 1978).

A la fecha, se tiene ya una base de datos del 2015 al 2023 sobre la composición química del agua de lluvia colectada en el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México), en el Observatorio Atmosférico de Juriquilla (Campus Juriquilla de la UNAM, Querétaro) y en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), pertenecientes a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. La RUOA (García-Moctezuma, pág. 28, 2022) ha logrado obtener resultados óptimos de acuerdo a los estándares de investigación internacional del Programa Nacional de Deposición Atmosférica (por sus siglas en inglés, NADP). En este artículo nos enfocaremos en los resultados de metales pesados obtenidos en dos sitios: el Observatorio Atmosférico de la UNAM (Ciudad Universitaria, UNAM) y el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México).

La contaminación de la atmósfera por metales será determinada por la diferencia entre los presentes en la naturaleza y los que se eliminan a través de los procesos de remoción atmosférica, que incluyen la disolución, la deposición, la precipitación y la erosión de los suelos (Figuras 2A y 2B).



Figura 2. A) Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México). B) Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México).

La colecta de muestras de lluvia se realizó bajo un método de acumulación por evento y, en casos aislados, por *bulk precipitation*. El análisis químico de metales en las muestras de lluvia se realizó de acuerdo con el método EPA 6010C, 2007 empleando un Espectrofotómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Thermo Fisher Scientific, modelo iCAP 7000, que puede detectar fracciones de partes de metales en solución por millón (ppm). El análisis se realizó en el laboratorio de Geoquímica de Aguas, perteneciente al Centro de Geociencias de la UNAM, ahora Instituto de Geociencias, campus Juriquilla, Querétaro.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Investigaciones realizadas sobre los mecanismos que controlan la deposición de metales pesados en ecosistemas acuáticos y terrestres, toman en cuenta la especiación, biodisponibilidad, reactividad, sedimentación y movilidad de los metales por acción del viento, lo que permite realizar estimaciones del impacto ambiental (APHA, 2005; Basta y Chaney, 2005). La deposición de metales pesados debida al agua de lluvia representa la parte sustancial y el componente principal de la deposición húmeda (Kitagishi y Yamame, 1981). Se llevaron a cabo los cálculos necesarios de deposición húmeda, a partir de la concentración promedio ponderada total (CPP-T) de los metales determinados en la precipitación pluvial. Para calcularla se multiplicó la CPP de cada uno de los metales, por la cantidad total de lluvia en un intervalo de tiempo, se consideró como precipitación pluvial total al periodo de lluvia de 2015 al 2019 que va de mediados de mayo a finales de octubre, para cinco años de muestreo.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los valores de deposición para cada metal analizado de los dos sitios de muestreo.

**Tabla 1.** Deposición de metales pesados en  $\text{mg m}^{-2} \text{ periodo}^{-1}$  colectados en el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM) en el periodo 2015-2019.

Metal	*CPP-T	$\text{mg m}^{-2} \text{ periodo}^{-1}$
	**ppm	1537.86***
Al	0.083	157.84
Cd	$8.8 \times 10^{-4}$	2.35
Cr	$1.2 \times 10^{-3}$	2.54
Fe	0.077	138.00
Mn	0.014	51.53
Ni	$3.2 \times 10^{-3}$	3.73
Pb	$5.4 \times 10^{-3}$	10.30
V	$9.3 \times 10^{-3}$	21.67

\*CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. \*\*ppm: Partes por millón. \*\*\* Cantidad de lluvia total en milímetros (mm).

**Tabla 2.** Deposición de metales pesados en mg m<sup>-2</sup> periodo<sup>-1</sup> colectados en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), en el periodo 2015-2019.

Metal	*CPP-T **ppm	mg m <sup>-2</sup> periodo <sup>-1</sup> 405.1***
Al	0.107	203.34
Cd	1.4 x10 <sup>-3</sup>	3.66
Cr	1.5 x10 <sup>-3</sup>	2.65
Fe	0.086	104.83
Mn	7.6 x10 <sup>-3</sup>	83.18
Ni	3.0 x10 <sup>-3</sup>	1.21
Pb	2.4 x10 <sup>-3</sup>	90.97
V	6.5 x10 <sup>-3</sup>	72.63

\*CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. \*\*ppm: Partes por millón. \*\*\* Cantidad de lluvia total en milímetros (mm).

### Factores de enriquecimiento

El cálculo de los factores de enriquecimiento (FE) resulta útil para determinar el mayor o menor enriquecimiento de un elemento teniendo en cuenta las variaciones naturales en su abundancia debidas a la composición litológica. Este método es empleado en numerosos estudios para diversos elementos como medida de aporte antropogénico (Baize y Sterckeman, 2001). Los FE se obtienen normalizando las concentraciones de los metales en elemento conservativo (Schütz y Rahn, 1982); en este caso se utilizó el aluminio (Al) con un valor base promedio ponderado de 81 300 mg L<sup>-1</sup> para metales y Calcio (Ca<sup>2+</sup>) para iones, con un valor promedio ponderado de 36 300 mg L<sup>-1</sup> por ser trazadores litogénicos, lo cual nos permite determinar el enriquecimiento antropogénico de un sitio (Mason y Moore, 1982). A su vez, estos resultados dados por Mason y Moore (1982), se normalizan con la relación metal/Al e ión/Ca, obtenida a partir de la concentración promedio ponderada (mg L<sup>-1</sup> = ppm). Los FE calculados por Mason y Moore (1982) fueron determinados de acuerdo con la composición geoquímica de los suelos, considerando a las especies químicas en diferentes lugares del mundo. Al calcular el FE de un metal o de un ión se puede determinar si su concentración está enriquecida con respecto a la concentración natural. El FE se calcula con base en la concentración natural y la concentración local del metal o ión en el sitio de estudio; si se obtiene un valor >1, entonces se considera que la concentración natural está incrementada antropogénicamente (Mason y Moore, 1982).

Se calcularon los factores de enriquecimiento (FE<sub>C</sub>) aplicando la siguiente fórmula:

$$FE_C = ([C_X] / [C_{Al}])_{muestra} / ([C_X] / [C_{Al}])_{corteza}$$

Donde [C<sub>X</sub>]<sub>muestra</sub> es el contenido del elemento analizado en la fracción insoluble de la muestra, [C<sub>Al</sub>] es el contenido de aluminio (Al) en la muestra, [C<sub>X</sub>]<sub>corteza</sub> es la concentración promedio ponderada del elemento que se determinó en la muestra y [C<sub>Al</sub>]<sub>corteza</sub> es la concentración media del elemento de referencia, aluminio (Al), de la corteza (Mason y Moore, 1982). En la Tabla 3 se observan los resultados de los FE para ambos sitios de muestreo, en donde aparece la concentración promedio ponderada (CPP) y concentración promedio ponderada total (CPP-T).

**Tabla 3.** Factores de enriquecimientos calculados para el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria UNAM) y el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), en el periodo 2015-2019.

Elemento	Valor en CU	Altzomoni	CU	Altzomoni
	*CPP ***ppm	**CPP-T ***ppm	(FE) <sub>corteza del sitio</sub> ***ppm	
Cd	0.2	8.8 x10 <sup>-4</sup>	1.4 x10 <sup>-3</sup>	4,263.68
Cr	100	1.2 x10 <sup>-3</sup>	1.5 x10 <sup>-3</sup>	12.01
Fe	50,000	0.077	0.086	1.49
Mn	950	0.014	7.6 x10 <sup>-3</sup>	14.38
Ni	75	3.2 x10 <sup>-3</sup>	3.0 x10 <sup>-3</sup>	41.36
Pb	13	5.4 x10 <sup>-3</sup>	2.4 x10 <sup>-3</sup>	404.79
V	135	9.3 x10 <sup>-3</sup>	6.5 x10 <sup>-3</sup>	66.74
Na <sup>+</sup>	28,300	0.315	0.099	1.99
K <sup>+</sup>	25,900	0.094	0.257	0.64
Mg <sup>2+</sup>	20,900	0.040	0.074	0.34

\*CPP: Concentración Promedio Ponderada de corteza. \*\*CPP-T: Concentración Promedio Ponderada Total. \*\*\*ppm: Partes por millón.

### CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, tanto en el Observatorio Atmosférico (Ciudad Universitaria, UNAM), como en el Observatorio Atmosférico Altzomoni (Parque Nacional Izta-Popo, Estado de México), es evidente la importancia del proceso “*In-cloud scavenging*”, es decir que la mayoría de los vapores y gases presentes en la atmósfera exhiben una solubilidad finita en agua, la captura de un gas por una gota involucra varios procesos tanto físicos como químicos. Así que, la concentración de los diferentes gases en las gotas depende de su concentración en el aire y de la eficiencia con la cual son atrapados. Las concentraciones Al, Cd, Fe, Pb y V fueron consistentes con una contribución antropogénica importante, debido al posible transporte desde las ciudades de México y de la contribución intrínseca de cada sitio de muestreo. A lo anterior se debe añadir que, en regiones montañosas, existen variaciones considerables en la dirección de los vientos en distancias relativamente pequeñas.

La persistencia, la presencia y la permanencia de metales pesados en el estudio del agua de lluvia es necesario para promover proyectos actuales y futuros en su tratamiento y uso. Finalmente, debemos plantear las siguientes preguntas: ¿El agua de lluvia sin tratar es apta para su consumo? ¿En qué podría utilizarse? El agua de lluvia sin tratar sirve perfectamente para otras tareas como la agricultura, la limpieza del hogar, etc. Así que la próxima vez que llueva hay que recolectar la mayor cantidad posible y no solo emplearla para la limpieza de la casa o para regar el jardín, sino pensar en incorporar un sistema básico de captación: escurrimiento de azoteas (superficie) > colector > purificación > contenedor.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), al Ingeniero Manuel García, integrante del Área de Instrumentación Meteorológica y al M. en C. Enrique Azpra, integrante Grupo de Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos.

## REFERENCIAS

- American Public Health Association (APHA)-American Public Health Association. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater. Recuperado de <https://www.standardmethods.org>.
- Baize, D. y Sterckeman, T. (2001). Of the necessity of knowledge of the natural pedo- geochemical background content of soils by trace elements. *Science of the Total Environment*. 264, 127-139.
- Basta, N., Ryan, J., y Chaney, R. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of environmental quality*. 1(49-63), 34.
- Beard K. V. (1976). Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 851-864.
- Castañe P. M., Topalián M. L., Cordero R. y Salibián A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Rev. Toxicología*. 20, 13-18.
- EPA 6010C-2007, Método para el análisis de metales. Norma y/o método de referencia (Ba, Cd, Cr, Pb y Ag).
- García, R., Torres, M.C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., y Báez, A. (2006). Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of México, México. *Atmospheric Environment*, 40, 6088-6100.
- García, R., Pérez, R., Kotsarenko, A., Álvarez, H., Barrera, H., Carrillo-Chavez, A., Peralta, O., Campos, J., Torres, R., Hernández, G. (2018). Concentrations of Mercury and Other Inorganic Ions in Wet Precipitation Collected from a Mountain Mining Zone and an Urban Area in Central Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 101(2), 145-152.
- García-Martínez, R., Carrillo-Chávez, A., Torres-Jardón, R., Ramírez-Guzmán, A., Ramírez-Guzmán, A., López-Carrasco, M. (2020). Chemical composition of rainwater collected from 2006 to 2009 in Mexico City and at a rural site in Morelos State, south central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(1), 1-8.
- García-Moctezuma, F. (2022). Efemérides meteorológicas para entender la dinámica de la atmósfera. *Revista de Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*. 1(1), 27-31
- Horn H. G. H. Bonka, E. Gerhards, B. Hieronimus, M. Kalinowski, L. Kranz, and M. Maqua. (1988). Collection efficiency of aerosol particles by raindrops. *Journal of Aerosol Science*. 19(7), 855-858.
- Instituto del Agua, sitio web consultado el 29 de mayo de 2024: [https://institutodelagua.es/hidrologia/o-que-e-ciclo-hidrologico/hidrologia/#google\\_vignette](https://institutodelagua.es/hidrologia/o-que-e-ciclo-hidrologico/hidrologia/#google_vignette)
- Flossmann, A.L., y Pruppacher, H.R. (1988). A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part II: The uptake, redistribution, and deposition of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> particles by convective cloud using a two-dimensional cloud dynamical model. *Journal Atmospheric Science*, 45, 1857-1871.
- Hutchinson, T.C., y Havas, M. (1978). Effects of acid precipitation of terrestrial ecosystems. New York, Estados Unidos de América: Plenum Press.
- Kitagishi, K. Yamame, I. 1981. Heavy metal pollution in solis of Japan. *Tokio Japan Scient. Soc*. 32, 302-312.
- Lohmann, U., Lüönd, F., y Mahrt, F. (2016). An introduction to clouds: from the microscale to climate. Cambridge University Press.
- Mason, B. y Moore, C. B. (1982) Principles of Geochemistry. John Wiley and Sons.
- Salvador, P. (2005). Caracterización de la Contaminación Atmosférica producidas por Partículas en Suspensión en Madrid (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Madrid, España.
- Samara, C., Tsitouridou. R., y Balafoutis, C. (1992). Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 26(3), 359-367.
- Schütz, L. y Rahn, K. A. (1982). Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmospheric Environment* (1967), 16 (1), 171-176.
- Pain D. J. (1995). Lead in the environment en D. J. Hoffman, B. A. Rattner, G. A. Burton y J. Cairns (Eds.), *Handbook of ecotoxicology* (Section II, Chap. 16, pp. 356-391). Lewis Publishers USA.
- Perera, W. A. K. y Magana-Arachchi, D. N. (2022). Microbial Diversity in Rainwater with Correspondence to Particulate Matter and Environmental Factors. *Journal of Sustainability and Environmental Management*. 1(4), 410-418.
- Velasco, I., Ochoa, L., y Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71.
- Wetangula, G., y Wamalwa, H. (2015). Trace Elements in rainfall collected around Menengai area Kenya. *Proceedings World Geothermal Congress: Melbourne Australia*, 19-25.

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2024

Manuscrito corregido recibido: 14 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2024

# RECURSO DIDÁCTICO SOBRE QUÍMICA PREBIÓTICA: HERRAMIENTAS PRÁCTICAS PARA COMPRENDER EL ORIGEN DE LA VIDA

Ana Elisa Valderrama-Méndez<sup>1</sup>, Luan Xanath Castillo-Alcalá<sup>1</sup> y Saúl Alberto Villafañe-Barajas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, Investigación Científica S/N, C. U., Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior S/N, C. U., Coyoacán, Apartado Postal 70-543, C.P. 04510, Ciudad de México, México

\*saul.villafane@correo.nucleares.unam.mx

## RESUMEN

El origen de la vida sigue siendo un enigma a pesar de los grandes avances científicos en las últimas décadas en las áreas de investigación de química prebiótica, astrobiología, geología espacial, biología molecular, entre muchas otras. En este trabajo, se explora cómo la química prebiótica, a través del estudio de la interacción entre minerales y moléculas orgánicas, ofrece pistas sobre los procesos que podrían haber conducido al surgimiento de la vida. Se propone un recurso didáctico que aborda los pasos interconectados que precedieron al surgimiento de las primeras formas de vida, desde la síntesis hasta la adquisición de propiedades emergentes en polímeros orgánicos. Este material educativo busca facilitar la comprensión del origen de la vida a través de una presentación accesible y clara de conceptos complejos, fomentando el aprendizaje activo y la reflexión sobre los procesos fundamentales involucrados.

**Palabras clave:** Origen de la vida, química prebiótica, minerales, propuesta didáctica.

## ABSTRACT

*The origin of life remains a puzzle despite the great scientific advances of the last decades in the areas of prebiotic chemistry, astrobiology, space geology, molecular biology, among many others. This paper explores how prebiotic chemistry, through the study of interaction between minerals and organic molecules, offers clues about the processes that could have led to the emergence of life. A didactic resource is proposed that addresses the interconnected steps that preceded the appearance of the first life forms, from synthesis to the acquisition of emergent properties in organic polymers. This didactic material aims to facilitate the understanding of the origin of life through an accessible and clear presentation of complex concepts, encouraging active learning and reflection on the fundamental processes involved.*

**Keywords:** Origin of life, prebiotic chemistry, minerals, teaching proposal.

## INTRODUCCIÓN

A pesar de los continuos descubrimientos sobre los sistemas planetarios extrasolares, la increíble adaptación de organismos a diversos ambientes, o la gran versatilidad de funciones de los polímeros de ácidos nucleicos, hasta el día de hoy no sabemos cómo se originó la vida. A pesar de que innumerables formas de vida han evolucionado a lo largo de miles de millones de años en el planeta Tierra, todavía hay grandes huecos sobre cómo y en qué momento se formaron y desarrollaron las primeras entidades vivas. Sin embargo, actualmente existe una línea de evidencias experimentales que sugiere que la complejidad química, que precede al origen de la vida y que fue producto de la interacción continua entre minerales y moléculas orgánicas, conllevó una serie de pasos interconectados. En este trabajo se desarrolló una propuesta de recurso didáctico para público de nivel medio superior con el objetivo de explicar los procesos que pudieron estar involucrados en la formación de estructuras químicas complejas y el origen de la vida.

### ¿Cómo se estudia el origen de la vida?

El origen de la vida es un área de investigación multidisciplinaria enfocada en estudiar y entender los procesos y condiciones que pudieron llevar al origen y desarrollo de la complejidad molecular (macromoléculas con estructura y funciones específicas) y posteriormente a las primeras formas de vida. Actualmente, hay dos enfoques a partir de los cuales se puede estudiar este tema: “de arriba abajo” (*top-down*) o analítico, y “de abajo arriba” (*bottom-up*) o sintético (Preiner *et al.*, 2020). El enfoque analítico se basa en un análisis comparativo de las moléculas que almacenan y transmiten información (p. ej., ácidos nucleicos) presentes en los organismos actuales y estudia sus posibles características genotípicas (conjunto de genes) y fenotípicas (conjunto de características observables) y sus caminos evolutivos (Preiner *et al.*, 2020). Por otro lado, el enfoque sintético simula experimental y teóricamente las interacciones entre moléculas orgánicas bajo diversas condiciones ambientales que pudieron estar presentes en la Tierra primitiva (Krishnamurthy, 2018). De manera general, este último enfoque utiliza las herramientas y conocimientos de diversas ciencias para englobarlas en un campo de estudio llamado «química prebiótica».

## Química prebiótica

La química prebiótica surgió en los años 50 cuando Stanley L. Miller, inspirado por las ideas de Harold Urey, diseñó un experimento utilizando tres elementos básicos: una fuente de energía (p. ej., descargas eléctricas), un medio de reacción (p. ej., agua), y precursores de moléculas orgánicas (p. ej.,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , y  $\text{H}_2$ ). Con este experimento, S. Miller buscaba simular las interacciones océano-atmósfera en la Tierra primitiva y comprobar si era posible sintetizar moléculas más complejas (Miller, 1953; Fry, 2006). Este experimento demostró que era relativamente sencillo sintetizar algunas moléculas orgánicas complejas (p. ej., aminoácidos, ácidos carboxílicos) que están presentes en los seres vivos y sentó las bases experimentales para desarrollar modelos de posibles ambientes primitivos. Hoy en día, la química prebiótica está muy lejos de sintetizar “vida” en el laboratorio, y más bien se enfoca en estudiar la síntesis, estabilidad, reactividad y polimerización de diversas moléculas, así como el desarrollo de la complejidad química en condiciones que pudieron haber existido en la Tierra primitiva o en otros cuerpos celestes (Bruylants et al., 2011; Cleaves, 2012).

