

# LA ONTOGENIA LACUSTRE: UN VISTAZO A LA EVOLUCIÓN DE LOS LAGOS

Gustavo Olivares-Casillas

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México C.P. 04510, México. golivarescas@geociencias.unam.mx

## RESUMEN

Las dinámicas ambientales de los lagos están en constante evolución debido a la influencia de agentes externos que pueden ser regionales, como el clima, o locales, como las actividades humanas. La "ontogenia lacustre" hace referencia al proceso de transformación de un lago, que puede manifestarse como cambios en el estado trófico o la transición a otro tipo de ecosistema. En la Península de Yucatán el incremento del nivel del mar, los cambios regionales en el ciclo del agua, y la larga ocupación humana han sido mecanismos de forzamiento en la evolución de los sistemas lacustres durante los últimos 10 000 años. La región del sureste de México sirve como un laboratorio natural para abordar cómo han cambiado los sistemas lacustres (aguadas, cenotes, lagunas costeras) debido a causas naturales y/o antropogénicas. Se elaboró un video para explicar el término "ontogenia lacustre" y las causas que propician los cambios en los lagos. El objetivo es transmitir a un público general los conceptos básicos del origen, la formación, el funcionamiento y la importancia social que rodea a estos sistemas acuáticos.

**Palabras clave:** Lagos, ontogenia, ciclo del agua, eutrofización, Península de Yucatán.

## ABSTRACT

*The environmental dynamics of lakes are in constant evolution because they are subject to the influence of external agents, which can be regional, such as the climate, or local, such as human activities. "Lacustrine ontogeny" refers to the process of transformation of a lake that manifests itself as changes in the trophic state or the transition to another type of ecosystem. In the Yucatan Peninsula, sea level rise, regional changes in the water cycle, and the long human occupation have been forcing mechanisms in the evolution of lacustrine systems during the last 10 000 years. The southeast of Mexico serves as a natural laboratory to address the evolution of lacustrine systems (aguadas, cenotes, coastal lagoons) due to natural and/or anthropogenic causes. A video was made to explain the "lacustrine ontogeny" and the causes that lead to changes in the*

*lakes. The aim is to transmit to a general public the basic concepts of the origin, formation, functioning and social importance that surround these aquatic systems.*

**Keywords:** Lakes, ontogeny, water cycle, eutrophication, Yucatan Peninsula.

## INTRODUCCIÓN

La divulgación científica busca volver accesible el conocimiento científico a todo público no especializado. Los materiales audiovisuales facilitan el entendimiento de los procesos o fenómenos naturales que son complejos o que no son visibles (i.e. Sugimoto *et al.*, 2013). La elaboración de este tipo de videos permite transmitir temas específicos de manera entretenida a personas interesadas en dicho tema particular (i.e. Haran y Poliakov, 2012). El video "ontogenia lacustre" sirve como base para futuros capítulos que tendrán como objetivo explicar la importancia de los lagos como archivos naturales de los cambios ambientales.

Los sistemas lacustres albergan ecosistemas altamente productivos que desempeñan un papel clave dentro de las dinámicas de los ciclos de nutrientes y del agua, (Jeppesen *et al.*, 2014). Al mismo tiempo, estos cuerpos de agua funcionan como refugio de una alta diversidad biológica y suministran servicios ecosistémicos a las poblaciones humanas que habitan cerca de ellos (Wetzel, 2001). Sin embargo, estos cuerpos de agua son altamente vulnerables a las perturbaciones externas. Durante las últimas décadas se ha observado una acelerada degradación en su estructura y funcionalidad. Por ejemplo, actualmente es posible apreciar una reducción sustancial de los volúmenes hídricos, un incremento en la concentración de sales minerales, una disminución en la disponibilidad de recursos ambientales (agua y alimento), enriquecimiento acelerado de nutrientes (eutrofización), pérdida de biodiversidad (especies endémicas), así como una subsecuente transformación antrópica debido al ingreso de pesticidas, fertilizantes, y desechos humanos a los lagos (contaminación) (Jenny *et al.*, 2020).

