



Año 18 | Número 35 | 30 de Junio 2021 |

| Hermosillo, Sonora, México. |

# NUESTRA TIERRA

Órgano de divulgación de la Estación

Regional del Noroeste, UNAM

## CONOCIENDO A LOS HONGOS MICROSCÓPICOS

IMPORTANCIA DE LAS ABEJAS NATIVAS (HYMENOPTERA: HALICTIDAE) PARA  
LA FLORA SILVESTRE, Y EL IMPACTO DE LA PERTURBACIÓN ANTRÓPICA

LA EVOLUCIÓN DEL RELIEVE: EL ESTUDIO DE  
CÓMO SE TRANSFORMA LA SUPERFICIE TERRESTRE

VULNERABILIDAD  
ACUÍFERA

IN MEMORIAM: CÉSAR JACQUES AYALA

## EDITORIAL

**E**stimados lectores, en nombre del equipo de trabajo de esta revista, es un placer presentarles el ejemplar No. 35 de "Nuestra Tierra", publicación que es órgano de divulgación de la Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México.



En esta edición hacemos un viaje a través de algunas esferas que componen nuestro planeta Tierra. Comenzamos con la biosfera, en donde Villalba-Villalba nos invita al Reino Fungi en donde conoceremos a unos organismos únicos capaces de colonizar cualquier matriz ambiental, "los hongos microscópicos", su importancia para el hombre, su papel en los ecosistemas y su potencial biotecnológico. En seguida, Ríos-Oviedo y Cetzal-Ix nos transportan al nivel macroscópico en donde conoceremos la importancia de las abejas nativas, que en México se consideran entre los tres principales grupos con mayor riqueza en especies. En este grupo estudiaremos su rol como polinizadores, su hábitat y alimentación y cómo las actividades humanas afectan a su población. A continuación, nos movemos a la geosfera, en donde Castillo y Muñoz nos invitan a conocer cómo se transforma la superficie sólida del planeta Tierra, "el relieve terrestre", que muestra un mosaico complejo de formas. Entenderemos cómo ha sido su estudio en el contexto histórico y actual y cómo contribuye a la resolución de problemáticas actuales. Finalmente nos adentramos en la hidrosfera con Vidaña-Guillén y Archundia-Peralta, en donde, a través del entendimiento del concepto y el estudio de la vulnerabilidad acuífera, conoceremos la formación y el papel de los acuíferos para la subsistencia y el desarrollo del ser humano.

En esta edición, se incluye un obituario en honor al Dr. César Jacques Ayala, fundador de esta revista y que en sus propias palabras "se creó con la intención de acercar a los lectores al campo de las Ciencias de la Tierra con el fin de que conozcan un poco de esta casa que habitamos". El escrito es presentado por el Dr. Juan Carlos García y Barragán, quien ha desempeñado junto con el Dr. Jacques un papel fundamental en esta revista "Nuestra Tierra".

Esperando que este número sea de su agrado, me despidió en nombre del equipo de "Nuestra Tierra".

Dr. René Loredo Portales  
Editor en jefe de Nuestra Tierra

## DIRECTORIO UNAM

DR. ENRIQUE LUIS GRAUE WIECHERS  
**Rector**

DR. LEONARDO LOMELÍ VARGAS  
**Secretario General**

DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ ICAZA LONGORIA  
**Secretario Administrativo**

DR. WILLIAM HENRY LEE ALARDÍN  
**Coordinador de la Investigación Científica**

DR. RICARDO BARRAGÁN MANZO  
**Director del Instituto de Geología**

DR. THIERRY CALMUS  
**Jefe de la Estación Regional del Noroeste**

## DIRECTORIO DE NUESTRA TIERRA

No. de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2004-050610455400-102  
ISSN 1665-935X

DR. RENE LOREDO PORTALES  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM  
**Editor Responsable**

DRA. CLARA L. TINOCO OJANGUREN  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Ecología, UNAM

DRA. MA. CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA  
Depto. de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora

DRA. AURORA MARGARITA PAT ESPADAS  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM

DRA. BLANCA GONZÁLEZ MÉNDEZ  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM

DRA. DENISSE ARCHUNDIA PERALTA  
Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, UNAM

### Editores Asociados

Para recibir esta revista vía internet escribir a:  
**rloredop@geologia.unam.mx**  
Enviar contribuciones a René Loredo Portales:  
**rloredop@geologia.unam.mx**

## CONTENIDO

- 2 EDITORIAL

---

- 3 CONOCIENDO A LOS HONGOS MICROSCÓPICOS

---

- 6 IMPORTANCIA DE LAS ABEJAS NATIVAS (HYMENOPTERA: HALICTIDAE) PARA LA FLORA SILVESTRE, Y EL IMPACTO DE LA PERTURBACIÓN ANTRÓPICA

---

- 8 LA EVOLUCIÓN DEL RELIEVE: EL ESTUDIO DE CÓMO SE TRANSFORMA LA SUPERFICIE TERRESTRE

---

- 11 VULNERABILIDAD ACUÍFERA

---

- 16 IN MEMORIAM: DR. CÉSAR JAQUES AYALA

Fotografía de portada y contraportada: Hongos microscópicos del género *Aspergillus* aislados de una muestra de suelo. Autora: Ana Gloria Villalba Villalba.

**Nuestra Tierra**, Año 18, No. 35 (junio de 2021), es una publicación semestral del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México. Estación Regional del Noroeste, av. Luis Donaldo Colosio s/n y Madrid, campus UniSon, Hermosillo, Sonora, C. P. 83000. Editor responsable: René Loredo Portales. Número del Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del Título: 04-2004- 050610455400-102. ISSN 1665-935X. Número del Certificado de Licitud de Título y Contenido: en trámite. Diseño: Alejandra Bárcenas Martínez. Impresión: LABOPRINTEC DIGITAL SA DE CV. Tiraje: 250 ejemplares, impresión Offset con papel couché cover de 300 g para forros y couché text de 150 g para los interiores. El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja necesariamente el punto de vista de los editores asociados ni del editor en jefe. Se autoriza la reproducción de los artículos (no así de las imágenes) con la condición de citar la fuente y se respeten los derechos de autor.

# CONOCIENDO A LOS HONGOS MICROSCÓPICOS

**Ana Gloria Villalba Villalba<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>\*CONACYT-Universidad de Sonora, Departamento de Física, Laboratorio de Biofísica Celular

\*anagloria.villalba@unison.mx

## El Reino Fungi

Los hongos son organismos únicos debido a sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas; son ubicuos, es decir capaces de colonizar todas las matrices (suelo, agua, aire) en las que desempeñan un papel clave en el mantenimiento del equilibrio de los ecosistemas. El medio acuático, tanto marino como de agua dulce, también está constantemente colonizado por hongos; sin embargo, el hábitat principal de estos organismos es el suelo. Los hongos se encuentran en una variedad de nichos ecológicos, desde la tundra ártica hasta las dunas de arena del desierto.

El tremendo éxito evolutivo de este heterogéneo grupo de organismos se evidencia en el elevado número de especies, la diversidad de nichos y hábitats ocupados, la capacidad de establecer simbiosis (tanto mutualista como antagónica) con otros organismos y en que sobreviven en condiciones restrictivas para la mayoría de los demás organismos. En términos de biodiversidad, los hongos son probablemente el segundo grupo de organismos más común en nuestro planeta, con un estimado de ¡¡¡¡5.1 millones de especies!!!! (Blackwell, 2011) solo superados por los artrópodos. Sin embargo, esta enorme biodiversidad todavía está en gran parte inexplorada, ya que las especies descritas actualmente son apenas unas 100, 000 (Anastasi *et al.*, 2013).

Todos los hongos son heterótrofos y obtienen la sustancia orgánica necesaria para su crecimiento a través de tres procesos diferentes: saprofitismo, parasitismo (simbiosis patosística) y simbiosis mutualista. Los hongos saprotróficos juegan un papel clave en la descomposición de la materia orgánica y, por tanto, en la circulación de los elementos, tanto en ambientes naturales como antrópicos (Fig. 1). Sin embargo, muchos otros hongos forman asociaciones simbióticas con plantas (micorrizas, su nombre deriva de las palabras griegas, *mykes*: hongo y *rhizos*: raíz), algas, animales y procariotas. Además, los hongos se encuentran entre los patógenos vegetales más importantes y pueden ser parásitos de los animales, incluidos los humanos.

## Hongos microscópicos

Dentro del Reino Fungi, más del 60% de las especies son microscópicas. Lo que determina que un hongo sea macro o microscópico es el tamaño de sus cuerpos fructíferos, también conocidos como esporóforos o conidióforos (estructuras que generan las conidias o esporas, las cuales son las células reproductoras). Las especies microscópicas presentan conidióforos cuyo tamaño es menor a 1 mm, es decir se requiere un microscopio para su observación. Aunque se puede decir que todos los hongos (macro o microscópicos) poseen una parte que el ojo humano no puede captar a simple vista, se trata de la fase somática (Heredia, 2008). La fase somática se compone de una red de filamentos delgados que se distribuyen sobre o dentro de los materiales que colonizan. Los hongos realizan sus funciones de alimentación, respiración y excreción a través de la fase somática.

Se considera que el nivel de conocimiento sobre los hongos microscópicos es significativamente menor en comparación con los hongos macroscópicos. Lo anterior puede relacionarse con el hecho de que los hongos microscópicos, también llamados micromicetos, suelen pasar desapercibidos ante nuestros ojos, mientras que la morfología vistosa de los macromicetos ha llamado la atención de científicos por cientos de años. Debido a la condición encriptada de los micromicetos, se requiere de técnicas más elaboradas para su detección y estudio. Por lo anterior, la evolución en el conocimiento de los hongos microscópicos está relacionada con los avances tecnológicos en microbiología y otras ciencias que le han permitido al hombre asomarse al maravilloso mundo fúngico microscópico.

## ¿Qué forma tienen los hongos microscópicos?

Como se mencionaba anteriormente, los hongos microscópicos presentan una fase somática o cuerpo adaptado para la exploración y explotación de los sustratos que colonizan para alimentarse y reproducirse. En los hongos microscópicos se pueden encontrar dos tipos de cuerpos: los unicelulares o levaduriformes y los multicelulares o filamentosos. En el primero se clasifican las



Figura 1. Hongo microscópico saprobio creciendo sobre naranjas (Fotografía de la autora).

