

LAS “LAGUNAS DE MONTEBELLO”

Joyas de la naturaleza amenazadas

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

EDITORES



LAS “LAGUNAS DE MONTEBELLO”

Joyas de la naturaleza amenazadas



Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Alcocer Durand, Javier, 1957- , autor, editor. | Escolero Fuentes, Oscar A., 1954-, editor, autor. | Álvarez, Fernando, 1958- , editor, autor. | Mora Palomino, Lucy, autor. | Prado, Blanca, autor. | Bonifaz Alfonso, Roberto, autor. | López, Rafael, autor. | Oseguera, Luis Alberto, autor. | Caballero Miranda, Margarita Erna, autor.

Título: Las “Lagunas de Montebello”. Joyas de la naturaleza amenazadas / Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez, editores ; Javier Alcocer, Óscar Escolero, Fernando Álvarez, Lucy Mora, Blanca Prado, Roberto Bonifaz, Rafael López, Luis A. Oseguera, Margarita Caballero.

Descripción: Primera edición. | México : Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, 2023. | “Instituto de Geología. Instituto de Biología”.

Identificadores: LIBRUNAM 2188647 | ISBN 9786073073608.

Temas: Lagunas de Montebello (Chiapas) -- Hábitat -- Conservación. | Conservación de los recursos naturales -- Chiapas. | Hidrogeología -- Chiapas.

Clasificación: LCC QH77.C45.A53 2023 | DDC 333.95160972—dc23

Forma correcta de citar:

Alcocer, J., Escolero, O. y Álvarez, F. (Eds.). (2023). Las “Lagunas de Montebello”. Joyas de la naturaleza amenazadas. FES Iztacala, UNAM. México.

Las “Lagunas de Montebello”. Joyas de la naturaleza amenazadas

Primera edición: marzo de 2023

Editores: Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez.

D.R. 2023 © Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Alcaldía de Coyoacán,
C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala,
Tlalnepantla de Baz, CP 54090, Estado de México, México.

www.iztacala.unam.mx

ISBN: 9786073073608.

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Apoyo técnico

Sandra Heiras Garibay
Benjamín Quiroz Martínez

Cuidado de la edición

Mariana Vargas Sánchez

Diseño

Hecho en México

ISBN 978-607-30-7360-8





LAS “LAGUNAS DE MONTEBELLO”

Joyas de la naturaleza amenazadas

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

EDITORES

Javier Alcocer, Óscar Escolero, Fernando Álvarez, Lucy Mora,
Blanca Prado, Roberto Bonifaz, Rafael López, Luis A. Oseguera,
Margarita Caballero



México 2023

Contenido

Presentación	8
1. Introducción	11
2. La cuenca del Río Grande de Comitán	15
2.1 Geología	17
2.2 Hidrología	17
2.3 Clima	18
2.4 Vegetación y uso de suelo	18
2.5 Geomorfología	19
2.6 Suelos	20
3. Las Lagunas de Montebello	27
3.1 ¿Dónde están y cuántas son?	28
3.2 ¿Cómo se formaron?	29
3.3 ¿Qué forma y dimensiones tienen?	32
3.4 Transparencia y color	34
3.5 Temperatura y estratificación térmica	36
3.6 Oxígeno disuelto y anoxia	38
3.7 Los sedimentos lagunares	39
3.8 Los fertilizantes: nitrógeno y fósforo	42
3.9 Clorofila y eutroficación	44
3.10 “Florecimientos” tóxicos	46
4. La biota acuática	49
4.1 Biodiversidad	50
4.2 Fitoplancton	51
4.3 Fauna acuática	51
4.4 Macrofitas	55
5. Las causas del deterioro	59
5.1 Deforestación y agricultura	60
5.2 Crecimiento urbano y contaminación	60
5.3 Especies introducidas	63
5.4 Historia del impacto antrópico	65
6. Conclusiones	69
Financiamientos	74
Agradecimientos	75
Bibliografía de referencia	77

Presentación

Esta obra, dedicada a una de las Áreas Naturales Protegidas de México de mayor belleza paisajística de todo el país y de una importancia ecosistémica sin igual, el Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, presenta de forma clara no sólo sus importantes valores naturales, ecológicos e hídricos que privilegia a las y los chiapanecos, y a todas y todos le mexicanos, también alude a las principales causas que amenazan a esta joya de la naturaleza, y enfatiza en algunas alternativas para prevenir su deterioro. Describe de una manera accesible, pero con sólidas bases científicas, la interacción naturaleza-sociedad desde la ocupación prehispánica hasta nuestros días, las características físico-ambientales, biológicas y ecológicas de las “Lagunas de Montebello”, así como los procesos geológicos, climáticos, hidrológicos y biológicos que en una combinación irrepetible han dado lugar a esta región en que se entremezclan bosques y lagunas multicolores. De igual forma, expone la gran diversidad de los distintos grupos biológicos que forman y comparten los ecosistemas de Montebello. Para el cierre del libro, y luego de hacer un recuento de los impactos ambientales causados por múltiples actividades humanas, se plantean diversas alternativas concretas que pueden contribuir a recuperar la salud ecológica, por un lado, y prevenir el deterioro de las “Lagunas de Montebello”





por otro, y con ello, evitar la pérdida de este formidable tesoro natural de las y los mexicanos. Desde la CONANP mantenemos el compromiso y la convicción de colaborar de manera decidida con la academia y la investigación, y de forma fundamental con las comunidades locales para dar continuidad al cuidado y protección de nuestro patrimonio natural, hoy representado en 186 Áreas Naturales Protegidas que heredan ecosistemas y riqueza natural como muy pocos países del planeta.

Humberto Adán Peña Fuentes
Titular de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas





Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

Introducción

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

En la porción inferior de la cuenca del Río Grande de Comitán se ubican las “Lagunas de Montebello”, ecosistema sin igual en el país, rico en recursos hídricos, lo que de entrada constituye un tesoro nacional considerando la creciente escasez del vital líquido y su cada vez menor calidad. El paisaje constituido por numerosos cuerpos acuáticos de color azul cristalino enmarcado por extensas áreas boscosas es reconocido como uno de los escenarios naturales más hermosos de Chiapas y constituye un sitio icónico para el estado y el país. Su relevancia ecosistémica justificó ampliamente su designación como Área Natural Protegida en 1959 y sitio RAMSAR en 2003.

La cuenca del Río Grande de Comitán hoy en día incorpora un abanico de impactos ligados a las actividades humanas y originados desde tiempos prehispánicos por la presencia de asentamientos humanos. Sin embargo, los efectos a mayor escala se ubican desde por lo menos los años 1950s incrementándose durante la década de los años 1980s hasta la década de los años 2000s. Los primeros eventos “modernos” de perturbación están relacionados con cambios en el uso del suelo durante la reforma agraria que dio inicio en la década de 1940; el evento más reciente está relacionado con el aumento de la población local y la introducción de la agricultura intensiva. Esta

última fase de perturbación corresponde con los informes de cambio de color y eventos de mortandad de peces alrededor de 2003. Todos estos impactos, desafortunadamente, serán potenciados bajo el escenario actual de cambio global.

La región presenta una problemática compleja, en la cual un sinnúmero de actividades antrópicas converge e impacta a los cuerpos acuáticos. La eutrofización es uno de los problemas más importantes y evidentes que presenta un conjunto de lagos particularmente de la zona noroeste y que está asociado a las actividades agrícolas y desarrollo urbano e incluso al vertimiento de las aguas residuales procedentes de la Ciudad de Comitán, entre otros poblados. Además de que la eutrofización degrada la calidad del agua de las lagunas, incrementa de forma notable la emisión de gases de efecto de invernadero (p. ej., dióxido de carbono y metano) lo cual promueve el calentamiento regional y global.

De forma paralela, otro de los impactos de gran magnitud en la zona deriva de las actividades de deforestación y posterior erosión de los suelos que independientemente de que aumenta la turbidez terrígena (limos y arcillas) de las lagunas, aportan los fertilizantes que otrora retenían los terrenos forestales.

La interacción de las aguas superficiales y subterráneas en el contexto del paisaje kárstico chiapaneco explican no solo el origen de las lagunas, sino también el balance hídrico y los flujos superficiales y subterráneos que mantienen interconectadas a las lagunas de la porción noroeste. Sin embargo, esta comunicación activa favorece la incorporación de desechos derivados de la agricultura y ganadería, actividades muy importantes en la zona, tales como fertilizantes, plaguicidas y contaminantes emergentes (p. ej., hormonas y antibióticos), así como los efectos que esto conlleva en las lagunas. La característica estacionalidad tropical en condiciones de elevada humedad y temperatura, escalan la fragilidad de estos ecosistemas expuestos a las actividades humanas a través de, por ejemplo, las súbitas tormentas tropicales con fuertes precipitaciones e inundaciones que favorecen la dispersión de contaminantes entre las lagunas volviéndolas altamente susceptibles a la contaminación acuática con su consecuente deterioro.

El inicio de las actividades de investigación científica integral de las lagunas y su cuenca de drenaje es reciente dando principio en 2015. Afortunadamente estos 7 años de investigación científica coordinada han permitido generar una visión holística del funcionamiento del ecosistema lagunar de Montebello en el contexto de su cuenca de drenaje, de la causa de su deterioro evidenciado por los cambios observados por

los locales y, quizás lo más importante, el poder proponer planes y alternativas que eviten que el proceso de deterioro se extienda a otras lagunas y eventualmente para implementar medidas de restauración en aquellas que ya han sido degradadas.

En este libro presentaremos los siguientes cuatro aspectos de las “Lagunas de Montebello”:

- La Cuenca. Espacio en el cual interactúan naturaleza y sociedad desde tiempos ancestrales y contemporáneos y que han ido moldeando los recursos hídricos.
- Las Lagunas. Objeto central de este libro y que hasta en fechas muy recientes eran prácticamente desconocidas para la ciencia, a pesar de ser reconocidas por la sociedad por su belleza escénica.
- La Biota Acuática. Característica de la megadiversidad del país, la biota que habita las Lagunas de Montebello muestra una gran riqueza biológica regional y al mismo tiempo una elevada singularidad en cada laguna.
- El Deterioro Ambiental. Tras años de ocupación desde tiempos prehispánicos y con un intenso desarrollo de actividades antrópicas en los años 1950s y posteriormente a partir de los años 2000s, las lagunas comenzaron a mostrar los signos evidentes del impacto humano que, desafortunadamente, sigue avanzando, deteriorando cada vez más lagunas.





Capítulo 2

LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE COMITÁN

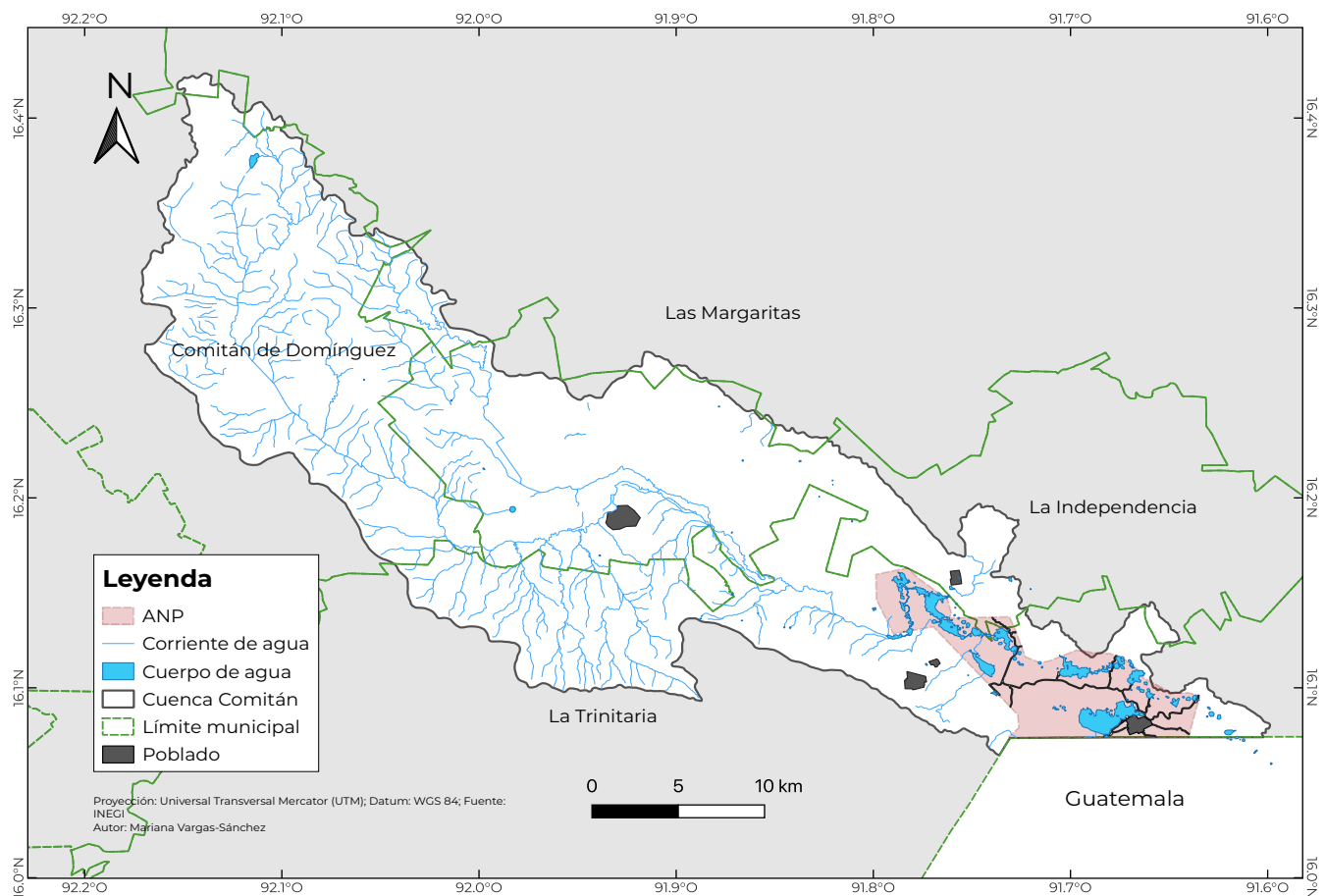
Lucy Mora, Blanca Prado, Óscar Escolero y Roberto Bonifaz

La cuenca del Río Grande de Comitán

Lucy Mora, Blanca Prado, Óscar Escolero y Roberto Bonifaz

La cuenca del río Grande de Comitán representa el territorio que aporta escurrimientos hacia el río del mismo nombre. El Río Grande de Comitán nace en la laguna de Juznajab, ubicada en el municipio de Comitán de Domínguez y desemboca donde inicia el Parque Nacional “Lagunas de Montebello”. La cuenca abarca una

superficie de 810.43 km² que corresponde a tres municipios principalmente: La Independencia, Comitán y la Trinidad, así como a una pequeña porción de las Margaritas. Esta cuenca forma parte de la Región Hidrográfica N° 30 Grijalva-Usumacinta en la región sursureste en el estado de Chiapas, esto es, de la Meseta Central o los Altos



Delimitación de la cuenca del Río Grande de Comitán y municipios que abarcan. (ANP = Área Natural Protegida “Lagunas de Montebello”).

de Chiapas. En la cuenca se pueden reconocer tres grandes zonas: la cuenca alta o cabecera que es donde nace el río; la cuenca media que es donde se encuentran los lomeríos, colinas, valles y planicies y, finalmente, la cuenca baja o zona de descarga al complejo lagunar y planicies de inundación.

2.1 Geología

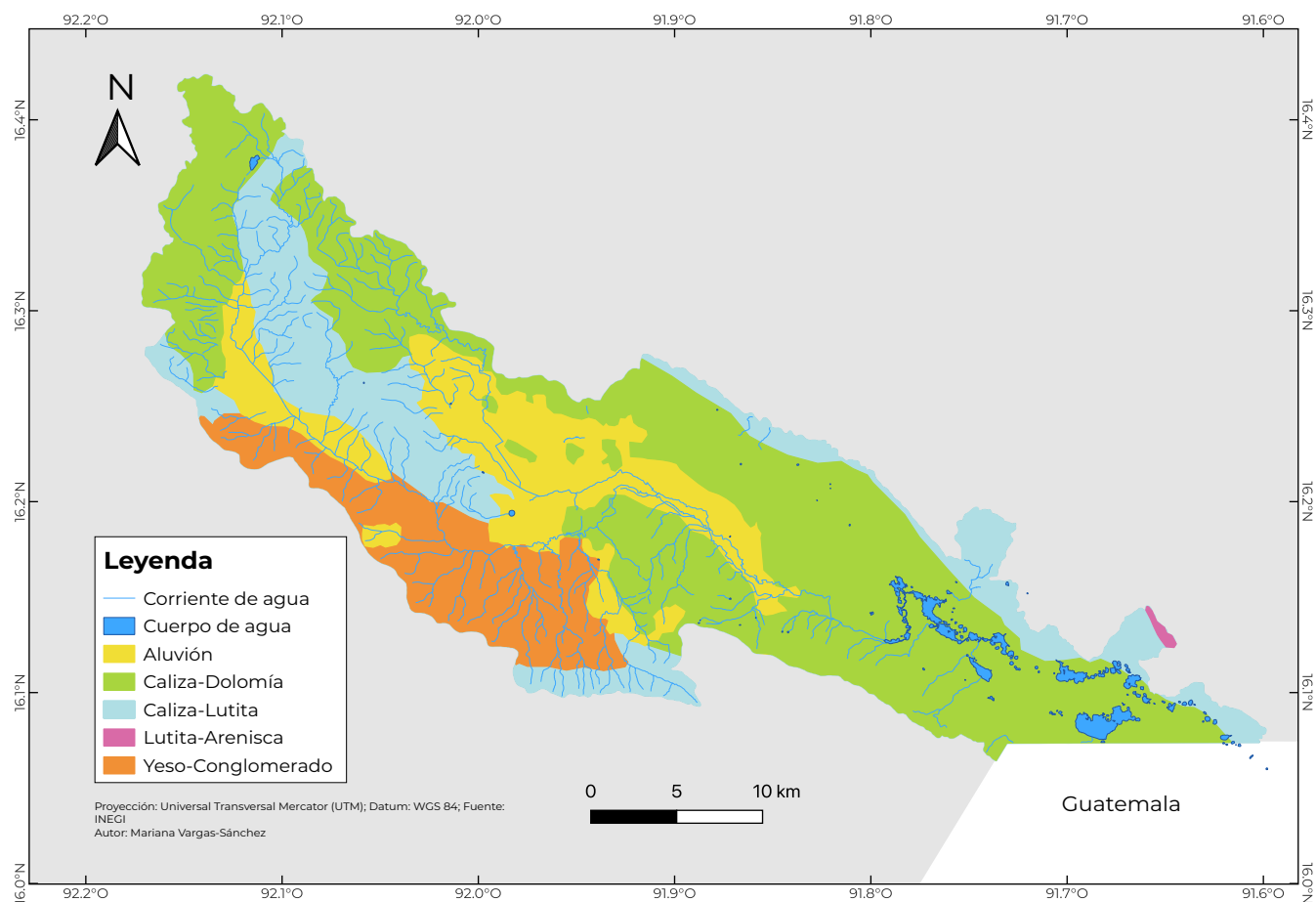
La geología que predomina en la cuenca es de origen sedimentario; está constituida principalmente por rocas calizas muy antiguas, del Cretácico (entre 65 y 146 millones de años), que representan el 62% del total del área; el resto está compuesto por otro tipo de rocas calizas como las limolitas y las areniscas que se originaron del Terciario Superior al Cuaternario (entre 2.85 y 1.85 millones de años), así como los aluviones más

recientes procedentes del Cuaternario (menores a 1.8 millones de años). También hay registros de rocas de yeso cerca de la localidad El Triunfo.

La conformación de las montañas y las zonas planas son el resultado de la actividad de las placas tectónicas de Cocos, Norteamericana y del Caribe. Estos movimientos generaron fracturamiento de las rocas que favorecieron su disolución, a partir de lo cual se inició la conformación de la zona de los lagos por disolución de las rocas.

2.2 Hidrología

El sistema hidrológico de la cuenca se conforma por diversos ríos perennes e intermitentes, así como lagunas. El afluente principal es el Río Grande de Comitán que corre de noroeste a sureste y que es alimentado por la laguna de Juznajib,



Geología de la cuenca del Río Grande de Comitán.

a una altitud de 2,450 m s.n.m., descendiendo a 1,300 m s.n.m. en su desembocadura en el sistema lagunar. El Río Grande de Comitán recibe los aportes de corrientes intermitentes durante la época de lluvias y tiene una longitud aproximada de 81 km.

