ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS

Volumen 3, número 2, diciembre 2024

Fuente: Control de Ozono en la Ciudad, Unidades de Apoyo para el Aprendizaje. Centro de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.

DIRECTORA DE GESTIÓN EDITORIAL

Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez
alaniz@geociencias.unam.mx
Instituto de Geociencias, campus Juriquilla
Universidad Nacional Autónoma de México

EDITORES EN JEFE

Sección Enseñanza
Dr. Alexis Del Pilar Martínez
adelpilar@geologia.unam.mx
Instituto de Geología, ERNO
Universidad Nacional Autónoma de México

Sección Comunicación
Dr. Rodrigo Gutiérrez Navarro
rgutierrez@geociencias.unam.mx
Instituto de Geociencias, campus Juriquilla
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
Planeteando
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. 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
Scripps Intitution of Oceanography
University of California, San Diego, EUA

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

Dr. Roberto Greco
greco@unicamp.br
Universidad Estadual de Campinas, Brasil

M. en C. Néstor Damián Salinas Franco
nestorsalinas@facen.una.py
Departamento de Geología
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

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

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

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

Ing. Geól. Ángel E. Espinosa Borges
angeleduardoespinosaborges@gmail.com
Universidad de Desarrollo e Innovación
Universidad de las Tunas, Cuba

M. en C. Ana Cecilia Lopera
terramovil@geologia.unam.mx
Instituto de Geología
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. 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

EDITORAS TÉCNICAS

Dra. Marina Vega
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

M. en C. Ilse Elbjorn Flores
ief1394@geociencias.unam.mx
Instituto de Geociencias, campus Juriquilla
Universidad Nacional Autónoma de México

ENSEÑANZA COMUNICACIÓN GEOCIENCIAS

VOLUMEN 3 – NÚMERO 2

CONTENIDO

Pág.

ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS PARA LA ENSEÑANZA DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS CON AQUIPARAMETER **1**

Antonio Hernández-Espriú, Saúl Arciniega-Esparza y Héctor Baez-Reyes
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Parámetros hidrogeológicos, propuesta didáctica, enseñanza de la hidrogeología, análisis de datos, visualización de datos.

RECURSOS EDUCATIVOS SOBRE QUÍMICA ATMOSFÉRICA Y EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN URBANA POR OZONO: MATERIAL DIDÁCTICO Y PLATAFORMA INTERACTIVA **9**

José Agustín García-Reynoso
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Ozono, sitio web, compuestos orgánicos volátiles, calidad del aire, óxidos de nitrógeno, química atmosférica.

¿DE DÓNDE VIENEN LOS MICROPLÁSTICOS? **13**

Itzamna Zaknite Flores-Ocampo, Sandra Elizabeth Ibarra-Rueda y José Iván Morales-Arredondo
Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Contaminación, residuos, ambiente, basura.

GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DE ZINC **17**

Alejandro Carrillo-Chávez, Daniela K. Calvo-Ramos, Luisa F. Rueda-Garzón, Liliana Corona-Martínez, Carolina Muñoz-Torres y Rocío García-Martínez
Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Zinc, isótopos estables, fraccionamiento isotópico, columnas cromatográficas de separación, espectro de masas multicolector acoplado a plasma inducido

ENSEÑANZA DEL PENSAMIENTO SISTÉMICO DE LA TIERRA. EVIDENCIAS DEL APRENDIZAJE ACTIVO Y PROPUESTA DE UN MODELO DE CAPÍTULO PARA EL "ATLAS INTERDISCIPLINARIO DE MÉXICO" **25**

Eduardo Becerra-Torres y Oscar Bravo-Pérez
ENES Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Pensamiento Sistémico de la Tierra, evaluación del aprendizaje, transdisciplina, pensamiento escalar, pensamiento espacial.

INTEGRACIÓN INTERDISCIPLINARIA DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN EL CURRÍCULO DE SECUNDARIA: ESTUDIO DE CASO EN EL CONTEXTO COLOMBIANO **32**

Rosa Carolina Ayala-Calvo y Libardo Andrés Ocampo-Cardona
Facultad de Estudios Sociales y Empresariales, Universidad Autónoma de Manizales
Palabras clave: Enseñanza en Ciencias de la Tierra, integración interdisciplinaria, propuesta curricular, estudio de caso.

TALLER DE CIENCIA PARA PROFESORES JURIQUILLA, QUERÉTARO, 2024. SU IMPORTANCIA PARA LA FORMACIÓN CIENTÍFICA, EXPERIENCIAS Y REFLEXIONES DEL PROFESORADO PARTICIPANTE **42**

Roxana Núñez-Ramos, Jorge Pineda-Mora, Rodrigo Gutiérrez-Navarro, Marina Rivera-Trejo, Pedro Figueroa-González y Pavka Patiño-Conde
Escuela Nacional Preparatoria 2, Erasmo Castellanos Quinto, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Creatividad, educación STEM, didáctica de las ciencias, proyectos educativos, sustentabilidad, colaboración.

¿UNA TIERRA SIN CAMPO MAGNÉTICO? UN FENÓMENO COMPRENDIDO HASTA 1919 **50**

Francisco Chacón-Hernández
Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México
Palabras clave: Campo magnético de la Tierra, magnetita, auroras boreal y austral, rocas magnetizadas, polos magnéticos de la Tierra.

LA UTILIDAD DE LOS SENSORES DE BAJO COSTO EN LAS GEOCIENCIAS: CASO DE ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS **60**

Alejandro Rodríguez-Trejo, Héctor E. Ibarra-Ortega y Reneé González-Guzmán

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México

Palabras clave: Sensores de bajo costo, monitoreo ambiental, geociencias, Raspberry Pi, Arduino, ESP32, tormentas geomagnéticas.

EDITORIAL

Nos complace anunciar este nuevo número de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias, reafirmando nuestro compromiso con la publicación de contenido científico de calidad para docentes y público en general.

Primeramente, damos la bienvenida a la Dra. Elizabeth Rangel Granados y a la Geól. María Julia Solari, como nuevas Editoras Asociadas, cuyo *expertise* enriquecerá nuestra revista. Además, les anunciamos que estrenamos una nueva página web con el Sistema Abierto de Revistas (OJS) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), mejorando así la gestión editorial de los manuscritos.

En el presente número están publicados ocho artículos que versan sobre distintos tópicos de Ciencias de la Tierra dirigidos a docentes y estudiantes, desde nivel básico hasta posgrado, sin perder la esencia de ser un material de consulta para el público en general. Contamos con la presentación de dos plataformas web de acceso libre, "Aquiparameter", la cual fue diseñada para la enseñanza de parámetros hidrogeológicos, y otra para ilustrar las medidas necesarias para controlar la contaminación urbana por ozono. Se presenta también información fundamental para entender el tema de la contaminación por microplásticos diseñado para niños y adolescentes. Un artículo explica con detalle los principios teóricos, métodos de preparación y aplicaciones de los isótopos de zinc (Zn) en la geoquímica ambiental. Por otro lado, se hace una propuesta del "Pensamiento Sistémico de la Tierra", como una técnica de enseñanza innovadora y estimulante para la solución de problemas multivariables. En el mismo tenor, se presenta un estudio sobre cómo se abordan los temas de Ciencias de la Tierra en las mallas curriculares en nivel secundaria en Colombia, mientras que un grupo de profesores nos comparte sus experiencias y reflexiones vividos en el Taller de Ciencia para Profesores Edición 2024 impartido en el Instituto de Geociencias de la UNAM. También, se ilustra de manera sintética y didáctica cómo evolucionó el concepto del campo magnético y su funcionamiento, desde los tiempos de las antiguas civilizaciones hasta la actualidad. Finalmente, se presenta el uso de sensores de bajo costo en la detección de tormentas geomagnéticas como una herramienta potencial en lugares donde la infraestructura tecnológica es limitada.

Agradecemos a todos nuestros colaboradores, árbitros, 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,

Equipo Editorial Enseñanza y Comunicación de las Geociencias

Enseñanza y Comunicación de las Geociencias
Centro de Geociencias, campus Juriquilla UNAM | Boulevard Juriquilla núm. 3001, Juriquilla Querétaro, C.P. 76230, México
encomunicacionct@geociencias.unam.mx

ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS PARA LA ENSEÑANZA DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS CON AQUIPARAMETER

Antonio Hernández-Espriú [1]*, Saúl Arciniega-Esparza [1], Héctor Báez-Reyes [2]

[1] Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.
[2] Consultor independiente en análisis de datos.

***ahespriu@unam.mx ; ahespriu@gmail.com**

RESUMEN

El agua subterránea representa un recurso estratégico para el desarrollo humano a nivel mundial y por tanto su enseñanza juega un papel clave en el panorama educativo geocientífico, ingenieril y ambiental actual. Para el estudiante de hidrogeología, resulta trascendental entender los fundamentos que describen el flujo subterráneo, vinculando un rasgo litológico (descriptivo) con una propiedad hidráulica (cuantitativa), a partir de un tópico obligado en clase: los parámetros hidrogeológicos (PH). Por ello, desarrollamos la plataforma Web gratuita "Aquiparameter" que permite acceder, visualizar y analizar con criterios estadísticos 6000+ datos de PH de forma interactiva (https://aquiparameter.ingenieria.unam.mx/). El objetivo de este artículo docente es presentar una nueva propuesta didáctica basada en el diseño de una serie de ejercicios prácticos enfocados en la resolución de problemas cuantitativos en hidrogeología. Estos ejercicios facilitan la enseñanza de PH por medio del aprendizaje activo, mostrando de manera visual la variabilidad estadística de parámetros hidrogeológicos en medios granulares y fracturados usando "Aquiparameter". También, fomentan el análisis y visualización de datos, como un complemento cada vez más necesario en los estudiantes de áreas STEM y de geociencias, ya que permite mejorar la comprensión de procesos complejos, detectar patrones y tendencias en grandes bases de datos y preparar a las nuevas generaciones para enfrentar desafíos modernos de una manera innovadora, sistemática y analítica.

Palabras clave: Parámetros hidrogeológicos; propuesta didáctica; enseñanza de la hidrogeología; análisis de datos; visualización de datos.

ABSTRACT

Groundwater represents a strategic resource for human development worldwide, and therefore, its instruction plays a key role in the current geoscientific, engineering and environmental educational landscape. For any hydrogeology student, it is crucial to understand groundwater flow fundamentals, bridging a descriptive lithological feature into a quantitative hydraulic property, through a mandatory topic in class: The Hydrogeological Parameters (HP). Thus, we developed "Aquiparameter" a cost-free Web platform for rapid access, data visualization and statistical analysis for 6,000+ HP records (https://aquiparameter.ingenieria.unam.mx/). The aim of this teaching paper is to present a new didactic approach based on the design of a series of practical exercises focused on solving quantitative problems in hydrogeology. These exercises facilitate the teaching of HP through active learning, visually demonstrating the statistical variability of hydrogeological parameters in granular and fractured media using "Aquiparameter". They also promote data analysis and visualization, an increasingly required complement for students in STEM and geoscience fields, as it enhances understanding of complex processes, enables the detection of patterns and trends in large datasets, and prepares new generations to tackle modern challenges in an innovative, systematic, and analytical way.

Keywords: Hydrogeological parameters; instructive proposal; hydrogeology education; data analysis; data visualization.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea representa un recurso estratégico para el desarrollo humano. Se estima que el ~97 % del agua dulce accesible a nivel mundial está almacenada en acuíferos regionales (Shiklomanov, 1993), y más de 112 millones de hectáreas agrícolas son regadas con agua subterránea (Siebert *et al.*, 2010). Existen países como Suecia, Noruega o Dinamarca donde el ~100 % del agua consumida tiene una fuente subterránea.

Después de la India, Estados Unidos, China y Bangladesh, México es el quinto usuario que más extrae agua subterránea en el mundo (~30 km^3/año) de acuerdo con reportes de la FAO (2016). Esto implica que 6-7 de cada 10 litros que usamos los mexicanos provienen directamente del agua subterránea, o de los retornos de riego que vuelven a infiltrarse al subsuelo. Estas cifras revelan claramente la importancia del agua subterránea a escala mundial, regional y local.

La hidrogeología –entiéndase, el estudio del agua subterránea en la naturaleza y su relación con el medio ambiente– juega un papel clave en la educación científica actual, que no solo ha permeado en las carreras clásicas de corte geocientífico, sino que también se ha extendido a planes curriculares de otros programas de licenciatura y posgrado relacionados con la ingeniería civil y ambiental, biología, sustentabilidad, ciencias del suelo, oceanografía o energías renovables, por citar algunas. Además de su evidente aplicabilidad, su versatilidad radica en que la enseñanza del agua subterránea puede enfocarse desde un punto de vista cualitativo o cuantitativo, aunque este último es el que ofrece mayor aprendizaje al estudiantado.

La evaluación cuantitativa del agua subterránea y su enseñanza, se basan en entender las características fundamentales que describen el comportamiento del agua subterránea en un acuífero, permitiendo trasladar un rasgo litológico (descriptivo) a una propiedad hidráulica (cuantitativa). Algunas de estas variables de uso común en hidrogeología, tales como la conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento o porosidad, suponen la base para plantear análisis profundos relacionados con la extracción en un pozo de agua potable, el desagüe de agua subterránea en una mina, la migración de una pluma contaminante, la predicción numérica de niveles de agua y concentraciones de solutos, entre muchísimas aplicaciones más (Ma, *et al*., 2021; Omar, 2020).

El rasgo cuantitativo supone uno de los diferenciadores de la hidrogeología con relación a otras áreas de las geociencias más cualitativas. Se ha reconocido que la enseñanza basada en problemas geológicos cuantitativos, permite despertar en el estudiantado habilidades más valiosas enfocadas a la resolución de problemas del mundo real (Keller *et al*., 2000), que pueden potenciarse aún más, si la estrategia de enseñanza se nutre del uso del "Big Data" (y herramientas computacionales afines de análisis y visualización) directamente en clases STEM y de geociencias (Styers, 2018).

Las variables, propiedades o parámetros hidrogeológicos (PH) son un tópico obligado en cualquier temario de hidrogeología. Ahí, el profesorado explica que los PH dependen de varios factores relacionados con las características físicas, químicas y estructurales del medio geológico. Por lo tanto, la litología, acomodo de los poros, grado de cementación/compactación, mineralogía o fracturamiento, condicionarán la capacidad de una roca para almacenar agua, retenerla y permitir su circulación (o no) en el subsuelo. Por ello, es de esperarse una marcada variabilidad de estos parámetros en función de la heterogeneidad y anisotropía que domina las unidades geológicas regionales a escala de campo.

Virtualmente todos los libros relacionados con la hidrología subterránea (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983; Fetter, 2018) ofrecen un número poco representativo de PH, en función de algunas de las litologías más comunes, que no representan la diversidad, asimetría y distribución estadística de estas propiedades.

Para solventar esta carencia, desarrollamos Aquiparameter, una herramienta en línea para consultar, visualizar y analizar estadísticamente más de 6000 PH de una manera rápida, práctica y sencilla (Báez-Reyes y Hernández-Espriú, 2024), que puede consultarse en https://aquiparameter.ingenieria.unam.mx/. El objetivo de este artículo es presentar una nueva propuesta didáctica apoyada en el diseño de tres ejercicios prácticos enfocados en la resolución problemas cuantitativos en hidrogeología, analizando PH a partir de Aquiparameter.

Está demostrado que la enseñanza basada en la resolución de problemas desarrolla habilidades críticas y analíticas, genera mayor retención de conocimiento, vincula la teoría con la práctica y promueve el aprendizaje activo (Prince 2004; Van Loon, 2019; Boyd *et al*., 2024).

Estos ejercicios están concebidos para aplicarse en cursos relacionados con la hidrogeología, en programas académicos a nivel de licenciatura, que además pueden replicarse con facilidad debido a que Aquiparameter es un recurso gratuito y abierto. No obstante, se recomienda que el estudiantado al que se le apliquen estos recursos, tenga conocimientos previos en geología física y petrología, fundamentos introductorios de hidrología subterránea y estadística básica.

PROPUESTA DIDÁCTICA

Aquiparameter: Breve descripción y revisión

Aquiparameter nace como un proyecto de tesis de licenciatura de un estudiante de Ing. Geológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Báez-Reyes, 2021), y a partir de ahí se perfecciona para llegar al producto actual: una plataforma Web amigable, intuitiva y de uso directo para el rápido y fácil acceso a una base de datos interactiva de PH, que contempla 6305 datos de porosidad total, porosidad efectiva, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico y compresibilidad de roca, para 40 diferentes litologías, incluyendo rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas y sedimentos no consolidados (Báez-Reyes y Hernández-Espriú, 2024).

Los datos duros de Aquiparameter fueron integrados manualmente, con base en una detallada recopilación de ~900 referencias (artículos, reportes, tesis, libros), considerando datos de varias partes del mundo. Una de las mayores virtudes de Aquiparameter es que permite el análisis y visualización estadística de los datos, a partir de cinco módulos interactivos donde se pueden filtrar valores, desplegar histogramas, diagramas de caja (*boxplots*), gráficos de dispersión con ruido (*jitter plots*), gráficos de correlación entre variables, y resúmenes estadísticos por parámetro y/o por litología. También el usuario puede descargar la totalidad de la base de datos (en formato *.csv) para sus propios análisis.

Aquiparameter, diseñado para usuarios sin ningún tipo de experiencia en programación o manejo de bases de datos, fue compilado en R (*RStudio*), una robusta plataforma colaborativa para el desarrollo de proyectos de ciencia de datos, visualización y cómputo estadístico/geoestadístico (*R Core Team*, 2017; *RStudio Team*, 2024). Para mayor información acerca de la fundamentación, compilación y características generales de Aquiparameter, consultar Báez-Reyes (2021) y Báez-Reyes y Hernández-Espriú (2024).

Propuesta didáctica basada en Aquiparameter

A continuación, se presenta una propuesta didáctica basada en el diseño de tres ejercicios que fomentan el aprendizaje activo de PH y su relación con conceptos fundamentales en hidrogeología, a partir del análisis de datos y su visualización estadística. Cada ejercicio está estructurado en antecedentes y objetivos, aspectos a resolver, resultados, y discusión didáctica sugerida.

Ejercicio # 1. Variabilidad de la conductividad hidráulica en medios granulares vs. fracturados.

Antecedentes y objetivos. La conductividad hidráulica (k), es la facilidad con la que un medio geológico se deja atravesar por agua, y se expresa en unidades de velocidad (preferentemente m/día). La k, es un parámetro fundamental en hidrogeología, ya que condiciona diferentes procesos, como la velocidad de flujo subterráneo, la tasa de descarga en ríos y lagos, la respuesta de un acuífero al bombeo, o la migración de plumas contaminantes en el subsuelo. El objetivo de este ejercicio se basa en estudiar la variabilidad de la k en medios geológicos granulares y su comparación en medios fracturados, de manera que el estudiante comprenda la heterogeneidad del flujo en medios que se rigen por el movimiento del agua en los poros vs. su dinámica a través de fracturas.

Aspectos a resolver. Determinar valores estadísticamente representativos de k para tres litologías que se rigen por el movimiento del agua en los poros (medios granulares) y tres litologías cuya hidrodinámica esté controlada por fracturas (medios fracturados). Expresar gráficamente los intervalos de k para cada litología y discutir.

Resultados. En Aquiparameter, el estudiante puede seleccionar 40 litologías diversas para analizar y posteriormente determinar valores estadísticos de cada PH, incluida la k. Para resolver este ejercicio, usaremos las siguientes litologías: (1) arena y grava, (2) arenisca, (3) arena, limo y arcilla, (4) andesita, (5) basalto y (6) granito. Los materiales (1) - (3) representan el medio granular, y el (4) – (6) el medio fracturado.

Directamente en Aquiparameter, dentro del módulo "*Boxplot*", el estudiante debe activar la casilla "*Search by lithology*" (del panel izquierdo) y seleccionar las litologías antes mencionadas en el cuadro de diálogo "*Select Lithology*". Al hacerlo, automáticamente se visualizará un diagrama de caja y un gráfico de dispersión por ruido separado por cada litología seleccionada. El diagrama de caja es una herramienta gráfica que resume y permite visualizar la distribución de un conjunto de datos, mostrando valores mínimos, el primer cuartil, q1 (el 25 % de los datos está por debajo de ese valor), la mediana (valor central), el tercer cuartil, q3 (el 75 % de los datos está por debajo de ese valor), el valor máximo y los valores atípicos.

El intervalo entre q1 y q3, se denomina intervalo intercuartil (IQR, en inglés) y representa la dispersión de un conjunto de datos. Los puntos adyacentes a estos diagramas muestran la distribución de datos individuales que de otra manera se sobrepondrían, revelando más fácilmente agrupaciones o valores atípicos. Además, Aquiparameter muestra un resumen estadístico de las litologías evaluadas. Los diagramas desplegados de las litologías seleccionadas se muestran en la Figura 1, mientras que los valores de k se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen estadístico de la variabilidad de la conductividad hidráulica (m/día) en medios granulares y fracturados.

Material	n	Min	q1	Mediana	q3	Max
Arena y grava	98	8.64E-03	5.1	32.40	110.00	1900
Arenisca	188	2.68E-05	0.24	1.39	7.96	486
Arena, limo y arcilla	28	3.00E-04	0.01	0.43	8.50	119
Andesita	17	8.64E-04	0.10	0.50	3.60	125
Basalto	162	8.64E-08	0.0346	0.5	19.3	864
Granito	161	1E-10	0.001	0.1	1.86	106

n = Número de datos por litología; Min = Valor mínimo; q1 = Primer cuartil; q3 = Tercer cuartil; Max = Valor máximo

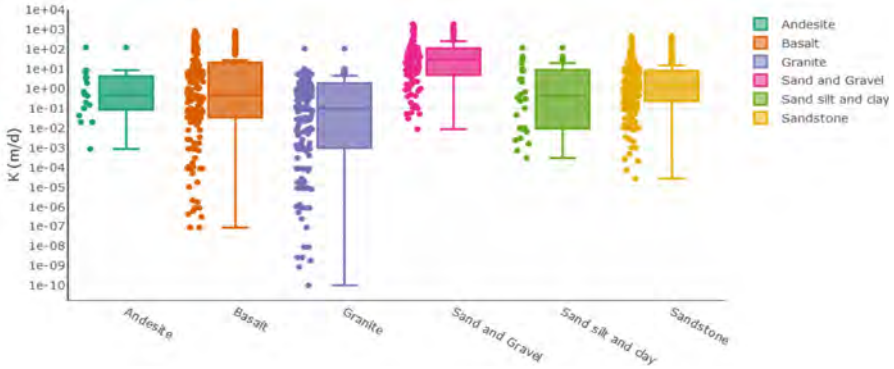


Figura 1. Diagramas de caja y gráficos de dispersión con ruido para visualizar la variabilidad de la conductividad hidráulica, k (m/día) expresada en escala logarítmica, para medios granulares y fracturados en Aquiparameter (módulo "*Boxplot*", referido en inglés debido a que así aparece en Aquiparameter). La imagen se muestra tal como sale del programa; por esto, los letreros están en inglés..

Discusión didáctica sugerida. Derivado de la visualización (Figura 1) y el resumen estadístico de 654 valores de k (Tabla 1), el estudiante orientado por el profesor, puede interpretar estos datos con algunas de las siguientes guías de discusión:

- La k es mayor en medios granulares (mediana ~0.4 a 30 m/d) que en medios fracturados (mediana ~0.1 a 0.5 m/d), al menos en un orden de magnitud.

- Existe mayor variabilidad de k en los medios fracturados que en los granulares. Esto se identifica al observar que la mediana está más cerca de alguno de los extremos (superiores o inferiores) de la caja, y además el IQR es mayor. Esto sugiere que los medios fracturados son más heterogéneos que los granulares, y por tanto son más complejos de predecir y de modelar.

- Tanto en medios granulares como fracturados la variabilidad es claramente marcada. Para arenas y gravas, por ejemplo, la k varía en casi 6 órdenes de magnitud, de ~8E-03 a 1900 m/d (min-max), mientras que el 50 % de los datos se encuentra en el intervalo de ~5 a 110 m/día (IQR). En contraste, un granito exhibe una variabilidad de hasta 12 órdenes de magnitud, de 1E-10 hasta ~100 m/día (este último, un valor atípico para este tipo de litologías). Esto evidencia que la condición natural de medios tanto granulares como fracturados, es la heterogeneidad.

- Concluimos con base en estos resultados, que las litologías con mayor potencialidad para formar acuíferos, son, en orden de importancia: arenas y gravas > arenisca > arena, limo y arcilla > andesita > basalto > granito, siendo este último, un material geológico prácticamente impermeable que se descarta para fines hidrogeológicos de exploración y producción, debido a la baja k que exhibe (IQR = 0.001 – 1.86 m/día; mediana = 0.1 m/día).

Ejercicio # 2. Volumen almacenado, cedido y retenido en diferentes materiales geológicos.

Antecedentes y objetivos. La capacidad que tiene un medio geológico para almacenar agua subterránea, cederla y retenerla, es un concepto clave para el entendimiento integral de la hidrogeología. El análisis de estos procesos está denotado por la porosidad, definida como la cantidad de espacio vacío en un medio poroso.

La porosidad total ($\emptyset_T$), denotada por la Ecuación (1) es el porcentaje del volumen total que está ocupado por poros, mientras que la porosidad efectiva ($\emptyset_e$), especificada por la Ecuación (2), es la fracción del volumen de poros que se encuentran interconectados entre sí (con respecto al volumen total), que permiten el movimiento del agua:

$$\emptyset_T = V_P / V_T \quad (1)$$

$$\emptyset_e = V_{PI} / V_T \quad (2)$$

Donde:
$\emptyset$: Porosidad (T = total, e = efectiva), V_P: Volumen de los poros, V_{PI}: Volumen de los poros interconectados, V_T: Volumen total de la muestra, roca o acuífero.

La porosidad resulta útil para relacionar conceptos prácticos y palpables como el volumen de agua subterránea que un acuífero puede almacenar, estimado a partir de las ecuaciones (3) y (4):

$$V_A = \emptyset_T V_{Acuifero} \quad (3)$$

o bien

$$V_A = A_A \cdot b \cdot \emptyset_T \quad (4)$$

Donde:
V_A: Volumen almacenado total, $V_A$cuífero: Volumen total del acuífero, A_A: Área superficial del acuífero y b: Espesor saturado.

Sin embargo, solo una fracción del volumen almacenado (V_A) estará disponible para ser extraído, liberado o recuperado, debido a que solo un pequeño porcentaje será cedido por el acuífero por efectos del drenado mecánico (gravitacional) de los poros interconectados (para acuíferos libres) o en su caso, por compresión/descompresión del medio (para acuíferos confinados). El volumen cedido puede ser cuantificado usando las ecuaciones (5) y (6) involucrando el rendimiento específico (para el primer caso) o el coeficiente de almacenamiento para el segundo:

$$V_{CL} = A_A \cdot \Delta h \cdot S_y \quad (5)$$

$$V_{CC} = A_A \cdot \Delta h \cdot S \quad (6)$$

Donde:
V_C: Volumen cedido (L = libre, C = confinado), S: coeficiente de almacenamiento, S_y: rendimiento específico.

Aspectos a resolver. Estimar el volumen de agua subterránea almacenada, cedida y retenida, considerando un volumen de 1 m3 formado por una arenisca, un basalto y un esquisto. Considerar para ello diferentes estimaciones usando valores centrales, superiores e inferiores en la distribución estadística de los PH involucrados.

Resultados. Para la determinación de V_A, V_C y su diferencia (volumen retenido, V_R), será necesario consultar Aquiparameter, con objeto de recopilar valores de $\emptyset_T$ y $\emptyset_e$ que se usarán para estimar los volúmenes solicitados. Para ello, en el módulo "*Boxplot*", se despliegan valores de $\emptyset_T$ y $\emptyset e$ para cada una de las litologías especificadas (arenisca, basalto y esquisto), considerando la mediana para estimar el valor central, el tercer cuartil (q3) para valores superiores y el primer cuartil (q1) para los valores inferiores de la distribución. Posteriormente se usa la ecuación (3) para estimar V_A, y su equivalente para estimar V_C (es decir, $V_C = \emptyset_e \cdot V_{Acuífero}$). Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Discusión didáctica sugerida. Los resultados del ejercicio # 2 (Tabla 2) se pueden discutir mediante alguno de los siguientes elementos:

- Tanto para los valores centrales de la distribución, como para los valores superiores e inferiores, la arenisca es la litología que permite un mayor volumen almacenado y cedido, seguido del basalto y por último el esquisto.

- Si consideramos que las tres litologías tienen el mismo volumen total (1 m^3), la diferencia que controla la capacidad de volumen liberado o cedido, radica en las características de cada material, lo que denota que un material poroso (arenisca) tiene una mayor capacidad volumétrica, seguido de un medio fracturado (basalto) y de una roca metamórfica, que es prácticamente impermeable (esquisto).

- La diferencia entre la porosidad total y eficaz de la arenisca es mínima (1 % -2 %), mientras que para las litologías restantes la diferencia puede rondar el ~5 %. Esto ocasiona que la relación entre el volumen cedido sobre el almacenado en la arenisca sea del ~90 %

(es decir, esta litología libera el 90 % del agua que está almacenada). En contraste, la relación del volumen cedido sobre el almacenado en el basalto es del 14 % al ~48 % (IQR; mediana ~19 %) y del esquisto es apenas del ~4 % al ~17 % (IQR; mediana ~14 %).

- Resulta interesante evaluar la correlación entre porosidad efectiva y total. Para ello, se puede consultar el módulo "Correlation" en Aquiparameter, y seleccionar en el panel izquierdo ϕ_T y ϕ_e, en escala log-log (Figura 2). En este análisis, se aprecia una correlación pseudo-lineal entre ambas variables, para rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados, a partir de valores de $\phi_T \geq 10\%$ y $\phi_e \geq 1$ %. No obstante, Aquiparameter no pemite distinguir esta correlación para litologías individuales. Se alienta al estudiante que explore a fondo esta correlación a partir de litologías individuales, descargando la base de datos cruda (en el módulo "*Download*"), para analizar los datos con más detalle a partir de plataformas especializadas con códigos propios.

Tabla 2. Estimación de V_A, V_C y V_R a partir de valores de porosidad eficaz y total, considerando 1 m^3 de arenisca, basalto y esquisto.

Material (VT = 1000 litros)	ϕT (%)	ϕe (%)	V_A (litros)	V_C (litros)	V_C/V_A (%)	V_R (litros)
Estimación usando valores centrales de la distribución (mediana)						
Arenisca	18	20	200	180	90	20
Basalto	1	5.1	51	10	19.61	41
Esquisto	0.14	1	10	1.44	14.40	8.56
Estimación usando valores superiores de la distribución (q3)						
Arenisca	10	11	110	100	90.91	10
Basalto	5	10	103	50	48.54	53
Esquisto	0.87	5	50	8.67	17.34	41.33
Estimación usando valores inferiores de la distribución (q1)						
Arenisca	10	11	110	100	90.91	10
Basalto	0.14	1	10	1.4	14.00	8.6
Esquisto	0.003	0.09	0.85	0.032	3.76	0.818

ϕ_T = Porosidad total; ϕ_e = Porosidad efectiva; V_A = Volumen almacenado de agua subterránea; V_C = Volumen cedido de agua subterránea; V_R = Volumen retenido de agua subterránea.

Ejercicio # 3. Volumen extraíble en acuíferos confinados a escala regional.

Antecedentes y objetivos. El proceso por medio del cual un acuífero almacena y cede agua, se ha explicado con detalle en el ejercicio # 2. Aquí, se retoman los mismos conceptos para estimar el volumen extraíble en acuíferos confinados a escala regional. Para ello, se usará la Ecuación (6) relacionando el coeficiente de almacenamiento (S), que mide la cantidad de agua subterránea que un acuífero confinado puede liberar debido a la compresibilidad de la roca y la expansión del fluido, cuando se despresuriza el sistema por medio del descenso de la carga hidráulica o superficie piezométrica.

Aspectos a resolver. Determinar el volumen que puede extraerse de un acuífero confinado regional de 500 km^2 de área, compuesto por materiales no consolidados, rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuando se hace descender la superficie piezométrica una media de 10 m de manera uniforme en todo el acuífero. Usar valores inferiores, medios y superiores que sean estadísticamente representativos del coeficiente de almacenamiento, S.

Resultados. En esta ocasión usaremos el módulo de "*Histogram*" en Aquiparameter, para acceder a valores de S, activando este parámetro en el panel izquierdo, y seleccionando en "*Select Type*" de manera simultánea las rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias y materiales no consolidados. Al hacerlo, se despliegan cuatro histogramas simultáneos que relacionan la variabilidad de S (Figura 3a), donde el usuario puede variar interactivamente las clases de cada histograma (*Bins*). Claramente, las cuatro distribuciones tienen un marcado sesgo, por lo que se sugiere log-transformarlas para reducirlo, con objeto de analizar una distribución más tendiente a la Gaussiana. Para ello, basta con activar el botón "*Log Scale*" (Figura 3b).

Además, este módulo también permite resumir los resultados estadísticos considerando además de n, la media geométrica (MG) y la desviación estándar del logaritmo de la variable, $\sigma_{log(X)}$. La MG es un tipo de media particularmente útil para analizar datos positivos, cuando éstos varían en órdenes de magnitud (como sucede en procesos de almacenamiento en acuíferos), mientras que $\sigma_{log(X)}$ (o bien, $\sigma_{log(S)}$), denota la desviación estándar (SD) después de haber log-transformado la distribución (Sullivan, 2018).

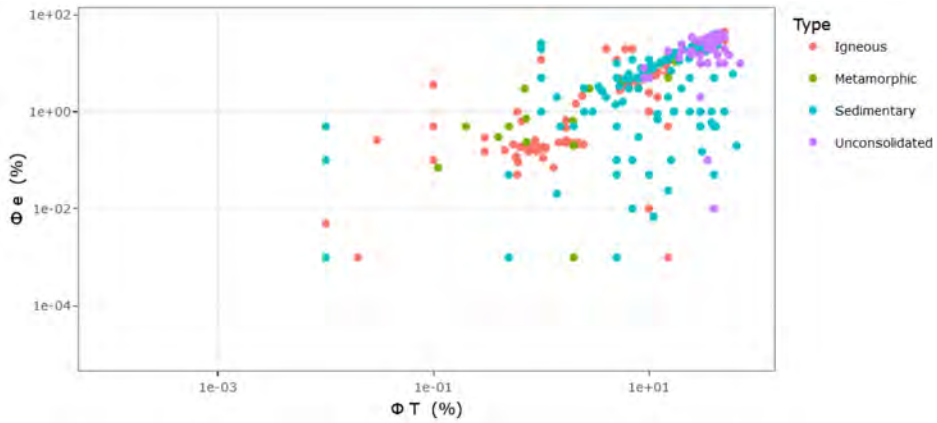


Figura 2. Correlación entre porosidad total y eficaz en rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas y sedimentos no consolidados en Aquiparameter (módulo: "*Correlation*"). La imagen se muestra tal como sale del programa; por esto, los letreros están en inglés.

Debido a que la SD está calculada en datos log-transformados, se debe estimar su función exponencial (exp(x) = e^x), es decir:

$$SD = exp\left[\sigma_{log(S)}\right] = e^{\sigma_{log(S)}} \quad (7)$$

Por ejemplo, para materiales no consolidados, si la MG de S = 1.54E-04 (n = 190), y $\sigma_{log(S)}$ = 2.63, entonces su SD = $e^{2.63}$ ≈ 13.87. Esto significa que el ~68 % de los datos de S en este tipo de materiales geológicos variarán de MG/SD a MG*SD, o bien, de MG/13.87 a MG*13.87 (Sullivan, 2018). Los resultados del análisis estadístico de S se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Variación estadística de S para rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias y materiales no consolidados, considerando la MG y $\sigma_{log(S)}$

Material	n	MG	$\sigma_{log(S)}$	SD	MG/SD	MG*SD
No consolidado	190	1.55E-04	2.63	13.87	1.12E-05	2.15E-03
Ígnea	173	1.54E-04	3.17	23.81	6.47E-06	3.67E-03
Sedimentaria	282	1.53E-04	2.71	15.03	1.02E-05	2.30E-03
Metamórfica	230	9.98E-05	3.08	21.76	4.59E-06	2.17E-03

n = Número de datos; MG = Media geométrica; $\sigma_{log(S)}$ = Desviación estándar del logaritmo de S; SD = Desviación estándar en escala lineal, estimada con la Ecuación (7).

Con ello, el volumen de agua subterránea cedido por un acuífero confinado de A_A = 500 km^2 al que se hace descender la superficie piezométrica Δh = 10 m se estima usando la Ecuación (6). Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación del volumen cedido por un acuífero confinado a escala regional compuesto por diferentes materiales geológicos

Acuífero confinado compuesto por	Volumen cedido menor (Mm^3)[1]	Volumen medio cedido (Mm^3)[2]	Volumen mayor cedido (Mm^3)[3]
Material no consolidado	0.06	0.78	10.75
Rocas ígneas	0.03	0.77	18.33
Rocas sedimentarias	0.05	0.77	11.50
Rocas metamórficas	0.02	0.50	10.86

Mm^3 = 106 m^3; 1 m^3 = 1000 litros. [1]Estimado a partir de MG/SD; [2]Estimado a partir de MG; [3]Estimado a partir de MG*SD

Discusión didáctica sugerida. Los resultados del ejercicio # 3 (Figura 3, Tablas 3 y 4) se pueden discutir mediante alguno de los siguientes elementos:

- El acuífero confinado con mayor capacidad de almacenamiento y volumen cedido es el compuesto por materiales no consolidados, seguido por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; este último con un valor de S un orden de magnitud menor que los demás.

- Este patrón no se percibe en la estimación del volumen mayor cedido. Esto puede deberse a que los valores máximos de S pudiesen representar valores atípicos, por lo que se alienta al estudiante que verifique este punto anterior usando el módulo "Boxplot". Si esto se comprueba, se recomienda usar la estimación media a partir de la MG.

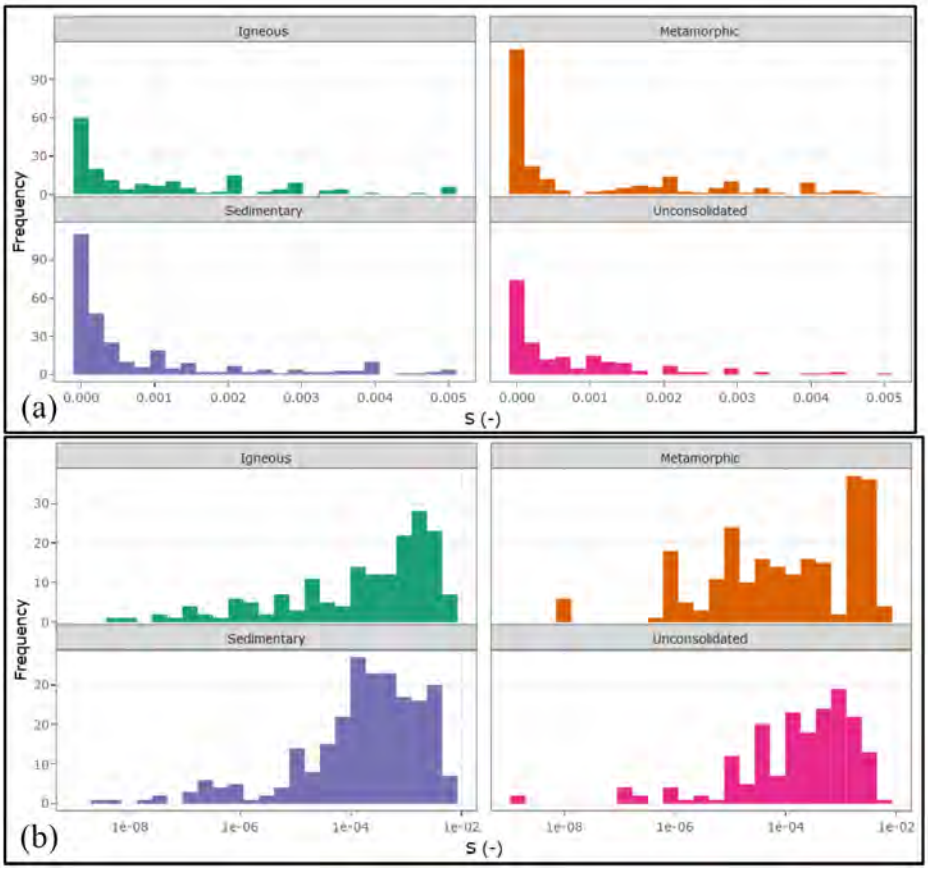


Figura 3. Histogramas del coeficiente de almacenamiento para rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias y materiales no consolidados en Aquiparameter en escala lineal (a) y logarítmica (b). En ambos casos, ***Bins*** = 25. La imagen se muestra tal como sale del programa; por esto, los letreros están en inglés.

• Aunque este ejercicio solo contempló la estimación de volúmenes en acuíferos confinados, se estimula al estudiante que compare los resultados analizando los volúmenes en acuíferos libres y se discutan las diferencias (usando ahora Sy en la ecuación (5)). Así, el estudiante se dará cuenta que los acuíferos libres tienen mucho mayor capacidad de almacenamiento, incluso en dos órdenes de magnitud.

Finalmente, aunque la plataforma Aquiparameter provee una serie de herramientas robustas y prácticas de visualización, el estudiante puede explorar visualizaciones propias más avanzadas, a partir de la base de datos original que puede descargarse en el módulo "*Download*". La visualización de datos (representación gráfica de datos e información) ayuda al aprendizaje al facilitar la comprensión de conceptos complejos, revelar patrones y tendencias de grandes bases de datos, que de otra manera sería muy complicado detectar. Por ello, la visualización permite al estudiante analizar y explorar información de manera activa, particularmente en áreas STEM.

Por ejemplo, usando el popular lenguaje de programación Python (*Python Software Foundation*, 2024) ampliamente extendido en las geociencias (Trauth, 2022), el estudiante puede crear un gráfico que permite correlacionar cuatro variables en unos cuantos minutos. Para este ejemplo, se creó un gráfico de dispersión y burbujas (*Bubble Plot*) correlacionando Sy, k y ϕ_{ef} (este último proporcional al tamaño de la burbuja) para cada tipo de roca, en solo 15 líneas de código (Figura 4).

De manera muy práctica, se analiza que no existe una correlación lineal entre las propiedades, y se aprecia que particularmente para un mismo valor de Sy, los materiales no consolidados exhiben diferentes valores de K. También, de manera general, se detecta que cuando aumenta Sy, también se incrementa su porosidad eficaz. El estudiante interesado puede revisar, copiar y ejecutar el código en la nube usado para generar la Figura 4, desde la plataforma *Google Colab* (Google, 2023), ingresando al link:

https://tinyurl.com/PyBubble

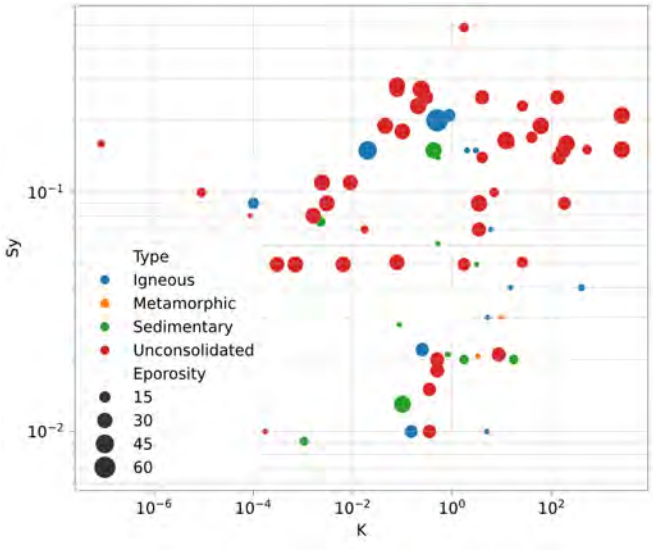


Figura 4. Gráfica de dispersión de burbujas correlacionando cuatro variables (base de datos: Aquiparameter) desarrollado en Python (***Python Software Foundation***, 2024). La imagen se muestra tal como sale del programa; por esto, los letreros están en inglés.