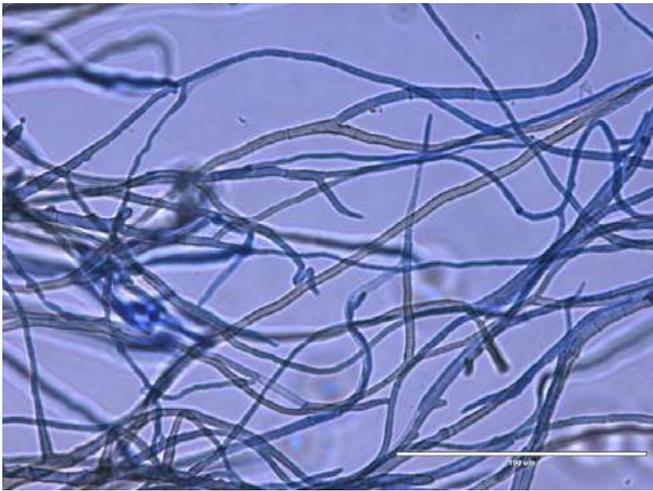


Figura 2. Hifas entrecruzadas de un hongo microscópico. Barra de escala: 100 µm. Microscopía óptica. (Imagen tomada por la autora.)

levaduras, las cuales son esféricas, ovaladas, cuyo diámetro varía entre 3 y 15 µm dependiendo de la especie (Heredia, 2008). Mientras que los micromicetos filamentosos, conocidos también como mohos, están compuestos por un tipo de células llamadas hifas, las cuales al ramificarse forman el micelio (red entrecruzada de hifas, Fig. 2). Las hifas se generan a partir de diferentes fuentes como otras hifas, conidias o estructuras de resistencia (esclerocios). Estas estructuras son dispersadas por acción del viento, lluvia, insectos u otros animales, y cuando llegan a algún sustrato, cualquier material orgánico vivo o muerto, y si las condiciones ambientales de temperatura y humedad son las adecuadas, se ramifican hasta formar el micelio. Además, las estructuras microscópicas (Fig. 3) de este grupo de hongos son tan únicas que parecen obras de arte!!! Pero recordemos que solo las podemos ver en el microscopio.

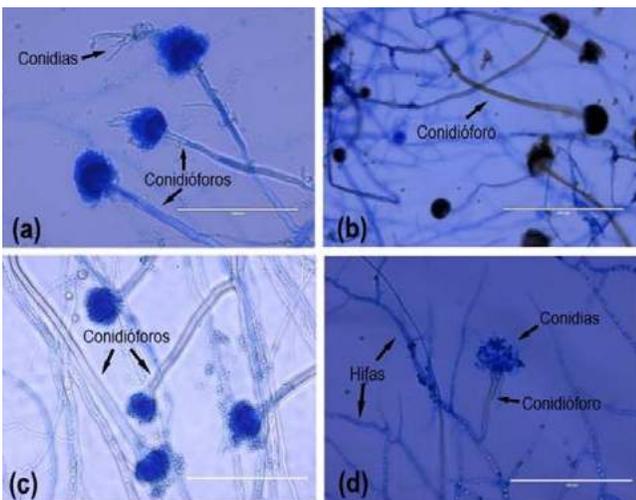


Figura 3. Estructuras microscópicas de micromicetos. (a-c) conidias y conidióforos; (d) hifas, conidias y conidióforos. Barras de escala: (a) 100 µm, (b) 200 µm, (c) 100 µm, (d) 50 µm. Microscopía óptica. (Imágenes tomadas por la autora.)

### Importancia ecológica de los hongos microscópicos

Prácticamente de forma imperceptible los hongos microscópicos desempeñan un papel primordial en la naturaleza. En la Tabla 1 se resumen las funciones que juegan este tipo de hongos en los ecosistemas.

**Eliminación y descomposición de materia orgánica.**

**Mineralización de N, P, K, S y otros iones.**

**Retención de nutrientes por inmovilización.**

**Reducción de la lixiviación de los nutrientes.**

**Acumulación de sustancias tóxicas.**

**Facilitación del flujo de nutrientes y agua entre las plantas.**

**Regulación del agua y movimiento de iones a través de las plantas.**

**Incremento de la supervivencia de las plántulas.**

**Protección de las raíces de las plantas contra patógenos.**

**Regulación de las poblaciones de artrópodos y nemátodos.**

**Modificación de las características del suelo (permeabilidad, porosidad, textura).**

**Descontaminación del suelo por volatilización, degradación y secuestro de contaminantes.**

**Fuente de alimento para la meso y macrofauna del suelo.**

**Establecimiento de simbiosis parasíticas y mutualistas con plantas y animales.**

Tabla 1. Funciones que desempeñan los hongos microscópicos en la naturaleza. Modificada de Heredia, 2008.

### Importancia de los hongos microscópicos para el hombre

Las capacidades fisiológicas de los hongos microscópicos saprobios han sido aprovechadas por el hombre desde tiempos remotos para producir alimentos y fármacos, incluso en procesos industriales. En la actualidad, en el supermercado y en nuestros hogares, contamos con diversos productos que se han obtenido empleando micromicetos, tales como pan, cervezas, vinos, alcohol, medicamentos, entre otros. También con sus enzimas se fabrican telas, papel y ciertos artículos de piel. Pero sin duda, el descubrimiento de la producción del antibiótico penicilina por un hongo microscópico ha sido uno de los que ha tenido mayor impacto en la mejora de la calidad de vida del hombre moderno. Fue en 1928 cuando Alexander Fleming descubrió que el hongo *Penicillium chrysogenum* producía la penicilina y durante la segunda guerra mundial (1939-1945) se dio su industrialización. A partir de ese momento inició la producción de antibióticos

por fermentación mediada por microorganismos. Ya para 1983 se habían reportado más de 5000 antibióticos, siendo el 23% biosintetizados por hongos. Pero no solo antibióticos tenemos gracias a los micromicetos, también se han obtenido otros fármacos de gran impacto, tales como la ciclosporina A y la lovastatina. El primero es un inmunosupresor coadyuvante en los trasplantes de órganos para evitar su rechazo y el segundo es utilizado en pacientes con hipercolesterolemia para reducir las concentraciones de colesterol y otras grasas (Heredia, 2008).

### Potencial biotecnológico

Los hongos microscópicos presentan cualidades que les confieren un altísimo potencial biotecnológico. Las especies saprobias crecen muy rápido y las sustancias

activas deseadas se producen y obtienen en poco tiempo; además de requerirse métodos relativamente sencillos como centrifugación, filtración o decantación para separar los productos de interés. En la actualidad los micromicetos se emplean como biofertilizantes, bioestimulantes y bioplaguicidas; también para el control de enfermedades de plantas. Otras posibles aplicaciones se encuentran en etapas de investigación; ejemplo de ellas es la biorremediación de suelos y aguas contaminadas; una más y de las más recientes es la biodegradación de plásticos (Fig. 4).

La versatilidad de los micromicetos permite múltiples posibilidades biotecnológicas, las cuales seguramente se incrementarán en la medida en la que se redoblen esfuerzos en la investigación científica y tecnológica entorno a este grupo de microorganismos.

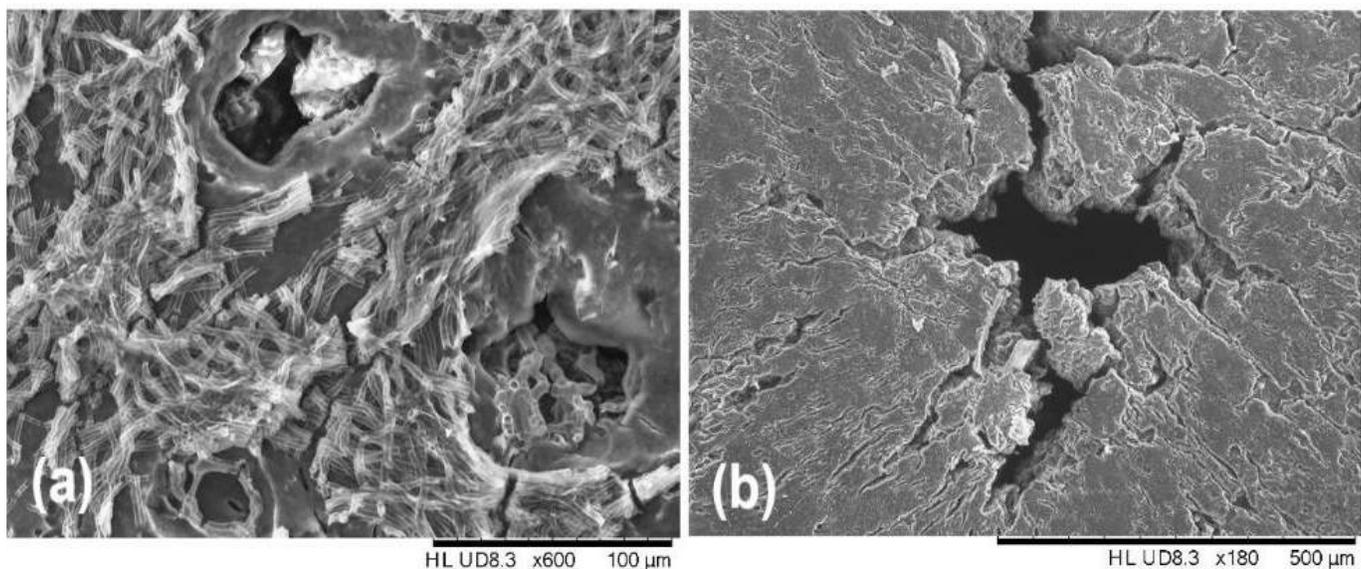


Figura 4. Micrografías del efecto de biodegradación de un hongo microscópico sobre poliuretano (PU). (a) Hifas proliferando en la superficie del PU; (b) Grieta en el PU como efecto de biodegradación. Microscopía electrónica de barrido. (Imágenes tomadas por la autora.)

### Definiciones de conceptos

**Simbiosis mutualista:** es una interacción biológica entre individuos de diferentes especies en donde ambos se benefician.