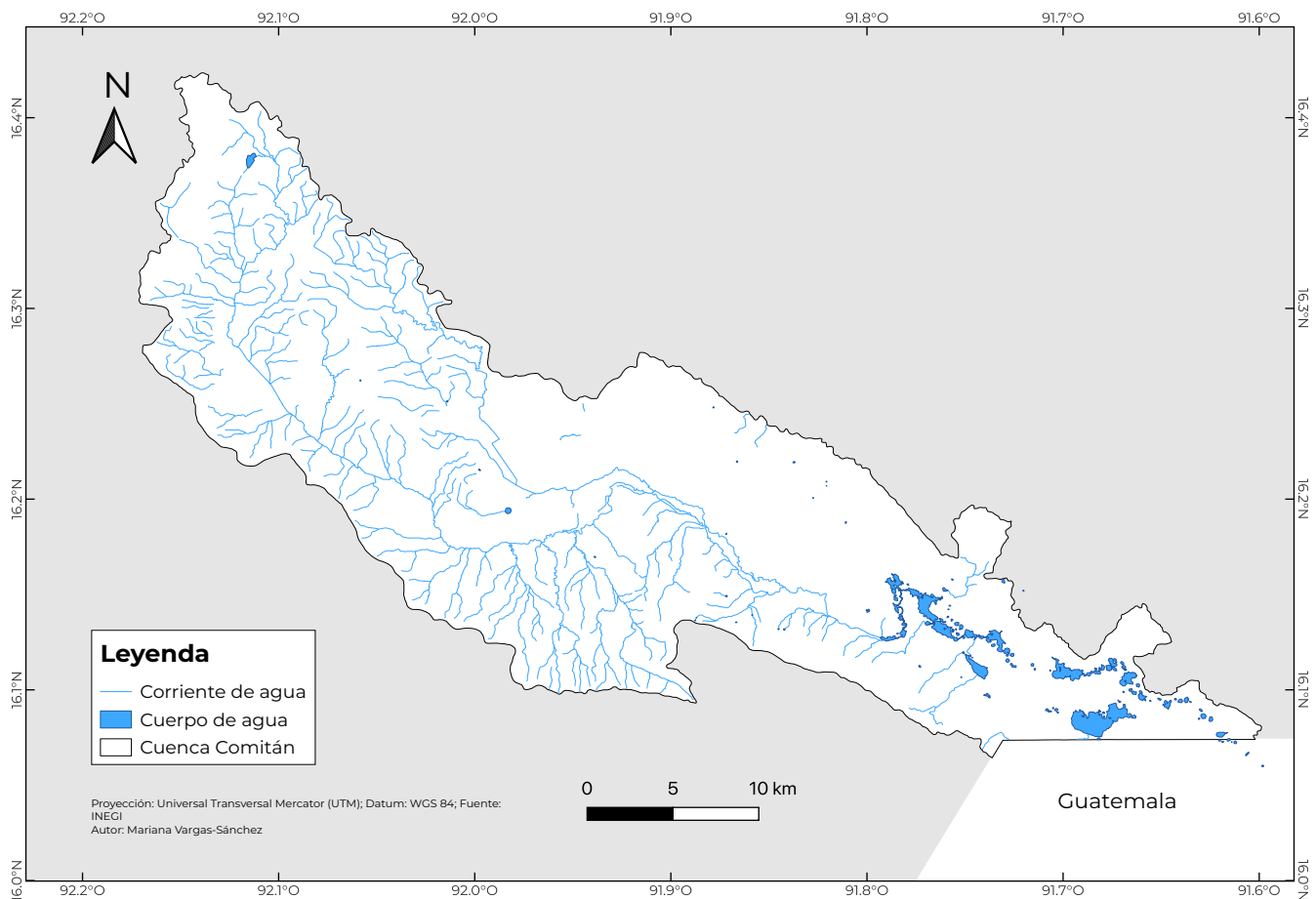
2.3 Clima

El clima en la cuenca del Río Grande de Comitán es templado húmedo a subhúmedo con lluvias en verano. Los climas predominantes dentro de la cuenca son templado subhúmedo con lluvias en verano en el municipio de Comitán y semicálido subhúmedo con lluvias en verano en La Trinitaria, La Independencia y Las Margaritas. Las temperaturas máximas se presentan de mayo a octubre y fluctúan de 24 a 27°C, mientras que

las temperaturas mínimas (9 a 12°C) se registran en las partes más altas y montañosas de la cuenca, las porciones medias y bajas promedian los 18°C. La precipitación media anual se estima en 1,483 mm. Sin embargo, la distribución de la lluvia no es uniforme a lo largo de la cuenca, pues los valores van desde un mínimo de 895 mm de lluvia anual en el municipio de Comitán, hasta un máximo de 2,588 mm en el municipio de El Triunfo. El periodo de lluvias normalmente se presenta entre mayo y octubre; los meses más lluviosos son durante el verano, de junio a septiembre, siendo este último el mes el más lluvioso.

2.4 Vegetación y uso de suelo

Los tipos de vegetación nativa establecidos en la cuenca del Río Grande de Comitán son: bosque



Hidrología de la cuenca del Río Grande de Comitán.

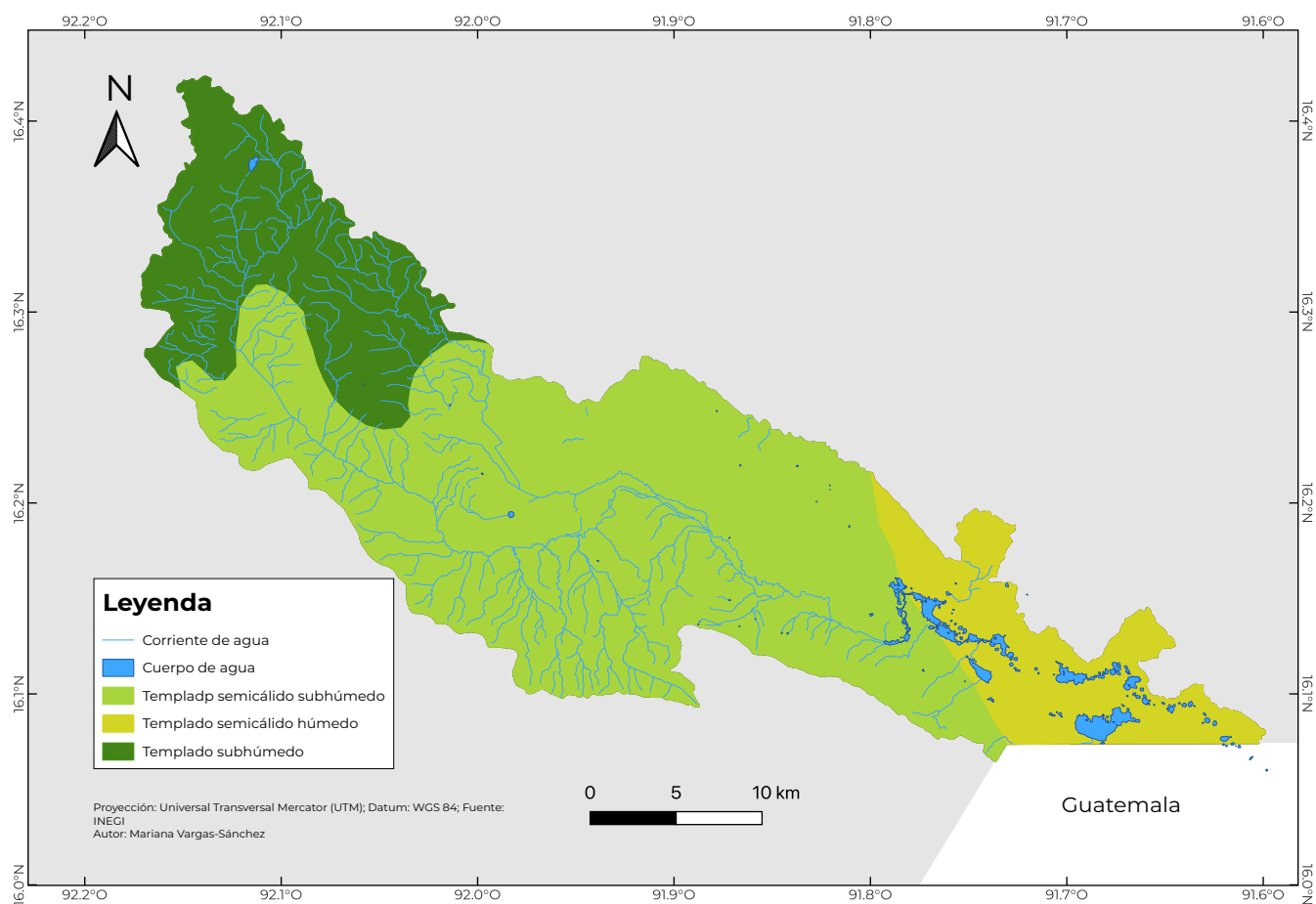
mixto de pino-encino, de pino-encino-liquidámbar, así como bosques de pino y bosques de encino. También se observan bosques fragmentados de pinares, encinares y en su mayor parte vegetación secundaria con acacias y matorrales con diversas especies de cactáceas. El territorio presenta problemas de deforestación que se deben no sólo a la alteración de la vegetación natural originada por el cambio de los usos de suelo para propósitos agropecuarios, sino también por la extracción excesiva de madera para uso industrial, construcción y leña. Las actividades agrícolas ocupan el 31% del uso del suelo, el 23% es destinado a la agricultura de temporal, siendo el maíz, frijol y algunas hortalizas, los principales productos cultivados. El 8% del territorio es destinado a la agricultura de riego, que se

desarrolla principalmente en la parte media de la cuenca (Emiliano Zapata, Venustiano Carranza, El Triunfo, El Porvenir y Lázaro Cárdenas). El cultivo de jitomate es uno de los productos agrícolas cultivados de forma extensiva ya que se realizan entre 3 y 6 ciclos por año. La zona urbana ocupa el 5% del territorio y está compuesta por 179 localidades, siendo la Ciudad de Comitán la más poblada.

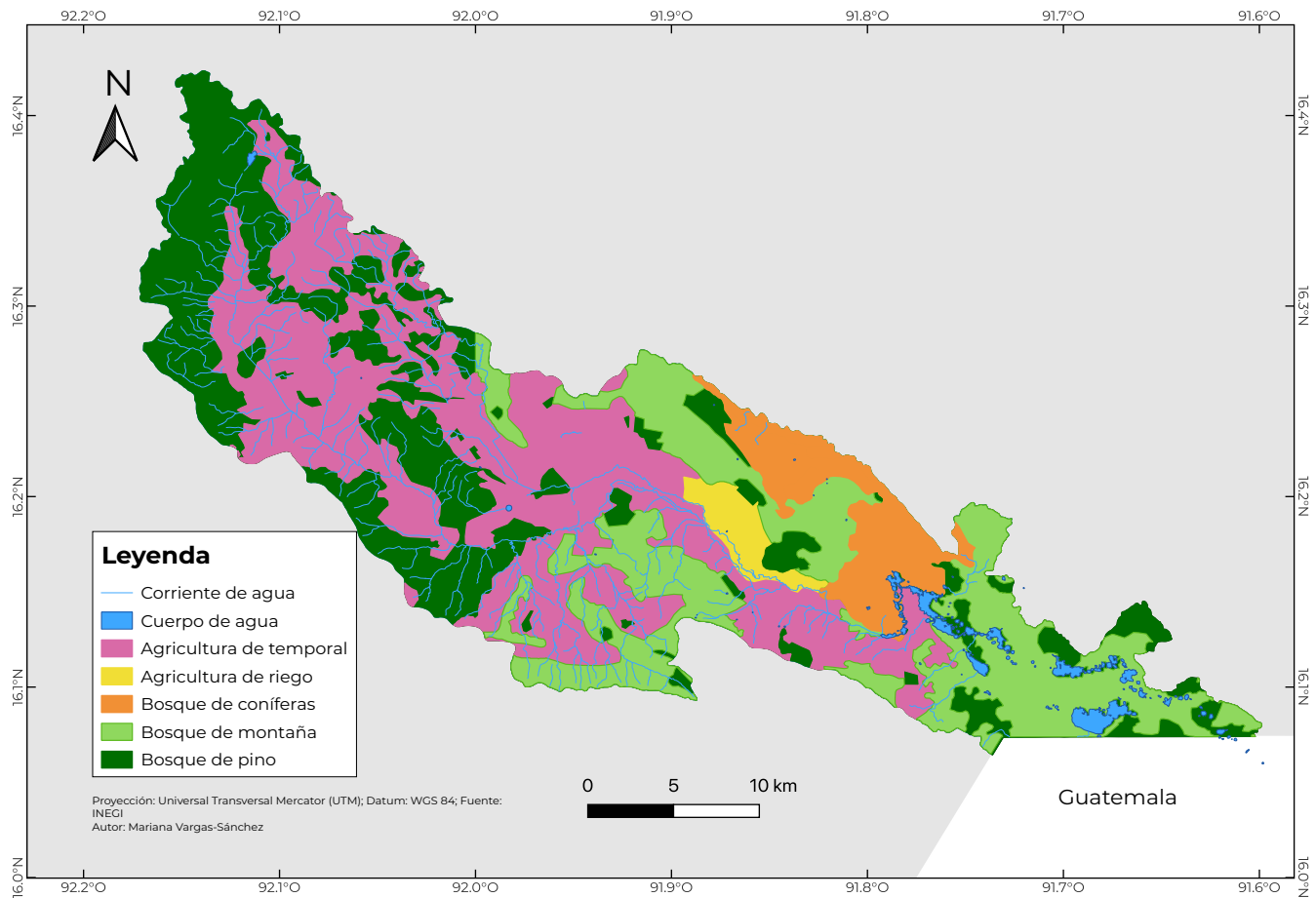
2.5 Geomorfología

Las principales “unidades de paisaje”, esto es, paisajes característicos de la cuenca son: montañas, lomeríos y planicies.

La zona de montaña conforma el parteaguas de la cuenca y se caracteriza por tener diferentes aspectos de acuerdo con los procesos que modelan



Climas de la cuenca del Río Grande de Comitán.



Vegetación y uso de suelo de la cuenca del Río Grande de Comitán.

el paisaje. El relieve en esta zona es abrupto con una pendiente entre 32  y 57  y est  conformado por rocas calizas y dolomías principalmente.

Se identifican dos zonas de montaña, al norte y al sur de la cuenca. En la zona norte las rocas tienen poca disolución y las pendientes favorecen la erosión. La zona de montaña al sur de la cuenca tiene características ambientales contrastantes a la de la zona norte. Las condiciones favorecen el modelado por procesos de disolución kárstico. En la unidad de montaña también se identifican elevaciones bajas con karst de dolinas y poljes inundados que representan las zonas de los lagos de montaña o de altura.

Una de las geoformas más frecuentes en los lomeríos son los llamados “mogotes”, que son lomas aisladas pequeñas con altura menor a 50

m. Otra geoforma común es la de los lomeríos con pendiente ligeras, se caracterizan por presentar mucha erosión y ésta es evidente por la amplia red de drenaje y escasa vegetación.

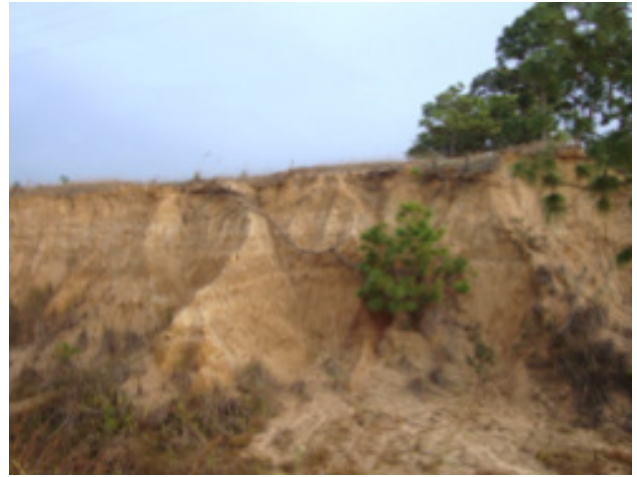
Finalmente, en las planicies se presentan geoformas de origen diferente: 1) una antigua planicie kárstica que fue rellenada por material residual, 2) una planicie lacustre residual en donde se cree existió un antiguo lago, 3) la planicie kárstica en donde actualmente se ubican los lagos de planicie y 4) el valle fluvial moldeado en la ribera del río.

2.6 Suelos

Los suelos que predominan en la cuenca se ubican en seis grupos: leptosoles, regosoles, cambisoles, luvisoles, feozems y vertisoles.



Paisajes representativos de montaña. Terrazas estructurales, localidad Oquistón Candelaria (arriba), relieve mesiforme, localidad El Triunfo (en medio) y elevaciones bajas con karst de dolinas y poljes inundados, zona de los lagos (abajo). (Fotografías tomadas por Lucy Mora).



Paisajes representativos de lomerío. Lomeríos sobre mogotes relictos, localidad La Patria (izquierda) y lomeríos bajos de pendiente continua, localidad Ejido Santa Rita (derecha). (Fotografías tomadas por Lucy Mora).

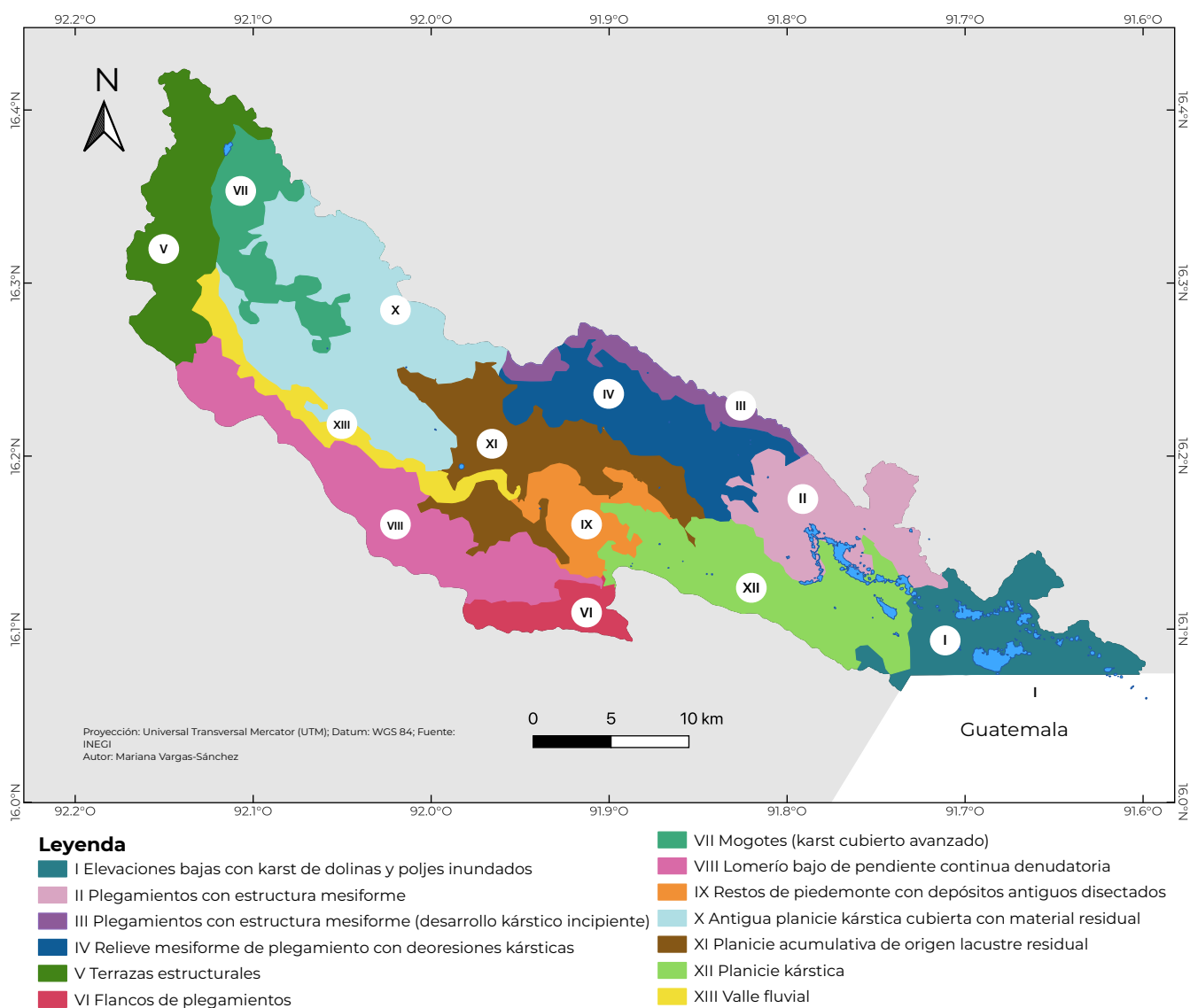


Paisajes representativos de planicies. Antiguas planicies kársticas, localidad Los Higos (superior izquierda); planicies de acumulación lacustre, localidad Venustiano Carranza (superior derecha); y valle fluvial, vista desde vuelo de las localidades de Venustiano Carranza y el Carrizal, (derecha e izquierda abajo). (Fotografías tomadas por Lucy Mora).