CONCLUSIONES

En este artículo usamos Aquiparameter, una nueva herramienta Web gratuita para acceder, analizar y visualizar más de 6000 datos de parámetros hidrogeológicos de forma interactiva, con el objetivo de diseñar una nueva propuesta didáctica basada en una serie de ejercicios relacionados con la hidrogeología cuantitativa, pensada para estudiantes interesados en cursos de aguas subterráneas a nivel licenciatura.

Estos ejercicios muestran la utilidad práctica del uso de los parámetros hidráulicos para medir la capacidad de transmisión, almacenamiento y retención de agua subterránea en acuíferos de distinta naturaleza, compuestos por litologías diversas.

Esta propuesta, además, fomenta el análisis de datos y su visualización estadística, como un complemento cada vez más necesario para el aprendizaje activo en los estudiantes de geociencias y áreas relacionadas, ya que permite mejorar la comprensión de procesos complejos, desarrollar mejores habilidades técnicas y preparar a las nuevas generaciones para enfrentar desafíos modernos de manera innovadora, fundamentada siempre en el análisis.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores Gabriel Salinas-Calleros y Francisco Miguel-Cortés sus sugerencias y discusiones que enriquecieron el contenido de este artículo. También, agradecemos a la Facultad de Ingeniería (UNAM) por permitirnos alojar Aquiparameter en su servidor. Esto no hubiese sido posible sin la asesoría y trabajo técnico del Mtro. Alejandro Velázquez Mena, jefe de la división de Ing. Eléctrica. Agradecemos la revisión de los dos árbitros, cuyas observaciones permitieron mejorar notablemente la presentación, redacción y calidad docente de este artículo. Esta es una colaboración científica y docente del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

REFERENCIAS

Báez-Reyes, H. (2021). AquiParameter: Base de datos abierta de parámetros hidrogeológicos. Compilación y análisis estadístico usando R. Tesis de licenciatura, Ing. Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Báez-Reyes, H., Hernández-Espriú, A. (2024). AquiParameter—A Novel Interactive Web-Based Tool for Statistical Assessment of Hydrogeological Parameters. Groundwater.

Boyd, E. A., Lazar, K. B., Moysey, S. (2024). Big data to support geoscience recruitment: Novel adoption of topological data analysis in geoscience education. Bulletin, 136(3-4), 1458-1468.

Custodio, E., Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea, 2da Edición, Omega, Barcelona, España.

Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press, Ohio, EUA.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). AQUASTAT Database: Mexico- Country Profile. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm.

Freeze, A., Cherry, J. (1979). Groundwater, Prentice Hall, NJ, EUA.

Google (2023). Google Colaboratory. https://colab.research.google.com

Keller, C. K., Allen-King, R. M., O'Brien, R. (2000). A framework for integrating quantitative geologic problem solving into courses across the undergraduate geology curriculum. Journal of Geoscience Education, 48(4), 459-463.

Ma, J., Li, D., Wang, M. (2021). The Evaluation of the Hydrogeological Parameters of a Field Pumping Test within Multi-layer Unconfined Pebble Aquifers: A Case Study. KSCE Journal of Civil Engineering, 25, 4018-4031.

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., y Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation–a global inventory. Hydrology and earth system sciences, 14(10), 1863-1880.

Omar, P. J., Gaur, S., Dwivedi, S. B., Dikshit, P. K. S. (2020). A modular three-dimensional scenario-based numerical modelling of groundwater flow. Water Resources Management, 34(6), 1913-1932.

Prince, M. (2004). Does active learning work? A review of the research. Journal of engineering education, 93(3), 223-231.

Python Software Foundation. (2024). Python Language Reference (version 3.12). https://www.python.org

Shiklomanov, I. A. (1993). World fresh water resources. In P. H. Gleick (Ed.), Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (pp. 13-24). Oxford University Press.

Styers, D. M. (2018). Using big data to engage undergraduate students in authentic science. Journal of Geoscience Education, 66(1), 12-24.

Sullivan, M. (2018). Fundamentals of statistics: Informed decisions using data. Pearson, Boston, EUA.

Trauth, M. H. (2022). Python Recipes for Earth Sciences. Springer Texbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, Springer.

Van Loon, A. F. (2019). Learning by doing: enhancing hydrology lectures with individual fieldwork projects. Journal of Geography in Higher Education, 43(2), 155-180.

Manuscrito recibido: 2 de noviembre de 2024
Manuscrito corregido: 20 de noviembre de 2024
Manuscrito aceptado: 26 de noviembre de 2024

RECURSOS EDUCATIVOS SOBRE QUÍMICA ATMOSFÉRICA Y EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN URBANA POR OZONO: MATERIAL DIDÁCTICO Y PLATAFORMA INTERACTIVA

José Agustín García-Reynoso

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000 Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

agustin@atmosfera.unam.mx

RESUMEN

Se presenta la página web del material didáctico utilizado para explicar la no linealidad de la producción de ozono troposférico, con el objeto de ilustrar las rutas de control de emisiones necesarias para reducir la concentración ambiental de ozono a partir de los componentes en la atmósfera. La intención principal es demostrar que es posible contribuir significativamente a la mejora de la calidad del aire, así como a la salud y el bienestar de la población y los ecosistemas urbanos mediante una comprensión profunda de la dinámica del ozono y la implementación de acciones concretas basadas en este conocimiento.

Sitio: https://uapa.cuaed.unam.mx/node/1264

Palabras clave: Ozono, sitio web, compuestos orgánicos volátiles, calidad del aire, óxidos de nitrógeno, química atmosférica.

ABSTRACT

The educational material in a webpage used to explain the non-linearity of tropospheric ozone production is presented, with the aim of illustrating the emission control routes necessary to reduce the ambient concentration of ozone from the components present in the atmosphere. The main message is that, through a deep understanding of ozone dynamics and the implementation of concrete actions based on this knowledge, it is possible to contribute significantly to the improvement of air quality, and, consequently, to the health and well-being of the population and urban ecosystems.

Keywords: Ozone, website, volatile organic compounds, air quality, nitrogen oxides, atmospheric chemistry.

INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado una página web con material didáctico diseñado para explicar la no linealidad en la producción de ozono troposférico con el objetivo de ilustrar las estrategias de control de emisiones necesarias para reducir la concentración de ozono en el aire. Este recurso educativo destaca la importancia de comprender las dinámicas del ozono para implementar acciones concretas que mejoren la calidad del aire, lo que impacta positivamente en la salud de la población y los ecosistemas urbanos. Está dirigida principalmente a estudiantes de las licenciaturas de Ingeniería Química (Facultad de Química) y Ciencias de la Tierra (Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra), y a los estudiantes de posgrado en Ingeniería Ambiental y Ciencias de la Tierra, además de estar disponible para cualquier persona interesada en el tema. El sitio se encuentra actualmente en el repositorio de Unidades de Apoyo para el Aprendizaje (UAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estos recursos están diseñados para ser estudiados de manera autónoma y gratuita.

La página "Control de Ozono en la Ciudad" es una unidad de apoyo para el aprendizaje que proporciona un análisis detallado sobre la contaminación atmosférica centrándose en el ozono como contaminante crítico. Se define el concepto de contaminantes y se clasifican en primarios y secundarios destacando la importancia de elaborar un inventario de emisiones como herramienta de gestión de la calidad del aire. Este inventario incluye características de las fuentes de contaminación, su ubicación y la cantidad y tipos de contaminantes emitidos, tales como los contaminantes criterio (dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, partículas y plomo), gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas.

La utilidad de un inventario de emisiones se enfatiza en su capacidad para identificar problemas de contaminación, determinar necesidades de reducción de emisiones y evaluar la efectividad de las medidas de control. Además, se utiliza el modelo cinético empírico (EKMA, por sus siglas en inglés) como un método para

García-Reynoso, J. A. (2024). Recursos educativos sobre química atmosférica y el control de la contaminación urbana por ozono: material didáctico y plataforma interactiva. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 3, núm. 2, p. 9-12 DOI: https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.2

Observatorio de la Tierra de la NASA. (s. f.). [Ozono sobre la Ciudad de México] [fotografía]. Tomada de https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/145000/145062/mexicofires_amo_2019104.jpg

Figura 1. Sección de introducción de la página control de ozono en la ciudad. Fuente: Sitio repositorio UAPA

explicar la no-linealidad de la contaminación atmosférica y, con este modelo, estimar las reducciones necesarias en las emisiones para controlar las concentraciones de ozono a partir de la reducción de sus precursores (García-Reynoso, *et al*., 2023).

El contenido de la página también aborda la influencia de factores como la topografía y las condiciones meteorológicas en la calidad del aire proponiendo que las emisiones son el principal aspecto sobre el cual se puede actuar para mejorar esta calidad. En la parte final se presentan recomendaciones para reducir las emisiones como el uso de combustibles menos contaminantes y la mejora de la eficiencia de combustión en equipos industriales y en los hogares.

MÉTODO

Estructura de la página web

La página está desarrollada de manera que facilita la navegación y comprensión del contenido relacionado con el control del ozono en la ciudad. A continuación se presenta una descripción de las secciones incluidas en el índice.

1. Introducción: sección que presenta el contexto general sobre la contaminación atmosférica y la importancia del ozono como contaminante (Figura 1).
2. Contenido: muestra el resumen de los temas que se abordarán en el documento, proporcionando una visión general de los aspectos tratados.

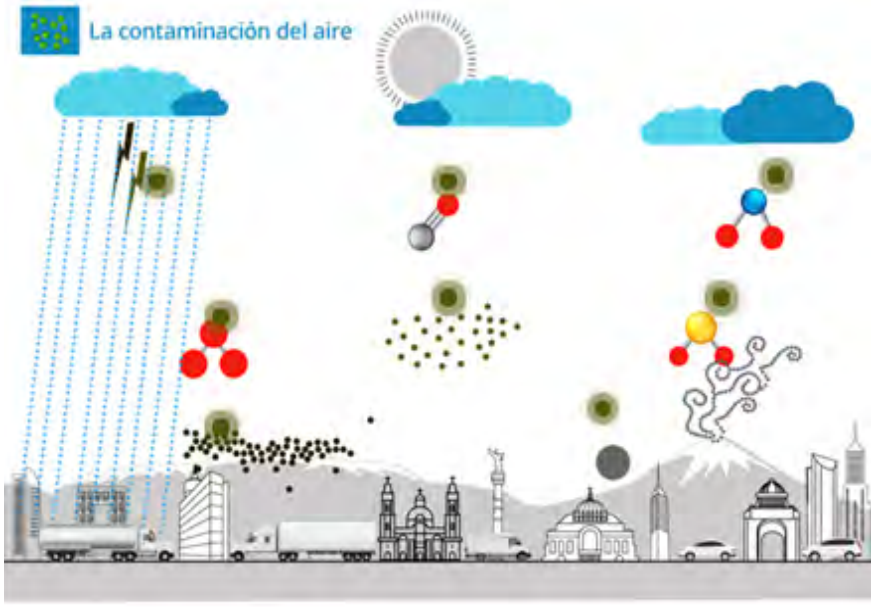


Figura 2. Ilustración interactiva sobre los contaminantes atmosféricos y sus efectos. Fuente: Sitio repositorio UAPA

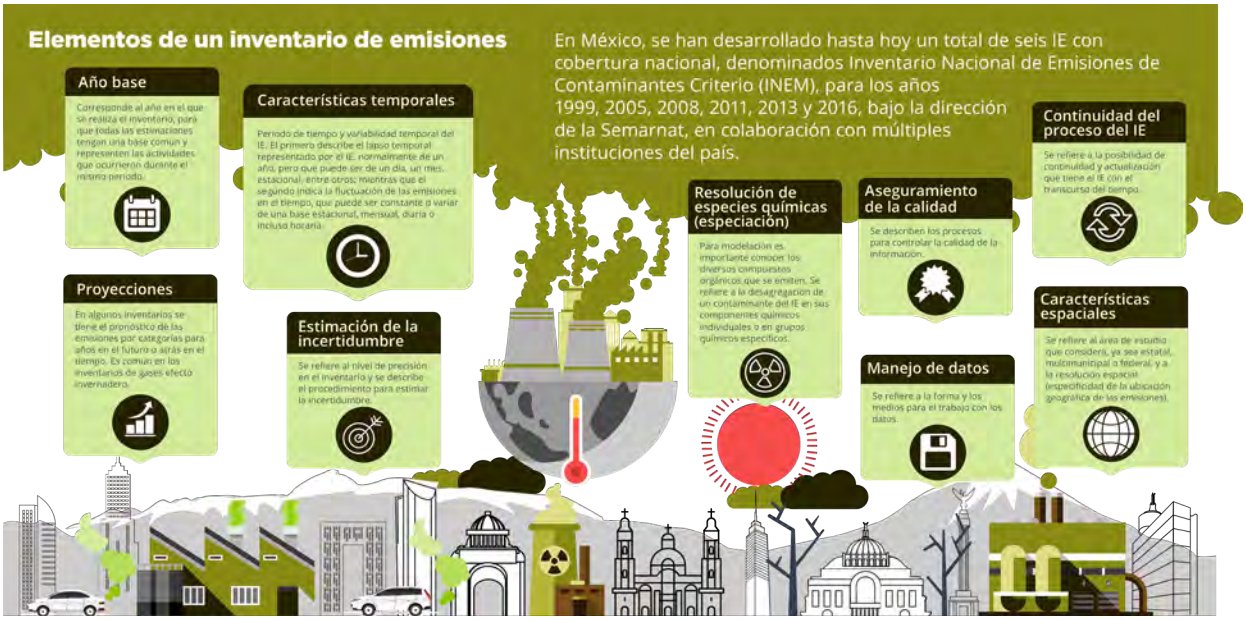


Figura 3. Infografía sobre los elementos principales de un inventario de emisiones. Fuente: Sitio repositorio UAPA

3. Ozono y contaminación: esta sección explora la contaminación atmosférica (Figura 2) y la naturaleza del ozono como contaminante secundario, sus precursores y la relación entre la concentración de ozono y sus efectos en la salud y el medio ambiente.
4. Calidad del aire e inventario de emisiones: se detalla cómo la calidad del aire se ve afectada por las emisiones y la meteorología así como la importancia de un inventario de emisiones para la gestión de la calidad del aire. En una infografía descargable se muestran los elementos del inventario de emisiones (Figura 3).
5. Reducción de ozono: sección dedicada a las estrategias y métodos para reducir las emisiones de ozono, empleando como herramienta didáctica el modelo cinético empírico (EKMA) mediante gráficos interactivos como el presentado en la Figura 4.
6. Actividades: interactivas que permiten a los usuarios explorar y aplicar los conceptos aprendidos sobre la contaminación y el ozono.
7. Actividades 1 y 2: específicamente diseñadas para profundizar en la comprensión y el aprendizaje de los temas tratados. En la Figura 5 se muestran los encabezados de ambas actividades.

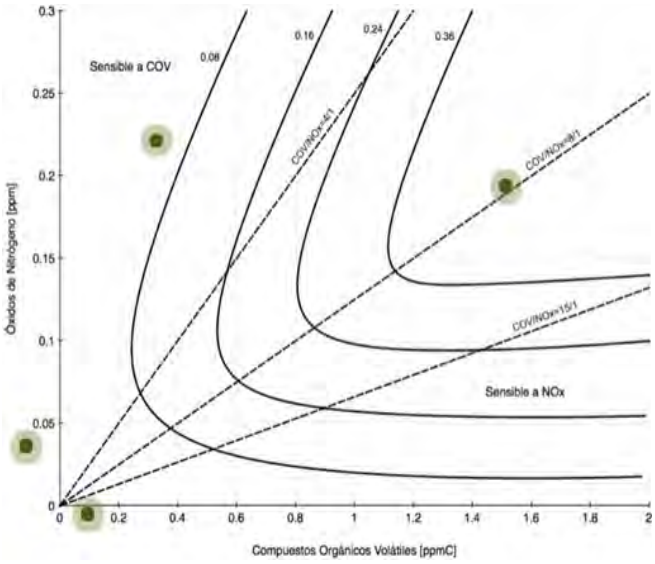


Figura 4. Diagrama EKMA donde se muestra el efecto de las concentraciones ambientales y el ozono. Fuente: Sitio repositorio UAPA

Figura 5. Actividades para profundizar sobre el tema de la contaminación por ozono. Fuente: Sitio repositorio UAPA

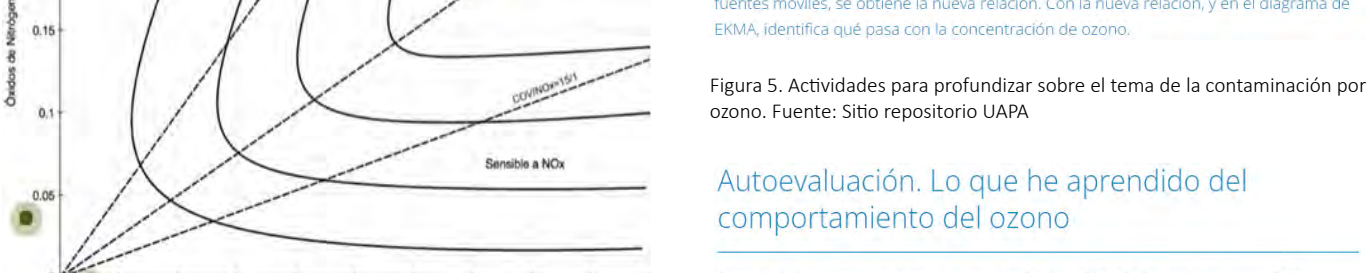


Figura 6. Autoevaluación para el visitante de la página. Fuente: Sitio repositorio UAPA

8. Autoevaluación: una sección que permite a los usuarios evaluar su comprensión del contenido presentado. En la Figura 6 se muestra el encabezado de la autoevaluación.
9. Fuentes: referencias y recursos adicionales que respaldan la información presentada en el sitio "Control de Ozono en la Ciudad", incluyendo estudios y publicaciones relevantes. Este índice proporciona una estructura clara y lógica que guía al lector a través de los diferentes aspectos del control del ozono y la calidad del aire, facilitando un aprendizaje integral sobre el tema.

Desarrollo de la página web

La página fue desarrollada por un equipo de profesionales.

1. Coordinación general: Jorge León Martínez
2. Coordinación de desarrollo: Edith Tapia Rangel
3. Coordinación académica: Arón Jazcilevich Diamant
4. Elaboración del contenido: José Agustín García Reynoso
5. Administración del proyecto: Moisés Cenobio Fraire Benítez
6. Coordinación de asesoría pedagógica: Elisa Campero Malo
7. Asesoría pedagógica: Miriam Díaz Herrera, Susana Claudio Vargas
8. Coordinación de corrección de estilo: Brenda Gómez Sánchez
9. Corrección de estilo: José Antonio Medina Carranza
10. Coordinación de diseño gráfico e integración: Juan de Dios Fuentes Reyes
11. Diseño gráfico e integración: José Félix Olivares Landín
12. Coordinación de programación de recursos: Juan Luis Becerril Gutiérrez

Este equipo multidisciplinario trabajó en conjunto en las diferentes etapas de la elaboración del material para asegurar que el contenido fuera riguroso, accesible y visualmente atractivo.

El sitio "Control de Ozono en la Ciudad" está disponible en https://uapa.cuaed.unam.mx/node/1264

AGRADECIMIENTOS

A la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia por el apoyo recibido en la elaboración de la página y en la publicación de esta Unidad de Apoyo Para el Aprendizaje (UAPA).

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por el apoyo en la realización de este proyecto.

A los revisores por sus valiosos comentarios y sugerencias, que han sido fundamentales para mejorar la calidad de este trabajo. Su atención a los detalles y su perspectiva crítica han enriquecido nuestro enfoque y análisis, ayudando a que el material sea más accesible a un público mayor.

REFERENCIAS

García-Reynoso, J. A. (s.f.). Control de ozono en la ciudad. Unidad de Apoyo para el Aprendizaje. Recuperado de https://uapa.cuaed.unam.mx/node/1264

García-Reynoso J. A., Almanza-Veloz V., Torres-Jardón R. (2023). Ozono y su control en la Ciudad de México. Enseñanza y Comunicación de las Geociencias, 2(2), 24-27. DOI: 10.22201/cgeo.29928087e.2023.2.2.5

Manuscrito recibido: 2 de agosto de 2024
Manuscrito corregido recibido: 23 de septiembre de 2024
Manuscrito aceptado: 23 de octubre de 2024

¿DE DÓNDE VIENEN LOS MICROPLÁSTICOS?

Itzamna Zaknite Flores-Ocampo[1*], Sandra Elizabeth Ibarra-Rueda[1] y José Iván Morales-Arredondo[2]

[1] Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.
[2] Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

***zaknyocampogmail.com**

RESUMEN

El siguiente texto es una lectura para introducir a niños y adolescentes en el tema de contaminación por microplásticos dado que es un tipo de contaminante que, desafortunadamente, está presente en todos lados, aunque no lo veamos a simple vista. En el contenido de este trabajo se menciona cuáles son los productos más comunes de plástico que utilizamos, de dónde vienen, cómo se forman y dónde terminan los microplásticos y cuál es la importancia de estudiarlos. Este tema cada vez toma mayor interés entre la población y es importante que se difunda entre la población más joven. El objetivo es que los niños y jóvenes, al finalizar la lectura puedan reflexionar y contestar preguntas importantes como ¿Sabías que estas consumiendo microplásticos sin darte cuenta? ¿Conoces qué daños ocasionan los microplásticos al medio ambiente? ¿Qué productos son los mayores aportadores de plástico al ambiente?

Palabras clave: Contaminación, residuos, ambiente, basura.

ABSTRACT

The following text is a reading to introduce children and teenagers to the topic of microplastic pollution, a type of contaminant that, unfortunately, is present everywhere, even though we cannot see it with the naked eye The content of this paper mentions which are the most common plastic products used, where they come from, how they are formed and where microplastics end up, and the importance of studying them. This topic is gaining increasing interest among the population, and it is important to spread awareness among the younger generation. The goal is for children and young people, after reading the text, to reflect on and answer important questions such as: Did you know you are consuming microplastics without realizing it? Do you know the damage microplastics cause to the environment? Which products contribute the most plastic to the environment?

Keywords: Pollution, microplastics, environment, garbage.

INTRODUCCIÓN

Es fundamental introducir a los niños y adolescentes a los temas de contaminación, porque ellos son las futuras generaciones que heredarán el planeta, además se encuentran en una etapa clave de su vida donde están formando sus hábitos y valores. Si desde pequeños se les inculca el cuidar el medio ambiente, es más probable que adopten prácticas sostenibles que llevarán a cabo a lo largo de su vida.

El consumo excesivo de productos plásticos que utilizamos en nuestra vida diaria, tanto de manera directa (celular, juguetes, computadora) como indirecta (automóvil, alimentos, jabones) tiene un impacto significativo en el futuro de nuestro planeta. Además, conocer el tema es fundamental debido a su impacto en el ambiente y la salud humana. Los microplásticos están presentes en casi todos los ecosistemas: océanos, ríos, suelos y hasta en el aire que respiramos. Al entrar en la cadena alimentaria, estos contaminantes pueden ser ingeridos por peces y otros animales que consumimos, exponiendo a los seres humanos a sustancias tóxicas (Galloway y Lewis, 2016). Estos productos no se degradan fácilmente, por lo que se quedan en el ambiente mucho tiempo, desde 5 hasta 500 años. ¿Tienes alguna idea de a dónde van a parar los microplásticos?

METODOLOGÍA

Antes de comenzar con la lectura, se sugiere que el profesor plantee a los alumnos preguntas como: ¿Qué son los microplásticos? ¿Qué productos que utilizamos todos los días contienen plástico? ¿En tu casa reciclan algún tipo de plástico? Posteriormente, los alumnos leerán el texto ¿De dónde vienen los microplásticos?, al finalizar la lectura habrá una discusión sobre los puntos más importantes y el docente les preguntará qué medidas se pueden aplicar para reducir la contaminación por plásticos. Entre todo el grupo elegirán las propuestas más innovadoras y tratarán de aplicarlas en la casa o la escuela. ¿Cuál de todas las propuestas te parece más adecuada para llevarla a cabo en casa? Adicionalmente, se proponen actividades prácticas para realizarse en el aula.

Flores-Ocampo, I.Z., Ibarra-Rueda S.E., Morales-Arredondo J.I. (2024). ¿De dónde vienen los microplásticos? *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 3, núm. 2, p. 13-16. DOI: https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.3

Actividad para estudiantes de primaria. Identificación de microplásticos en productos de uso diario.

Material: Lupa, pasta dental, detergente, crema exfoliante, recipientes planos transparentes (como un plato).

Tiempo de la actividad: 30 min

Los estudiantes pueden llevar a la escuela productos de uso diario, como detergentes o pastas de dientes, para buscar microperlas plásticas con la ayuda de una lupa. El objetivo de esta actividad es que los estudiantes puedan ver cómo los microplásticos están presentes en productos comunes de uso diario.

Instrucciones para el profesor: los alumnos colocarán una pequeña porción del producto sobre el recipiente, con la lupa y en un área con bastante luz, buscarán pequeñas esferas y describirán como se ven.

Actividad para estudiantes de secundaria. Análisis de microplásticos en agua.

Material: Muestras de agua, filtros para café, vasos, microscopio.

Tiempo de la actividad: 45 min

Los estudiantes pueden recolectar muestras de agua de la escuela o de su casa y con la ayuda de filtros para café, filtrar el agua, luego, con un microscopio, comenzar a buscar la presencia de microplásticos y discutir sus posibles fuentes y efectos. El propósito es que los alumnos comprueben si el agua que usan a diario esta contaminada por fibras de microplásticos.

Instrucciones para el profesor: el profesor elegirá de 2 a 4 alumnos para que recolecten agua (100 mL aproximadamente o 1 taza de agua) de distintos sitios. Poner sobre uno de los vasos un filtro de café y vaciar cuidadosamente el agua, una vez filtrada toda el agua, retirar el filtro y ponerlo sobre el microscopio. Empezar la búsqueda de fibras desde el objetivo mas lejano e ir cambiando de objetivo hasta encontrar fibras. Clasificarlas por color y discutir cuantas encontraron.

Actividad para estudiantes de secundaria. Se propone que los alumnos hagan carteles, infografías o videos informativos sobre la contaminación por microplásticos y lo difundan entre otros salones. El objetivo de la actividad es concientizar a la comunidad escolar sobre estos contaminantes.

Material: Cartulinas, hojas de papel, plumones

Tiempo de la actividad: 60 min

Instrucciones para el profesor: el profesor conformará distintos grupos de alumnos para que realicen carteles o videos sobre la importancia de los plásticos, su consumo excesivo y algunas medidas preventivas para la reducción de estos contaminantes. Al terminar, cada equipo presentará su trabajo final ante el grupo. También se recomienda pegar sus cartulinas en el patio de la escuela para que otros estudiantes puedan leer la información.

LECTURA

El plástico es un material muy útil porque se utiliza para producir muchos productos a precios muy bajos (Figura 1), sin embargo, tienen que pasar de 5 a 500 años para que se descompongan. Algunos de los plásticos más comunes y que utilizamos en nuestra vida diaria son:

Empaques: Piensa en las botellas de agua, las bolsas de papas fritas o las envolturas de dulces. Todo eso está hecho de plástico porque es liviano y fácil de usar. De hecho, casi la mitad del plástico en el mundo se usa para hacer empaques.

Construcción: En las casas y edificios también se usa mucho plástico, como en las tuberías (por donde pasa el agua) o en las ventanas para que no entre el frío.

Coches y transporte: Los carros usan plástico en muchas partes, como los asientos, el tablero, las ventanas, el volante, parabrisas, tapetes, etc. Se utiliza este material, porque es más liviano que otros materiales, lo que ayuda a que los carros gasten menos combustible.

Figura 1. Productos plásticos más comunes que forman a los microplásticos.

Salud y medicina: En los hospitales, el plástico es muy importante. Muchas cosas como las jeringas, los cubrebocas, guantes, empaques de medicinas o incluso algunos aparatos que usan los doctores están hechos de plástico porque es seguro y antibacteriano.
Electrónica: Los teléfonos, televisiones, impresoras, las tabletas y las computadoras tienen partes de plástico. Es un material ideal para proteger los circuitos del calor y hacer que los aparatos sean más ligeros.
Agricultura y ganadería: En las granjas, el plástico se usa para crear invernaderos (son casas de plástico que ayudan a proteger las plantas del frío, de las lluvias y de animales, ahí dentro se puede controlar la temperatura y la humedad que las plantas necesitan), también las mangueras y recipientes para guardar los cultivos (frutas, verduras, legumbres) se producen de materiales plásticos.
Cosmetología: Son utilizados para mejorar la textura de las cremas, exfoliantes labiales, bases y polvos faciales así como para suavizar la piel.
Limpieza: La mayoría de los detergentes y limpiadores que utilizamos en nuestros hogares contienen microplásticos como parte de los ingredientes que lo conforman, con la finalidad de limpiar de manera más rápida y eficaz.

Así que, aunque no lo veamos siempre, el plástico está por todas partes. Pero, aunque los plásticos son muy útiles en nuestra vida diaria también son contaminantes que se esparcen rápidamente en el ambiente y se convierten en microplásticos cuando se rompen en pedazos muy pequeños, más pequeños que una semilla de manzana (Figura 2).

De acuerdo con su origen, los microplásticos pueden clasificarse en dos grupos (Figura 3). Los primarios son aquellos que se forman a partir del rompimiento de los desechos plásticos como botellas, bolsas, utensilios de cocina, los cuales son los más abundantes. El viento, la lluvia, la luz y las olas ayudan a romper a los plásticos poco a poco en pedazos más pequeños, ya que tienen suficiente fuerza para desmoronar estos materiales. Por ejemplo, cuando lavamos ropa hecha de fibras sintéticas, se desprenden fibras de plástico que viajan por las tuberías hasta llegar al mar.

Estudios que se han realizado muestran que tan sólo una prenda de vestir puede llegar a generar hasta 1900 fibras de microplásticos por lavado (Bertling *et al*., 2018). Otros estudios han demostrado que una persona puede generar hasta cuatro kilos de microplásticos por año. También, cuando los neumáticos de los carros o incluso cuando las suelas de nuestros zapatos tocan el suelo, su material plástico se va desgastando y se libera en forma de pequeñas partículas.

Los microplásticos que son fabricados originalmente con un tamaño pequeño, menor a 5 mm, como el grano de un arroz, se conocen como secundarios. Estas diminutas partículas son añadidas a productos como jabones, exfoliantes, cremas para cara y cuerpo, pastas de dientes y detergentes, con el fin de dar textura o color a los productos (Galloway y Lewis, 2016).

Estos microplásticos son tan pequeños que no los vemos, pero siempre están en el ambiente y terminan en los océanos, ríos, lagos e incluso en el aire, causando problemas para los animales y el medio ambiente.

Los microplásticos viajan desde la casa hasta las playas y después al fondo del mar por diferentes vías. Una de ellas es a través de los desagües de nuestras casas, posteriormente ingresan a los ríos y finalmente llegan a los mares. Allí, son arrastrados por las corrientes hasta depositarse en las playas o en el fondo marino (Sarria-Villa y Gallo-Corredor, 2016).

Otra ruta es a través del viento, las partículas plásticas se desprenden de los productos originales y son llevadas por el viento o arrastradas por la lluvia hacia las alcantarillas, o directamente al mar. Una vez allí, las corrientes oceánicas las esparcen por todo el mundo, y muchas terminan en las costas o se hunden en el agua. Otras tantas son depositadas en la playa o en el mar directamente debido a las actividades turísticas que se desarrollan en las playas (Rimachi y Huamán, 2023). En la actualidad se estima que 200 millones de toneladas métricas de plásticos fluyen en los océanos.

Cada año producimos más de 430 millones de toneladas de plásticos, de los cuales la mayoría son desechados después de su primer uso (de Andrade y Gonçalves, 2022).

Figura 2. Esquema de cómo los plásticos se convierten en microplásticos y la clasificación de acuerdo con su tamaño (Modificado de Vázquez, 2024)

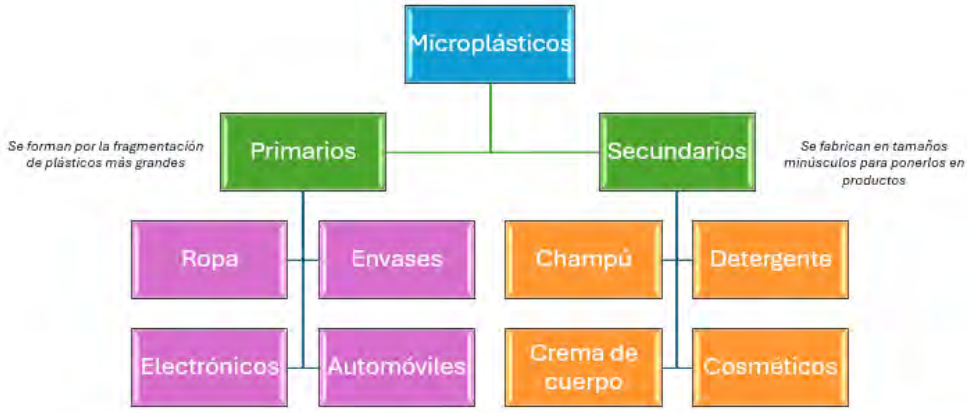


Figura 3. Clasificación de los microplásticos de acuerdo con su origen.

Una vez que llegan al mar, los animales marinos como los peces, las langostas y los ostiones, entre otros, pueden confundir los microplásticos con comida, ya que son del mismo tamaño y color que la comida que consumen. Después de comerlos, los microplásticos pasan por su cuerpo, algunos de ellos bloquean el tracto digestivo, o tienden a viajar hacia diferentes órganos y acumularse en el hígado, músculo y pulmones, sangre, etc. Otra manera en que los microplásticos entran a los organismos de los animales acuáticos es a través de sus branquias cuando respiran (de Miguel *et al.*, 2021). Cuando incluimos alimentos marinos en nuestra alimentación, también ingerimos microplásticos que han acumulado estos organismos, lo que podría provocarnos problemas de salud graves.

Se estima que para el año 2050 habrá más plásticos que peces en el mar (Rimachi y Huamán, 2023). Por ello es importante tomar acciones para el cuidado de nuestro medio ambiente, ya que la salud de nuestro planeta está relacionada con nuestra propia salud. La biodiversidad es esencial para el buen funcionamiento de los ecosistemas, ya que nos proporcionan alimentos, agua y aire. Aunque no podemos eliminar los plásticos de nuestras vidas, si podemos tomar medidas de consumo responsable, como controlar la cantidad de ropa que compramos, reducir los residuos que generamos, utilizar menos envases de plástico y reutilizar y reciclar antes de desechar.

CONCLUSIÓN

El conocer sobre el medio ambiente y su contaminación desde edades tempranas ayuda a desarrollar un pensamiento crítico. Al entender los problemas ambientales, los niños pueden cuestionar las decisiones de consumo y estilo de vida que afectan al planeta, lo que los convierte en ciudadanos más reflexivos y responsables. Además, pueden motivarse a involucrarse en actividades comunitarias, como la limpieza de playas, la plantación de árboles o proyectos de reciclaje. Estas acciones los conectan con su entorno y les enseñan la importancia del trabajo en equipo para cuidar el planeta.

Por otra parte, tomar acciones en la escuela y en la casa para fomentar la educación ambiental ayudará a comprender materias como la ecología, biología y ciencias naturales. Así que, es hora de tomar acción. ¿Qué ideas propones para reducir la generación de microplásticos y contribuir al cuidado de nuestro ambiente?

AGRADECIMIENTOS

A los revisores anónimos de este trabajo, a la correctora de estilo y a los editores de la revista.

REFERENCIAS

Anderson, L. W., y Krathwohl, D. R. (2001). A taxonomy for learning, Bertling, Jürgen., Bertling, Ralf., Hamann, Leandra. (2018). Kunststoffe in der Emwelt: Miko-un Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.).

de Miguel, C., Martínez, K., Pereira, M., y Kohout, M. (2021). Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/120), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

de Andrade, G. N., y Gonçalves, A. (2022). Lixo nos oceanos: uma revisão sobre a problemática do lixo e os resíduos plásticos, encontrados nos oceanos. Revista Interdisciplinar da FARESE, 4.

Galloway, T. S. y Lewis, C. N. (2016). Marine microplastics spell big problems for future generations. Proceedings of the national academy of sciences, 113(9), 2331-2333.

Rimachi, G. Y. C., y Huamán, D. J. F. (2023). Contaminación ambiental y sus efectos en la sociedad. Horizonte Empresarial, 10(1), 1-11.

Sarria-Villa, R. A., y Gallo-Corredor, J. A. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. Journal de Ciencia e Ingeniería, 8(1).

Vazquez, A. (2024). ¿Qué son los microplásticos y cómo se analizan? Eurofins Environment Testing Spain. https://www.eurofins-environment.es/es/que-son-microplasticos-como-se-analizan/

Manuscrito recibido: 16 de septiembre de 2024
Manuscrito corregido: 11 de noviembre de 2024
Manuscrito aceptado: 13 de noviembre de 2024

GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DE ZINC

Alejandro Carrillo-Chávez[1*], Daniela K. Calvo-Ramos[1], Luisa F. Rueda-Garzón[1,2], Liliana Corona-Martínez[1], Carolina Muñoz-Torres[1] y Rocío García-Martínez[3]

[1] Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, México.
[2]Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, C.P. 36000, Guanajuato, México
[3]Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

***ambiente@geociencias.unam.mx**

RESUMEN

La geoquímica ambiental de los isótopos estables del zinc (Zn) es un campo de investigación relativamente nuevo que se centra en la comprensión de los ciclos geoquímico y biogeoquímico del Zn en los sistemas naturales, usando el fraccionamiento isotópico del Zn como trazador de diversos procesos. Los isótopos de Zn son sensibles a una amplia gama de condiciones ambientales, incluidos los cambios en los estados de oxidación, la absorción biológica y la meteorización mineral. Esto los convierte en herramientas valiosas para estudiar las influencias tanto naturales como antropogénicas en el medio ambiente. En general, el Zn es unos de los metales más usados por la industria, es esencial en procesos orgánicos metabólicos (incluidos los del ser humano) y es tóxico en altas concentraciones. Los isótopos de Zn se han utilizado para rastrear fuentes de contaminación en suelos y aguas, especialmente en zonas afectadas por actividades mineras y emisiones industriales, apoyando así las evaluaciones geoquímicas ambientales, y en las estrategias de remediación. La geoquímica de isótopos estables del Zn tiene implicaciones en varios campos de las geociencias, ciencias bioquímicas e incluso en las ciencias médicas. En este artículo se da información general de fuentes naturales de Zn, algunos de sus usos industriales, el Zn como elemento esencial en metabolismo orgánico y su toxicidad. El principal enfoque está centrado en analizar algunos procesos de fraccionamiento isotópico, explicar de manera general sus aplicaciones, definir las metodologías de preparación de muestras en laboratorio, así como los métodos analíticos modernos para medir el fraccionamiento isotópico del Zn, y finalmente presentar algunos datos preliminares de mediciones isotópicas de Zn de proyectos vigentes en Instituto de Geociencias-UNAM, Campus Juriquilla.

Palabras clave: Zinc, isótopos estables, fraccionamiento isotópico, columnas cromatográficas de separación, espectro de masas multicolector acoplado a plasma inducido (MC-ICP-MS, siglas en inglés).

ABSTRACT

Zinc (Zn) stable isotope environmental geochemistry is a relatively new field of research that focuses on understanding Zn's geochemical and biogeochemical cycling in natural systems, using Zn isotopic fractionation as a tracer for various processes. Zn isotopes are sensitive to various environmental conditions, including changes in oxidation states, biological uptake, and mineral weathering. This makes them valuable tools for studying both natural and anthropogenic influences on the environment. Zn is one of the most widely used metals in industry and is an essential metal in organic metabolic processes (including those in humans); it is toxic at high concentrations. Zn isotopes have been used to trace sources of contamination in soils and waters, especially in areas affected by mining activities and industrial emissions, thus supporting environmental geochemical assessments and remediation strategies. Zn stable isotope geochemistry has implications on different areas of geosciences, biochemical sciences, and even on medical sciences. This paper provides general information on natural sources of Zn, some of its industrial uses, Zn as an essential element in organic metabolism, and its toxicity. The main focus is to define some isotopic fractionation processes, explain their applications in a general way, define the sample preparation methodologies in the laboratory, as well as the modern analytical methods to measure Zn isotopic fractionation, and finally, present some preliminary data of Zn isotopic measurements from current projects at Instituto de Geociencias-UNAM, Campus Juriquilla.

Keywords: Zinc, stable isotopes, isotopic fractionation, separation chromatographic columns, multi-collector induced coupled plasma mass spectrometer (MC-ICP-MS).

Carrillo-Chávez, A., Calvo-Ramos, D. K., Rueda-Garzón, L. F., Corona-Martínez, L., Muñoz-Torres, C. y García-Martínez, R. (2024). Geoquímica ambiental de los isótopos estables del zinc. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 3, núm. 2, p. 17-24. DOI: https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.4. .

INTRODUCCIÓN

El zinc (Zn) es un oligoelemento esencial (elemento que forma parte de procesos orgánicos y biológicos) que interviene en diversos procesos bioquímicos, incluyendo el metabolismo humano, y medioambientales (geoquímicos). Aunque el Zn era un elemento empleado ya por griegos y romanos hace más de dos mil años, su descubrimiento se atribuye al alemán Andreas Marggraf, quien lo identificó por primera vez como un metal nuevo en 1746. Su número atómico es 30, pertenece al grupo I2 y al periodo IV de la tabla periódica de los elementos. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0.02 % (en peso) de la corteza terrestre. El Zn se encuentra principalmente en minerales sulfurados como la esfalerita (ZnS), que es la mena más importante de Zn. Otros minerales que contienen Zn son la smithsonita ($ZnCO_3$), la hemimorfita ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2{\cdot}H_2O$) y la willemita ($Zn_2SiO_4$). El Zn se encuentra comúnmente en vetas hidrotermales, depósitos sedimentarios exhalativos (SEDEX), depósitos tipo Mississippi Valley (MVT) y depósitos de sulfuros masivos alojados en volcanes (VHMS). El Zn es moderadamente móvil en el medio ambiente, especialmente en condiciones ácidas y oxidantes. Puede ser transportado en solución como iones Zn^{2+} y diversos complejos (por ejemplo, con cloruro o sulfato). Durante la meteorización, la esfalerita y otros minerales de Zn se oxidan para formar minerales secundarios como la smithsonita y la hemimorfita.

El Zn es necesario en el metabolismo humano y lo podemos obtener en la carne roja, algunos peces y cereales. El Zn da vitalidad a pelo, piel y uñas, y a nivel hormonal es activador en la producción de insulina y de testosterona (Adrie y Bert, 2002; Maret y Sandstead, 2006).

Industrialmente el Zn es un elemento utilizado para sustituir aleaciones ferrosas y no ferrosas, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y de desgaste. También se emplea en la manufactura de semiconductores, reveladores fotográficos, agentes colorantes (especialmente en la producción de pigmentos amarillos) y cerámicas. Las sales y los óxidos de Zn se emplean como catalizadores para la producción de ácido sulfúrico, en la purificación de gases y en la oxidación de etanol. Se emite a la atmósfera principalmente por dos actividades humanas: la quema de combustibles fósiles y la industria. Las fuentes antropogénicas contribuyen con dos terceras partes del Zn que es emitido a la atmósfera, específicamente en forma de óxidos. Las fuentes naturales como polvos continentales, aerosoles marinos y en menor medida, emisiones volcánicas, contribuyen con el resto del Zn en el ambiente (Adrie y Bert, 2002; Chai *et al*., 2017).

El Zn tiende a lixiviar de los suelos en condiciones ácidas. El Zn es un micronutriente esencial, pero puede ser tóxico en concentraciones elevadas. Tanto la Comisión de Estándares de la Unión Europea como la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (EPA por sus siglas en inglés) establecen un valor de 300 mg/kg como límite aceptable en suelos agrícolas (un valor arriba de 500 mg/kg se considera tóxico). Con respecto al agua potable, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un valor de 3 mg/L como límite aceptable, aunque este valor se ha establecido en 1 mg/L recientemente. Para algunas especies de peces 1 mg/L puede ser tóxico (Maret y Sandstead, 2006; Roohani *et al.,* 2013, WHO, 2022a; WHO 2022b).