Las características ambientales de los lagos son definidas, en principio, por los mecanismos de formación en su origen geológico (i.e. por actividad volcánica, represamiento, disolución kárstica, entre otros), ya que condicionan la geomorfología de la cuenca de captación (área de captura, área del lago, profundidad) (Wetzel, 2001). Por otra parte, la variabilidad climática ha modulado la evolución en el estado hidrológico y productivo de los lagos. El tipo de clima al que está sometido un lago varía de acuerdo con su posición geográfica (latitud), altitud sobre el nivel del mar, continentalidad, precipitación anual, y patrones de insolación y viento (Beck *et al.*, 2018). Las entradas (lluvia, escorrentía y afluentes) y salidas de agua (evaporación, flujos superficiales) modulan el nivel promedio y la química de un lago, mientras que el grado de erosión, producido por la misma precipitación, influye en la tasa de entrada de nutrientes que afectan la relación entre la fotosíntesis y la respiración dentro de un sistema lacustre (Wetzel, 2001).

Actualmente, existe un creciente interés entre el público no especializado, tanto rural como urbano, que se cuestiona las causas del cambio en la calidad del agua y los recursos que derivan de los lagos. Debido a esto, nace la necesidad de realizar un video de divulgación para comunicar, de manera clara y concisa, la información científica disponible acerca de las causas en la variabilidad ambiental de los sistemas lacustres. Se espera que el cambio climático actual modifique los ciclos hidrológicos globales, alterando los patrones de lluvia (aumentando o disminuyendo la disponibilidad de agua) en muchas regiones. Además, debido al incremento de la población mundial, la presión por producir más alimento y vivienda intensifican los procesos de cambio de uso de suelo en torno a los lagos. Esto acelera la erosión local, propiciando la eutrofización en muchas localidades (Jeppesen *et al.*, 2014).

La "ontogenia lacustre" se define como el proceso de desarrollo de un cuerpo de agua, que involucra tanto las causas que dieron lugar a su origen como aquellas que condujeron a su transformación. En general, el estudio de la evolución de los sistemas lacustres sostiene que 1) los cuerpos de agua cambian de estados prístinos caracterizados por aguas claras con pocos nutrientes (estado oligotrófico) a estados altamente productivos ricos en nutrientes y con aguas turbias (estado eutrófico), o que 2) los lagos (o lagunas) acumulan sedimentos compuestos por restos orgánicos e inorgánicos hasta que son llenados y se transforman en otro tipo de ecosistemas terrestres, por ejemplo, un pantano o una marisma (Binford *et al.*, 1983; Brenner y Escobar, 2009).

En México, gran parte de los sistemas lacustres se encuentran amenazados debido al desgaste y sobreexplotación de los mantos freáticos. En el norte del país las lluvias son escasas y muchos lagos se han secado (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010). Las diferencias espaciales en la disponibilidad de la humedad están asociadas principalmente a la variación en los patrones de lluvia que ocurren durante la estación lluviosa de verano y los sistemas ciclónicos de latitud media (también conocidos como Nortes) durante el invierno (Cavazos y Hastenrath, 1990; Alcocer y Bernal-Brooks, 2010). Además, importantes cambios en la disponibilidad de humedad toman lugar durante la ocurrencia de oscilaciones climáticas (i.e. El Niño Oscilador del sur, ENSO, en Magaña *et al.*, 2003). Por otra parte, es notable el deterioro ambiental de numerosos cuerpos de agua para diversas localidades del norte, centro y sur de México. El incremento en la entrada de nutrientes y materia orgánica particulada en los lagos debido a actividades ganaderas, agrícolas, turísticas o por uso doméstico, ha causado un aceleramiento en el

proceso de eutrofización (i.e. Herrera-Silveira, *et al.*, 2002; Bravo-Inclán *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2011; Sigala *et al.*, 2017; Alcocer *et al.*, 2018). La contaminación química del agua debido al exceso en la entrada de nutrientes (i.e. fósforo), metales pesados, así como sustancias químicas (i.e. pesticidas) y micro plásticos, se ha visto reflejada en una alta toxicidad del agua y a una mayor exposición a patógenos que pueden tener efectos letales en la biodiversidad y las poblaciones humanas (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010; Ansari *et al.*, 2010; Schwarzenbach *et al.*, 2010).