- Leptosoles. Son suelos poco profundos y pedregosos, tiene un horizonte oscuro rico en humus. Se identifican en la zona de laderas abruptas de la cuenca, a pesar de que tienen mucho humus superficial, no son tan buenos para la agricultura porque las raíces no pueden profundizar mucho. Requiere buen manejo para no perderlo por erosión.
- Regosoles. También son suelos poco profundos, a lo largo del perfil no son pedregosos. Son suelos pobres en materia

orgánica o humus, por lo que no son tan aptos para la producción agrícola. Sin embargo, ayudan a infiltrar el agua y favorecer la recarga a los acuíferos.

- Cambisoles. Son suelos que tienen un poco de arcilla o material fino en los horizontes inferiores. Se caracterizan por tener una coloración amarillenta o parda. Son suelos aptos para la agricultura y la producción forestal ya que almacenan más nutrientes y son capaces de retener más agua.
- Luvisoles. Son suelos más arcillosos y



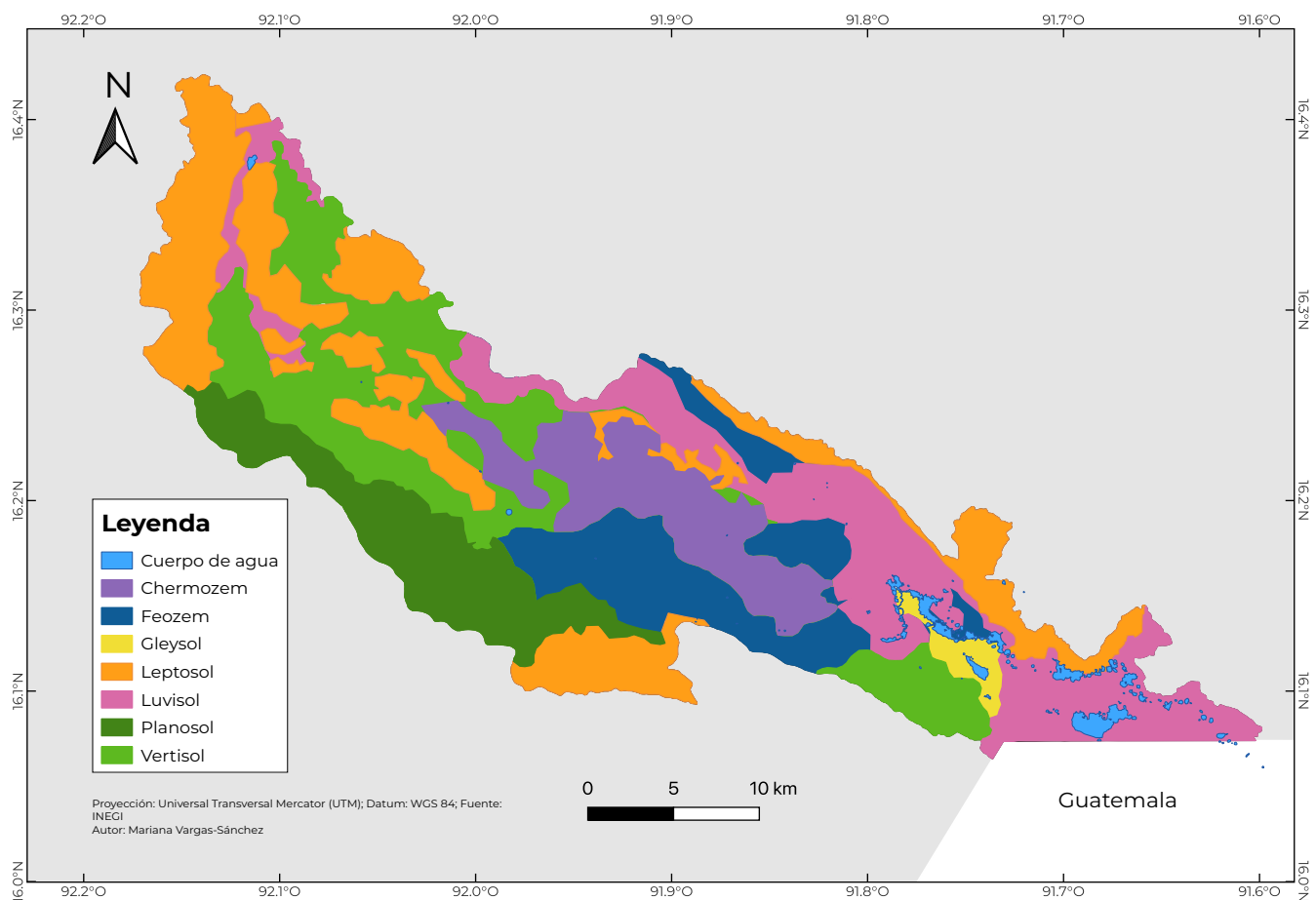
Geomorfología de la cuenca del Río Grande de Comitán.

profundos, generalmente se encuentran en zonas planas al pie de laderas. Se caracterizan por su color amarillento intenso y hasta rojizo. La profundidad los hace más aptos para la producción agrícola, también almacenan más agua. Sin embargo, en algunos lugares pueden ser ácidos o ligeramente ácidos, lo que limita la producción agrícola.

- Feozems. Son suelos de mediana profundidad que se caracterizan por tener mucha acumulación de humus, además son muy ricos en nutrientes, por lo que se consideran muy aptos para la producción agrícola.
- Vertisoles. Estos suelos se pueden encontrar

en zonas planas en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas. Son generalmente muy oscuros debido al alto contenido de materia orgánica, otra característica es que contienen mucha arcilla. Una propiedad que los caracteriza es el alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada. Esta propiedad hace que, aunque son muy fértiles, son difíciles de trabajar.

En la parte alta de la cuenca se encuentra una superficie importante cubierta por leptosoles, principalmente en la zona de montaña. Se trata de suelos vulnerables a la erosión, por lo tanto, deben ser prioridad para el manejo y conservación, ya



Suelos presentes en la cuenca del Río Grande de Comitán.

que representan las zonas de mayor aporte de sedimentos.

En la parte media predominan los vertisoles y feozems, suelos ricos en materia orgánica y con alto potencial para la agricultura. En particular los feozems, por el uso intensivo en la agricultura y mal manejo, pueden perder su capa orgánica y degradarse perdiendo sus potenciales de producción agrícola y almacenamiento de agua.

En la parte baja de la cuenca se identifican luvisoles, suelos con alto contenido de materia orgánica en la superficie y contenido de arcilla en los horizontes subsuperficiales.



Capítulo 3

LAS LAGUNAS DE MONTEBELLO

Javier Alcocer, Fernando Álvarez, Óscar Escolero, Rafael A. López,
Luis A. Oseguera y Roberto Bonifaz

Las Lagunas de Montebello

Javier Alcocer, Fernando Álvarez, Óscar Escolero, Rafael A. López, Luis A. Oseguera y Roberto Bonifaz

3.1 ¿Dónde están y cuántas son?

Las “Lagunas de Montebello” se encuentran en la región sureste del Estado de Chiapas en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre de Chiapas, en la frontera con Guatemala. Hidrológicamente la zona pertenece a la Cuenca de Comitán. Esta cuenca es parte de la Región Hidrológica Administrativa No. 30, Frontera Sur, Grijalva-Usumacinta N° 3056, en la provincia de la Meseta Central (Altiplanicie o Altos de Chiapas). La cuenca del Río Grande de Comitán está conformada por el afluente principal Río Grande. Este recorre zonas urbanas y agrícolas antes de desembocar en las “Lagunas de Montebello”.

La cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello es kárstica conformada por secuencias sedimentarias de origen marino y transicional. Esta región ha estado sujeta a diversos procesos geológicos como son la sedimentación, plegamiento y fallamiento. Los pliegues principales y fallas geológicas tienen una orientación NO a SE sobre la cual se alinean las lagunas.

El clima de la zona es templado, Cb(m)(f)ig, con un verano largo y fresco, húmedo y con un régimen

típico de precipitación en verano. De acuerdo con los datos de la estación meteorológica “Tziscão” (16.1°N, 91.63°O; 1,475 m s.n.m.), registra una temperatura media anual de 17.4 °C, precipitación media anual de 2,279 mm y evaporación media anual de 948 mm. Los meses más calurosos del año son abril y mayo, y la temporada cálida de lluvias se presenta entre junio y octubre, mientras que la temporada fría y seca se observa entre enero y mayo. La temperatura media mensual es de 23.6 °C; el mes más frío es enero, con 20.9 °C de temperatura promedio y el más cálido es abril, con un promedio de 25.6 °C.

El uso de suelo en la región lagunar está destinado a la conservación de bosques de montaña, encino y coníferas. Se estima que el 73% de la superficie está ocupada por bosques de coníferas, de los cuales el 44% está perturbado y presenta vegetación secundaria (acahuales), el 9% por cultivos agrícolas (de riego y de temporal lluvioso) y el 16% son cuerpos de agua. Sin embargo, en las últimas décadas, se ha registrado un notable aumento de la actividad agrícola sobre terrenos que fueron antes superficie forestal.

Los cuerpos lagunares se desarrollaron sobre

unidades estratigráficas del Cretácico (menos 145 millones de años), principalmente sobre el grupo Sierra Madre del Cretácico Superior y las formaciones Malpaso y Chinameca del Cretácico Inferior (entre 145 y 66 millones de años). En el área lagunar afloran rocas caliza-dolomía y calizalutita de la Formación Sierra Madre de edad Albiano-Cenomaniano (113 y 100.5 millones de años). La mayor parte de los suelos de la región lagunar se han desarrollado a partir de las calizas o de sedimentos fluviales y lacustres. En la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello se encuentran cinco grupos de suelos: leptosoles, luvisoles, feozems, planosoles y vertisoles.

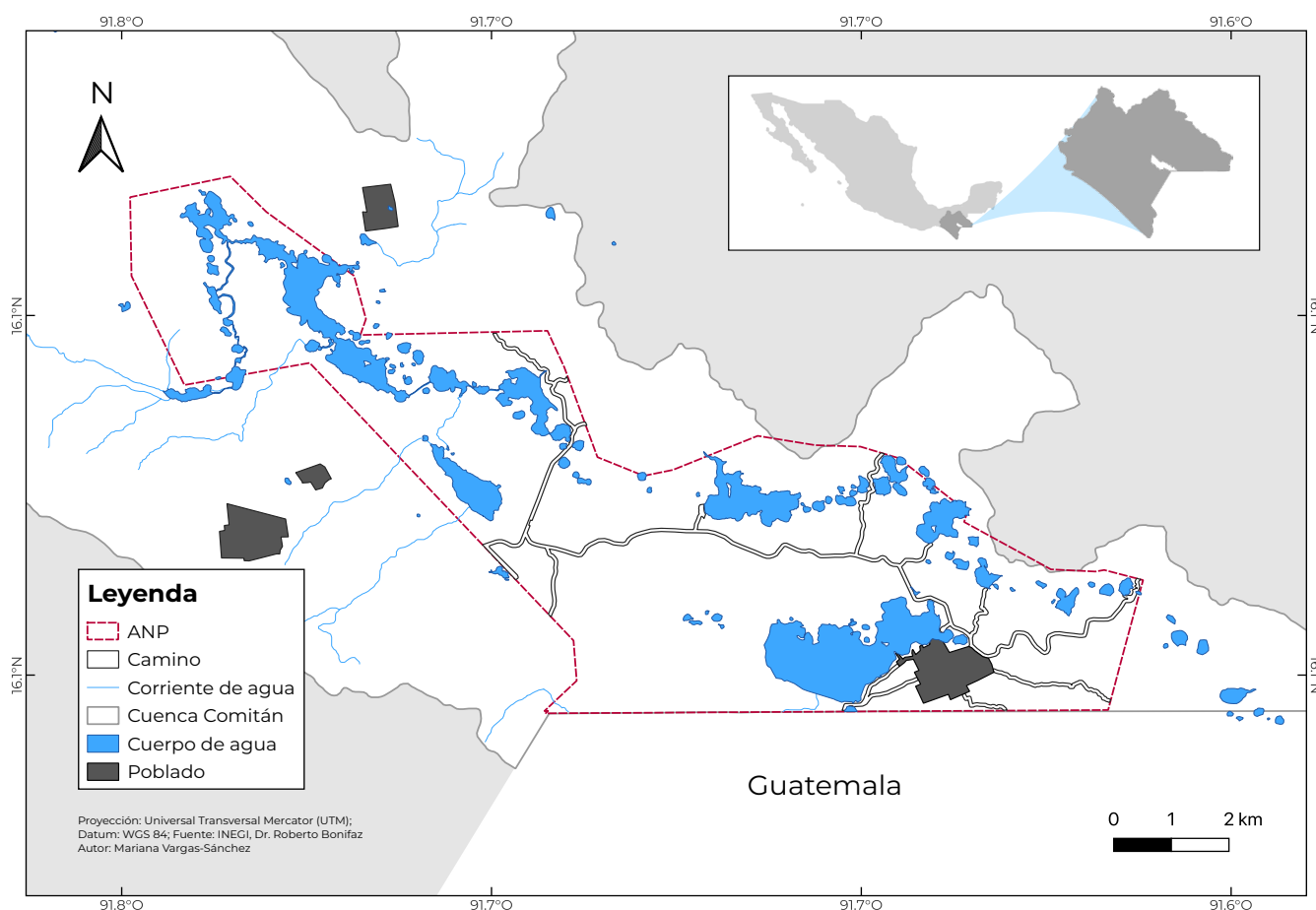
Quizás una de las primeras preguntas que le surgen a cualquier visitante al llegar a las “Lagunas de Montebello” es ¿cuántas lagunas

hay? Pues bien, el número de cuerpos acuáticos en la región de acuerdo con el conteo realizado por el Dr. Roberto Bonifaz es de 139 y muestran una enorme diversidad de formas y tamaños.

Muchas de estas lagunas se encuentran dentro del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”. Este Parque Nacional se ubica a los 16°04'-16°10' N y 91°37'-91°47' O, a una altitud de 1,500 m en el km 39.5 carretera Comitán-Lagos de Montebello; abarca una superficie de aproximadamente 6,425 hectáreas y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria; éste último abarca 95% de la superficie del Parque Nacional.

3.2 ¿Cómo se formaron?

Las “Lagunas de Montebello” se originaron a través de la disolución de la roca caliza, de



Las “Lagunas de Montebello”, Chiapas.

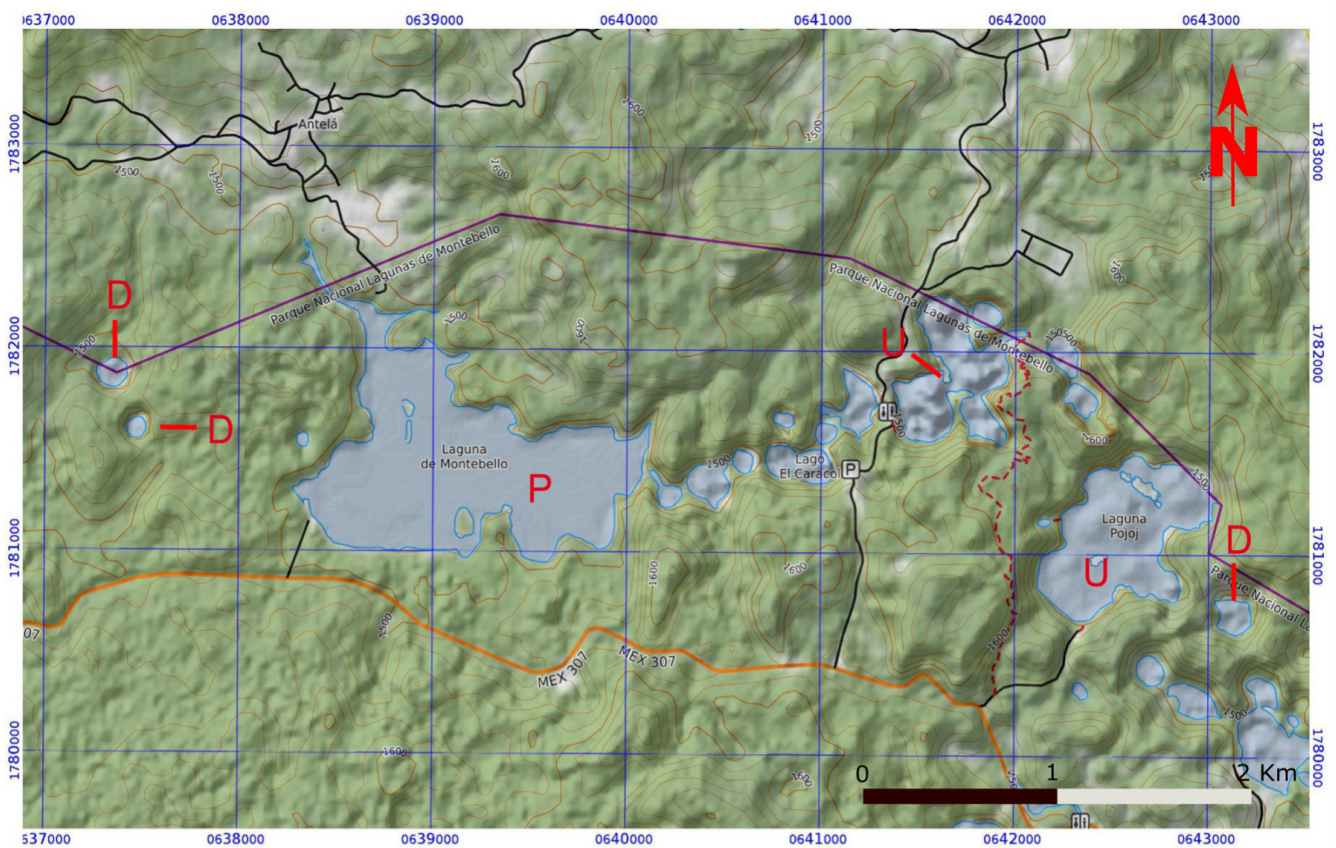
manera equivalente a los cenotes de la Península de Yucatán. La región de Montebello es una zona denominada kárstica porque está compuesta por rocas solubles como la caliza y los fenómenos de disolución han actuado de manera intensa para formar cuevas y lagunas entre muchas otras formas kársticas.

La palabra karst proviene de la región de Kras, ubicada entre Italia y Eslovenia, que es una meseta calcárea donde los fenómenos o relieve kársticos son muy abundantes. Actualmente se define al karst como “formas de relieve o paisaje originada por una serie de procesos que ocurren producto de la disolución de las rocas”.

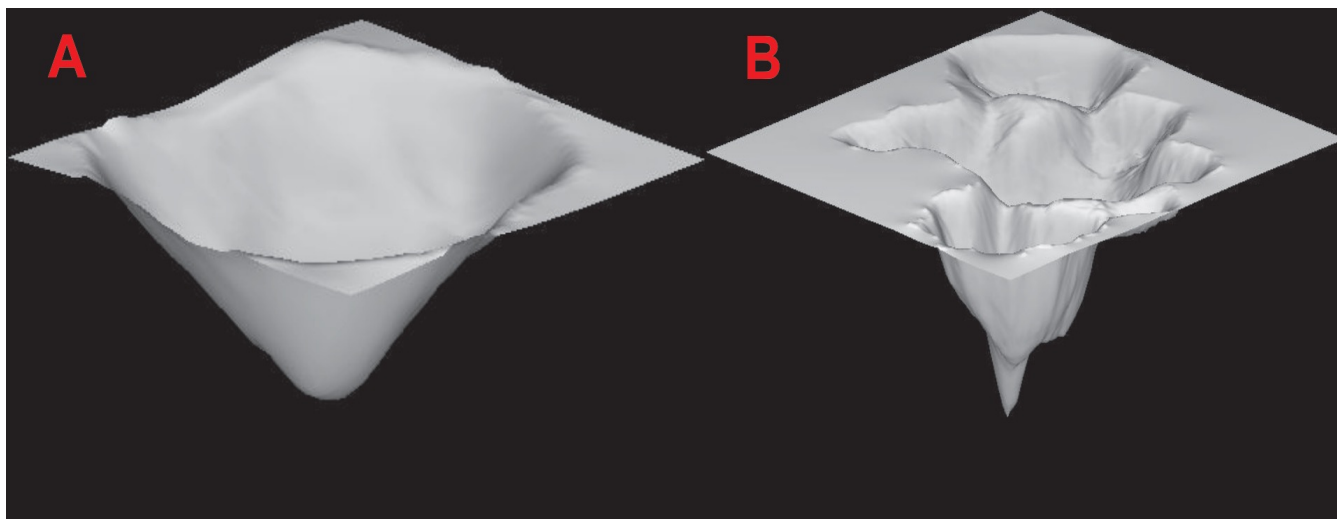
La roca más abundante de la región de Montebello es la roca caliza que está compuesta por carbonato de calcio (CaCO_3) que es un compuesto químico

muy soluble en agua y en presencia de ácidos. Uno de estos ácidos es el ácido carbónico (H_2CO_3) que se produce al reaccionar el dióxido de carbono (CO_2) con el agua (H_2O). El CO_2 tiene muchas fuentes incluyendo la atmósfera, pero tal vez la más importante para este caso en particular, es el que se genera después de una serie de reacciones que ocurren en el suelo. Principalmente por la respiración de plantas, raíces y microorganismos que producen CO_2 que se disuelve en el agua que pasa por el suelo donde se transforma en H_2CO_3 haciendo esta agua muy “agresiva” para la roca caliza.