**Simbiosis antagónica:** interacción biológica negativa, algunos miembros inhiben o destruyen a otros.

**Heterótrofo:** organismo incapaz de elaborar sus propios nutrientes y los obtiene de las sustancias elaboradas por otros seres vivos.

**Saprotitismo:** dependencia de ciertos organismos para alimentarse de materia orgánica muerta o en descomposición.

**Parasitismo:** se produce cuando un organismo vive a expensas de otro al que puede perjudicar.

**Simbiosis patosística:** parasitismo.

**Nicho:** es el rango de condiciones ambientales, físicas y bióticas en las cuales una especie o una población de organismos puede vivir y perpetuarse de forma exitosa.

**Hábitat:** se refiere al lugar donde vive un organismo determinado.

### Referencias

- Anastasi, A., Tigini, V., Varese G.C., 2013, The bioremediation potential of different ecophysiological groups of fungi, en Goltapeh, E.M., Danesh, Y.R., Varma, A. (eds.), *Fungi as Bioremediators*: Berlin, Springer-Verlag, 29-50.
- Blackwell, M., 2011, The fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species?: *American Journal of Botany*, 98(3), 426-438.
- Heredia, G., 2008, Tópicos sobre diversidad, ecología y usos de los hongos microscópicos en Iberoamérica: México, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) e Instituto de Ecología, 371 pp.





Figura 3. Los morfotipos (grupo de especies con características morfológicas comunes) de los halictidos generalmente son de pigmentos metálicos brillantes (Fotografía tomada por William Cetzal-Ix.)

L. (abeja domesticada) se presenta menos eficiente en su selectividad. En la península de Yucatán, México, nuestros estudios de biología de polinización en la familia Convolvulaceae Juss. (Proyecto apoyado por FORDECYT/PRONACES/18/2020 #304952), demuestran una tasa importante de abundancia de Halictidae y preferencia en los géneros *Ipomoea* sp., y *Distimake* sp., cuyo pecoreo (conducta de recolección de polen y néctar) matutino se manifiesta desde las primeras horas del día a diferencia de otros grupos de AN hallados, esto a pesar de que las especies de Convolvulaceae, generalmente se desarrollan en espacios abiertos, con altos grados de perturbación antrópica. A pesar de ello, también se ha comprobado por observaciones directas su preferencia por representantes silvestres de

las familias Fabaceae Lindl., Asteraceae Bercht. & J. Presl, y Acanthaceae Juss. (Figura 4).



Figura 4. Representantes de los géneros *Lasioglossum* sp., y *Augochlora* sp., pecoreando en *Distimake dissectus* (Jacq.) A.R. Simões & Staples (Convolvulaceae) en la Península de Yucatán, México (Fotografía tomada por Ángel J. Ríos Oviedo).

### Hábitat y alimentación

Los halictidos generalmente son abejas solitarias, pero algunas especies pueden ser semisociales, con la característica de realizar nidos complejos en la superficie del

suelo (Figura 5), construyen túneles verticales y laterales, forjando celdillas de distintos materiales, como retazos foliares, detritos vegetales, arcilla, barro, resinas, etc., donde depositan el polen recolectado. Se ha documentado que algunas especies del género *Augochlora* sp., construyen sus nidos bajo cortezas podridas de troncos secos, por ello se denominan abejas carpinteras.



Figura 5. Nido superficial en forma de túnel de 4 mm de longitud. (Fotografía tomada por C. Pradera.)

Su dieta requiere esencialmente recursos florísticos para su supervivencia, los cuales incluyen principalmente néctar, polen y resinas. Incidentalmente al momento del scrapping o raspado de polen, este se adhiere al cuerpo de manera pasiva específicamente en las setas (pelos) y corbículas (Figura 6), debido a propiedades electrostáticas o a la consistencia viscosa del polen. Por otro lado, el pecoreo de estas abejas es principalmente diurno en la parte sur de México donde el clima es más cálido, ya que su actividad es susceptible a los patrones climáticos; es decir, las más adaptadas a ambientes cálidos descienden su actividad en periodos de lluvias y nortes (temporadas de frío) cuando la temperatura disminuye y la precipitación aumenta. El cambio climático juega un papel importante, puesto que cada vez es más difícil acertar con exactitud estos periodos, desfavoreciendo la apertura floral de especies botánicas y la polinización.

### Descenso de poblaciones y problemáticas en México

Se ha documentado que hay diferencias poblacionales en la composición de especies de AN de acuerdo con la variación y degradación del ecosistema en que se encuentran, por estar directamente relacionado con el pecoreo que desarrolla cada especie para obtener los recursos alimenticios y sitios de nidificación (Sosenski y Domínguez, 2018). No obstante, la degradación,

destrucción del hábitat vegetativo y actividades antrópicas en las zonas tropicales parece indicar un problema exponencial, proporcionando una clara señal de descenso y pérdida de diversidad de estas abejas.

El grave problema de la disminución de estas poblaciones no solo radica en el ámbito económico por la baja estabilidad de la producción de alimentos, también incluye graves consecuencias en la baja diversidad de especies y ausencia de transferencia de polen (polinización) en el ecosistema. Por lo que se sugiere, como prioridad, realizar más estudios sobre conservación de AN y su función en la reproducción de flora silvestre, así como evaluaciones concretas de los efectos negativos por uso de pesticidas y herbicidas. Además, es importante destacar, que gracias a la adaptable actividad de los halictidos en sitios perturbados y semiconservados, pueden cumplir con el papel para ser consideradas como una familia bioindicadora de cambios en la estructura vegetal, útiles para monitoreos en ecosistemas del Neotrópico con perturbación antrópica en agroecosistemas y monocultivos.



Figura 6. Granos polínicos de *Curcubita* sp. (Cucurbitaceae), adheridos a la región ventral, dorsal y corbículas de *Lasioglossum* sp. (Halictidae), por medio de las setas (pelos) (Fotografía tomada por Ángel J. Ríos Oviedo.)

### Referencias

Sosenski P., Domínguez C., 2018, El valor de la polinización y los riesgos que enfrenta como servicio ecosistémico: Revista Mexicana de Biodiversidad, 89, 961-970.  
 Freire R.L., Alanís G.J., Ayala R., Martínez, Q.H., Velasco C.G., 2012, Las abejas del género *Agapostemon* (Hymenoptera: Halictidae) del estado de Nuevo León, México: Revista Mexicana de Biodiversidad, 83, 63-70.  
 Reyes N.E., Meléndez R.V., Delfín H., Ayala, R., 2009, Abejas silvestres (Hymenoptera: Apoidea) como bioindicadores en el Neotrópico: Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10, 1-13.

# LA EVOLUCIÓN DEL RELIEVE: EL ESTUDIO DE CÓMO SE TRANSFORMA LA SUPERFICIE TERRESTRE

**Miguel Castillo<sup>1\*</sup> y Esperanza Muñoz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Luis Donaldo Colosio s/n, esq. con Madrid, Los Arcos, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000.

\*castillom@geologia.unam.mx

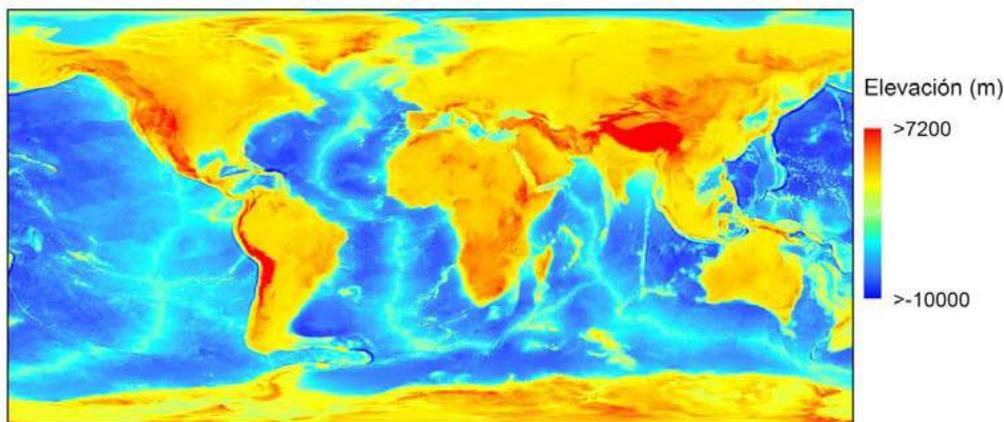


Figura 1. Mapa de elevaciones de la superficie terrestre. El relieve continental (colores cálidos) tiene superficies que van desde las planas hasta aquellas con fuertes desniveles. Las principales cadenas montañosas (color naranja a rojo) abarcan cerca del 10% de la superficie continental. Datos digitales de elevación obtenidos de ETOPO1-NOAA [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>].

## La superficie continental y la erosión

El relieve terrestre, el cual es la superficie sólida del planeta Tierra, forma un mosaico complejo de formas que van desde aquellas que tienen poca elevación y con superficies poco accidentadas, como son las planicies, hasta las zonas de mayor contraste topográfico, como las cadenas montañosas, en donde el terreno presenta desniveles abruptos, escarpes, es decir, superficies empinadas y con exposición de rocas, y valles profundos (Figura 1). Un patrón constante en el relieve continental es el producido por los ríos que se observa como ramificaciones que se unen a un tronco central, el cual corresponde al cauce principal y cuya área geográfica se denomina cuenca. Los ríos pueden conformar grandes cuencas, como es la del río Amazonas (Figura 2), o ser relativamente pequeños como suele ocurrir en los sistemas montañosos jóvenes, como es el caso en la cordillera de los Andes, en América del Sur (Figura 2).

La distribución, cantidad y dimensión de los ríos es de suma importancia a nivel terrestre, ya que es a través de ellos donde ocurre la mayor movilización de sedimentos que resultan de la erosión de los continentes y cuyo destino son los océanos. Los sistemas montañosos en los continentes son la principal fuente de sedimentos a nivel planetario, aportan cerca del 50% a pesar de que

sólo ocupan el 10% del relieve continental (Figura 1; Larsen *et al.*, 2014). Además de los ríos, los glaciares, los cuales son masas de hielo que pueden avanzar o retroceder varios metros en un año, constituyen otro medio importante de transporte de sedimento que también producen una intensa erosión en los sistemas montañosos. La acción de los glaciares está, sin embargo, limitada en el tiempo y en el espacio, ya que su avance y rango de operación dependen de

diversos factores como son: (1) la latitud, su desarrollo es principalmente en la región polar y disminuye hacia los trópicos; (2) la altitud, cuando es alta se da la congelación y acumulación de nieve por largos periodos que mantienen una masa glacial y (3) las condiciones climáticas a nivel global, las cuales están controladas por los cambios en la órbita terrestre en intervalos de miles de años y conocidos como ciclos de Milankovitch; el final del último periodo glacial tuvo lugar hace aproximadamente 15,000 años.