La Península de Yucatán es una extensa plataforma carbonatada al sureste de México que está compuesta por una alta diversidad de ecosistemas. Esta región está caracterizada por presentar poco relieve y estar rodeada de masas oceánicas que actúan como las fuentes primarias de humedad, las cuales condicionan la hidroquímica de la columna de agua en los sistemas lacustres (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011) (Figura 1). El clima es de tipo estacional y está caracterizado por una marcada temporada de lluvia (de mayo a septiembre) y otra seca (octubre a abril). El patrón estacional de precipitación en verano es determinado por los mecanismos de convección (lluvia convectiva) que ocurren en torno a las albercas cálidas de los mares interamericanos (Mar Caribe, Golfo de México y el nororiente del Océano Pacífico tropical) (Magaña y Caetano, 2005). La humedad es transportada en dirección a la Península de Yucatán por medio de los vientos del este (o vientos alisios). Asimismo, la formación de huracanes tropicales en el mar Caribe y el Golfo de México es una fuente importante de humedad (Wang y Lee, 2007). Mientras que los Nortes proveen humedad durante los meses fríos de invierno (Magaña *et al.*, 2003). El paisaje está compuesto principalmente por vegetación caducifolia, perennifolia y mangle (Ibarra-Manríquez *et al.*, 2002) que rodean diversos cuerpos de agua, entre ellos, aguadas, cenotes, y lagunas costeras de origen kárstico (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). De esta manera, este sitio resulta un laboratorio natural para estudiar cómo influyen los diversos procesos oceánicos, climáticos y antropogénicos sobre la ontogenia lacustre de los diversos sistemas acuáticos.

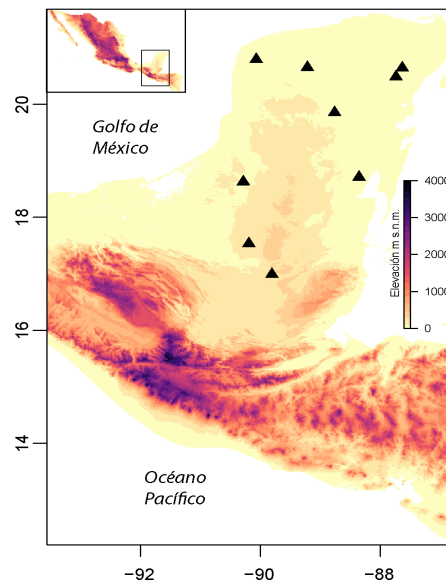


Figura 1. Localización de la Península de Yucatán (proyección UTM en el sistema de coordenadas WGS84). Se representan las variaciones de elevación (metros sobre el nivel del mar, m s.n.m.). Las principales aguadas, cenotes y lagunas costeras (i.e. San José Chulchaca, Yalahau, Coba, Punta Laguna, Chichancanab, Silvituc, La Encantada, Puerto Arturo, Petén Itzá, Salpetén) distribuidas a lo largo de la Península de Yucatán están denotadas por triángulos negros.

## METODOLOGÍA

Un proyecto de investigación es la elaboración de un escrito especializado teórico y metodológico de un tema de interés que describe los pasos: título, marco teórico, antecedentes, marco conceptual, justificación, objetivos, hipótesis, preguntas de investigación, y marco metodológico, con el fin de resolver una o varias problemáticas actuales. De este proyecto de investigación pueden derivar proyectos de tesis, informes técnicos, así como proyectos de divulgación. En particular, la difusión de la ciencia pretende alcanzar a un público no especializado que quiera aprender y conocer del tema de una manera práctica. El proyecto “Una aproximación multi-indicador y multi-registro a la variabilidad ambiental de la Península de Yucatán a través del Holoceno” tiene como objetivo reconstruir la compleja historia ambiental (en términos biológicos, climáticos e hidrológicos) de los ecosistemas distribuidos en la Península de Yucatán durante los últimos 10 000 años (época geológica Holoceno). La variabilidad ambiental de estos ecosistemas es influenciada por la conectividad espacial y temporal que existe entre los procesos continentales y marinos sobre el paisaje. A su vez, busca encontrar las causas naturales y antropogénicas de dicha variabilidad ambiental.