Así es que en la región de Montebello se reúnen un conjunto de factores que favorecen la disolución de las rocas del área. Por una parte, la presencia de roca soluble, la caliza, mucha agua al ser un lugar



Algunas formas kársticas que se encuentran en la región de las “Lagunas de Montebello” (D = dolinas, P = poljes, U = uvalas). Nótese la Laguna de Montebello al centro y la Laguna Pojoj a la derecha. (Fuente: Maps © www.thunderforest.com, Data © www.osm.org/copyright). (Diagrama elaborado por Rafael A. López Martínez).



Modelos tridimensionales del lago Patinau (A) como ejemplo de una dolina clásica y Pojoj (B) donde se observa la coalescencia o fusión de varias dolinas para formar una uvala. (Fuente: Maps © www.thunderforest.com, Data © www.osm.org/copyright). (Diagrama elaborado por Rafael A. López Martínez).

tropical lluvioso y finalmente el CO_2 que aporta principalmente el suelo. Esta es una excelente receta para formar terrenos o paisajes kársticos.

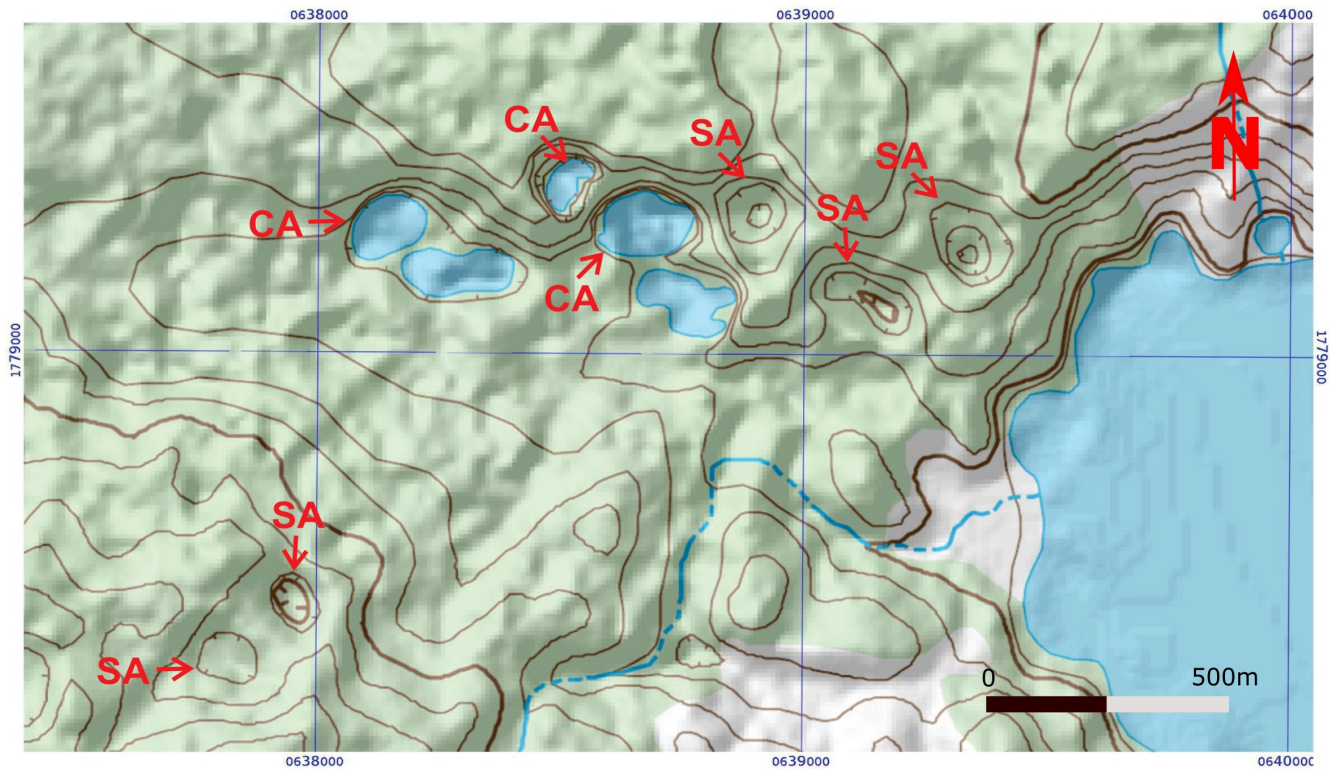
Existe una enorme variedad de formas kársticas que se pueden encontrar en la región de Montebello. Sin embargo, la forma más representativa del karst superficial son las denominadas “dolinas” que son depresiones cerradas de forma circular que no sobrepasan 1 km de diámetro. Las dolinas abundan en Montebello. Cuando por procesos de crecimiento horizontal dos dolinas se unen forman una uvala y cuando el diámetro sobrepasa 1 km se denomina polje.

No todas las dolinas tienen agua; de hecho, lo más común es que las dolinas no posean agua en su interior y solo si llegan a tocar el manto acuífero se llenan de agua de manera permanente y a veces intermitente tal y como sucede en las “Lagunas de Montebello”.

Otro aspecto fundamental para entender el origen de estas lagunas kársticas es que son poligenéticas, esto es, con distintos orígenes, lo que significa que son el resultado de varios procesos que han actuado a lo largo del tiempo

y las han ido moldeando. Las dolinas son formas de conducción que crecen en el sentido vertical por esta razón se presentan como estructuras más profundas. Para que esto suceda se necesita que la zona vadosa (zona no saturada de agua que está entre la superficie y el manto acuífero) sea amplia. En una fase inicial, los procesos de levantamiento que ocurren en la región propician una zona vadosa extensa por lo que las dolinas tienden a crecer en la vertical llegando a profundidades de hasta 198 m como es el caso de la laguna Pojoj, la más profunda de la región.

Los procesos de levantamiento tectónico no son continuos, sino que existen momentos en los que la zona deja de levantarse y alcanza cierta estabilidad. Es aquí cuando los cambios de nivel de base (elevación del continente) hacen posible que exista disolución en el sentido horizontal y las dolinas pueden hacerse más anchas y, si están cercanas, llegan a unirse formando uvalas. El proceso de formación de uvalas es favorecido por la existencia de zonas de debilidad tectónica como fallas haciendo que las dolinas se encuentren orientadas en direcciones preferenciales.



Dolinas diversas sin agua (SA) y con agua (CA) en la región de Montebello. El color azul indica la presencia de agua. Nótese la Laguna Montebello a la derecha. (Fuente: Maps © www.thunderforest.com, Data © www.osm.org/copyright). (Diagrama elaborado por Rafael A. López Martínez).

Sin embargo, existe una forma kárstica que es aún más compleja en su origen y evolución, el polje. En esta clasificación se cuentan lagunas como San Lorenzo, Montebello y Tzisco. El origen de los poljes es extremadamente complejo. En su origen y evolución intervienen procesos de disolución, pero también procesos fluviales y sedimentarios. Algunas de las lagunas como el caso de Montebello tienen en su interior antiguos cauces de ríos que quedaron sumergidos al inundarse el polje.

Las dolinas son formas que llevan agua en el sentido vertical hacia zonas más profundas. Para que esto pueda suceder debe existir una zona sin agua entre la superficie y el manto acuífero (a la que llamamos zona vadosa) que sea de un espesor considerable, esto es, varios metros. En una fase inicial, los procesos tectónicos que han levantado la región hacen que la superficie esté cada vez más alta y por tanto la zona vadosa sea cada vez más

grande. Esto favorece el crecimiento de las dolinas que tratan de llevar el agua desde la superficie a cada vez mayor profundidad, llegando a alcanzar profundidades de hasta 198 m tal como es el caso de la laguna Pojoj, la más profunda registrada de las Lagunas de Montebello.

3.3 ¿Qué forma y dimensiones tienen?

Las “Lagunas de Montebello” muestran una enorme diversidad de dimensiones. Aunque no ha sido posible el estudiarlas todas y cada una de ellas, una muestra representativa de éstas incluyendo las más grandes, da una buena idea de cuáles son sus dimensiones. Las lagunas presentan un abanico amplio en sus dimensiones, con lagunas pequeñas y someras, lagunas pequeñas y profundas, lagunas extensas y profundas y lagunas extensas y someras.

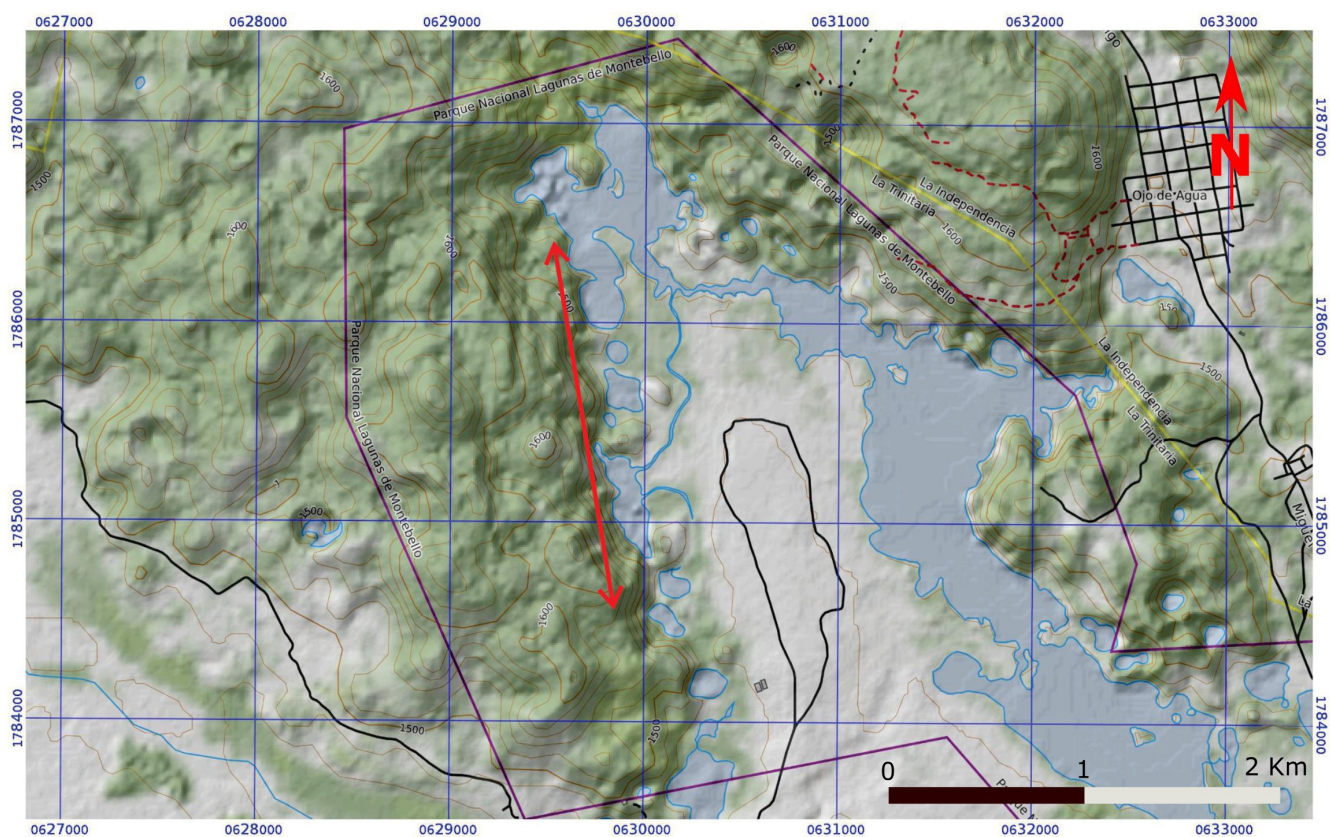
El rango de variación encontrado en su longitud

máxima va de 0.14 y hasta 3.2 km de largo; con respecto al ancho, éste va desde 0.11 y hasta 1.48 km. Con relación a sus áreas superficiales éstas fluctúan de 1.1 hasta 306.6 hectáreas; sus perímetros o líneas de costa van de 0.42 hasta 15.1 km. Finalmente, los volúmenes de agua almacenados en sus cuencas fluctúan de 0.00004 a 0.08852 km³.

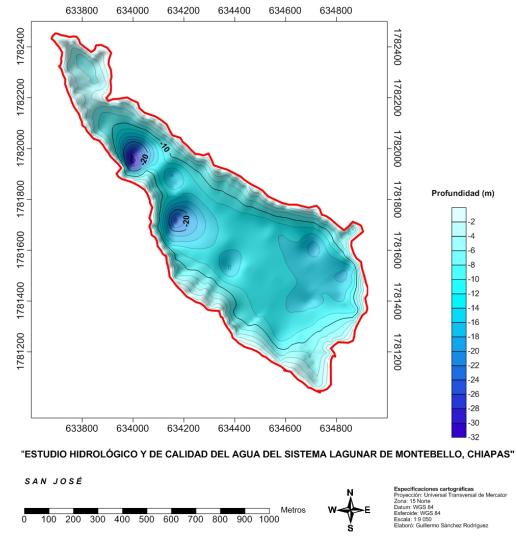
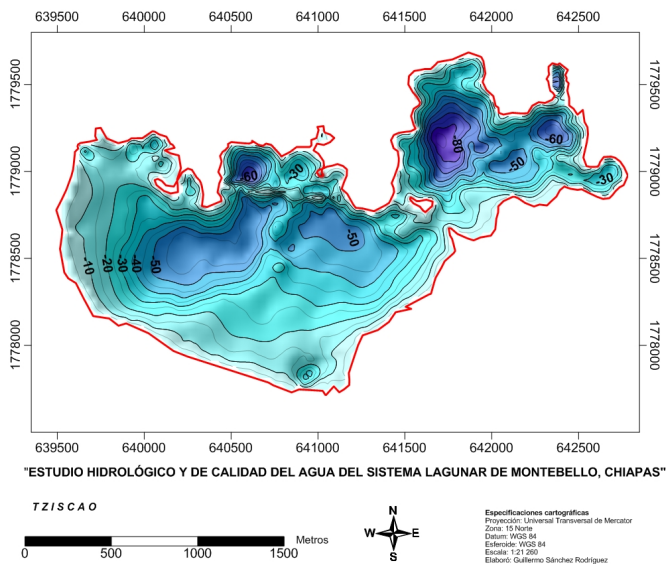
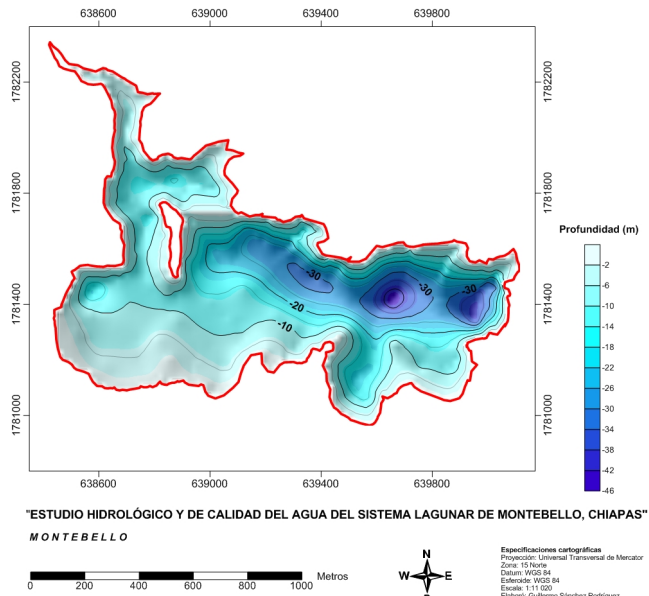
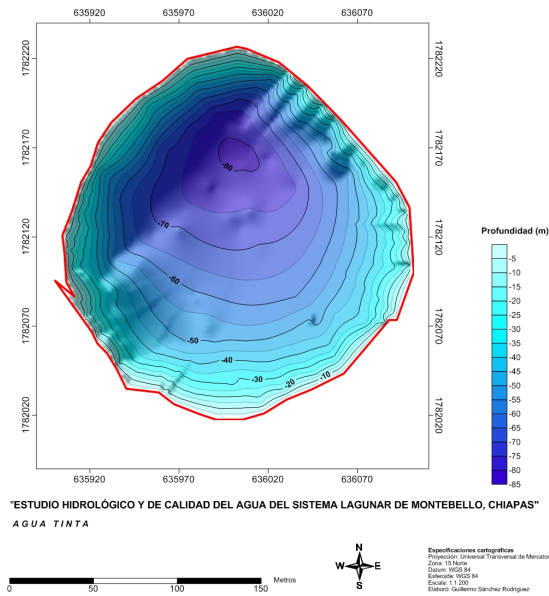
Las formas y dimensiones de los lagos son producto de su origen por disolución del terreno kárstico, por ello sus formas varían de casi circular a elíptica, cuando son dolinas típicas. Sin embargo, cuando se fusionan dos o más dolinas para conformar lo que se conoce como poljes o uvalas, las formas finales son más bien triangulares, alargadas o incluso irregulares. Por otro lado, la forma predominante de sus cuencas

o concavidades que contienen el agua es la de conos truncados invertidos.

Finalmente, entre las dimensiones más sorprendentes de estas lagunas está su profundidad máxima. Aunque hay lagunas muy poco profundas o someras con tan solo 3 m, se han encontrado lagunas con profundidades de casi 200 m. Claro que las profundidades promedio, esto es, la profundidad más común presente en las lagunas fluctúa de entre 1.7 y 42.5 m. De cualquier manera, si se considera que la mayoría de los lagos y lagunas en México tienen profundidades inferiores a los 10 m e incluso más frecuentemente menores a los 5 m, las lagunas de Montebello pueden considerarse profundas. De las lagunas estudiadas, cinco de ellas [Pojoj (198 m), Cinco Lagos (162 m), La Encantada (89 m),



La formación de uvalas favorecida por la existencia de fallas y fracturas en las rocas. El eje de crecimiento o elongación de las uvalas, indicado por la flecha roja, es coincidente con la dirección de las fallas y fracturas en la zona. Nótese la Laguna San Lorenzo a la derecha. (Fuente: Maps © www.thunderforest.com, Data © www.osm.org/copyright). (Diagrama elaborado por Rafael A. López Martínez).



Mapas batimétricos de las lagunas Agua Tinta, San José, Montebello y Tziscoa. (Las líneas muestran las isobatas en metros).

Tziscoa (86 m) y San Lorenzo (67 m)] se cuentan hoy en día entre las más profundas de todo el país.

3.4 Transparencia y color

La manera como los habitantes de la zona detectaron que “algo” estaba pasando en las “Lagunas de Montebello” fue el cambio repentino tanto del color como de la transparencia de algunas de las lagunas como Vuelta al Agua. Las aguas originalmente azul cristalinas y muy transparentes se tornaron de color verdoso amarillento, turbias

y con presencia de natas flotando en la superficie, además del olor a “huevo podrido”.