Los ríos, a diferencia de los glaciares, están presentes en gran parte de la superficie continental, incluso en las regiones áridas y semiáridas del planeta, también operan de forma contigua a los glaciares (Figura 3). La mayor energía producida por los distintos procesos terrestres se consume en el ciclo hidrológico (Tabla 1), en la cual se engloban tanto la acción de los ríos como la de los glaciares; ello explica en gran medida, la razón por la cual se erosionan los sistemas montañosos y es indicativo de la importancia de los ríos a nivel global.

## El estudio científico del relieve terrestre

La rama de la ciencia que investiga cómo y cuánto cambia la superficie terrestre como resultado de los procesos que la modelan es la Geomorfología. Los procesos modeladores son los fluviales (acción de los ríos), glaciales (acción del desplazamiento de las masas de hielo), gravitacionales

Fuente	Consumo de energía (watts)	Proceso
Ciclo hidrológico	$4 \times 10^{16}$	Procesos fluviales y glaciales
Energía eólica	$7 \times 10^{14}$	Procesos eólicos
Oleajes y corrientes marinas	$5 \times 10^{12}$	Procesos litorales
Calor geotérmico	$11 \times 10^{12}$	Sismicidad y volcanismo

Tabla 1. Consumo de energía en la Tierra por distintos procesos. La mayor energía se consume por el ciclo hidrológico que deriva en la acción ejercida por los ríos y glaciares. Datos tomados de Summerfield (1991).

(movilización de grandes volúmenes de roca y/o sedimento), litorales (efecto del oleaje y las mareas), eólicos (acción del viento) y de disolución (proceso de alteración del suelo, sedimento o roca).

Los procesos fluviales, por su amplia distribución y presencia en gran parte de los dominios climáticos, fueron los primeros en ser tratados por los filósofos griegos como Herodoto, Aristóteles, Seneca y Estrabón y más tarde por inventores como Leonardo da Vinci (s. XV y XVI), geólogos como James Hutton (s. XVIII), John Playfair (s. XVIII y XIX) y Charles Lyell (s. XVIII y XIX). A finales del siglo XIX comenzaron los estudios más detallados sobre la importancia que tienen los ríos en el modelado de la superficie terrestre. Es destacable el aporte hecho por el geólogo norteamericano Grove Karl Gilbert (1843–1918) quien introdujo la idea del concepto del equilibrio dinámico, la cual se explicaría más adelante, en 1880 en su trabajo intitulado “Reporte de la Geología de las Montañas Henry”, el cual es hasta la fecha, uno de los pilares en los estudios de evolución del relieve.

Más tarde, William Morris Davis (1850–1934), quien es considerado el padre de la Geomorfología, publicó el primer modelo de evolución del relieve en 1899 con el título “El ciclo geográfico”. En ese estudio Davis explica la forma en que un sistema montañoso evoluciona desde su formación (juventud), el cual se caracteriza por tener una topografía abrupta y con numerosos valles con paredes escarpadas, hasta su nivel máximo de erosión (senectud), en la que la erosión, modulada en su mayoría por la acción fluvial, produce una superficie ligeramente ondulada conocida como peniplano (Figura 4). El ciclo geográfico fue cuestionado por otros investigadores quienes elaboraron modelos, sin embargo, éstos consideran que el relieve evoluciona de forma lineal en la cual se llega a un nivel máximo de erosión que está caracterizado por relieves poco abruptos. El modelo de Davis no sólo fue útil para explicar la evolución de sistemas montañosos antiguos, como son los montes Apalaches, localizados en la porción oriental de los Estados Unidos de Norteamérica, sino que también enfatizó en la importancia que tienen los ríos en la evolución de los grandes sistemas montañosos.

La consolidación de la Teoría de la Tectónica de Placas en la Geología y la Teoría General de Sistemas en la Biología propiciaron un cambio significativo en la Geomorfología, ya que con dichas bases es posible explicar la compleja

relación que existe entre los procesos que forman y/o deforman la superficie terrestre (orogenias y volcanismo) y aquellos que la modelan (cómo es la erosión fluvial y glacial). En la evolución del relieve, fue relevante la formalidad dada al concepto del equilibrio dinámico por parte del geólogo-geomorfólogo norteamericano John T. Hack (1913–1991). El equilibrio dinámico es un estado que alcanzan las formas y, en última instancia algún sector del relieve terrestre, en donde estas cambian de forma independiente del tiempo, ya que existe un balance entre los procesos que las generan y aquellos que las erosionan. Un ejemplo es la formación de los abanicos aluviales; estos se forman en la desembocadura de un frente montañoso y corresponden con una superficie suave e inclinada que resulta de la acumulación de los sedimentos transportados por los ríos (Figura 5). El equilibrio dinámico se alcanza cuando la cantidad de sedimento que alimenta el abanico es la misma que se pierde por la erosión (Figura 5), de tal forma que esta condición se mantiene siempre y cuando no haya un cambio brusco en la actividad tectónica, volcánica o climática.

### La evolución del relieve en su contexto actual

La evolución del relieve es el estudio cuantitativo de una determinada porción de la superficie terrestre en la cual se busca comprender cómo ha llegado ésta a su condición actual desde un estado previo. Para ello es necesario precisar si existe un equilibrio dinámico o no y detectar si hay una influencia por los procesos tectónicos, volcánicos o climáticos. Los científicos utilizan para este fin el fechado de edad de formas, rocas y sedimentos, para con ello, poder estimar el/los cambio(s) en la sedimentación y erosión para un cierto periodo.



Figura 2. Mapa de elevaciones del sector central y septentrional de América del Sur\*. Datos digitales de elevación tomados de ETOPO1-NOAA [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/].

\*La cuenca del Río Amazonas está compuesta por una gran cantidad de afluentes, los cuales pueden observarse en la figura por la intensidad de los colores verdes, y es una de las más grandes del planeta. En el sector occidental de la cordillera de los Andes, los ríos son de una dimensión menor (ramificaciones en color café), no obstante, erosionan una de las principales cadenas montañosas de la Tierra.



Figura 3. Fotografía de un glaciar en los Alpes franceses. En la imagen puede apreciarse que la escorrentía (ríos sobre el lado izquierdo) operan de contiguas a la zona terminal de un glaciar (Fotografía tomada por M. Castillo). Datos tomados de Summerfield (1991).

Para el estudio de las cadenas montañosas, la escala temporal es del orden de millones de años, ya que el tiempo para modificar estas grandes superficies es prolongado. Por el contrario, las formas de una dimensión menor, como son los abanicos aluviales, tienen cambios en el orden de la decena a unidad de miles de años. Para el caso de la erosión producida en los suelos, la escala temporal se reduce al orden de decenios a unidad de años. En la actualidad la mayoría de los estudios de evolución del relieve están centrados en conocer los cambios en sistemas montañosos jóvenes que resultan de la actividad tectónica que producen deformación, levantamiento, actividad de fallas geológicas y formación de éstas.

Los ríos son un tema central en los estudios de evolución del relieve ya que presentan una respuesta instantánea (del orden de miles a decenas de miles de años) ante la actividad tectónica, incrementan la erosión y son la condición de cambio en la topografía de los valles y laderas que conforman el sistema montañoso. Durante el lapso en que transcurre la respuesta, el relieve se encuentra en un estado que se denomina transitoriedad, es decir, que hay desequilibrio. Otras investigaciones estudian los abanicos aluviales; estas formas acumulativas al ser producto de la erosión de las montañas contienen información sobre las condiciones climáticas que las generaron, por lo tanto, permiten detectar cambios climáticos pasados, así como aquellos asociados a la actividad tectónica.

Los estudios de la evolución del relieve son de transcendencia en las Ciencias de la Tierra para conocer cómo se transforma la superficie terrestre. Por la amplitud de las escalas temporales sus implicaciones, van más allá de los estudios regionales y tienen aplicación a problemas concretos que afectan las actividades humanas como son la pérdida de suelo, la formación de cárcavas, la desertización, la erosión en costas, por citar algunos ejemplos. Para ello, es necesario conocer si el proceso a estudiar está o no en una condición de equilibrio. En México es menester que las nuevas generaciones se interesen por estas investigaciones ya que, además de que aportan conocimiento para la solución de problemas nacionales como es la estimación de la recurrencia de inundaciones en las planicies costeras y zonas de montaña a consecuencia de intensas precipitaciones o la degradación de suelos en zonas tropicales, áridas y semiáridas como resultado de la erosión, formación de barrancos, entre otros ejemplos, son un campo de estudio fascinante de la Geomorfología, en el cual se investiga sobre la razón de cambio del relieve.



Figura 5. En la parte superior se presenta una imagen de satélite (Landsat/Copernicus) obtenida de GoogleEarth® y proyectada en 3D de una zona con abanicos aluviales en el Valle de la Muerte, EUA. Nótese que los abanicos se encuentran incididos por canales. Los esquemas debajo de la imagen indican el caso en el que se cumple el equilibrio dinámico (1) y donde existe desequilibrio (2 y 3). Para el caso 1, los cambios son independientes del tiempo ya que existe un balance entre la sedimentación y erosión, por lo tanto, la forma no se modifica de forma sustancial.

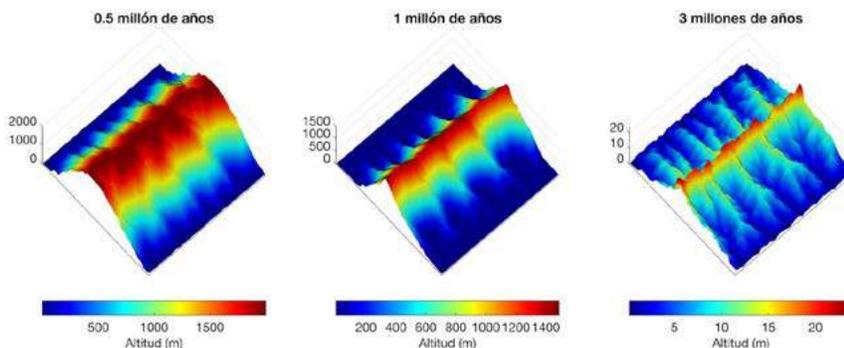


Figura 4. Simulación en computadora de un modelo de evolución basado en el propuesto por W.M. Davis en 1989. Obsérvese cómo la topografía decae con el paso del tiempo (3 millones de años). Simulación realizada con el software CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development) versión 2.3 (Tucker et al., 2001).