Factores como el pH, la materia orgánica y las condiciones redox influyen en la distribución de Zn en suelos y sedimentos. En las aguas naturales, las concentraciones de Zn suelen ser bajas (1 mg/L) pero pueden aumentar hasta decenas de mg/L debido a actividades antropogénicas como la minería, la fundición y el vertido de residuos industriales. La Tabla 1 muestra los valores máximos de concentración de Zn en suelos, agua de lagos y ríos, y agua potable establecidos por la Unión Europea, la EPA de los EUA y la OMS (Bradl, 2005).

Tabla 1. Concentración tóxica/crítica de Zn en suelo, agua en ríos, lagos y subterráneos y agua potable (OMS y EPA; Bradl, 2005).

Medio/ Matriz	Concentración tóxica/crítica	Descripción
Suelo	200 - 500 mg/kg	Tóxico para plantas y organismos del suelo (bacterias, hongos, lombrices y artrópodos).
	> 700 mg/kg	Suelo altamente contaminado
Ecosistemas de agua dulce	30 - 200 µg/L (agudo)	Tóxico para organismos acuáticos sensibles
	30 - 60 µg/L (crónico)	Efectos de la exposición a largo plazo
Agua potable	< 1 mg/L (1000 µg/L)	Generalmente seguro para el consumo
	3 - 5 mg/L (3000 - 5000 µg/L)	Límites para la salud/ seguridad propuestos por la OMS y de la EPA de EUA

Las concentraciones de Zn en el petróleo, una de las principales fuentes antropogénicas de Zn en el medio ambiente, incluidos el crudo y los productos refinados, pueden variar en función de la fuente y de las condiciones de procesamiento. El Zn puede entrar en el petróleo a través de varias vías, como los procesos de formación geológica, la contaminación durante la extracción o los aditivos durante el refinado. La Tabla 2 muestra un resumen de las concentraciones típicas de Zn en petróleo crudo, diesel, aditivos y aceites lubricantes. Altas concentraciones de Zn (hasta 50 % de los elementos traza) aparecen en los depósitos de petróleo, especialmente en los que provienen de Kuwait, de Venezuela y del Golfo de México. Se estima que cerca del 21 % de Zn está presente en los derivados del petróleo, incluso después de ser procesados (Khodeir *et al*., 2012; Hou *et al*., 2013; Bradl, 2005). Como ejemplo mencionaremos que en 2008 se estimó que en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) el consumo promedio diario de gasolina fue de 314 mil barriles, es decir, 50 millones de litros por día, cifra que, con el pasar de los años, ha aumentado debido al incremento del parque vehicular. La ZMVM presenta características topográficas y meteorológicas que la vuelven altamente susceptible a presentar altos niveles de contaminación por Zn (Molina y Molina, 2004).

Algunos de los síntomas de intoxicación por Zn son fiebre, dolor de cabeza, náuseas, vómito y fuerte sabor metálico, entre otros. La fiebre del metal por humo es el principal efecto observado en trabajadores expuestos a humo o polvo de óxido de Zn, aparece usualmente de 3 a 10 horas después de la exposición y los síntomas persisten durante 24 a 48 hrs. La Administración Federal de Seguridad

y Salud Ocupacional de los EUA (OSHA por sus siglas en inglés) ha establecido un límite de 1 mg/m³ para vapores de cloruro de Zn ($ZnCl_2$) y 5 mg/m³ para óxido de Zn (ZnO, vapores y polvo) en una jornada diaria de 8 horas, 40 horas a la semana. Esta norma significa que la concentración promedio de $ZnCl_2$ en el aire no debe exceder 1 mg/m³ durante una jornada de 8 horas diarias en una semana de 40 horas. El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los EUA (NIOSH por sus siglas en inglés) recomienda que la concentración de ZnO en el aire del trabajo no exceda un promedio de 1 mg/m³ durante un período de 10 horas en una semana de 40 horas.

Tabla 2. Concentraciones de Zn en diferentes productos de petróleo (Bradl, 2005).

Productos de petróleo	Concentración de Zn	Descripción
Petróleo crudo	0.1 - 10 mg/kg (ppm)	Varía según el tipo de crudo; generalmente en niveles traza
Aceites combustibles/ diésel	< 0.5 mg/kg	Bajas concentraciones debido a los procesos de refinación
Aceites lubricantes	500 - 1500 mg/kg (con aditivos)	Alto cuando se añaden compuestos de Zn para propósitos antidesgaste

Por otro lado, los isótopos estables del Zn, en particular ^{64}Zn, ^{66}Zn, ^{67}Zn, ^{68}Zn y ^{70}Zn, proporcionan información valiosa sobre los ciclos geoquímicos, los procesos biogeoquímicos y los impactos antropogénicos sobre el medio ambiente. El estudio de los isótopos de Zn ha ganado cada vez más atención debido a su potencial para rastrear procesos ambientales como la contaminación por metales, las interacciones suelo-planta y el ciclo de los metales en los sistemas acuáticos. La Figura 1 muestra un aumento en publicaciones científicas sobre isótopos estables de Zn en diferentes matrices y aplicaciones (ciencias ambientales, yacimientos minerales y geoquímica médica) desde 1999 y hasta la fecha (septiembre 2024).

El propósito de este artículo es presentar los fundamentos de la geoquímica de isótopos estables del Zn a nivel de divulgación. Va dirigido a lectores con conocimientos básicos de ciencias de la Tierra y química y puede ser usado como una lectura general en cursos de educación media superior, licenciatura y posgrado. Se presenta información general del Zn, fuentes y usos, se describen los fundamentos del fraccionamiento isotópico (separación de los diferentes isótopos debido a diferentes procesos geoquímicos y bioquímicos), algunas de las aplicaciones prácticas de la isotopía estable del Zn, algunos de los métodos de laboratorio para separación de Zn de otros elementos de masas atómicas similares, el uso de estándares para la medición isotópica, los métodos analíticos modernos, la interpretación de resultados y, finalmente, algunos datos preliminares de investigaciones de isótopos de Zn en muestras medio ambientales en el Instituto de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla.

Isótopos de Zn, abundancia natural y fraccionamiento

El modelo general del átomo consiste en un núcleo con protones (carga eléctrica positiva) unidos estrechamente a neutrones (sin carga eléctrica) y una nube de electrones (carga negativa) girando rápidamente alrededor del núcleo. En un átomo sin alterar, la suma de cargas positivas (protones) es igual al número de cargas negativas (electrones). Los protones y neutrones tienen la misma masa, los electrones no tienen masa, sólo carga. La suma del número de protones y neutrones define la masa atómica de un átomo. Un elemento puede tener el mismo número de protones y neutrones, o más, o menos neutrones en su núcleo. Químicamente esto no afecta porque los electrones (número atómico del elemento) son los responsables de las reacciones químicas. Sin embargo, la variación del número de neutrones en varios átomos del mismo elemento genera variación en la masa atómica del elemento. Un isótopo es un átomo del mismo elemento pero con diferente masa atómica (diferente número de neutrones).

El Zn tiene un número atómico de 30, es decir, tiene 30 protones en su núcleo y 30 electrones orbitando. Este elemento tiene cinco isótopos estables, cada uno con una abundancia natural específica: ^{64}Zn: 48.6 % (30 protones y 34 neutrones), ^{66}Zn: 27.9 % (30 protones y 36 neutrones), ^{67}Zn: 4.1 % (30 protones y 37 neutrones), ^{68}Zn: 18.8 % (30 protones y 38 neutrones), y ^{70}Zn: 0.6 % (30 protones y 40 neutrones). Estos isótopos varían en su masa atómica y muestran sutiles variaciones en los porcentajes. A la relación entre las concentraciones de dos isótopos de Zn se le llama relaciones

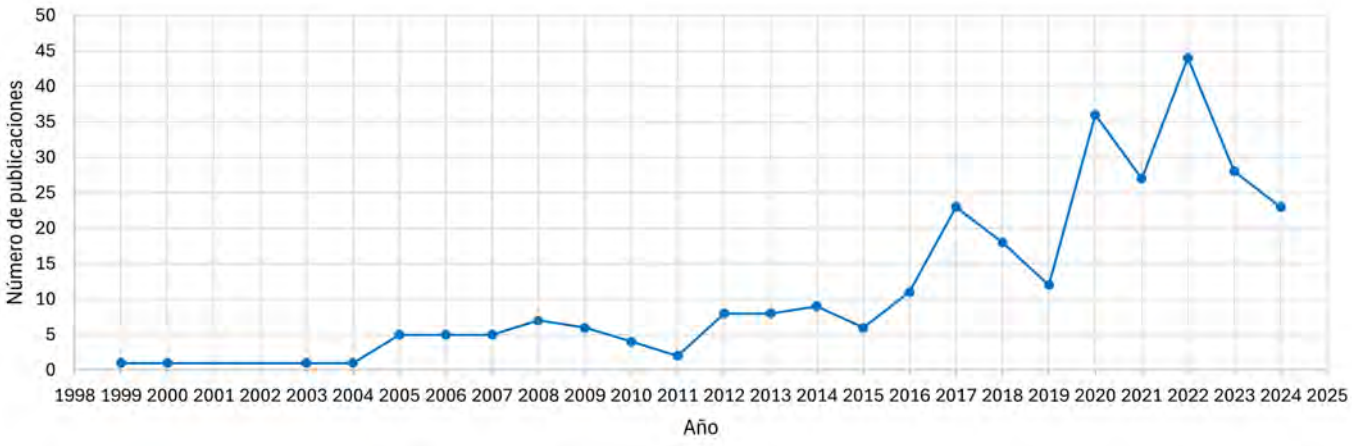


Figura 1. Número de artículos científicos sobre isótopos estables de Zn publicados por año desde 1999 hasta 2024.

isotópicas. Estas variaciones son muy pequeñas (fracciones de porciento) por lo que estas relaciones se expresan en permil (0/00) y son debidas a diferentes procesos físico-químicos y bioquímicos. Estas variaciones pueden analizarse para comprender las fuentes y vías de Zn en el medio ambiente. El fraccionamiento de isótopos de Zn ocurre principalmente por las siguientes causas:

1. **Entorno de enlace.** Los isótopos de Zn más ligeros tienden a formar enlaces más débiles, mientras que los isótopos más pesados forman enlaces más fuertes, causando fraccionamiento durante las reacciones, especialmente en condiciones de alta temperatura o alta presión donde la estabilidad de los enlaces es crítica.
2. **Reacciones redox.** El Zn no sufre cambios redox en entornos biológicos típicos, ya que generalmente se encuentra en el estado de oxidación +2, pero las variaciones en los entornos de complejización pueden influir en su composición isotópica.
3. **Procesos biológicos.** Los organismos pueden absorber preferentemente isótopos de Zn más ligeros o más pesados, dependiendo de las vías metabólicas y de los requisitos fisiológicos. Por ejemplo, las plantas y los microorganismos muestran diferentes preferencias isotópicas debido a sus mecanismos específicos de transporte y almacenamiento.
4. **Precipitación y adsorción mineral.** Durante la formación de minerales y la adsorción en superficies, como óxidos y arcillas, puede producirse un fraccionamiento isotópico a medida que los isótopos de Zn interactúan con diferentes fases sólidas, lo que a menudo da lugar a la incorporación preferente de determinados isótopos en minerales específicos.
5. **Efectos de la temperatura.** La temperatura influye en el fraccionamiento isotópico del Zn. Los procesos a alta temperatura suelen causar menos fraccionamiento que los procesos biológicos y químicos a baja temperatura, que son más selectivos en el uso de isótopos.

Estos factores dan lugar a variaciones detectables en las composiciones isotópicas del Zn que pueden utilizarse para rastrear vías geoquímicas y biológicas.

Aplicaciones de los isótopos de Zn en los estudios medioambientales

Rastreo de fuentes de contaminación

Los isótopos de Zn permiten diferenciar entre fuentes naturales y antropogénicas de Zn en el medio ambiente. Actividades industriales como la minería, la fundición y el uso de Zn en fertilizantes y pesticidas introducen firmas de Zn isotópicamente distintas. Las relaciones isotópicas de Zn en suelos y sedimentos contaminados pueden utilizarse para rastrear la fuente, distinguiendo entre las emisiones procedentes de operaciones mineras y las procedentes de actividades urbanas o agrícolas.

Interacciones suelo-planta

El estudio de los isótopos del Zn permite comprender mejor las interacciones suelo-planta. El fraccionamiento se produce cuando el Zn pasa del suelo a las raíces y brotes de las plantas. Las plantas suelen presentar composiciones isotópicas más ligeras que los suelos debido a la absorción preferente de isótopos más ligeros. Esta información puede utilizarse para mejorar la comprensión del ciclo de nutrientes y la biodisponibilidad en diferentes tipos de suelo.

Ciclo biogeoquímico en sistemas acuáticos

Los isótopos de Zn son valiosos para entender el ciclo del Zn en ambientes marinos y de agua dulce. Las variaciones isotópicas pueden indicar fuentes de entrada de Zn, como el transporte fluvial, la deposición atmosférica o los respiraderos hidrotermales, así como procesos como la adsorción en sedimentos o la absorción biológica por organismos acuáticos. Por ejemplo, los isótopos de Zn más ligeros suelen enriquecerse en las formas disueltas, mientras que los más pesados se asocian a las partículas. Algunas de las funciones biológicas del Zn son: 1) enzimáticas (más de 300 enzimas, incluyendo ADN), 2) estructurales en proteínas (esenciales en ligaduras del ADN), 3) genéticas, 4) antioxidantes, 5) metabólicas, entre otras.

Remediación medioambiental

Los isótopos de Zn pueden utilizarse para controlar la eficacia de los esfuerzos de remediación en lugares contaminados. El análisis isotópico ayuda a evaluar la movilidad del Zn en suelos y sedimentos y el impacto de las técnicas de remediación, como la fitorremediación o la estabilización química. Los cambios en la composición isotópica pueden indicar el éxito de los procesos de eliminación o estabilización de contaminantes.

Métodos de laboratorio para medir el fraccionamiento isotópico del Zn

Métodos de digestión

La digestión de la muestra es un paso esencial en su preparación, pues permite liberar el Zn de su matriz original para poder analizarlo correctamente en solución. Básicamente el Zn en su matriz sólida (roca, mineral, suelo, sedimento, materia orgánica) tiene que disolverse en ácidos (HNO_3-HCl; EPA, 1996) para liberarlo de los compuestos. Si la matriz de la muestra es líquida (agua, por ejemplo), simplemente se diluye y acidificada con HNO_3 para preservar los elementos traza. Los métodos analíticos modernos incluyen el uso de espectrometría óptica de emisión acoplada a plasma inducido (ICP-OES por sus siglas en inglés) y espectrometría de masas acoplada a plasma inducido (ICP-MS por sus siglas en inglés). Estos métodos analíticos permiten la cuantificación de múltiples elementos a la vez. Sin embargo, para los análisis de isótopos estables es necesario aplicar métodos de separación de Zn de otros elementos que pueden causar interferencias de masa en el análisis isotópico.

Métodos de separación

El Zn en solución tiene que separarse de otros elementos con masa atómica similar (como el Cu y el Fe) con el fin de evitar interferencias en la medición de masas atómicas y garantizar la pureza isotópica antes del análisis por espectrometría de masas. Uno de los métodos más utilizados es la cromatografía de intercambio aniónico con ácido clorhídrico (HCl). Esta técnica aprovecha la afinidad variable de los complejos metal-cloruro por la resina a distintas concentraciones de ácido, lo que permite separar eficazmente el Zn de otros elementos como el Cu y el Fe en una sola elución en columna. La especiación del Zn en diferentes concentraciones de HCl controla su comportamiento durante la elución, lo que hace que este método sea eficiente y preciso para aislar el Zn de matrices complejas como las aguas naturales (Cloquet *et.al.*, 2007; Borrok *et al.*, 2007).

Algunas de las ventajas de este método son su alta eficiencia de separación, su facilidad de escalabilidad y su compatibilidad con diferentes matrices de muestra. Un desafío que presenta es que requiere un cuidadoso control del pH y de los componentes de la matriz para evitar la contaminación o la interferencia de otros metales (por ejemplo, Cu y Fe). Esta técnica se ha implementado en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Instituto de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. La Figura 2 muestra, de manera esquemática, los diferentes pasos para separar Cu, Fe y Zn en columnas cromatográficas de intercambio iónico. Todo este trabajo se realiza en el Cuarto Ultralimpio del Instituto de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. Se utiliza HCl de alta pureza (destilado en laboratorio varias veces) y material de plástico de alta densidad cuidadosamente lavado. En resumen, la columna cromatográfica con resina se acondiciona primero con HCl a 10M; como segundo paso, se carga la muestra líquida obtenida de la digestión ácida previamente descrita; se agrega más HCl a 10M; después se agrega HCl a 5M y se eluye el Cu; el siguiente paso es agregar HCl a 1M para eluir el Fe y finalmente se agrega agua desionizada para eluir el Zn. Todos los eluyentes se analizan para determinar el grado de separación y recuperación (Borrok *et al*., 2007).

Uso de soluciones estándar para mediciones del fraccionamiento isotópico del Zn

Los materiales estándar se emplean para calibrar y validar la exactitud de las mediciones así como para corregir posibles sesgos de masa del instrumento (Chen *et al*., 2016; Druce *et al*., 2020). Estos materiales generalmente son desarrollados por agencias e institutos internacionales especialistas en materiales. En el caso del Zn existen diversos estándares reconocidos como el NIST SRM 682 y 683, certificado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés), y el IRMM-3702, certificado por el Instituto de Materiales de Referencia y Medición (IRMM, por sus siglas en inglés), y el JMC 3-0749 Lyon Zn, desarrollado por Johnson Matthey Co. (JMC). Este último es un estándar altamente puro, utilizado en estudios de fraccionamiento isotópico de Zn en sistemas biológicos y geológicos para el rastreo de procesos naturales y antropogénicos. Existen otros materiales de referencia y estándares, pero los mencionados anteriormente son los más comúnmente utilizados. La Figura 3 muestra la gráfica de la Figura 1 (número de artículos sobre isótopos estables de Zn desde 1999 y hasta 2024) combinada con el uso de los diferentes materiales estándares. Se

Figura 2. Secuencia esquemática de los pasos a seguir en la separación de Zn, Cu y Fe en columnas cromatográficas (Borrok *et al.*, 2007).

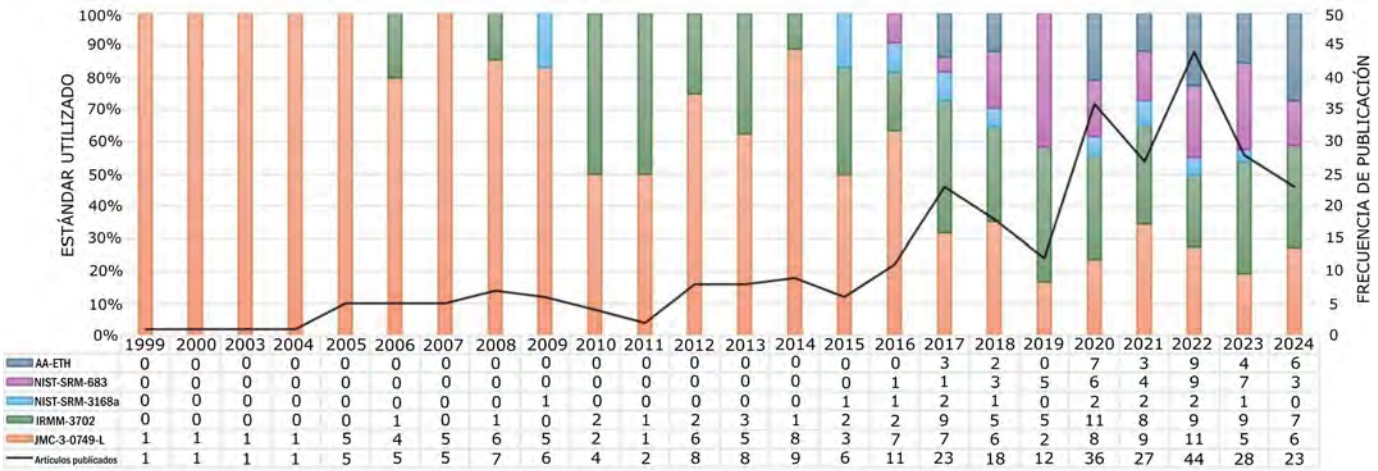


Figura 3. Gráfica que muestra en las barras el uso de diferentes estándares de isótopos estables de Zn desde 1999 y hasta 2024. La línea negra indica el número de artículos científicos publicados en el mismo periodo (Figura 1).

aprecia que el JMC Lyon (JMC-3-0749-L) fue el único que se usó de 1999 hasta 2005 y fue el más popular hasta el 2014. De 2015 a 2024 se han utilizado otros materiales estándares.

Métodos analíticos para la medición de isótopos de Zn

La medición de los isótopos estables del Zn se basa en métodos analíticos de alta precisión que suelen emplear técnicas de espectrometría de masas con multicolector. Con estos métodos se obtiene la precisión necesaria para distinguir variaciones sutiles en las proporciones de isótopos de Zn, que pueden servir de base para estudios sobre procesos biológicos, geológicos y medioambientales. A continuación se presenta un resumen de las principales técnicas analíticas.

Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo multicolector

La espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo multicolector (MC-ICP-MS por sus siglas en inglés) es el método más utilizado para medir los isótopos estables del Zn debido a su gran precisión y a su capacidad para manejar matrices complejas. La muestra se ioniza en un plasma a alta temperatura y la composición isotópica se mide utilizando múltiples detectores, lo que permite la detección simultánea de diferentes isótopos.

- **Ventajas:** Alta precisión, capacidad de medir múltiples isótopos simultáneamente y excelente sensibilidad a muestras de baja concentración.
- **Desafíos:** requiere una cuidadosa separación de la matriz para evitar interferencias de otros elementos (como Fe y Cu) y una calibración minuciosa con estándares de Zn (Albarède, 2004). Esta técnica se usa en el LEI del Instituto de Geociencias, UNAM. La Figura 4 muestra los principales componentes del MC-ICP-MS, sobresalen la fuente de iones en el plasma inducido, el imán (separador) principal, los colimadores (filtros), el detector de señal (voltaje) y el proceso de señales en un ordenador.

Espectrometría de masas por ionización térmica

La espectrometría de masas por ionización térmica (TIMS por sus siglas en inglés) es otro método muy preciso para medir las relaciones isotópicas del Zn. La muestra se ioniza por calentamiento en un filamento, y la composición isotópica se mide con alta precisión.

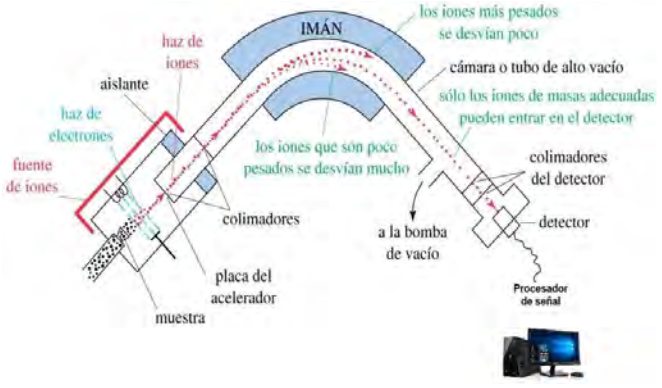


Figura 4. Diagrama esquemático de los principales componentes del MC-ICP-MS: fuente de iones en el plasma inducido, el imán (separador) principal, colimadores (filtros), detector de señal (voltaje) y el proceso de señales en un ordenador. Esta técnica se usa en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Instituto de Geociencias, UNAM.

TIMS se utiliza con menos frecuencia que MC-ICP-MS para el análisis de isótopos de Zn ya que requiere una purificación química más rigurosa de las muestras para garantizar resultados precisos.

- **Ventajas:** alta precisión, especialmente para muestras pequeñas.
- **Desafíos:** requiere una amplia separación química para eliminar los elementos de la matriz y puede requerir más tiempo en comparación con MC-ICP-MS.

Espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS)

La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) se emplea cuando se necesitan mediciones espacialmente resueltas de isótopos de Zn. Consiste en bombardear la muestra con un haz de iones focalizado y recoger los iones secundarios para el análisis isotópico. SIMS es ideal para estudios a microescala, como la medición de variaciones isotópicas dentro de granos minerales o tejidos biológicos.

- **Ventajas:** alta resolución espacial, útil para mediciones *in situ*.
- **Desafíos:** menor precisión en comparación con MC-ICP-MS o TIMS y requiere instrumentación especializada.

Ablación por láser MC-ICP-MS

Esta técnica combina la ablación por láser con MC-ICP-MS, permitiendo el análisis directo de muestras sólidas sin necesidad de disolución. El láser ablaciona la superficie de la muestra y el material vaporizado es transportado al plasma para su análisis isotópico. Este método es útil para estudiar la composición isotópica de materiales sólidos, como las muestras geológicas.

- **Ventajas:** mínima preparación de la muestra, capaz de analizar muestras sólidas directamente.
- **Desafíos:** menor precisión comparado con MC-ICP-MS basado en solución y problemas potenciales con el fraccionamiento durante la ablación.

Lo que miden todos estos instrumentos es la relación entre las concentraciones (señal voltaica en los instrumentos) principalmente del ^{64}Zn, ^{66}Zn y ^{68}Zn de las muestras preparadas y soluciones estándar. Se miden las relaciones $^{66/64}$Zn y $^{68/64}$Zn, las cuales deben ser del doble porque el fraccionamiento del Zn es dependiente de masa, es decir que la relación 68/64 es dos veces la del 66/64. Como se mencionó anteriormente, las variaciones de masas en diferentes muestras son de partes por mil expresadas como 0/00 (permil). Una de las técnicas más usadas para determinar el fraccionamiento es analizar soluciones en la secuencia "solución estándar-muestra-solución estándar": los resultados de las mediciones estándar se promedian y se usan en la Ecuación 1, el resultado se conoce como el valor "$\delta^{66/64}$Zn". El estándar debe de tener un valor de $\delta^{66/64}$Zn= 0, o con una variación de 0.1 0/00 (error instrumental). Esta técnica se conoce comúnmente como *bracketing*. Todos los resultados de las muestras y los estándares se utilizan para calcular el fraccionamiento isotópico entre el ^{66}Zn y ^{64}Zn ($\delta^{66/64}$Zn) mediante la siguiente ecuación:

$$\delta^{66}Zn = \left[\frac{\left(^{66}Zn/^{64}Zn\right)_{sample}}{\left(^{66}Zn/^{64}Zn\right)_{JMC_{ave}}} - 1\right] \times 1000. \qquad \text{Ec. 1}$$

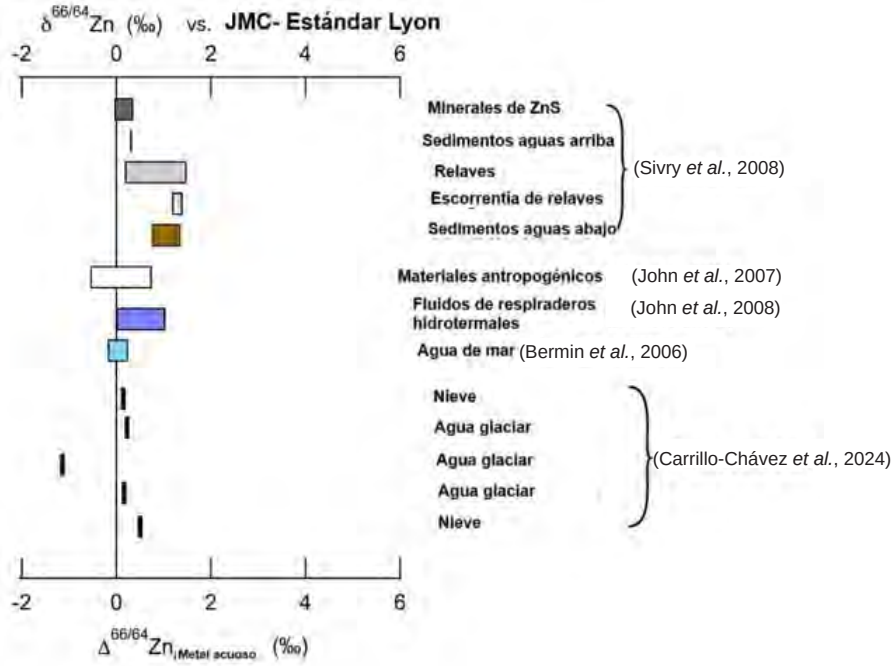


Figura 5. Se muestra una comparación del rango de $\delta^{66/64}$Zn para materiales naturales y antropogénicos y los primeros datos preliminares publicados ($\delta^{66/64}$Zn) para hielo, nieve y agua de glaciares de alta montaña en México y Perú. El fraccionamiento de $\delta^{66/64}$Zn en estos países parece estar relacionado principalmente con fuentes naturales (polvo atmosférico). La muestra con valores negativos de $\delta^{66/64}$Zn parece estar relacionada con una fuente antropogénica, posiblemente micropartículas procedentes de la combustión de hidrocarburos (Bermin *et al.*, 2006; John *et al.*, 2007, 2008; Sivry *et al.*, 2008; Black *et al.*, 2011, Calvo-Ramos *et al.*, 2023, Carrillo-Chávez *et al.*, 2024).

En términos generales, los valores de $\delta^{66/64}$Zn > 0 (positivos) son de fuentes naturales y los valores de $\delta^{66/64}$Zn < 0 (negativos) son de fuentes antropogénicas (Figura 5).

Resultados preliminares de mediciones isotópicas de Zn en proyectos del Instituto de Geociencias-UNAM

La Figura 5 muestra una comparación de la composición isotópica (rango de $\delta^{66/64}$Zn) para materiales naturales y antropogénicos ZnS (mineral de esfalerita, natural), Zn en sedimentos de relaves mineros (Zn natural afectado por actividades mineras), Zn en materiales antropogénicos (industriales y quema de hidrocarburos), Zn en fluidos de respiraderos hidrotermales (Zn natural), Zn en agua de mar (Zn natural principalmente) y los primeros datos preliminares publicados ($\delta^{66/64}$Zn) para hielo, nieve y agua de glaciares de alta montaña en México y Perú (Bermin *et al.*, 2006; John *et al*., 2007, 2008; Sivry *et al.*, 2008; Black *et al.*, 2011, Calvo-Ramos *et al.*, 2023, Carrillo-Chávez *et al.*, 2024). El fraccionamiento isotópico ($\delta^{66/64}$Zn) para las muestras de alta montaña de México y Perú parece estar relacionado con fuentes naturales (polvo atmosférico). Sin embargo, algunas de las muestras presentan valores negativos de $\delta^{66/64}$Zn, lo cual indicaría una posible fuente antropogénica (posibles micropartículas procedentes de la combustión de hidrocarburos). A la fecha se están preparando muestras de diferentes matrices (ambientales, naturales y biológicas) en el LEI Geociencias UNAM y procesando más datos de $\delta^{66/64}$Zn para su análisis y publicación. Las primeras mediciones de $\delta^{66/64}$Zn de muestras de proyectos UNAM se han realizado en el laboratorio de estudios isotópicos del Servicio Geológico de los EUA (USGS por sus siglas en inglés) en Denver, Colorado. Se espera que en breve se tenga la capacidad analítica de medir fraccionamiento isotópico de Zn en diferentes matrices (ambientales, naturales y biológicas) en el LEI del Instituto de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla, como apoyo a para problemas de contaminación, explotación de yacimientos minerales y en el campo relativamente nuevo de la geoquímica médica.

CONCLUSIONES

La geoquímica de isótopos estables de Zn es una compleja interacción de la mineralogía, las condiciones ambientales y las actividades humanas. La movilidad del Zn y su comportamiento en distintos entornos geológicos lo convierten en un elemento importante para la exploración, la vigilancia medioambiental y la comprensión de los procesos geoquímicos de la Tierra. El estudio progresivo de la geoquímica de isótopos estables de Zn no solo ayuda en la gestión de los recursos, sino que también contribuye a mitigar los impactos medioambientales asociados a su extracción y uso, garantizando que este valioso metal pueda utilizarse de forma sostenible.

Por otro lado, el Zn es un oligoelemento vital que influye en una amplia gama de funciones biológicas, desde la catálisis enzimática hasta la expresión génica y la defensa inmunitaria. Sus propiedades bioquímicas únicas lo hacen indispensable para mantener la estructura y la función celulares. Comprender la bioquímica de los isótopos estables de Zn es crucial para apreciar su papel en la salud, en algunas enfermedades y para desarrollar estrategias de gestión de las afecciones relacionadas con el desequilibrio de Zn.

La medición precisa de las proporciones de los diferentes isótopos estables de Zn se logra mediante técnicas como la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente con multicolector (MC-ICP-MS). Este método permite realizar análisis isotópicos de alta precisión y puede detectar pequeñas variaciones en las composiciones isotópicas del Zn. Las muestras suelen prepararse mediante digestión,

purificación y separación para eliminar los elementos de la matriz que puedan interferir en las mediciones isotópicas. Estos métodos de preparación, separación y analíticos son cruciales para las aplicaciones en geoquímica, biología y ciencias medioambientales, donde los isótopos de Zn pueden proporcionar información valiosa sobre el ciclo de los metales traza, el uso de nutrientes y las fuentes de contaminación.

El Instituto de Geociencias de la UNAM participa activamente en investigaciones de frontera sobre geoquímica isotópica de Zn y otros metales como apoyo en diferentes aplicaciones ambientales, exploración minera y de geoquímica médica.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo y el trabajo actual sobre geoquímica isotópica de Zn, Cu y Fe han sido posibles gracias a los recursos del Proyecto UNAM-PAPIIT IN 110421 (2021-2023) "Concentraciones y fraccionamiento isotópico de Zn y Hg en agua de lluvia y hielo glaciar de alta montaña: procesos geoquímicos, fuentes y trayectorias de metales en el centro de México" y al Proyecto CONAHCyT CBF2023-2024-1068 "Geoquímica isotópica estable de metales pesados (Zn, Cu, Hg): aplicaciones ambientales, exploración minera y ciencias de la salud (geoquímica médica). Agradecemos a los M. en C. Mike Pribil y Danny Rutherford por su valioso apoyo para medir variaciones de isótopos estables de Zn en el laboratorio de estudios isotópicos del USGS, Denver, Colorado. Finalmente se agradece a los revisores de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias por sus valiosos comentarios para mejorar y enriquecer este artículo.

REFERENCIAS

Adrie, V. y Bert, H. (2002). Sources of Cd, Cu, Pb and Zn in biowaste. Science of the Total Environment, 300, 87-98. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01103-2.

Albarède, F. (2004). The stable isotope geochemistry of copper and zinc. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 55 (1), 409–427. https://doi.org/10.2138/gsrmg.55.1.409

Black, J.R., Kavner, A. y Schauble, E.A. (2011). Calculation of equilibrium stable isotope partition function ratios for aqueous zinc complexes and metallic zinc: Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(3), 769-783.

Borrok, D.M., Wanty, R.B., Ridley, W.I., Wolf, R., Lamothe, P.J., y Adams, M. (2007).Separation of copper, iron, and zinc from complex aqueous solutions for isotopic measurement. Chemical Geology, 242 (3-4), 400-414.

Bradl, H. (Ed.). (2005). Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation. Elsevier.

Calvo-Ramos, D., Pribil, M., García, R., Muñoz-Torres, C. y Carrillo-Chávez, A. (2023). Isótopos estables de zinc y su uso como trazadores en el medio ambiente de nieve de alta montaña en México (Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba) en Libro de Resúmenes. Convención Geológica Nacional. Sociedad Geológica Mexicana.

Carrillo-Chávez, A., Delgado-Granados H., Vázquez-Selem, L., Ontiveros-González, G., Cortés-Ramos, J., Soto V., Muños-Torres, C. y Calvo-Ramos D. K. (2024). Glaciological studies in Mexico, 60 years of academic work: A summary. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 41(1), 53–65. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2024.1.1706.

Chai, L., Li, H., Yang, Z., Min, X., Liao, Q., Liu, Y., Men, S., Yan, Y., y Xu, J. (2017). Heavy metals and metalloids in the surface sediments of the Xiangjiang River, Hunan, China: distribution, contamination, and ecological risk assessment. Environmental Science and Pollution Research, 24, 874-885. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7872-x

Chen, S., Liu, Y., Hu, J., Zhang, Z., Hou, Z., Huang, F., y Yu, H. (2016). Zinc Isotopic compositions of NIST SRM 683 and whole-rock reference materials. Geostandards and Geoanalytical Research, 40(3), 417–432. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00377.x

Cloquet, C., Carignan, J., Lehmann, M. y Vanhaecke, F. (2007). Variation in the isotopic composition of zinc in the natural environment and the use of zinc isotopes in biogeosciences: a review. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 390:451–463, DOI: 10.1007/s00216-007-1635

Druce, M., Stirling, C. H., y Rolison, J. M. (2020). High-precision zinc isotopic measurement of certified reference materials relevant to the environmental, Earth, planetary and biomedical sciences. Geostandards and Geoanalytical Research, 44(4), 711–732. https://doi.org/10.1111/ggr.12341

Environmental Protection Agency (1996). Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges and soils, Revision 2. https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils.

Hou, D., He, J., Lü, C., Ren, L., Fan, Q., Wang, J., y Xie, Z. (2013). Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China. Ecotoxicology and Environmental Safety, 93, 135-144. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.03.012.

John, S.G., Park, J.G., Zhang, Z., y Boyle, E.A., (2007). The isotopic composition of some common forms of anthropogenic zinc. Chemical Geology, 245, 61-69.

John, S.G., Rouxel, O.J., Craddock, P.R., Engwall, A.M. y Boyle, E.A., (2008). Zinc stable isotopes in seafloor hydrothermal vent fluids and chimneys. Earth and Planetary Science Letters, 269, 17-28.

Khodeir, M., Shamy M., Alghamdi M., Zhong M., Sun H., Costa M., Chen L. y Maciejcczyk P. (2012). Source apportionment and elemental composition of PM2. 5 and PM10 in Jeddah City, Saudi Arabia. Atmospheric Pollution Research, 3(3), 331-340. https://doi.org/10.5094/apr.2012.037.

Maret, W. y Sandstead, H. H. (2006). Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 20(1), 3–18. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2006.01.006

Molina, M. J. y Molina, L. T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. Journal of the Air & Waste Management Association, 54(6), 644-680. https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936.

Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., y Schulin, R. (2013). Zinc and its importance for human health: an integrative review. Journal of Research in Medical Sciences, 18, 144–157. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3724376/

Sivry, Y., Riotte, J., Sonke, J.E., Audry S., Schafer, J., Viers, J., Blanc, G., Freydier, R. y Dupre, B., (2008), Zn isotopes as tracers of anthropogenic pollution from Zn-ore smelters The Riou Mort-Lot River system. Chemical Geology, 255, 295-304.

World Health Organization (2022a). Zinc fact sheet for consumers. National Institutes of Health, Office of Dietary Supplements. https://doi.org/10.4324/9780203426968_chapter_1

World Health Organization (2022b). Zinc fact sheet for health professionals. National Institute of Health, Office of Dietary Supplements. https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-HealthProfessional/

Manuscrito recibido: 19 de septiembre de 2024
Manuscrito corregido recibido: 8 de noviembre de 2024
Manuscrito aceptado: 29 de noviembre de 2024

ENSEÑANZA DEL PENSAMIENTO SISTÉMICO DE LA TIERRA. EVIDENCIAS DEL APRENDIZAJE ACTIVO Y PROPUESTA DE UN MODELO DE CAPÍTULO PARA EL "ATLAS INTERDISCIPLINARIO DE MÉXICO"

Eduardo Becerra-Torres[1,2*] y Oscar Bravo-Pérez[1]

[1] Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Boulevard Juriquilla 3001, C.P. 76230, Querétaro, México.
[2] Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria s/n, C.P. 04510 Ciudad de México, México.

***becerra@unam.mx**

RESUMEN

La Tierra, la sociedad y el ambiente están encarando en los últimos años fuertes crisis climáticas, energéticas, alimenticias e hídricas. En la formación académica esta circunstancia obliga a los docentes a formar profesionales capaces de entender la importancia de la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad y de la aplicación de los conocimientos que con ellas se adquieren en la resolución de problemas multivariables en sistemas complejos. La enseñanza de las Ciencias de la Tierra debe implementar técnicas de docencia innovadoras y estimulantes que permitan desarrollar el Pensamiento Sistémico de la Tierra (PST). Los docentes que abordan los temas del Sistema Tierra deben tener claro que el estudiantado está conformado por personas con perfiles heterogéneos y académicos diversos y, en consecuencia, utilizar las técnicas de enseñanza-aprendizaje tradicionales, discursivas y unidireccionales reduce las posibilidades de adquirir habilidades de orden superior como el análisis, la síntesis y la resolución de problemas. En este trabajo presentamos un modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México" utilizando datos de un estudio sobre la Cuenca de Serdán-Oriental con actividades conducidas que permiten el ejercicio del pensamiento sistémico transdiciplinario con vistas a la formación de profesionales capacitados para contribuir a la solución de los problemas globales que enfrenta la sociedad. Asimismo, presentamos los resultados de la intervención educativa durante el 2022 que demuestran que la aplicación de este modelo de enseñanza estimula el aprendizaje autónomo y la resolución de problemas complejos, con miras a cumplir el objetivo de una educación de calidad y la reducción de desigualdades.

Palabras clave: Pensamiento Sistémico de la Tierra, evaluación del aprendizaje, transdisciplina, pensamiento escalar, pensamiento espacial.

ABSTRACT

In recent years, the Earth, society and the environment have been facing severe climate, energy, food and water crises. In academic education, this situation motivate teachers to train professionals capable of understanding the importance of interdisciplinarity and transdisciplinarity and the application of the knowledge they acquire in solving multivariate problems in complex systems. Earth science education needs to implement innovative and stimulating teaching techniques to develop Earth Systemic Thinking (EST). Teachers dealing with Earth System topics must be aware that the student body is made up of people with heterogeneous and academically diverse profiles and, consequently, using traditional, discursive and unidirectional teaching-learning techniques reduces the possibilities of acquiring higher-order skills such as analysis, synthesis and problem solving. In this paper we present a chapter model for the 'Interdisciplinary Atlas of Mexico' using data from a study on the Serdán-Oriental Basin with conducted activities that allow the exercise of trans-disciplinary systems thinking with a view to training skilled professionals to contribute to the solution of global problems facing society. We also present the results of the educational intervention during 2022 that demonstrate that the application of this teaching model stimulates autonomous learning and the resolution of complex problems, with a view to fulfilling the objective of quality education and the reduction of inequalities.

Keywords: Earth System Thinking, learning assessment, transdisciplinary, scalar thinking, spatial thinking.

Becerra-Torres E. y Bravo-Pérez O. (2024). "Enseñanza del pensamiento sistémico de la Tierra. Evidencias del aprendizaje activo y propuesta de un modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México" *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 3, núm. 2, p. 25-31.
DOI: https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.5

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el estudiantado de Ciencias de la Tierra ha pasado de solo estar interesado en la Tierra desde la perspectiva multidisciplinar a ser agentes claves para entender y transmitir los problemas de un Sistema Tierra complejo. Las sociedades en el mundo demandan al profesional geocientífico el desarrollo llamado Pensamiento Sistémico de la Tierra (PST, *Earth System Thinking*) indispensable para resolver problemas complejos relacionados con las crisis mayores del planeta como la distribución y generación de alimentos o las crisis sanitarias y climáticas, entre otras.

Sin embargo, aunque estos problemas globales han sido planteados para ser resueltos con PST, las investigaciones relacionadas con la enseñanza de las Ciencias de la Tierra (Herbert, 2006; Soltis *et al*., 2019) muestran que el PST solo puede ser transmitido a través de técnicas de aprendizaje activo que estimulen el pensamiento crítico profundo. Estas técnicas requieren de un trabajo de planeación y estructuración sistemático que vaya más allá de la transmisión unidireccional de conocimiento y con evaluaciones simples memorísticas como los exámenes tradicionales.

Este trabajo presenta algunos resultados obtenidos con estudiantes al implementar algunas actividades se incluyen materiales que estimulan el PST y muestran cómo permiten construir aprendizajes significativos. Asimismo, se describen las actividades que pueden encontrarse en el "Atlas Interdisciplinario de México" y algunos datos de encuestas de inicio y cierre de curso. Cuando el estudiantado de Ciencias de la Tierra llegan a desarrollar el PST se convierten en agentes clave con una visión transdisciplinaria capaces de resolver problemas sistémicos y complejos. Asimismo, adquirido este pensamiento estructurado, pueden manejar la comunicación científica en foros con audiencias amplias no necesariamente especializadas.