El color y la transparencia de las lagunas se define por las sustancias que se encuentran disueltas o suspendidas en sus aguas. Las sustancias disueltas que imparten color al agua se conocen como “cromofóricas” y se pueden ejemplificar a través de las sustancias que le dan el color rojizo al vino tinto. Muchas veces estas sustancias (p. ej., ácidos húmicos y fúlvicos) proceden de los suelos, humedales y la vegetación terrestre que crece

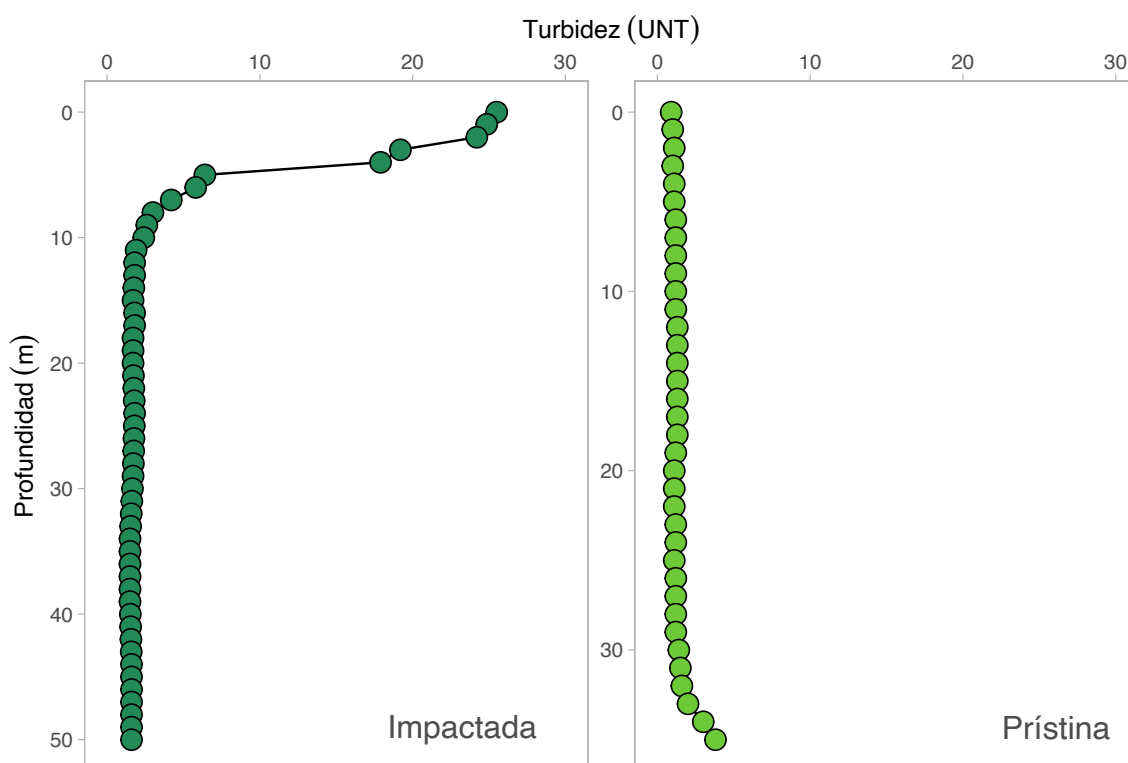
alrededor de los cuerpos acuáticos.

Por otro lado, los materiales finamente particulados y que permanecen suspendidos en las aguas y que se conocen con el nombre de “seston”, también aportan color al agua. El material particulado puede ser de origen biogénico, esto es, constituido principalmente por fitoplancton o bien terrígeno, esto es, constituido por arcillas y limos. El crecimiento masivo de fitoplancton torna verde las aguas, mientras que la presencia de arcillas y limos la torna de color café e incluso rojiza.

Tanto el material disuelto, pero sobre todo el particulado, aumentan la turbidez e impiden la penetración de la luz en el cuerpo acuático. En las “Lagunas de Montebello” el color y la transparencia de las aguas está dado por la cantidad y tipo de material particulado. Con referencia a ello se pueden distinguir dos grupos de lagunas. Las aguas de las lagunas ubicadas en la zona de montaña del sureste poseen concentraciones

bajas de seston (1.0 a 2.1 mg/L) y transparencia elevada (10.1 a 33.4 m). Las aguas de las lagunas ubicadas en la zona de planicie del noroeste presentan concentraciones elevadas de seston (4.1 a 21.0 mg/L) y transparencia reducida (2.6 a 6.3 m).

Mientras que el color del agua de las lagunas de la zona de montaña es azul cristalino, el color de las lagunas de la zona de planicie es verde. El intenso color verde de las aguas de las lagunas de la zona de planicie se debe a la presencia de grandes cantidades de fitoplancton. Las crecientes actividades humanas han estado vertiendo, entre sus desechos, fertilizantes que han promovido el crecimiento del fitoplancton dando por resultado la coloración verde y la elevada turbidez. Tiempo atrás, todas las lagunas presentaban aguas transparentes de color azul cristalino, aguas que volvieron famoso y muy atractivo turísticamente al sitio.



Perfiles verticales de turbidez de la laguna impactada Bosque Azul (izquierda) y la laguna prístina Ensueño (derecha). (UNT = unidades nefelométricas de turbidez). (Gráficas elaboradas por Mariana Vargas Sánchez).



Las aguas azul transparentes de la laguna Cinco Lagos (arriba) y las aguas verdes turbias de la laguna La Encantada (abajo). (Fotografías de Mariana Vargas Sánchez).

3.5 Temperatura y estratificación térmica

La estacionalidad climática de las zonas tropicales como en la que se encuentran las “Lagunas de Montebello” se compone de dos estaciones: la estación de secas (enero a mayo) y la estación de lluvias (junio a diciembre). De manera general, los meses fríos abarcan de noviembre a marzo que se traslapan en parte con la época seca, mientras que los meses cálidos se extienden de abril a octubre que inician a finales de la época seca y abarcan gran parte de la lluviosa. Hay etapas de transición con meses secos cálidos (abril y mayo) y meses lluviosos fríos (noviembre y diciembre).

La temperatura afecta la densidad del agua, de forma que cuando la temperatura se eleva la

densidad del agua disminuye volviéndose más ligera. Cuando la temperatura disminuye, la densidad del agua aumenta y ésta se torna más pesada.

Durante el frío invierno las lagunas muestran una temperatura homogéneamente baja a lo largo de toda la columna de agua y su densidad es similar de forma que el viento conduce a que el lago circule, es decir, que la columna de agua se mezcle de forma completa y se homogenice.

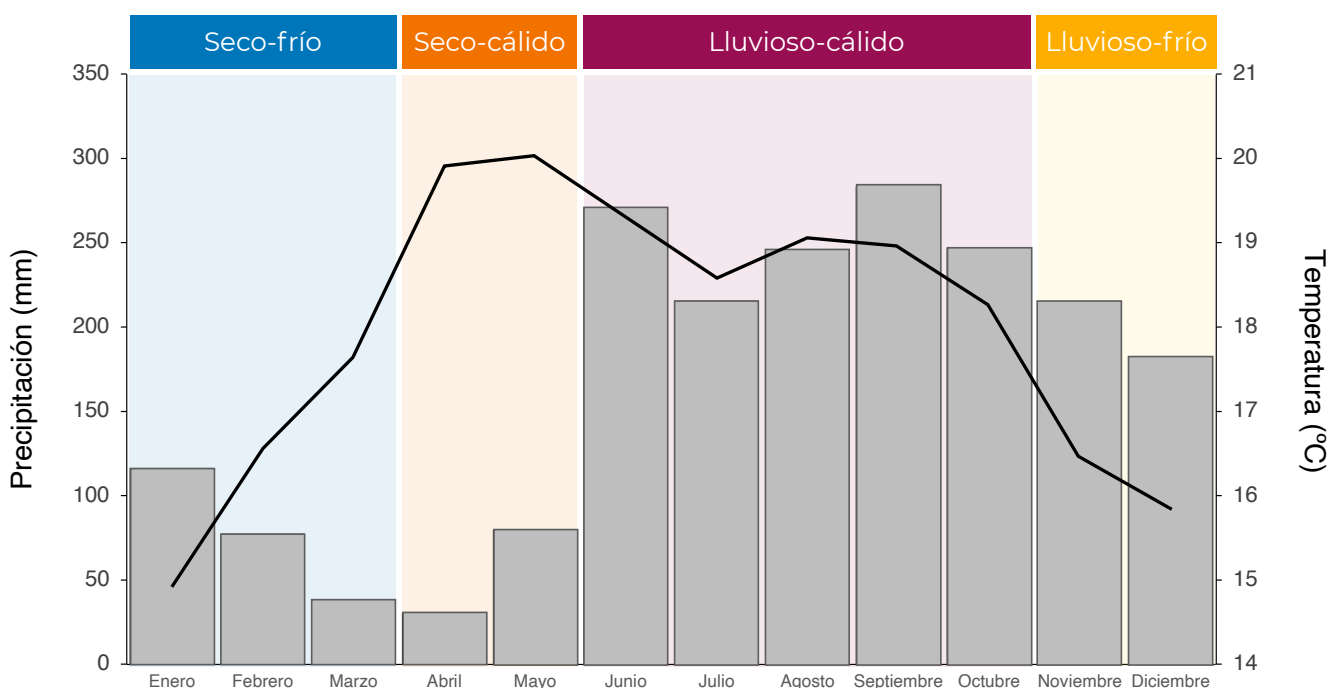
Por el contrario, durante la temporada cálida, el Sol calienta la porción superficial de las lagunas y con esto la densidad del agua de esta porción disminuye y se vuelve más ligera, flotando sobre la capa inferior de agua de la laguna que al encontrarse más fría es por lo tanto más densa y

pesada. El resultado es que la laguna se comporta como si estuviera constituida por dos capas de agua diferente, la caliente ligera flotando sobre la fría pesada; y a pesar de que el viento sople, las dos capas no se mezclan. En este caso se dice que la laguna está estratificada térmicamente, esto es, muestra dos estratos o capas de diferente temperatura y por ende de diferente densidad. La capa superior se denomina “epilimnion” mientras que la inferior se designa “hipolimnion”. Entre el epilimnion y el hipolimnion se da un cambio rápido de temperatura con la profundidad, la termoclina, que define a esta zona o capa intermedia como el “metalimnion”.

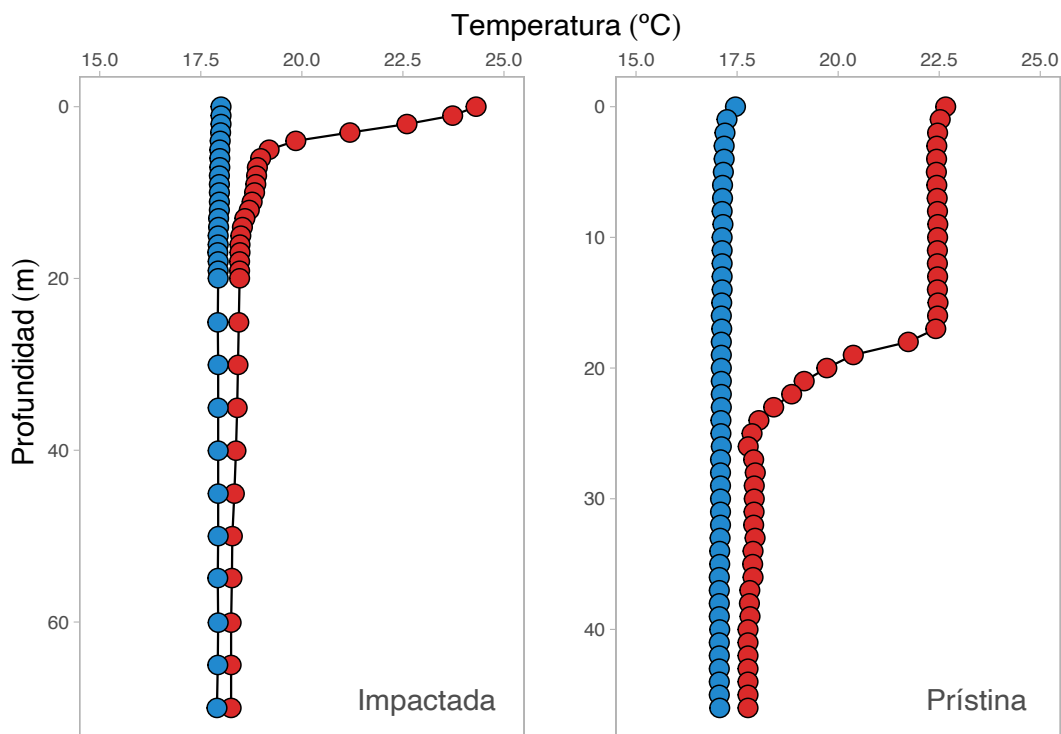
Las “Lagunas de Montebello” profundas se estratifican térmicamente por el largo periodo cálido de marzo o abril a octubre o noviembre, para mezclarse u homogeneizarse en la época fría, entre noviembre o diciembre y febrero o marzo. Las “Lagunas de Montebello” someras no se estratifican térmicamente más que por periodos

cortos, más bien circulan frecuentemente a lo largo del año. En casos extremos, en el mismo día se estratifican durante las horas de mayor insolación, solo para circular nuevamente al disminuir la temperatura por la tarde, noche y madrugada. Al ser tan someros, el viento puede actuar hasta el fondo de la laguna, mezclándola fácilmente. Al aumentar la profundidad, al viento le cuesta más trabajo poder mezclar toda la columna.

En resumen, las “Lagunas de Montebello” se dividen en dos grupos de acuerdo con su comportamiento térmico. Se denominan “monomícticas cálidas” las que circulan y mezclan completamente su columna de agua una vez al año asociado al invierno y permanecen estratificadas el resto del año. Y el segundo grupo, las “polimícticas cálidas” son las que circulan frecuentemente alternando periodos de mezcla con periodos de estratificación. Entre las lagunas polimícticas cálidas se cuentan Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush. Las



Temperatura ambiental (línea negra) y precipitación (barras grises) media mensual en la estación climática de Tzisco. (Gráfica elaborada por Mariana Vargas Sánchez).



Perfiles verticales de temperatura de la laguna La Encantada (impactada; izquierda) y Montebello (prístina; derecha). Los puntos azules corresponden a la temporada de circulación cuando la columna de agua se encuentra mezclada y homogénea, mientras que los puntos rojos corresponden a la temporada de estratificación con aguas más cálidas en la capa superficial (epilimnion) y más frías en la capa de fondo (hipolimnion). (Gráficas elaboradas por Mariana Vargas Sánchez).

lagunas monomícticas cálidas son San Lorenzo, Bosque Azul, La Encantada, San José, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Kichail, Tzisco, Patianú y Dos Lagos.

3.6 Oxígeno disuelto y anoxia

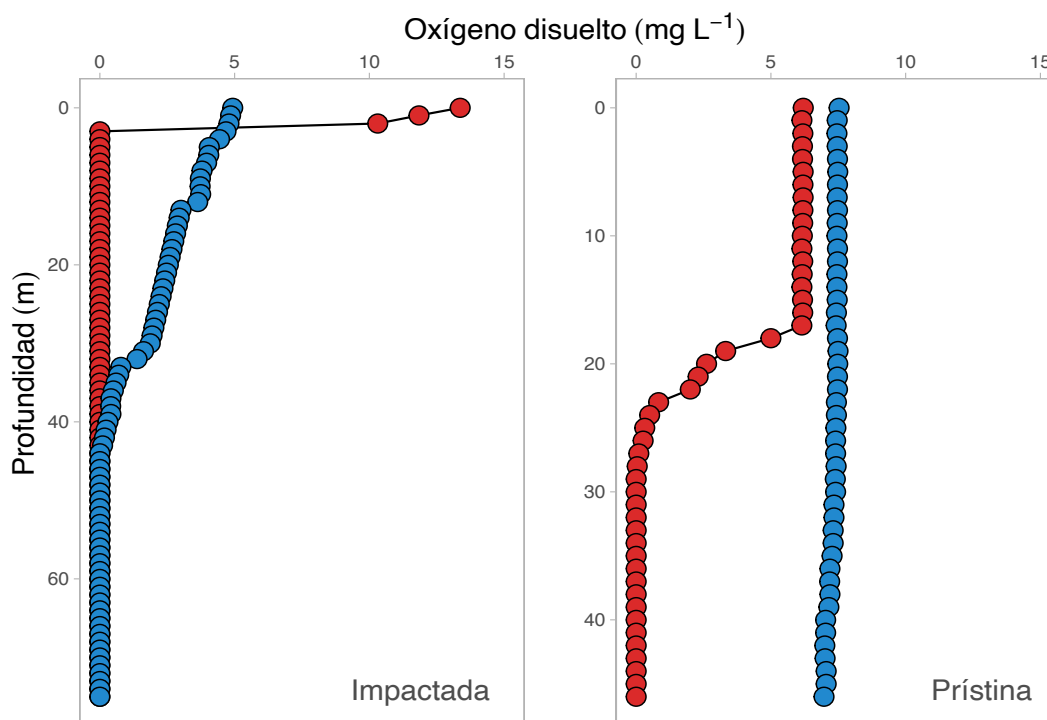
La importancia de que la columna de agua de las lagunas se mezcle y homogenice es que la turbulencia generada por el viento distribuye de forma pareja a lo largo de columna de agua importantes gases y materiales disueltos y particulados. El oxígeno disuelto es un gas vital al ser requerido por todos los organismos aerobios (p. ej., el fitoplancton, el zooplancton, los peces) para su respiración. El oxígeno que contiene una masa de agua proviene de dos fuentes, por difusión de la atmósfera al agua y como producto secundario de la reacción de la fotosíntesis.

La difusión atmosférica se presenta en la interfase

atmósfera-hidrosfera y es favorecida, es decir acelerada, por la turbulencia generada por el viento. En el caso de la fotosíntesis, para llevarse a cabo requiere de la presencia de luz solar, por lo tanto, se desarrolla en la capa superior más superficial y bien iluminada de las lagunas. El resultado es que el oxígeno disuelto tiende a acumularse en la capa superior o capa aerobia u óxica.

La capa profunda está alejada de la atmósfera y frecuentemente es oscura por lo que la fotosíntesis no se lleva a cabo. Consecuentemente, a la capa profunda solo llega este gas a través de la difusión turbulenta desde la capa aerobia mediante la mezcla de la columna del agua generada por el viento. Cuando la mezcla es completa, el oxígeno disuelto alcanza hasta el fondo de las lagunas.

En resumen, cuando la laguna se encuentra en circulación es que se está mezclando, el



Perfiles verticales de distribución de oxígeno disueltode la laguna La Encantada (impactada; izquierda) y Montebello (prístina; derecha). Los puntos azules corresponden a la temporada de circulación, mientras que los puntos rojos corresponden a la temporada de estratificación. (Gráficas elaboradas por Mariana Vargas Sánchez).

oxígeno disuelto se redistribuye todo el tiempo garantizando su presencia a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, cuando la laguna se estratifica, la capa profunda o hipolimnion ya no se mezcla con la superficial o epilimnion y por ende deja de recibir este vital gas. Conforme se va consumiendo el oxígeno disuelto en el hipolimnion por la respiración de los organismos y el metabolismo microbiano, su concentración disminuye hasta alcanzar concentraciones bajas o hipóxicas o incluso anóxicas, esto es, la ausencia de oxígeno. Evidentemente, la anoxia impide que los organismos aerobios puedan habitar en el hipolimnion y de no poderse desplazar a otro sitio oxigenado, mueren. Bajo condiciones anóxicas se pueden producir gases tóxicos como el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno (con su típico olor a huevo podrido) y el metano.

En las lagunas tropicales que se estratifican por un

largo periodo, tal y como sucede en las “Lagunas de Montebello” profundas, el hipolimnion se torna anóxico y permanece así hasta que llega el invierno y con éste la mezcla que permite que toda la columna de agua vuelva a oxigenarse. Sin embargo, cuando las lagunas son eutróficas, esto es, muy productivas, la cantidad de fitoplancton es tan grande que mucho de éste muere, se deposita en el fondo y las bacterias lo descomponen para lo cual emplean grandes cantidades de oxígeno disuelto. Bajo estas condiciones, aún durante la circulación o mezcla, el fondo de la laguna se mantiene anóxico.

3.7 Los sedimentos lagunares

Los sedimentos en el sistema lagunar de Montebello son el resultado de la acumulación de material particulado depositado en los cuerpos de agua. El origen de los sedimentos puede darse



en el lago mismo y son denominados autóctonos, tales como restos de los organismos que viven en las aguas, o bien, pueden proceder del exterior, a través de procesos de erosión de los suelos de la cuenca del Río Grande de Comitán y que son denominados alóctonos, tales como arcillas y limos acarreados de los suelos.

Los sedimentos se van depositando y acumulando a lo largo del tiempo en el fondo de las lagunas azolvándolas, esto es, rellenándolas, haciendo que poco a poco disminuya su profundidad. Los sedimentos del fondo de las lagunas pueden ser orgánicos cuando predomina el contenido de materia orgánica en éstos o bien terrígeno cuando predomina el contenido de arcillas y limos.

Para que los sedimentos lleguen al sistema lagunar han tenido que pasar diferentes procesos: desprendimiento, transporte y depósito de las partículas de suelo. Para que se lleve a cabo la sedimentación en un lugar es porque ha sucedido erosión de suelo en la zona circundante.