## Referencias

- Larsen, I.J., Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., 2014, The contributions of mountains to global denudation: *Geology*, 42, 527-530.
- Summerfield, M., 1991, *Global Geomorphology: An Introduction to the Study of Landforms*, Gran Bretaña, Pearson Prentice Hall, 537 pp.
- Tucker, G.E., Lancaster, S.T., Gasparini, N.M., Bras, R.L., 2001, *The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development (CHILD) Model* en R.S. Harmon y W.W. Doe III (eds.): *Landscape Erosion and Evolution Modeling*: EUA, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 349-388.

# VULNERABILIDAD ACUÍFERA

**Victor Vidaña-Guillén<sup>1</sup>, Denisse Archundia Peralta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra, Subsede Hermosillo, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. L. D. Colosio s/n y Madrid, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México C.P. 83000  
vdvg1994@gmail.com

<sup>2</sup>Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, CONACYT-Universidad Nacional Autónoma de México, Av. L. D. Colosio s/n y Madrid, campus UNISON, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora.

darchundia@geologia.unam.mx

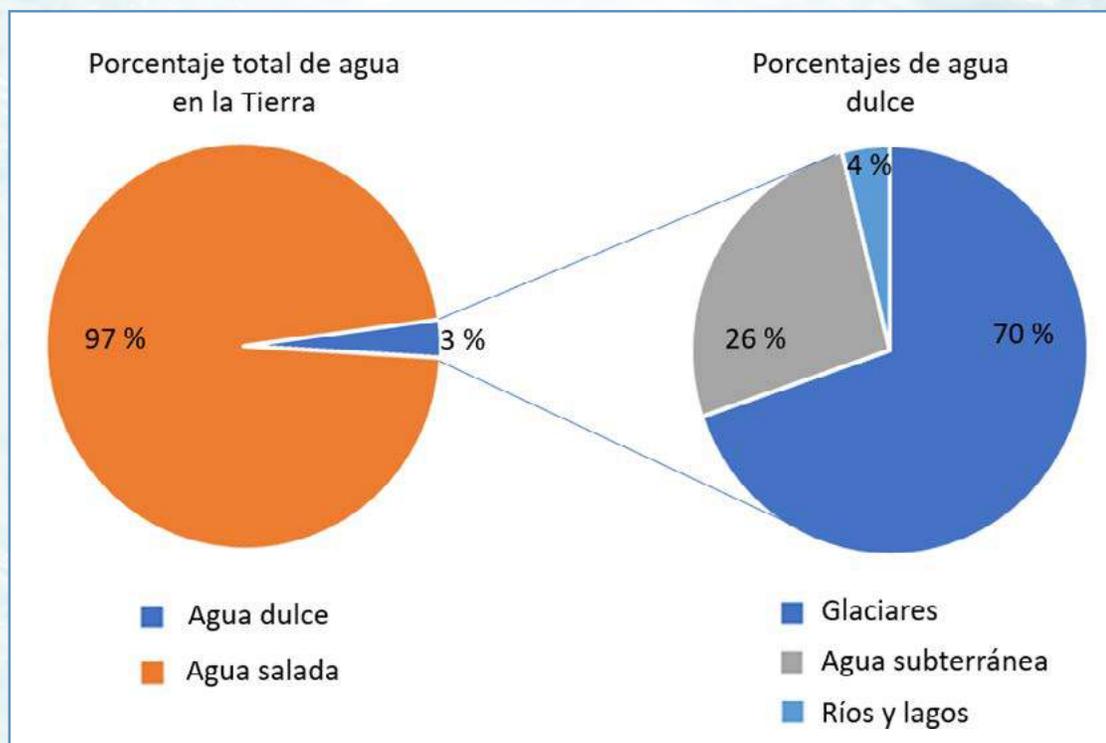


Figura 1. Estas gráficas ayudan a representar el porcentaje de agua dulce en la Tierra y la proporción que está disponible para uso humano (agua subterránea, ríos y lagos). A pesar de la gran cantidad de agua dulce en glaciares, su aprovechamiento es dificultoso debido a los costos que implicaría su obtención, traslado y procesamiento. Imagen tomada de Shiklomanov (1993).

## Acuíferos, reservorios del valioso recurso de agua subterránea

De toda el agua que existe en la Tierra solo el 3% corresponde a agua dulce. Dentro de esta solo el 30% se encuentra disponible para uso humano donde un 26% corresponde a agua subterránea y 4% a agua superficial como ríos y lagos (Fig. 1) (Shiklomanov, 1993). El agua subterránea es un recurso de suma importancia pues tiene un papel significativo en la economía, siendo la agricultura su principal consumidor, seguida por las actividades industriales, como las industrias de procesamiento de alimentos y las industrias de producción y transformación de metales (minería). A pesar de que estos campos son los que utilizan en su mayoría el agua subterránea, el ser humano también depende de este recurso pues el agua que consumimos y el agua que utilizamos en servicios sanitarios

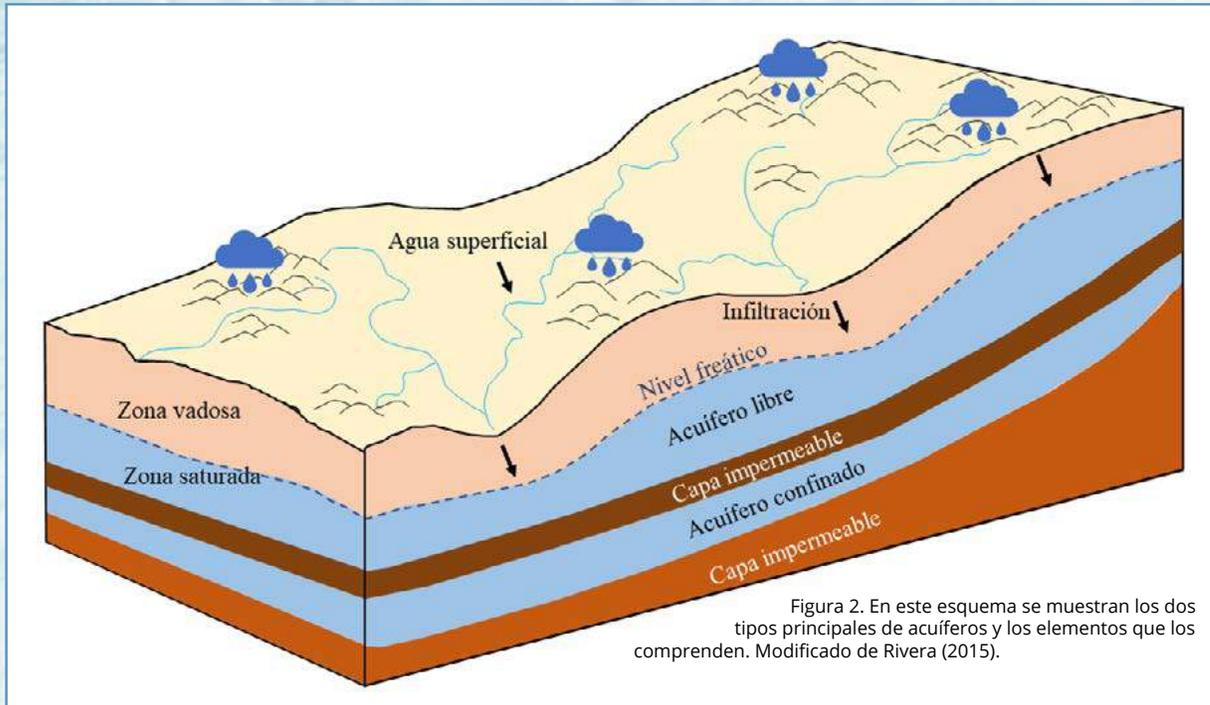


Figura 2. En este esquema se muestran los dos tipos principales de acuíferos y los elementos que los comprenden. Modificado de Rivera (2015).

en las ciudades o pueblos también provienen de los acuíferos. Por último, se debe mencionar la importancia que tiene la presencia de los acuíferos en los ecosistemas, las aguas subterráneas son el soporte principal en los ecosistemas acuáticos que existen en la superficie como es el caso de ríos, humedales, manantiales, pero también en los terrestres como los bosques, incluso en ambientes subterráneos como las cavernas. Debido a la relativa escasez de agua subterránea y a su amplia gama de funciones tanto en la sociedad como en los ecosistemas naturales, es necesario regular el uso de este recurso para evitar su agotamiento y también impedir la contaminación de acuíferos.

*De toda el agua que existe en la Tierra solo el 3% corresponde a agua dulce. Dentro de esta solo el 30% se encuentra disponible para uso humano donde un 26% corresponde a agua subterránea y 4% a agua superficial como ríos y lagos.*

### El acuífero como formación geológica

Como acabamos de ver, el agua es un elemento esencial para la subsistencia y desarrollo del ser humano, de sus sociedades y de todas las formas de vida que habitan en el planeta. Desde el punto de vista geológico, un acuífero es una formación geológica constituida por una o más capas de rocas o sedimentos las cuales tienen la propiedad de almacenar y transmitir agua. Los acuíferos se forman cuando las aguas pluviales logran infiltrarse en el subsuelo hasta llegar a una capa impermeable que impide el paso del agua; relleno de los espacios vacíos (poros o fisuras) que presentan las rocas, que son aptos para almacenar agua, a esta zona rellena de agua se le conoce como zona saturada. La zona que comprende desde la superficie del suelo hasta la zona saturada se llama zona vadosa y al límite que separa la zona saturada de la zona vadosa se le llama nivel freático. Dondequiera que estas rocas portadoras de agua transmitan agua fácilmente a pozos o manantiales, se denominan acuíferos (Fig. 2).