### Minerales: una pieza fundamental

Dentro de los experimentos de química prebiótica, los minerales son un componente que se utiliza frecuentemente por varias razones. Por un lado, es ampliamente aceptado que había una gran cantidad de depósitos minerales en diversos ambientes primitivos (p. ej., silicatos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas) (Hazen et al., 2008). Por otro lado, múltiples experimentos han evidenciado la versatilidad de los minerales respecto a su capacidad para interactuar con moléculas orgánicas: por ejemplo, brindan un medio protector y facilitan el anclaje y concentración de moléculas orgánicas, orientan las reacciones químicas hacia mecanismos de descomposición preferente, pueden interactuar selectivamente con biomoléculas con una estructura química específica, y desempeñar un papel catalítico en reacciones químicas y optimizarlas (Baú et al., 2020; Colín-García et al., 2018; Hazen y Sverjensky, 2010; Lambert, 2008; Negron y Ramos, 2004; Zaia, 2012).

Actualmente existe una línea de evidencias experimentales que sugiere que la complejidad química que precedió al origen de la vida siguió una serie de pasos interconectados y fue producto de la interacción continua entre minerales y moléculas orgánicas. A continuación se presenta el material educativo diseñado para explorar y explicar el concepto de química prebiótica y su relevancia en el estudio del origen de la vida. Este recurso busca proporcionar herramientas accesibles y claras para ayudar a comprender cómo las interacciones entre minerales y moléculas orgánicas bajo condiciones prebióticas pudieron haber contribuido al surgimiento de las primeras formas de vida en la Tierra (Figuras 1 a la 5). Con este material se pretende facilitar la comprensión de un tema complejo a través del aprendizaje activo y la reflexión sobre los procesos fundamentales que dieron origen a la vida en nuestro planeta.

## PROPUESTA DE RECURSO DIDÁCTICO

La serie de pasos interconectados que precedió al surgimiento de las primeras formas de vida se puede explicar de la siguiente manera:

**Síntesis.** Los bloques de construcción de las células son las moléculas orgánicas (p. ej., aminoácidos, lípidos, bases nitrogenadas, ácidos carboxílicos). Por lo tanto, tuvieron que sintetizarse continuamente y en diversos ambientes para dar paso a otras moléculas más grandes y con mayor complejidad química. Las condiciones de síntesis son muy variables y pueden depender de diversos parámetros fisicoquímicos, como la acidez del medio, la temperatura, las fuentes de energía, el estado redox, la presión y la presencia de minerales. Cabe mencionar que la síntesis de moléculas generalmente no es espontánea y que muchas de ellas son inestables en entornos acuosos y tienden a romperse. En consecuencia, se están desarrollando continuamente nuevos experimentos para establecer rutas de reacción más consistentes con las condiciones primitivas, analizar el papel de otros precursores químicos y mejorar los rendimientos de la síntesis y la selectividad de los productos.

**Propuesta didáctica.** Las moléculas orgánicas se ejemplifican con tres figuras geométricas comunes de colores primarios, representado a los bloques de construcción de moléculas complejas. El garrafón de plástico simula el medio en el cual los componentes interactúan (p. ej. océano primitivo). La fuente de energía se puede mostrar usando un foco (Figura 1).

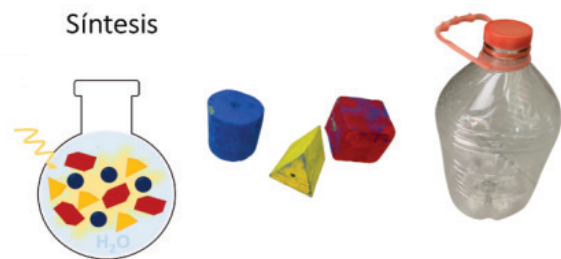


Figura 1. Síntesis: Las moléculas orgánicas se ejemplifican con 3 figuras geométricas comunes de colores primarios, representando a los bloques de construcción de moléculas complejas. El garrafón de plástico simula el medio en el cual los componentes interactúan (p. ej. océano primitivo).

**Concentración.** Gracias a diversas herramientas geoquímicas y geológicas, se ha propuesto que durante los primeros años de la formación del planeta Tierra existía una enorme variedad de minerales (p. ej., silicatos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas). La gran versatilidad de estructuras minerales y sus propiedades fisicoquímicas pudieron promover diversas interacciones con las moléculas disponibles en el ambiente. A este proceso se le conoce como *sorción*, y aunque depende de numerosas variables, tuvo que ser un fenómeno positivo y persistente que favoreció la formación de moléculas más complejas al reducir las energías de activación de enlaces, produciendo mayor concentración y estabilidad.

**Propuesta didáctica.** Los minerales se pueden fabricar usando esponjas de forma rectangular. En cada una de ellas, hay que hacer agujeros con la forma que corresponda a las figuras geométricas elaboradas en el primer paso. Esto ejemplificará que cada mineral tiene una estructura particular y la capacidad de sorber diferentes moléculas orgánicas. Por lo tanto, esta interacción puede favorecer el aumento de concentración de moléculas en la superficie mineral (Figura 2).

### Concentración

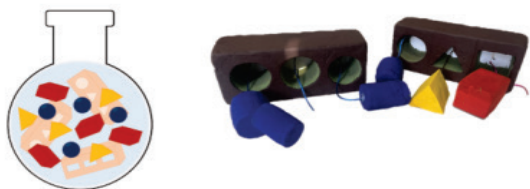


Figura 2. Concentración: Los minerales se pueden fabricar usando esponjas en forma rectangular. En cada una de ellas, es necesario diseñar agujeros con la forma que corresponda a las figuras geométricas elaboradas en el primer paso. Esto ejemplificará que cada mineral tiene una estructura particular y la capacidad de sorber diferentes moléculas orgánicas.

**Selección.** La selectividad mineral es la forma en que algunos minerales tienden a priorizar la sorción de moléculas específicas sobre otras. Diversos experimentos sugieren que la interacción entre superficies minerales y moléculas orgánicas pudo ser selectiva debido a ciertos factores como la afinidad química entre el mineral y la molécula orgánica, la concentración, los grupos funcionales de la molécula, la estructura mineral y la estabilidad de los enlaces.

**Propuesta didáctica.** El proceso de sorción selectivo se evidencia con el hecho de que una figura geométrica (molécula orgánica) encaja con el agujero que tiene su forma equivalente en la esponja (mineral). De esta manera se explica cómo algunos minerales tienen una configuración que favorece el anclaje de una molécula orgánica con una estructura específica (Figura 3).

### Selección



Figura 3. Selección: El proceso de sorción selectivo se evidencia con el hecho de que una figura geométrica (molécula orgánica) encaja con el agujero que tiene su forma equivalente en las esponja (mineral). De esta manera, se explica cómo algunos minerales tienen una configuración que favorece el anclaje de una molécula orgánica con una estructura específica.

**Polimerización.** Concentrar y seleccionar los minerales fue crucial para definir el siguiente paso en el desarrollo de la complejidad molecular: la polimerización, que es la formación de extensas cadenas de moléculas orgánicas por medio del continuo ensamblaje de sus estructuras básicas (p. ej., protoácidos nucleicos, protoproteínas). Este fenómeno pudo haber sido favorecido en las estructuras laminares de los minerales arcillosos (p. ej., esmectitas). Por otro lado, tales polímeros difícilmente fueron homogéneos y más bien estaban formados por moléculas con grupos funcionales similares que, dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas, se unían de manera preferencial.

**Propuesta didáctica.** La interacción entre moléculas orgánicas similares se puede demostrar construyendo cadenas y usando como eslabones las figuras geométricas. Cabe resaltar que las cadenas resultantes pueden tener un arreglo homogéneo y mixto, mostrando así la versatilidad de polímeros que se pudieron formar en condiciones primitivas (Figura 4).

### Polimerización



Figura 4. Polimerización: La interacción entre moléculas orgánicas similares se puede demostrar construyendo cadenas y usando como eslabones las figuras geométricas. Cabe resaltar que las cadenas resultantes pueden tener un arreglo homogéneo y mixto, mostrándose así la versatilidad de polímeros que se pudieron formar en condiciones primitivas.

**Plegamiento y propiedades emergentes.** Los polímeros, que adquirirían tamaños y estructuras cada vez más complejos, pudieron tomar una configuración tridimensional debido al plegamiento (p. ej., proto-RNA-proteínas). Tal disposición pudo favorecer el desarrollo de diversas propiedades emergentes como la interacción específica con otras moléculas, la optimización de reacciones químicas, la formación o rompimiento de enlaces, etc. Tales propiedades emergentes se fueron seleccionando y optimizando hasta prevalecer en el medio y enriquecerlo con estructuras y moléculas específicas, siendo la antesala de configuraciones altamente complejas, como los ribosomas.

**Propuesta didáctica.** Elaborar una cadena con un considerable número de eslabones para poder evidenciar su plegamiento y la formación de una estructura en 3D. Esta figura realizará un plegamiento específico. El objetivo es mostrar que la estructura tridimensional puede interactuar (p. ej., sorción, formación o rompimiento de enlaces específicos) con moléculas más complejas. Es necesario diseñar una nueva figura con una estructura más elaborada, un corazón, por ejemplo (Figura 5).

### Plegamiento y propiedades emergentes



Figura 5. Plegamiento y propiedades emergentes: Elaborar una cadena con un considerable número de eslabones para poder evidenciar su plegamiento y la formación de una estructura en 3D. El objetivo es mostrar que la estructura tridimensional puede interactuar (p. ej., sorción, formación o rompimiento de enlaces específicos) con moléculas más complejas. Es necesario, diseñar una nueva figura con una estructura más elaborada, por ejemplo, un corazón.



## CONCLUSIONES

El estudio del origen de la vida puede ser malinterpretado o sobrestimado por los términos que emplea. Por lo tanto, resulta importante transmitir los conceptos y objetivos de esta área de estudio de forma precisa. El desarrollo y la implementación de este recurso didáctico sobre química prebiótica es un esfuerzo para favorecer la comprensión del origen de la vida. Al proponer elementos y herramientas accesibles al público es posible abordar conceptos complejos. Esta propuesta promueve la explicación práctica de temas de ciencia básica, como la evolución de complejidad molecular, a través de un enfoque didáctico. Esto no sólo facilita la comprensión de conceptos difíciles, sino que también fomenta la participación y el aprendizaje significativo.

Para una mejor ilustración de cómo este material se presentaría en clase, por favor, vea el siguiente video: ([https://drive.google.com/file/d/1b9B08pm1fHSr3Gh3cgwY9l8P3XF7mKD/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1b9B08pm1fHSr3Gh3cgwY9l8P3XF7mKD/view?usp=drive_link)).

## AGRADECIMIENTOS

Las y los autores agradecen enormemente las aportaciones, trabajo e ideas de nuestro compañero y colega Juan Nicolás Balderas-Pérez, quién ayudó a desarrollar la propuesta de trabajo y la presentación del material didáctico.

Agradecemos a la ENES Unidad Juriquilla UNAM habernos permitido presentar el material didáctico propuesto en este artículo y ponerlo a prueba durante la tercera edición del Simposio de la Tierra, llevado a cabo del 15 al 17 de abril, frente a un público de nivel medio-superior y superior.

## REFERENCIAS

- Baú, J. P. T., Villafañe-Barajas, S. A., da Costa, A. C. S., Negrón-Mendoza, A., Colín-García, M. y Zaia, D. A. (2020). Adenine adsorbed onto montmorillonite exposed to ionizing radiation: Essays on prebiotic chemistry. *Astrobiology*, 20(1), 26-38.
- Brylants, G., Bartik, K. y Reisse, J. (2011). Prebiotic chemistry: a fuzzy field. *Comptes Rendus Chimie*, 14(4), 388-391.
- Cleaves, H. J. (2012). Prebiotic chemistry: what we know, what we don't. *Evolution: Education and Outreach*, 5(3), 342.
- Colín-García, M., Villafañe-Barajas, S., Camprubí, A., Ortega-Gutiérrez, F., Colás, V. y Negrón-Mendoza, A. (2018). Prebiotic chemistry in hydrothermal vent systems. *Handbook of Astrobiology*, 297-329.
- Fry, I. (2006). The origins of research into the origins of life. *Endeavour*, 30(1), 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2005.12.002>
- Hazen, R. M. y Sverjensky, D. A. (2010). Mineral surfaces, geochemical complexities, and the origins of life. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a002162-a002162. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a002162>
- Hazen, R. M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, R. T., Ferry, J. M., McCoy, T. J., Sverjensky, D. A. y Yang, H. (2008). Mineral evolution. *American Mineralogist*, 93(11-12), 1693-1720.
- Krishnamurthy, R. (2018). Life's biological chemistry: a destiny or destination starting from prebiotic chemistry? *Chemistry—A European Journal*, 24(63), 16708-16715.
- Lambert, J.-F. (2008). Adsorption and polymerization of amino acids on mineral surfaces: a review. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 38(3), 211-242. <https://doi.org/10.1007/s11084-008-9128-3>
- Miller, S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 117(3046), 528-529. <https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528>
- Negrón-Mendoza, A. y Ramos-Bernal, S. (2004). The role of clays in the origin of life. En *Origins: genesis, evolution and diversity of life* (pp. 181-194). Springer.
- Preiner, M., Asche, S., Becker, S., Betts, H. C., Boniface, A., Camprubi, E., Chandru, K., Erastova, V., Garg, S. G. y Khawaja, N. (2020). The future of origin of life research: bridging decades-old divisions. *Life*, 10(3), 20.
- Zaia, D. A. M. (2012). Adsorption of amino acids and nucleic acid bases onto minerals: a few suggestions for prebiotic chemistry experiments. *International Journal of Astrobiology*, 11(4), 229-234. <https://doi.org/10.1017/S1473550412000195>

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2024

Manuscrito corregido recibido: 16 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 30 de mayo de 2024

# CORRECCIONES UTILIZADAS EN EL PROCESAMIENTO DE DATOS MAGNÉTICOS: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN EN GEOCIENCIAS

Timoteo Gómez-Sánchez<sup>1</sup>, Miguel Ángel Guzmán-De la Cruz<sup>1</sup>,  
Gelder Éneo Cámara- Beauregard<sup>1</sup> y Adriana Guadalupe Jiménez-Vázquez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> División Académica de Ciencias Básicas (DACB), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México. CP. 86690

\*[adriana.jimenez@ujat.mx](mailto:adriana.jimenez@ujat.mx)

## RESUMEN

La geofísica como parte de las ciencias de la Tierra, basa sus conclusiones en el estudio de las propiedades físicas universales aplicadas a nuestro planeta. Las prospecciones geofísicas permiten la caracterización del interior de la Tierra, tanto de manera somera como profunda, midiendo diferentes características de las rocas y fluidos en cada exploración. La magnetometría es uno de los dos métodos conocidos como métodos potenciales: esto significa que su ámbito de estudio es natural, ya que se encarga de medir el campo magnético y sus variaciones, originadas por un cuerpo rocoso magnetizado debido a su susceptibilidad magnética. Las prospecciones magnetométricas tienen como propósito caracterizar el subsuelo para la exploración y caracterización de yacimientos minerales, incluyendo los de diamantes y los sistemas petroleros. Sin embargo, para lograrlo, es necesario tomar datos en campo con un magnetómetro, llevando a cabo una prospección magnetométrica sobre la zona de interés para obtener datos de estudio. Es importante destacar que existen causas que pueden asociarse con un error en la toma de datos, por lo que es necesario realizar correcciones para eliminar la influencia de estos factores en las mediciones. Las correcciones que se deben considerar son: temporal, instrumental, por elevación, por topografía y espaciales. Este artículo tiene como principal aportación explicar la importancia y los usos de las correcciones utilizadas en prospecciones magnetométricas en los datos obtenidos en campo, fungiendo como un primer acercamiento a este tópico para estudiantes de geociencias.

**Palabras clave:** Magnetometría, correcciones, potenciales, campo magnético.

## ABSTRACT

*Geophysics, as part of Earth sciences, bases its conclusions on the study of the universal physical properties applied to our planet. Geophysical surveys allow for the characterization of the Earth's interior, both at the surface and at depth, by measuring different characteristics of rocks and fluids during each exploration. Magnetometry is one of the two methods known as potential methods. This means that its field of study is natural, as it is responsible for measuring the magnetic field and its variations, which originate from a magnetized rocky body due to its magnetic susceptibility. Magnetometric surveys aim to characterize the subsurface for the exploration and characterization of mineral deposits, including diamonds and oil systems. However, to achieve this, it is necessary to collect field data with a magnetometer, conducting a magnetometric survey over the area of interest to obtain the study data. It is important to note that there are factors that may be associated with errors in data collection, so it is necessary to make corrections to eliminate the influence of these factors on measurements. The corrections to be considered include temporal, instrumental, elevation, topographic, and spatial. This article primarily aims to explain the importance and uses of corrections applied in magnetometric surveys, focusing on the data obtained in the field. It serves as an introductory approach to this topic for geoscience students.*

**Keywords:** Magnetometry, corrections, potentials, magnetic field.

## INTRODUCCIÓN

La geofísica es una ciencia que utiliza métodos indirectos para caracterizar el subsuelo. Cada estudio tiene un propósito diferente, una metodología distinta para la toma de datos, así como diferentes límites de profundidad y resolución. Según el tipo de fuente empleada para la obtención de datos, estos análisis se clasifican en métodos potenciales o naturales y métodos no potenciales o artificiales.

La magnetometría pertenece al grupo de métodos potenciales, junto con la gravimetría, ya que sus datos se originan de una fuente natural y no generada artificialmente, a diferencia de métodos tales como la prospección sísmica (consistente en generar ondas P y S emitidas mediante el golpe directo en una placa metálica o haciendo detonar dinamita, siendo éstas las fuentes artificiales).

La fuente de medición utilizada en la magnetometría se basa en la "Teoría del dinamo", la cual explica cómo se forma el campo magnético terrestre interno. Esta teoría afirma que el origen de esta componente principal se debe a corrientes eléctricas generadas por el movimiento de iones de los metales fundidos en el interior de la Tierra, específicamente en una de las regiones internas conocida como núcleo externo, a una profundidad aproximada de entre 2900 y 5100 km (Tarbuck *et al.*, 2005). Debido a estas corrientes el campo magnético se forma de manera natural y se mide mediante un instrumento llamado magnetómetro. Por su parte, la segunda componente del campo magnético (componente externa), tiene su origen en corrientes eléctricas en las capas ionizadas de la atmósfera superior. Las variaciones temporales de esta componente son más rápidas que las del campo interno. Algunos de los efectos relacionados con esta componente son los ciclos de once años de las manchas solares, las variaciones solares diurnas, las variaciones lunares y las tormentas magnéticas.

En la historia de la ciencia aplicada, los magnetómetros se han empleado para la exploración de recursos desde 1940 (Telford *et al.*, 2004). Con el tiempo, estos instrumentos de medición han sido actualizados para adaptarse a las nuevas necesidades, permitiendo obtener mejores resultados en los análisis. Es por ello que son constantemente remplazados por otros, aunque usan el mismo fundamento de medición.

La magnetometría es un método utilizado principalmente para la exploración de yacimientos minerales, incluyendo los de diamantes y los sistemas petroleros (Budker y Kimball, 2013). Además, se utiliza ampliamente en la caracterización geológica de formaciones de cuerpos ígneos intrusivos y extrusivos como los volcanes e intrusiones magmáticas (Singh *et al.*, 2014).