1.1 Antecedentes para la enseñanza del PST

El PST responde a entender a la Tierra como un sistema dinámico que busca trascender las fronteras disciplinares y adoptar una visión holística de las interacciones entre atmósfera, geósfera, hidrósfera, biosfera con los sistemas sociales (Change, 2004; Jacobson *et al*., 2000). Esta visión es una demanda establecida desde la declaración de la crisis climática global (Pacto Global de las Naciones Unidas, 2000). Rockström *et al*. (2009) plantean que el PST implica visualizar la Tierra como un objeto de estudio donde los componentes físicos, químicos, biológicos y sociales interactúan e influyen mutuamente.

Por su parte, Manduca y Mogk (2006) establecen que el PST implica desarrollar una visión escalar que, en los procesos de enseñanza, estimule la percepción de incluir variables en un espacio de más de dos dimensiones como el mecanismo para establecer relaciones causas-consecuencias claras. Asimismo, debido a la naturaleza del objeto de estudio de las Ciencias de la Tierra, donde la experimentación frecuentemente se ve limitada, el PST implica tener potenciadas habilidades observacionales y deductivas capaces de explicar la fenomenología terrestre con las limitantes de muestreo siempre presentes (Kastens y Manduca, 2012).

1.2. Antecedentes para la enseñanza de los sistemas complejos

Entendamos los sistemas como distintas partes de un todo que aislamos y al que les asignamos límites (reales o imaginarios) para su estudio. Podemos considerar la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera como sistemas con complejidades y características determinadas (Hevia, 2009). Sin embargo, Piaget *et al.* (2006) plantean que los sistemas complejos son una representación de la realidad que es conceptualizada como una totalidad organizada cuyos elementos no son separables y por tanto no pueden ser estudiados aisladamente. Uno de los principales objetivos de la ciencia es comprender los fenómenos naturales que ocurren en la Tierra. Para lograrlo debemos entender que nuestro planeta funciona como un sistema complejo formado por una gran variedad de subsistemas que interactúan entre ellos intercambiando energía y materia (Donner *et al*., 2009).

Los fundamentos de la complejidad consisten en la relación existente entre el objeto de estudio y las disciplinas a partir de las cuales se realiza dicho estudio, en esta relación la complejidad está asociada con la incapacidad de simplificar un fenómeno a partir de una disciplina específica (Piaget *et al*., 2006). En el caso de los modelos utilizados para la enseñanza en esta contribución, utilizamos una base de datos de elementos mayores y trazas con características geológicas descriptibles, relaciones químicas esperadas por los modelos de distribución elemental; y acopladas a una visión espacial que da la capacidad de ser representada con un mapa de la región.En este trabajo mostramos una problemática de manera integral y presentamos como al dotar de materiales centrados en el 'saber-hacer' (Indorf *et al.*, 2021) resulta beneficioso según los datos de percepción del aprendizaje significativo.

METODOLOGÍA

Desde el año 2022 en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla (ENES-J) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se han desarrollado e implementado actividades que permiten aprendizaje activo centrado en datos. Este tipo de aprendizaje permite desarrollar habilidades de orden superior, las cuales generan aprendizaje significativo y entre la comunidad estudiantil un pensamiento crítico (Anderson y Krathwohl, 2001; Ram *et al.*, 2020). Las actividades construidas permiten entrenar las percepciones escalar, espacial y temporal. Todas ellas centradas en problemas del Sistema Tierra atravesados transdisciplinariamente por las ciencias química y geológica. A continuación, se presenta un modelo de actividad, evidencias de aplicación de las actividades y un análisis de los resultados experimentados por el estudiantado que ha tomado los cursos posteriormente a la intervención pedagógica.

DESARROLLO

3.1 La enseñanza transdisciplinaria como vía hacia la sustentabilidad

La multidisciplinariedad es una acción colaborativa entre expertos de distintas áreas para resolver un problema particular sin modificar su visión metodológica (Paoli-Bolio, 2019). Esta es la metodología de algunos de los planes de estudio de la UNAM enfocados en Ciencias de la Tierra, donde especialistas en diversas materias presentan sus conocimientos y generan modelos muchas veces disociados del resto de currículum. Es evidente que esta disociación genera un conflicto

en el estudiantado cuando intentan abordar problemas sistémicos complejos. La interdisciplinariedad plantea un primer acercamiento para subsanar la disociación que mantiene la multidisciplinariedad. Una colaboración interdisciplinaria implica una relación entre las disciplinas cuyas teorías y modelos se integran (Paoli-Bolio, 2019), es decir, que en la resolución interdisciplinaria de problemas se requerirá de la construcción de una metodología común donde cada uno de los especialistas aporte conceptos, planteamientos de problemas y métodos de investigación (Esther *et al*., 2008).

La mayoría de los proyectos de docencia se realiza usando el esquema de la interdisciplinariedad. Sin embargo, se requiere dar un paso más hacia la integración disciplinaria para enfrentar los problemas más preocupantes que padece la humanidad en este siglo. La transdisciplinariedad surge entonces como la aportación metodológica-conceptual de una disciplina dentro de otra disciplina (Esther *et al*., 2008), es decir, ocupar e incorporar metodologías de una disciplina en otra distinta con el fin de reforzar sus planteamientos. La implementación de estos modelos transdisciplinarios beneficia directamente al estudiantado de nivel superior en la resolución de las crisis socioambientales globales (Orion, 2024).

3.2 Actividades de la intervención educativa y el modelo del "Atlas interdisciplinario de México"

El "Atlas interdisciplinario de México: una visión geocientífica", está inspirado en la estructura con la cual se han construido los proyectos de los UNESCO *Global Geoparks* (e.g. Canet, 2023; García-Sánchez *et al.*, 2021). Estos proyectos resaltan el valor geológico de la región escogida y lo complementan y enriquecen con los valores sociales y culturales que a lo largo del tiempo han adquirido los sitios (Palacio Prieto *et al.*, 2019).

Un Atlas con estos estándares es el resultado de un trabajo interdisciplinario. Desde una visión geocientífica, el Atlas se construye a partir de la investigación geológica básica con el propósito de establecer la geodiversidad y estructurar los geositios (Kozlowski, 2004). El geocientífico establece puntualmente la riqueza geológica de un sitio y determina la identidad culturar de la región y los impactos ambientales alrededor de esta área de estudio.

Desde una perspectiva interdisciplinaria y con una visión geocientífica, este Atlas busca presentar el patrimonio geológico del país (Brilha, 2016; Palacio Prieto *et al.*, 2019) a través de muestras de minerales y rocas en conjunto con los datos de caracterización. Estos elementos del patrimonio geológico pueden ser fácilmente presentados gráficamente y organizados de manera *ex situ* desde la perspectiva transdiciplinaria de una persona geocientífica.

La visión de la enseñanza para estimular el pensamiento sistémico requiere implementar recursos didácticos que apoyen el aprendizaje activo. En la Licenciatura en Ciencias de la Tierra se he probado en las asignaturas de Geología General, Geoquímica, Química 2 y Petrología de Rocas Cristalinas diversas actividades para desarrollar habilidades y ejercitar este tipo de aprendizaje. Esto es crucial para formar profesionales aptos en la atención de las problemáticas sistémicas, globales y complejas. En este sentido, el pensamiento sistémico de la Tierra es un concepto central en estos cambios de paradigma y es lo esperado de les licenciades en Ciencias de la Tierra en el ámbito profesional dentro y fuera de la academia.

Considerando lo anterior, la propuesta fue diseñar, elaborar e implementar una serie de actividades dirigidas de aprendizaje cooperativo, aprendizaje con datos y en general actividades con las que el estudiantado tenga claras las aplicaciones y las implicaciones de productos tangibles en su trabajo dentro de los laboratorios y las aulas. Estas actividades son la base del "Atlas interdisciplinario de México: una visión geocientífica". Las cuales fueron implementadas a lo largo del año 2022 y consideradas como una intervención educativa destacable cuyos resultados se presentan a continuación.

RESULTADOS

4.1 El modelo del "Atlas Interdisciplinario de México"

Para cumplir con los objetivos de este trabajo se elaboró el modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México". Actualmente este trabajo sigue en proceso y próximamente será publicado. Cada capítulo presenta materiales gráficos y estadísticos para plantear el análisis regional a través de la visión de la Tierra como un sistema visto desde distintos enfoques. Asimismo, al final de cada capítulo se presentan algunas preguntas/actividades que estimulen el pensamiento crítico y transdisciplinario. Dichas preguntas construyen una actividad final que establece los elementos para caracterizar un problema que vincule al Sistema Tierra con la crisis ambiental desde la perspectiva de las ciencias de la complejidad.

La Figura 1 muestra el mapa y las imágenes petrográficas que, junto con los datos geoquímicos, proponen un ejercicio para el desarrollo de habilidades espaciales y escalares. Al complementar los materiales cartográficos tradicionales con información abstracta como el análisis químico de los materiales terrestres, da un nuevo sentido a los valores poco descriptivos, trasladándolos a un escenario espacial mucho más fácil de correlacionar con las esferas del sistema terrestre.

El proyecto del Atlas también pretende correlacionar la escala microscópica con la escala macroscópica. Esta capacidad de vincular características a una escala menor con los procesos que modelan la Tierra construye las habilidades de síntesis y abstracción cruciales para estudiar los problemas de la sustentabilidad y permitir encontrar una solución factible para ellos. El desarrollo de estas dos habilidades es la base para estructurar un pensamiento sistémico que pueda ser asociado con problemas complejos, como los que se pretende resolver desde la sostenibilidad. Durante esta actividad, el docente debe sensibilizar a les estudiantes sobre la importancia de entender las regiones del planeta en su conjunto, correlacionar características geográficas con los datos cuantificables y formular interpretaciones y conclusiones que sean relacionables con el entorno que se estudia.

4.2 Los resultados de la intervención pedagógica

Durante el año 2022 se realizaron encuestas de inicio y cierre en los dos semestres. La población analizada está representada en la Figura 2a, les estudiantes corresponden a aquellos que tomaron las asignaturas de Geoquímica y Petrología de Rocas Cristalinas del plan de estudios 2010 y Geología General y Química 2 del plan de estudios 2021, ambos grupos de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la ENES-J.

a)

Atlas Interdisciplinario de México
Cuenca de Serdán Oriental, Puebla

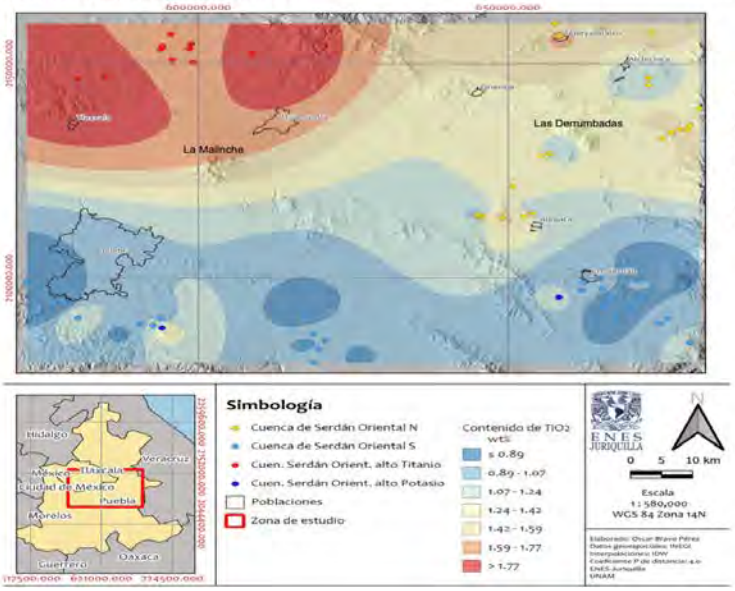
Análisis espacial

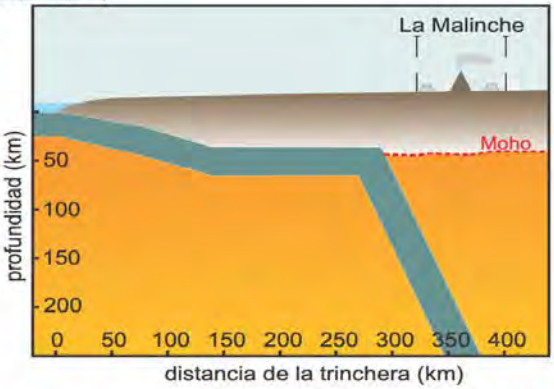
1) Revisa los datos de la siguiente tabla y puntualiza las diferencias en contenido de TiO2 en los tres grupos

Mg#	Edificio volcánico	Muestra	longitude	latitude	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
51.4	malpais T	CSO-1	98°14.057'	19°24.607'	1.80	17.54	8.47	0.12	5.02	7.33	4.21	1.26	0.53
54.2	malpais T	CSO-2	98°03.666'	19°28.382'	1.68	17.15	8.90	0.15	5.91	9.58	3.58	1.09	0.46
52.5	Cerro El Tecajete	CSO-3	97°57.908'	19°27.721'	1.94	16.17	9.91	0.16	6.14	8.84	4.03	1.08	0.44
53.5	malpais T	CSO-4	98°11.492'	19°24.887'	1.90	17.22	9.52	0.15	6.13	8.37	3.64	0.89	0.43
48.6	malpais T	CSO-5	98°11.492'	19°24.887'	1.95	17.20	9.86	0.17	5.22	8.64	3.71	1.07	0.44
63.2	Cerro Tecajete	CSO-6	97°31.286'	19°14.590'	1.31	16.11	7.98	0.13	7.68	8.71	3.49	1.52	0.37
61.2	El Brujo (volcán escudo)	CSO-7	97°37.059'	19°07.016'	1.04	16.80	7.12	0.12	6.31	6.90	3.90	1.49	0.26
57.8	Maar Tecuitlapa	CSO-8	97°32.241'	19°07.385'	1.09	17.37	7.14	0.11	5.48	7.16	4.03	1.54	0.32
59.2	Cerro El Corazón (cono monogenético)	CSO-9	97°19.297'	19°17.467'	1.56	16.42	8.96	0.15	7.31	9.33	3.44	1.03	0.34
61.9	Cerro La Cruz (cono monogenético)	CSO-10	97°20.106'	19°16.731'	1.31	16.61	8.31	0.15	7.57	9.25	3.23	1.24	0.38
60.2	flujo de lava	CSO-11	97°18.493'	19°17.822'	1.53	16.54	8.52	0.16	7.23	9.33	3.56	1.17	0.36
59.5	Cono monogenético	CSO-12	97°17.771'	19°17.760'	1.57	16.66	8.82	0.15	7.27	8.94	3.53	1.15	0.36
66.8	flujo de lava	CSO-13	97°17.570'	19°18.312'	1.23	15.82	8.16	0.15	9.20	9.22	3.24	1.04	0.27
64.2	Cerro Cuecuello	CSO-14	97°16.670'	19°20.465'	1.34	15.84	8.55	0.15	8.59	9.74	3.45	1.07	0.44
56.6	Cerro Tezontepec	CSO-15	97°29.878'	19°31.284'	1.49	16.91	8.29	0.14	6.06	8.22	3.91	1.33	0.38
48.0	malpais Los Humeros	CSO-16	97°21.037'	19°30.086'	1.46	17.10	7.85	0.13	4.07	7.15	3.73	1.39	0.32
61.6	Cerro Tochtepec	CSO-17	97°48.672'	18°49.691'	0.89	16.05	5.41	0.09	4.86	9.20	3.34	2.28	0.27
65.1	Cerro Tepeyahualco	CSO-18	97°52.510'	18°48.690'	0.91	16.78	6.48	0.11	6.77	7.32	4.27	1.01	0.22
61.3	Cerro Zapotlán		97°51.977'	18°50.388'	1.01	17.25	6.35	0.10	5.64	6.77	4.20	1.50	0.35
62.4	Cerro Resbaladero (cono monogenético)	CSO-20	97°27.581'	18°58.676'	1.05	16.96	8.30	0.15	7.73	9.75	3.15	0.99	0.21
64.2	Cerro Borrego (cono monogenético)	CSO-21	97°27.702'	18°57.624'	1.00	16.20	6.52	0.10	6.56	7.98	3.56	2.28	0.44
65.8	Cerro El Jaguey	CSO-22	98°06.380'	18°53.143'	1.38	14.61	9.03	0.15	9.75	10.78	2.75	2.37	0.80
68.5	Cerro Macegual (cono monogenético)	CSO-23	97°29.842'	18°56.784'	1.09	14.39	7.24	0.12	8.85	9.45	3.12	2.78	0.85
60.9	Cerro Mirador (cráter de explosión)	CSO-24	97°25.479'	18°58.644'	0.67	15.84	6.38	0.12	5.57	7.71	3.16	1.52	0.17

Mg#=(Mgmol/(Mgmol+Femol))x100.
Todos las concentraciones de óxidos presentadas son en porcentaje en peso (wt%)

2) Identifica el patrón geoquímico representado espacialmente en el mapa y establece donde se localizan los grupos de manifestaciones volcánicas que corresponde a los datos de la tabla.





3) Completa el esquema, incluyendo dónde esperarias encontrar cada grupo de rocas. Si la sección no permite la representación establece la limitación espacial.

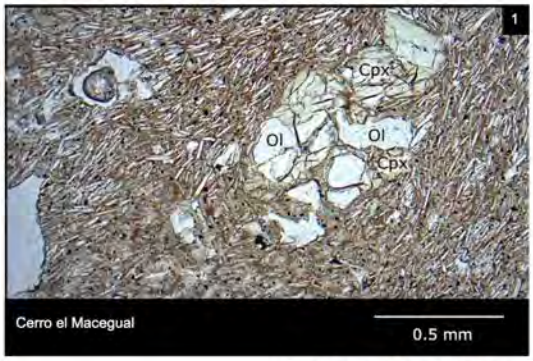
Figura 1. Modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México"; en esta figura se presentan materiales gráficos que ayudan a conducir actividades de análisis, síntesis para construir un aparato crítico. a) Muestra los recursos para estimular el análisis espacial. Datos geoquímicos de Becerra-Torres ***et al.***, 2024 por publicar.

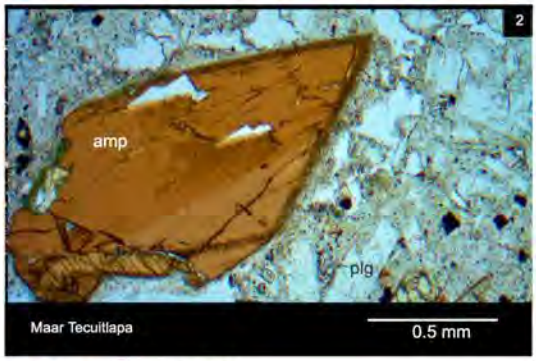
b)

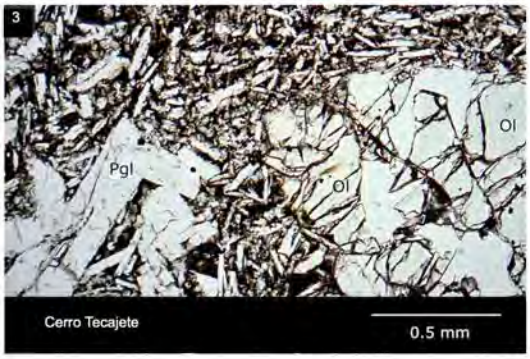
Atlas Interdisciplinario de México
Cuenca de Serdán Oriental, Puebla

Análisis escalar

1) Los datos geoquímicos reflejan procesos de distribución elemental, procesos a nano y micro escala. A continuación se presentan 3 microfotografías, representaciones a escala microscópica.







2) Construye un cuadro comparativo que permita relacionar la mineralogía y las microestructuras de las microfotografías, con la composición presentada en la tabla de datos geoquímicos; y su distribución espacial

Cuadro comparativo

Muestra	Características geoquímicas (escala molecular)	Mineralogía y microestructuras (micro escala)	Distribución en la CSO (macro escala)

Figura 1. Modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México"; en esta figura se presentan materiales gráficos que ayudan a conducir actividades de análisis, síntesis para construir un aparato crítico. b) En esta figura se ejemplifica con microfotografías la diversidad en la CSO y se busca estimular la observación a microescala y vincularla con las observaciones geoquímicas y la visualización espacial. Este material ejemplifica los instrumentos didácticos requeridos para desarrollar habilidades de orden superior que doten al estudiantado de herramientas para atender problemáticas globales. Ol: olivino; Cpx: clinopiroxeno; amp: anfíbol; pgl: plagioclasa.

DISCUSIÓN

5.1 Discusión sobre la intervención pedagógica

La Figura 2b muestra que la mayor carga de calificación para les estudiantes previo a la intervención son los exámenes. Este mecanismo de evaluación se basa solo en el aprendizaje memorístico y no garantiza que el conocimiento perdure a lo largo del tiempo. Un considerable número de docentes asevera que mantener ese recurso es estratégico para que les estudiantes estudien y tengan el conocimiento fundamental de cada asignatura. Sin embargo, la Figura 2c muestra que, en retrospectiva y antes de la intervención educativa, la población encuestada declara que las actividades no tradicionales, activas y que promueven 'el saber hacer' son los mecanismos que mayor retención de conocimiento les han proporcionado. Las discusiones y ejercicios grupales de todas las actividades son las más eficientes y las más emuladas en la intervención educativa.

Figura 2. Muestra los datos presentados gráficamente y procesados de las encuestas llevadas a cabo al comienzo y al cierre de cada curso semestral.
a) Exhibe la caracterización de la población que tomóla encuesta.
b) Los exámenes son los mecanismos de evaluación que más peso tienen para los docentes en la mayoría de los cursos de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra. c) Les estudiantes muestran confirman que los exámenes y en general ninguno de los mecanismos de evaluación tradicionales son lo que mayor repercusión tienen en la retención del conocimiento.

El aprendizaje autónomo es un elemento crucial para construir conocimiento colectivo que enseñe al estudiantado a resolver las problemáticas complejas ambientales y globales con el desarrollo del PST. La Figura 3 exhibe que previamente a la intervención educativa revisar materiales de manera autónoma antes de clases no era una actividad común (en más del 50 % de los casos), por lo que evaluar con exámenes, al parecer evita dejar la responsabilidad del aprendizaje al estudiante, quien solo espera la revisión de las cátedras unidireccionales. Por el contrario, después de la intervención educativa la revisión de materiales de manera autónoma corresponde al 57 % de la población, por lo que emplear un material que estimule el aprendizaje activo, como el presentado en el modelo del "Atlas Interdisciplinario de México" no solo construye habilidades de orden superior, sino que también promueve que el estudiantado asuma la responsabilidad de su aprendizaje y adquiera una visión personal y de calidad para su educación.

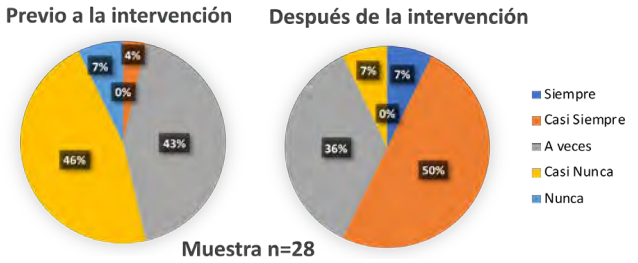


Figura 3. Gráfico que ilustra la respuesta a la pregunta "¿Revisas de manera autónoma los temas previos a una clase?" Los resultados son previos a la intervención educativa, la pregunta se hizo al inicio del semestre y después de la intervención educativa.

Una posibilidad de este cambio en los hábitos del estudiante es que durante el semestre en el tiempo de clase se realizaban actividades con material como el modelo del Atlas. Con esta planeación invertida, es decir actividades durante clase y estudio y revisión en casa, se genera un ambiente de constante retroalimentación y repaso donde solo es posible realizar la actividad de manera exitosa durante la sesión ¿Por qué sucede esto?. Estos escenarios son más realistas y vinculantes a los planteamientos profesionales que enfrentarán al término de su vida universitaria.

Es indispensable hacer notar que estas intervenciones requieren de un trabajo arduo por parte del docente, ya que debe preparar dos tipos de materiales: el de revisión autónoma como los materiales gráficos y los datos del "Atlas", en conjunto con las actividades conducidas que se desarrollarán en clase y serán acompañadas de una rúbrica. Asimismo, una constante conducción y dirección durante el desarrollo de la actividad.

CONCLUSIÓN

El modelo de capítulo para el "Atlas Interdisciplinario de México" es solo un ejemplo de los materiales e instrumentos pedagógicos que hemos preparado y que, desde nuestro punto de vista, se requieren para estimular el Pensamiento Sistémico de la Tierra. Por su parte, el análisis crítico para la solución de problemas y una educación de calidad que forme profesionales capaces de enfrentar los desafíos de la sociedad global y las crisis socioambientales.

Durante el primer año de implementación de estos mecanismos con estudiantes de la ENES-J se ha observado que se fomentan habilidades cruciales y de orden superior con mayor eficiencia que con los métodos tradicionales. Debemos extender este aprendizaje a la enseñanza de la sustentabilidad, ya que los problemas que se busca resolver requieren de la construcción colectiva de conocimiento y de la estimulación del aprendizaje autónomo entre el estudiantado de licenciatura, en conjunto futuras personas profesionistas dirigidas a atender las crisis climáticas, energéticas, hídricas y ambientales globales.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto PAPIME PEI00623, financiado por la DGAPA-UNAM y dirigido por el Dr. Eduardo Becerra-Torres, por los recursos brindados para la realización de este trabajo. A los estudiantes Monserrat Santos Flores y Oscar Bravo Pérez por su colaboración. Los datos utilizados para el modelo y la práctica provienen de trabajos en los que colaboré bajo la responsabilidad de la Dra. Laura Mori.

Agradezco enormemente al equipo editorial de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias por el espacio y a los revisores por sus atentas correcciones que hicieron mejorar esta contribución.

REFERENCIAS

Anderson, L. W., y Krathwohl, D. R. (2001). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives: complete edition. Addison Wesley Longman, Inc.

Becerra-Torres, E., Mori, L., Gómez-Tuena, A., Bravo-Pérez,B., The magmatic diversity of the Serdán-Oriental Basin as a key to understand the geochemical recycling and sub-arc mantle processes. In process.

Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. Geoheritage, 8(2), 119–134. https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3

Canet, C. (2023). Is Mexico a "Megageodiverse" Country? In Geoheritage (Vol. 15, Issue 3). Springer. https://doi.org/10.1007/s12371-023-00865-2

Change, G. (2004). the Earth System: A planet under pressure. Executive Summary, Utgiven Av International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP).

Donner, R., Barbosa, S., Kurths, J., y Marwan, N. (2009). Understanding the Earth as a Complex System–recent advances in data analysis and modelling in Earth sciences. The European Physical Journal Special Topics, 174, 1–9.

Esther, N., Matos, P., Setién, E., y Ii, Q. (2008). La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias: una mirada a la teoría bibliológico-informativa. Acimed, 18(4).

García-Sánchez, L., Canet, C., Cruz-Pérez, M., Morelos-Rodríguez, L., Salgado-Martínez, E., y Corona-Chávez, P. (2021). A comparison between local sustainable development strategies based on the geoheritage of two post-mining areas of Central Mexico. International Journal of Geoheritage and Parks, 9(4), 391–404. https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2021.10.001

Herbert, B. E. (2006). Student understanding of complex earth systems. Special Paper of the Geological Society of America, 413(413), 95–104. https://doi.org/10.1130/2006.2413(07)

Indorf, J. L., Benabentos, R., Daubenmire, P., Murasko, D., Hazari, Z., Potvin, G., Kramer, L., Marsteller, P., Thompson, K. V., Cassone, V. M., y Stanford, J. S. (2021). Distinct factors predict use of active learning techniques by pre-tenure and tenured STEM faculty. Journal of Geoscience Education, 69(4), 357–372. https://doi.org/10.1080/10899995.2021.1927461

Jacobson, M., Charlson, R. J., Rodhe, H., y Orians, G. H. (2000). Earth System Science: from biogeochemical cycles to global changes. Academic Press.

Kastens, K. A., y Manduca, C. A. (2012). Earth and mind II: A synthesis of research on thinking and learning in the geosciences (Vol. 486). Geological Society of America.

Kozlowski, S. (2004). Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. Przeglad Geologiczny, 52(8).

Manduca, C. A., y Mogk, D. W. (2006). Earth and mind: How geologists think and learn about the earth (Vol. 413). Geological Society of America.

Meléndez Hevia, I. (2009). Introducción y conceptos previos. (Vol. 17, Issue 1).

Orion, N. (2024). Geoscience education: Changing paradigms. In Geoethics for the Future (pp. 333–338). Elsevier.

Palacio Prieto, J. L., Martínez, G. F. de C., y González, E. M. R. (2019). Geotrails in the mixteca alta UNESCO Global Geopark, Oaxaca, Mexico. Cuadernos Geograficos, 58(2), 111–125. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7055

Paoli-Bolio, F. J. (2019). multi-inter y transdisciplinariedad. Anuario de Filosofía y Teoría Del Derecho, 13, 347–357.

Piaget, J., Garcia, R., y García, R. (2006). Filosofía de la Ciencia Hacia una lógica de significaciones. www.gedisa.com

Ram, M. P., Ajay, K. K., y Gopinathan Nair, A. (2020). Geoscience Curriculum: Approach Through Learning Taxonomy and Outcome Based Education. Higher Education for the Future, 7(1), 22–44. https://doi.org/10.1177/2347631119886403

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., y Schellnhuber, H. J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society, 14(2).

Soltis, N. A., McNeal, K. S., Forbes, C. T., y Lally, D. (2019). The relationship between active learning, course innovation, and teaching Earth systems thinking: A structural equation modeling approach. Geosphere, 15(5), 1703–1721. https://doi.org/10.1130/GES02071.1

Manuscrito recibido: 2 de mayo de 2024
Manuscrito corregido: 5 de octubre de 2024
Manuscrito aceptado: 16 de octubre de 2024

INTEGRACIÓN INTERDISCIPLINARIA DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN EL CURRÍCULO DE SECUNDARIA: ESTUDIO DE CASO EN EL CONTEXTO COLOMBIANO

Rosa Carolina Ayala-Calvo[1*] y Libardo Andrés Ocampo-Cardona[1]

[1] Facultad de Estudios Sociales y Empresariales, Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, Manizales, Caldas, Colombia. C. P. 170001

***rosac.ayalac@autonoma.edu.co**

RESUMEN

Se realizó un estudio de caso múltiple con cuatro docentes de secundaria que trabajan en instituciones educativas públicas de Colombia, con el fin de analizar cómo los profesores de diferentes asignaturas enseñan los temas de Ciencias de la Tierra (CT) presentes en los currículos actuales. Los docentes participantes respondieron una encuesta cualitativa de 38 preguntas abiertas y realizaron un ejercicio de transversalidad. Los resultados obtenidos revelan que los temas relacionados con la Tierra y el universo, la meteorología y el medio ambiente son los más comúnmente enseñados, mostrando su relevancia a nivel de educación secundaria. En general, los docentes que orientan las áreas de Ciencias Naturales y Educación en CTSA (Ciencia-Tecnología-Sociedad-Ambiente) poseen una mayor claridad conceptual y abarcan más variedad de temas en CT. Aunque no se implementó directamente con un grupo de estudiantes, los docentes participantes demostraron tener una clara consciencia sobre la importancia de fortalecer la enseñanza de las CT en la educación básica secundaria y la necesidad de superar las barreras existentes para su integración, entre las que se incluyen la limitación de tiempo, la escasez de recursos y el desconocimiento sobre materiales educativos especializados. Se realizó una propuesta de tópicos en CT que contribuyen al desarrollo de las competencias en Ciencias Naturales y Sociales contempladas en los estándares nacionales y se hace un llamado a la comunidad geocientífica interesada en la promoción y educación de las CT a explorar estrategias de intervención y formación docente dirigidas a los profesores de educación secundaria con el fin de incentivar la integración interdisciplinaria de las CT en los currículos actuales y mejorar la calidad de su enseñanza en el país.

Palabras clave: Enseñanza en Ciencias de la Tierra, integración interdisciplinaria, propuesta curricular, estudio de caso.

ABSTRACT

A multiple case study was conducted on four middle-high school teachers in Colombian public schools to analyze how educators from different subject matter areas teach Earth Science (ES) topics under the current curriculum design. Participants answered a 38-open-question qualitative survey and carried out a transversality exercise. According to the results, the most common topics taught are those related to the Earth and the universe, meteorology, and the environment, revealing their importance in secondary education. Overall, Natural Sciences and STEM teachers have more conceptual clarity and introduce a broader range of topics. Although we did not implement any instrument in the student groups, all teachers expressed the importance of strengthening the ES teaching in secondary education and the need to overcome the existent barriers that hinder their practical application in the classroom, which include time constraints and the lack of resources and knowledge about specialized educational materials to support the instruction. We included a curricular proposal of ES topics that enhances the performance expectations consigned in the Natural and Social Sciences national standards. We encourage geoscientists and researchers in Earth Sciences Education (ESE) to explore interventional and formation strategies designed for school teachers to support the interdisciplinary integration of the ES in the curricula, improving the quality of the ESE in Colombia.

Keywords: Earth Sciences Education, interdisciplinary integration, curricular proposal, case study.

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de las Ciencias de la Tierra (CT) en la educación básica secundaria es crucial para que los estudiantes desarrollen habilidades científicas. Estas habilidades incluyen el pensamiento a gran escala y desde diferentes perspectivas temporales, la capacidad de sintetizar y generalizar, la abstracción, el pensamiento espacial de alto nivel, el pensamiento cíclico y el análisis de sistemas complejos (King, 2008; Orion, 2019). Es esencial que el ciudadano común posea un conocimiento adecuado de los sistemas terrestres para tomar decisiones informadas sobre los desafíos actuales que enfrenta la humanidad, como el cambio climático, la demanda de minerales estratégicos para el desarrollo tecnológico y las energías alternativas, la escasez de agua y la creciente exposición a riesgos por desastres naturales (Correa y Greco, 2017; Orion, 2019).

En Colombia, los contenidos relacionados con las CT a nivel de educación secundaria se encuentran en las propuestas curriculares de Ciencias Naturales y Sociales. Desde una perspectiva en educación integral, esto no sería un problema; sin embargo, en la educación secundaria y en especial en la educación media en Colombia (grados 10° y 11°) las Ciencias Naturales "se imparten como conocimientos aislados de Biología, Química y Física" (Claret *et al*., 2019, p. 47), y en las Ciencias Sociales las CT se enfocan en el eje de relaciones espaciales y ambientales.

Los estándares de competencias en Ciencias Naturales, bajo los cuales se diseñan las mallas curriculares de los diferentes colegios, incluyen contenidos en CT aunque no presentan un eje temático definido para esta ciencia, como sí sucede con Biología, Química y Física (MEN, 2006). Por este motivo, en las instituciones educativas del país, los contenidos en CT suelen ser impartidos por docentes especializados en otras áreas del conocimiento y bajo currículos diseñados para disciplinas distintas. Esto genera algunos desafíos como la falta de seguimiento en la progresión de los aprendizajes, la omisión de temas para los cuales los docentes no están preparados o no les generan interés (Arias *et al.*, 2018), y dificultades para detectar concepciones alternativas en los estudiantes, así como para planificar lecciones o seleccionar estrategias de enseñanza adecuadas (Kind, 2009).

No obstante, debido al carácter holístico y multidisciplinario de las CT, es posible establecer relaciones y abordarlas eficazmente en conjunto con otras disciplinas. Estudios en la enseñanza de las CT integradas con la Biología, la Física y la Química (King y Kennett, 2002; Plotnick *et al*., 2009), las Ciencias Sociales (Lacreau, 2015), o en el contexto de la educación en ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente (CTSA; Correa y Greco, 2017), han demostrado que las aproximaciones interdisciplinarias facilitan conexiones más profundas y aprendizajes más significativos en los estudiantes, en comparación con enfoques basados en disciplinas aisladas y conocimientos fragmentados. Esto se debe a que los problemas reales abordados por la ciencia suelen ser multidisciplinarios (Correa y Greco, 2017).

Para esta investigación se realizó un estudio de caso múltiple con la colaboración de cuatro docentes de secundaria que trabajan en instituciones educativas públicas de Colombia, con el objetivo de analizar sus concepciones acerca de las CT, los temas que abordan en el aula, los materiales educativos que utilizan y las dificultades que enfrentan en la enseñanza de estas ciencias. Los resultados de este estudio buscan ofrecer herramientas que incentiven la integración interdisciplinaria de las CT dentro de los currículos actuales y, de este modo, contribuir a mejorar la calidad de la educación de las CT en Colombia.

METODOLOGÍA

Esta investigación fue realizada bajo el diseño de estudio de caso múltiple con un enfoque cualitativo-descriptivo (Yin, 2014). Claret *et al*. (2019), a partir del análisis documental, resaltaron la crisis en la enseñanza de las CT y la necesidad de incluirlas y trabajarlas con mayor profundidad en las aulas colombianas. Para este estudio se consideró pertinente realizar un análisis cualitativo-descriptivo con el fin de entender mejor cómo se realiza esta enseñanza desde diversas asignaturas y qué se puede hacer para incrementar su integración interdisciplinaria, teniendo presente que ésta se encuentra influenciada por contextos y perspectivas diferentes de cada uno de los docentes. Con este fin, se analizó el trabajo de cuatro docentes de instituciones educativas públicas de diferentes municipios de Colombia que orientan asignaturas de Ciencias Naturales y Sociales en grados 6°-11° (Tabla 1). Por motivos de confidencialidad, los nombres de los docentes fueron eliminados y en su lugar se identifican con el nombre del municipio donde laboran.

Tabla 1. Docentes participantes en el estudio de caso

	Heliconia	**Bogotá**	**Macanal**	**Medellín**
Profesión	Licenciado en Biología	Licenciado en Matemáticas y Física	Físico	Historiadora
Años de experiencia	7 años	5 años	4 años	8 años
Asignatura que orienta	Biología, Química y Física en grados 6°-11°	Física en grados 7°-11°	Biología en grado 6° y Física en grados 6°-11°	Ciencias Sociales, Políticas y Económicas en los grados 6°, 7°, 10° y 11°

Para obtener la información necesaria se aplicó como instrumento inicial una encuesta cualitativa que nos permitió tener un panorama acerca del pensamiento docente y de las prácticas en torno a la enseñanza de las CT. En la encuesta de 38 preguntas, los profesores respondieron preguntas abiertas respecto a las CT: la percepción, las relaciones y la aplicabilidad de las CT en sus respectivas áreas de estudio. También seleccionaron los temas en CT que imparten actualmente y los temas de mayor interés para ellos y sus estudiantes. Mencionaron los recursos educativos y las estrategias que utilizan para enseñarlos, evaluaron el estado de la enseñanza actual, propusieron ideas para integrar estas ciencias desde su asignatura y expusieron los retos y dificultades que conlleva enseñar un tópico fuera del área de experiencia, así como aspectos del contexto educativo en el cual se desempeñan. Los detalles de las preguntas de la encuesta y las respuestas de los docentes se pueden consultar en Ayala (2024).

Posteriormente, se realizó un ejercicio con los docentes para transversalizar un tema geológico de interés nacional y que a pesar de su importancia no se encuentra contemplado en la propuesta curricular de secundaria en Colombia. Se seleccionó el volcán Nevado del Ruiz, el cual experimentó actividad durante el año 2023 y tiene una historia notable en el país, ya que la erupción de 1985 se posicionó como una de las más mortales a nivel mundial debido al desconocimiento de la población acerca de la actividad del volcán y la poca difusión de los estudios de riesgo realizados por expertos en los meses previos a la tragedia.

En la primera parte del ejercicio se desarrolla una situación hipotética donde el profesor debe responder las preguntas que los estudiantes hacen en torno a los volcanes, tales como: ¿Qué es un volcán? ¿Se puede predecir una erupción? ¿Todos los volcanes son iguales? ¿En Colombia hay más volcanes? ¿De qué depende que haya volcanes en ciertas zonas específicas? ¿Por qué la gente vive cerca de zonas de riesgo volcánico? Estas preguntas permiten explorar conceptos acerca de los volcanes que van más allá del conocimiento científico y relacionan este tema con la geografía de Colombia, la tectónica de placas y los procesos a gran escala, fenómenos físicos, amenazas naturales, evolución de las poblaciones en torno a los recursos naturales, entre otros, y fueron tomadas de guías educativas especializadas en educación básica primaria y secundaria (D'Elia *et al.*, 2021).

En la segunda parte, se les compartió a los docentes un gráfico en donde se relaciona este tópico específico con diferentes áreas de las ciencias (Figura 1) y se les preguntó cuáles de estos temas podrían enseñar en su asignatura para que los estudiantes conozcan más de este volcán al mismo tiempo que realizan conexiones con su asignatura teniendo en cuenta los objetivos de aprendizaje contemplados en su malla curricular, las estrategias que usarían y las dificultades que identifican para abordar estos temas.

RESULTADOS

A continuación se describirán diferentes aspectos relacionados con la enseñanza de las CT de acuerdo con las respuestas de los docentes estudiados en los dos instrumentos analizados. Por su extensión, no se adjuntan todos los instrumentos resueltos, pero se incluyen algunas de las respuestas de los docentes extraídas textualmente (identificadas en itálica y comillas).

Concepto de los profesores acerca de las Ciencias de la Tierra y relaciones con sus respectivas asignaturas

Los docentes Heliconia, Macanal y Medellín tienen una visión más acorde con los sistemas terrestres, mientras que la definición del docente Bogotá se asemeja más al estudio de la geósfera, sin incluir los otros sistemas:

- **Heliconia:** "Es el conjunto de conocimientos que estudian el planeta, desde su formación, sus cambios, transformaciones y cómo va evolucionando en relación con el universo".
- **Macanal:** "Las CT son aquellas que se encargan del estudio de los elementos que componen la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, así como los fenómenos asociados a estas".
- **Bogotá:** "Es la ciencia donde se realiza el estudio de los componentes y comportamientos de los diferentes elementos que conforman el suelo y el interior de la Tierra".
- **Medellín:** "Es el estudio del origen y evolución del planeta Tierra y de todo lo que hay en él, en especial de la función que tienen cada una de sus capas internas y externas para el normal desarrollo del planeta".

Figura 1. Ideas de temas asociados al Volcán Nevado del Ruiz (VNR), en el Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados en Colombia, que pueden ser abordados en diferentes áreas de estudio.

La manera como relacionan las CT con sus asignaturas varía según el área de experticia de cada docente. Para el profesor Heliconia las CT ayudan a entender las relaciones entre los diferentes sistemas: "Desde las ciencias naturales estudiamos los seres vivos y cómo son sus relaciones con el entorno, la materia y sus transformaciones, además de las leyes que rigen el universo, esto involucra al planeta como parte de un conjunto de conocimientos implícitos en la comprensión de la vida tal cual la conocemos". Para él las CT son importantes para enriquecer su práctica de aula ya que orienta el área de Ciencias Naturales, pero considera que no es necesario que profesionales de cualquier área aprendan CT, ya que le da un enfoque a la obtención de conocimientos científicos sin tener en cuenta sus aplicaciones en la toma de decisiones a nivel de sociedad.

El profesor Macanal considera que la física es fundamental para entender las CT, ya que "los múltiples fenómenos que surgen y que se estudian en las CT encuentran sus herramientas fundamentales en los conceptos trabajados en la Física". Para este docente es crucial comprender los procesos y fenómenos en las CT pues permiten "fortalecer las experiencias significativas llevadas al aula, al igual que el desarrollo de conocimientos a partir de experiencias contextuales guiadas en el aula". Considera también que los conceptos básicos de CT deben hacer parte de la alfabetización científica: "Las CT pese a no ser tan reconocidas, tienen una gran influencia en muchos campos de la actualidad, es por esto que se hace necesario que todos reconozcamos estas ciencias como un conocimiento necesario para comprender el mundo que nos rodea".

El profesor Bogotá, quien también enseña en el área de Física, considera que es importante para él aprender sobre las CT para "valorar nuestro lugar de vida, entender el comportamiento de fenómenos naturales que surgen desde lo profundo de la Tierra, y la conformación de nuestro suelo"; y para promover en sus estudiantes "la necesidad de usar los recursos hídricos y minerales de manera sostenible y responsable, y aprender cómo proteger la biodiversidad".