Se conoce que la erosión es un proceso natural en la superficie terrestre, en donde las rocas y el suelo se desgastan por acción de agentes externos como el agua y el viento. Sin embargo, este proceso es acelerado por actividades como el cambio de uso de suelo, la agricultura mecanizada y también por el crecimiento urbano.

En particular hay factores que definen una mayor o menor tendencia a la erosión; entre éstos se cuentan: la precipitación (a mayor precipitación mayor erosión), el relieve (los relieves de montaña se erosionan más), la cobertura vegetal (con mayor cobertura vegetal hay menor riesgo a la erosión) y el tipo de suelo (los leptosoles son más vulnerables a la erosión) entre otros.

Evaluaciones de la pérdida de suelo en la cuenca que analizan los factores mencionados que determinan la erosión del suelo muestran que las zonas con mayor erosión corresponden a las superficies con agricultura de temporal, seguidas de los pastizales y las de agricultura de

riego. Claramente las zonas de bosque de pino son las que menor pérdida de suelo presenta, lo que evidencia el papel de la vegetación en la conservación de suelo.

Las actividades humanas en la zona como la deforestación, cuando se talan los bosques para convertirlos en tierras de cultivo agrícola o para asentamientos humanos, conllevan frecuentemente a: 1) un aumento en el aporte de fertilizantes que favorece el incremento de la productividad primaria en las aguas de las lagunas y 2) un aumento en la erosión de los suelos de la cuenca de captación. Ambos procesos conducen a que se aporten mayores cantidades de sedimentos, autóctonos en el primer caso y alóctonos en el segundo.

El análisis de los sedimentos de las “Lagunas de Montebello” mostró que hay dos grupos de lagunas, cada grupo con características sedimentarias diferentes. Los sedimentos de las lagunas ubicadas en la zona de montaña del sureste poseen sedimentos de textura o tamaño más gruesos o grandes y con mayor cantidad de materia orgánica recalcitrante, lo que significa que son de difícil degradación (p. ej., celulosas y hemicelulosas). Los sedimentos de las lagunas ubicadas en la zona de planicie del noroeste presentan sedimentos de textura más fina, de tamaño más pequeño y con mayor cantidad de materia orgánica de fácil degradación y enriquecida en nitrógeno.

Se presume que hace muchos años los sedimentos de todas las lagunas deberían de haber sido similares a los de las lagunas de la zona de montaña, sin embargo, el desarrollo creciente de actividades humanas en la zona los ha modificado. El incremento de las áreas agrícolas en detrimento

de las boscosas, así como el crecimiento de la población humana y sus desechos como aguas residuales (p. ej., aguas negras y grises, drenajes agrícolas y ganaderos) y aplicación de fertilizantes excesivos en los cultivos, han conducido a que se haya llevado a cabo un cambio en los sedimentos de las lagunas de la zona de planicie con relación a las de la zona de montaña.

La historia de cómo se han ido acumulando a lo largo del tiempo sedimentos en la laguna Balantetic, la primera del sistema lagunar que se conecta directamente con la descarga del río Grande de Comitán, así como en el lago San Lorenzo, ubicado un poco más adelante en la cadena de las lagunas de planicie, sugiere que la entrada de sedimentos ha tenido diferentes momentos de arribo masivo recientemente, lo que explica por qué hoy Balantetik es una de las lagunas más someras de todas y por qué ambas lagunas son actualmente turbias y eutróficas. En los últimos 70 años, estas lagunas han recibido tres pulsos importantes de sedimentos producto de la erosión en la cuenca. Con base en la composición química y biológica de los sedimentos, el primer pulso es previo a los años 1950s cuando la laguna recibió descargas de sedimentos que pueden relacionarse con los cambios en la legislación sobre la propiedad de la tierra y el establecimiento de la Reforma Agraria, momento en que se distribuyeron tierras para cultivo con la consecuente deforestación. El resultado fue la gran expansión del territorio agrícola y la pérdida tanto de zona boscosa como de gran cantidad de suelo por erosión. En las décadas de los 1960s a 2000s se identifican otros dos picos, los cuales se relacionan con la expansión de las zonas urbanas y por fenómenos migratorios, que incluyeron el arribo de migrantes

guatemaltecos que se dedicaron a la agricultura. Existe evidencia de que el impacto del cambio de uso de suelo y la erosión en la zona no es reciente ya que se ha podido identificar evidencia de este mismo proceso que data de épocas prehispánicas, cuando la zona fue ocupada por Mayas. Sin embargo, lo que es importante en este caso, es que los pulsos de entrada de sedimentos a las lagunas se han incrementado en frecuencia y magnitud por lo que la tasa de sedimentación de las lagunas, producto de la erosión de la cuenca, ha aumentado acelerando el proceso de azolvamiento haciendo peligrar su persistencia.

3.8 Los fertilizantes: nitrógeno y fósforo

Los agricultores agregan fertilizantes a los campos agrícolas para obtener cosechas más abundantes. La fertilización se lleva a cabo adicionando sales de fósforo y nitrógeno que son los principales nutrientes que las plantas necesitan para crecer. Pues bien, en los cuerpos acuáticos sucede lo mismo y dependiendo de la concentración o cantidad que existan de éstos, será mayor o menor el crecimiento de los productores primarios, por ejemplo, el fitoplancton. Pero no solo es importante la concentración que exista de nitrógeno y fósforo en el cuerpo acuático, sino también es muy importante la proporción en que se encuentre uno con respecto al otro. La razón es muy simple, el fitoplancton no usa la misma cantidad de estos elementos para formar materia orgánica mediante el proceso de la fotosíntesis. En general, la proporción requerida para formar materia orgánica es de 106 átomos de carbono y 16 de nitrógeno por cada fósforo. Ahora bien, el fitoplancton obtiene el carbono del dióxido de carbono disuelto en el agua, el cual está disponible

en elevadas cantidades, por lo que rara vez podría considerarse que pudiera limitar la producción primaria. Pero en el caso del nitrógeno y del fósforo es diferente ya que su disponibilidad en los cuerpos acuáticos suele ser mucho menor.

Cuando los agricultores de la región adicionan fertilizantes a sus campos agrícolas, parte de éstos son acarreados por la escorrentía (drenaje agrícola) hacia las lagunas, pero otra parte también puede infiltrarse a través del terreno kárstico hasta alcanzar los mantos freáticos y ser transportados por el flujo subterráneo hacia las lagunas. Se ha encontrado que estos fertilizantes, en particular el nitrógeno, están presentes en las aguas subterráneas de la región. Su concentración es mayor en las zonas cercanas a los cultivos intensivos. De cualquier manera, todas las descargas subterráneas que fluyen ya sean directamente a las lagunas o bien al Río Grande de Comitán, terminan por ser descargadas en el complejo lagunar favoreciendo su fertilización.

De la misma manera, el vertimiento de aguas negras crudas, esto es, sin tratamiento, también resulta en una fertilización de manera similar a como nuestros abuelos adicionaban abono de borrego, por ejemplo, para fertilizar sus cultivos. Ambas formas de fertilización, la química y la orgánica, tienen efectos similares cuando llegan a las lagunas, las fertilizan.

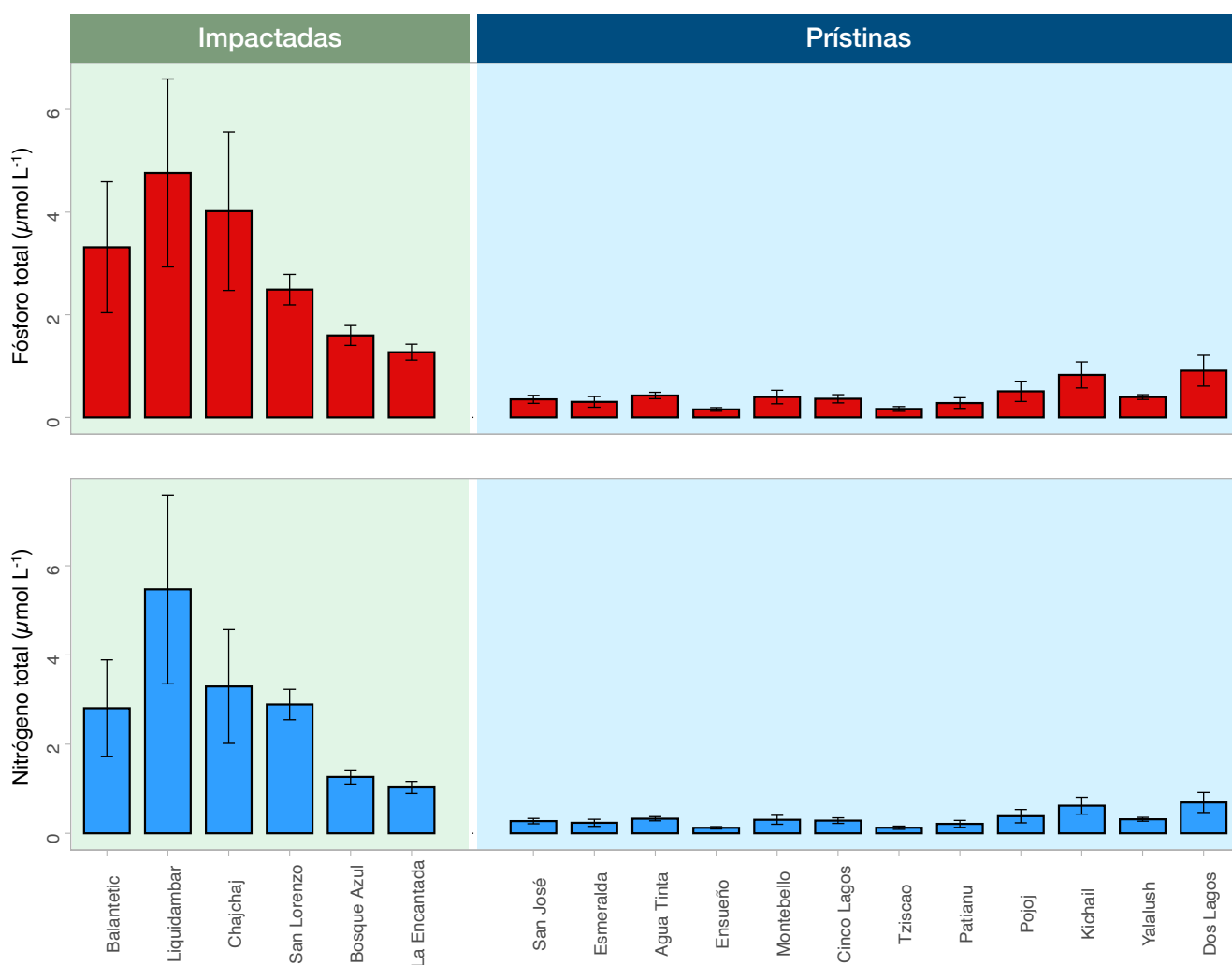
Las “Lagunas de Montebello” pueden catalogarse en dos tipos, las que tienen concentraciones elevadas de fertilizantes que también se denominan “eutróficas” y las que poseen bajas concentraciones de fertilizantes designadas como “oligotróficas”. Las eutróficas se localizan principalmente en la zona del NO, mientras que las oligotróficas se ubican hacia el SE. Esta

distribución corresponde en gran medida a que la mayoría de las actividades antrópicas tales como la agricultura, ganadería y desarrollo urbano se llevan a cabo predominantemente rodeando las lagunas de la zona de planicie y, por ende, es en éstas donde los desechos han tenido un mayor impacto. Por el contrario, en la zona de montaña estas actividades son menores y en consecuencia, las lagunas de esta porción se encuentran mejor conservadas.

Entre las lagunas eutróficas se pueden mencionar Balantetic, Chaj Chaj, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada, mientras que entre las oligotróficas se pueden mencionar a San José, Esmeralda,

Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Kichail, Tzisco, Patianú, Yalalush y Dos Lagos. Las concentraciones promedio de nitrógeno y fósforo totales en las lagunas eutróficas son superiores a 1 mg/L y alcanzando casi 5 mg/L, mientras que las concentraciones promedio de ambos elementos en las lagunas oligotróficas son inferiores a 1 mg/L y en general por debajo de 5 mg/L.

La proporción de nitrógeno a fósforo (N:P) en las lagunas varía de 1.9 a 2.9 con relación al requerido de 16, lo que indica que el fósforo se encuentra en mucho menor cantidad a la requerida en proporción al nitrógeno disponible. La razón



Concentración promedio de nitrógeno total (arriba) y de fósforo total (abajo) en las "Lagunas de Montebello". Las lagunas están acomodadas en el sentido de la zona de planicie (NW) a la montaña (SE). (Gráficas elaboradas por Mariana Vargas Sánchez).

por la que el fósforo es proporcionalmente el más escaso tiene que ver con las características del terreno en el que se formaron las lagunas. El terreno kárstico favorece que el fósforo disuelto en el agua se precipite en los sedimentos y por lo tanto no se encuentre disponible para ser consumido por el fitoplancton. De esta manera, el nutriente que limita la producción primaria en este tipo de lagunas es el fósforo ya que, aunque exista nitrógeno disponible, la falta de fósforo impide que se lleve a cabo la producción primaria. Los habitantes locales atestiguan que originalmente, como sus abuelos y bisabuelos platicaban, todas las lagunas eran oligotróficas, de aguas azul cristalino. Sin embargo, al incrementarse el aporte de fertilizantes derivados de la agricultura a las lagunas, principalmente de fósforo, la naturalmente baja productividad de las lagunas, su característica oligotrofia, se vio modificada. El elemento que otrora funcionara como limitante de la producción primaria, el fósforo, se volvió disponible en gran cantidad y con ello se favoreció el proceso de eutrofización que se vio reflejado en el cambio de coloración y transparencia de las aguas a verdes turbias, que se manifestó en el 2003.

3.9 Clorofila y eutrofización

La clorofila es un pigmento fotosintético que se encuentra presente en todos los organismos que realizan fotosíntesis; el fitoplancton no es la excepción. Por esta razón, la concentración de la clorofila se ha utilizado ampliamente como un indicador de la biomasa fitoplanctónica en las estimaciones de la productividad primaria en ecosistemas acuáticos. Su nombre proviene del griego "*chloros*" que quiere decir verde y por lo

que cuando hay gran abundancia de fitoplancton en los cuerpos acuáticos, estos se observan verdes, mientras que cuando hay muy poca cantidad de fitoplancton el color es azul.

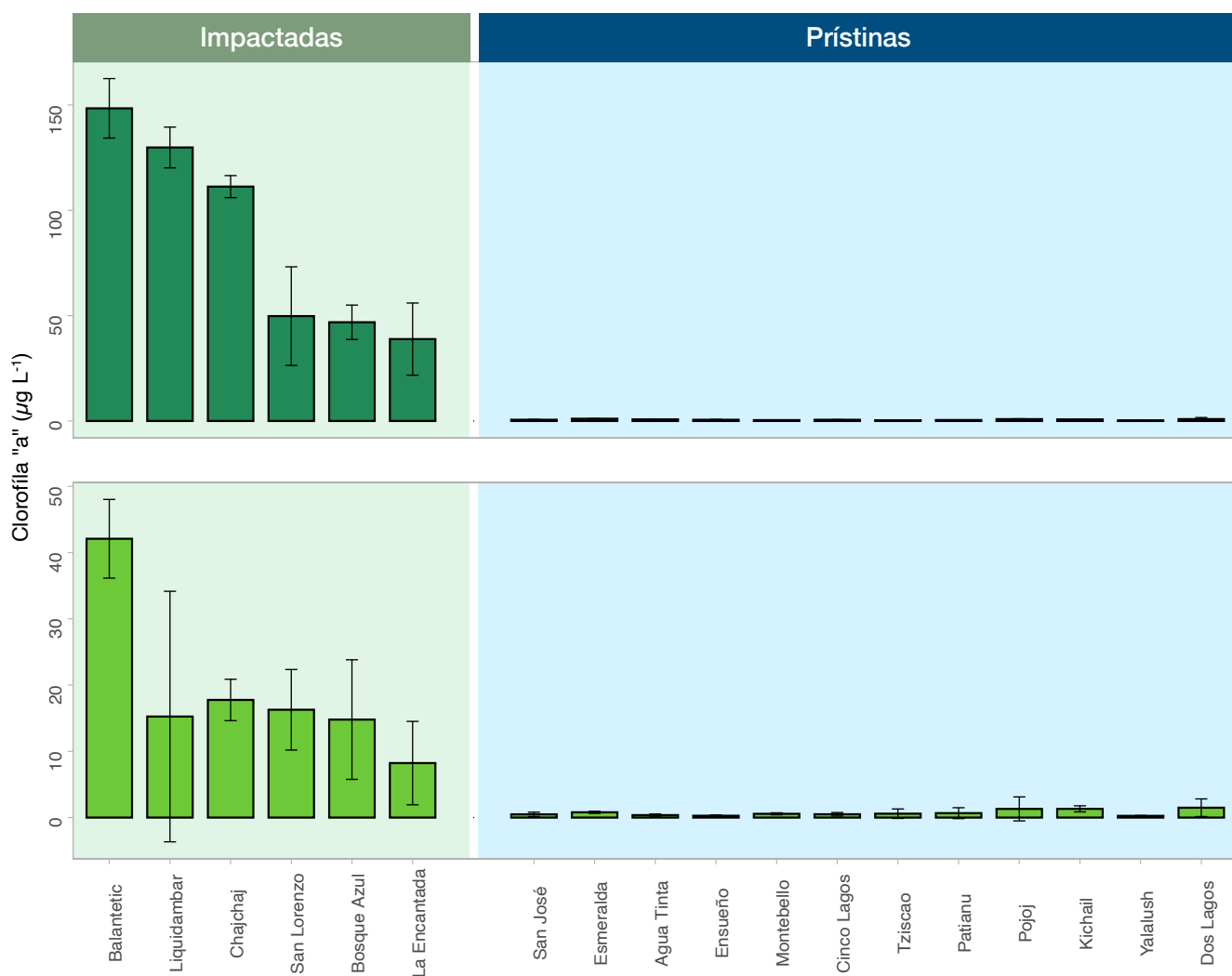
Si bien el aumento de los fertilizantes es un requisito para que la productividad primaria pueda incrementarse, la conversión de estos fertilizantes en materia orgánica empleando como fuente de energía la luz del sol, deriva en el resultado final que se observa en el cuerpo acuático. De esta manera, la concentración de la clorofila es evidencia clara del estado trófico o de productividad del cuerpo acuático.

Los términos oligotrófico y eutrófico refieren estadios en donde hay reducida o elevada generación de materia orgánica vegetal respectivamente, de fitoplancton en este caso, que es la base de la red trófica en los ecosistemas acuáticos. La medición de la concentración de clorofila representa una evidencia del grado de productividad de un cuerpo acuático. En el caso de las "Lagunas de Montebello" se presentan dos grupos claramente diferenciados con base en su concentración de clorofila. Las lagunas de la zona de planicie al NO, por ejemplo, Balantetic, Chaj Chaj, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada, presentan concentraciones promedio que superan los 8 mg/m³, pero llegando a alcanzar hasta casi 150 mg/m³. Por el otro lado, las lagunas de la zona de montaña del SE tales como San José, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Kichail, Tzisco, Patianú, Yalalush y Dos Lagos, presentan concentraciones menores a 1 mg/m³ y llegando tan bajo como 0.2 mg/m³.

Como se explica más adelante, cuando los cuerpos acuáticos se eutrofizan los cambios que se generan van más allá del aumento en la biomasa

de fitoplancton y su cambio de coloración al verde. La mayor disponibilidad de fertilizantes favorece a grupos diferentes de fitoplancton de aquellos que habitan en aguas oligotróficas. De esta manera, la abundante biomasa fitoplanctónica está compuesta por algas azul-verdes (cianofitas) principalmente y algas verdes (clorofitas). Las algas azul-verdes presentan adaptaciones para evitar ser consumidas como el desarrollo de vainas fibrosas, la formación de largos filamentos o colonias englobadas en mucilago, de forma tal que mucha de la biomasa que se genera, no puede ser consumida por los herbívoros, no se integra a

la red trófica y termina muriendo y depositándose en el fondo de las lagunas. En el fondo de las lagunas esta biomasa es descompuesta por los microorganismos empleando, mientras se agota, el oxígeno disuelto en el agua. Más aún, cuando se termina el oxígeno disuelto, los microorganismos siguen descomponiendo la materia orgánica, pero en este caso, en lugar de producir dióxido de carbono y agua, pueden generarse gases nocivos (sulfuro de hidrógeno y metano). La anoxia, así como los gases tóxicos son adversos para la vida de los organismos aerobios, además de producir malos olores y sabores al agua se incrementan



Concentración promedio de clorofila durante la época de estratificación (arriba) y circulación o mezcla (abajo) en las "Lagunas de Montebello". Las lagunas están acomodadas en el sentido de la zona de planicie (NO) a la montaña (SE). (Gráficas elaboradas por Mariana Vargas Sánchez).