Hay que resaltar que la magnetometría es uno de los métodos con mayor alcance desde el punto de vista regional, ya que puede ser empleada tanto en forma aérea como terrestre. Su destacada precisión para caracterizar formaciones geológicas sepultadas que generan anomalías magnéticas regionales la convierte en un método confiable para distinguir basamentos y zonas con características particulares como zonas con fallamientos (Telford *et al.*, 2004).

Al utilizar el magnetómetro en el campo, se miden el campo magnético total y sus variaciones. Dentro de la zona de estudio habrá partes donde estas variaciones serán más evidentes, a las cuales llamaremos anomalías.

Las rocas tienen una propiedad física llamada susceptibilidad magnética, que es la capacidad de magnetizarse por un campo magnético externo. Cada tipo de roca tiene una capacidad diferente para ser magnetizada, dependiendo de su contenido ferromagnético; por lo tanto, habrá cuerpos rocosos que proporcionarán una señal más fuerte del campo magnético que otros.

El enfoque de este artículo se centra en la problemática que surge durante la toma de datos en campo. Nuestra fuente, el campo magnético total (CMT), conlleva errores en la medición del valor real debido a diversos factores como el tiempo, la elevación, la topografía y la latitud. La variación del campo magnético respecto a la hora de la medición es una de estas fuentes de error.

Las variaciones debidas a la elevación y topografía de la zona son también factores importantes que se utilizan solo en casos particulares, en los que estas dos variaciones generan un error relevante en los datos. Por último, la latitud introduce un efecto regional en los datos. Cada uno de estos factores proporciona datos con errores asociados que se alejan considerablemente de los que buscamos observar y procesar para obtener anomalías de la zona y realizar una interpretación adecuada. Por esta razón, han surgido procesos para eliminar estos errores de nuestros datos y obtener datos limpios. A estos procesos los denominaremos correcciones.

El propósito de este artículo es explicar con fundamentos las correcciones aplicadas a los datos obtenidos de una prospección magnetométrica. Las correcciones que se abordan son: temporal, corrección instrumental, por elevación, topográfica y espaciales.

### Prospección Magnetométrica

En las prospecciones de toma de datos en campo existen factores muy importantes que deben considerarse para que las mediciones sean precisas. Estos factores incluyen la historia geológica de la zona y su asociación con cuerpos depositados, como yacimientos minerales con contenido magnético o rocas con contenido ferromagnético, lo que puede provocar variaciones en las mediciones, asociándolas con anomalías.

Los factores naturales que afectan al campo magnético son ocasionados por variables terrestres, como la temperatura y las variaciones en el campo geomagnético local, que experimenta cambios a lo largo del tiempo o durante el curso diario de la luz solar. Estas variaciones se conocen como variaciones diurnas (Anderson *et al.*, 2002). Además, el punto de medición también influye en las mediciones, ya que algunas corrientes son más fuertes cerca del ecuador. La latitud, la proximidad al océano y sus mares, así como la intensidad de la radiación solar, también pueden afectar los resultados de las mediciones.

### Corrección Temporal

Como resultado de las variaciones del campo magnético con el tiempo, la primera corrección que se realizará es de tipo temporal. Esto se debe a que en la toma de datos se emplean dos equipos de magnetómetros: uno como estación base y otro como estación móvil.

La estación base tiene como objetivo medir las variaciones del campo magnético a lo largo del tiempo, mientras que la estación móvil recopila datos en los puntos de interés y regresa a la estación

base. Los magnetómetros no experimentan una deriva instrumental, lo que significa que los valores medidos serán consistentes independientemente del uso que se haga del instrumento. Por lo tanto, la única corrección necesaria será la temporal, que tiene en cuenta las mareas, el efecto de la actividad solar y la rotación de la Tierra. En el caso de contar únicamente con un instrumento, se recurre a un observatorio regional. Aquí se utilizan los datos obtenidos de un observatorio que monitorea de manera continua el campo magnético, empleándolos como referencia.

**Corrección Instrumental**

La corrección instrumental, también conocida como corrección diurna, implica restar los datos medidos por la estación base de los datos obtenidos por la estación móvil (Figura 1). En la parte inferior, encontramos valores positivos, mientras que, en la superior, valores negativos. El propósito de esta corrección es eliminar los efectos causados por las variaciones diurnas.

Hay zonas donde no hay cuerpos anómalos que produzcan alguna magnetización, por lo tanto, esperaríamos que el campo que observamos sea constante. Sin embargo, las variaciones diurnas afectan este valor, por lo que se deben restar los valores de la estación base con los de la estación móvil para obtener un valor de 0 y así eliminar cualquier error que nos aleje del valor real del campo magnético en el momento de la medición.

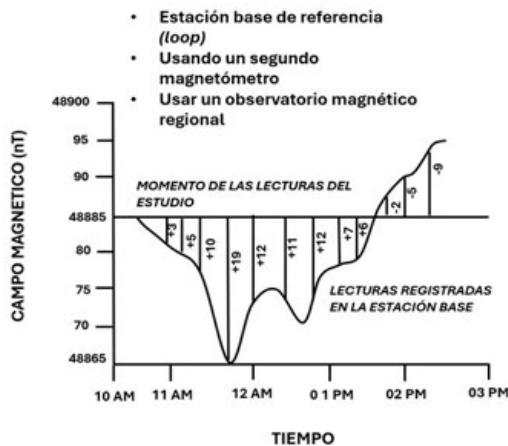


Figura 1. Diagrama de corrección de diurna, utilizando una estación base y una estación móvil. Modificado de Budker y Kimball (2013).

El campo externo ( $\delta f$ ) ajusta sus variaciones a partir de la diferencia entre los valores registrados por la estación base y su modelo lineal. En este caso, nos referimos al campo externo, que se comporta como una constante en cada punto. Matemáticamente este ajuste se realiza de acuerdo con la Ecuación (1)

$$\delta f = F_{base} - F_{lineal} \quad (1)$$

donde:

- $F_{base}$  = Valores de F promediado de la base
- $F_{lineal}$  = Ecuación por mínimos cuadrados
- $\delta f$  = variación del campo externo

Una vez que calculamos la variación del campo externo, podemos eliminar el efecto de las variaciones diurnas con la Ecuación (2):

$$\Delta T_{VD} = F_{obs} - \delta f \quad (2)$$

donde:

- $\Delta T_{VD}$  = Corrección por Variación Diurna
- $F_{obs}$  = Valor del F en cada punto
- $\delta f$  = variación del campo externo

En el año 2002, Anderson y colaboradores llevaron a cabo un estudio para relacionar la velocidad de la deriva vertical con la fuerza diurna en Sudamérica (Anderson *et al.*, 2002). Este estudio se realizó con 2 magnetómetros, uno posicionado sobre el ecuador y otro a 9 grados de distancia, con el fin de identificar las diferencias en las magnitudes de la componente horizontal del campo magnético (H). Así, se obtuvo un contraste de magnitudes medidas en el mismo tiempo y longitud, pero con diferencias en sus datos. Estas diferencias están asociadas a variaciones diurnas (Anderson *et al.*, 2002).

El grupo llevó a cabo una corrección diurna, ya que los datos tomados presentaban una variación en relación con la hora en que fueron registrados. Al superponer un comportamiento del componente H sobre el otro, se realizó una resta para obtener los valores diurnos (Figura 2).

Estos autores concluyen su estudio determinando el valor de la velocidad de la deriva vertical una vez que lograron restar las variaciones diurnas de su medición. También señalan que existen casos en los que no se cuenta con una estación base debido a la falta de instrumental, pero se puede sustituir con un observatorio regional y utilizar sus datos como referencia en tiempo real.

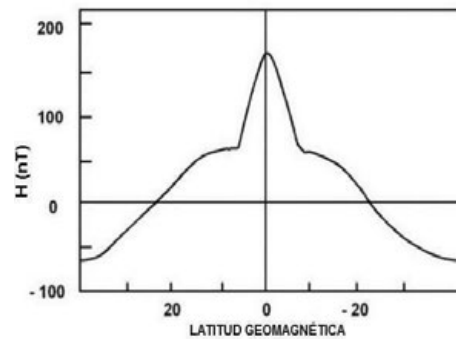


Figura 2. Representación del comportamiento del componente H del magnetómetro al mediodía con respecto a la latitud (Anderson *et al.*, 2002).

**Corrección por elevación**

La corrección por elevación se utiliza sólo en casos particulares, ya que la variable de elevación no siempre influye en las variaciones de la medición. Si realizamos una medición en cualquier punto de la Tierra, observamos que el gradiente de variación en los polos es de 0.03 nTm<sup>-1</sup>, mientras que en el ecuador es de -0.015 nTm<sup>-1</sup> (Parshin *et al.*, 2018).

Por ello, esta pequeña diferencia en los valores hace que la corrección en los datos sea innecesaria en la mayoría de los casos, aunque existen situaciones especiales. Un ejemplo de esto es el siguiente caso de estudio: entre los años 2014 y 2016, Parshin y colaboradores (2018) llevaron a cabo prospecciones magnéticas en las regiones montañosas de Siberia Oriental. El objetivo era caracterizar zonas con potencial para yacimientos minerales en zonas remotas y difíciles de acceso. Para abordar este desafío, realizaron la prospección magnética aérea debido a la dificultad que presentaba el relieve de la zona. Emplearon una tecnología de medición automática de alta precisión, ya que la altitud desde la cual se recopilaban los datos causaba inestabilidad en el instrumento, debido a la lluvia y el viento.

Dado que el relieve de la zona variaba considerablemente en altitud, en algunas áreas el instrumento tomó mediciones a alturas diferentes. Aunque los autores mismos concluyeron que los datos obtenidos mediante mediciones terrestres o aéreas podrían ser similares, se necesitó realizar una corrección por elevación para eliminar cualquier error mínimo asociado a las mediciones y obtener datos más precisos de la zona.

## Corrección por topografía

Esta corrección se basa en considerar la influencia de los cuerpos que rodean la zona de estudio. Sin embargo, sería necesario conocer sus propiedades magnéticas para poder asociarlas con alguna variación en la toma de datos. Debido a esta incertidumbre, se minimiza o descarta la corrección topográfica, ya que no genera una variación significativa en los datos. Entre 1952 y 1954, Sulhi Yüngül llevó a cabo estudios gravitacionales y magnéticos en Turquía, específicamente en las concesiones de *Eastern Chromite Works*, con el fin de descubrir y caracterizar reservas de cromita en una región de topografía accidentada y geología complicada. En este caso de estudio, el autor sugiere que se utilice una densidad superficial mayor a 2.5 para evitar que el valor sea despreciable, en este caso, se hace necesaria la realización de esta corrección para eliminar cualquier error (Yüngül, 1956). Esto permitiría considerarla como una perturbación en la toma de mediciones. Sin embargo, existirán zonas donde esta magnitud puede ser menor y no generar ninguna variación en los datos, como ocurrió en este caso de estudio.

## Correcciones Espaciales

Las correcciones espaciales consisten en utilizar el Sistema Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF, por sus siglas en inglés). Este modelo es ampliamente utilizado, pero se actualiza cada 5 años, lo que significa que sus resultados tienen una incertidumbre y un error asociado, dado que este campo experimenta constantes variaciones que no son reflejadas en este modelo matemático (Gough e Ingham, 1983). Mayormente, los errores se asocian con las zonas más remotas y alejadas de los observatorios encargados de procesar los datos medidos. El modelo IGRF se calcula para un tiempo y una zona específicos. Para eliminar este valor, que es el valor teórico del campo magnético de la Tierra, debemos restarlo a nuestros datos medidos sobre esa zona (Gough e Ingham, 1983).

Se puede aplicar la Ecuación (3) para realizar la corrección espacial cuando se conoce el valor del campo geomagnético.

$$\Delta T_{IGRF} = \Delta T_{VD} - F_{IGRF} \quad (3)$$

donde:

$$\begin{aligned} \Delta T_{IGRF} &= \text{corrección por IGRF} \\ \Delta T_{VD} &= \text{corrección por diurna} \\ F_{IGRF} &= \text{valor de F del IGRF} \end{aligned}$$

Esta corrección ayuda a eliminar la influencia del campo geomagnético terrestre, lo que permite procesar los datos y obtener las anomalías de manera más precisa. Se aplica mayormente en áreas de estudio de una gran extensión. Sin embargo, en el caso de perfiles de menor extensión es necesario eliminar el efecto regional producido por cuerpos más profundos. Este efecto regional se puede corregir eliminando la línea de tendencia, tal como se muestra en la Figura 3. Existen anomalías residuales y regionales. Para obtener una anomalía regional, es necesario establecer una línea de tendencia y restarla de los datos. De esta forma, podremos asociar esos datos sin perturbaciones a nuestra zona de estudio.

## MAPAS MAGNÉTICOS

Cuando los datos tomados en campo han sido procesados con las correcciones antes mencionadas, obtenemos lo que llamamos "Datos limpios". Es necesario tener estos datos sin ninguna perturbación que nos pueda alejar del valor real del campo magnético medido,

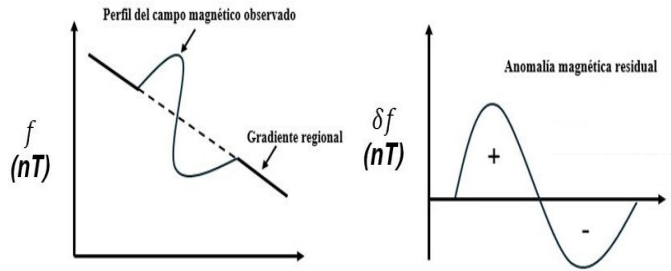


Figura 3. Anomalía regional. Modificado de Estrada (2015).

ya que cada valor de intensidad magnética tiene una interpretación diferente. Para ir entrando en materia, en geofísica se emplean los mapas de anomalías. Estos mapas permiten tener una visualización de los datos sobre la zona de estudio e interpretar cada mapa según sea el caso de estudio.

En el 2010, el autor Daniel González-Rivera realizó una prospección magnetométrica en la zona de Peña de Bernal, en el estado de Querétaro, para caracterizar cuerpos intrusivos de minerales de Au y Ag y así correlacionarlos con las anomalías magnéticas representadas en sus mapas. En la zona de estudio en la Peña de Bernal se realizó un levantamiento aeromagnético sobre una zona con topografía irregular y pendientes escarpadas, con un rango de elevación de 1900 a 2500 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m). La localización de la zona de estudio, así como el mapa de elevaciones se muestran en la Figura 4. Se colocó una estación base situada en la mina San Martín para medir en tiempo real las variaciones del campo respecto al tiempo de medición, para posteriormente realizar la corrección diurna.

En este estudio se generaron mapas de anomalías de la zona de interés. El autor aplicó en el siguiente orden las correcciones necesarias para el procesamiento de los datos obtenidos: primero, corrección temporal, que consistió en eliminar los errores de medición producidos por los datos registrados por el avión, usando como referencia los datos medidos por la estación base.

Una vez eliminados esos errores asociados a los datos, los resultados se almacenaron en bases de datos. En segundo lugar, se aplicó la corrección instrumental, también conocida como corrección diurna, con la que se obtuvieron los valores reales de todos los puntos adquiridos a partir de las mediciones, eliminando así toda perturbación por las variaciones diurnas. Se digitalizaron los valores obtenidos en la estación base, para ello, bastó con aproximar la curva de variación respecto al campo medido y el tiempo transcurrido en la medición (Figura 1), de forma que dichos valores se ajustaron a los datos con una dispersión menor que la resolución adquirida, utilizando aquí las Ecuaciones (1) y (2).

Como tercer paso, se aplicó la corrección espacial, debido a que el estudio para caracterizar cuerpos intrusivos de Au y Ag en la zona de la Peña de Bernal fue de gran extensión. Los datos fueron reducidos al modelo del IGRF para el año 2005, utilizando la Ecuación (3). Así se pudo eliminar la influencia del campo geomagnético terrestre, lo que permitió procesar los datos y obtener los mapas de anomalías de manera más precisa y con una mejor caracterización.

A continuación, se efectuó la corrección por elevación debido a que hubo cierta interferencia en la medición, ya que la prospección se hizo a una altura de vuelo de 60 m del helicóptero y 30 metros del sensor, a una velocidad de 110 km/h (González-Rivera, 2010).

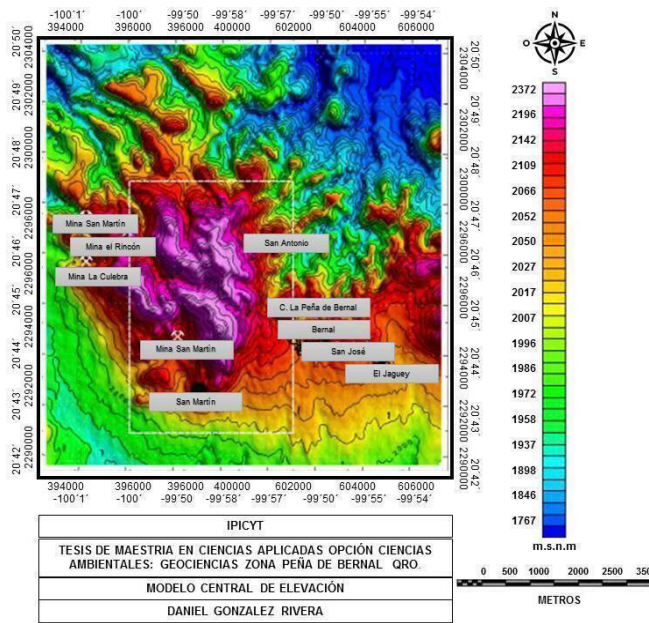


Figura 4. Mapa de elevación de la zona de Peña de Bernal, Querétaro. Tomado de González-Rivera (2010).

Una vez procesados los datos con las correcciones mencionadas, los resultados obtenidos se clasificaron como datos limpios que se almacenaron en una base de datos XYZ. Estos datos numéricos se digitalizaron en forma de mapa con escalas en formato raster para continuar con la interpretación de los mismos. Los datos limpios fueron procesados en el software *Oasis Montaj, de Geosoft Inc.*

Una vez terminada la primera fase del procesado de los datos aeromagnéticos, se comenzó la segunda fase, que fue la técnica de interpolación, generada a partir de plantillas XYZ (*grids*) mediante el algoritmo de curvatura mínima (Briggs, 1974), con un tamaño de celda de 100 m. A partir de esta técnica y en función del análisis de Fourier se obtuvieron los mapas de campo magnético total reducido al polo, de derivadas en la vertical (Z), *Butterworth* (BTRW) y de señal analítica. El proceso se sintetizó en 3 fases:

1. Cálculo de la transformada de Fourier  $f(u,v)$  de una función en el dominio del espacio  $x e y, f(x,y)$  que se define matemáticamente como en la Ecuación (4) (Bracewell, 1978):

$$F(u,v) = \iint f(x,y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (4)$$

donde:

- $(u,v)$  = es la distancia en la dirección  $x,y$ .
- $(ux+vy)$  = número de onda en la dirección  $x,y$ .