Como parte del proyecto de investigación, se planteó el desarrollo de una serie de videos con un enfoque educativo que buscan informar a un público general el alcance de los estudios multi-indicador y los resultados logrados durante este proyecto de investigación. Estos videos abarcaran temas teóricos de variabilidad ambiental y métodos para el análisis de paleo-indicadores. En este trabajo se presenta un video que explica los estados tróficos (Figura 2) y las causas por las cuales los lagos se transforman debido a sus dinámicas internas y a su sensibilidad a estímulos externos (Figura 3). Este video es una esquematización que comprende una recopilación teórica acerca de la evolución de los lagos, y se localiza en la dirección:

<https://drive.google.com/file/d/13Z9hPePVi4QeLvVbFuFOTmI4O62nvDYa/view?usp=sharing>

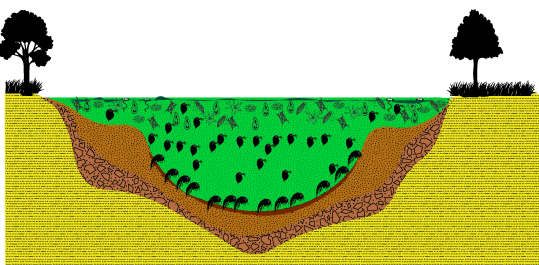


Figura 2. Esquematización de un lago en estado eutrófico (altamente productivo). Imagen utilizada en el video.

El video llamado “Ontogenia lacustre” tiene una duración de 2 minutos con 20 segundos. Este video introduce al público en el tema del deterioro de los lagos y sus causas. El video explica mediante ejemplos generales, y de manera detallada, cómo es la evolución de un lago, respondiendo dos principales preguntas: 1) ¿Qué les está pasando a nuestros lagos?, 2) ¿Por qué se transforman los lagos?

Este video será difundido a través de las principales redes sociales usadas y que tienen un mayor alcance mediático por un público no especializado (i.e. YouTube, Facebook), adjuntando datos del autor por si surgieran dudas respecto al tema. Datos de contacto: M. en C. Gustavo Olivares Casillas, correo electrónico [golivarescas@geociencias.unam.mx](mailto:golivarescas@geociencias.unam.mx).

El video fue elaborado mediante el programa Filmora®. La teoría del video está basada en información científica especializada (libros científicos, artículos científicos y comunicación personal con expertos en el tema). Los clips del video y los esquemas animados fueron producidos por el autor del escrito usando una cámara casera de celular y la aplicación de programas especializados en fotografía y gráficos (Illustrator® y Photoshop®). Las imágenes utilizadas en este video son de uso libre y provienen de páginas de internet como freepik.com, pixabay.com e iStockphoto.com. La música pertenece al compositor Benjamin Tissot que es de uso libre y está integrada dentro del banco de audio digital bensound.com. Este video es de uso libre mencionando la autoría. Su contenido podrá ser utilizado por docentes en clases que abarquen temas como los ecosistemas acuáticos o procesos de contaminación en el agua. Otros exponentes podrán utilizarlo como punto de partida para ejemplificar la evolución de un lago por cambios naturales o los causados por actividades humanas, y posteriormente podrán integrar casos de estudio para localidades particulares.



Figura 3. Esquematización de la contaminación de un lago causado por actividades antropogénicas (Imagen utilizada en el video).

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Una aproximación multi-indicador y multi-registro a la variabilidad ambiental de la Península de Yucatán a través del Holoceno” dirigido por el Dr. Alexander Correa Metrio del Centro de Geociencias de la UNAM. Al taller “Comunica tu investigación” dirigido por la M. en C. Mónica Ramírez Calderón adscrita al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, por su orientación en la elaboración de este video.