La profesora Medellín identifica al ser humano como componente activo y transformador de los sistemas terrestres: "En el caso de las CT, ayudan a entender cómo los seres humanos evolucionaron según el entorno en que habitaron, pero también cómo el hombre ayudó en la transformación del planeta". Considera que las CT son importantes para todos los ciudadanos, sin importar su profesión: "El reconocimiento y comprensión de nuestro entorno físico puede ayudarnos a vivir mejor en él, a cuidarlo, a protegerlo y utilizarlo en provecho de todos. Aprender a convivir con nuestro entorno (físico y social) es una competencia ciudadana que se debe desarrollar desde cualquier edad, profesión o ciencia, porque permite asumir un compromiso social con la humanidad y el planeta desde el presente y hacia el futuro". Considera que aunque los temas en CT se han relegado principalmente al campo de las Ciencias Naturales, se deben integrar con las Ciencias Sociales por las razones expuestas anteriormente.

Temas de interés en Ciencias de la Tierra

Los temas de mayor interés para los estudiantes, según los profesores, incluyen el universo, el sistema solar, la energía renovable, la contaminación ambiental, los recursos hídricos y el cambio climático. Sin embargo, los profesores manifiestan que hay limitantes de tiempo y progresión en los aprendizajes: "En los planes de área no hay continuidad en las temáticas, ni tiempo y mucho menos interdisciplinariedad de las áreas o los conocimientos que permita entender estos cambios desde la realidad" (Medellín).

Con respecto a los temas que han sido enseñados por los docentes durante sus años de práctica en las aulas de secundaria se encuentran:

- **La Tierra y el universo.** Los temas relacionados con el origen y composición del universo y del sistema solar, así como los diferentes movimientos planetarios y astronómicos que causan las estaciones, eclipses y fases lunares. Sólo los docentes Heliconia y Medellín mencionaron además el tema de la estructura interna de la Tierra.
- **Sistemas terrestres.** Aunque todos han enseñado acerca del origen de la vida y la evolución de las especies, sólo los docentes Heliconia y Macanal abordan las relaciones entre la biósfera y otros sistemas terrestres. Los recursos hídricos, el ciclo del agua y del carbono sólo han sido enseñados por el profesor Heliconia.
- **Geología.** El docente Heliconia, al orientar asignaturas de Química, incluye el tema de los minerales y la distribución de los elementos químicos en la Tierra. El docente Macanal reporta haber enseñado acerca de la tectónica de placas y los procesos de formación de montañas, fallas geológicas y rasgos geográficos, mientras que la docente Medellín se enfoca sólo en la caracterización de los rasgos geográficos. Los volcanes, tsunamis y terremotos y su relación con procesos de liberación de energía han sido abordados por los docentes Heliconia y Macanal. El profesor Bogotá ha explicado acerca de los movimientos de ondas en diferentes materiales y su relación con los terremotos.
- **Meteorología.** Es común entre todos los profesores enseñar temas básicos acerca del tiempo, el clima, las zonas climáticas y las corrientes atmosféricas.
- **Ciencias Ambientales/Sostenibilidad.** Los temas del cambio climático, las energías renovables y la contaminación ambiental han sido enseñados por los docentes Heliconia, Bogotá y Macanal. En general, todos los docentes contemplan el desarrollo de la humanidad en torno a la disponibilidad o explotación de recursos naturales, pero sólo el profesor Heliconia incluye los riesgos naturales.

Estrategias y materiales educativos utilizados para la enseñanza en Ciencias de la Tierra

Los recursos educativos más comunes que usan los cuatro profesores analizados para abordar los temas descritos en el apartado anterior son el libro de texto/guías del curso, videos y páginas de internet. Ninguno de los cuatro docentes conoce material educativo especializado en Ciencias de la Tierra.

El profesor Heliconia es el único de los docentes analizados que tomó cursos previos en Ciencias de la Tierra durante su formación docente y los incluye regularmente en su práctica de aula. También realiza proyectos transversales en la parte ambiental en donde se articulan problemáticas generales desde diferentes asignaturas. Entre sus prácticas habituales se encuentran la cartografía social, los debates, el uso de imágenes para la argumentación y herramientas interactivas. En el segundo instrumento muestra claridad conceptual aunque tiene sólo un conocimiento general de la temática de los volcanes y considera que puede conectar fácilmente este tema con su área de estudio, concentrándola en conceptos como las placas tectónicas, el origen de la Tierra, estados de la materia, temperatura, energía y contaminación ambiental. Sin embargo, manifiesta que no existen suficientes recursos educativos para realizar actividades de campo/laboratorio y en general tiene poca interacción con docentes de otras disciplinas para llevar a cabo este tipo de actividades.

El profesor Bogotá incluye en sus prácticas docentes numerosas actividades didácticas (maquetas, mapas conceptuales, resúmenes, carteleras, construcción de instrumentos de medición) en combinación con actividades como conversatorios, entrevistas e investigaciones. En el segundo instrumento propone la construcción de un sismógrafo casero e interacción con personas que trabajen con volcanes o vivan en una zona de alta actividad volcánica. Considera que puede enseñar sobre los volcanes, relacionándolos con explicaciones desde la Física: "Temperatura, energías, densidades, estados de la materia, movimientos, ondas, termodinámica, instrumentos de medición, análisis de gráficas de movimiento vs tiempo, fuerzas, transferencia de calor, efectos de la variación de temperatura, fluidos, presión, magnitudes físicas e historia alrededor de la geología". Su conocimiento acerca de los volcanes es limitado, y manifiesta no tener en general mucho conocimiento acerca de las CT, lo que le dificulta evaluar si los recursos utilizados poseen buena calidad científica.

El profesor Macanal se siente seguro con su conocimiento general de los temas de CT que enseña, y debido a que en su asignatura se aplica la educación en CTSA, suele integrar conocimientos de múltiples áreas de estudio con un fuerte componente de aprendizaje centrado en el estudiante para el desarrollo de sus actividades en el aula. Para este docente, "a partir de ejemplos gráficos del fenómeno natural y de las discusiones temáticas con el docente se pueden utilizar recursos que propicien el aprendizaje activo a través de la experimentación e incluso la proposición, con proyectos escolares para dar cuenta del dominio y comprensión del fenómeno en cuestión".

En el segundo instrumento, el profesor Macanal muestra una conexión clara del tema propuesto con su asignatura y conocimiento acerca de la progresión de los aprendizajes durante toda la secundaria, ya que orienta la asignatura de Física-CTSA en todos los grados de secundaria: "Para abordar el tema en grados sextos y séptimos, se establecen los temas de formación terrestre y movimientos tectónicos; en grados octavos y novenos, es posible abordar la temática con base en la dinámica de fluidos y fuentes de energía, y por último en grados décimos y décimo primeros, se profundiza en la Dinámica con el estudio de fuerzas y energía lo que permite establecer la relación con la energía potencial, cinética y térmica propia de este fenómeno natural, además de las ondas y oscilaciones presentes en los sismos de esta temática".

La profesora Medellín utiliza ejercicios prácticos y actividades como maquetas, dibujos, modelos, cuentos, mapas e infografías, entre otros. También incluye el componente de Ciencias Sociales proponiendo por ejemplo el análisis de políticas públicas en torno a la prevención de desastres, cartografía social, identificación de zonas de riesgo en el área donde se encuentra ubicada la institución educativa y el impacto de la desinformación en los medios de comunicación.

En el segundo instrumento, no sólo responde las preguntas conceptuales acerca de los volcanes, sino que las expande hacia su área, explicando temas como el trabajo de un volcanólogo, el aporte del Servicio Geológico Colombiano a la vigilancia de los volcanes del país, la relación de los volcanes con otras áreas de las Ciencias Sociales y la importancia del monitoreo y evaluación de riesgos naturales para la seguridad de todos los habitantes. También adecúa el tema a su contexto educativo: "Identificar por medio de un croquis, mapa o cartografía social los principales riesgos en los alrededores del colegio con ayuda de los estudiantes, para que ellos tomen conciencia y propongan soluciones reales que se puedan aplicar con la ayuda de la comunidad o la institución".

Retos y dificultades que enfrentan los docentes en la enseñanza de temas de Ciencias de la Tierra

Uno de los mayores retos se encuentra en la falta de cursos enfocados en CT durante la formación profesional de los docentes, lo que ocasiona inseguridades en el abordaje de contenidos en CT: "Aunque personalmente me gusta el tema desde la geografía, lo social y económico, siento que como profesora me hacen falta bases científicas que me cuesta entender desde las ciencias naturales y exactas" (Medellín). Durante el desarrollo del segundo instrumento, los profesores también tienen respuestas incompletas y presentan errores conceptuales. Como se mencionó anteriormente, sólo el docente Heliconia tuvo cursos universitarios enfocados en CT.

Todos consideran que la educación en CT a nivel de secundaria en Colombia es en general baja. Sin embargo, la integración de conocimientos de diversas áreas de estudio también es un reto para todos los docentes, incluso para aquellos con mayor nivel de conocimiento en temas de CT, como en el caso de los profesores Heliconia y Macanal. En múltiples ocasiones manifiestan falta de tiempo, recursos y espacios institucionales para abordar temas transversales a su disciplina. "Sólo dispongo de una hora a la semana para enseñar mi asignatura" (Bogotá). "Los currículos de muchas instituciones están desactualizados o tienen una marcada diferencia entre cuál es el campo de las Ciencias Sociales y las Ciencias Naturales y Exactas" (Medellín). "Faltan recursos, siento que (la responsabilidad) recae mucho en el profesor" (Heliconia).

Existen también en general dificultades para identificar una progresión en los aprendizajes de las CT. Sólo el profesor Macanal muestra mayor facilidad para definir diferentes estrategias y objetivos por grado, ya que es el único docente de su área en el colegio y enseña en todos los grados de secundaria.

Entre las principales dificultades que han observado en sus estudiantes se encuentran la lectura de mapas, la conversión de magnitudes, el imaginar procesos que ocurren en escalas muy grandes de tiempo, el concepto de un planeta dinámico, ideas religiosas que los estudiantes intentan conciliar con las explicaciones científicas y dificultades en la conexión o aplicación de contenidos provenientes de diferentes áreas de estudio.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, una barrera para una integración más activa de las CT es la creencia de que su utilidad se limita a una mejor comprensión de los fenómenos naturales. El ejercicio de transversalidad mostró cómo un tema que usualmente se relaciona con las Ciencias Naturales fue una herramienta para que la profesora de Ciencias Sociales (Medellín) hablara de temas sociales como la desinformación de los medios, el papel de las instituciones gubernamentales en el monitoreo de riesgos y la generación de planes de emergencia, la labor de distintos profesionales, aspectos económicos asociados a los volcanes, cómo la ciencia aporta al bienestar de la comunidad y otros. Los temas ambientales y de sostenibilidad también proveen ejemplos excelentes para desarrollar temas sociales y de formación ciudadana con miras hacia el futuro, así como el pensamiento crítico y la toma consciente de decisiones (Correa y Greco, 2017; Lacreau, 2015).

Los docentes reconocen que la integración de tópicos de CT en su disciplina ayuda a generar aprendizajes más significativos y experiencias contextualizadas en los temas propios de sus asignaturas.

Abordar temas de CT también contribuye a desarrollar en los estudiantes diversas habilidades de pensamiento espacial (al analizar cómo se ven los objetos y estructuras tridimensionalmente); temporal (mediante el análisis de diversos fenómenos que pueden ocurrir inmediatamente, como los derrumbes, o procesos que tardan cientos o miles de millones de años); cíclico (ciclo del agua, ciclo del carbono) y de sistemas complejos (ya que involucran procesos físicos, químicos y biológicos que se interrelacionan; King, 2008). Orion (2019) también enfatiza el efecto positivo de las actividades de campo y laboratorio en el desarrollo de habilidades científicas y sociales en los estudiantes.

Los resultados anteriores muestran que, si bien las CT no poseen una identidad propia en los currículos del país, las propuestas curriculares contemplan varios temas y los docentes manifiestan la necesidad de fortalecer su enseñanza a nivel de básica secundaria. Con el fin de incentivar la inclusión de temas de CT, se realizó un análisis de los estándares de competencias a nivel de secundaria (MEN, 2006) y una propuesta de los tópicos de CT que permiten desarrollar dichas competencias desde los ejes temáticos relacionados con el entorno biológico, químico y físico para todos los grados de secundaria (Tablas 2, 3 y 4), así como de las competencias sociales y ciudadanas (Tabla 5).

Tabla 2. Estándares de competencias para la educación Colombiana – Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Naturales (Grados 6° y 7°)

Competencias por área que transversalizan las Ciencias de la Tierra	Temas en Ciencias de la Tierra que se pueden abordar
Entorno vivo	
Explico el origen del universo y de la vida a partir de varias teorías.	Origen y formación del universo y del sistema solar. Primeros organismos en la Tierra, cianobacterias y estromatolitos.
Caracterizo ecosistemas y analizo el equilibrio dinámico entre sus poblaciones.	Rol de la biosfera en los sistemas terrestres, ecosistemas en cavernas. Cambio climático y sus efectos en los ecosistemas.
Propongo explicaciones sobre la diversidad biológica teniendo en cuenta el movimiento de placas tectónicas y las características climáticas.	Interacciones biósfera-geósfera-atmósfera.
Formulo hipótesis sobre las causas de extinción de un grupo taxonómico.	Extinciones masivas en la historia geológica y posibles causas.
Justifico la importancia del agua en el sostenimiento de la vida.	Interacciones entre biósfera e hidrósfera.
Describo y relaciono los ciclos del agua, de algunos elementos y de la energía en los ecosistemas.	Ciclos del agua, de las rocas, del carbono.
Explico la función del suelo como depósito de nutrientes.	Suelos, erosión y meteorización.
Entorno físico	
Verifico la acción de fuerzas electrostáticas y magnéticas y explico su relación con la carga eléctrica.	Tormentas eléctricas, truenos y relámpagos.
Explico cómo un número limitado de elementos hace posible la diversidad de la materia conocida.	Composición de las estrellas y origen de los elementos químicos en el universo, minerales de uso común.
Explico el desarrollo de modelos de organización de los elementos químicos.	Elementos nativos y minerales de uso común.
Comparo masa, peso y densidad de diferentes materiales mediante experimentos.	Densidad de diferentes tipos de rocas y minerales, densidad y diferenciación planetaria-estructura interna de la Tierra.
Relaciono masa, peso y densidad con la aceleración de la gravedad en distintos puntos del sistema solar.	Elementos del sistema solar, los planetas y sus características.
Explico las consecuencias del movimiento de las placas tectónicas sobre la corteza de la Tierra.	Placas tectónicas, volcanes, terremotos, formación de cadenas montañosas, el Cinturón de Fuego.
Ciencia/Tecnología/Sociedad	
Analizo el potencial de los recursos naturales de mi entorno para la obtención de energía e indico sus posibles usos.	Energías renovables, no renovables, combustibles fósiles, recursos naturales, relaciones entre los humanos y los sistemas terrestres (desarrollo sostenible, contaminación ambiental).
Identifico recursos renovables y no renovables y los peligros a los que están expuestos debido al desarrollo de los grupos humanos.	
Justifico la importancia del recurso hídrico en el surgimiento y desarrollo de comunidades humanas.	Hidrósfera-recursos hídricos y su distribución en la superficie terrestre.
Identifico factores de contaminación en mi entorno y sus implicaciones para la salud.	Contaminación ambiental, desarrollo sostenible, relaciones entre los humanos y los sistemas terrestres.
Indago sobre los adelantos científicos y tecnológicos que han hecho posible la exploración del universo.	Geología planetaria, elementos del sistema solar.
Indago acerca del uso industrial de microorganismos que habitan en ambientes extremos.	Organismos extremófilos y relación con el estudio de la vida primitiva en la Tierra.

Tabla 3. Estándares de competencias para la educación Colombiana – Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Naturales (Grados 8° y 9°)	
Competencias por área que transversalizan las Ciencias de la Tierra	**Temas en Ciencias de la Tierra que se pueden abordar**
Entorno vivo	
Formulo hipótesis acerca del origen y evolución de un grupo de organismos.	Los fósiles y su importancia para estudiar la evolución de la vida. La explosión cámbrica, los primeros organismos terrestres.
Establezco relaciones entre el clima en las diferentes eras geológicas y las adaptaciones de los seres vivos.	Evolución de los ecosistemas en el tiempo geológico, registro fósil.
Entorno físico	
Comparo masa, peso, cantidad de sustancia y densidad de diferentes materiales.	Densidad de diferentes tipos de rocas y minerales, gases disueltos en el magma vs densidad y viscosidad.
Establezco relaciones entre energía interna de un sistema termodinámico, trabajo y transferencia de energía térmica; las expreso matemáticamente.	El Sol como fuente de energía, el efecto invernadero, la convección del manto y la energía interna de la Tierra, volcanismo.
Relaciono las diversas formas de transferencia de energía térmica con la formación de vientos.	Convección atmosférica, frentes meteorológicos.
Establezco relaciones entre frecuencia, amplitud, velocidad de propagación y longitud de onda en diversos tipos de ondas mecánicas.	Ondas costeras (reflexión y refracción), tsunamis.
Explico el principio de conservación de la energía en ondas que cambian de medio de propagación.	Ondas sísmicas y terremotos.
Reconozco y diferencio modelos para explicar la naturaleza y el comportamiento de la luz.	Efecto del albedo en la temperatura.
Ciencia/Tecnología/Sociedad/Ambiente	
Establezco la importancia de mantener la biodiversidad para estimular el desarrollo del país.	Desarrollo sostenible, biodiversidad de ecosistemas: páramos, manglares, selva.
Describo procesos físicos y químicos de la contaminación atmosférica.	Combustibles fósiles, gases contaminantes de la atmósfera, calidad del aire, huella del carbono, gestión ambiental.

Tabla 4. Estándares de competencias para la educación Colombiana – Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Naturales (Grados 10° y 11°)	
Competencias por área que transversalizan las Ciencias de la Tierra	**Temas en Ciencias de la Tierra que se pueden abordar**
Procesos biológicos	
Busco ejemplos de principios termodinámicos en algunos ecosistemas.	El Sol como fuente de energía, interacción entre esferas terrestres, ciclos del agua y del carbono, corrientes oceánicas.
Relaciono los ciclos del agua y de los elementos con la energía de los ecosistemas.	
Procesos químicos	
Explico la relación entre la estructura de los átomos y los enlaces que realiza.	Formación de cristales en la naturaleza.
Identifico cambios químicos en la vida cotidiana y en el ambiente.	Meteorización química.
Verifico el efecto de presión y temperatura en los cambios químicos.	Metamorfismo y enfriamiento de cuerpos magmáticos.
Explico la obtención de energía nuclear a partir de la alteración de la estructura del átomo.	Dataciones radiométricas y decaimiento radioactivo - Descifrando la edad de la Tierra y el sistema solar.
Procesos físicos	
Explico el comportamiento de fluidos en movimiento y en reposo.	Fluidos hidrotermales, dinámica de fluidos en el manto.
Establezco relaciones entre campo gravitacional y electrostático y entre campo eléctrico y magnético.	Campo magnético terrestre, cambios de polaridad magnética y registro en las rocas (magnetización remanente), auroras boreales.
Ciencia/Tecnología/Sociedad/Ambiente	
Analizo el potencial de los recursos naturales en la obtención de energía para diferentes usos.	Combustibles fósiles, energías alternativas, minerales estratégicos.

Tabla 5. Estándares de competencias para la educación Colombiana – Currículo de Ciencias Sociales y competencias ciudadanas		
Competencias por área que transversalizan las Ciencias de la Tierra		**Temas en Ciencias de la Tierra que se pueden abordar**
Grados 6° y 7°	***Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Sociales: Relaciones espaciales y ambientales***	
	Reconozco características de la Tierra que la hacen un planeta vivo..	Interacción entre esferas terrestres, relaciones de la Tierra con el sistema solar.
	Utilizo coordenadas, convenciones y escalas para trabajar con mapas y planos de representación.	Latitud/longitud, mapas topográficos, curvas de nivel, mapas meteorológicos.
	Establezco relaciones entre la ubicación geoespacial y las características climáticas del entorno de diferentes culturas.	Tiempo y clima, zonas climáticas.
	Describo las características que permiten dividir a Colombia en regiones naturales.	Climas y microclimas.
	Compromisos sociales y competencias ciudadanas	
	Asumo una posición crítica frente al deterioro del medio ambiente y participo en su protección.	Ciencias ambientales, desarrollo sostenible.
	Reconozco que los seres vivos y el medio ambiente son un recurso único e irrepetible que merece mi respeto y consideración.	Ciencias ambientales, desarrollo sostenible, páramos de Colombia y su importancia.
	Preveo las consecuencias que pueden tener, sobre mí y sobre los demás, las diversas alternativas de acción propuestas frente a una decisión colectiva.	Geoética, desarrollo sostenible, riesgos naturales.
Grados 8° y 9°	***Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Sociales: Relaciones espaciales y ambientales***	
	Describo las principales características físicas de los diversos ecosistemas.	Climas y microclimas, manglares y páramos de Colombia.
	Explico la manera como el medio ambiente influye en el tipo de organización social y económica que se da en las regiones de Colombia.	Riesgos naturales, relaciones entre el ser humano y los sistemas terrestres.
	Comparo las maneras como distintas comunidades, etnias y culturas se han relacionado económicamente con el medio ambiente en Colombia a lo largo de la historia (pesca de subienda, cultivo en terrazas).	Riesgos naturales, relaciones entre el ser humano y los sistemas terrestres, recursos naturales.
	Compromisos sociales y competencias ciudadanas	
	Asumo una posición crítica frente al deterioro del medio ambiente y participo en su protección.	Ciencias ambientales, desarrollo sostenible.
	Conozco y uso estrategias creativas para generar opciones frente a decisiones colectivas.	Riesgos naturales, desarrollo sostenible.
Grados 10° y 11°	***Manejo de conocimientos propios de las Ciencias Sociales: Relaciones espaciales y ambientales***	
	Explico y evalúo el impacto del desarrollo industrial y tecnológico sobre el medio ambiente y el ser humano.	Calentamiento global, recursos minerales, desarrollo sostenible.
	Analizo críticamente los factores que ponen en riesgo el derecho del ser humano a una alimentación sana y suficiente (uso de la tierra, desertización, transgénicos).	Erosión, suelos.
	Compromisos sociales y competencias ciudadanas	
	Analizo críticamente las decisiones, acciones u omisiones que se toman en el ámbito nacional o internacional y que pueden generar conflictos o afectar los derechos humanos.	Uso y distribución de los recursos naturales, minerales estratégicos.
	Comprendo la importancia de la defensa del medio ambiente, tanto en el nivel local como global, y participo en iniciativas a su favor.	Ciencias ambientales.
	Analizo críticamente la influencia de los medios de comunicación en la vida de las personas y de las comunidades.	Geoética, riesgos naturales y organismos de control, la tragedia de Armero.

Si bien la mayoría de los docentes aprendieron durante su práctica los temas de CT que enseñan de acuerdo con el plan curricular, para hacerlo requieren de materiales científicamente adecuados, lo cual no siempre sucede con los libros de texto que se usan en los colegios públicos, no sólo en Colombia, sino en varios países del mundo (King, 2008). En la actualidad existen diversos materiales educativos en CT de acceso gratuito, en idioma español, creados por profesionales en Ciencias de la Tierra y diseñados para la enseñanza a niveles de básica primaria y secundaria, como por ejemplo las guías educativas de *Earth Learning Idea* - versión en español (ESTA, 2024), la colección de libros "Experimentos simples para entender una Tierra complicada" (UNAM, 2021) y guías educativas especializadas en volcanes (D'Elia *et al.*, 2021), ciclo del agua (Assarat *et al.*, 2007) y riesgos y desastres naturales (Wilgenbus *et al*, 2019).

Como se mencionó anteriormente, ninguno de los docentes participantes conoce material educativo especializado en Ciencias de la Tierra, haciendo necesario fortalecer los canales de comunicación entre la comunidad geocientífica y las instituciones educativas.

CONCLUSIONES

Tanto para los docentes de educación secundaria como para la comunidad geocientífica en general es claro que existe una brecha educativa a nivel de las Ciencias de la Tierra. Para reducirla, se requiere que los docentes adquieran conciencia acerca de la utilidad de las aproximaciones interdisciplinarias que involucren las CT para contribuir en el desarrollo de habilidades científicas, cognitivas y sociales de los estudiantes y en el impacto social de un adecuado conocimiento en CT.

Durante esta investigación se pudieron reconocer algunos de los temas de mayor interés y abordaje en las aulas de secundaria, entre los que se encuentran la Tierra y el universo, la meteorología y las ciencias ambientales. El análisis de los estándares de competencias nos permitió también proponer otros tópicos en CT que fomentan el desarrollo de los conocimientos indicados en los ejes temáticos de Biología, Química, Física y Ciencias Sociales. Sin embargo, puesto que es un estudio de caso, se requiere una investigación más extensa que involucre un gran número de docentes e instituciones para tener un panorama más completo acerca de los temas en CT que necesitan mayor refuerzo a nivel de formación docente, permitiendo así la integración efectiva de las CT con las asignaturas que se enseñan actualmente.

Existe una preocupante falta de conocimiento entre los profesores de educación básica acerca de materiales educativos de apoyo diseñados por profesionales especializados en el área de las CT. En el caso nacional, donde los temas en CT son orientados por docentes con otras áreas de experticia, es vital reforzar el trabajo de múltiples geocientíficos e investigadores en la educación de las CT para establecer canales de difusión y comunicación, así como para implementar escenarios pedagógicos que permitan una integración activa de las CT en las aulas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento de manera muy especial a los profesores participantes: "Heliconia", "Bogotá", "Macanal" y "Medellín"; al equipo docente y administrativo del Programa de Maestría en Enseñanza de las Ciencias de la Universidad Autónoma de Manizales y a los profesores Ana Milena López y Francisco Ruiz por sus valiosos comentarios durante la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

Arias, D., Bonan B. y Gonçalves P.W. (2018). Propuestas de formación docente para la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en Argentina. Terræ Didatica, 14(4), 355-362.

Assarat, O., Orion, N., Menajem, O., Yarden, A., Ronen, D. y Lemcoff, J. (2007). El Planeta Azul: El ciclo del agua en los sistemas terrestres – versión en español. Instituto Weizmann de Ciencia. https://stwww1.weizmann.ac.il/geogroup/?p=458

Ayala, R.C. (2024). El CDC en Ciencias de la Tierra: Estudio de caso en cuatro docentes de educación básica secundaria y media en instituciones educativas públicas de Colombia. Trabajo de Grado, Universidad Autónoma de Manizales.

Claret, A., Villa, L.Y. y Méndez-Duque, J. (2019). La propuesta curricular de Ciencias de la Tierra en Colombia. En: Hernández, M. (Ed.), Geociencias en la educación primaria y secundaria. (Vol. I: Realidades y Oportunidades en Latinoamérica y el Caribe, pp. 42-51). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Correa, L. R. y Greco, R. (2017). La integración de temas geocientíficos para la educación en ciencias, tecnología, sociedad y medioambiente: una propuesta para el aprendizaje significativo. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 25(2), 168-175.

D'Elia, L., Carrera, J., Carrera, J., López, L., D'Abramo,S., González, M., Moyano, D., Fortunato, D., Liotta, K., Pompei, J., Massenzio, A., Morote, M., Bilmes, A., Redigonda, J., Mendicino, J., Albarrán, K., Funes, D. y Cuevas, C. (2021). Conociendo los volcanes: Guía didáctica para la enseñanza y aprendizaje del volcanismo, su relación con el ecosistema y el ser humano. Universidad Nacional de La Plata. Andamios, Serie Materiales 7. En Memoria Académica.

Earth Sciences Teachers Association (20 de Junio de 2024). Earth Learning Idea: Innovative, Earth-related teaching ideas (Spanish). https://www.earthlearningidea.com/Indices/contents_Spanish.html

Kind, V. (2009). A conflict in your head: An exploration of trainee science teachers' subject matter knowledge development and its impact on teacher self-confidence. International Journal of Science Education, 31(11), 1529-1562.

King, C. (2008). Geoscience education: an overview. Studies in Science Education, 44 (2), 187-222.

King, C. y Kennett, P. (2002). Earth science contexts for teaching physics. Part 1: Why teach physics in an Earth science context?. Physics Education, 37 (6), 467-469.

Lacreau, H. (2015). Geociencias para la formación ciudadana. XIV Congreso Geológico Chileno-Actas, 469-472.

Ministerio de Educación Nacional (2006). Estándares básicos de competencias. Colombia. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-340021_recurso_1.pdf

Orion, N. (2019). The future challenge of Earth science education research. Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research 1(3), 1-8.

Plotnick, R.E., Varelas, M. y Fan, Q. (2009). An Integrated Earth Science, Astronomy, and Physics Course for Elementary Education Majors. Journal of Geoscience Education, 57 (2), 152-158.

Universidad Nacional Autónoma de México (2021). Experimentos simples para entender una Tierra complicada: Los libros de la serie. Centro de Geociencias, Universidad Autónoma de México. https://tellus.geociencias.unam.mx/index.php/serie/

Wilgenbus, D., Faure, C. y Schick, O. (2018). Cuando la Tierra ruge: proyecto de educación en riesgos en la educación básica. Guía del Profesor (Español). Le Pommier. https://fondation-lamap.org/sites/default/files/pdf_res_int/cuando-la-tierra-ruge-es.pdf

Yin, R. (2014). Case study research: Design and methods. (5ª ed.). Sage.

Manuscrito recibido: 25 de junio de 2024
Manuscrito corregido recibido: 23 de septiembre de 2024
Manuscrito aceptado: 12 de noviembre de 2024

TALLER DE CIENCIA PARA PROFESORES JURIQUILLA, QUERÉTARO, 2024. SU IMPORTANCIA PARA LA FORMACIÓN CIENTÍFICA, EXPERIENCIAS Y REFLEXIONES DEL PROFESORADO PARTICIPANTE

Roxana Núñez-Ramos[1*], Jorge Pineda-Mora[2], Rodrigo Gutiérrez-Navarro[3], Marina Rivera-Trejo[4], Pedro Figueroa-González[5] y Pavka Patiño-Conde[6]

[1] Escuela Nacional Preparatoria 2, Erasmo Castellanos Quinto, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Río Churubusco S/N, Zapata Vela, Iztacalco, Ciudad de México, México. C.P. 08040
[2]Escuela Secundaria Num. 13, Rosario Castellanos, Nueva Francia S/N, Lomas de Cortés, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62240
[3]Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla Num. 3001, Querétaro, Querétaro, México. C.P. 76230
[4]Colegio de Ciencias y Humanidades, Plantel Naucalpan, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. De los Remedios Num. 10, Los Remedios, Naucalpan de Juárez, Ciudad de México, México. C.P. 53400
[5]Preparatoria La Ciénega, Universidad de Guadalajara, Corregidora Num. 500, Calle 40, Guadalajara, Jalisco. C. P. 44420
[6]Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 94, Periodista Roberto Pita Cornejo Num. 17 Emiliano Zapata, Pátzcuaro, Michoacán de Ocampo, México. C.P. 61600

***roxana.nunez@enp.unam.mx**

RESUMEN

El Taller de Ciencia para Profesores (TCP) se desarrolló en el Campus Juriquilla de la Universidad Nacional Autónoma de México, durante la semana del 23 al 29 de junio. Fue una semana de actividades intensas en la que se vinculó al profesorado de secundaria y bachillerato con la investigación, la indagación y la creatividad. Los participantes asistieron durante seis días a talleres de ciencia, seminarios, laboratorios, recorridos académicos y de campo en conjunto con el estudiantado. Algunos de los propósitos del TCP fueron socializar información, participar activamente en los talleres y seminarios, presenciar prácticas sustentables y una salida geológico -paleontológica. De igual forma se buscó replantear las actividades de enseñanza en áreas relacionadas con: Física, Química, Matemáticas, Biología y Ciencias de la Tierra.

En este trabajo se incluye una breve descripción de las actividades realizadas durante el TCP-2024 y se plasman las reflexiones y vivencias de las y los docentes participantes para motivar e incentivar a más profesores a unirse a las actividades, así como a replicar este taller en otros espacios y centros educativos.

Palabras clave: Creatividad, educación STEM, didáctica de las ciencias, proyectos educativos, sustentabilidad, colaboración.

ABSTRACT

The Science Workshop for Teachers (TCP) took place at the Juriquilla Campus of the National Autonomous University of Mexico from June 23rd to June 29th. It was a week of intense activities linking secondary and high school teachers with research, inquiry, and creativity. The participants attended six days of science workshops, seminars, laboratories, and academic field trips along with the students. Some of the purposes of the TCP were to socialize information, actively participate in workshops and seminars, witness sustainable practices, and go on a geological-palaeontological field trip. It also sought to rethink teaching activities in areas related to Physics, Chemistry, Mathematics, Biology, and Earth Sciences.

This work includes a brief description of the activities carried out during the TCP-2024 conveying the reflections and experiences of the participating teachers in order to motivate and encourage more teachers to join the activities and replicate this workshop in other spaces and educational centers.

Keywords: Creativity, STEM education, science education, educational projects, sustainability, collaboration.

Núñez-Ramos, R., Pineda-Mora, J., Gutiérrez-Navarro, R., Rivera-Trejo, M., Figueroa-González, P. y Patiño-Conde, P. (2024). Taller de Ciencia para Profesores Juriquilla, Querétaro, 2024. Su importancia para la formación científica, experiencias y reflexiones del profesorado participante. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 3, núm. 2, p. 42-49. DOI: https://doi.org/ 10.22201/cgeo.29928087e.2024.3.2.7

INTRODUCCIÓN

El Taller de Ciencia para Profesores (TCP) está diseñado para que el profesorado de diferentes regiones de México se vincule con la ciencia, la tecnología y la didáctica creando espacios de colaboración para el diseño de proyectos innovadores. El TCP se desarrolla anualmente desde el 2016 en las instalaciones del Campus Juriquilla de la Universidad Nacional Autónoma de México. Este año se realizó durante la semana del 23 al 29 de junio. En esta versión del TCP se innovó creando algunas actividades en conjunto con las/los asistentes del Taller de Ciencia para Jóvenes 2024 (TCJ) con el objetivo de mejorar su efectividad e impacto. Las actividades comunes fueron algunos talleres, prácticas de laboratorios y un par de seminarios.

Durante la comida se promovió un espacio para la socialización en un ambiente relajado y ameno. Esta nueva modalidad promovió una mayor interacción entre el profesorado y el estudiantado en la adquisición de conocimientos, a través de la discusión, la reflexión y la participación durante las actividades. También se buscó crear empatía entre estudiantes y profesores en laboratorios y aulas. Las visitas y la salida de campo del TCP no involucraron a los estudiantes del TCJ ya que se visitaron diferentes sitios.

Es importante destacar que el TCP no incluye clases tradicionales sobre materias específicas; en cambio, se basa en actividades multidisciplinarias que promueven un acercamiento a la ciencia, su aprendizaje y enseñanza en el aula o en los laboratorios de ciencias. De manera general los objetivos del TCP son:

- Actualizar al profesorado con los recursos didácticos y científicos en cada área.
- Fortalecer las habilidades para desarrollar actividades prácticas, uso de recursos tecnológicos y evaluación del aprendizaje.
- Fomentar la creatividad entre docentes y crear ambientes de aprendizaje innovadores y motivadores.
- Promover el trabajo colaborativo y el intercambio de experiencias basadas en el trabajo en equipo.
- Vincular la teoría con la práctica: cómo se pueden aplicar los conocimientos científicos en las diferentes aulas de clases.

Los profesores interesados en participar en futuras ediciones del TCP pueden consultar la convocatoria que se publica anualmente en el mes de marzo en la página del Instituto de Geociencias (IGc) de la UNAM y en las redes sociales del TCP.

Participantes

Para el TCP 2024 se recibieron alrededor de 20 solicitudes y asistieron 13 profesoras y profesores de secundaria, educación media superior y educación superior, provenientes de diversos estados de la República Mexicana (Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Morelos, Michoacán, Querétaro, Quintana Roo, Veracruz y Zacatecas), de entre 30 y 60 años y con formación educativa en áreas del conocimiento diversas como Biología, Educación, Medicina, Química, Historia, Física, Matemáticas y Geología. Algunos de los docentes conformaron el grupo de autores de este trabajo, que tiene como objetivo compartir experiencias, reflexiones y vivencias de las actividades durante el TCP-2024 (Figura 1).

Figura 1. Fotografía de profesores participantes en el Taller de Ciencia para Profesores 2024 en las instalaciones del Instituto de Geociencias, UNAM-Juriquilla.

Organizadores

El equipo encargado de organizar, gestionar y supervisar estos talleres estuvo conformado por la M. en C. María Carolina Muñoz Torres del IGc de la UNAM, la M. en C. Iris Alejandra Rojas Eisenring del Colegio de Ciencias y Humanidades de la UNAM, el Dr. Juan Martín Gómez González del IGc y el Ing. Jesús Silva Corona del IGc. El "Taller de Ciencia para Profesores: vinculando la ciencia con la enseñanza", TCP-2024, forma parte del "Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación", PAPIME-PE100424, de la DGAPA-UNAM.

Actividades en aulas y laboratorios

El TCP se llevó a cabo principalmente en el IGc del Campus Juriquilla de la UNAM, ubicado en el Estado de Querétaro. Las actividades se realizaron en salas para seminarios, un auditorio y algunos laboratorios de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) y del Laboratorio Nacional de Caracterización de Materiales del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA). Los talleres, seminarios y actividades en laboratorio fueron impartidos por investigadores de diversas instituciones que propusieron diferentes estrategias didácticas y dinámicas sencillas para llevarlas a cabo en el salón de clase. De igual manera, favorecieron la reflexión constante sobre la forma tradicional de dar clases y replantear las dinámicas expuestas con el fin de enriquecerlas.

Durante la visita al laboratorio los investigadores mostraron el uso de equipos tecnológicos de vanguardia de cada una de las diferentes áreas de investigación. La duración de los talleres fue de dos horas, de los seminarios y laboratorios de una hora. Durante la semana del TCP se impartieron 13 talleres, 6 seminarios y 9 laboratorios. Los asistentes seleccionaron su participación a 4 de 8 talleres y un laboratorio.

Visita a la Universidad Tecnológica de Querétaro y salida de campo

Se realizó una visita a la División de Tecnología Ambiental de la Universidad Tecnológica de Querétaro para participar en un seminario de tópicos diversos y un Taller de Ecotecnias a cargo de la Dra. Lourdes Magdalena Peña Cheng y su grupo, con una duración de 4 horas aproximadamente.

La salida de campo se dividió en dos partes. La primera, por la mañana, consistió en una exploración sensorial geológico-paleontológica en el Parque La Joya-La barreta, a una hora del campus de la UNAM. Por la tarde se realizó una visita a la comunidad La Carbonera, en Querétaro, con el grupo de "Mujeres y Ambiente", con quienes se llevó a cabo un recorrido por la vivienda sustentable, con una duración de 4 horas aproximadamente.

Aspectos teóricos acerca de la estrategia educativa

La indagación científica

En el contexto educativo, la indagación científica se refiere a las actividades realizadas para el desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo. Es un proceso activo en el que el estudiantado explora el mundo que le rodea al igual que lo realiza un investigador científico, partiendo de un fenómeno natural en el que se proponen explicaciones basadas en evidencias, con el apoyo de su equipo de trabajo. Expertos en el tema afirman que "la mejor forma de interiorizar los conceptos es haciendo ciencia, ya que de esta forma se promueve el desarrollo de habilidades" (Lederman *et al*., 2013).

El concepto de indagación científica fue presentado por primera vez en 1910 por John Dewey como resultado de la necesidad de transformar la educación, ya que en ese momento la forma de aprender se basaba en la acumulación de datos e información y no en el desarrollo de actitudes y habilidades (Reyes-Cárdenas y Padilla, 2012). Actualmente, aunque se siguen manteniendo sus bases, el enfoque ha evolucionado, categorizando la indagación científica en cinco fases y nueve sub-fases interrelacionadas entre sí y que representan una diversidad de opciones aplicables en el aula (Pedaste *et al*., 2015). Las habilidades que promueve este modelo incluyen la pregunta detonadora que se intentará explicar a través de la formulación de hipótesis, la experimentación y el análisis de resultados para llegar a una conclusión, promoviendo de esta forma el desarrollo de la curiosidad, el trabajo colaborativo, la escucha activa y el desarrollo de una postura crítica y reflexiva abriendo la posibilidad de que el estudiantado pueda resolver diversas problemáticas, no solo en el área escolar sino también en su entorno personal, social y/o laboral.

En un mundo cada vez más competitivo, los docentes de asignaturas científicas nos enfrentamos a nuevos retos en la enseñanza. Afortunadamente existen espacios de aprendizaje como el TCP que fue un punto de encuentro entre profesionistas en el área de las ciencias y de la educación en el que a través del intercambio de estrategias novedosas quedó evidenciada la forma de aplicar este modelo educativo basado en la indagación (Garritz, 2006; Cristóbal-Tembladera y García-Poma, 2013). Los talleres constituyeron una experiencia invaluable para el aprendizaje, ya que vislumbramos la forma de tener una interacción directa con el objeto de estudio bajo la orientación de un experto.

Importancia de los experimentos y los recursos didácticos

La experimentación es un proceso inherente al ser humano y que ha dado respuestas a fenómenos naturales. Esta necesidad por comprender el mundo en el que vivimos es algo que nos ha acompañado a lo largo de la historia, lo sabemos gracias a evidencia física que han dejado nuestros antepasados en pinturas rupestres, pergaminos, manuscritos, libros, entre otros testimonios.

Nacemos con la curiosidad de entender el ambiente que nos rodea. Esta curiosidad continúa a lo largo de nuestra vida; sin embargo, es durante los primeros años de vida cuando nos permitimos experimentar aún más. Conforme vamos creciendo, estas ganas de aprender se pueden ir coartando o limitando si no se dan las condiciones necesarias para continuar.

Más que dictar al estudiantado las actividades experimentales que deben realizar, los docentes debemos promover la creatividad y el ingenio para que sean ellos quienes a partir de sus propios recursos sean capaces de resolver sus propias preguntas, sin un manual o un instructivo, pues de esta manera se consolida el conocimiento y comprenden los conceptos de forma práctica y activa.

Al diseñar actividades experimentales promovemos el desarrollo de habilidades de observación, análisis, pensamiento crítico y creatividad. Además, los alumnos aprenden a enfrentar situaciones inesperadas, favoreciendo su resiliencia y su capacidad para resolver problemas. Esta experiencia despierta su curiosidad y fomenta una mentalidad investigativa, sentando una base sólida para futuros científicos y personas con aprecio por el conocimiento.

Los diversos recursos didácticos que se nos facilitaron en el TCP 2024 demostraron que a partir de materiales sencillos se pueden poner en práctica un sinfín de ideas nuevas y creativas para resolver cuestionamientos que igualmente pueden ser sencillos de manera colaborativa.

Diseño creativo e impacto en la sociedad

Un factor relevante para motivar la creatividad son los agentes externos: actividad--es familiares, personales o socioculturales que impactan positiva o negativamente a un estudiante. La creatividad es multifactorial, es decir, no existe una fórmula que indique cuales son los componentes específicos que llevan a ella: ésta nacerá a partir de un interés al reconocer los detalles, analizar la situación y al diseñar metas lógicas apropiadas a la situación para transformarlas en metas más complejas e innovadoras.

Existe la falsa creencia de que la creatividad sólo la poseen unos cuantos o que sólo se encuentra en las artes. Esto está lejos de la realidad y lo vemos en la infinidad de descubrimientos, hallazgos o teorías que existen en el mundo, ya que para haber resuelto problemas de impacto social se tuvo que desarrollar un pensamiento creativo implementado de manera sistemática con el método científico (Garcês, 2018).

Nuestro país está lleno de jóvenes que observan a su alrededor y que expresan sus ideas dentro de nuestros salones de clase; sin embargo, éstas no siempre son apoyadas o llevadas a cabo. Contamos con un semillero de futuros profesionales que pondrán a prueba todas sus habilidades para ganarse un lugar en nuestra sociedad. Nuestra labor como profesores consiste en guiarlos, ya que serán nuestros próximos médicos, arquitectos, artistas o escritores.

El TCP 2024 sembró en nosotros la importancia de aventurarnos y arriesgarnos a realizar estrategias sin limitaciones ni prejuicios, sin juzgarnos y sin ataduras tradicionales pues estamos presenciando cambios tecnológicos trascendentes por los cuales tenemos que actualizarnos y dar respuesta a las necesidades actuales de nuestra sociedad.