2. Multiplicación en el dominio de la frecuencia de los datos transformados por uno más de los operadores  $P(u,v)$  o filtros que se citan a continuación:

$$G(\mu,\nu) = P(u,v) * F(u,v) \quad (5)$$

3. Transformada inversa  $G(\mu,\nu)$  obteniendo de nuevo una función  $G(x,y)$

$$G(x,y) = \iint f(x,y) e^{-i2\pi(ux+vy)} d\mu dv \quad (6)$$

Al término de estas 3 fases se obtuvieron los mapas según la transformada o filtro aplicado, ya que cada uno tiene un diferente enfoque de resolución. Los mapas de anomalías fueron:

Reducción al polo, el cual se utilizó para transformar las anomalías magnéticas dipolares en anomalías monopolares, lo que compensó la distancia de la anomalía verdadera a la posición sobre el origen causal, es decir, el desplazamiento de la zona de medición del polo norte magnético (Figura 5). Debido a la magnetita, la inclinación y la declinación de los datos magnéticos se recalcula, convirtiendo así las anomalías de la zona de estudio, las cuales aparecerán como si se encontraran en el polo norte magnético. De este modo, la anomalía de campo total fu completamente monopolar y centrada directamente sobre el cuerpo que la genera. Esto ayudó a tener una interpretación más precisa de los datos, particularmente en zonas de alta latitud no cercanas al ecuador.

El segundo mapa obtenido fue con el filtro de derivadas en la vertical (z). Dicha herramienta se aplicó a los datos magnéticos de campo total, permitiendo tener un mejor alcance para la delimitación de las fuentes causales (cuerpos magnetizados de la zona) y localizar con precisión los cambios en los gradientes del campo magnético, dando como resultado una mejor definición de las discontinuidades y su relación con la geología de la zona (Nabighian, 1984). Cabe añadir que con este filtro se definen los rasgos geológicos de fuentes poco profundas que originan anomalías de frecuencia alta o de baja longitud de onda (Figura 6).

Se aplicó también el filtro *Butterworth* (BTRW), ya que se consideró el más apto para la aplicación directa de altas y bajas frecuencias de los datos, dándoles así un control, estableciendo una onda controlada o central, ayudando a eliminar ruido que no es de interés relacionado con altas frecuencias, para establecer la geometría, la yacencia de las anomalías y las dimensiones de las fuentes que las producen (Figura 7).

Por último, se aplicó el filtro señal analítica a los datos de anomalía de campo total, ayudando a definir cuerpos magnetizados en el subsuelo con un resultado que es coherente con lo obtenido a través de la reducción al polo y derivadas verticales, reforzando la interpretación de la posible ubicación de cuerpos en el subsuelo. El mapa obtenido se muestra en la Figura 8.

En los mapas de anomalías anteriores es posible observar que, pese a tratarse de la misma zona de estudio, la visualización es diferente. Esto se debe a los filtros utilizados que nos ayudan a resaltar los valores de magnitudes de interés de acuerdo con la problemática de interés en el estudio que se esté realizando. Lo anterior permite una interpretación más certera y precisa. Sin una corrección previa a nuestros datos no podremos obtener mapas de anomalías magnéticas con un porcentaje de certeza mayor.

Para dar un mejor contraste de la importancia del tratamiento y la aplicación de correcciones a los datos, se procesaron dos mapas de anomalías, el primero de ellos utilizando datos sin ninguna corrección y el segundo con datos con corrección temporal, instrumental e IGRF. La comparación se muestra en la Figura 9.

En el caso del mapa de anomalías con datos sin correcciones (Figura 9A), fue posible notar que hubo una distribución de magnitudes dispersa en toda el área mostrada.

Sin embargo, con la aplicación de corrección temporal (eliminando errores asociados en el transcurso de la medición tomando como referencia la estación base), corrección instrumental o diurna (para acercar los valores medidos a los reales, restando cualquier variación de la estación móvil de la estación base) y corrección espacial (utilizando

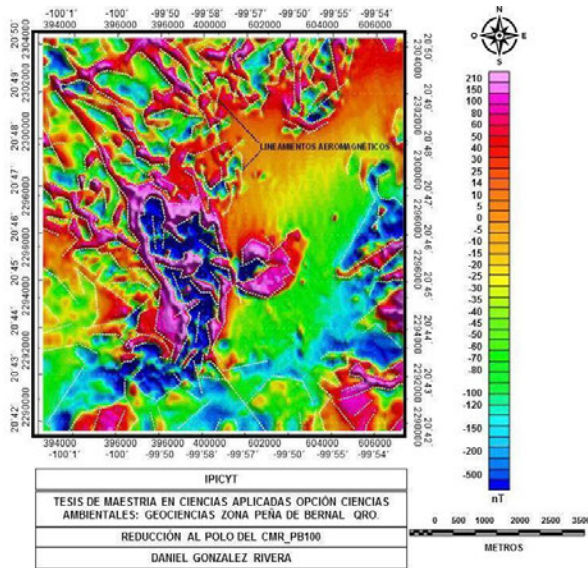


Figura 5. Mapa de intensidades magnéticas reducido al polo en el área de estudio. Se observan anomalías positivas en tonos rojos a magenta y anomalías negativas en tonos azules a verdes, sobre las que se muestran los lineamientos aeromagnéticos. Tomado de González-Rivera (2010).

un IGFR actual para restar la variación por el campo magnético terrestre) a la misma base de datos, se obtuvo el mapa de anomalía total del campo magnético, el cual se muestra en la Figura 9B).

La inspección visual de las Figuras 9A y 9B permitió notar que en esta última persistió la presencia de valores de anomalías altas y bajas según la escala de colores; sin embargo, la distribución fue más controlada respecto al mapa de anomalías magnéticas con datos sin correcciones.

Esto hizo factible ver las anomalías menos dispersas y más concentradas según su valor. El ejemplo anterior resalta la importancia de las correcciones, que consiste en darle a los datos un valor real, minimizando el error asociado para poder analizar con mayor precisión las anomalías presentes y dar una interpretación más certera.

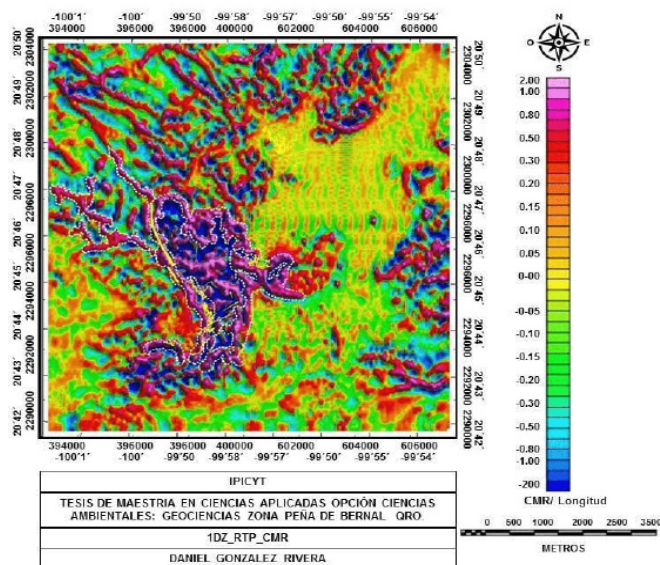


Figura 6. Mapa del campo magnético residual (CMR) con filtro de la segunda derivada en la vertical (z). Nótense en color amarillo las estructuras mineralizadas. Tomado de González-Rivera (2010).

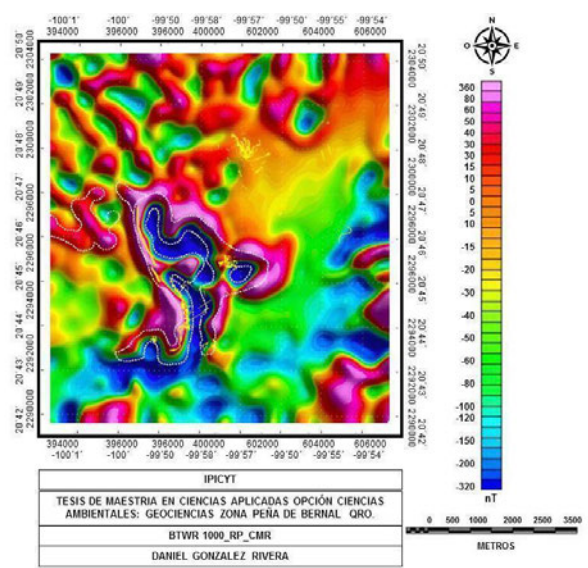


Figura 7. Mapa del CMR con filtro Butterworth con longitud de onda de corte de 1000 ciclo/km. Nótense en color amarillo las estructuras mineralizadas. Tomado de González-Rivera (2010).

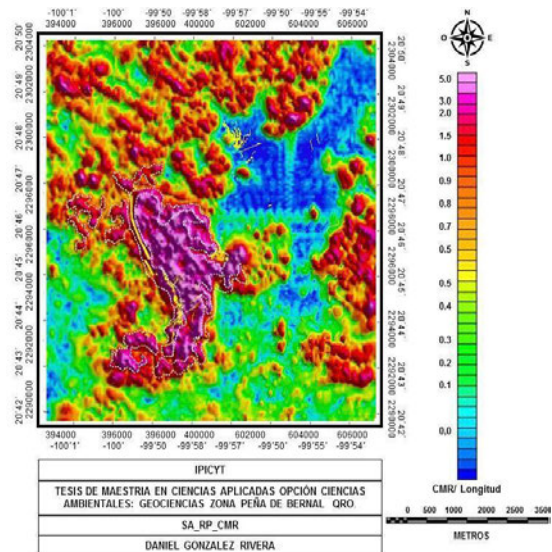


Figura 8. Mapa del CMR con el filtro de señal analítica. Nótense en color amarillo las estructuras mineralizadas. Tomado de González-Rivera (2010)

## CONCLUSIONES

En cualquier prospección geofísica es fundamental comprender el método de medición y entender cómo los factores naturales de la Tierra influyen en los datos obtenidos. Una metodología de adquisición realizada correctamente en campo es de suma importancia para el procesamiento de los datos, ya que el porcentaje de incertidumbre disminuye una vez que los datos han sido “limpiados” por los filtros de corrección.

En este trabajo se han analizado las correcciones a datos magnéticos para obtener mayor precisión para la interpretación de las anomalías magnéticas.

Al comprender los factores que afectan a las variaciones del campo

magnético, se entiende mejor la importancia de las correcciones realizadas en los datos obtenidos de estudios magnéticos (Figura 10). Las correcciones utilizadas en magnetometría tienen como propósito eliminar cualquier error producido por efectos naturales e instrumentales que puedan desviar los datos del valor real del campo magnético medido. Esto permite obtener una caracterización mejorada de la zona de estudio.

Las anomalías geofísicas son las señales de interés para poder abordar la problemática del estudio. No se puede concluir un trabajo sin aplicar las correcciones diurnas y espaciales a los datos de forma obligatoria, lo que justifica los resultados obtenidos. Las correcciones por elevación y topográficas se consideran secundarias y se aplican dependiendo de la necesidad específica de la situación.

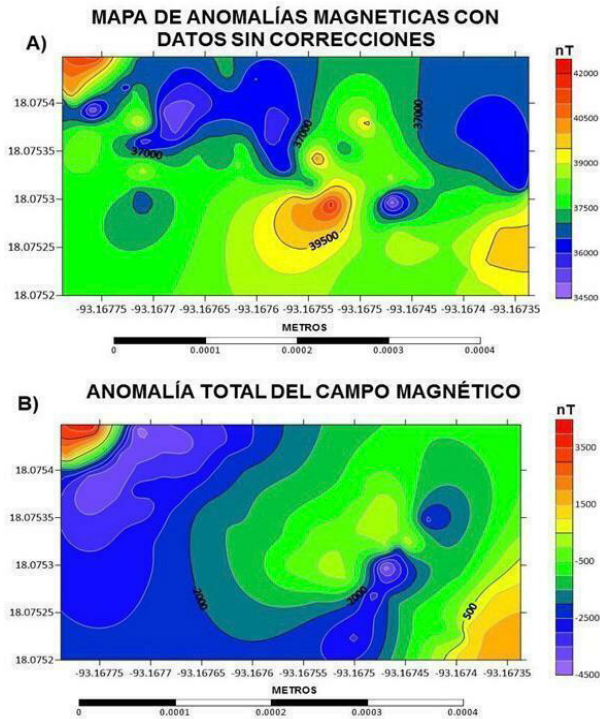


Figura 9. (A) Mapa de anomalías magnéticas con datos sin correcciones. (B) Mapa de anomalía total del campo magnético una vez aplicadas las correcciones a los datos.

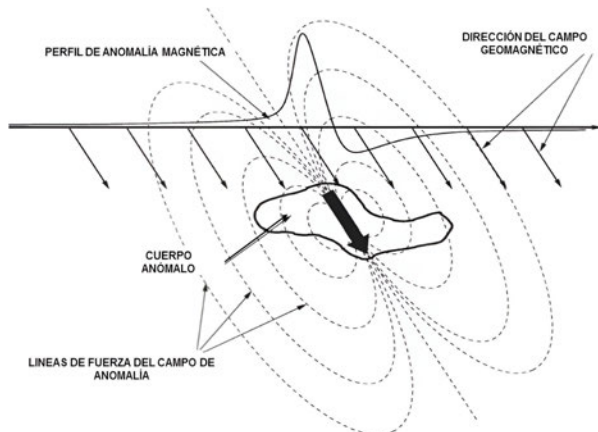


Figura 10. Factores presentes en prospecciones magnetométricas. cuerpos magnetizados, campo magnético terrestre, intensidad del campo geomagnético y variaciones diurnas. Tomado de Estrada (2015).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la revista "Enseñanza y Comunicación de las Geociencias" por la oportunidad de publicar este trabajo, así como al editor en jefe, Dr. Alexis del Pilar Martínez, y a los revisores, Dra. Anna Paulina Lima Costa y Oscar Ávila Vargas por sus observaciones y sugerencias.

## REFERENCIAS

Anderson, D., Anghel, A., Yumoto, K., Ishitsuka, M., y Kudeki, E. (2002). Estimating daytime vertical ExB drift velocities in the equatorial F-region using ground-based magnetometer observations. *Geophysical Research Letters*, 29(12). <https://doi.org/10.1029/2001GL014562>

Bracewell R.N., (1978). *The Fourier Transformer and its application*. Mc Graw Hill, 444 p.

Briggs I.C., (1974). Machine contouring using minimum curvature: *Geophysics*, V. 39, p.39–48.

Budker, D., y Kimball, J. (2013). *Optical Magnetometry* (D. Budker y D. F. Jackson Kimball, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511846380>

Estrada, L.A (2015). *Prospección Magnetométrica para alumnos de ingeniería geodésica y geofísica de la Facultad de Ciencias exactas y Tecnología, Departamento de geodesia y topografía. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.*

González-Rivera, D. (2010). *La exploración magnética aérea en la prospección de yacimientos de oro y plata: caso Peña de Bernal, Querétaro.* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. Consultado el 20 de marzo de 2024. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx//handle/11627/2982>

Gough, D. I., e Ingham, M. R. (1983). Interpretation methods for magnetometer arrays. *Reviews of Geophysics*, 21(4), 805–827. <https://doi.org/10.1029/RG021i004p00805>

Nabighian M. N., (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms- Fundamental relations: *Geophysics*, v.49, p.780–786.

Parshin, A. V., Morozov, V. A., Blinov, A. V., Kosterev, A. N., y Budyak, A. E. (2018). Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*, 21(1), 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>

Singh, B., Prabhakara Rao, M. R. K., Prajapati, S. K., y Swarnapriya, Ch. (2014). Combined gravity and magnetic modeling over Pavagadh and Phenaimata igneous complexes, Gujarat, India: Inference on emplacement history of Deccan volcanism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80, 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.11.005>

Tarback, E., Lutgens, F., y Giner Robles, J. (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*. Prentice Hall / Pearson.

Telford, W., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Yüngül, S. (1956). Prospecting for chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in East Turkey. *Geophysics*, 21(2), 433–454. <https://doi.org/10.1190/1.1438245>

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2024

Manuscrito corregido recibido: 16 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 30 de mayo de 2024



# PROCESO DIAGENÉTICO DEL CARBÓN Y SU RELACIÓN CON LA GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS

Eduardo González-Partida<sup>1\*</sup>, Juan Josué Enciso-Cárdenas<sup>2</sup>, Sumit Mishra<sup>1</sup>, Joseph Madondo<sup>1</sup>, Genaro de la Rosa-Rodríguez<sup>2</sup>, José Abdón Gauna-Arista<sup>2</sup> y Alejandro Carrillo-Chávez<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Laboratorio de Yacimientos Minerales, Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas, Universidad Autónoma de Coahuila, Boulevard Simón Bolívar # 303A, Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza, C.P. 26830, México

\*[egp@geociencias.unam.mx](mailto:egp@geociencias.unam.mx)

## RESUMEN

El carbón se define como una roca sedimentaria de origen orgánico formada por el depósito de restos vegetales y sedimentos arcillosos, que han sido sometidos a un proceso diagenético. Los principales factores que controlan la formación del carbón durante la diagénesis son: 1) la acumulación de materia orgánica y sedimentos, 2) subsidencia, 3) tirante de agua, 4) aumento de presión y temperatura a través del tiempo geológico.

El carbón se constituye por materia orgánica derivada de plantas terrestres superiores (kerógeno tipo III), una mezcla de compuestos químicos orgánicos que durante el proceso diagenético dan origen a compuestos poliaromáticos condensados y grupos funcionales oxigenados. El kerógeno tipo III presenta bajas proporciones de cadenas alifáticas, además de una baja relación atómica H/C (<1), dando como resultado un potencial productor de aceite moderado y cantidades abundantes de gas a mayores profundidades, exhibiendo así mismo, una relación atómica O/C (0.05 – 0.40) que es comparativamente mayor que otros kerógenos (p. ej. kerógeno tipo I y kerógeno tipo II).

El kerógeno de tipo III, representado por material orgánico húmico de origen continental y costero, se compone primordialmente de plantas superiores y todo tipo de maderas, por lo que contiene altas concentraciones de celulosa, lignina, ácidos del grupo carboxilo, cetonas heteroatómicas y una proporción menor de compuestos alifáticos y alicíclicos. El ambiente de depósito de este tipo de material se encuentra relacionado con lagunas, deltas y manglares.

En las primeras etapas de madurez del kerógeno tipo III se desarrolla comúnmente una mayor cantidad de gas que de aceite. Éste es predominantemente parafínico, nafténico, aromático e

incluso puede contener ceras. Este kerógeno puede, además, formar potentes capas de carbón que posteriormente se convierten en hidrocarburos. En este trabajo se discute la importante relación entre el carbón y los hidrocarburos formados a partir de él.

La información presentada en este manuscrito está dirigida a docentes, estudiantes y futuros profesionales en el área, y se espera que contribuya a la comprensión de los fundamentos, composición y procesos que ocurren en la transformación de carbón a hidrocarburos. También se espera que esta información aporte a la caracterización e interpretación geológica y geoquímica de este tipo de hidrocarburos.