San Lorenzo, una laguna eutr6fica. (Fotografía de Mariana Vargas Sánchez).

los costos y tiempos de tratamiento para poderla utilizar para otras actividades.

Los nutrimentos remineralizados en el fondo de la laguna quedan disponibles para ser usados por el fitoplancton en cuanto ésta se mezcle incrementando, aún más, la productividad primaria. De esta forma, la eutrofización es un proceso que degrada las lagunas disminuyendo la posibilidad de emplear los recursos acuáticos para diversos usos. Incluso, como se menciona más adelante, otro aspecto negativo de la eutrofización es que pueden generar condiciones de toxicidad.

3.10 “Florecimientos” t6xicos

El aumento en la disponibilidad de fertilizantes en los cuerpos acuáticos favorece el desarrollo de ciertos grupos de fitoplancton tales como las algas verdes, pero principalmente a las algas azul-verdes. Las “Lagunas de Montebello” que se han visto fertilizadas presentan un desarrollado masivo o “florecimiento” de fitoplancton, de ahí

su color verde intenso. Estos florecimientos son dominados por unas pocas especies de cianofitas, pero principalmente las del género *Planktothrix*.

Como cualquier especie, *Planktothrix* desarrolla estrategias para no ser consumida y ser la dominante en las lagunas en las que habita desplazando a otras especies competidoras. Una de estas estrategias es la de producir toxinas, en este caso se conocen generalmente como cianotoxinas, dentro de las que destacan las microcistinas porque han producido numerosos casos de intoxicaciones e incluso la muerte de ganado y en ocasiones de humanos al consumir agua con concentraciones elevadas de microcistinas.

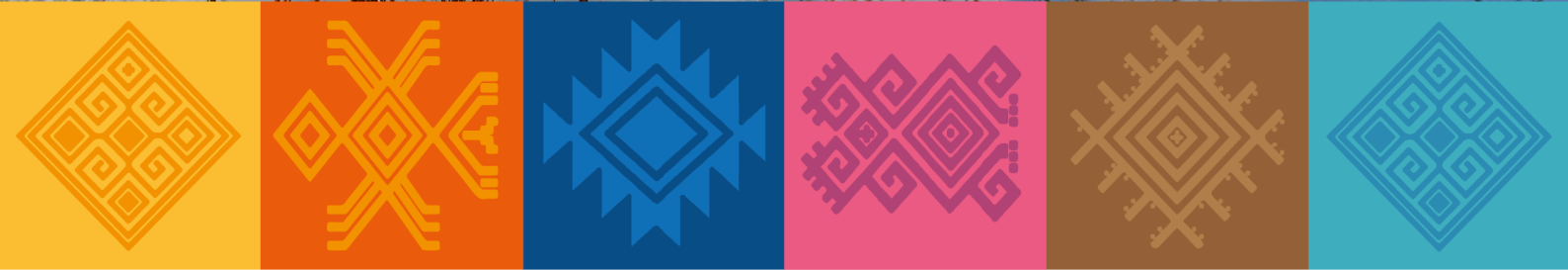
Aunque las “Lagunas de Montebello” se utilizan como suministro de agua potable, pesca, riego y turismo, no se había evaluado el riesgo de la posible presencia de cianotoxinas en estos cuerpos de agua. El fitoplancton de las “Lagunas de Montebello” estuvo dominado por las algas azul-verdes reconocidas como productoras



Florecimiento de algas azul-verdes formando una "nata" en la laguna San Lorenzo (Fotografía de Mariana Vargas Sánchez).

de cianotoxinas (*Planktothrix*, *Raphidiopsis*, y *Limnothrix*). Asimismo, se confirmó la presencia de microcistinas en concentraciones de 2.0 a 5.3 $\mu\text{g L}^{-1}$. Este rango indica una probabilidad relativamente baja de causar efectos agudos en la salud a través del consumo humano o fines recreativos.

Sin embargo, estos resultados obligan a implementar un programa de seguimiento para medir no solo las microcistinas sino toda la gama de cianotoxinas a lo largo de un ciclo anual para poder reconocer las concentraciones máximas de las toxinas y su potencial bioacumulación en la red alimentaria. Hay que recordar que una de las actividades que se desarrollan en estas lagunas es la pesca para consumo humano, así como la extracción de agua para irrigar cultivos los cuales, a final de cuentas, también son para consumo humano.



Capítulo 4

LA BIOTA ACUÁTICA

Javier Alcocer, Fernando Álvarez y Luis A. Oseguera

La biota acuática

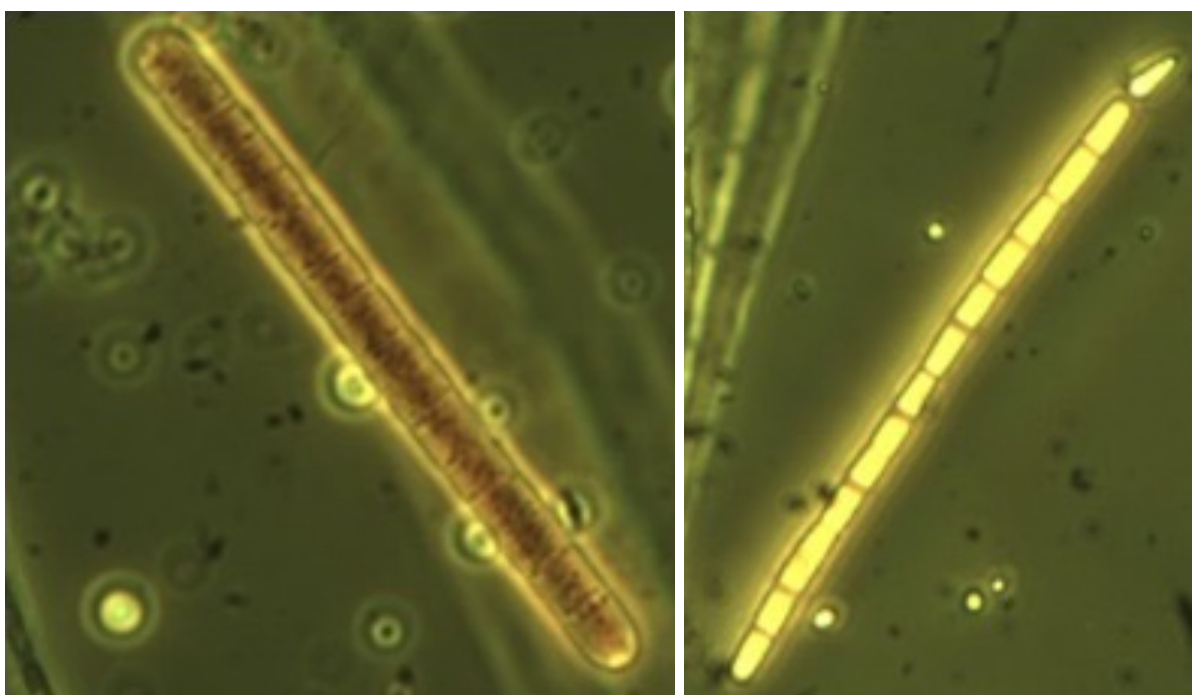
Javier Alcocer, Fernando Álvarez y Luis A. Oseguera

4.1 Biodiversidad

México se considera un país megadiverso. Es uno de los pocos países que poseen, en conjunto, el 70% de la diversidad de vertebrados y plantas vasculares de todo el mundo. Con respecto a la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos epicontinentales mexicanos, los grupos probablemente mejor conocidos son los peces y los anfibios, muchos de cuyas especies son endémicas. Se desconoce si la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos epicontinentales sigue

la misma tendencia de los ecosistemas terrestres, con un aumento hacia las zonas tropicales.

El elevado número de cuerpos acuáticos en esta región tropical sugiere que pudiera existir una elevada biodiversidad acuática. Al momento la biota de estas lagunas ha sido poco investigada, aunque con mayor detalle se han estudiado tanto el zooplancton o sea los pequeños animalitos que viven suspendidos en las aguas de las lagunas, así como los macroinvertebrados bentónicos, esto es, los organismos que habitan en los sedimentos del fondo de las lagunas.



Las algas azul-verdes *Planktothrix suspensa* (izquierda) y *Cylindrospermopsis cuspis* (derecha). (Fotografías de Tomás Almeida Becerril).

4.2 Fitoplancton

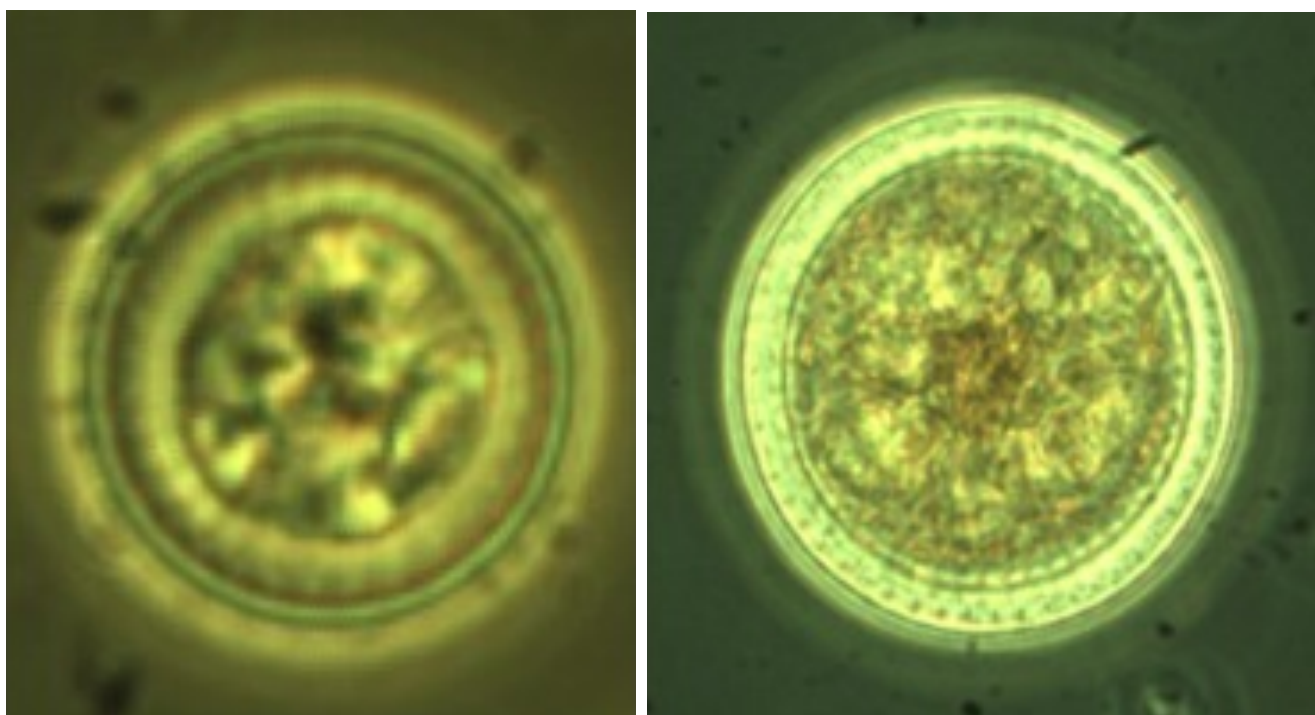
Se han registrado 78 taxones conformando el fitoplancton de las “Lagunas de Montebello”. Los grupos con mayor riqueza taxonómica fueron las algas azul-verdes con 23 taxones y las algas verdes con 27 taxones. Entre los taxones mejor distribuidos en las lagunas se cuentan la diatomea *Cyclotella meneghiniana* y el alga azul-verde *Synechocystis aquatilis*. Sin embargo, la riqueza taxonómica por laguna fluctuó entre 10 y 37 lo que indicó una gran heterogeneidad de fitoplancton entre las lagunas.

Las mayores biomásas de fitoplancton se encontraron en las lagunas eutróficas situadas en el NO, mientras que las menores biomásas se registraron en las lagunas oligotróficas ubicadas hacia el SE. La mayor biomasa de las lagunas eutróficas se asocia a las algas azul-verdes *Planktothrix suspensa* y *Cylindrospermopsis cuspidis*, mientras que las diatomeas *Cyclotella*

meneghiniana y otras especies de *Cyclotella* son abundantes en las oligotróficas.

4.3 Fauna acuática

El conteo de especies más reciente, incluyendo datos del año 2022, indica que se han reconocido 174 especies de animales acuáticos en las “Lagunas de Montebello”. Este conteo es desde luego preliminar y se estima, basados en estudios similares y considerando que hay varios grupos zoológicos que no se han estudiado a profundidad en la zona (por ejemplo, algunos grupos de insectos y de moluscos), que en los siguientes años se llegará a más de 300 especies. Hasta ahora el nivel de endemismo de toda la fauna acuática es del 4%, pero sin duda crecerá a más del 8% con la descripción de por lo menos 10 especies de varios grupos que han sido ya detectadas como especies nuevas y que esperan ser formalmente descritas. Este nivel de endemismo que se proyecta será más alto que, por ejemplo, el de toda la cuenca



Las diatomeas *Cyclotella meneghiniana* (izquierda) y *Cyclotella sp.* (derecha). (Fotografías de Tomás Almeida Becerril).

de Cuatro Ciénegas, Coahuila, que es considerada un “hotspot” de biodiversidad y una zona de alta prioridad para su conservación.

Por otra parte, la fauna acuática de las “Lagunas de Montebello” es de gran valor para la biodiversidad del sur de México y del país en general pues contiene muchos elementos faunísticos que son parte de la biota Centroamericana que penetra a nuestro país hasta el sur de Chiapas. La eventual pérdida de especies en esta región tendría un fuerte impacto para el país ya que se trata de ecosistemas y grupos de especies únicos dentro de la geografía mexicana.

Aunado al aspecto anterior, que asocia la región a Centroamérica, cabe mencionar que las “Lagunas de Montebello” se han formado en una latitud tropical, pero a cierta altitud (> 1,500 m s.n.m.), creando un escenario geográfico único. Respondiendo a estas condiciones particulares

es que la fauna acuática presenta también singularidades, puesto que hay componentes completamente tropicales mezclados con grupos de afinidades subtropicales y templadas, como los acociles.

4.3.1 Zooplancton

Dentro del zooplancton se han registrado 59 taxones, 25 copépodos, 13 cladóceros y 21 rotíferos. La riqueza taxonómica por laguna fue baja, esto es, en promedio, en cada una se encontraron solo 10 de los 59 taxones. Las especies mejor distribuidas fueron los copépodos *Mastigodiatomus maya* y *Mastigodiatomus nesus*, los cladóceros *Diaphanosoma cf. birgei*, *Ceriodaphnia dubia* y *Eubosmina tubicen*, así como el rotífero *Keratella americana*. Sin embargo, las lagunas eutróficas presentaron especies diferentes de las que se encontraron en las lagunas



El copépodo *Mastigodiatomus nesus* (izquierda) y el cladócero *Diaphanosoma birgei* (derecha). (Fotografías de Rocío Fernández).

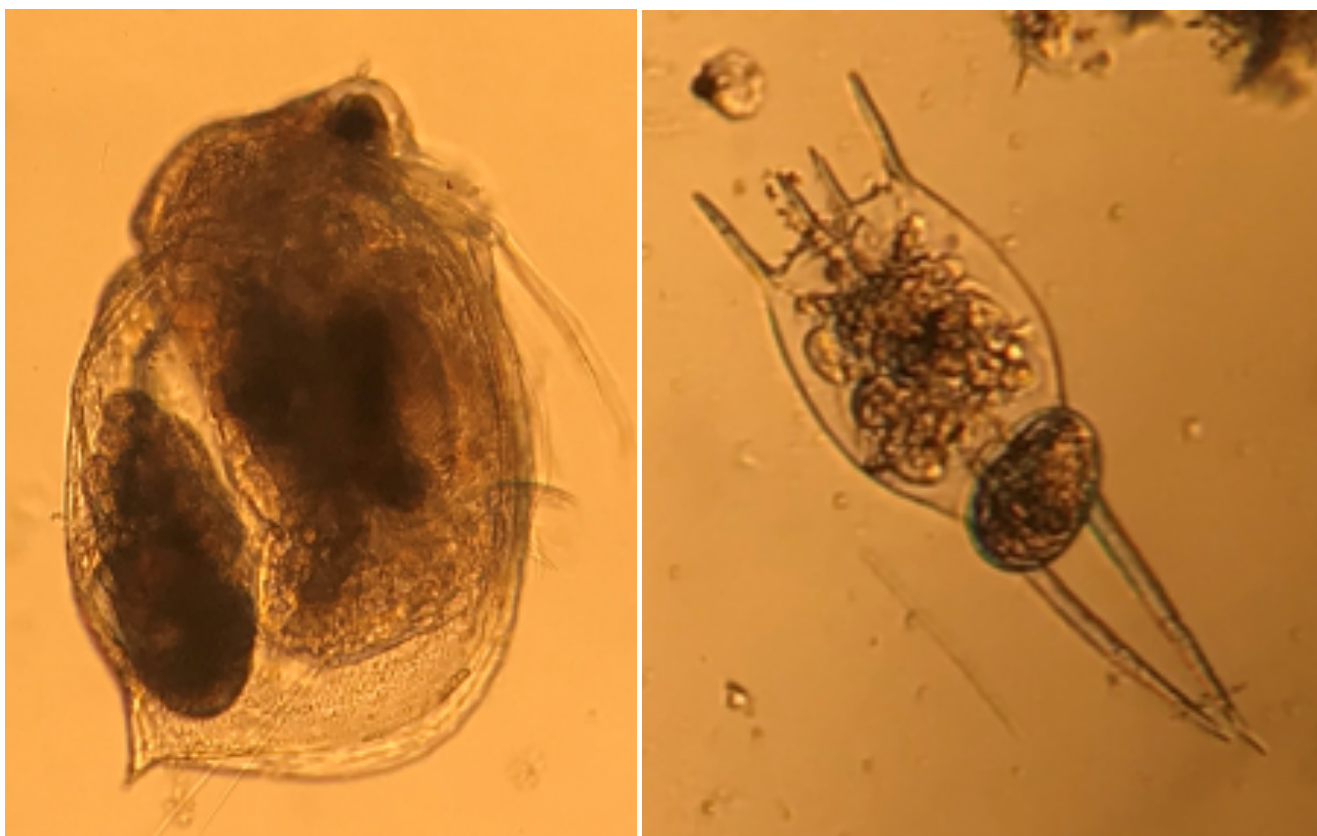
oligotróficas. En las lagunas eutróficas se encontró una mayor riqueza taxonómica, así como mayores abundancias y biomasa muy probablemente asociada a una mayor disponibilidad de alimento al ser más productivas, sin poder descartar otros factores de interacciones bióticas (p. ej., competencia, depredación).