Los acuíferos pueden englobarse en dos tipos principales: acuíferos confinados y acuíferos libres. Los acuíferos confinados se encuentran entre dos capas impermeables, esto hace que el agua subterránea se encuentre a una presión mayor a la atmosférica, en cambio, un acuífero libre está en contacto directo, en su parte superior, con la atmósfera a través de los poros o fisuras (Fig. 1) (Harter, 2003).

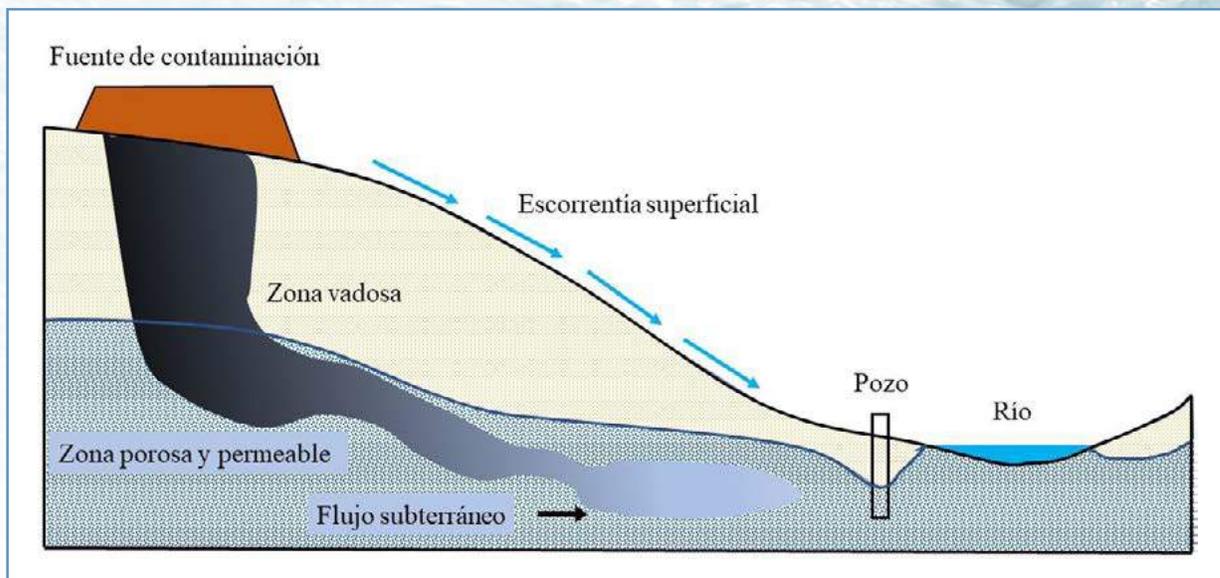


Figura 3. Modelo básico que muestra la infiltración y movilización de los contaminantes en superficie y a través de la zona vadosa y el medio subterráneo. En la zona saturada se forma una pluma de contaminante que se mueve en dirección del flujo subterráneo. La escorrentía superficial también representa una vía de contaminación de cuerpos de agua superficiales (ej. ríos). Imagen modificada de Aller *et al.* (1985).

### A pesar de ser subterráneos, los acuíferos también pueden contaminarse

La contaminación en acuíferos puede ocurrir tanto por procesos naturales como antrópicos. La contaminación natural se da cuando existe una concentración anormal de minerales preexistentes en el medio por el cual discurre el agua antes de llegar al acuífero. En cambio, la contaminación antrópica ocurre cuando agentes contaminantes generados por actividades antropogénicas son liberados al suelo o subsuelo y luego migran al acuífero. A diferencia de la contaminación de las aguas superficiales, la contaminación de las aguas subterráneas es difícil de detectar y controlar, y puede persistir durante años, décadas o incluso siglos (Aller *et al.*, 1985).

Para que se dé una contaminación acuífera se deben cumplir dos condiciones: el suelo y la zona vadosa deben ser porosos y permeables, lo cual permite la entrada y movimiento de contaminantes; debe existir una fuente grande y continua de contaminantes para que estos logren infiltrarse hasta alcanzar el acuífero. También puede darse el caso en el que el contaminante entra en contacto directo con aguas superficiales como ríos o lagos que facilitan su entrada en los acuíferos (Fig. 3) (Aller *et al.*, 1985). La contaminación de acuíferos se da especialmente en zonas con fuerte actividad industrial (ej. minería y agricultura). Por esta razón, los hidrogeólogos se han esforzado en incorporar medidas de prevención de contaminación en aguas subterráneas y también determinar la vulnerabilidad de los acuíferos, para realizar planes que mejoren la toma de decisiones en cuanto a la ubicación o tratamiento de manejo de contaminantes.

### Vulnerabilidad acuífera

Se dice que un acuífero es vulnerable cuando tiene sensibilidad a ser afectado por una carga contaminante impuesta desde la superficie terrestre. Se puede definir más concretamente como la posibilidad de filtración y difusión de contaminantes desde la superficie hacia el sistema del acuífero, lo cual representaría una reducción en la calidad del agua subterránea. Este concepto implica que un acuífero pueda tener una alta vulnerabilidad, pero no tener

riesgo de ser contaminado debido a la poca o nula presencia de una carga de contaminantes (Aller *et al.*, 1985).

La vulnerabilidad acuífera depende de la resistencia del mismo acuífero al recibir contaminantes provenientes del exterior: a menor resistencia mayor será la vulnerabilidad. Entre los factores que influyen en ella, se tiene la capacidad de atenuación natural de la carga del contaminante, la cual tiene relación con los procesos que ocurren en el suelo y en la zona vadosa. El suelo corresponde a la parte más superficial de la zona vadosa, en este se llevan a cabo procesos fisicoquímicos como la filtración, biodegradación, neutralización y adsorción de contaminantes. Debido a lo anterior, el suelo tiene el papel principal en la resistencia por su capacidad de atenuación, sobre todo si se compone de materiales de grano fino como limo y arcillas, estos elementos hacen del suelo un efectivo amortiguador que ayuda a proteger a los acuíferos. La zona vadosa también es una defensa natural del acuífero contra contaminantes debido a su potencial de atenuación, siendo este mayor con grandes espesores, mejorando las posibilidades de amortiguar o retener contaminantes, inmovilizándolos por más tiempo y exponiéndolos a un mayor contacto con el medio, es decir, adecuando procesos de atenuación en un mayor periodo de tiempo.

---

*La vulnerabilidad acuífera depende de la resistencia del mismo acuífero al recibir contaminantes provenientes del exterior: a menor resistencia mayor será la vulnerabilidad. Entre los factores que influyen en ella, se tiene la capacidad de atenuación natural de la carga del contaminante, la cual tiene relación con los procesos que ocurren en el suelo y en la zona vadosa.*

---

### **Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera**

Los métodos para evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas son utilizados ampliamente en la actualidad para prevenir la contaminación de acuíferos, ya que pueden proporcionar información valiosa para localizar áreas vulnerables y realizar planes de manejo de contaminantes o desechos de origen antropogénico.

Se han desarrollado varios métodos para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas dependiendo del tipo de acuífero o de la información que se tenga a disposición. Existen modelos de simulación, estos usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte de contaminantes en el medio subterráneo. También están los métodos estadísticos, los cuales cuantifican la vulnerabilidad determinando la relación estadística entre la contaminación observada y las condiciones ambientales y actividades relacionadas al uso del suelo que sean fuentes potenciales de contaminación. Por último, el más utilizado es la aplicación de índices paramétricos.

Estos índices corresponden a valores numéricos que expresan la relación entre parámetros hidrogeológicos y las características de estos parámetros que influyen en el incremento o decremento de la vulnerabilidad acuífera. Entre estos se tiene el Índice GOD (por sus siglas en inglés). En el índice GOD se utilizan tres parámetros: ocurrencia de agua subterránea (G), tipo general de acuífero (O) y profundidad del nivel freático (D). Otro método es el índice EPIK (por sus siglas en inglés), este índice es una metodología desarrollada para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos conformados por rocas carbonatadas, también llamados acuíferos kársticos, y utiliza cuatro parámetros: zona de karstificación o tipo de formaciones de las rocas carbonatadas como dolinas y grutas (E), depósitos de suelo y otros materiales que cubren al acuífero (P), condiciones de infiltración (I), red kárstica o características de las fisuras de las rocas carbonatadas (K).

El índice más utilizado es el índice DRASTIC, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) para evaluar el potencial de contaminación del agua subterránea. El índice DRASTIC se introdujo por primera vez por Aller *et al.* (1985), y considera siete parámetros hidrogeológicos los cuales se procesan por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar capas que sirven como base para la creación de un mapa final de vulnerabilidad (Fig. 4). Estos parámetros reflejan las condiciones naturales del medio superficial y subterráneo cuyas características pueden incrementar o disminuir la vulnerabilidad del acuífero. Algunos de los parámetros más importantes son: la profundidad del agua subterránea (D), en donde a mayor profundidad mayor será la protección del acuífero; la textura del suelo (S), que