**Palabras clave:** Carbón, kerógeno tipo III, diagénesis, gas.

## ABSTRACT

*Coal is defined as a sedimentary rock of organic origin formed by the deposition of plant debris and clayey sediments that have undergone a diagenetic process. The main factors that control the formation of coal during diagenesis are: 1) accumulation of organic matter and sediments, 2) subsidence, 3) water column, 4) increase in pressure and temperature through geologic time.*

*Coal is constituted by organic matter derived from higher terrestrial plants (type III kerogen) that during the diagenetic process gives rise to condensed polyaromatic compounds and oxygenated functional groups, with low proportions of aliphatic chains, in addition to a low H/C atomic ratio (<1), resulting in a moderate oil producing potential and abundant amounts of gas at greater depths, also exhibiting an O/C atomic ratio (0.05 - 0.40) that is comparatively higher than other kerogens (e.g., I and II).*

Type III kerogen, represented by humic organic material of continental and coastal origin, is composed primarily of higher plants and all types of wood, and contains high concentrations of celluloses, lignin, carboxyl group acids, heteroatomic ketones, and a smaller proportion of aliphatic and alicyclic compounds. The depositional environment of this type of material is related to lagoons, deltas, and mangroves. In the early stages of maturity of type III kerogen, a greater amount of gas than oil is commonly developed, however, the latter is predominantly paraffinic, naphthenic, aromatic, and even contains waxes. This kerogen can also form strong carbon layers. Hence the importance of discussing the significant relationship between coal and the hydrocarbons formed from it.

The information presented in the manuscript is expected to help teachers, students and future professionals understand the fundamentals, composition and processes that occur for the formation of hydrocarbons in coal in order to apply the necessary knowledge in the development of geological and geochemical characterization and interpretation.

**Keywords:** Coal, type III kerogen, diagenesis, gas.

## INTRODUCCIÓN

El carbón es una roca sedimentaria orgánica formada a partir de restos vegetales que se encuentran en diferentes estados de conservación, a causa del sepultamiento y la compactación (International Committee for Coal Petrology [ICCP], 1993). Este concepto, adoptado de forma internacional, integra el conjunto de fundamentos para la caracterización de carbones con relación a su grado de maduración térmica (Figura 1). Esta maduración es ocasionada por el sepultamiento de una cuenca sedimentaria en la que se ha depositado la materia vegetal y que ha sido sometida a distintos procesos geológicos durante la diagénesis (humidificación, turbificación, putrefacción, carbonización y metamorfismo), para dar origen al carbón (Lemos de Sousa *et al.* 2012). En virtud de lo anterior, resulta importante tomar como punto de partida esta consideración para clasificar al carbón en función de su evolución térmica.

La diagénesis se refiere al conjunto de procesos físicos y químicos que ocurren de manera posterior al depósito de un sedimento, incluyendo la compactación y expulsión del agua intersticial, degradación de materia orgánica y cambios en el pH. Durante este proceso, algunas fases depositadas originalmente se disuelven en el agua intersticial y otras cristalizan dando origen al kerógeno mismo que corresponde a la fracción de materia orgánica considerada como el principal precursor en la generación de hidrocarburos. Dependiendo del tiempo en que se desarrolle la diagénesis, se puede definir como "etapa de depósito temprano" o bien en una etapa tardía como "mesogenética y telogenética tardía".

Durante la primera etapa de carbonización una tonelada de materia orgánica concentrada genera alrededor de 1,300 m<sup>3</sup> de gas y gran cantidad de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, para formar un manto de carbón de un metro de espesor se requiere una columna de 12 metros de vegetación (Barker, 2001). De manera simplificada, los principales factores que controlan la formación del carbón son: 1) la acumulación de materia orgánica y sedimentos, 2) subsidencia, 3) tirante de agua, 4) aumento de presión y temperatura en el transcurso del tiempo geológico. Durante el proceso diagenético, con el aumento de presión y temperatura ocurre la generación de gas metano, en estado absorbido en la estructura porosa del carbón almacenado en fracturas. Este fenómeno representa un papel que debe ser tomado con especial atención durante la extracción del carbón (Rodrigues, 2002).

### Relación materia orgánica - kerógeno

En sucesiones sedimentarias, la materia orgánica preservada comprende desde partículas orgánicas finamente diseminadas, hasta materia orgánica concentrada en los carbones. En general, las facies orgánicas son mezclas de materiales complejos y heterogéneos, cuyas características dependen del origen y la naturaleza de la materia orgánica (p. ej., biomasa planctónica y bacteriana, plantas terrestres y material re TRABAJADO), la productividad orgánica, los aportes al medio sedimentario, las condiciones fisicoquímicas que ocurren dentro del medio sedimentario, la diagénesis temprana y la evolución térmica (maduración) a causa del sepultamiento del sedimento, y del metamorfismo (Diessel, 1992; Stach *et al.*, 1982; Senftle *et al.*, 1993; Taylor *et al.*, 1998; Teichmüller y Teichmüller, 1982; Vandenbroucke y Largeau 2007; Suárez-Ruiz *et al.*, 2012).

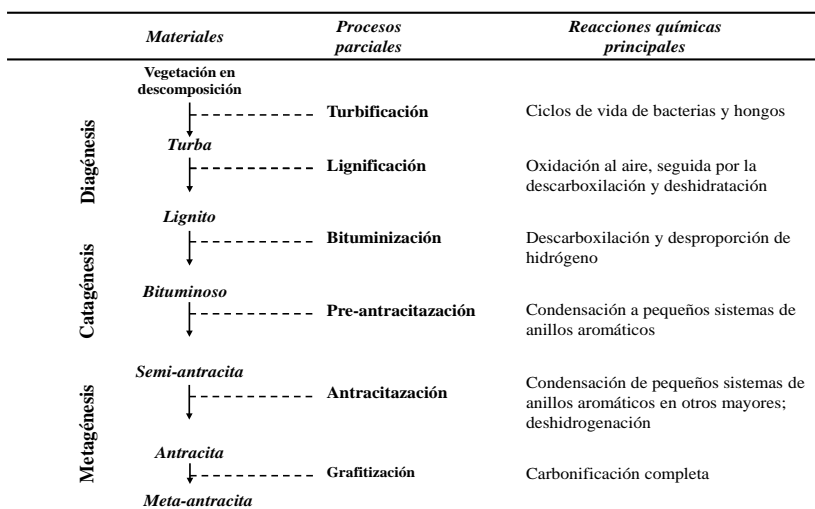


Figura 1. Proceso de evolución y maduración del carbón (modificado de Van Krevelen, 1993).

Las reacciones cinéticas durante el proceso de transformación térmica de la materia orgánica, son variables y están controladas principalmente por la composición del sedimento, la presión, la temperatura, la composición y la naturaleza del fluido de poro, el tamaño de granos, la porosidad, la permeabilidad, el volumen de fluidos, los procesos de óxido-reducción y el pH, entre los más importantes. Aquí el kerógeno juega un papel relevante, ya que corresponde al residuo orgánico contenido en una roca sedimentaria formada a partir de la concentración de la materia orgánica. En la etapa al final de la diagénesis, el enriquecimiento orgánico en las rocas sedimentarias se origina en ambientes sedimentarios cuyas condiciones fueron apropiadas para la acumulación y preservación de materia orgánica. En este sentido, las variaciones de la composición del kerógeno se encuentran influenciadas por:

- 1) El tipo de materia orgánica original o facies orgánicas donde fue depositada.
- 2) La temperatura y grado de madurez de la roca a través del tiempo en la cuenca sedimentaria.
- 3) Los procesos de alteración biofísicoquímicos (biodegradación, erosión, intemperismo, etc.), a los que se haya sometido la roca durante la diagénesis.

Por lo tanto, se requiere evaluar distintos parámetros, para estimar la generación, expulsión, migración y acumulación de hidrocarburos en una cuenca petrolera (Santamaría-Orozco *et al.*, 2009).

La probabilidad de que haya una carga efectiva de petróleo (i.e., aceite o gas) depende de: 1) el tipo, calidad y grado de madurez de una roca generadora, 2) los tipos de hidrocarburos generados (líquidos o gaseosos), 3) el volumen de la roca generadora y el área de drenado, 4) el tiempo de inicio y fin de la migración del aceite y gas, 5) el área de drenado y las posibles rutas de migración; 6) la relación de llenado y fuga, 7) la evaluación de la fase del yacimiento y 8) la alteración de los hidrocarburos almacenados (Santamaría-Orozco *et al.*, 2009). En este sentido, los diferentes tipos de kerógeno pueden reconocerse mediante un examen óptico y un análisis fisicoquímico.

Los kerógenos se pueden clasificar mediante las relaciones atómicas Hidrógeno/Carbono (H/C) vs Oxígeno/Carbono (O/C, Van Krevelen, 1993, Figura 2).

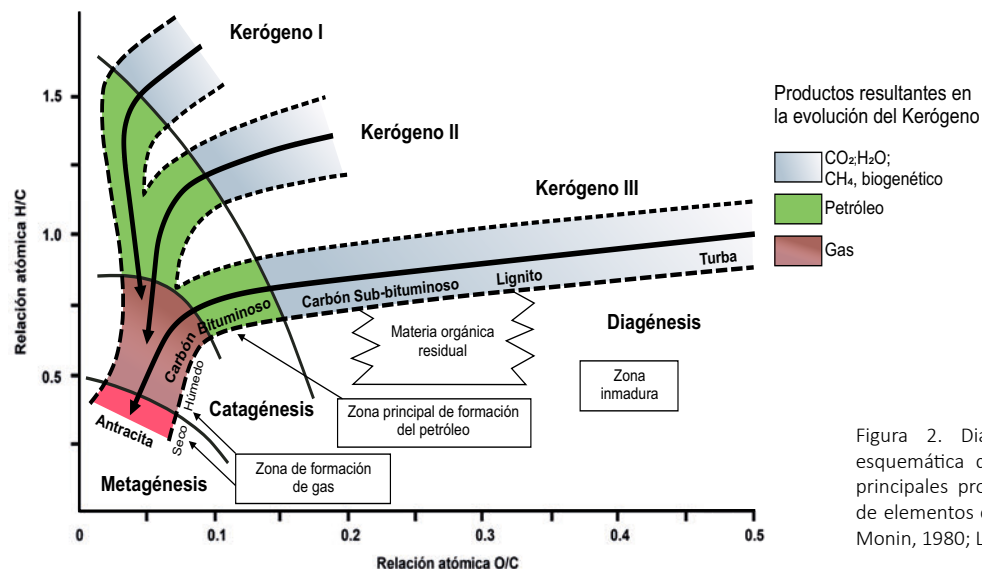


Figura 2. Diagrama de Van Krevelen: representación esquemática de la evolución general del kerógeno y los principales productos generados (reconstruido y adaptado de elementos contenidos en Tissot y Welte, 1984; Durand y Monin, 1980; Lemos de Sousa *et al.*, 2012).

### Maduración térmica

La evolución térmica de la roca generadora durante la diagénesis, la catagénesis y la metagénesis, experimenta cambios en sus propiedades físicas y químicas. Estos cambios son importantes para determinar el grado de maduración del material orgánico. En la industria petrolera, se utilizan varios parámetros para determinar el grado de maduración, los más comunes son, el examen óptico del kerógeno, el análisis fisicoquímico del kerógeno y el análisis químico del bitumen extraíble. Hood y Castaño (1974) compararon diferentes técnicas para medir estos cambios térmicos y propusieron una escala numérica denominada LOM (*Level of Organic Metamorphism*; Hood *et al.*, 1975).

Generalmente, el carbón se constituye por restos de plantas que, en una cuenca de depósito, experimentan un proceso inicial de formación de turba. Cuando estos depósitos quedan enterrados bajo capas de sedimento, la turba se transforma primero en lignito, posteriormente en carbón bituminoso y finalmente en antracita, debido principalmente a efectos geotérmicos (Van Krevelen, 1993). La evolución térmica corresponde a uno de los principales parámetros que permitan clasificar el carbón, sin embargo, la composición petrográfica y el contenido de materia orgánica, deben ser tomados en cuenta para su correcta clasificación (Figura 3).

En el análisis de cuencas sedimentarias es crucial considerar la historia geotérmica, la cual se suele abordar a través del grado de evolución de la materia orgánica. Existe una relación bien establecida entre el grado de carbonización/maduración y las temperaturas aproximadas alcanzadas por la materia orgánica durante el proceso de sepultamiento geológico. Muchos estudios han reconstruido la historia geotérmica y realizado el modelado de cuencas basándose en el rango del carbón, utilizando principalmente la reflectancia de la vitrinita como indicador de madurez. El modelado de cuencas es una herramienta ampliamente utilizada en los estudios petrolíferos (p. ej., Allen y Allen, 2005; Hantschel y Kaueroff, 2009) donde la historia del flujo de calor se suele calcular a partir de los datos de reflectancia de la vitrinita ( $R_o$  %; Baur *et al.*, 2010; Beha *et al.*, 2008a, 2008b).

En la actualidad, las metodologías disponibles para la reconstrucción de la historia térmica de una cuenca se pueden agrupar en cuatro categorías (Pagel *et al.*, 2014), los geotermómetros, los cronómetros, los crono-termómetros y los geotermómetros cinéticos. Según Pagel *et al.* (2014), la historia térmica de las cuencas sedimentarias (y/o sus procesos diagenéticos) puede ser reconstruida utilizando diferentes marcadores, tanto inorgánicos (o minerales) como orgánicos.

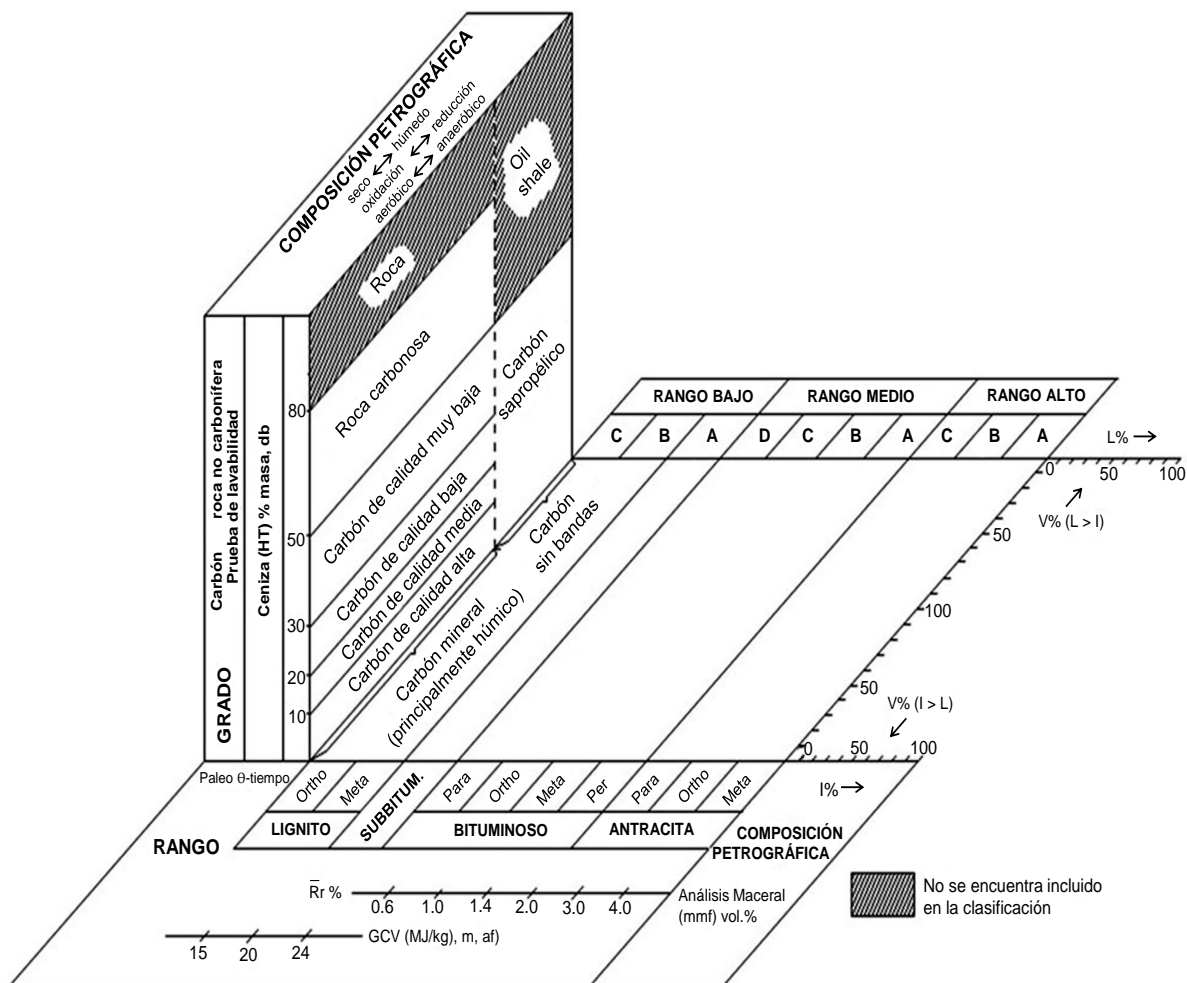


Figura 3. Clasificación internacional del carbón (ECE-UN, 1998) Rango – Grado – Composición petrográfica (modificado de Lemos de Sousa *et al.*, 2012). Alta Temperatura (HT), Base Seca (db), Vitrinita (V), Inertinita (I), Liptinita (L), Valor medio del poder reflector de vitrinita ( $R_r$ ), Poder calorífico bruto (GCV) expresado en mega joules/kilogramo (MJ/kg), base libre de humedad (m) y de cenizas (af), Libre de materia mineral (mmf).

**El carbón como roca generadora de gas**

El carbón está compuesto por una variedad de tejidos vegetales en diferentes estados de conservación. Estos tejidos son identificables microscópicamente por partículas denominados macerales, los cuales con frecuencia pueden relacionarse con partes específicas de una planta, como cutículas, estructuras leñosas, esporas, etc. Durante y después del depósito en las cuencas sedimentarias, los restos de plantas experimentan una serie de cambios físicos, bioquímicos y químicos, conocidos como diagénesis y catagénesis, que dan lugar a diferentes carbones con un rango creciente. Este rango comienza con la turba (material vegetal prácticamente inalterado), y continúa a través del lignito, el carbón bituminoso y, finalmente, la antracita (Tissot y Welte, 1984).

La generación de gas en el carbón se encuentra directamente relacionada con su grado de evolución y composición maceral (Mukhopadhyay, 1993). En el carbón mineral se pueden distinguir tres grupos diferentes de macerales: vitrinita, liptinita e inertinita. Estos macerales se diferencian microscópicamente con base en la reflectancia de la vitrinita, su forma y su estructura. La diferencia de la reflectancia de la vitrinita entre los grupos macerales aumenta gradualmente desde los lignitos hasta la antracita. El carbón genera hidrocarburos líquidos y gaseosos de acuerdo al grado de evolución o rango alcanzado en la cuenca sedimentaria.

Por ejemplo, los carbones de rango bituminoso y de alta concentración de volátiles a bituminoso y moderada concentración de volátiles generan hidrocarburos líquidos en el intervalo de bituminización denominado la ventana del aceite. Por otro lado los carbones más evolucionados, es decir, los bituminosos con bajas concentraciones de volátiles a antracitas producen hidrocarburos gaseosos, con contenido de metano fundamentalmente, en la ventana de gas (Figura 4). Los macerales del grupo liptinita y los componentes más hidrogenados del grupo vitrinita son los que generan estos hidrocarburos (Teichmüller, 1989). La investigación y la experimentación continúan en el campo de la tecnología de exploración y producción, con el objetivo de extraer el gas natural de los yacimientos de carbón, conocidos como metano de hulla o "gas grisú" (Corona-Esquivel et al., 2006).