## REFERENCIAS

- Alcocer, J., Bernal-Brooks, F.W., 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia*, 644, 1-54.
- Alcocer, J., Merino-Ibarra, M., Oseguera, L.A., Escolero, O., 2018. Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. *Ecohydrology*, 11(8), e2029.
- Ansari, A.A., Gill, S.S., Khan, F.A., 2010. Eutrophication: Threat to Aquatic Ecosystems. In: Ansari, A., Singh, Gill, S., Lanza, G., Rast, W. (eds.). *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer, Dordrecht. 401 pp.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524.
- Beck, H., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Nergopolan, N., Berg, A. Wood, E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214.
- Binford, M.W., Deevey, E.S., Crisman, T.L., 1983. Paleolimnology: An Historical Perspective on Lacustrine Ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 14, 255-286.
- Bravo-Inclán, L.A., Olvera-Viascán, V., Sánchez-Chávez, J.J., Saldaña-Fabela, P., Tomasini-Ortiz, A.C., 2010. Trophic state assessment in warm-water tropical lakes and reservoirs of the central region of Mexico. In: van Bochove, E., Vanrolleghem, P.A., Chambers, P.A., Thériault, G., Novotná, B., Burkart, M.R. (eds.). *Issues and solutions to diffuse pollution: Selected papers from the 14th International conference of the IWA diffuse pollution specialist group, DIPCON 2010. Conférence sur la pollution diffuse 2010 inc, Québec, Québec, CANADA*, 495 pp.
- Brenner, M., Escobar, J., 2009. Ontogeny of Aquatic Ecosystems. In: *Encyclopedia of Inland Waters*, ed. Likens, G.E., Academic Press, Oxford, 456-461.
- Cavazos, T., Hastenrath, S., 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377-386.
- Haran B, Poliakoff, M., 2012. The periodic table of videos. *Science*, 332, 10460-1047.
- Herrera-Silveira, J.A., Medina-Gomez, I., Colli, R., 2002. Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia*, 475-476(1), 91-98.
- Ibarra-Manriquez, G., Villasenor, J.L., Duran, R., Meave, J., 2002. Biogeographical analysis of the tree flora of the Yucatan Peninsula. *Journal of Biogeography*, 29, 17-29.
- Jenny J., Anneville O., Arnaud F., Baulaz Y., Bouffard D., Domaizon I., Bocaniov S., Chèvre N., Dittrich M., Dorioz J., Dunlop E., Dur G., Guillard J., Guinaldo T., Jacquet S., Jamoneau A., Jawed Z., Jeppesen E., Krantzberg G., Lenters J., Leoni B., Meybeck M., Nava V., Nöges P., Patelli M., Pebbles V., Perga M., Rasconi S., Reutz C., Rudstam L., Salmaso N., Sapna S., Straile D., Tammeorg O., Twiss M., Uzarski D., Ventelä A., Vincet W., Wilhelm S., Wäng-berg S., Weyhenmeyer G., 2020. Scientists' warning to humanity: rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 46, 686-702.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Davidson, T.A., Trolle, D., Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Beklioglu, M., Brucet, S., Volta, P., González-Bergonzoni, I., Nielsen, A., 2014. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology*, 73(s1), 88-111.
- Magaña, V.O., Vázquez, J.L., Pérez, J.L., Pérez, J.B., 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.
- Magaña, V., Caetano, E., 2005. Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools. *Geophysical Research Letters*, 32, L02803.
- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P., Islebe, G., Scharf, B., Schwalb, A., 2011. Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661, 407-433.
- Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467, 215-228.
- Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U., Wehrli, B., 2010. Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109-136.
- Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Vázquez, G., Pérez, L., Zawisza, E., 2017. Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 313-370.
- Sugimoto C.R., Thelwall, M., Larivière, V., Tsou, A., Mongeon, P., Macaluso, B., 2013. Scientists Popularizing Science: Characteristics and Impact of TED Talk Presenters. *PLoS ONE*, 8(4), e62403.
- Wang, C., Lee, S.-K., 2007. Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 34, L02703.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology Lake and Reservoir Ecosystems*. Academic Press, San Diego, 1006 pp

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 23 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 7 de diciembre de 2022