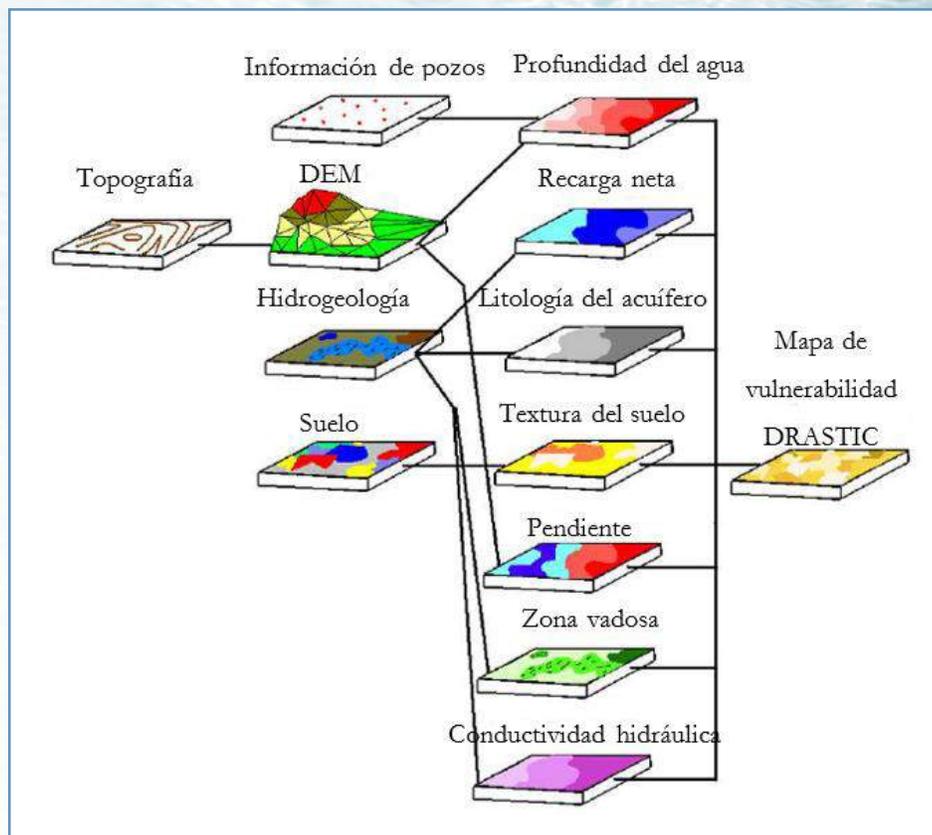


Figura 4. Descripción esquemática del índice DRASTIC. La imagen sintetiza las fuentes de información necesarias para generar las siete capas del índice. Como resultado de la interacción de estas capas se obtiene un mapa de vulnerabilidad. Imagen tomada de Agüero-Valverde & Pujol-Mesalles (2000).

representa la proporción y el tamaño de las partículas en el suelo (arenas, limos y arcillas) o la conductividad hidráulica (C), la cual se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua. A cada parámetro DRASTIC se le asigna un valor entre 1 (mínima vulnerabilidad) y 10 (máxima vulnerabilidad), cuanto mayor sea la calificación, más significativo será el potencial de contaminación. El índice de vulnerabilidad puede variar entre 23 (vulnerabilidad muy baja) a 230 (vulnerabilidad muy alta) (Aller *et al.*, 1985).

La evaluación de la vulnerabilidad acuífera es así un problema de gran importancia para las sociedades y el medio ambiente en general, por lo que la elección metodológica es crítica. A diferencia de los modelos de simulación y los métodos estadísticos, la aplicación de índices paramétricos es la metodología más utilizada. Esto debido al tipo de información requerida (la cual puede no ser exhaustiva) y a que se puede aplicar sobre áreas de gran tamaño, lo que implica un menor tiempo de trabajo y menor costo. Sin embargo, debido a que los valores aplicados a cada parámetro pueden ser subjetivos es recomendable una validación por medio del análisis de las concentraciones de contaminantes en el acuífero.

## Referencias

- Agüero-Valverde, J., & Pujol-Mesalles, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Presentado En La VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía, 20–22.
- Aller, L., Bennet, T., H. Ler, J., & J. Petty, R. (1985). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential using Hydrogeological Settings*. U.S. Environmental Protection Agency (1st ed.). Worthington: United States Environmental Protection Agency.
- Harter, T. (2003). Basic Concepts of Groundwater Hydrology. *Agriculture and Natural Resources, University of California*, 1–6.
- Rivera, A. (2015). Transboundary aquifers along the Canada – USA border : Science , policy and social issues. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, (September), 623–643. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.006>
- Shiklomanov, I. (1993). World freshwater resources. In *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press, New York.

# IN MEMORIAM

## **CÉSAR JACQUES AYALA**

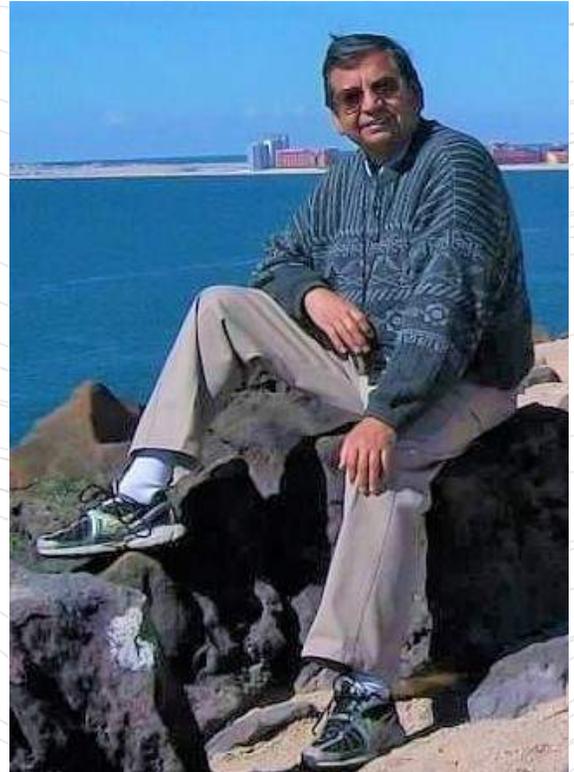
*(17 de septiembre de 1946 - 5 de mayo de 2021)\**

César nació en Monterrey, Nuevo León; los estudios de primaria y secundaria los realizó en el Colegio Internacional de esa ciudad. Egresó del Bachillerato de Ciencias Físico-Matemáticas en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Su inclinación por estudiar geología, tal vez se haya debido al ejemplo de su padre, el Ing. de Minas Jesús Jacques Guillén quien nació en Sonora y trabajó durante varios años en la mina de La Colorada, Sonora.

Obtuvo su título de Ingeniero Geólogo por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el 23 de enero de 1976 con la tesis "Estudio geológico de la mina La Reforma, Municipio de Urique, Chihuahua". Tanto su grado de maestría (1982) como el de doctorado (1993) los obtuvo en la Universidad de Cincinnati, Ohio, Estados Unidos, especializándose en estratigrafía y sedimentología bajo la dirección del Dr. Paul E. Potter.

Aunque no recuerdo con precisión el momento y el lugar donde conocí a César, seguramente compartí alguna clase con él, alrededor de 1969, en el edificio "Anexo" de Ingeniería. Un año más tarde, la cafetería de la Facultad de Ingeniería fue un lugar de encuentros frecuentes con César. Siempre almorzando o comiendo apresuradamente y leyendo, al mismo tiempo, sus libros de geología. Él fue el primero quien me enseñó el curioso comportamiento de las corrientes marinas superficiales y, cómo, por efecto del gradiente de temperaturas y densidades a profundidad, las corrientes cambiaban de dirección de flujo hasta ser perfectamente perpendiculares a la corriente original. Este es sólo un detalle de los muchos que él me platicaba en esos breves encuentros en la cafetería de la facultad, pues salía corriendo al cercano y antiguo edificio del Instituto de Geología, donde él hacía su servicio social y prácticas de geología. Se notaba su intensa pasión por la geología.

No volvimos a encontrarnos en la facultad pues nuestros horarios de cursos y trabajos ya no coincidían. No fue sino hasta una práctica del curso de Métodos Geofísicos que volví a ver a César cuando él trabajaba para la compañía de consultoría GEOCA, S.A., en Cuautla, Morelos. César ganó muchísima experiencia en el manejo de brigadas de topografía, geofísica (gravimetría) y geología, realizando transectos para PEMEX, desde Tierra Caliente en Michoacán y Guerrero, atravesando toda la Sierra Madre del Sur hasta Morelos. Entre sus experiencias más memorables fue haber vivido un terremoto cerca de Arcelia, Guerrero, dentro de uno de los campamentos móviles: él vio el piso de cemento ondularse por unos cuantos milímetros al paso de la onda sísmica, como si fuera una cuerda sacudida en sentido vertical.



César Jacques Ayala

Con toda la experiencia adquirida en esa compañía, llegó el momento en el cual decidió cambiar de aires en la geología. Se le presentaron dos oportunidades de manera simultánea: tuvo un breve paso por PEMEX en la Superintendencia de Reynosa y al mismo tiempo hubo un ofrecimiento para trabajar en el Instituto de Geología de la UNAM como investigador asociado. Él ya sabía cómo se hacía investigación cuando hizo sus prácticas profesionales en el mismo instituto, de modo que su opción fue por ésta última. César llegó al Instituto de Geología a fines de la década de 1970. Gracias a su desempeño y después de una breve estancia en la Cd. de México, se le propuso que se trasladara a la ciudad de Hermosillo, en donde acababa de fundarse (1980) la Estación Regional del Noroeste (ERNO). Ahí tendría la oportunidad de abrir la línea de investigación en estratigrafía y sedimentología de secuencias mesozoicas en el noroeste de México. Decidió aceptar el reto y se presentó en Hermosillo con el entonces M. en C. Jaime Roldán Q., responsable de la ERNO; una pequeña colección de fotografías aéreas de la región de Caborca-Altar, fue suficiente para iniciar sus investigaciones, en el límite sureste del Desierto de Altar. Nunca más abandonaría esa región, salvo por cortos períodos para hacer otras investigaciones en el norte y oriente de Sonora.

Pocos años pasaron desde su llegada a la Estación Regional del Noroeste, cuando fue obvio que no podía quedarse sólo con una licenciatura, de modo que estableció contacto epistolar (entonces no existía la "internet") con investigadores y maestros de diferentes universidades de Estados Unidos y Canadá. Su meta más ambiciosa era ser admitido en la Universidad de Columbia Británica en Vancouver, Canadá. Sin embargo, las circunstancias no fueron favorables por las exigencias de esta universidad. Es así que se alegró mucho cuando recibió contestación del Dr. Paul E. Potter de la Universidad de Cincinnati, Ohio, Estados Unidos, diciéndole que había una buena oportunidad de seguir con sus estudios de maestría y doctorado bajo su dirección y con apoyo económico parcial de esa universidad. César logró su maestría alrededor de 1984; regresó a Sonora para seguir con sus investigaciones de campo con el objetivo de que fueran su base para los estudios de doctorado. Siguió en la misma universidad, pero ahora también asociado con el Dr. Kees DeJong, quien se entusiasmó con la geología estructural y tectónica de la región de Caborca y vino varias veces a supervisar el trabajo de César. Finalmente, en 1993, obtuvo su grado de doctor con un estudio estratigráfico, sedimentológico y de procedencia de la secuencia mesozoica de la sierra El Chanate, municipio de Altar. Los resultados de sus investigaciones están plasmados en diversos artículos, presentaciones en simposios y congresos, resúmenes en extenso y capítulos de libros. Sus descubrimientos no siempre fueron aceptados por una parte de la comunidad geológica y, de hecho, fueron motivo de fuertes discusiones. Era bien conocido el carácter apacible de César que no estaba hecho para la provocación y menos para la beligerancia. Sin embargo, él se dio cuenta de que estaba rompiendo el molde tectónico aceptado por la mayoría de los geólogos familiarizados con la geología del noroeste de México; esto le traería, eventualmente, oposición académica, por decirlo de alguna manera. Su herramienta más poderosa fue seguir, estrictamente, el método científico y considerar siempre, la teoría de las hipótesis múltiples de trabajo.