El carbón contiene proporciones significativas de material volátil compuesto por hidrógeno y metano, también puede contener compuestos complejos. La desorción de la materia volátil puede alcanzar hasta más de 100 m³ en volumen de gas por tonelada de carbón extraído (Bodden y Ehrlich, 1998; Crosdale et al., 1998; Flores, 1998; Laxminarayana y Crosdale, 1999). El gas de las minas es prácticamente idéntico al gas natural en su composición por lo que puede ser utilizado como combustible. El contenido y la composición química del gas grisú es variable y consiste principalmente de metano (CH<sub>4</sub>), con cantidades menores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y otros hidrocarburos (Querol-Suñé, 2005).

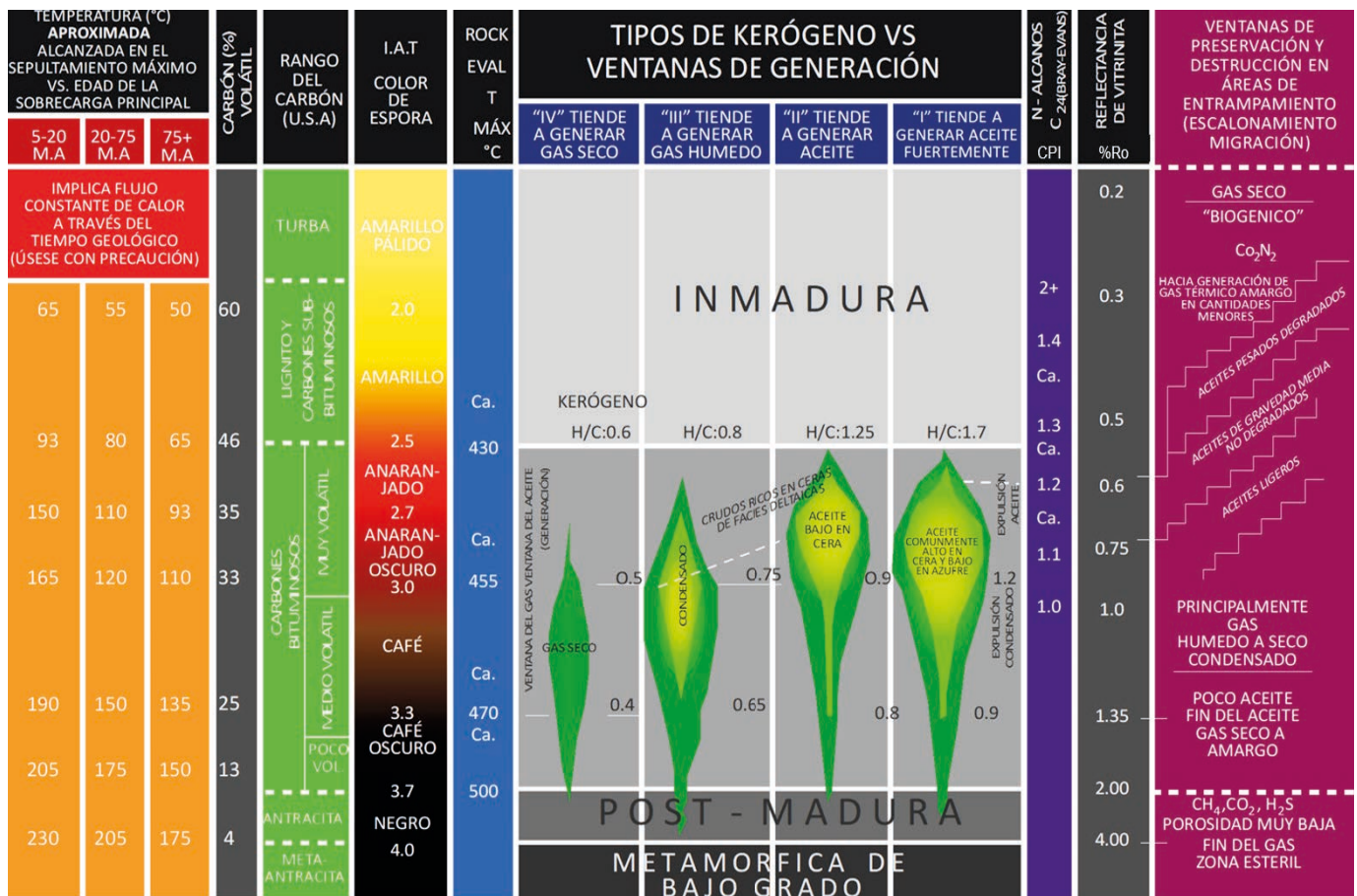


Figura 4. Esquema de los tipos de kerógeno con respecto a las ventanas de generación de hidrocarburos y su relación con el carbón (modificado de Piedad-Sánchez, 2005a,2005b; Piedad-Sánchez, et al., 2005). Grados centigrados (°C), Millones de años (M.A), Estados Unidos de América (U.S.A), Temperatura máxima de Pirólisis (Tmax), Índice de ateración termica (I.A.T.), Índice preferente de carbono (CPI).

El carbón se define como una roca sedimentaria constituida por más de un 50 % en peso de restos orgánicos y por lo tanto es considerada la roca generadora más rica en contenido de materia orgánica. Por este motivo, el carbón, es considerado una importante roca generadora de hidrocarburos (Wilkins y George, 2002). Los hidrocarburos gaseosos producidos a partir del carbón se denominan comúnmente metano en capas de carbón (CBM, por sus siglas en inglés, Rightmire *et al.*, 1984; Kaiser *et al.*, 1994; Ayers, 2002; Suárez-Ruiz y Crelling, 2008). El CBM representa aproximadamente el 9.5 % del gas natural seco producido en Estados Unidos, comercializándose actualmente a nivel global.

## CONCLUSIONES

1. El carbón se define como una roca sedimentaria orgánica constituida por restos de plantas que han experimentado un proceso de sepultamiento, presión y temperatura dando lugar a carbones de diferente madurez térmica o rango, entre los que se definen: turba, lignito, bituminoso y antracita.
2. Durante los procesos de diagénesis, catagénesis y metagénesis ocurren reacciones físico-químicas que, en conjunto con los factores que controlan la formación del carbón, dan origen a la generación de hidrocarburos líquidos o gaseosos en relación al tipo de kerógeno y al grado de evolución térmica alcanzado en la cuenca sedimentaria.
3. En el carbón, la generación de hidrocarburos inicia desde la diagénesis produciendo gas desde la turba, definiéndose como gas biogénico. Durante la catagénesis con el aumento de la presión y temperatura, el carbón aumenta su rango a bituminoso produciendo hidrocarburos principalmente gaseosos y una fracción menor de líquidos. Finalmente en la metagénesis, se produce gas metano, decreciendo la generación de gas hacia el rango de la antracita.

## AGRADECIMIENTOS

Actualmente un grupo de investigadores del Instituto de Geociencias IGC-UNAM, antes Centro de Geociencias (CGEO), en colaboración con otras Instituciones Nacionales y Europeas, a través del proyecto PAPIIT #IN114522 (a quien se agradece), están investigando los procesos diagenéticos e historia térmica de los mantos de carbón en México, para apoyar a la industria productiva del país y al conocimiento científico.

## REFERENCIAS

- Allen, P.A., y Allen, J.R., (2005). Basin Analysis: Principles and Applications, 2nd Edition. Wiley-Blackwell. 560 pp.
- Ayers Jr, W. B., (2002). "Coalbed gas systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River Basins," American Association Petroleum Geologists Bulletin 86, 1853-1890.
- Barker, C.E., S. A., (2001). Coal Bed Methane: From prospect to production. Denver, Colorado: Short Course presented hydrocarbon generation and migration in the Horn Graben in the Danish North Sea: a 2D basin modelling study. International Journal of Earth Science 97, 1087-1100.
- Beha, A., Thomsen, R.O., y Littke, R., (2008b). A rapid method of quantifying the resolution limits of heat-flow estimates in basin models. Journal of Petroleum Geology 31 (2), 167-178.
- Bodden, R.W. III, y Ehrlich, R., (1998). Permeability of coals and characteristics of desorption tests: Implications for coalbed methane production: International Journal of Coal Geology 35, 333-347.
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M. E., Piedad-Sánchez, N., y Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 58(1), 141-160.
- Crosdale, P.J., Basil, Beamish, B., y Valix, M., (1998). Coalbed methane sorption related to coal composition. International Journal of Coal Geology 35, 147-158.
- Diessel, C.F.K., (1992). Coal-bearing Depositional Systems. Springer-Verlag, Berlin. 721 pp.
- Durand, B., y Monin, J.C., (1980). Elemental analysis of kerogens (C,H,O,N,S, Fe). In B Durand, Ed., Kerogen. Insoluble organic matter from sedimentary rocks, p. 113-142. Editions Technip, Paris.
- ECE-UN (1998): International Classification of in-Seam Coals, Economic Commission for Europe Committee on Sustainable Energy, United Nations, New York and Geneva, 1998, ENERGY/1998/19, 41 pp.
- Flores, R.M., (1998). Coalbed methane: From hazard to resource: International Journal of Coal Geology, 35, 3-26.
- Hantschel, T., y Kaueroff, A.I., (2009). Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer. 492pp.
- Hood, A., y Castaño, J. R., (1974). Organic metamorphism: Its relationship to petroleum generation and application to studies of authigenic minerals. Coordinating Comm. Offshore Prospecting Techn. Bull. 8, 85-118.
- Hood, A., Gutjahr, C. C. M., y Heacock, R. L., (1975). Organic metamorphism and the generation of petroleum. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 59, 986-996.
- ICCP. (1993). International Committee for Coal Petrology. International Handbook of Coal Petrography, 3rd Supplement to the 2nd Ed. University of Newcastle upon Tyne, England.
- Kaiser, W. R., Hamilton, D. S., Scott, A. R., Tyler, R., y Finley, R. J., (1994). "Geological and hydrological controls on the producibility of coalbed methane," J. Geol. Soc. London, 151, 417-420.
- Laxminarayana, C., y Crosdale, P.J., (1999). Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals: International Journal of Coal Geology 40, 309-325.
- Lemos de Sousa, M.J., Rodrigues C.F., y Dinis M.A.P., Eds, (2012). O Carvão na Actualidade, Vol 1- Petrology, methods of analyses, classification and resources/reserves assessment, coal in world energy scenario, coal in Portugal, 467 p. Universidade Fernando Pessoa (Portugal). ISBN 978-989-643-103-7.
- Mukhopadhyay, K., H. P., (1993). Composition of coal, in Law, B.E., Rice, D.D., (eds.), Hydrocarbons from coal. AAPG Studies in Geology, 38, 79-113.
- Pagel, M., Barbarand, J., Beaufort, D., Gautheron, C., and Pironon, J., (2014). Bassins sédimentaires: Les marqueurs de leur histoire thermique, Géosphères Collection; edp sciences: www.edpsciences.org, 227 pp.
- Piedad-Sánchez, N., (2005a). Prospección des hidrocarbures par une approche intégrée de pétrographie, géochimie et modélisation de la transformation de la matière organique : Analyse et reconstruction de la histoire thermique des Bassins Carbonifère Central des Asturies (Espagne) et Sabinas-Piedras Negras (Coahuila, Mexique). Tesis de Doctorado. UMR-CNRS G2R/7566-Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Énergétiques. Faculte des Sciences- Université Henri Poincaré- Nancy I. 350 pp.

- Piedad-Sánchez, N., (2005b). Estudio de la Industria del Carbón en la Región Carbonífera del Estado de Coahuila y del cluster del carbón a nivel mundial: Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A., pp. 16-29.
- Piedad-Sánchez, N., Martínez, L., Suárez-Ruiz, I., Alsaab, D., Izart, A., y Milenkova, K., (2005). Estudio preliminar de la estructura del carbón de la Formación Olmos en la Región Carbonífera, Coahuila, México: Convención Internacional de Minería XXVI. Veracruz, Ver. Acta de Sesiones, p. 89.
- Piedad-Sánchez, N., Suárez-Ruiz, I., Martínez, L., Izart, A., Elie, M., y Keravis, D., (2005) Organic petrology and geochemistry of the Carboniferous coal seams from the Central Asturian Coal Basin (NW Spain). *International Journal of Coal Geology* 57, 211-242.
- Rightmire, C. T., Eddy, G. E., y Kirr, J. N. (eds.), (1984). "Coalbed methane resources of the United States," *Am. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geology* 21, 378 pp.
- Rodrigues, C. F. A. (2002). The application of isotherm studies to evaluate the coalbed methane potential of the Waterberg Basin, South Africa. 287 pp.
- Querol-Suñé, F. 2005. Desperdicio del gas grisú en México. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., Convención Internacional de Minería XXVI. Veracruz, Ver. Acta de Sesiones, p. 461-465
- Santamaría-Orozco, D. M., Amezcua Allieri, M. A., y Carrillo Hernández, T. D. J. (2009). Generación de petróleo mediante experimentos de pirólisis: revisión sobre el conocimiento actual. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), 353-366.
- Senftle, J.T., Landis, Ch.R., y MacLaughlin, R.L., (1993). Organic petrographic approach to kerogen characterization. In: Engel, M.H., Macko, S.A. (Eds.), *Organic Geochemistry: Principles and Applications*. Plenum Publishing Corporation, New York, pp. 355–374. Chapter 15.
- Stach, E., Mackowsky, M-Th., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., y Teichmüller, R. (Eds.), (1982). *Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin- Stuttgart, p. 535 pp.
- Suárez-Ruiz, I., y Crelling, J.C. (Eds.), (2008). *Applied Coal Petrology. The Role of Petrology in Coal Utilization*. Elsevier, Amsterdam. 398 pp.
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Filho, J. G. M., y Hackley, P. C. (2012). Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications. *International Journal Of Coal Geology*, 99, 54-112. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.02.004>
- Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R., y Robert, P., (1998). *Organic Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin. 704 pp.
- Teichmüller, M., y Teichmüller, R., (1982). Fundamentals of coal petrology. In: Stach, E., Mackowsky, M-Th., Teichmüller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., y Teichmüller, R. (Eds.), *Stach's Textbook of Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, pp. 5–86.
- Teichmüller, M. (1989). The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology. *International Journal of Coal Geology*, 12(1-4), 1-87.
- Tissot, B.P. y Welte, D.H., (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*, 2 edition. – 669 p.; New York (Springer). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>.
- Vandenbroucke, M., y Largeau, C., (2007). Kerogen origin, evolution and structure. *Organic Geochemistry* 38, 719–833.
- Van Krevelen, D.W., (1993). *Coal: Typology – Chemistry –Physics – Constitution*, 3rd ed. Elsevier, The Netherlands. 979 pp.
- Wilkins, R. W. T., y George, S. C., (2002). "Coal as a source rack for oil: a review," *International Journal of Coal Geology* 50, 317-361.

Manuscrito recibido: 10 de enero de 2024

Manuscrito corregido recibido: 20 de mayo de 2024

Manuscrito aceptado: 3 de junio de 2024

# MODELOS SIMPLES DE CRECIMIENTO POBLACIONAL DESDE LA PERSPECTIVA DE FLUJOS-RESERVORIOS EN LA PLATAFORMA STELLA COMO HERRAMIENTA PARA VISUALIZAR ELEMENTOS QUE REGULAN LOS SISTEMAS DINÁMICOS

Israel Medina-Gómez

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, Universidad Nacional Autónoma de México, Tablaje Catastral N°6998, Carretera Mérida-Tetiz km. 4.5, Municipio de Ucú, Yucatán, México, C. P. 97357

imedgomez@gmail.com

## RESUMEN

El paradigma de desarrollo en curso para muchas poblaciones humanas implica una propagación a expensas del ambiente natural, coincidente con la extinción de las funciones que soportan la integridad funcional de dichos ecosistemas. Los modelos de crecimiento han probado su utilidad en encontrar un equilibrio entre estos procesos, aparentemente excluyentes uno de otro. Sin embargo, cierta dificultad para entender y manejar de manera amplia este tipo de representaciones abstractas ha impedido su amplia adopción en la resolución de problemáticas actuales, conducentes a advertir y ajustar límites al crecimiento, evitando tendencias no sostenibles. El objetivo del presente estudio es examinar mediante el sistema STELLA<sup>(R)</sup> los fundamentos de algunos modelos sencillos de crecimiento poblacional de larga tradición en la biología: lineal, exponencial y logístico. Con base en una perspectiva de flujos y reservorios, se pretende apoyar la comprensión de estos modelos y contribuir a consolidar un marco conceptual indispensable para el análisis crítico de los cambios en poblaciones silvestres. Al mismo tiempo, es importante estar conscientes de los supuestos y limitaciones que esta experiencia puede conllevar. Finalmente, se demuestra cómo un modelo relativamente complejo de poblaciones estructuradas puede simplificarse, tanto en su construcción como en su funcionamiento, si se lo encuadra en la perspectiva de flujos y reservorios, sin perder su capacidad para dar predicciones provisionales y con la ventaja adicional de ser un instrumento pedagógico.

**Palabras clave:** Sustentabilidad, crecimiento, modelos, recursos, formación educativa.

## ABSTRACT

*Classic growth models in biology were addressed to provide a conceptual framework for critical assessment of wild populations' changes. By leveraging this body of knowledge, it is intended to understand current trends in human population's development, very often to the expenses of an increasing severity in the ecosystem's disturbance regime. Such a dynamic modeling approach will enhance our capability to solve sustainability issues ubiquitously experienced in today's cities and along the rural/urban interface. This paper focuses in offering the students with flexible analytical tools, contributing to their overall pedagogical formation and encourage them to be at the forefront of discussion panels tackling current challenges regarding growth limits and untenable expansion schemes. Such an informed background improves the cities inhabitants' ability to engage into an assertive and impactful participation to overcome resources depletion in the verge of climate change, while paying attention to key local-scale processes.*

**Keywords:** Sustainability, growth, models, resources, pedagogic formation.



## INTRODUCCIÓN

Es urgente una revisión crítica del esquema de crecimiento actual de las poblaciones humanas bajo una óptica de sostenibilidad que prevea el impacto que generará en el entorno ambiental. Este postulado ofrece una oportunidad para la reflexión sobre la viabilidad de nuestras poblaciones a escala local, al tiempo que brinda también un marco analítico para vislumbrar posibles vías de adaptabilidad en el umbral del cambio climático. Esta tendencia global someterá a los sistemas artificiales y naturales a una serie de perturbaciones que pondrá a prueba nuestra sobrevivencia en la era del Antropoceno.

Cabe hacer aquí una distinción entre los tipos de sistemas antes mencionados. Los sistemas artificiales se caracterizan porque la infraestructura humana se implementa sin vislumbrar la alteración sobre ciclos fundamentales (agua, carbono, nutrientes). Los sistemas naturales, por su parte, son aquellos donde los procesos en curso han sido moldeados por patrones históricos que definen el estado de salud y la integridad del conjunto de ecosistemas que los constituyen. En síntesis, este último tipo de sistema se establece sobre una serie de efectos acumulados materializados en tasas y magnitudes cuyos patrones modulan trayectorias de largo plazo, mientras que en los sistemas artificiales se suele ignorar el régimen de perturbaciones en favor de un desarrollo acelerado, en el cual usualmente se carece de visión a largo plazo.

Algunas experiencias recientes se han adelantado a aquellas proyecciones de corto y mediano plazo, la cuales solían reconocer efectos perniciosos en la calidad de vida de las poblaciones humanas, directamente derivados del cambio climático, en virtud de emergencias sanitarias asociadas con el incremento de enfermedades infecciosas y deterioro de la salud por el empobrecimiento en la calidad del aire. De igual modo, el estrés térmico a consecuencia de altas temperaturas está ligado con alteraciones del ciclo hidrológico.