Importancia del trabajo colaborativo

Uno de los resultados más impactantes producto del aislamiento por la pandemia de COVID-19 fue la pérdida de habilidades de socialización; esto afectó seriamente al estudiantado, pues al regresar a las aulas nos topamos con su resistencia al trabajo colaborativo. A pesar del diseño de espacios virtuales para su interacción, la pandemia coartó la comunicación entre ellos. Desde entonces se han empleado múltiples herramientas y formas de reactivar la interacción entre el estudiantado; sin embargo, esto no ha sido suficiente, ya que ha disminuido la calidad de los proyectos complejos. También se ha observado poca tolerancia, menor proactividad, apatía e indiferencia entre el estudiantado.

Durante el TCP 2024 se mostraron ejemplos muy claros para reactivar la comunicación entre el estudiantado con actividades sencillas realizadas de una manera amable y priorizando la escucha activa, la tolerancia y el respeto para lograr una experiencia gratificante. Entre el profesorado participante, el TCP destaca por fomentar actividades colaborativas que permitieron compartir conocimiento y crear redes de comunicación entre docentes para el intercambio de ideas, dinámicas y aprendizajes.

Desarrollo de las actividades

Seminarios y talleres

Durante dos horas, investigadores y/o profesores lideraron actividades centradas en una temática definida. Cada sesión comenzó con una introducción al tema y se plantearon los objetivos de aprendizaje. Se desarrollaron dinámicas interactivas, discusiones, análisis y experimentos prácticos, que permitieron a los participantes explorar el tema en profundidad y adquirir habilidades aplicables en clase. También se realizaron actividades específicas para reforzar lo aprendido y asegurar que los conceptos clave quedaran comprendidos. Al finalizar, se abrieron espacios para la reflexión, intercambio de ideas para compartir experiencias y recibir retroalimentación.

- Seminario “Cómo funciona mejor nuestro cerebro”, impartido por la Dra. Sofía Yolanda Díaz Miranda, quien explicó cómo se conforma el cerebro, su periodo de maduración que termina a los 33 años, el número de horas necesarias para descansar y los factores de riesgo por la mala alimentación. Cabe resaltar que esta actividad se llevó a cabo en conjunto con los jóvenes, para sensibilizarnos y entender cómo se comporta o reacciona el estudiantado ante el estrés.
- Seminario-taller “Club de ciencia de química verde y desarrollo sostenible”, impartido por el Ing. Francisco Cortés Ruiz del Colegio de Ciencias y Humanidades plantel Azcapotzalco. Se describe también como taller porque se realizaron diversas prácticas sostenibles para la enseñanza en el bachillerato, tales como la síntesis de soluciones en un horno de microondas, la observación de fluorescencia de pigmentos fotosintéticos utilizando una lámpara de UV y el análisis del efecto producido por las reacciones de óxido-reducción de la clorofila, resaltando que en estas actividades se aplicaron los principios de la química verde y la importancia de la sostenibilidad (Figura 2).
- Seminario "El desarrollo del pensamiento científico en alumnos de educación secundaria y media superior", impartido por el M. en E. Juan Carlos Miranda de la Universidad Pedagógica Nacional de Querétaro, quien habló de las competencias científicas en la escuela clasificadas en conocimientos requeridos (saber), habilidades (saber hacer), y actitudes (saber ser); también abordó lo que implica realizar una investigación de la teoría de la inteligencia tripartita y un análisis de estrategias cognitivas.
- Seminario virtual “Enseñanza de la ciencia con tecnología de Arduino”, impartido por el M. en C. Octavio Enrique Posada Quintero, de la Escuela Secundaria General No. 225 “Nueva Creación” del municipio de Tecámac, Estado de México. Este seminario resaltó la importancia y facilidad de utilizar herramientas digitales al alcance de todos para la enseñanza de las ciencias, en particular de la Química, con una aplicación descargable de Arduino (*Arduino Science Journal*) y un celular. Se realizó un experimento, guiado en línea por el ponente, donde se monitoreó una reacción de efervescencia al diluir una tableta de antiácido en agua y se elaboraron gráficas del sonido detectado con un teléfono celular. La aplicación mostró la diferencia de la velocidad de las reacciones con agua fría o caliente, así como la velocidad de la solubilidad.
- Seminario "Los diez experimentos más bellos de la Física en la educación básica", impartido por la Dra. Susana Alaníz Álvarez, quien dio a conocer estos experimentos y mencionó que las características para lograrlos deben ser la simplicidad, la precisión y el bajo costo y que, sobre todo, deben provocar cambios en la percepción de lo que la gente sabe y cree. Los experimentos pueden encontrarse en la sección de “Difusión” en la página del IGc.
- Seminario “Encuentro Investigadores-Estudiantes”. Se trató de una actividad muy interesante en la que asistieron los docentes del TCP y los alumnos del TCJ. Este seminario estuvo dedicado a mujeres en la ciencia destancando la valiosa labor que realizan. Las ponentes fueron la Dra. Adriana Espino del Castillo, la Dra. Daniela Calvo y la Dra. Bárbara Moguel Rodríguez. Cada una de ellas conversó directamente con los jóvenes sobre cómo fue su inserción a la ciencia y la investigación en el área de las geociencias.
- Taller de Danzaterapia. Se realizó en las canchas deportivas del campus para dar la bienvenida a las/los participantes. La actividad fue guiada por la Dra. Kenya Sánchez y en ella participaron los asistentes a los talleres TCP y TCJ en actividades psico-terapeúticas de movimiento para integrar el cuerpo y la mente. La actividad propuesta fue conectarnos con nuestros cuerpos imitando el movimiento de animales al ritmo de

Figura 2. a) Taller de Química verde impartido por Ing. Francisco Cortés Ruíz, en el aula del Instituto de Geociencias. b) Prueba de encendido de un foco con clorofila por parte de Francisco Cortés y profesores participantes.

sonidos de tambores. Al finalizar se elaboraron carteles para dejar un mensaje al alumnado y profesorado (Figura 3).

- Taller “Despierta tu curiosidad creativamente”, a cargo de la Dra. Diana Rubio Navarro, mexicana que forma parte de las diez mejores docentes del mundo por la fundación Varkey y es experta en estrategias didácticas de ciencias. Durante el taller, la Dra. Rubio explicó la importancia de despertar la curiosidad en el estudiantado, a partir de ideas innovadoras diseñando objetos de estudio, juegos y retroalimentación positiva para atraerlos cada vez más al área de las ciencias. Como prueba de esto compartió con nosotros una serie de imágenes que usamos como modelo para elaborar de forma creativa 10 dibujos diferentes en no más de 3 minutos, estimulando de esta forma nuestra creatividad. Mostró ideas locas de cómo se han resuelto necesidades cotidianas y con esto solicitó que inventáramos una actividad original, creativa e innovadora de algún tema que identificáramos como complejo, para enriquecer nuestras ideas y transformar nuestras estrategias en el aula (Figura 4).
- Taller "Paleontología, Evolución, Paleogeografía y Ciencias de la Tierra”, impartido por el M. en C. Luis Espinoza Arruabarrena, del Instituto de Geología de la UNAM, quien nos mostró la importancia de una buena organización, de la presentación de evidencias claras y del uso de un lenguaje accesible. El Mtro. Espinoza presentó de manera lógica y cronológica la evolución de la vida a la par de la evolución geológica, mostró su clasificación en el tiempo y describió cómo los restos fósiles forman parte de la historia geológica registrada en los estratos de la Tierra.
- Taller “Pliegues en rocas: ¿cómo son?”, impartido por el Dr. Ángel Nieto Samaniego, quien nos invitó a conocer los pliegues en las rocas, cómo se forman y cuál es su importancia. Además, destacó la ocurrencia de sismos y sus principales consecuencias y habló de los instrumentos con los que se cuenta para medirlos, las medidas de precaución civiles y el cómo tener conciencia ciudadana.
- Taller "Las ondas de choque: antecedentes y aplicaciones biomédicas actuales", impartido por el M. en C. Francisco Fernández Escobar quien, a través de microexplosiones controladas en el laboratorio, demostró cómo ocurre la combustión interna con un encendedor de antorcha y alcohol, los cuales manipularon tanto los jóvenes como los docentes. Esta experiencia fue impactante no solo por ver cómo salían volando los balines que se introdujeron en el encendedor, sino también por el estruendo que esto provocó. Otro de los experimentos empleó descargas eléctricas, emitidas por fuentes de poder, para observar cómo el choque eléctrico es capaz de incendiar objetos; todo esto, con la intención de explicar su aplicación en la medicina al pulverizar cálculos renales sin la necesidad de una cirugía invasiva.

Figura 3. a) Taller de Química verde impartido por Ing. Francisco Cortés Ruíz, en el aula del Instituto de Geociencias. b) Prueba de encendido de un foco con clorofila por parte de Francisco Cortés y profesores participantes.

Figura 4. a) Fotografía de la ponencia de la Dra. Diana Rubio “Potenciar la creatividad”. b) Fotografía de la ponente y del grupo de profesores participantes al Taller de Ciencia 2024.

- Taller “Nanotecnología y Biomedicina: la intersección de lo invisible", impartido por la Dra. Luz María López Marín quien mostró nanopartículas dentro de un vial y su interacción con un haz de luz al apuntarlas con un láser. Las nanopartículas son sintetizadas en el CFATA de la UNAM para investigar sus aplicaciones en medicina y diagnósticos dirigidos.
- Taller “Historietas sedimentarias: descifrando los episodios de la evolución terrestre", impartido por la Dra. Mildred Zepeda del Instituto de Geociencias, quien explicó de manera didáctica la evolución del supercontinente Pangea y las evidencias para su reconstrucción a través del conocimiento de la paleontología, la paleogeografía y las rocas sedimentarias.
- Taller "El uso de los microorganismos en la ciencia: beneficios y desventajas. Conexión Biología-Física", impartido por la Dra. Blanca Edith Millán Chiu, quien hizo un recorrido por el CFATA explicando el funcionamiento del equipo de laboratorio, mostrando los experimentos realizados con diversos tipos de bacterias y hongos usados para la elaboración de bioplásticos y proporcionando los materiales para la germinación de setas.
- Taller “Tendencias de la ingeniería de reemplazo en extremidades superiores”, impartido por el Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales, quien combinó elementos esenciales con una narrativa autobiográfica sobre sus estudios y sobre cómo llegó a la investigación científica. Los participantes

ensamblaron una pieza similar a una prótesis, experiencia sumamente enriquecedora. Al final, el Dr. Rodríguez animó a los estudiantes a seguir aprendiendo, mostrando un proceso teórico que incluía conceptos y procedimientos físicos y matemáticos de nivel preparatoria para evaluar la eficacia de las prótesis.

- Taller "Planteamiento del problema", impartido por la Dra. Diana Lorena Rubio Navarro, quien demostró una técnica para diferenciar entre una problemática y una situación. Una vez identificadas, cada docente escribió en un *post-it* las causas y las consecuencias del problema. Los *post-it* se pegaron en el pizarrón para posteriormente categorizarlos por equipos de trabajo previamente organizados. Al finalizar se leyeron todas las aportaciones y se argumentaron las propuestas. Esta actividad permitió desarrollar el contexto y la comunicación basada en un objetivo en común. Una de las frases que más resonó en este taller fue mencionada por la Dra. Rubio: "No capacitamos, porque ya son capaces: nosotros profesionalizamos".
- Taller "Incentivando la investigación", impartido por el Dr. Ulises Mora; inició repartiendo huevos a los equipos para calcular su superficie en reposo. El objetivo fue aplicar la inteligencia, despertar la curiosidad, promover el pensamiento crítico y fomentar el pensamiento analítico durante un aparente cálculo simple. Al mismo tiempo, esta actividad implicó la reflexión colectiva, el uso de la creatividad y la lluvia de propuestas innovadoras para resolver el problema dado.
- Taller "Gráficas y modelos en la ciencia matemática", que impartió el Dr. Luis Álvarez López del Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET). A partir de ejemplos, el Dr. Álvarez explicó la aplicación de gráficas y modelos en diversas áreas de estudio, mostrando que con la comunicación y el lenguaje se pueden "leer e interpretar correctamente las diferentes simbologías". Uno de estos ejemplos fue un acertijo en el que se tenían que utilizar símbolos y letras para comunicar la metodología para encontrar la solución. El acertijo propuesto fue el del viejo, la gallina y el perro, en el que el viejo tiene que cruzar un río con sus animales y pertenencias sin que se coman los animales entre sí. Con esto en mente, el profesorado sugirió, con símbolos y letras, la mejor manera de comunicar el plan de viaje al resto del grupo (Figura 5).
- Taller "Aprendiendo sobre la ciencia del cambio climático con recursos gratuitos de HHMI", impartido por las embajadoras de *Biointeractive*, las profesoras Iris Alejandra Rojas Eisenring y Yedith García Galván. Ellas abrieron la comunicación entre los docentes y relajaron el ambiente con una actividad en la que se buscaban compañeros que hubieran tenido experiencias personales similares. Posteriormente se utilizó el recurso gratuito alojado en la página oficial de *Biointeractive* llamado "Comprendiendo el cambio climático". Se formaron equipos de trabajo para responder preguntas reflexivas; después, a cada integrante se le asignaron hojas de trabajo que contenían una serie de tablas y gráficas. Se reunió a todos los profesores que tenían hojas similares para evaluar, interpretar y entender las gráficas y tablas. Al finalizar se hizo una reflexión grupal en torno a las actividades didácticas y las soluciones propuestas para mitigar el cambio climático y entender la problemática global.

Figura 5. Fotografía de los resultados del taller "Gráficas y modelos matemáticos" del TCP-2024 en las aulas del Instituto de Geociencias.

Visita a los laboratorios

- Laboratorio de microscopía en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos Corticales del IGc, impartido por la Dra. Marina Vega González quien mostró en el cómo, por qué y para qué se realizan cortes de cerebro. Además, se realizó un pequeño corte de cerebro y se observó en el microscopio. La Dra. Vega también habló de la importancia de las proteínas que se acumulan en el cerebro y su relación con la enfermedad de Alzheimer.
- Laboratorio de nanomateriales en el Laboratorio Nacional de Caracterización de Materiales del CFATA, impartido por el Dr. Fabián Mares Briones. Después de una explicación sobre nanociencias y nanotecnología, se realizó una práctica para la obtención de partículas del tamaño del orden de 10^{-9} m. Finalmente, se reflexionó sobre la importancia de la nanoescala en la enseñanza de estos temas.
- "La biodiversidad en una gota de agua", laboratorio impartido por los investigadores Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza y Dra. Miriam Guadalupe Bojorge García de la UMDI de la UNAM. En este laboratorio se explicó a los participantes cómo usar el microscopio realizando observaciones a diferentes escalas microscópicas; se observaron diatomeas y diferentes organismos los cuales sirven como indicadores de toxicidad en ambientes acuáticos.

Visita a la Universidad Tecnológica del Estado de Querétaro

Se realizó una salida a la Universidad Tecnológica del Estado de Querétaro (UTEQ) para participar en un seminario titulado "Ecotecnias aplicadas a las comunidades", dirigido por la Dra. Lourdes Magdalena Peña Cheng y un grupo de colaboradores estudiantes de la maestría en Economía Circular. Durante el seminario, los ponentes señalaron la importancia de los conceptos de desarrollo sostenible, eficiencia energética y economía circular y presentaron las innovaciones y proyectos vanguardistas implementados por alumnos y profesores de la UTEQ entre los que destacan el diseño de biodigestores, la producción de bioetanol y la fabricación de pintura retardante del fuego, pintura nanotecnológica y pintura antigrafitti (Figura 6a). Todo esto dentro del marco de las acciones que la UTEQ implementa para dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) de la ONU.

Al finalizar el seminario se realizó un taller con cuatro actividades didácticas para que los profesores adaptaran estas estrategias en sus escuelas. La primera actividad consistió en un tablero de piso

donde se clasificaba el tiempo de degradación de productos. La segunda incluía preguntas de sostenibilidad al lanzar fichas a un tablero de puntajes. En la tercera se subastaban fichas de alimentos según la cantidad de litros de agua necesarios para su producción. En la última actividad se usó papel reciclado para construir un avión de origami (Figura 6b).

Excursión geológica

Se realizó un recorrido de campo sensorial geológico-paleontológico al Parque La Joya-La Barreta, donde se observaron los tipos de suelos, rocas y las diferentes formaciones geológicas de la región. Esta visita fue guiada por el Ing. J. Jesús Silva Corona, la M. en C. Iris A. Rojas Eisenring, el M. en C. Julio César Chávez Ambriz, el Dr. Adolfo Pacheco Castro y el Dr. Rodrigo Gutiérrez Navarro.

En la excursión se realizó un ejercicio de ubicación y entendimiento del contexto geológico de Querétaro y del Cinturón Volcánico Transmexicano. Posteriormente se invitó a reflexionar sobre los animales que recorrieron estas regiones durante el Pleistoceno y la riqueza del contenido fósil en las cercanías de los estados de Guanajuato y Querétaro. El Parque La Joya-La Barreta es administrado por una familia local. Cuenta con un invernadero y una farmacia viva con diversas plantas medicinales, así como instalaciones y amenidades para que los visitantes acampen y disfruten de la naturaleza los fines de semana. Con este recorrido se redondeó el aprendizaje del profesorado en el campo acerca de los diferentes subsistemas que componen el Sistema Tierra, así como de los temas vistos durante los talleres y seminarios (Figuras 7 y 8).

Finalmente se realizó una visita a la comunidad La Carbonera, en Querétaro, con el grupo de “Mujeres y Ambiente” quienes presentaron el diseño y la operación de su vivienda sustentable, el jardín comunitario y la tienda de productos naturales y orgánicos para la higiene personal y la salud.

CONCLUSIONES

La capacitación y actualización docente, desarrolladas de manera multi e interdisciplinaria e integrando los últimos avances científico-tecnológicos ofrecidos en el TCP-24, enriquecen las prácticas pedagógicas, complementan los programas de estudio y fortalecen el proceso de enseñanza-aprendizaje en el aula.

El TCP ofreció nuevas formas de acercar la ciencia a los alumnos de manera divertida , eficiente y sencilla, sin necesidad de grandes proyectos ni materiales costosos. Se logró que las y los participantes reflexionaran profundamente con recursos modestos y significativos.

Figura 6. Fotografías de las actividades desarrolladas por parte de los participantes del TCP-2024 en las instalaciones de la Universidad Tecnológica del Estado de Querétaro. a) Seminario "Ecotecnias aplicadas a las comunidades". b) Taller de actividades didácticas sobre sostenibilidad.

Figura 7. Fotografía de grupo de profesores y guías de la excursión sensorial geológico-paleontológica en el mirador del parque Joya-La Barreta, Querétaro..

Figura 8. Fotografía del grupo de estudiantes y profesores participantes en el TCJ-TCP 2024.

Esto brinda la capacidad de ofrecer una educación más dinámica y efectiva, garantizando experiencias de aprendizaje actualizadas y enriquecedoras para los estudiantes. El TCP tiene un impacto profundo y positivo en el aprendizaje de los estudiantes, ya que permite a los docentes generar una sólida educación científica, fomentar el intercambio de conocimientos y experiencias, implementar el trabajo en equipo y acercar a los estudiantes a la ciencia, lo que les ofrece una mayor diversidad de opciones al momento de elegir una carrera profesional para los estudiantes.

Es imprescindible que los Talleres de Ciencia para Profesores se extiendan a más personas, incentivando a las instituciones de investigación a implementarlos y proporcionarles los recursos necesarios para lograr una mayor difusión, presencia y alcance, en beneficio de la educación científica en México.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Martín Gómez, a la M. en C. Carolina Muñoz Torres, al Ing. Jesús Silva Corona y a la M. en C. Iris Alejandra Rojas Eisenring por la organización y logística para desarrollar el "Taller de Ciencia para Profesores: vinculando la ciencia con la enseñanza", también agradecemos a las y los estudiantes participantes del Taller de Ciencias para Jóvenes 2024 así como a monitores, talleristas, ponentes e investigadores y a todas las personas que participaron en la coordinación y desarrollo de este magnífico evento. De igual forma agradecemos a los revisores del manuscrito, Sandra Paula Villacorta Chambi y Gilberto Silva Romo, por sus enriquecedoras observaciones que ayudaron a mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

Cristóbal-Tembladera, C. M. y García-Poma, H. A. (2013). La indagación científica para la enseñanza de las ciencias. Horizonte de la Ciencia, 3(5), 99-104.

Garcês, S. (2018). Creativity in science domains: a reflection. Atenea, 517, 241-253. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-04622018000100241

Garritz, A. (2006). Naturaleza de la ciencia e indagación: cuestiones fundamentales para la educación científica del ciudadano. Revista Iberoamericana de Educación, 42, 127-152. https://doi.org/10.35362/rie420765

Lederman, N. G., Lederman, J. S., y Antink, A. (2013). Nature of science and scientific inquiry as contexts for the learning of science and achievement of scientific literacy. International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology, 1(3), 138-147.

Pedaste M., Mäeots M., Siiman L. A., De Jong T., Van Riesen S. A., Kamp E. T. y Tsourlidaki E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. Educational research review, 14, 47-61.

Reyes-Cárdenas, F. y Padilla, K. (2012). La indagación y la enseñanza de las ciencias. Educación Química, 23(4), 415-421.

Manuscrito recibido: 21 de septiembre de 2024
Manuscrito corregido recibido: 7 de noviembre de 2024
Manuscrito aceptado: 6 de diciembre de 2024

¿UNA TIERRA SIN CAMPO MAGNÉTICO? UN FENÓMENO COMPRENDIDO HASTA 1919

Francisco Chacón-Hernández

Instituto de Geofísica, Circuito de la investigación científica s/n, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

fcochaconsalemj@gmail.com; chaconf@igeofisica.unam.mx

RESUMEN

Al día de hoy, diferentes estudios nos han permitido conocer más sobre el origen, comportamiento y funcionamiento del campo magnético de la Tierra (cmT). Este fenómeno, cuyo conocimiento ha requerido de siglos de observaciones y estudios para responder inquietudes e interrogantes milenarios, aún plantea ciertas dudas sobre su pleno funcionamiento. No obstante, durante el siglo XVII, la pregunta que muchos hacían sobre si la Tierra era en sí un campo magnético gigante que seguía los principios físicos de un imán, comenzó a ser cada vez más considerada. Esto permitió obtener a principios del siglo XX, en el año de 1919, evidencias concretas solo de carácter empírico y experimental que permitieron hacer las primeras suposiciones sobre el origen del cmT, correlacionando sus causas-efectos e integrando los diferentes tipos de mecanismos y fenómenos que ocurren en el interior y exterior de la Tierra. Por tanto, en este escrito, se volverá al pasado para intentar revisar aquellos supuestos milenarios que se hicieron sobre el magnetismo y el cmT. Así mismo, se explica de forma general y sin detalles técnicos el origen y funcionamiento del cmT, lo que en realidad representa este fenómeno y cómo éste guarda correlación con el funcionamiento total del planeta Tierra en constante evolución.

Palabras clave: Campo magnético de la Tierra, magnetita, auroras boreal y austral, rocas magnetizadas, polos magnéticos de la Tierra.

ABSTRACT

Today, different studies have allowed us to learn more about the origin, behaviour, and functioning of the Earth's magnetic field (cmT). This phenomenon, whose knowledge has required centuries of observations and studies to answer millennia-old questions and concerns still raises some doubts about its full functioning. However, during the 17th century, the question that many asked, was whether the Earth itself was a giant magnetic field following the physical principles of a magnet began to be increasingly considered. this allowed to obtain at the beginning of the 20th century, in 1919, concrete evidence only of an empirical and experimental nature that allowed us to make the first assumptions about the origin of the cmT, correlating its causes-effects and integrating the different types of mechanisms and phenomena that occur in the interior and the exterior of the Earth. Therefore, this paper will go back in time to try to review those millennia-old assumptions made about magnetism and the cmT. It also explains, in a general and non-technical way, the origin and functioning of the cmT, what this phenomenon actually represents, and how it correlates with the overall functioning of the constantly evolving planet Earth.

Keywords: Earth's magnetic field, magnetite, aurora borealis and australis, magnetised rocks, Earth's magnetic poles.

INTRODUCCIÓN

Un fenómeno difícil de entender pero no ausente

El fenómeno del cmT ha resultado ser un tema complejo cuando se intenta entender y describir su origen o funcionamiento. Aunque el cmT sigue siendo un tema de análisis y estudio muy importante en la actualidad, las mejoras en la recopilación de datos y en el procesamiento de la información han permitido incrementar el conocimiento sobre el cmT sin que por ello deje de actualizarse o de que nuevas interrogantes surjan respecto a él, dada su importancia para el desarrollo de la vida en la Tierra. Si consideramos que el fenómeno del cmT ha permanecido desvinculado de causas-efectos, no es de extrañar que civilizaciones como la china, la griega o alguna cultura europea surgida hace milenios llegaran a cuestionarse si el comportamiento observado en cierto tipo de rocas era originado por algún proceso o mecanismo surgido en la misma Tierra.

Responder estas dudas a partir de hechos empíricos puede resultar complicado, especialmente cuando lo único que se tiene son la observación y experiencia humanas, por lo que es fácil considerar, desde una visión actual, que ciertas causas-efectos relacionados con el fenómeno del cmT pasaran desapercibidos durante tanto tiempo.

En ese sentido, es también comprensible que algunas civilizaciones antiguas que existieron hace más de 3000 años consideraran que el comportamiento magnético de ciertas rocas se debiera a energías desconocidas cuya explicación muchas veces tuvo enfoques divinos o mitológicos. Esto pudo ocurrir en culturas como la china o la griega aunque también es posible que otras civilizaciones contemporáneas a estas hicieran éstas suposiciones.

En la actualidad, la mayoría de los seres humanos apenas conocen algo sobre el cmT, lo que lleva a pensar que este fenómeno suele pasar un tanto desapercibido en comparación con otros fenómenos que ocurren a diario y que forman parte del proceso evolutivo de la Tierra. Sin embargo, los humanos no somos ajenos a este fenómeno, ya que hay muchos indicios que manifiestan su existencia. Por tanto, este escrito intentará mostrar cómo, a partir de evidencias y estudios pasados, fue posible alcanzar el conocimiento necesario para postular aquellas primeras hipótesis sobre el origen y funcionamiento del cmT. Así mismo, al ser éste un fenómeno que se sigue estudiando en la actualidad, se tratarán de explicar los medios que permiten obtener la información necesaria. Además, se mencionarán algunos casos sobre cómo el cmT es indispensable para la vida y cómo éste sirve también de estudio en otras áreas científicas.

Anécdotas históricas

Antes de ver cómo fue posible llegar a evidenciar que el cmT siempre ha sido un fenómeno presente en la Tierra así como tratar de entender sus diferentes comportamientos y funciones, sería, pertinente ante todo detenernos un momento y revisar cómo diferentes sucesos históricos fueron vitales para tal propósito. Un primer fenómeno sería el caso de las rocas magnetizadas, del que la mayor parte de las civilizaciones antiguas pudo observar. Por ejemplo, se cuenta que la civilización olmeca, una de las primeras culturas que habitó Mesoamérica hacia el año 1200 a.C., pudo haber desarrollado y antes que ninguna otra civilización del mundo un artefacto para orientarse formado a partir de rocas magnetizadas. Este hecho se basó en el descubrimiento de un artefacto que para su análisis fue llamado m-160 y que estaba conformado por rocas con minerales de hierro. La forma del artefacto hizo pensar que podría tratarse de una brújula. Para saber si esto era posible se realizó un experimento con una lámina de corcho que se puso sobre un recipiente con agua, mientras que encima se colocó el artefacto m-160. Girando sobre el agua el objeto se alineaba una y otra vez con respecto al norte magnético de la Tierra (Carlson, 1982). Este experimento ha permitido considerar que los olmecas fueron quizá la primera civilización conocida sobre el planeta que trabajó con rocas imantadas.

En Europa, la antigua civilización griega, conocida por sus grandes aportaciones en diferentes áreas de estudio -y que igualmente ha sido considerada como la cuna de la civilización occidental-, también realizó análisis de rocas conformadas por minerales de magnetita. Cabe mencionar que las magnetitas son el mineral más contribuyente al magnetismo de las rocas, las cuales están formadas por elementos de hierro y oxígeno (Fe_3O_4) y cuyo nombre fue posiblemente acuñado debido a la localidad de Magnesia, en Grecia, de donde eran extraídas. Hacia el año 500 a.C., uno de los principales estudiosos del fenómeno magnético fue Tales de Mileto (624-546 a.C.), quien a partir de sus investigaciones sobre los magnetos o imanes que eran obtenidos de las magnetitas, observó cómo estos minerales tenían la propiedad de atraer ciertos objetos de carácter metálico. Además, pudo concluir que si frotaba estos metales de hierro con la magnetita adquirían las propiedades magnéticas del mineral, es decir, el metal de hierro se magnetizaba. Tales de Mileto consideró que la causa era que poseían un alma, ya que en aquella época se consideraba que todo objeto que presentaba ciertos dinamismo o movimiento implicaba vida, alma o la intervención de un dios. En el caso de la civilización romana, el filósofo Lucrecio (98-54 a.C.), en su obra *'Sobre la naturaleza de las cosas'*, intenta separar el fenómeno de la imantación de los conceptos de almas o dioses.

Por su parte, el naturalista Plinio el Viejo (23-79 d.C.) se asombró de que una roca magnetizada atrajera los clavos de hierro de las sandalias de un pastor. En el caso del antiguo Egipto y de la India, las rocas magnetizadas también eran conocidas y usadas muchas veces como elementos de vestimenta desde hace más de 2000 años. Igualmente en el antiguo Cartago, ubicado en la actual Túnez, se ha mencionado que agujas magnetizadas fueron empleadas por el estadista Aníbal (247-183 a.C.) cuando invadió el imperio romano hacia el 203 a.C. Esto demuestra cómo en diferentes partes del planeta durante y después de la denominada edad de hierro (800-100 a.C.), varias civilizaciones prosperaron con el desarrollo y tratamiento de los métales de hierro y con el análisis y la observación de sus propiedades magnéticas.

Otra importante civilización que a través de los siglos no solo observó el comportamiento de las propiedades magnéticas a partir de metales de hierro o rocas magnetizadas, sino que también fabricó con ellos artefactos para diferentes fines y usos, fue la china. La referencia más antigua conocida sobre el análisis de rocas magnetizadas fue hacia el siglo IV a.C. en el *'Libro del jefe del valle de los demonios'*, donde se dice que la magnetita "hace que el hierro venga". Así mismo, en el libro llamado *'Louen-heng'*, escrito entre los años 20 y 100 d.C., se tiene el primer registro de cómo ciertos materiales quedaban magnetizados cuando rozaban o se frotaban con rocas de magnetita; en este caso, se describe cómo una aguja de metal quedaba magnetizada. Además, se habla de rocas de magnetitas que atraían objetos metálicos, lo que condujo a hacer las primeras consideraciones sobre su polaridad y la posible acción de la Tierra sobre la roca magnetizada. Hacia la Edad Media, que corresponde al periodo histórico entre los siglos V y XV d.C., las rocas magnetizadas comenzaron a ser empleadas para fines civiles y militares. Es durante la Dinastia Song (960-1279 d.C.), reconocida por contribuir con importantes avances tecnológicos en la historia de China, que surgieron las primeras descripciones de algunos artefactos y objetos hechos con rocas magnetizadas. A principios del siglo XI d.C., entre 1040 y 1044, se hacen menciones de artefactos magnéticos que eran utilizados como señalizadores del polo norte magnético usados para orientarse durante la noche.

Hacia el año 1086, en el libro *'Ensayo del tesoro de los sueños'*, el polímata Shen Kuo (1030-1095) describe la forma en que personas que se dedicaban a la geomancia o la adivinación lograban magnetizar una aguja que colgaba de una fibra de seda frotando su punta con un mineral de magnetita. Además, se comentaba que

algunas veces la aguja apuntaba hacia el norte y sur geográficos (Sivin, 1977, 1995). En el mismo libro, Shen Kuo hace mención de un artefacto magnético con forma de pez, «el pez que señala al sur» que en tal caso estaría señalando hacia el hemisferio sur de la Tierra (Figura 1a) comenta que se podía fabricar con una fina hoja de hierro cortada en forma de pez y calentada hasta que se pusiera al rojo vivo, posteriormente sería enfriada y sumergida en agua (Shen Kuo, 1088). Hacia el año 1119, el historiador marítimo Zhu Yu (960-1279), en su libro *'Pingzhou Ketan'* (Charlas de mesa de Pingzhou), describe el primer caso de una aguja magnetizada empleada para la navegación, siendo éste el primer instrumento de navegación relacionado con un artefacto de brújula antigua (Wu y Wu, 2021). Otro historiador importante de la dinastía Song fue Xu Jing, el cual nos comparte su pensar en el manuscrito *'Arrecife en el océano marino'*, donde menciona que un barco en altamar en días nublados solo puede pilotearse mediante una brújula flotante. Mientras tanto, de acuerdo con Joseph Needham (1900-1995), durante la dinastía Ming (1368-1644) también se desarrollaron brújulas secas o mojadas (Needham, 1974) que ya describían los puntos cardinales en rosas de vientos (Figura 1b). Se ha considerado que para el siglo XIV la brújula europea usada con marco de caja y aguja de pivote seco fue adoptada en China después de que piratas japoneses se apoderaran de ella en el siglo XVI. Estos avances permitieron tener una mayor noción del 'norte verdadero o geográfico' y diferenciarlo del 'norte magnético' (ver PNM y NG en la Figura 1c).

Navegantes árabes y europeos ya también hacían uso de agujas magnetizadas desde el siglo XI d.C., permitiendo por aquellos años emplear tres métodos de navegación: por orientación geográfica viajando cerca de la costa; por navegación astronómica en alta mar, donde seguían la posición de los astros del cielo para conocer la posición de la embarcación al medir la altura de las estrellas, y por navegación con el uso de la brújula. Caso distinto fue el de los vikingos, navegantes por naturaleza de quienes no se ha sabido que hicieran uso de algún tipo de compás magnético, sino más bien lo que se ha denominado como piedras solares. Alexander Neckham (1157-1217 d.C.) fue el primer europeo en contribuir de manera significativa en el desarrollo de la brújula de aguja magnética en su libro '*De Nominibus Ustensilium*'. Uno de los más importantes exponentes sobre el estudio del magnetismo hacia finales de la Edad Media fue Peter Peregrinus, de quien poco se conoce. Peregrinus realizó varios estudios analizando el comportamiento de piedras magnetizadas y contribuyendo igualmente en el desarrollo y mejora de la brújula. Además, hacia 1269, propone la que sería su mayor aportación en la llamada *'Epístola de magnete'*: al analizar los comportamientos de una aguja con respecto a un imán diseñado de forma redonda, descubrió patrones en los que los círculos máximos trazados resultaban ser análogos con los meridianos de la Tierra (Figura 1d). A los puntos extremos en los que convergían tales círculos máximos los denominó 'polos', lo que sería análogo con los polos magnéticos (Figura 1c).

Durante las travesías por mares y océanos, navegantes chinos, árabes o europeos, observaron que la orientación de las agujas magnetizadas en las brújulas cambiaba cuando dichos viajeros se encontraban en diferentes puntos de la Tierra, un fenómeno que hasta ese entonces era desconocido. Cabe mencionar un hecho histórico: el caso particular de las cuatro expediciones que lideró Cristóbal Colón (1451-1506) entre la Península Ibérica y las Indias Occidentales, que era el nombre que antiguamente se daba al continente americano, aunque en realidad su objetivo era el de llegar a las Indias Orientales. En estos viajes Colón logró descubrir de forma casual, y sin que él mismo lo supiese, la declinación magnética. Esto fue en una primera instancia al intentar encontrar una solución para uno de los problemas más importantes que los navegantes tuvieron que enfrentar en aquellos tiempos, que era determinar la longitud o el meridiano en su punto de ubicación, ya que la latitud podía ser calculada a partir de la ubicación en la estrella polar de la constelación de la Osa Menor.

Pero ¿a qué se refiere esto de la declinación magnética? Durante su primer viaje, Colón analizó el comportamiento de la estrella polar y sus guardas, éstas últimas llamadas así por la conformación de las estrellas llamadas beta y gamma de la constelación de la Osa Menor, así como el comportamiento de la aguja magnetizada de la brújula. Como es sabido, la aguja casi nunca señala el norte verdadero o geográfico sino al polo norte magnético (ver NG y PNM en Figura 1c). La diferencia entre ambos nortes (NG y PNM) es conocida como la declinación magnética, que en la Figura 1c se menciona como ϕ.

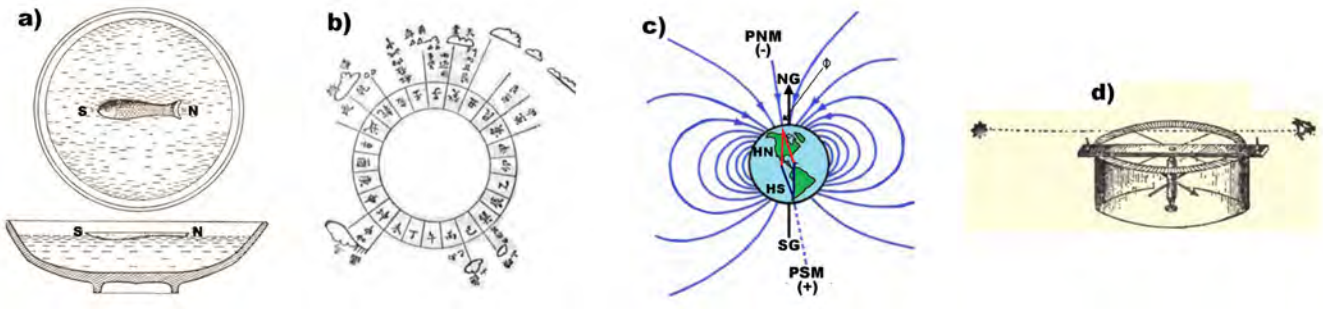


Figura 1 a) Ejemplo de un artefacto con forma de pez imantado, era colocado en un recipiente lleno de agua, señalando al norte magnético terrestre (tomado y modificado de Shen Kou, 1088). b) Diagrama de una brújula, empleado para la navegación durante la dinastía Ming en China, entre los años 1368 y 1644 d.C. c) Esquema teórico del cmT como un gran imán, señalando el polo norte magnético actual (PNM), que es la dirección que señala la aguja imantada hacia el hemisferio norte (HN) y se ubica cerca del norte geográfico (NG). El polo sur magnético (PSM), que es un polo magnético inestable debido a que las líneas de fuerza del cmT cambian, no tiende a localizarse en un lugar específico del hemisferio sur (HS). Para este esquema, el PSM se representa con una línea azul y mantiene cierta distancia respecto del sur geográfico (SG). El valor ϕ indica la declinación magnética-en este caso negativa, ya que tiende 'hacia el oeste'-, que es el ángulo entre el PNM y el NG (~ 9.6°). Dado que los polos opuestos se atraen (norte y sur), sí el polo norte de una roca magnetizada como un imán se orienta a lo largo del eje norte-sur debido a la acción del PNM y PSM de la Tierra, entonces en realidad el PSM se encuentra cerca del NG. Por tanto, el planeta puede ser modelado como un imán gigante con el color rojo (+) apuntando hacia el PNM y el color azul (-) hacia el PSM. d) El imán pivotante de Peter Peregrinos utilizado para medir el acimut de las estrellas (tomado de Peregrinus, 2020).

Es evidente que Colón y sus marinos no sabían que esto fuera debido al PNM; simplemente veían que la aguja magnetizada no se dirigía exactamente hacia el norte geográfico. Hacia 1492, dado que el campo magnético de la Tierra (cmT) cambia con el tiempo, por aquel entonces la aguja de la brújula se desviaba en el Oceáno Atlántico un poco menos de lo que ocurre en la actualidad, pues ahora el PNM está más cerca del NG. Sin embargo, Colón observó esto al realizar mediciones siempre que el sol se ponía en algunos lugares como Palos, España, la aguja se desviaba al este (~4°), mientras que en las Islas Canarias la aguja se desviaba aún menos al este (~3°). En la medida en que Colón y sus marinos se alejaban de España y se adentraban en la inmensidad del Océano Atlántico, la aguja en las carabelas presentaba la tendencia de ir disminuyendo cada vez más al oeste. Esa declinación disminuyó hasta que la aguja marcó el norte magnético exacto, indicando que justo en ese momento estaban cruzando la llamada 'línea agónica o meridiano magnético cero'. Esto indicó que la aguja magnética se alineaba exactamente con el PNM y que por aquellos años se localizaba cerca de las Antillas, en el mar Caribe.

Cuando estuvieron en un punto al oeste de la línea agónica, la aguja magnética debió señalar al este del PNM (esto denominado como declinación positiva), mientras que en un punto al este de la línea agónica la aguja debió señalar al oeste del PNM (esto denominado como declinación negativa). Así, Colón acababa de descubrir no solo la declinación magnética, que de alguna manera ya era intuida más o menos por aquel tiempo, sino la variación de esa declinación magnética con la longitud ya que ellos estuvieron viajando del este al oeste y viceversa. Lo malo es que él nunca se dio cuenta de su descubrimiento, llegando a considerar que la responsable de tales comportamientos era la estrella polar.

Retornando de nuevo a Europa, pero ya durante el Renacimiento, hubo un auge de grandes científicos y exponentes respecto al tema del magnetismo. Por ejemplo, en torno al año 1546 d.C., Gerardus Mercator (1512-1594) concluyó que la magnetización de las rocas se debía a un campo magnético que estaba en la misma Tierra. Hacia el siglo XVII, el filósofo y naturalista William Gilbert (1544-1603) realizó los primeros experimentos sobre el magnetismo y los publicó en su libro '*De Magnete*', proporcionando las bases científicas sobre el magnetismo. En 1600, él consideró que las agujas imantadas indicaban que la Tierra entera se comporta como un enorme imán, cuyos polos magnéticos Norte y Sur no coincidían exactamente con los polos geográficos por donde pasa el eje de rotación de la Tierra (ver PNM y NG, Figura 1c).

En 1729, el naturalista inglés Stephen Gray (1666-1736) observó que la electricidad podía ser conducida a través de un cuerpo conductor. Otro sobresaliente investigador fue el físico danés Hans Christian Ørsted (1777-1851), el cual descubrió experimentalmente la relación entre la carga eléctrica y el magnetismo a partir de lo que ya había propuesto Alexander von Humboldt (1769-1859): que las cargas eléctricas generaban que las rocas se magnetizasen. Hacía 1820, Ørsted evidenció por primera vez esta relación, y consideró que, dado que en un material existen diminutas corrientes eléctricas debido al movimiento de los electrones en sus átomos, cada uno de estos electrones debía ser un imán microscópico. Si estos electrones están desorientados los efectos magnéticos pueden ser nulos, pero si están alineados el material se podría magnetizar.

Gilbert y Ørsted contribuyeron en gran medida al observar las variaciones de la declinación magnética, las cuales fueron registradas y documentadas en Londres. Para 1600 se había observado una declinación de 16° hacia el este, mientras que para 1800 fue de 24° hacia el oeste. Las mediciones continuaron, y en 1935 la declinación disminuyó a 12° hacia el oeste, mientras que en la actualidad es de aproximadamente unos 10° hacia el oeste. Por su parte, en 1834 Carl F. Gauss (1777-1855) propuso ciertas operaciones físicas y matemáticas en las que intentó expresar la distribución del flujo de un campo eléctrico sobre superficies cerradas. En 1853, Macedonio Melloni (1798-1854) analizó derrames de lavas del volcán Vesubio, observando que estas rocas presentaban una magnetización que seguía aproximadamente al PNM. Además de estos aportes, otros importantes experimentos y estudios surgieron en consecuencia, como el desarrollo de la corriente continua y el invento de la pila por parte de Alessandro Volta (1745-1827), así como la descripción del fenómeno electromagnético y sus expresiones matemáticas que propuso James C. Maxwell (1831-1879).