César tuvo que encontrar la forma de presentar sus propuestas de investigación de modo que no afectaran la corriente geológica tradicional, pero con una perspectiva alternativa más interesante. Fue así como tuvo éxito en su última propuesta (2010) para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y, entonces, pudo refinar sus estudios estratigráficos con geología isotópica y geoquímica. Con la ayuda de varios colegas mexicanos y norteamericanos, al fin, pudo demostrar la verdadera edad de secuencias jurásicas y cretácicas en los alrededores de Altar, sentando las bases de una estratigrafía sólida que obligaban a una revisión cuidadosa de la estratigrafía y tectónica de la región de Caborca-Altar. Lo que alcanzó a vislumbrar César, era, definitivamente, excitante y rompía con el modelo geológico aceptado desde hacía ya 47 años para el noroeste de México.

Por otro lado, y gracias a la experiencia de César en temas de geofísica, él fue una parte esencial del proyecto para establecer la Red Sismológica del Noroeste. Esta fue una idea original propuesta y llevada a cabo por el Dr. Max Suter y financiada por el CONACYT. César participó activamente en la implementación, desarrollo y colecta de datos en campo de la red, a lo largo de, aproximadamente, 6 años, período que duró este proyecto. Hasta este momento no se conocen las razones científicas por las cuales, la dirección en México, decidió cancelar esta red sismológica. A pesar de la corta duración de esta red, se produjeron artículos científicos, presentaciones en simposios e innumerables pláticas de divulgación. Uno de los motivos para establecer esta red fue el terremoto del 3 de mayo de 1887, en el valle de Pitáycachi, extremo noreste de Sonora, con una intensidad estimada (no medida, pues se carecía de instrumentos en esa época) de 8.1 en la escala de Richter. La importancia de este proyecto residía en la ausencia de acelerógrafos en territorio sonorense que pudieran dar una idea de la actividad sísmica de la región. Así, se perdió una importante fuente de información, tanto para el conocimiento del comportamiento sísmico como para intentar descifrar la estructura de la corteza superior de la región.

Otra de las inquietudes de César fue la divulgación de las ciencias; le tomó varios años madurar su idea, pero al fin editó y publicó la revista "Nuestra Tierra" en la primavera de 2004. En las propias palabras de César, el objetivo de esta revista es "...acercar a los lectores al campo de las Ciencias de la Tierra con el fin de que conozcan un poco de esta casa que habitamos.....para respetarla y cuidarla". César siempre se preocupó por la pobre educación e información que se le proporciona al ciudadano común acerca del planeta que habitamos. De hecho, este es el motivo principal del título de la revista. A 17 años del inicio de esta publicación, vemos que el esfuerzo de César no sólo ha fructificado, sino que se ha acrecentado y enriquecido.

También, es justo mencionar que César llegó a ser jefe de la ERNO (1986-1989) y, como tal, organizó simposios, cursos extracurriculares, excursiones de campo y, de manera importante, inició el establecimiento más formal, de relaciones académicas con varias universidades extranjeras. Un dato curioso que ahora parecería insignificante, es que, durante su jefatura, se tuvo la primera y única computadora de escritorio para todos los académicos de la ERNO; esto sucedió en 1987.

Otro aspecto importante de su carrera académica fue dar clases, tanto en el Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM como en la licenciatura de Geociencias en el Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, ahora Universidad Estatal de Sonora. En esta institución pasó un año sabático (2002), teniendo un fructífero contacto con estudiantes de geociencias. Su carácter afable, lo hizo un maestro popular que lo llevó a dirigir varias tesis y formar parte de diversos comités académicos.

Podríamos platicar muchas anécdotas y aventuras. Sin embargo, el espacio es poco. Baste decir que recordaremos su carácter pacífico, su profundidad en el conocimiento geológico, en especial la geología sedimentaria, su amor por la fotografía, la música clásica ligera, Les Luthiers y la literatura universal. Y, por qué no, mencionar su desmemoria legendaria y habitual que algunas veces creó situaciones, desde un poco serias hasta cómicas. Con todas sus virtudes y todos sus defectos, César siempre fue un buen compañero en la aventura geológica y en la vida, que siempre correspondió con afecto y afabilidad; desde ya extrañamos a César. Descanse en paz nuestro buen amigo.

***\*Datos biográficos proporcionados, gentilmente,  
por Ángeles Cuevas y Ángela y César Jacques Cuevas.***

**Juan Carlos García y Barragán**

**“NUESTRA TIERRA”****Revista de divulgación de Ciencias Naturales**

“Nuestra Tierra” es una publicación semestral de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la cooperación del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora; es un medio de difusión de Ciencias Naturales como son las Ciencias de la Tierra y las Biológicas, aunque puede cubrir otras áreas del conocimiento científico. Su objetivo es dar a conocer, de manera sencilla, artículos y/o reportajes sobre investigaciones realizadas en los campos antes mencionados, tanto en México como en otras partes del mundo, así como temas de interés general relacionados con nuestro planeta y el universo. Se sugiere que los autores de las contribuciones sean especialistas o conocedores del tema. No se aceptan, en cambio, artículos de investigación ni informes de trabajo. Esta revista está dirigida no sólo a personas con estudios universitarios, sino también a estudiantes de nivel medio superior. Por esta razón, se pide a los autores que utilicen un lenguaje ágil, claro y sencillo, aunque sin que sea coloquial, limitando los términos especializados, los cuales deben de ir seguidos de una definición corta y clara, ya sea entre paréntesis o comillas, como nota al pie de página o como un cuadro resaltado dentro del texto. Las abreviaturas o acrónimos deben de evitarse hasta donde sea posible, a menos que sean de uso y conocimiento común.

**NORMAS EDITORIALES****Texto**

Los artículos deberán estar escritos en español, en “Word”, con letra Times New Roman, 11 puntos, normal, a doble espacio y con márgenes de 2.5 cm. Se recomienda dividir el texto con subtítulos en negritas. Los trabajos deberán enviarse en formato de archivo DOC o RTF (Rich Text Format) con el mínimo de formato posible. El nombre del archivo deberá contener las palabras clave del título, o el tema del mismo.

**Imágenes, fotografías, cuadros y figuras**

Las imágenes, fotografías cuadros y figuras deben presentarse como archivos independientes, enlistarse en hojas separadas y deben ser numerados en el orden de aparición en el texto. Deberán estar en español y tener los debidos permisos de reproducción cuando no sean originales (producidos por el autor). El número de los mismos no deberá ser mayor de 5, aunque podrían aceptarse hasta 7 en los casos que así lo ameriten. Las imágenes deberán tener una resolución mínima de 300 dpi, con formato JPEG, TIFF o PDF. En el caso de que se adquieran de internet, se recomienda guardarlas con el tamaño más grande para que tengan la mayor resolución.

Los encabezados de cuadros y tablas, y los pies de figura y de foto deben tener la información suficiente para entenderse sin la ayuda del texto principal.

Se publicarán artículos en dos modalidades: 1) textos cortos, con un mínimo de ½ página impresa y un máximo de 2 páginas; 2) textos en extenso, con un mínimo de 3 y máximo de 6 cuartillas con ilustraciones. En el texto no deben incluirse agradecimientos ni dedicatorias.

Los artículos recibidos serán evaluados por el editor en jefe; si éste considera que el artículo puede publicarse, lo pasará a los editores asociados para su revisión, y los comentarios y observaciones serán regresados al autor para correcciones finales. Sin embargo, si fuera necesario hacer correcciones mayores en la versión del manuscrito enviado por primera vez, el editor en jefe enviará el artículo al autor con sus comentarios. Si fuera el caso, se rechazarán aquellos artículos que no cumplan con los objetivos de la revista o que no tengan la calidad adecuada, tanto en la escritura como en el contenido, sin ninguna responsabilidad de la revista.

**Citas**

En caso de incluir citas de artículos, se sugiere un máximo de 3. Se debe incluir la bibliografía al final con el siguiente formato:

Para un autor: apellido y fecha (Torres, 1997).

Para 2 citas o más de un mismo tema, separar cada cita por un punto y coma (;) y en orden cronológico: (Torres et al., 1987; Barrón, 2006).

**Referencias**

En el caso de recomendar alguna lectura, la referencia debe ir completa al final del texto con el siguiente formato:

a) Artículos en publicaciones periódicas

Apellido(s), Inicial(es), Año, Título: Título de la revista, volumen, número de la primera y la última página del artículo. Ejemplo:

Barrios D., 1991, El oro y la historia de Perú: Historia Latinoamericana, 100, 35-40.

b) Monografías

Apellido(s), Inicial(es), año, Título de la monografía: Lugar de publicación, editorial, número de páginas. Ejemplo:

Faure, G., 1986, Principles of Isotope Geology: New York, John Wiley, 345 pp.

c) Capítulos en volúmenes editados

Apellido(s), Inicial(es), Año, Título del capítulo, en (Apellido e iniciales del editor o editores del volumen), (ed(s).), Título del volumen editado: Lugar de publicación, editorial, número de la primera y de la última página del capítulo. Ejemplo:

De Cserna, Z., 1968 Geología, en Lorenzo, J.L., De Cserna, Z., Herrera, I. (eds.): Las Ciencias Geológicas y su perspectiva en el desarrollo de México: México, Ediciones Productividad, 41-68.

**Los autores podrán enviar sus trabajos a:**

**Rene Loredo Portales**  
**Editor en Jefe de Nuestra Tierra**  
**Estación Regional del Noroeste**  
**Instituto de Geología, UNAM**  
**Hermosillo, Sonora**  
**rloredop@geologia.unam.mx**