Las implicaciones que supone esta ruptura en los flujos y reservorios de ciclos biogeoquímicos fundamentales no se conocen a cabalidad en muchos casos. Por otra parte, la amenaza que pudiera agredir la seguridad alimentaria es una preocupación latente. Con todo, el sistema acoplado océano-atmósfera regula perturbaciones del ciclo del agua mediante mecanismos de retroalimentación y, con ello, tiene la capacidad de modular las oscilaciones climatológicas interanuales asociadas con patrones de la temperatura global (El Niño-Oscilación del Sur). Sin embargo, ya se proyecta un costo entre  $2-4 \times 10^9$  U.S dólares por estragos directos en salud humana, con mayor vulnerabilidad para regiones del planeta en vías de desarrollo, expuestas a pésimas condiciones de infraestructura y educación sanitaria (WHO, 2023).

Pese a que la capacidad de ruptura ambiental no es homogénea entre las poblaciones del mundo, y por ello el cambio climático no debe reducirse a argumentos puramente demográficos, el entorno prevaleciente exige revisar las tendencias de desarrollo, en las cuales la economía se basa en el consumo indiscriminado de recursos naturales, sin reparo de las externalidades (costos transferidos a grupos sociales diferentes de aquellos que los generaron, o a generaciones futuras) que acumule el medio ambiente.

Este replanteamiento a favor de esquemas sustentables habrá de privilegiar un crecimiento de las poblaciones humanas acoplado con la función y estructura del entorno natural. De acuerdo con lo anterior, esta antítesis del método actual se enfoca en fomentar procesos que refuercen la integridad de los ecosistemas y en evaluar los numerosos cambios que registren las poblaciones silvestres, contrastando con la tendencia de crecer a expensas de ellos sin reponer lo tomado.

Eventos recientes hacen cada vez más difícil ignorar las voces de alarma que ya se manifestaban a mediados del siglo pasado, concernientes al ascenso de los niveles de dióxido de carbono en nuestra atmósfera y al hecho de que dicho patrón estaba asociado con actividad antrópica (Mcleod *et al.*, 2011). La noción de límites al crecimiento de la población humana fue examinada hace ya más de cinco décadas por el grupo Instituto de Tecnología de Massachusetts en uno de los trabajos clásicos sobre el tema (Meadows *et al.*, 1972).

## PROPUESTA

La enseñanza de las matemáticas y la estadística en instituciones de educación superior experimenta una evolución continua, en consonancia con los desafíos que surgen de la relación entre humanos y naturaleza. Este escenario implica un contexto cambiante de forzamientos sobre los sistemas socio-ecológicos, de los cuales formamos parte. Considerar la aproximación de modelos dinámicos complementaría la formación del alumnado en facultades de ciencias de la Tierra porque se aprovecharía la perspectiva para el análisis de sistemas para la interpretación objetiva de sus respuestas.

El servicio que han prestado las técnicas estadísticas y las funciones matemáticas a la descripción, análisis y predicción del comportamiento de estos sistemas es vasto. La obra de autores como May, Margalef, Odum y Meyr (1973, 1977, 2006 y 2016, respectivamente) es esencial y conforma la integración de diferentes áreas de la ciencia para presentar un amplio panorama que facilite la explicación de procesos complejos, al mismo tiempo que ofrece un marco coherente para evaluar posibles soluciones a aspectos elusivos del funcionamiento de los sistemas ecológicos.

El uso de modelos ecológicos puede llenar los vacíos que la interdisciplinariedad pueda llegar a generar, así como establece las bases de un enfoque transdisciplinario que presente un *corpus* conceptual con premisas comunes sobre el sistema complejo en estudio. Los cuerpos colegiados y las instituciones de educación superior de la región participan del mismo.

La justificación del presente estudio es la necesidad de participación de diferentes sectores de la sociedad que comprendan y se interesen por la naturaleza dinámica de los ecosistemas que se localizan no sólo a lo largo del paisaje silvestre, sino en los alrededores de las áreas urbanas que las mismas sociedades habitan.

Esta propuesta parte de una exposición de los fundamentos de modelos clásicos empleados en biología (modelo lineal, crecimiento exponencial y logístico), al igual que sus limitaciones y su relación con el método de análisis STELLA<sup>(R)</sup>. Ese sistema es flexible y al alcance de cualquier nivel educativo.

El motivo de estudiar el uso de modelos de crecimiento radica en su utilidad para el análisis de problemas relacionados con el crecimiento de poblaciones silvestres (aunque no limitado a dichas poblaciones), visualizándolos como un sistema dinámico y enfocando la atención en el modo en que evoluciona con el paso del tiempo (Gillman y Hails, 1997). Este bagaje conceptual y analítico nos ayuda a contestar una pregunta fundamental que subyace en la ciencia: ¿cuál es el futuro de las poblaciones? o ¿hasta qué punto es posible considerar una tendencia creciente antes de que el sistema dé señales inequívocas de que se ha alcanzado un límite insostenible?

Los modelos de crecimiento proveen una plataforma que permite profundizar en el análisis de relaciones fundamentales entre sistemas y variables exógenas. Con ello se pretende comunicar estas herramientas con la mayor transparencia posible y de manera relativamente simple con el ánimo de inspirar a los estudiantes a mirar con esta perspectiva el sistema que tengan frente a sí. De igual modo, es del mayor interés transmitir los elementos esenciales de dicha aproximación hacia una amplia audiencia más allá de las aulas, ya que todos los usuarios de estos ambientes tienen una perspectiva distinta y valiosa que aportar. Sin embargo, la falta de un punto de convergencia funcional en ocasiones dificulta una comunicación legible para todos los sectores. Esta peculiaridad ha jugado en contra del avance en soluciones alternativas viables para el desarrollo de diversas regiones de América Latina (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2023).

## MÉTODOLÓGÍA

En este estudio se presenta una descripción abstracta y simplificada de ciertos sistemas, a fin de desentrañar patrones de cambio poblacional bajo diferentes supuestos, comprendidos en una aproximación de modelación determinística, es decir, sin considerar el carácter fortuito del comportamiento de forzamientos y parámetros (aproximación estocástica).

Además de formalizar la expresión matemática de cada ecuación de crecimiento, se complementa la exposición mediante una estructura descrita por diagramas de reservorio y flujo. Estos componentes fueron representados cada uno como elemento funcional en la interface del sistema STELLA<sup>®</sup>:

<https://www.iseesystems.com/store/products/stella-online.aspx>

Las variables de estado son un reservorio (*stock*) por cuanto acumulan (o drenan) materiales o elementos en función del tiempo, mientras que los flujos son aquellos procesos que instrumentan una entrada y/o salida del material o elementos en cuestión. El reservorio representa la cantidad de interés que cambia en función del tiempo (crece o decrece) y puede por tanto considerárselo como un acumulador al transcurrir el tiempo. Por su parte, el flujo constituye aquellos procesos que concretan el aumento o, en su defecto, el declive del reservorio a cada ciclo que se verifica en el tiempo ( $\Delta t$ ). En cierto sentido, los flujos representan la parte dinámica de esta estructura, mientras que el reservorio es la parte que acumula/drena en/desde el sistema como resultado de dichos flujos.

Es importante hacer notar que para el presente análisis se dispuso de una descripción de modelos de crecimiento biológico simples, que en el terreno de la teoría ecológica se concentran en el desarrollo de una sola especie, incluyendo casos de natalidad/mortalidad independientes del tamaño poblacional (representación lineal), donde la población  $N$  multiplica el coeficiente intrínseco de incremento natural  $R$  (caso exponencial), o bien ilustrando umbrales y puntos de inflexión en su comportamiento variable, lo cual refleja fundamentalmente el efecto denso-dependiente (modelo logístico) sobre la tasa de crecimiento poblacional  $dN/dt$  como  $R$  que denota el cambio per cápita sobre el tamaño poblacional.

De acuerdo con lo anterior, se discuten capacidades y limitaciones de las ecuaciones de crecimiento descritas por estas curvas en función del tiempo. Posteriormente, mediante un ejemplo con subpoblaciones (categorías de edad) de una especie de herbívoro, se expone la manera en que el ajuste de dichas ecuaciones puede aproximarse a la perspectiva de flujos y reservorios usando datos "reales" en la plataforma STELLA<sup>®</sup>. El análisis de los resultados de la simulación permite encontrar los atributos de edad específicos de las poblaciones bajo estudio que modulan los patrones de crecimiento observados.

### Crecimiento lineal y aplicaciones en poblaciones denso-dependientes

El crecimiento lineal ha servido para explicar una gran variedad de casos y su importancia radica en la necesidad de calcular cómo será el crecimiento en un futuro a partir del cambio sostenido (tasa y pendiente, también denominado gradiente, y otros) en la natalidad y la mortalidad ( $n$  y  $m$ , respectivamente). La expresión matemática que ejemplifica este caso de cambio en el tiempo o crecimiento es  $dN/dt = n - m$ . La integración de dicha ecuación de cambio conduce a la línea recta  $N(t) = (n - m)t + C$ , donde se simplifica  $n - m = R$  para un  $\Delta t$  definido, y se tiene:  $N(t) = Rt + C$ .

El diagrama STELLA sintetiza estas relaciones, de tal modo que el flujo de  $R$  está determinado por el balance dinámico entre insumos ( $n$ ) y egresos ( $m$ ; Figura 1a). Esta ecuación de crecimiento brinda una perspectiva útil en casos en los que el cambio en el tamaño de la población está fuertemente determinado por el aprovechamiento de los recursos que dicha población obtiene con regularidad. Así, el crecimiento describe un comportamiento constante si los recursos son abundantes y sin límite aparente —no hay competencia por ellos. Dicho escenario define un cambio de la población limitado solamente por su capacidad (fisiológica) de allegarse de elementos nutricios, por un lado, y por sus tasas intrínsecas de natalidad y por la expectativa de vida, por el otro. Esto quiere decir que factores como la densidad no tienen, en principio, un significado regulatorio.

Acorde con dicho patrón de crecimiento, la magnitud de los cambios para cada intervalo fijo de tiempo ( $\Delta t$ ) es estrictamente igual (denominada como *primera diferencia* entre dos puntos adyacentes a lo largo de la secuencia de valores que adquiere el tamaño poblacional). Esta *primera diferencia* recurrente es un arreglo característico de la relación lineal y corresponde a la magnitud del gradiente de la relación entre ambos conjuntos: tiempo y tamaño poblacional (Postigo, 1983).

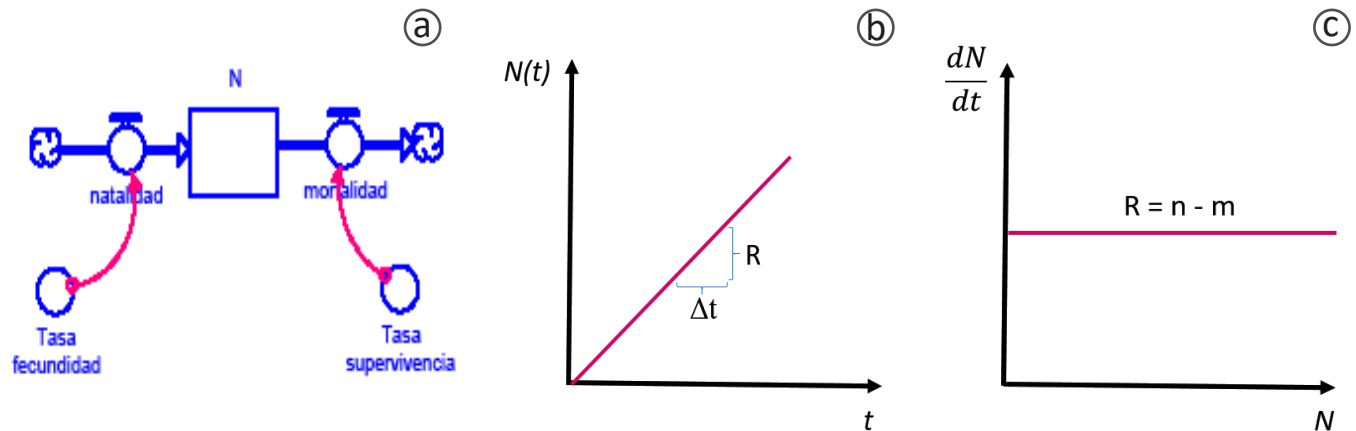


Figura 1. Diagrama flujo-reservorio (a), cambio del tamaño poblacional (b) y tasa de crecimiento vs. población –primera derivada (c), aplicado en este caso al flujo lineal per cápita ( $R = natalidad - mortalidad$ ) que ilustra su efecto en el patrón dinámico de la densidad poblacional como reservorio bajo un supuesto no-densodependiente.

**Crecimiento exponencial con capacidades y limitaciones**

Sin embargo, asumir el crecimiento lineal como expresión realista es, en ciertos casos, poco práctico. Es intuitivo que las condiciones que enfrentan las poblaciones durante su desarrollo son cambiantes y emergen, en ocasiones, abruptamente (condiciones internas del individuo que se reflejan como fluctuaciones en rasgos tales como fecundidad, o a nivel poblacional como migración, dispersión, o bien factores externos asociados con el clima, como la provisión de alimentos). Así, puede haber años “buenos” o “malos” como se dice coloquialmente.

La dependencia de estos factores obliga a reconocer un comportamiento variable del crecimiento en función del tiempo, regulado por una reducción en la natalidad y/o por alteraciones en la mortalidad ( $n$  y  $m$ , respectivamente). De aquí se desprende que los valores de la primera diferencia (entre puntos adyacentes en la evolución de valores que adquiere el tamaño poblacional,  $N$ ) ya no es exactamente el mismo entre puntos  $\Delta t$  consecutivos, como sí era en el caso lineal (la tasa de cambio en  $N$  es distinta en función del tiempo,  $t$ ). De hecho, el tamaño que registre la población al transcurrir el tiempo está representado por un valor cuya tasa de cambio es proporcional al tamaño poblacional previo, un aspecto que contradice la relación lineal antes descrita.

Conviene entonces incluir un efecto modificador –convertidor– del flujo que sea capaz de albergar la tasa variable a la que está sujeto el crecimiento exponencial (tasa de crecimiento per cápita  $R$  en el exponencial, o capacidad de carga en el crecimiento logarítmico; Figuras 2a y 3a, respectivamente). La denominación de *convertidor* corresponde al objeto designado por el sistema STELLA<sup>®</sup> para ejercer tal función y constituye un rasgo de la flexibilidad de esta plataforma para dotar con mayor realismo la dinámica del sistema bajo estudio.

La integración de la función de crecimiento exponencial está representada por:

$$N = N_0 e^{Rt} \tag{Ec. 1}$$

No hay que olvidar que la tasa de crecimiento per cápita es  $R = n - m$ .

Pensemos en un proceso como la dinámica de una población bacteriana que se cultiva en una caja de Petri. En tanto el medio de cultivo provea una plataforma y nutrientes para alimentar a las colonias en desarrollo, la población mantendrá un franco crecimiento. Otro ejemplo que ha sido también abordado con la función exponencial (en este caso una de tipo negativo) es el que plantea el reciclaje de nutrientes en manglares, cuyo patrón de cambio está descrito por el decaimiento del material orgánico en los suelos de estos ecosistemas inundables:

$$y(t) = C_0 e^{-Kt} \tag{Ec. 2}$$

El procesamiento de materia orgánica ( $y$ ) en función del tiempo ( $t$ ) está fuertemente controlado por comunidades de detritívoros, entre los cuales figuran bacterias heterotróficas, protozoarios y conjuntos de hongos que descomponen el rico aporte ( $C_0$ ) que caracteriza a estos bosques costeros y lo reducen a fragmentos con una tasa constante de decaimiento ( $K$ ) por día (el intervalo de tiempo al que alude  $t$ ). El aporte de material así fragmentado puede ser más tarde consumido por organismos filtradores que merodean los ecosistemas vecinos (Pradisty *et al.*, 2021).

**La ecuación logística para explorar patrones de crecimiento: crecimiento poblacional denso-dependiente**

Avanzando hacia una descripción más realista, es necesario incorporar un control al crecimiento poblacional, en este caso gobernado por la densidad. Nos disponemos por lo tanto a instrumentar una tasa de crecimiento per cápita densodependiente,  $R = f(N)$ . De acuerdo con lo anterior, los preceptos del crecimiento logístico cumplen con acreditar un límite a la expansión de  $N$ , en contraste con el patrón de crecimiento exponencial, el cual que al no estar acotado en su límite superior no explicaba del todo nuestra propia noción de límites al crecimiento (Figura 2c).

El patrón descrito por la ecuación logística marca una fase de crecimiento, seguida por una nivelación que alcanza eventualmente una asíntota, definiendo la forma en *S* característica del comportamiento logístico o *sigmoide*. Dos parámetros clave que integran la ecuación logística de cambio poblacional son la tasa intrínseca de crecimiento ( $r$ ) y la capacidad de carga ( $K$ ):

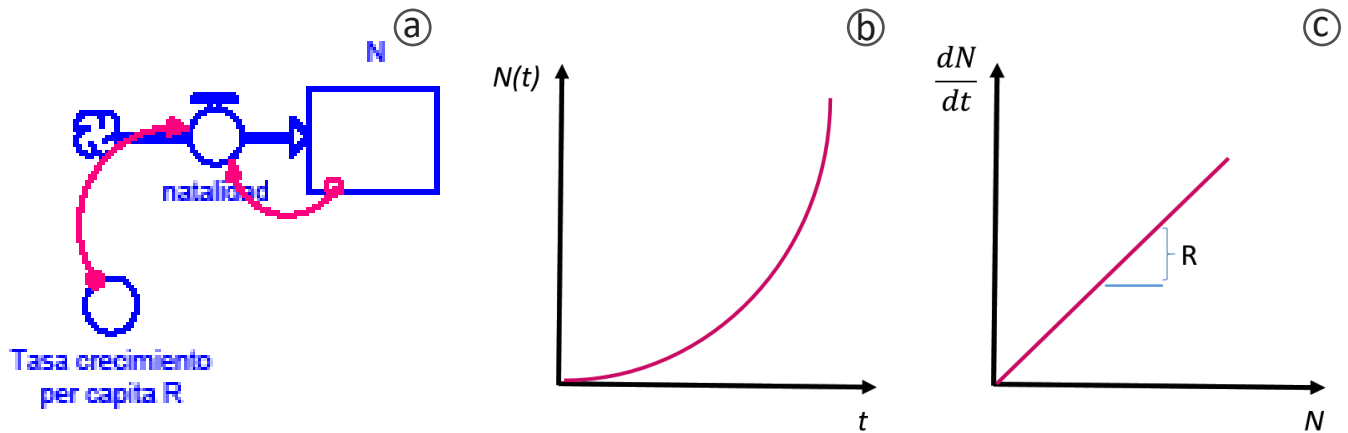


Figura 2. Diagrama flujo-reservorio (a), cambio del tamaño poblacional (b) y tasa de crecimiento vs. población –primera derivada (c) para la relación exponencial del flujo lineal per cápita ( $R = natalidad - mortalidad$ ) con un efecto sobre el reservorio que es proporcional a la densidad poblacional. El círculo del diagrama (a) se denomina *convertidor* y representa un elemento que añade lógica al modelo (tasa de supervivencia). Dicho convertidor conecta (y en cierta forma modifica) los flujos con los reservorios mediante líneas de acción (flechas rojas). Estos objetos son componentes y operaciones propios del sistema STELLA (*see systems*).

$$\frac{dN}{dt} = rNt \left(1 - \frac{Nt}{K}\right) \quad \text{Ec. 4}$$

De acuerdo con lo anterior, la reducción progresiva del lado derecho de la ecuación logística conforme el tamaño de la población  $N$  se incrementa hasta equipararse con  $K$ , constituye un punto de equilibrio materializado por  $1 - (N/K) = 0$ , cuando  $N=K$ .