Un segundo fenómeno, igualmente importante y que también ha sido prueba evidente de la existencia del cmT, está relacionado con las llamadas auroras boreales (hacia el hemisferio norte de la Tierra) y australes (hacia el hemisferio sur de la Tierra). En Francia se han encontrado pinturas rupestres fechadas en aproximadamente 30 000 años que intentan representar dicho fenómeno. Civilizaciones que se han asentado cerca del Ártico desde hace milenios han considerado el fenómeno de las auroras boreales bajo diferentes tipos de interpretaciones, haciendo alusión a diferentes mitos o creencias. En la región de Laponia, actualmente Noruega, Suecia y Finlandia, el grupo étnico denominado como los Samis (aproximadamente desde el 7000 a.C.) ha contado en antiguas leyendas que las auroras boreales representaban los espíritus de los muertos. Sin embargo, la primera descripción documentada de este fenómeno fue quizá hecha por el explorador griego Piteas de Massalia (359-289 a.C.) durante su viaje por mar hacia el norte de Europa. Los relatos de Piteas fueron recopilados por otros autores en los siglos siguientes a su muerte, ya que sus relatos originales se perdieron.

El filósofo griego Aristóteles (384-322 a.C.), que también hace mención de tal fenómeno, considera que las auroras se originaban debido a vapores que emanaban de la superficie de la Tierra, considerando que se debía al calentamiento generado por el sol. En China existe documentación de hace más de 2000 años en la que durante aproximadamente 40 años se describe tal fenómeno. El filósofo romano Séneca (4 a.C.-65 d.C.) hace mención de las auroras en su libro *'Naturales Quaestiones' (Cuestiones naturales)* en el que describe su forma y tipo de color, aunque también se ha llegado a considerar que tal descripción fue relacionada con otro tipo de fenómeno. Antiguamente se creía que las auroras no se daban en latitudes bajas, pero ahora sabemos que esto no es cierto.

Fue Galileo Galilei (1564-1642 d.C.) quien en realidad dio el nombre a este fenómeno, considerando el nombre de aurora en honor a la diosa romana del amanecer y boreal en honor a Bóreas, el dios del viento del norte. Otros hechos históricos descritos que también pudieran relacionarse con el fenómeno de las auroras han sido aquellos narrados en algunos pasajes de la Biblia. Por ejemplo, el profeta Ezequiel (593-571 a.C.) hace una particular mención sobre un fenómeno que ha sido considerado como una aurora ('un viento huracanado venía del norte, una gran nube con fuego fulgurante y un resplandor a su alrededor, y en su centro, algo como metal

refulgente en medio del fuego', Ezequiel, 1:4). Cabe la posibilidad de que Ezequiel intentara analogar este fenómeno con una visión divina, lo cual siempre será difícil de saber. Este fenómeno también ha sido considerado para otro tipo de circunstancias. Por ejemplo, hacia 1917, la visión mística de tres pastores en Fátima, Portugal, les hacía mención de un aviso divino relacionado con el inicio de la Segunda Guerra Mundial, el cual ocurrió en el año de 1939. Este aviso divino fue posteriormente relacionado con una aurora boreal de gran dimensión, la cual se pudo apreciar en casi toda Europa, ya que alcanzó latitudes muy bajas.

Los sucesos históricos de estos fenómenos no son ajenos a lo que podemos observar en la actualidad; sin embargo, representan un ejemplo claro de un conocimiento progresivo, el cual ya para el siglo XIX comenzaba a vislumbrar indicios de que ciertas causas-efectos eran generados debido a un tipo de mecanismo desconocido (p. ej. la magnetización de rocas o el fenómeno de las auroras). ¿Pero estos sucesos evidenciaban el hecho de que la Tierra poseía un campo magnético con un funcionamiento tal y como se ha podido conocer en la actualidad? En aquellos tiempos al menos hasta antes del Renacimiento pudo ser más difícil de considerar. No obstante, tales experiencias fueron fundamentales para cimentar las bases del conocimiento de un fenómeno que ha requerido de milenios y siglos de observaciones y estudios.

El magnetismo experimental

Hacia los siglos XVI, XVII y XVIII fue posible tener una mejor concepción acerca del magnetismo como una importante propiedad física de la materia, permitiendo caracterizar experimentalmente rocas o minerales. Igualmente fue posible observar que algunos de estos minerales eran más fácilmente magnetizados que otros, que podían presentar poca magnetización o ser desmagnetizados. No obstante, desde mediados del siglo XIX, el estudio experimental en la magnetización de rocas, principalmente del tipo volcánico, forjó las primeras teorías que darían un mejor concepto del cmT. Giuseppe Folgheraiter (1856-1913) logró recuperar los registros magnéticos del cmT en rocas volcánicas. Sus investigaciones quedaron reforzadas con la aportación de Paul L. Mercanton (1876-1963), cuyos análisis se usaron para estudios arqueológicos. Raymond Chevallier (1891-1965) se centró en el magnetismo de minerales en rocas volcánicas, intentando datar magnéticamente flujos volcánicos de edades inciertas. Por su parte, Bernard Brunhes (1867-1910) demostró que la magnetización adquirida por un material podía persistir en el tiempo sin ser rápidamente reemplazada por otra magnetización externa. En ese sentido, debido a su origen, las rocas están conformadas por diferentes tipos de minerales, lo que influye directamente en su capacidad para ser magnetizadas por un campo magnético externo. A este proceso se le conoce como susceptibilidad magnética, propiedad física que puede ser dividida en tres grupos minerales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.

La Figura 2 muestra ejemplos del comportamiento de los minerales respecto a un campo magnético externo. Los minerales diamagnéticos, como pueden ser la pirrotina, la pirita o la calcopirita, presentan una susceptibilidad magnética negativa, es decir, su magnetización va en sentido opuesto al campo magnético externo o que quiere decir que son repelidos. Dado que el material está conformado por átomos y partículas subatómicas, sus momentos magnéticos (mostrados en forma de borregos) se comportarán de forma independiente, como si cada uno de ellos estuviera al azar cuando no existe un campo magnético externo, mientras que, si aparece un campo magnético, estos momentos se alinearán en la misma dirección pero de forma opuesta a la orientación del campo magnético externo (flecha roja del campo magnético, Figura 2a).

Con respecto a los minerales paramagnéticos, como pueden ser el olivino, el piroxeno, el granate o la biotita, ligeramente magnéticos, su susceptibilidad magnética es pequeña. En este caso, cuando no existe un campo magnético externo, los momentos tienden a estar al azar, como ocurre en el caso diamagnético. Sin embargo, cuando aparece un campo magnético, estos momentos tienden a seguir más o menos la dirección del campo magnético, generando que la magnetización no sea tan importante ni permanente, por lo que cuando el campo magnético desaparece los momentos magnéticos vuelven a comportarse al azar (Figura 2b).

Los minerales ferromagnéticos, como el níquel, el cobalto, la awaruita o el hierro presentan una susceptibilidad positiva y alta, es decir, su magnetización ocurre en el mismo sentido que el campo magnético externo, por lo que los momentos magnéticos tienden a seguir al campo magnético. Cuando no existe el campo magnético, los momentos se presentan en un estado colectivo pero orientados. Cuando se aplica un campo magnético externo, los momentos magnéticos logran un estado de magnetización espontáneo con facilidad, el cual es consistente con la configuración ya ordenada previamente, por lo que los momentos y el campo magnético son paralelos en una misma dirección (Figura 2c). Los minerales ferromagnéticos pueden separase en otros dos grupos: antiferromagnéticos y ferrimagnéticos.

En los minerales antiferromagnéticos, como puede ser la ilmeita, el ulvoespinela, la troilita, o la goetita, los momentos magnéticos tienden a presentar comportamientos similares y ser del mismo tamaño, es decir, presentan una misma magnitud. Estos no se encuentran al azar y están conformados por pares paralelos orientados en sentido opuesto -esto es principalmente porque su comportamiento es 'antiparalelo' (Figura 2d). La forma en que se distribuyen estos momentos genera que se mantengan estables cuando no aparece un campo magnético externo y cuando aparece un campo magnético tienden a alinearse con él. No obstante, estos momentos magnéticos podrían transformase y presentar propiedades de tipo paramagnético, especialmente cuando el material está siendo sometido a ciertas temperaturas (Figura 2d). En el caso de los minerales ferrimagnéticos como son la magnetita, la magnesioferrita, el cobalto férrico, el cobre férrico, la jacobsita

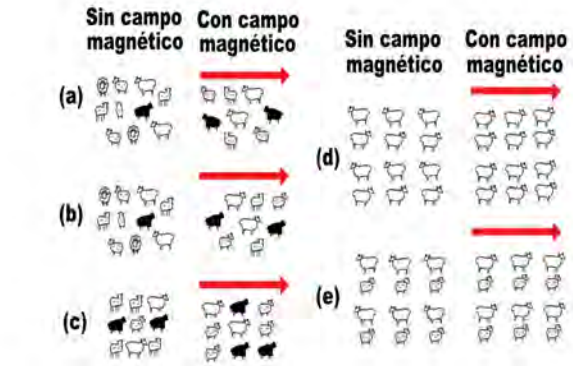


Figura 2 Ejemplo de susceptibilidad magnética debido a un campo magnético externo. Izquierda: comportamiento de los momentos magnéticos (borregos) en minerales a) diamagnéticos, b) paramagnéticos y c) ferromagnéticos. Derecha: dos diferentes ejemplos de minerales ferromagnéticos: d) antiferromagnéticos y e) ferrimagnéticos. Las flechas rojas señalan la dirección en la que actúa un campo magnético externo. Figura del autor.

o la pirroita, los momentos magnéticos se presentan orientados paralelamente pero en sentido opuesto y con tamaños diferentes. Esto genera que se mantengan pares de momentos de forma similar en ausencia de un campo magnético externo. Además, el campo magnético se ve potencializado en los pares de momentos magnéticos cuando aparece un campo magnético externo (Figura 2e).

Un mecanismo que ayuda a que los minerales cambien y adquieran ciertas propiedades magnéticas es la llamada termorremanencia. En tal mecanismo, la temperatura denominada como punto de Curie, que fue propuesta por el físico francés Pierre Curie (1859-1906), suele variar dependiendo del tipo de mineral. Por ejemplo, cuando un mineral ferromagnético es sometido a temperaturas por encima del punto de Curie tiende a cambiar a un estado paramagnético, algo que no sucedería con minerales antiferromagnéticos. En este estado, un campo magnético pequeño y externo es capaz de orientar los momentos magnéticos en la dirección del campo externo. Esta remanencia magnética es estable pero puede cambiar o desaparecer si se vuelve a alcanzar nuevamente la temperatura de Curie. La temperatura de Curie en grados Kelvin Tc(K) observada para minerales ferromagnéticos formados por cobalto es de Tc(K) > 1400 K, mientras que para minerales de hierro es de Tc(K) > 1043 K.

Hacia una nueva concepción (1919)

El fortalecimiento en el análisis de los registros magnéticos recuperados en rocas extraídas de flujos de lava permitió, hacia finales del siglo XIX, tener un mejor entendimiento de que estos registros siempre indicaban al polo norte magnético en el momento de su magnetización. Esto llevó a una pregunta obligada: ¿qué mecanismo o fenómeno podría estar siendo la principal fuente de magnetización en las rocas? La respuesta no tardó en considerarse, ya que pocos siglos antes como diferentes trabajos como los de Peter Peregrinous, Gerardus Mercator o William Gilbert habían ya dado importantes fundamentos sobre la posible existencia de un campo magnético que se originaba en el interior del mismo planeta y que se comportaba como un gran imán. Para 1822, André-Marie Ampère (1775-1836) ya había propuesto que las corrientes de energía internas eran responsables del magnetismo que se genera en la Tierra. Además, hacia 1881, Goldstein (1881) fue el primero en publicar la idea de que el Sol interactúa con un campo magnético en la Tierra y que envía al espacio rayos eléctricos similares a los rayos catódicos, haciendo una misteriosa conexión entre las variaciones de la actividad solar y las fluctuaciones de fenómenos magnéticos y eléctricos en la Tierra, una relación directa que conectaba con el fenómeno de las auroras. Pronto surgiría una nueva forma de explicar tal fenómeno cmT.

Hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX, después de analizar un cuerpo giratorio similar a nuestro Sol convirtiéndose en un gran imán (Figura 3), el físico Inglés Joseph Larmor (1857-1942) propuso un modelo teórico con el que intentó explicar el comportamiento de este gran imán, al cual llamó 'el Dínamo'. Su simple idea de que el campo magnético es el resultado de la acción de un dínamo en un núcleo fluido y que es conductor de electricidad en la Tierra encontró muchas dificultades, lo que tiempo después llevó a diferentes tipos de propuestas alternativas. En esta nueva concepción de un modelo magnético, Larmor intentó idealizar de manera analítica y experimental los procesos y comportamientos que podían estar ocurriendo tanto en el interior como en el exterior de la Tierra; propuso, en primera instancia, ciertas consideraciones para que el cmT pudiera generarse, creando una importante disciplina que hasta el día de hoy se estudia y perfecciona. En este caso, tuvo en cuenta que tal modelo del dínamo debía tener características bien establecidas, principalmente una conductividad central que fuera lo suficientemente alta como para garantizar la estabilidad del mismo. En ese sentido, si había una conductividad principalmente de tipo eléctrico y termal en el núcleo de la Tierra, ésta debía ser también de tipo metálico.

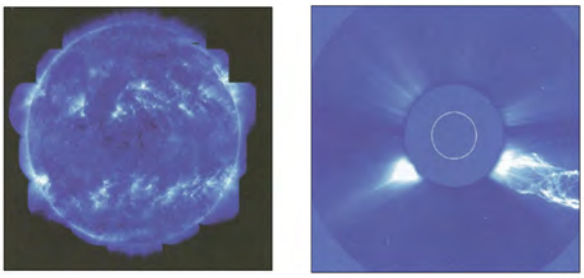


Figura 3. Ejemplo de radiografías del Sol registradas por el satélite SOHO de Japón, mostrando actividad del campo magnético solar. (Imagen tomada de Tobias, 2002).

Este último modelo fue respaldado por las aportaciones hechas de Emil Wiecher, Richard Olham y Jed Emil Wiechert que ya habían descubierto que la Tierra presentaba un núcleo sólido y consideraban la posible existencia de una parte líquida en el mismo núcleo, así como otro tipo de capas internas. Es así como la teoría del dínamo trajo los primeros análisis experimentales, en los que la magnetización de rocas y el fenómeno de las auroras fueron evidencias tangibles y observables de la existencia de un enorme campo magnético en el núcleo de la Tierra, el cual influía en todo el planeta. Así mismo, permitió explicar un funcionamiento en conjunto del planeta y del cmT.

La teoría del dínamo trata de explicar los procesos y mecanismos que permiten la generación de un campo magnético en una estrella o cuerpo celeste como la Tierra. Así, Larmor sugirió que un campo magnético interno se podría recuperar de forma análoga con su modelo de dínamo. Consideró que en el interior del planeta la interacción y movimiento de ciertos elementos y materiales producen las corrientes eléctricas necesarias para que se genere el campo magnético. Esta consideración se retomó hacia 1930, cuando se confirmó la existencia de una parte líquida en la zona más externa del mismo núcleo. Esto fue previamente observado en 1926 por el geofísico inglés Harold Jeffreys (1891-1989), considerando que el núcleo externo estaba compuesto de metal derretido, proporcionando así el medio conductivo requerido para las consideraciones hechas por Larmor (Bullard, 1948).

Para fortalecer la teoría del dínamo fue necesario considerar un movimiento convectivo en el núcleo exterior, principalmente formado por elementos de hierro y níquel fundido. Esta explicación fue asumida, lo que llevó a considerar la generación del campo magnético a partir de una inducción electromagnética (Elsasser, 1946; Bullard, 1948). Posteriormente, Elsasser (1947) mostró que es posible el fortalecimiento de un gran campo magnético en el núcleo debido al movimiento de rotación que presenta la Tierra. Así, estos materiales metálicos en movimiento convectivo sufren el llamado efecto de Coriolis, el cual fortalece el campo magnético en el interior.

Cuando estos materiales en movimiento convectivo, también considerado como plasma conductor, se desplazan por un campo magnético ya existente aparecen corrientes eléctricas inducidas creando otro campo magnético. Cuando este campo inducido se

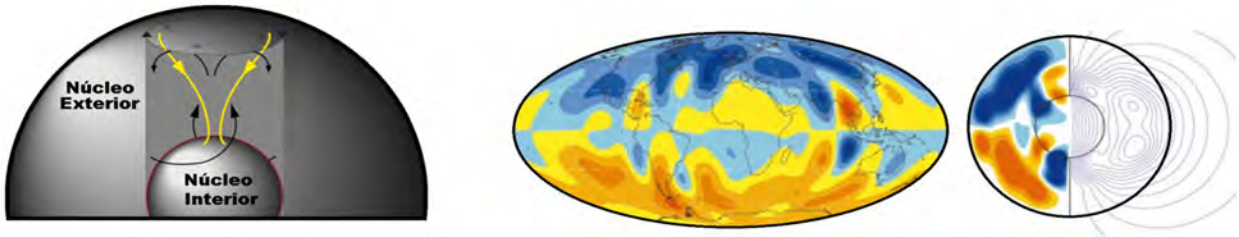


Figura 4. Izquierda, ejemplo de un tipo de modelo del geodínamo, en el que se genera el cmT desde el núcleo exterior y por ende el flujo del campo magnético (líneas amarillas) y sus velocidades (líneas negras. Modificado de Cao *et al.*, 2018). Derecha, simulación del campo magnético generado entre los límites del núcleo y el manto con proyecciones del campo magnético hacia afuera, rojo y hacia adentro, azul (Tomado de Roberts y Glatzmaier, 2000).

añade al campo preexistente se genera un campo magnético mayor que puede sostenerse a sí mismo. Este movimiento de fluidos cargados eléctricamente que se originan en el núcleo fluyen a lo largo de rutas conductivas a través del manto (Busse y Wicht, 1992).

Este proceso convectivo en el núcleo exterior es necesario para que el campo magnético sea constante y estable. Se ha considerado que tal proceso resulta de una combinación térmica y composicional (Buffet, 2000) en la que el manto juega un papel importante al controlar la velocidad con la que el calor sale desde el núcleo. A partir del uso de modelos computacionales, se ha considerado que las fuentes de calor pueden ser controladas por varias causas como la acción gravitacional que se genera debido a la compresión del núcleo, principalmente en la medida en que va creciendo (Buffet, 2000); el calor latente en el núcleo (Buffet, 2000) y los efectos de radiactividad generados por ciertos elementos (p. ej., potasio, uranio o torio; Sanders, 2007).

Estos procesos han sido considerados como una base importante para que el dínamo funcione. Sin embargo, a pesar de que nuevos trabajos y resultados se siguen dando a conocer desde comienzos del siglo XXI, los diferentes modelos computacionales del dínamo parecen variar; por ejemplo, si se considera que la superficie del núcleo presenta una temperatura constante, entonces es posible generar un campo magnético con ciertas características que se cree ocurren en la Tierra, pero si estos incorporan parámetros más realistas considerando variaciones de temperatura en la superficie del núcleo, se han obtenido aumentos significativos del flujo convectivo que producen un campo magnético más realista (Figura 4).

Un experimento mental

Usar la imaginación para investigar la naturaleza de las cosas resulta apropiado cuando se intenta idealizar y/o explicar algún tipo de fenómeno, vinculando una secuencia de procesos que en la misma naturaleza surgen y conducen a tal fenómeno. Es así como algunos modelos propuestos posteriormente a aquel primero de Josept Larmor surgieron con la intención de reconocer esa secuencia de procesos que no solamente han permitido relacionar el funcionamiento del cmT con evidencias tangibles y observables (p. ej. la magnetización de rocas o la formación de auroras), sino que también han permitido tener un mejor entendimiento del proceso evolutivo del planeta mismo. ¿Esto quiere decir que si la Tierra no tuviera campo magnético no habría provocado la magnetización de minerales como la magnetita o el surgimiento de algún otro tipo de fenómeno?

Gracias al modelo del dínamo, en especial a aquellos denominados 'geodínamos', los cuales han sido mayormente usados en décadas recientes, es posible corroborar experimentalmente que el cmT es responsable de muchos de los fenómenos magnéticos observados

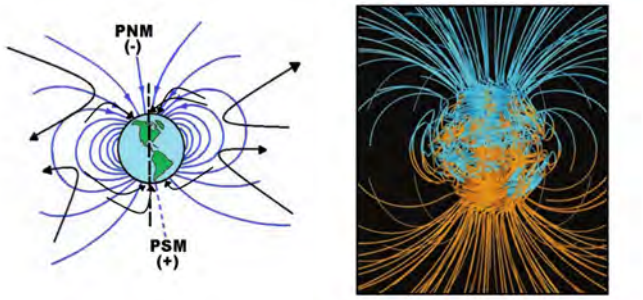


Figura 5 (izquierda). Ejemplo del cmT cuyo flujo magnético entra por el polo norte magnético (PNM) y sale por el polo sur magnético (PSM) cerca de los polos geográficos de la Tierra. Estos flujos magnéticos son representados por las flechas azules y están casi alineados con el eje de rotación terrestre: ver la línea negra a trazas. Las líneas negras representan partículas de energía proveniente del Sol que interactúan en la zona donde entra el cmT. Estas partículas solares se dirigen hacia los polos magnéticos produciendo las auroras boreales o australes (derecha). Ejemplo del cmT obtenido a partir de modelos computacionales del geodínamo (Imagen tomada de Glatzmaier y Robert, 1995).

y registrados en la Tierra sin que por ello se descarte la influencia del Sol sobre algunos de estos fenómenos terrestres. En general, los movimientos de rotación y traslación a los que está sujeta la Tierra impulsan fuertemente el flujo de esta energía magnética del cmT tal y como se ha mencionado, generando que este flujo magnético siga el eje rotativo (p. ej. líneas negras a trazas Figura 5). En el caso de las auroras que se generan cuando partículas cargadas eléctricamente y provenientes del Sol chocan contra la atmósfera y el cmT, son redirigidas hacia los polos magnéticos de la Tierra (flechas negras Figura 5).

En modelos más recientes del geodínamo se ha integrado la influencia del manto como pieza clave en el proceso convectivo del núcleo, el cual permite el origen y funcionamiento del cmT, ya que al ser el manto masivo y relativamente lento es capaz de controlar el enfriamiento que ocurre en el núcleo, regulando su flujo de calor a través del límite entre ambos. Este control es influenciado por otro proceso de vital importancia para el funcionamiento de la Tierra, el llamado 'proceso de convección del manto' (atención: no es igual este proceso de convección del manto que el proceso de convección que ocurre en el núcleo). El proceso convectivo del manto, que para este manuscrito solo se menciona de forma general, se genera debido al fraccionamiento y/o separación de materiales con diferentes densidades y condiciones térmicas con un funcionamiento cíclico en el mismo manto (p. ej. las flechas en color rojo que suben y bajan en la zona del manto, Figura 6). Pero ¿qué se logra con esta separación de materiales y por qué ocurre?

El principal mecanismo que genera este fraccionamiento de materiales es el enfriamiento de la Tierra, ya que desde que inició su formación, hace aproximadamente 4543 Ma (millones de años; Rudge *et al.*, 2010), la Tierra primitiva o también llamada "proto

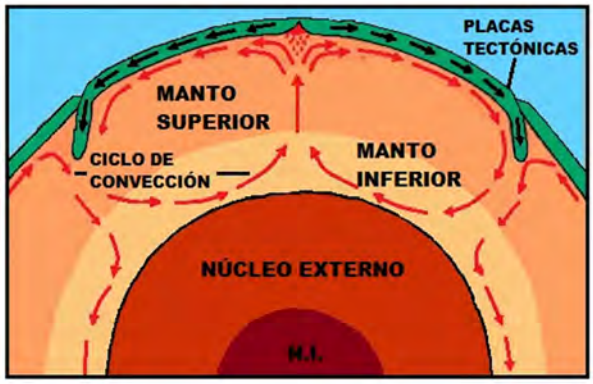


Figura 6 Movimiento en el interior de la Tierra a partir de la idealización del proceso de convección del manto, se observan corrientes convectivas (flechas en rojo) junto con el movimiento de las placas tectónicas en la parte superior (flechas en negro). N.I.: núcleo interno. (Modificado de Davies y Richards, 1992).

Tierra" se encontraba en un estado incandescente debido a la gran cantidad de impactos durante su proceso de acreción, el cual se ha considerado que pudo durado alrededor de 10 Ma, con base en la teoría cosmogónica de la nebulosa solar propuesta por Jacobsen en 2005 (Figura 7).

Esto produjo un incremento de calor a gran escala, haciendo que la Tierra primitiva se fundiera y que con el paso de los miles de millones de años se fuera enfriando progresivamente, dando forma a las diferentes capas internas que actualmente conocemos. Este proceso, que se da en el interior de la Tierra, ha separado los materiales y elementos más pesados y densos hacia el centro del planeta para conformar el actual núcleo, el cual en el pasado presentaba mayores dimensiones, mientras que los materiales menos densos y ligeros conforman el manto y la corteza actuales. Además, dado que también este proceso convectivo controla directamente el movimiento de las placas tectónicas (Figura 6), el ascenso de rocas conformadas por minerales magnéticos permitirá que estos se magneticen por la influencia del cmT cuando alcancen la superficie terrestre.

Por otro lado, los actuales modelos del geodínamo intentan explicar procesos que pudieron haber ocurrido en el pasado y que podrían respaldar las llamadas teorías cosmogónicas, tratando de explicar el origen y formación de la Tierra así como del sistema solar.

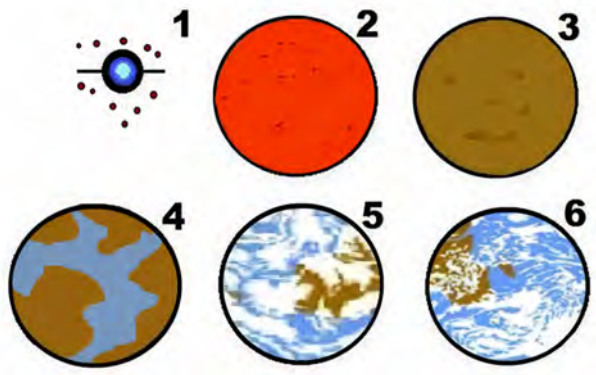


Figura 7. Evolución de la Tierra. (1) Formación y choque de planetesimales (pequeños cuerpos rocosos formados de gas y polvo) que comienzan a acrecionarse para formar la Tierra primitiva. (2) Tierra primitiva más estable e incandescente. (3) Tierra primitiva comienza a enfriarse, generando las primeras corteza terrestre. (4) Formación de la atmósfera y los océanos. (5) Origen de los primeros grandes continentes y (6) la formación de la Tierra actual. Figura del autor.

La historia de la Tierra marcada por el cmT

El surgimiento del paleomagnetismo (una disciplina que forma parte de la ciencia del geomagnetismo) ha permitido observar que el comportamiento del cmT ha cambiado a través del tiempo. Se ha observado experimentalmente que las direcciones magnéticas pasadas del cmT pueden abarcar de cientos de miles a millones de años y quedan registradas en las rocas. Un ejemplo de esta magnetización ocurre cuando se da el fenómeno del vulcanismo, en el que el material volcánico conformado por minerales magnéticos es expulsado de un volcán formando un río de lava. Este material volcánico entra en contacto con el ambiente y se enfría, registrando la dirección y declinación del cmT de ese momento. Sin embargo, ¿qué pasaría si tales direcciones del cmT cambiaran nuevamente, por ejemplo que el PNM se dirigiera hacia el Ecuador? (Figura 5). Primero que nada, la roca magnetizada conservaría la dirección del cmT antiguo, pero si se quisiera actualizar la orientación de su magnetización con un nuevo comportamiento del cmT, entonces tal remanente de magnetización requeriría que las rocas sufrieran un nuevo calentamiento hasta el punto de Curie.

Tales cambios en las orientaciones del cmT para diferentes ubicaciones y tiempos permiten restringir la edad de los materiales en una escala de tiempo de polaridades magnéticas (Figuras 8a, b, y c). Con este tipo de análisis se pudo considerar hacia la década de los años 80 del siglo XX que la Tierra ya manifestaba tener un campo magnético desde hace al menos 3.5 Ma (McElhinny y Senanayake, 1980). En estudios posteriores llevados a cabo en las últimas décadas del siglo XXI se observó que tal edad del cmT en la Tierra era mayor, considerando edades desde al menos los 3600 Ma (Buffet, 2003) y de entre los 3000 y los 3700 Ma (Dobson, 2016). Si estas edades se comparan con la edad de la Tierra (~4560 Ma, Helled *et al*., 2020) es posible confirmar que ya poseía un campo magnético casi desde sus primeros instantes de formación.

Por otro lado, estos cambios magnéticos en las rocas también han permitido ver dos situaciones importantes: 1) que el cmT no ha presentado el mismo comportamiento a lo largo de la historia de la Tierra, y 2) que si el cmT ha cambiado, también el interior de la Tierra se ha modificado. ¿Qué podría generar estos cambios de orientación o de polaridad magnética (p. ej. de positivo a negativo o viceversa) en el cmT? Se ha considerado que variaciones en la composición química y térmica de los materiales en el límite manto-núcleo podría generar anomalías de temperatura y densidad haciendo que estos materiales permanezcan en el manto o desciendan hacia el núcleo, influyendo directamente en el flujo de calor entre ambas capas y alterando la capacidad del flujo de las corrientes eléctricas (Bloxham y Gubbins, 1987; Lay *et al*., 1998). Así mismo, se ha considerado que cambios de la velocidad de rotación y/o traslación de la Tierra han generado que las velocidades relativas entre cuerpos sólidos y líquidos en el interior del planeta cambien temporalmente, afectando también el flujo de las corrientes eléctricas que circulan entre el núcleo y el manto (Olson y Glatzmaier, 1995).

Efectos de este tipo comenzaron a ser observados hace más de un siglo, ya que hacia 1906 el geofísico japonés Motonori Matuyama (1884-1958) sugirió que magnetizaciones inversas observadas en rocas antiguas se habrían generado cuando el cmT se comportaba de forma inversa -que sería como si en aquella época una brújula señalara al polo sur magnético en lugar del norte magnético-. Tal circunstancia también fue corroborada al observar que estos cambios de orientación magnética no ocurrían en rocas

con propiedades antiferromagnéticas (Figura 2d) sino con diferentes composiciones mineralógicas para una misma ubicación y tiempo de registro. Esto fortaleció aún más la idea de que las polaridades del cmT se han invertido o cambiado en el pasado. Por ello se han estudiado ampliamente diferentes periodos de inversión. Por ejemplo, el periodo denominado Bruhnes-Matuyama (Clement, 2004), que ha sido considerado como la última inversión magnética que ha tenido el cmT, el cual se considera que comenzó hace unos 700 000 años; mientras que el periodo denominado como Gauss-Matuyama, ocurrió hace unos 2.5 Ma (Clague, 2006). Estos cambios en la polaridad del cmT no se presentan en un determinado periodo de tiempo, sino que parecen estar relacionados con particulares mecanismos en el interior de la Tierra.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que la orientación de magnetización de las rocas va a depender de la edad misma de la roca. Sin embargo, ¿qué pasa cuando se analizan rocas para periodos de tiempo similares pero sus orientaciones magnéticas varían debido a que se localizaron en diferentes continentes? Esta pregunta pone en evidencia que hay algo más que solo cambios del PNM o variaciones de la polaridad del cmT, especialmente cuando se toman muestras de roca en diferentes lugares del planeta. Por ejemplo, al tratar de correlacionar polos magnéticos para muestras de roca recuperadas en diferentes continentes se ha observado que no suelen coincidir entre sí (Figura 8d). Esta situación solo puede tener una explicación, y es que los polos magnéticos migran, lo cual ha permitido entender y al mismo tiempo corroborar la llamada *'Teoría de la deriva continental'* propuesta en 1915 por Alfred Wegener (1880-1930) (Wegener, 1915). En esta teoría, los continentes migran y se desplazan siguiendo los llamados límites de placas; el físico británico Keith Runcort (1922-1995) fue uno de sus principales exponentes y defensores.

Gracias a que la remanencia magnética ha permanecido grabada en rocas antiguas localizadas en diferentes partes del planeta, y de que tal remanencia no concuerda con la actual orientación del cmT, es como ha sido posible concluir que los continentes se desplazan siguiendo el mismo patrón evolutivo de la Tierra.

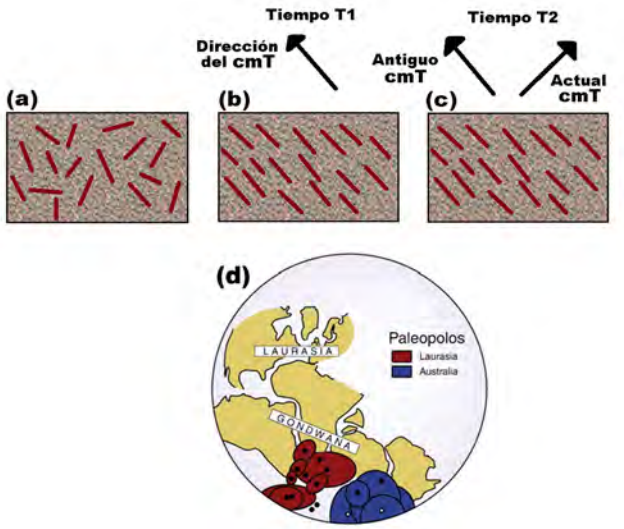


Figura 8. Ejemplo de cambios en la magnetización de rocas (arriba): a) Momentos magnéticos al azar (líneas en color rojo), debido a que no existe un campo magnético externo. b) Para un tiempo determinado T1 (antiguo), aparece un campo magnético y los momentos magnéticos se alinean. c) Momentos magnéticos registrados en un tiempo T2 (actual) no coinciden con la actual orientación del cmT (abajo). d) Reconstrucción del antiguo supercontinente llamado 'Pangea' a partir del análisis de muestras con edades de periodos geológicos del Paleozoico y Mesozoico. (Imagen tomada de Domeier *et al.*, 2012).

En la Figura 8d se muestra un ejemplo en el que se intenta reconstruir el supercontinente antiguo llamado 'Pangea', en el cual los paleopolos (polos magnéticos antiguos) obtenidos a partir de muestras de roca magnetizadas (círculos negros) se emplean para demarcar los posibles desplazamientos y rotaciones de bloques de roca o continente. En este caso, se usan trazados circulares en color rojo para el continente 'Laurasia' y en azul para el continente 'Gondwana'. Los diferentes puntos de color negro intentan mostrar la migración de los paleopolos a partir de las orientaciones magnéticas recuperadas en rocas de aquella época.

Un posible futuro del cmT

Volviendo al título de este escrito, no hay duda de que el cmT es un fenómeno que ha existido desde hace miles de millones de años, inclusive se puede pensar que desde los primeros instantes de la formación del planeta. La comprensión de este fenómeno ha requerido de siglos de observaciones y estudios, permitiendo ver que el cmT es una consecuencia directa del mismo funcionamiento y proceso evolutivo de nuestro planeta. La semilla sembrada hacia 1919 y la aportación de la teoría del dínamo y sus bases experimentales ayudaron a poner los cimientos de un fenómeno que se integra con el funcionamiento mismo de la Tierra, el cual sigue siendo objeto de estudio. En la actualidad, nuevas herramientas experimentales permiten estudiar el cmT a partir de recreaciones computacionales, y preguntarnos si el cmT continuará existiendo en el futuro. Responder esto no debería resultar difícil si intentáramos recurrir al pasado para constatar su existencia; no obstante, evidencias externas a la Tierra muestran que los campos magnéticos en otros planetas del sistema solar son diferentes. Por ejemplo, en el caso de los planetas Mercurio, Venus o Marte, tienen un origen similar y estructuras rocosas parecidas a las de la Tierra, por lo que presentan campos magnéticos similares al cmT pero menos intensos.

Particularmente en el caso de Marte, su campo magnético actual ha mostrado ser mucho más débil que el del cmT, el cual podría estar siendo generado únicamente por remanentes magnéticos que se presentan en rocas magnetizadas ubicadas sobre la superficie del planeta. Se ha considerado que este decaimiento del campo magnético de Marte pudo deberse a que sus capas internas dejaron de generar el suficiente flujo de calor, afectando sus propios procesos convectivos, similares a los procesos que ocurren en la Tierra y teniendo como consecuencia que el viento solar agote su atmósfera y afecte su débil e inestable campo magnético. Además, otro problema que también afecta la magnetización del planeta rojo es la gran cantidad de impactos por meteoritos. Esto muestra que el funcionamiento del actual cmT tal y como lo conocemos podría verse afectado en un futuro de forma similar al de Marte en millones de años, ya que es evidente que el proceso de enfriamiento gradual y continuo que ocurre en el interior de la Tierra (p. ej. el observado en los sistemas volcánicos y/o terremotos) generará cambios en las dimensiones de las capas internas, posiblemente con un núcleo más angosto y un manto-corteza con un mayor espesor.

AGRADECIMIENTOS

A los tres revisores de este manuscrito y a los editores de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias por sus comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

Bloxham, J., Gubbins, D., 1987. Thermal core–mantle interactions. Nature, 325(6104), 511-513.

Buffert, B. A., 2000. Earth's core and the geodynamo. Science, 288(5473), 2007-2012.

Buffett, B. A., 2003. The thermal state of Earth's core. Science, 299(5613), 1675-1677.

Bullard, E. C., 1949. The magnetic field within the Earth. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 197(1051), 433-453.

Busse, F. H., Wicht, J., 1992. A simple dynamo caused by conductivity variations. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 64(1-4), 135-144.

Cao, H., Yadav, R. K., Aurnou, J. M., 2018. Geomagnetic polar minima do not arise from steady meridional circulation. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(44), 11186-11191.

Carlson, J. B., 1982. Brújula de piedra-imán, ¿primicia china u olmeca?

Clague, J., 2006. Open letter by INQUA, executive committee. Quaternary Perspectives, 16(1), 158-159.

Clement, B. M., 2004. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. Nature, 428(6983), 637-640.

Davies, G. F., Richards, M. A., 1992. Mantle convection. The Journal of Geology, 100(2), 151-206.

Dobson, D., 2016. Earth's core problem. Nature, 534(7605), 45-45.

Domeier, M., Van der Voo, R., Torsvik, T. H., 2012. Paleomagnetism and Pangea: the road to reconciliation. Tectonophysics, 514, 14-43.

Elsasser, W. M., 1946. Induction effects in terrestrial magnetism part I. Theory. Physical Review, 69(3-4), 106.

Elsasser, W. M. 1947. Induction effects in terrestrial magnetism. Part III. Electric modes. Physical Review, 72(9), 821.

Glatzmaiers, G. A., Roberts, P. H., 1995. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. Nature, 377(6546), 203-209.

Golstein, 1881. Über die Entladung der Electricität in verdünnten Gasen," in Wiedemanns Annalen, vol. XII, p. 266.

Helled, R., Nettelmann, N., Guillot, T., 2020. Uranus and Neptune: origin, evolution and internal structure. Space Science Reviews, 216(3), 1-26.

Jacobsen, S. B., 2005. The Hf-W isotopic system and the origin of the Earth and Moon. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33, 531-570.

Lay, T., Williams, Q., Garnero, E. J., 1998. The core–mantle boundary layer and deep Earth dynamics. Nature, 392(6675), 461-468.

McElhinny, M. W., Senanayake, W. E., 1980. Paleomagnetic evidence for the existence of the geomagnetic field 3.5 Ga ago. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 85(B7), 3523-3528.

Needham, J., 1974. Science and civilisation in China (Vol. 5). Cambridge University Press.

Olson, P., Glatzmaier, G. A., 1995. Magnetoconvection in a rotating spherical shell: structure of flow in the outer core. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 92(1-2), 109-118.

Peregrinus, P., 2020. The letter of petrus peregrinus on the magnet, ad 1269 (Vol. 1). Library of Alexandria.

Roberts, P. H., Glatzmaier, G. A., 2000. Geodynamo theory and simulations. Reviews of modern physics, 72(4), 1081.

Rudge, J. F., Kleine, T., Bourdon, B., 2010. Broad bounds on Earth's accretion and core formation constrained by geochemical models. Nature Geoscience, 3(6), 439-443.

Sanders, R., 2007. Radioactive potassium may be major heat source in Earth's core. UC Berkeley News. Diakses, 02-28.

Shen Kuo, 1088. Ensayos del Arroyo de los Sueños". (Mèng Xī Bǐ Tán).

Sivin, N., 1995. State, cosmos, and body in the last three centuries BC. Harvard Journal of Asiatic Studies, 55(1), 5-37.

Sivin, N., 1977. Shen Kua: A Preliminary Assessment of His Scientific Thought and Achievements. Sung Studies Newsletter, (13), 31-56.

Tobias, S. M., 2002. The solar dynamo. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1801), 2741-2756.

Wegener, A.., 1915. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane: Vieweg & Sohr., Braunschweig; 2nd ed., 1920; 3rd ed., 1922, translated into English in 1924; 4th ed., 1924, revised by A. Wegener anil translated into English in 1929.

Wu, C., Wu, C., 2021. A Comparative Study of the Astronomical Navigation Between Ancient China and Pacific Austronesian. The Prehistoric Maritime Frontier of Southeast China: Indigenous Bai Yue and Their Oceanic Dispersal, 187-206.

Manuscrito recibido: 27 de marzo de 2024
Manuscrito corregido: 13 de septiembre de 2024
Manuscrito aceptado: 3 de octubre de 2024

LA UTILIDAD DE LOS SENSORES DE BAJO COSTO EN LAS GEOCIENCIAS: CASO DE ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Alejandro Rodríguez-Trejo[1*], Héctor E. Ibarra-Ortega[1] y Reneé González-Guzmán[2]

[1] Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, Querétaro, México.
[2]Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

***alexrt@geociencias.unam.mx**

RESUMEN

El desarrollo y uso de sensores de bajo costo en combinación con sistemas de microcontroladores como los Raspberry Pi, Arduino y ESP32 ha abierto nuevas posibilidades para el campo de las geociencias, ofreciendo soluciones accesibles y flexibles para el monitoreo y análisis de fenómenos naturales. Estas plataformas permiten la creación de sistemas de monitoreo adaptables y personalizables capaces de registrar diversos parámetros ambientales como temperatura, presión, humedad y variaciones del campo geomagnético. Este artículo explora el uso de estas tecnologías en las geociencias, enfocándose en su aplicabilidad y ventajas, destacando principalmente su bajo costo y versatilidad. En este trabajo se detalla la metodología de desarrollo de una estación meteorológica mediante el uso de un microcontrolador ESP32 y un sensor BMP280, detallando la metodología de conexiones y cableado físico así como la programación del microcontrolador.

También, a través de un caso de estudio centrado en la detección de tormentas geomagnéticas, se utilizaron un ESP32 y un magnetómetro HMC5883L con el objeto de mostrar sus aplicaciones prácticas tanto en contextos académicos como en proyectos comunitarios. El ejemplo pone de manifiesto el potencial de estas herramientas para realizar investigaciones preliminares en lugares con recursos limitados o como introducción a conceptos avanzados en geociencias.

A pesar de la limitante de los sensores de bajo costo en comparación con la gran precisión de los equipos de alta gama utilizados en laboratorios especializados, los primeros ofrecen una excelente oportunidad para realizar investigaciones exploratorias, proyectos educativos y la extensión de redes de monitoreo en áreas donde la infraestructura tecnológica es limitada. La facilidad de integración y programación, junto con la gran cantidad de documentación disponible, hacen que estas tecnologías sean ideales para científicos, educadores y estudiantes, facilitando el acceso a herramientas que de otro modo estarían fuera de su alcance. De este modo, estos sistemas representan una valiosa contribución para el avance de las ciencias de la Tierra y su difusión en sectores más amplios de la sociedad.

Palabras clave: Sensores de bajo costo, monitoreo ambiental, geociencias, Raspberry Pi, Arduino, ESP32, tormentas geomagnéticas.

ABSTRACT

The development and implementation of low-cost sensors, in combination with microcontroller systems such as Raspberry Pi, Arduino, and ESP32, have opened new avenues in the field of geosciences, providing accessible and flexible solutions for the monitoring and analysis of natural phenomena. These platforms allow for the creation of adaptable and customizable monitoring systems capable of recording various environmental parameters, such as temperature, pressure, humidity, and geomagnetic field variations. This article examines the application of these technologies in geosciences, with a particular focus on their advantages and potential uses, primarily emphasizing their low cost and versatility. These features in scientific instrumentation can democratize access to research and promote science-oriented education.

Through a case study on the detection of geomagnetic storms using an ESP32 and an HMC5883L magnetometer, the article presents a step-by-step tutorial on how to set up an efficient and affordable monitoring system, with the aim of showcasing its practical applications in both academic and community-based projects. The case study underscores the potential of these tools

for conducting preliminary research in resource-constrained environments or as an introduction to more advanced concepts in geosciences.

Although low-cost sensors may be limited in precision compared to high-end equipment used in specialized laboratories, they offer significant opportunities for exploratory research, educational initiatives, and the expansion of monitoring networks in areas with limited technological infrastructure. Their ease of integration and programming, coupled with the abundance of available documentation, make these technologies highly suitable for scientists, educators, and students, providing access to tools that would otherwise be unattainable. In this way, these systems represent a valuable contribution to the advancement of geological sciences and their broader dissemination to diverse sectors of society.

Keywords: Low-cost sensors, environmental monitoring, geosciences, Raspberry Pi, Arduino, ESP32, geomagnetic storms.

INTRODUCCIÓN

En la última década, el avance de la tecnología ha permitido que la ciencia aplicada y la ingeniería sean más accesibles a través de dispositivos electrónicos de bajo costo y alto rendimiento. Microprocesadores y microcontroladores como los Raspberry Pi, Arduino y ESP32, junto con una variedad de sensores asequibles, han transformado la forma en la que se realizan diversos estudios científicos, especialmente en disciplinas como las geociencias (por ejemplo, Anthony *et al*., 2019; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2024). Estos dispositivos, que años atrás eran considerados herramientas para aficionados o para fines solamente educativos, han encontrado aplicaciones cada vez más serias y robustas en investigaciones científicas, algunas publicaciones se relacionan con el monitoreo ambiental (Rodríguez-Trejo *et al*., 2024) y los estudios geofísicos (De Plaen *et al*., 2020).

Estos sistemas son atractivos no solo por su bajo costo, sino también por su versatilidad y facilidad de uso. A una fracción del precio de los equipos de alta precisión, es posible montar estaciones de monitoreo completas que incluyen múltiples sensores, conectividad a internet y capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos. Esta accesibilidad tecnológica permite a investigadores y estudiantes desarrollar proyectos que, en el pasado, habrían sido inviables debido al alto costo y a la complejidad del equipo requerido.

En las geociencias, los dispositivos de monitoreo se han utilizado para medir cuantitativamente fenómenos naturales como sismos, tormentas geomagnéticas, calidad del aire y clima, entre otros.

Importancia del uso de sensores de bajo costo en las geociencias

El desarrollo de sensores y microprocesadores de bajo costo está revolucionando la investigación en las geociencias que involucran monitoreo y recolección de datos en tiempo real. Estas herramientas han permitido que más instituciones, incluyendo las universidades y centros de investigación con recursos limitados, amplíen la posibilidad de hacer ciencia ciudadana y participar en proyectos interinstitucionales. Los dispositivos como el Arduino, el ESP32 y las Raspberry Pi ofrecen plataformas flexibles que se pueden programar fácilmente para interactuar con una variedad de sensores que registran parámetros como la temperatura, humedad, presión y particulado atmosférico, campo magnético y aceleración, entre otros.

Microcomputadoras y microcontroladores: un breve repaso

El Arduino es una plataforma de hardware libre (Figura 1a) que se ha ganado un lugar en el ámbito educativo y científico debido a su facilidad de programación y su capacidad de interactuar con una gran variedad de sensores y dispositivos externos (Ismailov y Jo'Rayev, 2022). A pesar de ser menos potente que dispositivos como la Raspberry Pi, el Arduino es ideal para aplicaciones donde se requieren tareas simples como leer sensores y enviar datos a otros dispositivos vía Wifi.

El Raspberry Pi es una microcomputadora diseñada originalmente como una computadora de bajo costo y alto desempeño que ha demostrado ser sumamente útil en proyectos científicos debido a su capacidad de ejecutar sistemas operativos completos de código libre (Figura 1b) y a su gran número de puertos de entrada/salida (Richardson y Wallace, 2014). Gracias a su capacidad de procesamiento, se puede utilizar para almacenar, procesar y visualizar datos directamente desde cualquier dispositivo detector de parámetros físicos.

El ESP32, que combina tecnología System on a Chip (SoC por sus siglas en inglés) que es básicamente un sistema completo montado en una placa, es un microcontrolador de bajo consumo de energía que incorpora conectividad dual Wifi y Bluetooth integrada (Figura 1c), permitiendo la transmisión remota de datos a plataformas en la nube o a dispositivos móviles (Maier *et al.*, 2017; Cameron, 2023). Esto lo convierte en una herramienta ideal para aplicaciones de monitoreo en tiempo real, especialmente en lugares de difícil acceso donde no es posible una conexión alámbrica a internet.

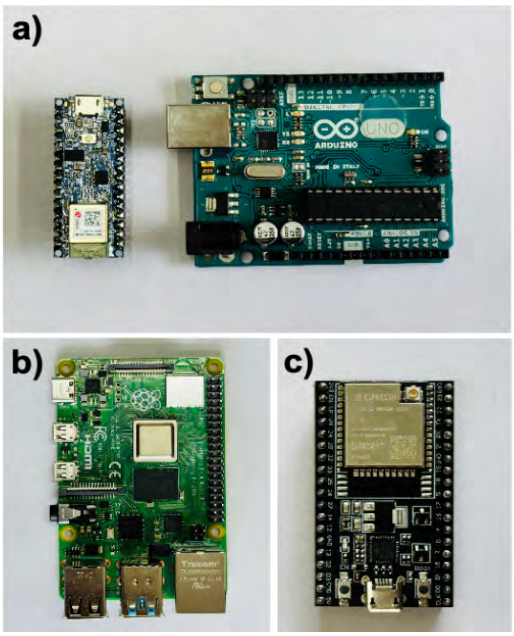


Figura 1. a) Dispositivos Arduino; b) dispositivo Raspberry Pi 4; c) dispositivo ESP32.

Aplicaciones en geociencias

Monitoreo ambiental en tiempo real

Uno de los usos más comunes de los sensores de bajo costo en geociencias es la creación de estaciones de monitoreo ambiental. Con sensores de calidad del aire, como los PMS5003 que miden la concentración de material particulado (PM) 1.0, 2.5 y 10 en µg/m^3 (Kaur y Kelly, 2023), temperatura, presión atmosférica, humedad y velocidad del viento, por ejemplo, es posible establecer una red de monitoreo ambiental. Dispositivos como las Raspberry Pi o el ESP32 permiten la captura y transmisión de datos en tiempo real, lo que es crucial para el seguimiento de fenómenos meteorológicos y climáticos. Las cualidades de estos dispositivos hacen posible la implementación de redes de monitoreo ambiental en comunidades pequeñas, ciudades, y localidades que no tienen acceso a dispositivos de alta precisión.

En el Instituto de Geociencias (IGc), de la UNAM Campus Juriquilla, se desarrolló un dispositivo denominado Estación de Monitoreo Geo Ambiental (EMGA; Figura 2), con el cual se pueden medir en tiempo real ocho variables ambientales que incluyen calidad del aire (PM 2.5 y 10), temperatura, humedad, presión atmosférica, ruido ambiental y deformación del campo magnético terrestre. Estos parámetros se monitorean con sensores de bajo costo y se han podido hacer estudios sobre el impacto ambiental, como el ocasionado por la actividad derivada del uso de pirotecnia, con variaciones espaciales y temporales en la ciudad de Querétaro (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2024). El IGc diseñó, instaló y opera la Red de Monitoreo Geo Ambiental del Estado de Querétaro, que cuenta con más de 25 estaciones EMGA instaladas en la ciudad de Querétaro y su zona metropolitana. Cabe mencionar que el IGc está en proceso de ampliación de la red de monitoreo en esta ciudad y la expansión de redes de monitoreo similares en otras ciudades de México. El monitoreo integral de estos parámetros ambientales permite a la sociedad conocer el estado de la contaminación en entornos urbanos y el impacto ambiental generado por las actividades antropogénicas.

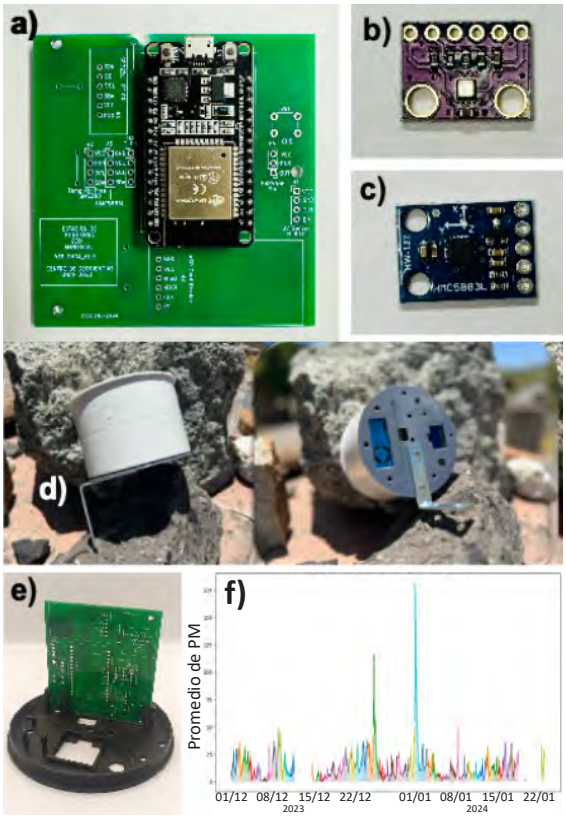


Figura 2. Ejemplificación del desarrollo de la Estación de Monitoreo Geo Ambiental diseñada en el Instituto de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla. a) Placa de desarrollo ESP32 y circuito impreso diseñado para las estaciones EMGA; b) sensor de temperatura, humedad y presión barométrica modelo BME280; c) magnetómetro HMC5883L; d) estación EMGA dentro de su gabinete exterior; e) montaje del circuito impreso sobre un diseño realizado en impresión 3D; f) resultados obtenidos por el sensor de calidad del aire mostrando concentración de material particulado.

Monitoreo sísmico

La detección de actividad sísmica es otra área donde los sensores de bajo costo han encontrado un valioso nicho. Con acelerómetros y microcontroladores como el Raspberry Pi se pueden construir sismógrafos de bajo costo que detecten movimientos en el suelo con origen profundo. Estos dispositivos permiten a científicos y aficionados monitorear terremotos de manera más accesible. Un excelente ejemplo de este tipo de dispositivos aplicados en la sismología es el uso del Raspberry Shake (Figura 3). Este dispositivo es un sismógrafo completo con sensores de alta resolución. El equipo consiste en un dispositivo Raspberry Pi que integra un geófono, un acelerómetro y un sensor de infrasonido. Con estos sensores es posible monitorear la actividad sísmica en tiempo real con una interfaz muy fácil de usar y, a su vez, es posible hacer redes sísmicas de costos considerablemente más bajos con respecto a los sismógrafos convencionales (Anthony *et al.*, 2019). El IGc desarrolló la Red Sísmica del Estado de Querétaro, compuesta por diversos equipos Raspberry Shake instalados en diferentes puntos del estado (De Plaen *et al.*, 2020). Esta red hace posible estudiar la actividad sísmica de la región lo que permite que las autoridades tengan acceso a la información sísmica para establecer planes de contingencia en lugares vulnerables al riesgo sísmico.

Figura 3. Dispositivo Raspberry Shake. Imagen modificada de https://raspberryshake.org/

Estudio del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre (CMT) es un fenómeno natural que se origina en el núcleo de la Tierra. Una de sus funciones principales es proteger a nuestro planeta de las radiaciones solares y rayos cósmicos. El CMT tiene la particularidad de varíar con el tiempo debido a cambios en el núcleo terrestre y a la interacción con el viento solar. Medir estas variaciones es crucial para entender

procesos geomagnéticos y eventos como las tormentas solares. Aquí es donde los magnetómetros de bajo costo, como el HMC5883L (Figura 4), pueden ayudar en la detección y monitoreo de estos eventos.

El magnetómetro HMC5883L es un sensor de campo magnético de bajo costo que permite medir la intensidad del CMT en tiempo real. Puede ser utilizado en conjunto con un ESP32 para medir el campo magnético local en tiempo real. Esto es útil no sólo para detectar eventos de corta duración como las tormentas geomagnéticas, sino también para conocer las variaciones en espacio y tiempo del CMT. Debido a las características inherentes a este equipo es posible instalar una gran cantidad de estos dispositivos en diferentes localidades, lo que nos brinda un bosquejo de los cambios en el CMT en el tiempo y el espacio.

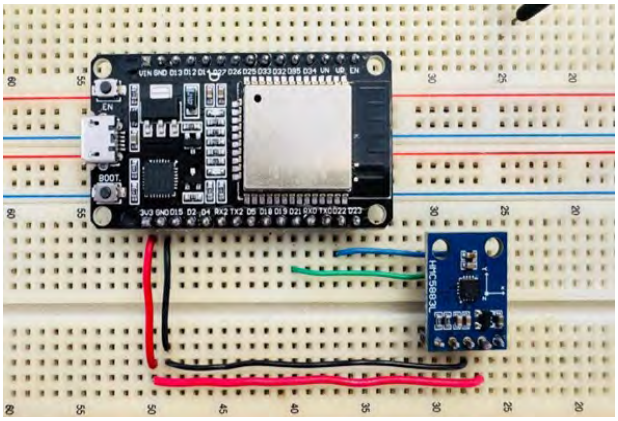


Figura 4. Magnetómetro HMC5883L en conexión con una placa de desarrollo ESP32.

Sensores de gases

Una aplicación importante de los microcomponentes citados es la medición y detección de diversos gases contaminantes y tóxicos. Actualmente existe una amplia gama de sensores de gases que utilizan instrumentos de bajo costo (Delgado-Castro y Rojas-Bolaños, 2015). En geociencias, estos sensores se pueden utilizar para estudiar la emisión de gases en áreas volcánicas, en zonas con actividad geotérmica o en zonas de alta mineralización o de descomposición de materia orgánica.

Con sensores como el MQ-135 y una Raspberry Pi es posible medir la concentración de gases como el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO) y otros compuestos volátiles en el aire (Rani *et al.*, 2020). Estos datos pueden ayudar a monitorear la calidad del aire o la actividad volcánica en regiones colindantes o áreas urbanas sumamente industrializadas, ofreciendo alertas en tiempo real cuando los niveles de gases nocivos aumentan.

Ventajas y desventajas generales del uso de sensores de bajo costo

La implementación de sensores de bajo costo trae consigo una amplia discusión sobre los beneficios y perjuicios de su implementación. Estas percepciones radican principalmente en el uso y aplicación para cada dispositivo y, sobre todo, en el objetivo y el alcance de cada investigación.

Ventajas

- *Bajo costo*

La accesibilidad de estos equipos en masa para la generación de datos científicos permite una mayor participación en la investigación y la educación. De esta manera se acerca a las instituciones educativas y de investigación con la ciencia ciudadana.

- *Flexibilidad y versatilidad*

Los sensores y microcontroladores de bajo costo para el monitoreo geocientífico pueden adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones en geociencias ya que pueden instalarse varios sensores en una misma placa para llevar a cabo desde el monitoreo de la calidad del aire hasta la detección de variaciones en el campo magnético terrestre. Además, la flexibilidad de estas plataformas permite agregar o intercambiar sensores para un mismo puerto según las necesidades del proyecto.

- *Facilidad de uso y programación*

La mayoría de estas plataformas cuentan con una extensa documentación y una comunidad activa de desarrolladores y grupos de colaboradores. Esto facilita el aprendizaje y la implementación de proyectos, incluso para aquellos que no tienen experiencia previa en programación o electrónica.

- *Portabilidad*

Debido a su tamaño diminuto y bajo consumo de energía, los sistemas basados en microcomputadoras y sensores de bajo costo pueden ser fácilmente transportados e instalados en el campo, lo que los hace ideales para estudios en ubicaciones remotas.

Desventajas

- *Menor precisión*

Aunque estos sensores son útiles para estudios preliminares y educativos, no ofrecen la misma precisión y exactitud que los equipos de laboratorio de alta gama. Esto puede limitar su utilidad en estudios que requieren datos extremadamente detallados.

- *Durabilidad*

Los sensores de bajo costo, al no estar diseñados para soportar condiciones extremas, pueden ser menos robustos y más susceptibles a fallas cuando se usan en climas altamente variables o extremos, como áreas de alta humedad, regiones polares, etc.

- *Interferencias y calibración*

Los sensores de bajo costo pueden ser más susceptibles a interferencias electromagnéticas o ambientales extremas. Además, la calibración de estos sensores puede ser menos estable, lo que requiere ajustes periódicos para mantener la calidad de los datos.

METODOLOGÍA

Desarrollo de un sistema base de sensores de bajo costo

En este tutorial describimos los pasos para montar un sistema base que utilice un sensor de presión barométrica y temperatura básicos conectados a un microcontrolador ESP32, aunque el mismo enfoque puede aplicarse a otros tipos de sensores y microcontroladores. La metodología básica consiste en la conexión física del sensor a los puertos del ESP32 así como en su programación y configuración para su funcionamiento.

Materiales necesarios

Para montar el sistema base se requiere de lo siguiente:

- **ESP32.** Microcontrolador para la programación y control de los sensores.
- **Sensor BMP280.** Es un sensor con la capacidad de medir la temperatura y presión barométrica en el ambiente que puede conectarse de manera simple a un microcontrolador ESP32 o Arduino.
- **Protoboard.** Una placa de pruebas que facilita el montaje temporal de circuitos sin la necesidad de soldar los componentes, permitiendo realizar ajustes de manera rápida y sencilla.
- **Cables de conexión.** Para la conexión del sensor a los puertos de entrada del ESP32.
- **Fuente de alimentación.** Se requieren un cable USB tipo C y una conexión eléctrica para la alimentación del sistema.
- **Computadora con Arduino IDE.** El entorno de desarrollo integrado de Arduino permite programar el ESP32 y cargar el código necesario para interactuar con el sensor. Para ello es necesario descargar y configurar el entorno de desarrollo de la placa ESP32. Para más información se puede consultar el siguiente enlace https://programarfacil.com/esp8266/programar-esp32-ide-arduino/.

Paso 1: conexión física de los componentes

El primer paso es realizar las conexiones físicas entre el ESP32 y el sensor BMP280 (Figura 5). Este sensor utiliza el protocolo de comunicación I2C, se requieren conectar cuatro cables:

- VCC (pin de alimentación) al pin 3.3V del ESP32 (cable rojo).
- GND (tierra) al pin GND del ESP32 (cable negro).
- SCL (línea de reloj del I2C) al pin GPIO 22 del ESP32 (cable azul).
- SDA (línea de datos del I2C) al pin GPIO 21 del ESP32 (cable verde).

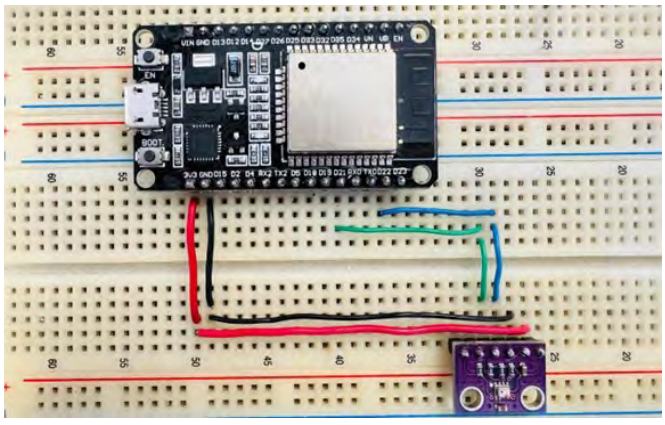


Figura 5. Conexiones entre el Sensor BMP280 y la placa de desarrollo ESP32.

Paso 2: programación del ESP32

Una vez que el hardware esté conectado, el siguiente paso es programar el ESP32 para leer los datos del sensor. Para ello, se utiliza el IDE de Arduino, que soporta de forma nativa al ESP32, facilitando la instalación de bibliotecas y el desarrollo del código.

Inicialmente es necesario instalar el código adecuado para el sensor. Esto se puede hacer desde el gestor de bibliotecas del IDE de Arduino buscando la librería BMP280 e instalándola al IDE (Figura 6). Cabe señalar que cada sensor tiene su propia librería que deberá instalarse. Con la librería instalada, podemos escribir un código básico para leer los valores del campo magnético detectado por el sensor y mostrar los resultados en el monitor serial de la computadora.

El siguiente código (Código 1) es un ejemplo básico de cómo leer los valores del sensor. La Figura 7 muestra la salida del puesto serie generada por este código.

```
/* Instituto de Geociencias
  UNAM Campus Juriquilla
  Ejemplo de programación de un sensor de temperatura y presión barométrica
  Modelo BMP280
  Utilizando una placa de desarrollo ESP32 Groover Kit
  y una alimentación vía USB de 5 V
   El código usado se modificó del incluido de manera nativa en Arduino IDE 2.3.2
*/

#include <Wire.h>. /* Declaracion de librerías*/
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_BMP280.h> // Esta librería es la que controla el Sensor BMP280

Adafruit_BMP280 bmp; // use I2C interface
Adafruit_Sensor *bmp_temp = bmp.getTemperatureSensor(); // Declaración de variables
Adafruit_Sensor *bmp_pressure = bmp.getPressureSensor();

/*configuración de variables y conexiones al puerto serie*/

void setup() {
 Serial.begin(9600);
 while ( !Serial ) delay(100);   // se activa la conexión al puerto USB
 Serial.println(F("BMP280 Sensor event test"));

 unsigned status;
 status = bmp.begin(BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID);
 status = bmp.begin(0x76);
 if (!status) {  /* Aquí se valida que el sensor funcione correctamente */
     Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring or "
                      "try a different address!"));
  Serial.print("SensorID was: 0x"); Serial.println(bmp.sensorID(),16);
```

```
  Serial.print("       ID of 0xFF probably means a bad address, a BMP
180 or BMP 085\n");
  Serial.print("   ID of 0x56-0x58 represents a BMP 280,\n");
  Serial.print("       ID of 0x60 represents a BME 280.\n");
  Serial.print("       ID of 0x61 represents a BME 680.\n");
  while (1) delay(10);
 }

/* Aquí se activa el muestreo de la temperatura y presión en el
sensor BMP280 */

 bmp.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
             Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
             Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
             Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
             Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_500);

 bmp_temp->printSensorDetails();
}
/*Aquí comienza la etapa cíclica del programa */
void loop() {
 sensors_event_t temp_event, pressure_event;
 bmp_temp->getEvent(&temp_event);
 bmp_pressure->getEvent(&pressure_event);
  /* Aquí se imprimen en el monitor serie los datos obtenidos por
el sensor */
 Serial.println("Instituto de Geociencias");
 Serial.println("UNAM Campus Juriquilla");
 Serial.println("Sensores de bajo costo");
 Serial.print(F("Temperatura = "));
 Serial.print(temp_event.temperature);
 Serial.println(" °C");

 Serial.print(F("Presión Barométrica = "));
 Serial.print(pressure_event.pressure);
 Serial.println(" hPa");

 Serial.println();
  delay(20000); /* Aquí se puede ajustar el tiempo de espera para
la siguiente lectura. Actualmente está dispuesto para esperar 20
segundos */
} /* Fin del programa */
```

Código 1. Con este código el dispositivo mostrará dos valores: temperatura (°C) y presión barométrica (hPa). Se puede modificar el código para regular el tiempo de espera entre la toma de datos, que puede ir desde cada segundo hasta minutos, días, horas, etc. (se puede copiar y pegar directo en el IDE). Está configurado para un tiempo de espera de 20 segundos. El código se modificó del incluido en el IDE de Arduino 1.8.19 (https://www.arduino.cc/en/software).

Paso 3: Almacenamiento y visualización de los datos

Un aspecto clave en cualquier sistema de monitoreo es la capacidad de almacenar o visualizar los datos recolectados. Gracias a las capacidades del ESP32, es posible enviar los datos a la nube utilizando su conectividad Wifi. Existen varias plataformas que permiten almacenar y visualizar los datos en tiempo real en un servidor web o un dispositivo móvil; o bien guardarlos de manera local en una tarjeta SD. Hay diferentes alternativas de código para estos fines, los cuales pueden encontrarse fácilmente en internet.

- **Envío a un servidor.** Los datos obtenidos pueden ser enviados a otros dispositivos por enlaces mediante la red (http) o vía bluetooth, con lo que se puede hacer monitoreo de manera remota.
- **Almacenamiento local.** Alternativamente, los datos se pueden guardar en una tarjeta microSD conectada al ESP32 para ser descargados posteriormente. Esta opción es ideal para proyectos de campo donde no hay acceso a internet.

Personalización del sistema

El sistema básico descrito se puede adaptar fácilmente para trabajar con diferentes tipos de sensores.

- **Estaciones de monitoreo ambiental.** Agregando sensores de calidad del aire y humedad, entre otros, es posible construir una estación completa (Figura 2).
- **Estudios geofísicos.** Al integrar sensores de vibración, inclinación, desplazamiento, entre otros, se podrían realizar estudios sísmicos de baja escala y subsidencia, entre otros.
- **Medición de ruido ambiental.** Al sistema se pueden adaptar micrófonos para detectar los cambios en el ruido generado en entornos urbanos. Esto se puede calibrar para ver la intensidad del ruido en decibeles y ayudar a prevenir daños a la salud generados por el ruido excesivo.

Los códigos base para el funcionamiento de cada sensor están disponibles usualmente en los sitios web del fabricante, pero también existen muchos códigos disponibles de forma gratuita en la red.

Los sistemas descritos con diferentes sensores pueden combinarse muy bien con diseños e impresiones en 3D para la fabricación de gabinetes, soportes y piezas útiles para el funcionamiento (Figura 2).

Aplicación práctica: detección de tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son eventos causados por la actividad solar. El Sol emite constantemente un flujo de partículas y un campo magnético hacia el espacio, este flujo recibe el nombre de viento solar.

Cuando ocurre un evento eruptivo en la superficie del Sol se expulsa una gran cantidad de material mayor al flujo normal del viento solar: en algunas ocasiones esta ola de partículas se mueve en dirección a la Tierra. El CMT actúa como una barrera para el viento solar. Si la ola de partículas debida a una erupción solar cumple con las condiciones adecuadas, ocurre una tormenta geomagnética, que es cuando las partículas del viento solar logran entrar a la atmósfera. Para que ocurra la tormenta, el viento solar debe tener cierta densidad y velocidad para lograr traspasar la magnetósfera. La orientación del campo magnético es la variable más importante.

El primer indicador de que ocurre una tormenta es el flujo visible de partículas en la atmósfera, pero esto suele ser solo visible en latitudes cercanas a los polos, las llamadas auroras boreales y australes (Akasofu, 1981). El efecto global de una tormenta es el descenso en la intensidad del campo magnético terrestre. Para cuantificar una tormenta se utiliza el índice DST (del inglés, Disturbance Storm Time) que se obtiene promediando el valor de diferentes estaciones que monitorean el campo magnético en diferentes puntos del planeta (Ahn *et al.*, 2002; Cerrato *et al.*, 2004). La tormenta se puede observar como un descenso drástico en la intensidad del campo magnético para luego regresar a la normalidad un par de días después. Conocer los

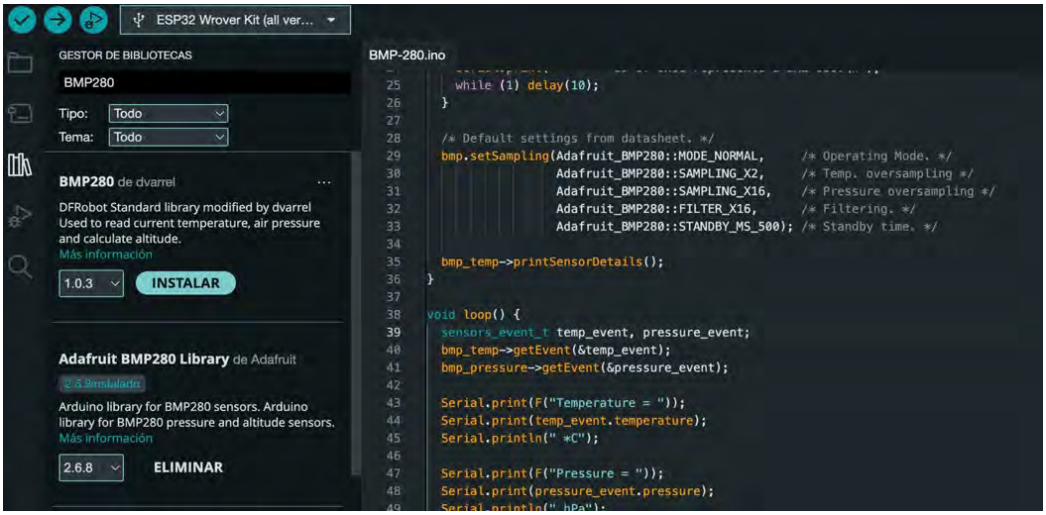


Figura 6. Ejemplo de búsqueda de librerías en el IDE de Arduino.

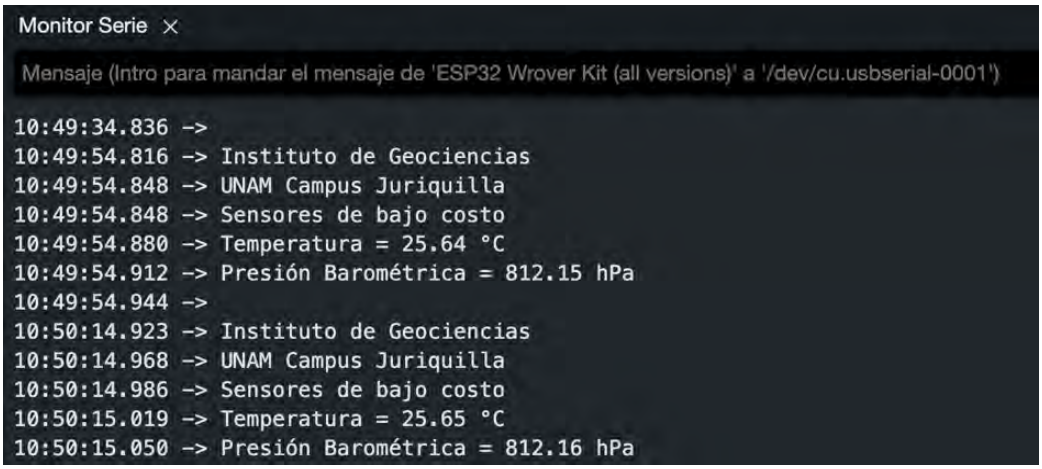


Figura 7. Salida de datos en el monitor serie luego de la conexión del sensor BMP280.

efectos de las tormentas geomagnéticas permite predecir y remediar posibles afectaciones a las telecomunicaciones y al suministro de energía eléctrica.

El día 9 de mayo de 2024, el satélite de la NASA GOES-16 detectó una serie de erupciones solares y en particular una que se observaba como una zona brillante. Este evento llegó a la Tierra el día 10, provocando auroras visibles en lugares cercanos a los polos como Canadá o Australia, también en países como Estados Unidos y Alemania, e incluso algunos medios reportaron auroras en México (Lazzús y Salfate, 2024).

Revisando los datos de las estaciones EMGA en la ciudad de Querétaro, se logró registrar el descenso en el campo magnético durante los días de la tormenta: comparado con días anteriores, el campo magnético para la zona de Querétaro disminuyó entre 5% y 10%. La Figura 8 muestra las fluctuaciones diarias del CMT. Si bien la intensidad del CMT está dada en µT, las curvas fueron normalizadas para poder mostrar la misma escala.

En la Figura 8 se observa el registro de cuatro estaciones con sensor de campo magnético en diferentes puntos de la ciudad de Querétaro: cada estación se muestra con un color diferente. La serie de tiempo muestra los datos tomados por las estaciones EMGA entre el 05 y el 15 mayo de 2024. La curva azul es un modelo de la variación diurna normal del campo esperado con base en varios días de mediciones. Los días 10 y 11 de mayo se observa que la intensidad del campo no llega a los mismos valores que en los 5 días anteriores. Este descenso coincide con el momento donde ocurre la tormenta geomagnética. La curva roja de la Figura 8 muestra este descenso considerable en el DTS.

Aunque son sensores económicos son capaces de brindarnos información de estos eventos, en este caso sobre cómo cambian las condiciones del campo magnético en Querétaro y su interacción con la actividad solar, durante una tormenta geomagnética.

En este ejemplo describimos la implementación de un sistema de monitoreo del CMT en tiempo real, con lo que es posible analizar el efecto de las tormentas geomagnéticas en zonas urbanas a latitudes bajas como la ciudad de Querétaro.

Descripción del sistema

El sistema se compone de un sensor de campo magnético tipo HMC5883L, un sensor de tres ejes capaz de medir la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre y una placa de desarrollo tipo ESP32 (Figura 4). El sistema está diseñado para manejar los datos

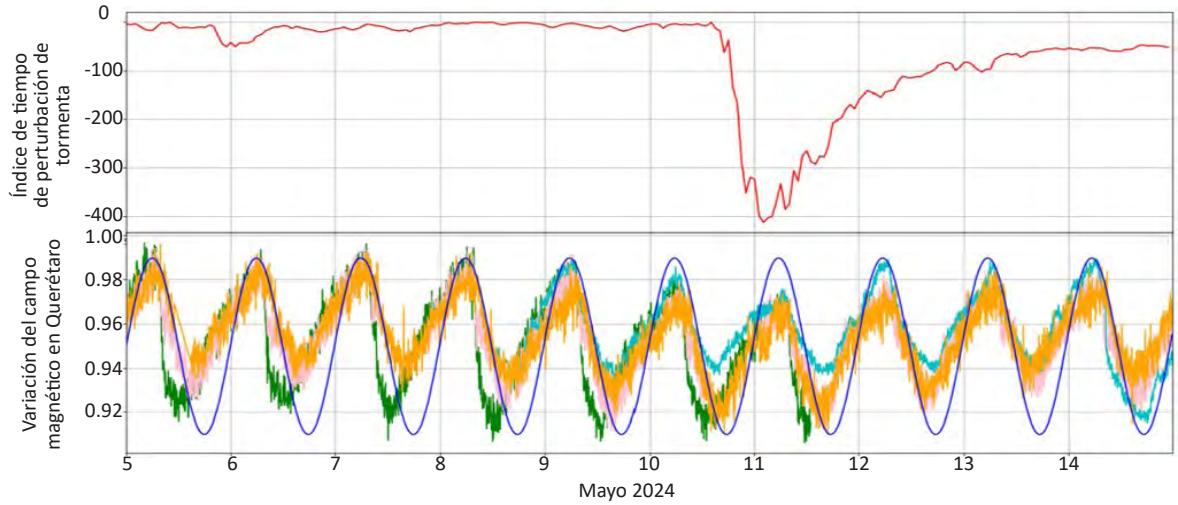


Figura 8. Serie de tiempo con datos entre el 5 y 15 de Mayo, que muestra la detección de la tormenta geomagnética en los dispositivos EMGA entre el 9 y 11 de Mayo de 2024. La curva roja (arriba) muestra el ajusto del DST que ilustra la disminución de la intensidad del CMT durante la tormenta geomagnética. Se ilustran en colores diferentes las curvas de obtenidas por casa estación (abajo).

del sensor y los transmite en tiempo real vía Wifi a una plataforma de almacenamiento, procesamiento y visualización. El ESP32 es ideal para este tipo de aplicaciones debido a su capacidad de conectividad vía inalámbrica, lo que permite que los datos sean enviados de manera automática a un servidor http o directamente a un dispositivo móvil para su análisis.

Funcionamiento

El sensor mide las componentes vectoriales del CMT (x-y-z), por lo que es necesario calcular su intensidad. Este cálculo es bastante simple: al ser un vector de tres componentes, basta con calcular su magnitud para obtener la intensidad del CMT con resultados del campo dados en microTeslas (µT). Con este dato se pueden detectar perturbaciones en el campo que puedan indicar el inicio y progreso de una tormenta geomagnética. Los datos se analizan en tiempo real, pueden ser representados gráficamente y, cuando se detectan cambios significativos en la intensidad del campo magnético, se puede generar una alerta.

Los datos obtenidos pueden ser corregidos para compararlos con índices geomagnéticos oficiales, como el índice Kp (por ejemplo Rostoker, 1972; Matzka *et al*., 2021), que mide la actividad geomagnética global, o con mediciones de observatorios magnéticos especializados (Hernández-Quintero *et al*., 2018). Si bien este sistema no tiene la precisión de equipos comerciales de amplia gama, su bajo costo y facilidad de desarrollo lo hacen ideal para proyectos educativos y para la implementación de redes de sensores distribuidos en áreas remotas.

CONCLUSIONES

El uso de plataformas de desarrollo como Raspberry Pi, Arduino y ESP32, junto con sensores de bajo costo, representa una herramienta innovadora y accesible para la investigación y monitoreo en diferentes ramas científicas, incluyendo geociencias. Estos sistemas que se caracterizan por su bajo costo, versatilidad y facilidad de integración ofrecen una alternativa viable para investigadores, estudiantes y aficionados que buscan acceder a tecnologías anteriormente limitadas, a equipos de alta precisión y elevados costos. Su capacidad para almacenar y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real, así como su integración con plataformas en la nube, los hace especialmente útiles para proyectos de monitoreo continuo y a largo plazo.

No obstante, es importante considerar que la precisión de los sensores de bajo costo puede ser limitada en comparación con los equipos profesionales. Sin embargo, su excelente relación costo-beneficio los convierte en una buena opción para estudios exploratorios o en entornos educativos. Con una correcta calibración y un uso adecuado, estos sistemas pueden proporcionar resultados relevantes y de valor científico. En el caso de estudio propuesto en este trabajo, para la detección de tormentas geomagnéticas, se emplea un ESP32 y un sensor de campo magnético terrestre. Este sistema, aunque simple, ha demostrado ser eficaz en la detección de variaciones significativas en la intensidad del campo magnético terrestre en latitudes bajas, como es el caso de la ciudad de Querétaro, donde se observa el registro de un descenso considerable en la intensidad del campo magnético terrestre debido a su interacción con la actividad solar. Lo anterior sugiere su viabilidad como herramienta para el monitoreo de estos eventos geomagnéticos.

Finalmente, el uso generalizado de estos sistemas podría tener un impacto significativo en el campo de las geociencias, al facilitar una mayor participación de la comunidad científica global y la generación de datos en regiones geográficas amplias. Esto contribuiría al avance en el entendimiento de los fenómenos naturales a través de una red de monitoreo accesible y replicable cuyos datos podrían ser compartidos y aprovechados por diversas instituciones a nivel nacional e internacional. La democratización de estas tecnologías en las ciencias de la Tierra abre nuevas posibilidades para estudios colaborativos y de amplia cobertura, lo que representa un paso importante hacia una ciencia más inclusiva y participativa.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jorge Escalante por el apoyo técnico brindado. Gracias al Laboratorio de Paleomagnetismo de Rocas del Instituto de Geociencias de la UNAM por proporcionar los materiales necesarios. Nuestro agradecimiento también a los editores y revisores, cuyas sugerencias han enriquecido este trabajo.

REFERENCIAS

Akasofu, S. I. (1981). Relationships between the AE and Dst indices during geomagnetic storms. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 86(A6), 4820-4822.

Ahn, B. H., Moon, G. H., Sun, W., Akasofu, S. I., Chen, G. X., y Park, Y. D. (2002). Universal time variation of the Dst index and the relationship between the cumulative AL and Dst indices during geomagnetic storms. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 107(A11), SMP-38.

Anthony, R. E., Ringler, A. T., Wilson, D. C., y Wolin, E. (2019). Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP Raspberry Shake 4D. Seismological Research Letters, 90(1), 219-228.

Cameron, N. (2023). ESP32 microcontroller en ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller (pp. 1-54). Berkeley, CA: Apress.

Cerrato, Y., Saiz, E., Cid, C., y Hidalgo, M. A. (2004). Geomagnetic storms: Their sources and a model to forecast the Dst index. Lecture Notes and Essays in Astrophysics, 1, 165-176.

De Plaen, R. S., Márquez-Ramírez, V. H., Pérez-Campos, X., Zuñiga Davila-Madrid, F. R., Rodríguez-Pérez, Q., Gómez González, J. M., y Capra, L. (2020). Seismic signature of the COVID-19 lockdown at the city-scale: A case study with low-cost seismometers in the city of Querétaro, Mexico. Solid Earth Discussions, 2020, 1-17.

Delgado-Castro, A., y Rojas-Bolaños, O. (2015). Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. Educación Química, 26(4), 299-306.

Hernández-Quintero, E., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R., Cervantes-Solano, M., y Cifuentes-Nava, G. (2018). Más de 100 años ininterrumpidos de registro geomagnético en México: implicaciones en la datación absoluta de algunos edificios históricos. Arqueología Iberoamericana, 39, 36-43.

Ismailov, A. S., y Jo'Rayev, Z. B. (2022). Study of Arduino microcontroller board. Science and Education, 3(3), 172-179.

Kaur, K., y Kelly, K. E. (2023). Laboratory evaluation of the Alphasense OPC-N3, and the Plantower PMS5003 and PMS6003 sensors. Journal of Aerosol Science, 171, 106181.

Lazzús, J. A., y Salfate, I. (2024). Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 261, 106304.

Maier, A., Sharp, A., y Vagapov, Y. (2017, September). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In 2017 Internet Technologies and Applications (ITA) (pp. 143-148). IEEE.

Matzka, J., Bronkalla, O., Tornow, K., Elger, K., y Stolle, C. (2021). Geomagnetic kp index. GFZ German Research Centre for Geosciences, 11.

Rani, S. U., Rajarajeswari, S., Jaimon, J. G., y Ravichandran, R. O. S. H. A. N. (2020). Real-time air quality monitoring system using MQ-135 and thingsboard. Journal of critical reviews, 7(18), 4107-4115.

Richardson, M., y Wallace, S. (2014). Getting Started with Raspberry Pi: Electronic Projects with Python, Scratch, and Linux. Maker Media, Inc.

Rodríguez-Trejo, A., Böhnel, H.N., Ibarra-Ortega, H.E., Salcedo, D., González-Guzmán, R., Castañeda-Miranda, A.G., Sánchez-Ramos, L.E. y Chaparro, M. A. E., (2024) Air quality monitoring with low-cost sensors: a record of the increase of PM2.5 during Christmas and New Year's Eve celebrations in the city of Queretaro, Mexico. Atmosphere 2024, 15, 879. https://doi.org/10.3390/atmos15080879

Rostoker, G. (1972). Geomagnetic indices. Reviews of Geophysics, 10(4), 935-950.

Manuscrito recibido: 23 de septiembre de 2024
Manuscrito corregido recibido: 8 de noviembre de 2024
Manuscrito aceptado: 3 de diciembre de 2024

AGRADECIMIENTO A LOS ÁRBITROS

La garantía de la calidad de los artículos publicados en la revista depende del trabajo altruista de especialistas que revisan los manuscritos antes de su publicación. Aquí queremos agradecer el tiempo y esfuerzo de los árbitros de los artículos publicados en los números 1 y 2 del 2024.

M. en C. Mónica G. Ramírez Calderón
Dr. Thierry Calmus
Dr. Alexis Del Pilar Martínez
M. en C. Néstor Damián Salinas Franco
Dr. Ángel F. Nieto Samaniego
M. en C. Ana Cecilia Lopera Gasca
Dr. Richard Serrano Agila
Dra. Susana A. Alaniz Álvarez
Dra. Laura Mori
Dra. Sandra Villacorta Chambi
Dr. Eduardo Aguirre Caracheo
Dr. Gilberto Silva Romo
Dr. Bernardo A. Bastien Olvera
Dr. Enrique A. González Torres
M. en C. Miguel Ángel Cruz Pérez
Dr. René Loredo Portales
Dra. Mayumy Cabrera Ramírez
Q. B. Miriam Clariza Valenzuela López
Dr. Francisco García Moctezuma
Dra. Rocío García Martínez
Dra. Cecilia Irene Caballero Miranda
Dr. Emilio Mora Van Cauwelaert
Dra. Claudia C. Mendoza Rosales
Dra. Dalila Aldana Aranda
Lic. Geol. Romina M. Celabe Gaona
Dra. Anna Paula Lima Costa
Dr. Marcelo Darío Bazan
Dra. Aída López Hernández
Dr. Juan Moisés Casas Peña
Dr. Sergio Iván Ancona Martínez
M. en L. C. Sandra Fuentes Vilchis
M. en C. Oscar Ávila Vargas