La diferencia entre  $N$  y  $K$  (consignada por el convertidor *dif* de la Figura 3a) se evalúa en cada ciclo (año) y corresponde al tamaño de la población actual con respecto al límite teórico que el sistema o hábitat puede soportar antes de colapsar ( $K$  o capacidad de carga). Es importante destacar que  $K$  es un parámetro particular de cada hábitat y puede cambiar con el tiempo. A medida que el tamaño de la población se aproxima a la densidad de equilibrio  $K$ , la diferencia (porción del lado derecho de la ecuación dentro del paréntesis) tiende a cero, indicando que ya no existe posibilidad de incremento.

Esta configuración ejemplifica la flexibilidad de los diagramas flujo/reservorio para establecer con nitidez el papel que ejercen factores adicionales en la evolución de sistemas multivariados. Dicho formato supone un diseño que resulta ilustrativo en términos de las conexiones, umbrales, puntos de inflexión y mecanismos de retroalimentación que inciden en el control dinámico del sistema de manera integral.

La aplicación de esta descripción matemática denota un arribo sin oscilaciones de la densidad de equilibrio poblacional hasta alcanzar  $K$ . Su implementación ha sido prolífica, particularmente en ramas de la ciencia dedicadas al análisis del manejo sustentable de recursos, cuyo suministro es clave para el desarrollo de las sociedades (stocks de pesquerías y explotación de áreas cultivables). En este ámbito, la ecuación de crecimiento logístico ha ayudado a examinar esquemas de aprovechamiento responsable de recursos, para alcanzar el punto que maximice el retorno del esfuerzo invertido en la actividad extractiva (cosecha sustentable) sin agotar las tasas naturales de renovación (*turnover*) del propio recurso en el largo plazo.

**Crecimiento de poblaciones estructuradas: Matriz de Leslie para proyectar cambios en la distribución de edades**

La descripción abstracta y simplificada del comportamiento dinámico en una población nos permite identificar los factores clave detrás de dichos patrones temporales. No obstante, cuando se tiene enfrente un sistema complejo, los supuestos se tornan cada vez más restrictivos en cuanto a los resultados de las simulaciones y la capacidad de descripción o predicción puede verse sustancialmente mermada. Es preciso evaluar en este punto cuánta eficacia se está dispuesto a sacrificar con nuestro conjunto de supuestos, para entonces considerar incrementar ligeramente la complejidad de nuestro modelo en favor de una aplicabilidad mayor. En ecología, este concepto se conoce como resolución del modelo (Odum, 2006) y se refiere al conjunto de compartimentos que contempla en un sistema concatenado (como las clases edad, el número de fases larvarias o los tamaños diferentes de productores primarios).

El incremento del nivel de resolución en el modelo es una opción que cada usuario debe considerar, fundamentalmente, bajo el criterio de que integrar este tipo de comportamiento dinámico en varias subpoblaciones simultáneamente le permitirá adquirir una comprensión más profunda del sistema, aunque a expensas de mayor complejidad. Aunque esto implica resolver un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales, el sistema STELLA<sup>(R)</sup> deja la configuración de los objetos que constituyen el modelo al usuario y resuelve dichas ecuaciones detrás de la interface (*background*), facilitando tanto la representación como la resolución de dicho sistema de ecuaciones.

Adicionalmente, para ilustrar el comportamiento de crecimiento en poblaciones discretas (aquellas que se distribuyen en grupos discretos de edad y donde el tiempo y la edad biológica avanzan en escalones determinados, como ciclos anuales, bienales, etc.), nos apoyamos en un tipo especial de estructura llamada matriz de Leslie, diseñada para predecir cambios en el tamaño de la población:  $N_{t+1} = AN_t$ , donde  $A$  es una matriz (arreglo numérico bidimensional constituido por elementos que se distribuyen en  $m$  columnas y  $n$  renglones; es denominada cuadrada cuando  $m=n$ ) con coeficientes positivos que describen las probabilidades de transición entre clases de edad (la primera fila de dicha matriz contiene las tasas de

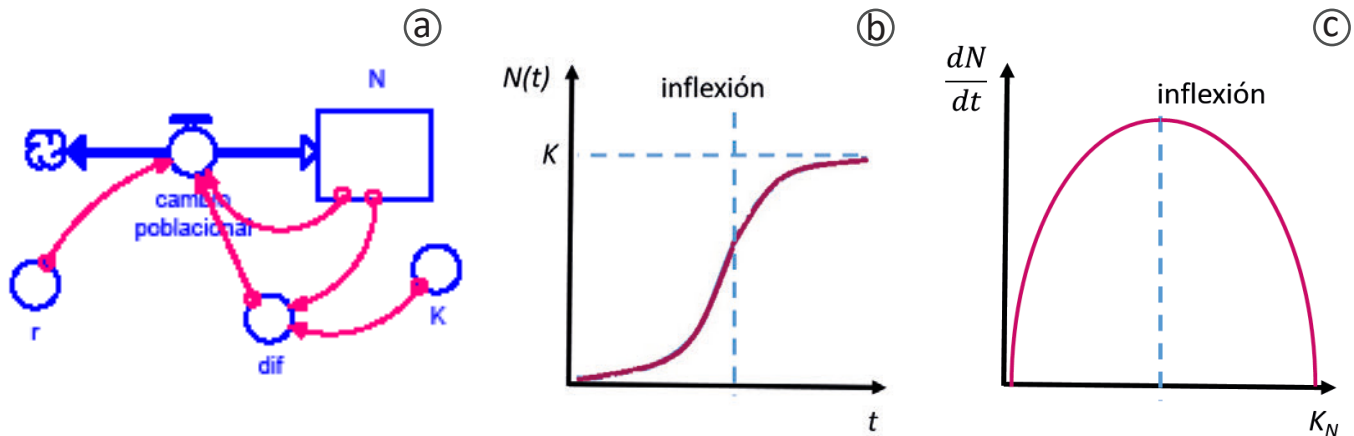


Figura 3. Diagrama flujo-reservorio (a), cambio del tamaño poblacional (b) y tasa de crecimiento vs. población –primera derivada (c) que describen el comportamiento logístico con límite superior al crecimiento. El círculo del diagrama (a) se denomina *convertidor* y representa un elemento que añade lógica al modelo ( $K$ , capacidad de carga). Dicho convertidor conecta (y en cierta forma modifica) los flujos o los reservorios mediante líneas de acción (flechas rojas). Estos objetos son componentes y operaciones propios del sistema STELLA (*see systems*).  $K$  controla el crecimiento del tamaño poblacional y confiere un carácter denso-dependiente al reservorio.

reproducción correspondiente a cada clase de edad). En la diagonal principal se encuentran las probabilidades de permanencia en la misma etapa con el paso del tiempo (supervivencia) y en la diagonal secundaria inferior (diagonal adyacente por debajo de la diagonal principal) las probabilidades de transición entre una etapa y otra (crecimiento). Asimismo, este arreglo incluye el vector poblacional  $N_t$  cuyos constituyentes denotan el número de individuos en las distintas clases de edad que contempla el modelo para cada tiempo ( $t$ ).

Este arreglo matricial permite una resolución de las incógnitas que subyacen en las ecuaciones usando álgebra lineal. Aunque el cálculo implica operaciones matriciales que pueden realizarse numéricamente (en ambiente R u hojas de cálculo Excel, por ejemplo) dicho cómputo puede de igual modo efectuarse siguiendo el enfoque del presente artículo, es decir, usando diagramas de flujo-reservorio.

El diagrama correspondiente y los resultados de la simulación del comportamiento dinámico de una población discreta de hembras de venado cola blanca se presentan en la Figura 4a. El foco en hembras del modelo Leslie se debe al peso específico de estos individuos para la población, ya que engendran nuevos individuos y usualmente mantienen una proporción estable dentro de la población total. Para nuestro modelo decidimos explicar los cambios anuales en el tamaño poblacional cifrados en el nacimiento de cervatillos (progenie) que se suman (*input*) al grupo más joven de la población (categoría de edad de 0-2 años) y en las tasas de mortalidad específicas por edad (*output*).

Todas las hembras de la población de venados son capaces de procrear desde los dos años, mientras que las tasas de natalidad y mortalidad comprenden un arreglo que varía en función de la transición de una categoría de edad a la siguiente (estado de maduración en el contexto de este artículo). Es importante recordar que se está tratando con una población discreta, donde los parámetros se proporcionan separadamente y son particulares de cada categoría de edad (edad-específico). Esta configuración permite un seguimiento de la variabilidad poblacional, reconociendo procesos potencialmente críticos para el desarrollo de los individuos

en etapas vulnerables (esto ilustra el beneficio de considerar reservorios separados para cada etapa). El resultado de una súbita disminución durante dichas etapas radica en la inestabilidad que podrían inducir en el tamaño poblacional neto.

Para ejemplificar un escenario correspondiente podría considerarse la reducción en la producción de individuos juveniles como consecuencia de cierta enfermedad infecciosa contagiada de la madre al cervatillo. Esta perturbación diezmaría la población, toda vez que los adultos morirían a una tasa fija, pero con una sustitución de individuos jóvenes (reclutamiento) que mengua progresivamente y que ya no alcanzaría la fase adulta/reproductiva. En este contexto, las matrices de sensibilidad para investigar el efecto proporcional que la variación en tasas edad -o estadio- específicas de supervivencia ejercen sobre la matriz de proyección poblacional constituyen una valiosa herramienta (Caswell, 2001). Dicha técnica de análisis demográfico ha sido ampliamente socorrida para la estimación cuantitativa (extensión superficial del paisaje destinada a la protección) y cualitativa (selección de hábitat ontogenético para completar el ciclo de vida de la especie en cuestión) de áreas protegidas y evaluar la eficacia de un determinado plan de conservación para fomentar el crecimiento anual de especies clave, al tiempo que se reconoce su historia de vida (Gerber y Heppell, 2004).

Los resultados del modelo de la Figura 4 indican un decremento de la tasa de cambio para todas las subpoblaciones (Figura 4b). El comportamiento dinámico descrito por cada categoría de edad es consistente con el decaimiento sostenido del tamaño total de la población (Figura 4c). Una prolongada latencia en la capacidad reproductiva para esta especie, que pospone hasta los dos años la activación de la fecundidad que incorporaría nuevos individuos cada año, y la tasa edad-específica de supervivencia más baja para esta vulnerable sub-población entre 0-2 años (~50 % de probabilidad de morir o persistir) contribuyeron a un gradual abatimiento anual del tamaño poblacional (Figura 4c).

Aunque dichas peculiaridades demográficas parecen aproximarse a un valor crítico en la magnitud del reclutamiento que pudiera causar el colapso en la población, éste no ocurrió dentro de

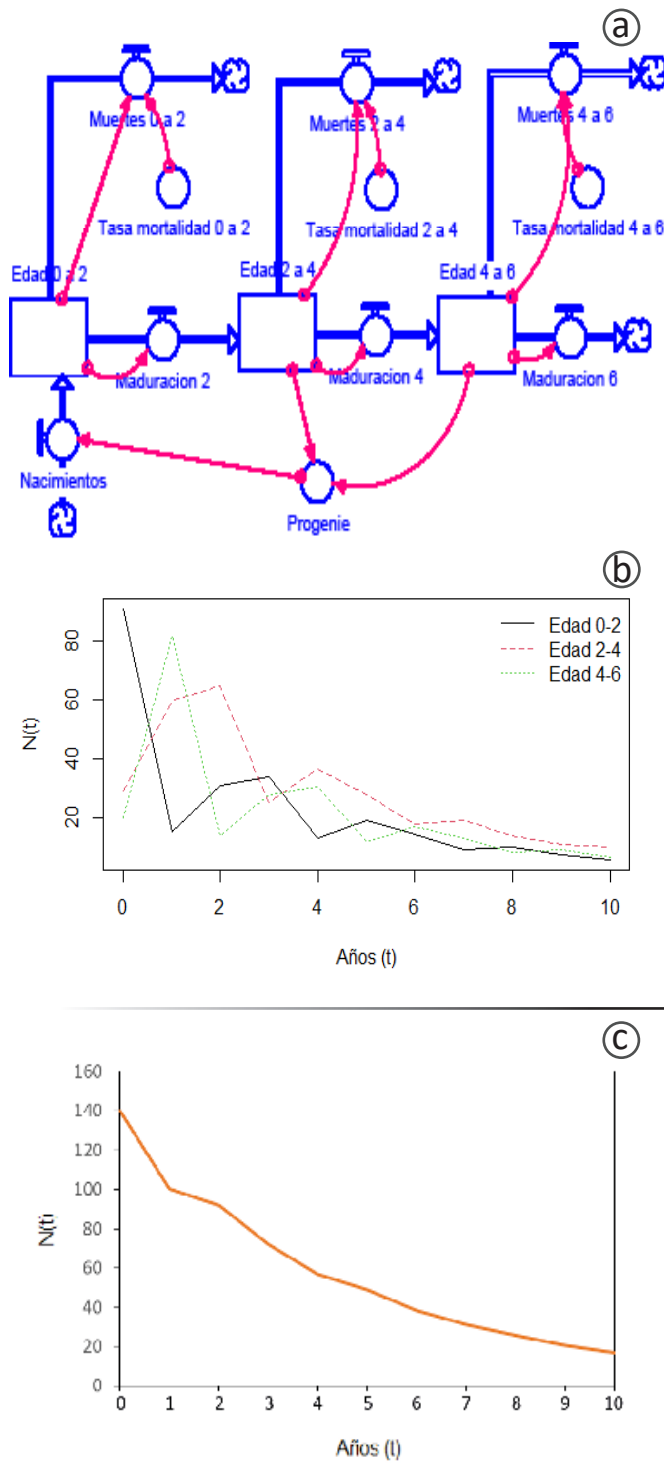


Figura 4. Cambio en la población de venados hembra desde edad cero a seis años compartimentalizada en tres clases de edad (cada categoría está acotada mediante rasgos poblacionales específicos indicados en el diagrama) para un período de simulación de 10 años con  $\Delta t = 1$  año. El flujo de entrada (*input*) a la población de venados se implementa en el modelo con una descendencia al nivel de individuos de dos años en adelante. Diagrama de flujos y reservorios en STELLA (a), gráfica con curvas de cambio poblacional para cada categoría de edad (b) y gráfica con curva de cambio para el total  $N$  (todo el conjunto de poblaciones) de venados (c).

la década de simulación (Figura 4c). Con todo, la tendencia negativa que describe el cambio poblacional indica la eventual consumación de este resultado. Como se mencionó anteriormente, herramientas clásicas de análisis demográfico como las matrices de sensibilidad y elasticidad podrían dar luz sobre el cambio poblacional inducido por ligeras variaciones en tasas vitales y, con esa evidencia, mejorar la prognosis del crecimiento o reducción en la población.

## CONCLUSIONES

La perspectiva de sistema dinámico se suma al conjunto de herramientas disponibles para la valoración crítica de problemáticas mediante una vía flexible enfocada al entendimiento de mecanismos de retroalimentación y regulación que atañen de manera general a sistemas complejos. Asimismo, dicha aproximación apoya, a través de una visualización relativamente sencilla, la expresión local de los factores que subyacen a estos mecanismos amortiguadores, contribuyendo a facilitar la elaboración de hipótesis orientadas a analizar soluciones viables para el estrés ecológico que resulte de perturbaciones naturales o antrópicas.

También ofrece una plataforma para incentivar a los estudiantes durante su formación a incidir asertivamente en las discusiones orientadas a tratar la mitigación y adaptación a tendencias globales de cambio. Asimismo, los elementos básicos que se aplicaron usando la plataforma STELLA<sup>(R)</sup> ofrecen una pauta para que tanto estudiantes como profesores indaguen sobre las implicaciones de la extracción de recursos y vislumbren los problemas de largo plazo que suponen el dispendio y explotación, en el contexto de fenómenos consistentes con cambios a escala global, si bien conciliando sus expresiones locales.

## AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Mérida, por permitirme impartir cursos de ecología como profesor de asignatura en sus Licenciaturas de Ciencias de la Tierra, Ecología y Ciencias Ambientales, en las cuales elaboré parte de los materiales que constituyen la raíz del presente manuscrito. Mi sincero reconocimiento también a los revisores, por disponer parte de su valioso tiempo para realizar un meticuloso análisis del manuscrito original y de las versiones ulteriores. Sus observaciones en torno al planteamiento conceptual de los diferentes modelos de dinámica poblacional fueron profundamente aleccionadores. Les estoy sumamente agradecido porque en el proceso de acreditar e implementar cada corrección, este manuscrito elevó notablemente su calidad.

## REFERENCIAS

- Caswell, H. (2000). Matrix population models: construction, analysis and interpretations. Sunderland, Sinauer Associates Inc. 722 pp.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2023). América Latina y el Caribe en la mitad del camino hacia 2030: avances y propuestas de aceleración. (Informe n° 6). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48823-america-latina-caribe-la-mitad-camino-2030-avances-propuestas-aceleracion>
- Gerber, L. y Heppell, S. (2004). The use of demographic sensitivity analysis in marine species conservation planning. Biological

- Gillman, M. y Hails, R. (1997). *An Introduction to Ecological Modelling Putting Practice into Theory*. Wiley Blackwell. 216 pp.
- iseesystems: página consultada el 12 de junio de 2024:  
<https://iseesystems.com/store/products/stella-online.aspx>
- Margalef, R. (1977). *Ecología*. Segunda Edición. Ediciones Omega, SA Barcelona, España. 951 pp.
- May, R. M. (1973). Qualitative Stability in Model Ecosystems. *Ecology*, 54(3), 638–641. DOI: 10.2307/1935352.
- Mayr, Ernst (2016). *Así es la biología*. Ed. DEBATE. 434 pp.
- Mcleod, E., Chmura, G., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C., Lovelock, C. Schlesinger, W. y Silliman, B. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9. DOI:10.1890/110004
- Peter J. M. (2011). *Community Ecology*. Wiley-Blackwell.
- Odum, E. P. (2006). *Fundamentos de Ecología*. Ed. Cengage Learning Editores, S.A. 613 pp.
- Postigo, L. (1983). *Matemáticas*. Ed. Hispania–Sopena. 917 pp.
- Pradisty, N. A., Amir, A. A. y Zimmer, M. (2021). Plant species- and stage- specific differences in microbial decay of mangrove leaf litter: the older the better? *Oecologia*, 195: 843-858. DOI: 10.1007/s00442-021-04865-3
- World Health Organization (12 de octubre de 2023). Climate change. Recuperado el 15 de noviembre de 2023 de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health#:~:text=Research%20shows%20that%203.6%20billion,diarrhoea%20and%20heat%20stress%20alone>.

Manuscrito recibido: 29 de marzo de 2024

Manuscrito corregido recibido: 4 de junio de 2024

Manuscrito aceptado: 12 de junio de 2023



Divulgación de la ciencia en la Escuela Primaria Ignacio Zaragoza, PeñaMiller, Querétaro. Cid-Villegas, 2024. p. 5-10.



ENSEÑANZA  
COMUNICACIÓN  
GEOCIENCIAS