La riqueza taxonómica de los rotíferos de las “Lagunas de Montebello” asciende a 21 taxones, número que, en general, resulta ser inferior a la reportado en otros cuerpos acuáticos mexicanos y del mundo. Asimismo, la mitad de los 21 taxones de rotíferos se encontraron en de uno a tres lagos, esto es, hay una gran singularidad de rotíferos presentes en las “Lagunas de Montebello”. Además de una mayor riqueza taxonómica de rotíferos, las lagunas eutróficas tuvieron mayores abundancias y biomasa de rotíferos que las lagunas oligotróficas. Con relación a los

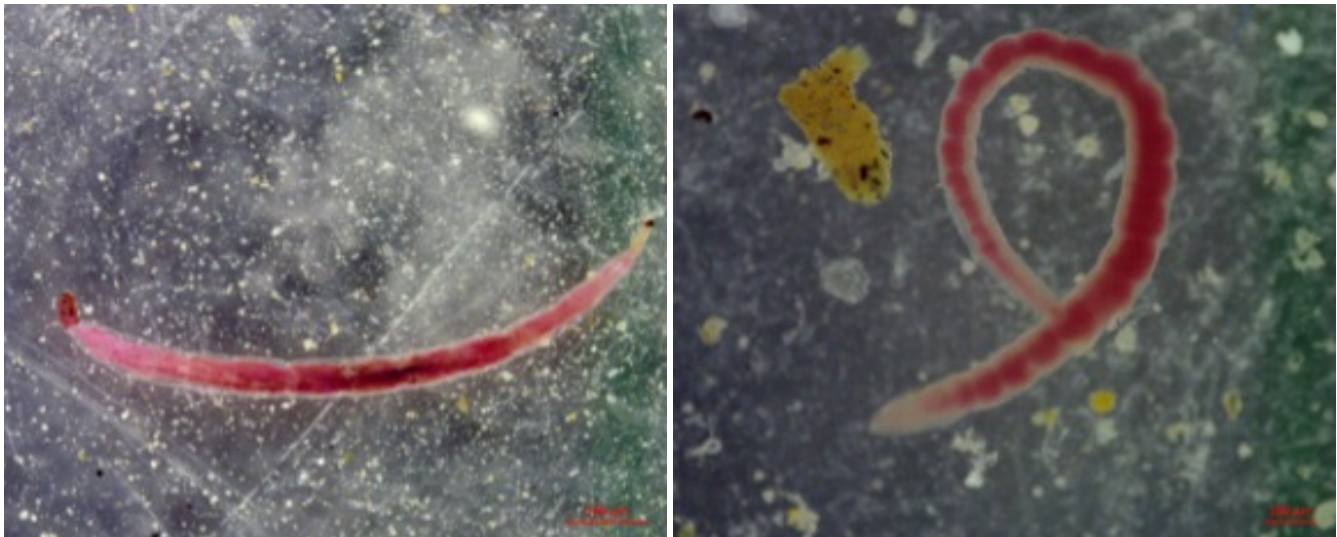
microcrustáceos, copépodos y cladóceros, las mayores riquezas taxonómicas, abundancias y biomasa se registraron en las lagunas eutróficas. Los copépodos son el grupo que contribuye más a la abundancia y a la biomasa. De forma similar a los rotíferos, existe una gran singularidad en la composición taxonómica de copépodos y cladóceros en cada laguna, la mitad de los taxones se encontraron en de uno a tres lagunas solamente.

4.3.2 Bentos

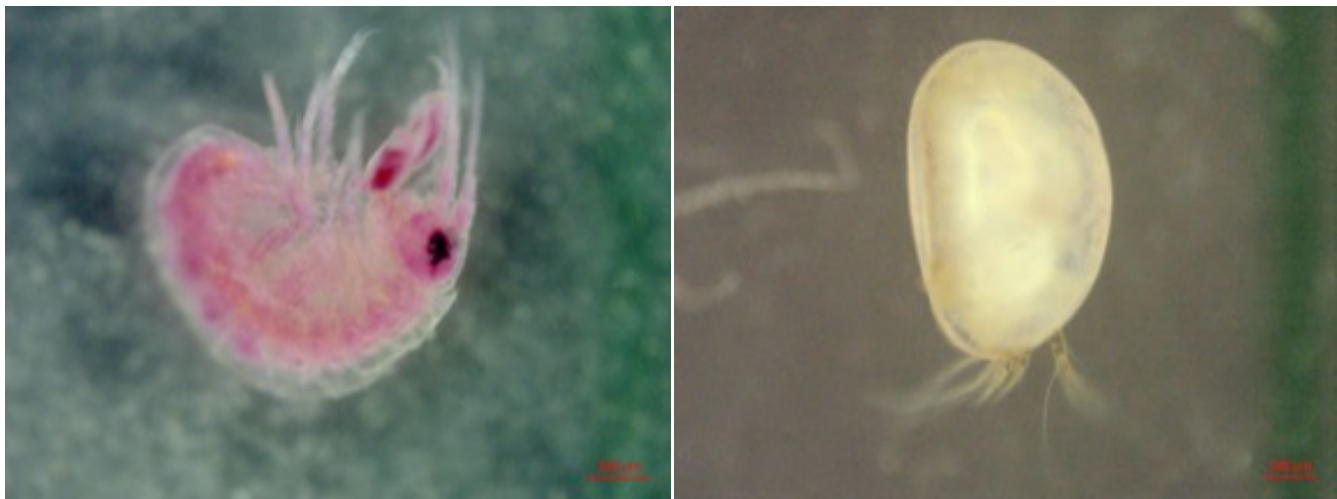
Con respecto a los macroinvertebrados bentónicos de las “Lagunas de Montebello”, se han registrado 49 taxones, riqueza taxonómica que resulta ser elevada comparada a la reportado en otros cuerpos acuáticos mexicanos y del mundo. Aunque la riqueza taxonómica regional es alta, la individual por laguna es baja con tan solo 5



El cladócero *Ceriodaphnia dubia* (izquierda) y el rotífero *Brachionus havanaensis* (derecha). (Fotografías de Rocío Fernández).



Larva de mosquito en la laguna Ensueño (izquierda) y lombriz de la laguna San José (derecha). (Fotografías de Erick O. Soto García).



Anfípodo de la laguna Ensueño (a la izquierda) y ostrácodo o "camarón semilla" de la laguna Yalalush (a la derecha). (Fotografías de Erick O. Soto García).

taxones por laguna en promedio. Las lagunas eutróficas presentaron menor riqueza taxonómica con un promedio de 3 taxones (0 a 5), mientras que las lagunas oligotróficas presentaron un promedio de 9 taxones (2 a 19).

Los tres grupos taxonómicos más abundantes que constituyeron casi el 85% del total de organismos son las larvas de mosquitos (quironómidos), las lombrices (oligoquetos) y los anfípodos. Los taxones más abundantes fueron los quironómidos *Tanytarsus sp.* y *Polypedilum sp.*, un oligoqueto de la familia Naididae y un anfípodo de la familia

Hyaellidae. Las lagunas oligotróficas presentaron similitud en la composición taxonómica de grupos dominantes con las lagunas eutróficas. La similitud en la composición taxonómica entre las lagunas es muy reducida, 65% de los taxones se encontraron en una sola laguna.

Los tres grupos biológicos muestran que las "Lagunas de Montebello" presentan una elevada singularidad de taxones (heterogeneidad biológica elevada entre lagunas) lo que muestra la gran fragilidad de estos ecosistemas ya que la contaminación o eutroficación impactan de

Familia	Especie	Nombre común	NOM*
Nativas			
Cichlidae	<i>Cichlasoma intermedium</i>	Mojarra del Petén	Pr, Endémica
Profundulidae	<i>Profundulus labias</i>	Escamudo bocón	
	<i>Profundulus candalarius</i>	Escamudo de Comitán	
Characidae	<i>Astyanax aeneus</i>	Sardina	
	<i>Brycon guatemalensis</i>	Sardinita Macabí	
Poeciliidae	<i>Poeciliopsis hnilickai</i>	Guatopote de Ixtapa	
	<i>Poecilia latipunctata</i>	Topote del Tamesí	P, Endémica
Heptapteridae	<i>Rhamdia guatemalensis</i>	Juil	Pr, Endémica
Introducidas o exóticas			
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia del Nilo	
Centrarchidae	<i>Micropterus salmoides</i>	Lobina negra	
Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i>	Carpa común	

* NORMA Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. (P : en peligro de extinción, Pr: sujeta a protección especial).

manera importante la gran biodiversidad regional. La pérdida de la biodiversidad de una sola laguna impacta, al disminuirla, la biodiversidad regional.

4.3.3 Peces y anfibios

Entre los grupos biológicos menos estudiados en las “Lagunas de Montebello” se encuentran los peces y los anfibios. Sobre los peces se menciona la presencia de 11 especies, 8 nativas y 3 introducidas o exóticas.

A pesar de no contar con estudios científicos que lo avalen, se piensa que, en general, las “Lagunas de Montebello” se caracterizan por una baja riqueza específica de peces, sin embargo albergan grandes poblaciones de pequeñas especies nativas. Adicionalmente, la falta de actividades

de acuicultura, promovió el establecimiento de especies de peces introducidas, carpa herbívora, lobina y tilapia, para pesca de autoconsumo.

Por parte de los anfibios, en el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” se han registrado 16 especies de anfibios, 5 de ellos en alguna categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-ECOL-2001.

4.4 Macrofitas

Finalmente, dentro de la vegetación ribereña, esto es, la asociada a las lagunas y que crece en la periferia de éstas, en las zonas pantanosas, poco profundas de las orillas, se reconocen principalmente los tulares (*Typha* sp., familia Typhaceae) y los carrizales (*Phragmites communis*, familia Poaceae).

Familia	Especie	Nombre común	NOM*
Brachycephalidae	<i>Craugastor rugulosus</i>	Rana de tierra	
Bufonidae	<i>Chaunus marinus</i>	Sapo gigante	
	<i>Incilius valliceps</i>	Sapo del Golfo	
	<i>Incilius campbelli</i>	Sapo de la selva	
	<i>Rhinella horribilis</i>	Sapo de caño mesoamericano	
Hylidae	<i>Hyla walkeri</i>	Rana de árbol de Walker	
	<i>Smilisca baudinii</i>	Rana arborícola mexicana	
	<i>Tlalocohyla loquax</i>	Rana de la caoba	
Microhylidae	<i>Hypopachus variolosus</i>	Rana ovejera	
Ranidae	<i>Rana berlandieri</i>	Rana del Río Grande	Pr
	<i>Rana brownorum</i>	Rana leopardo de Brown	Pr
	<i>Rana maculata</i>	Rana de Los Altos	
Plethodontidae	<i>Bolitoglossa hartwegi</i>	Salamandra trepadora de Hartwegi	
	<i>Bolitoglossa rufescens</i>	Salamandra lengua hongueada rojiza	Pr
	<i>Bolitoglossa stuarti</i>	Salamandra lengua hongueada de	A
	<i>Nyctanolis pernix</i>	Salamandra ágil de patas largas	Pr

* NORMA Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. (Pr: sujeta a protección especial, A: amenazada).



Vegetación ribereña en la zona litoral del lago Tziscoa (Fotografía de Mariana Vargas Sánchez).



Capítulo 5

LAS CAUSAS DEL DETERIORO

Javier Alcocer, Fernando Álvarez, Margarita Caballero, Óscar Escolero, Lucy Mora y Blanca Prado

Las causas del deterioro

Javier Alcocer, Fernando Álvarez, Margarita Caballero, Óscar Escolero, Lucy Mora y Blanca Prado

En la cuenca del Río Grande de Comitán existen diversas fuentes potenciales de contaminación entre las que destacan, de mayor a menor importancia, la agricultura de irrigación y de temporal, las aguas residuales, el desarrollo urbano y la ganadería. Entre los contaminantes asociados a estas fuentes de contaminación se cuentan los fertilizantes, pesticidas, materia orgánica y metales pesados.

Específicamente para la zona lagunar, las lagunas de la planicie, las del NO, tienen un riesgo medio de exposición –por la distancia a las fuentes– a estos contaminantes; mientras que las lagunas de montaña, las del SE, tienen un riesgo muy bajo de exposición. Pero al mismo tiempo, toda la zona lagunar presenta una alta vulnerabilidad asociada a que, por un lado, al encontrarse en la parte baja de la cuenca recibe todo el drenaje procedente del resto de la zona de captación y, por el otro, es la zona con mayor precipitación pluvial lo que favorece la dispersión de los contaminantes por escorrentía y por infiltración a los mantos freáticos. Finalmente, las tormentas tropicales características en la zona conllevan precipitaciones elevadas en periodos cortos de tiempo que producen inundaciones en la zona de planicie lo que interconecta temporalmente a las

lagunas y con ello, los contaminantes se dispersan aún más fácilmente.

5.1 Deforestación y agricultura

Existen diferentes estimaciones sobre el área boscosa que ha sido deforestada en la zona para su conversión a zonas agrícolas. En los años 1970s, el 72% de la superficie del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” mostraba áreas arboladas en buen estado de conservación, 20% se encontraron perturbadas o transformadas y el restante 10% estaba ocupada por el sistema lagunar. Para 1988-1993 más del 85% de la superficie mostraba áreas arboladas perturbadas o transformadas y tan solo un 4% permanecía en buen estado de conservación.

En la siguiente tabla se hace un análisis comparativo de las modificaciones derivadas del cambio del uso de suelo de forestal a agricultura y su efecto potencial en los cuerpos acuáticos receptores.

5.2 Crecimiento urbano y contaminación

Independientemente de la deforestación para ocupar los terrenos otrora arbolados para la agricultura, los terrenos van siendo ocupados para el asentamiento y desarrollo urbano. El creciente

Bosques	Terrenos agrícolas
Favorece la captura y retención de agua en los suelos	Favorece la pérdida de agua por evapo-transpiración
Infiltración > escorrentía	Escorrentía > infiltración
Retiene los suelos y evita la erosión	Favorece la erosión y movilización de suelos
Retiene los nutrientes y evita su movilización	Favorece la movilización de nutrientes de los suelos
Mantiene la productividad	Pérdida de fertilidad
No contamina agua superficial ni subterránea.	Contamina el agua superficial y la subterránea con los fertilizantes químicos, plaguicidas y otros contaminantes emergentes que se aplican en los
Puede exportar materia orgánica recalcitrante (celulosas, hemicelulosas)	Exporta materia orgánica de fácil degradación
No se altera la calidad del agua ni de las lagunas ni de los mantos freáticos	Eutroficación, contaminación orgánica y contaminantes emergentes de las lagunas y los mantos freáticos

número de poblados y caseríos asentados a los alrededores de las lagunas implica la generación de desechos, ya sea en forma de aguas residuales crudas, tanto negras como grises (jabonosas), como de residuos sólidos como basura orgánica y más recientemente y de forma muy preocupante residuos plásticos. Las aguas residuales son vertidas a través de fuentes puntuales, la más importante en la zona es el Río Grande de Comitán, pero también por fuentes difusas asociadas a la falta de drenaje. Este drenaje puntual constituye una fuente de contaminación importante por el tipo de productos químicos que incluye tales como antibióticos y hormonas cuyos efectos en el medio ambiente apenas se comienzan a descifrar, pero implican la generación de alteraciones importantes en algunos grupos biológicos como los anfibios. La falta de basureros promueve que los residuos

sólidos sean depositados sin control ni regulación y éstos terminen siendo arrastrados a los cuerpos acuáticos. Actualmente la contaminación por plásticos, en particular los micro- y nanoplásticos, ha crecido de manera alarmante y sus implicaciones en el ecosistema y sus repercusiones en el ser humano resultan ser de gran peligrosidad. En la cuenca del Río Grande de Comitán se han identificado diferentes fuentes potenciales de contaminación del agua. Entre ellas, en orden de importancia, se cuentan: la agricultura de riego y temporal, las lagunas de oxidación, las zonas urbanas, las actividades pecuarias, los pozos/norias, los drenajes agrícolas y urbanos, las industrias, las gasolineras, los sitios de construcción, los hospitales, los bancos de extracción de materiales y los cementerios. Todas estas fuentes potenciales de contaminación favorecen la entrada al río, las lagunas y el agua subterránea de fertilizantes y

plaguicidas, desechos fecales, microorganismos y otros agentes patógenos, nutrientes, desechos sólidos, grasas, aceites, metales pesados, desechos industriales, detergentes y fármacos. Sin embargo, hoy en día se desconoce su impacto sobre los recursos hídricos de la cuenca del Río Grande de Comitán.

El conjunto de actividades humanas también son fuente importante de contaminación del Río Grande de Comitán. La ausencia de tratamiento o el tratamiento inadecuado de las aguas residuales de los distintos centros urbanos que descargan sus desechos al Río Grande de Comitán contamina el agua tanto subterránea como la superficial que llega finalmente a la zona lagunar.

La actividad agrícola en la cuenca del Río Grande de Comitán en los últimos 10 años se ha concentrado en la producción de jitomate con riego artificial, mientras que en la zona de temporal permanece la producción de maíz. En ambos tipos de cultivo

se adicionan diferentes tipos de fertilizantes como la urea en la producción de maíz y fertilizantes químicos (p. ej., fosfato diamónico, ultrasol jitomates, phyto grow, nitrofoska) en la de jitomate. La producción de maíz requiere de menor adición de fertilizante que la de jitomate, lo que significa que las zonas con cultivos de jitomate representan un mayor riesgo de contaminación de los cuerpos de agua. Por otro lado, en el cultivo de maíz la mayor cantidad de fertilizante es absorbido por la planta, mientras que en el de jitomate, la mayor cantidad de fertilizante se “percola” y termina en las aguas subterráneas y superficiales contaminándolas.

Como se explica claramente en las secciones 3.8, 3.9 y 3.10, el acarreo de fertilizantes aplicados en las zonas agrícolas a las lagunas ya sea por la vía de escorrentía superficial o a través del agua subterránea promueve su eutrofización y con ello el deterioro de la calidad del agua. El crecimiento



excesivo del fitoplancton en muchos casos promueve que algunas especies de fitoplancton produzcan toxinas que afectan la vida acuática y representa un peligro potencial si el agua se usa para abreviar al ganado, para el riego de hortalizas e incluso para el consumo humano.

Existe poca información de las prácticas agrícolas en la cuenca del Río Grande de Comitán, pero se conoce que para el cultivo de maíz es cotidiano, para el control de maleza el uso de herbicidas como la atrazina. Desafortunadamente, este compuesto puede movilizarse en forma disuelta a través del agua y ser absorbido al suelo por lo que puede llegar a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos tal y como se ha registrado en diversos pozos y norias de la cuenca en donde se encontraron tanto la atrazina como productos derivados de ésta. Al igual que la atrazina, también se aplican otros herbicidas como el glifosato, paraquat y 2,4-D.

Por último, se sabe que la eutrofización de los cuerpos acuáticos provocada por el enriquecimiento con nutrientes y materia orgánica puede promover la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que tienen importantes consecuencias en el clima regional y del planeta. Estudios recientes realizados en las “Lagunas de Montebello” muestran que la eutrofización está favoreciendo el flujo de CO_2 a la atmósfera, lo cual evidencia una afectación más, el cambio climático, que se suma a las mencionadas derivadas de la degradación que se está llevando a cabo en estos cuerpos acuáticos como resulta de las actividades antrópicas. De esta manera, el aumento en las temperaturas globales y el cambio en los patrones

de precipitación y escorrentía asociados con el cambio climático podrían exacerbar aún más las emisiones de CO_2 y otros GEI de los lagos eutrofizados. La eutrofización y las emisiones de GEI se retroalimentarán positivamente en el futuro, causando impactos severos al clima y los sistemas acuáticos a escala regional y global.

5.3 Especies introducidas

Las especies introducidas han sido identificadas en múltiples estudios como uno de los factores más importantes que causan la pérdida de biodiversidad, que modifican el ambiente y que llevan a la pérdida de importantes funciones ecosistémicas. En México, como parte de programas gubernamentales de alcance nacional, se han introducido especies de peces masivamente en prácticamente todos los sistemas dulceacuícolas con el objetivo de proveer una pesca de subsistencia a las comunidades locales. En retrospectiva, estas introducciones han producido un empobrecimiento de los ecosistemas y no han contribuido significativamente para mejorar la alimentación en comunidades rurales.

En las “Lagunas de Montebello” ya se encuentran bien establecidas carpas, tilapias, trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y lobina negra (*Micropterus salmoides*), además de otras especies con menor impacto. Para estas tres especies de peces se han descrito efectos devastadores sobre las comunidades nativas. Las carpas debido a su tipo de alimentación, succionando el sedimento, lo resuspenden aumentando la turbidez lo que desencadena múltiples efectos negativos sobre especies bentónicas. Las tilapias con un alto potencial reproductivo se convierten en competidores de las especies nativas.



Generalmente las tilapias y otras especies de interés para la acuicultura son introducidas con parásitos que encuentran nuevos hospederos en las comunidades nativas produciendo una baja condición de salud y alta mortandad. La lobina negra es un pez carnívoro altamente depredador capaz de decimar por completo poblaciones de otros peces al depredar sus juveniles, además de consumir aves acuáticas, anfibios, crustáceos e insectos, entre otros.

La extirpación de las especies introducidas es muy difícil de llevar a cabo y a menudo los efectos son irreversibles. Lo que se puede buscar es llegar a un nuevo equilibrio en donde una porción de

la biodiversidad nativa y las especies introducidas coexistan y de esta manera se pueda contener la degradación del ecosistema. Pero para llegar a este punto se deben reconocer el problema y se deben desarrollar programas de control que incluyan monitoreos continuos.

Como es de esperarse, en las “Lagunas de Montebello” ya es apreciable un empobrecimiento significativo en la diversidad acuática. Aún cuando no se ha hecho un análisis cuantitativo, cada vez más los datos y estimaciones de diversidad provienen de registros de las últimas décadas y no de registros recientes (de los últimos cinco años). Esto sugiere que de hecho varias especies

de macroinvertebrados (p. ej., acociles, cangrejos, caracoles) están a punto de desaparecer localmente.

Como amenazas potenciales para todo el distrito lacustre de las “Lagunas de Montebello” se tiene al pez diablo (*Pterygoplichthys spp.*), ampliamente distribuido en toda la cuenca del Grijalva-Usumacinta y al acocil rojo (*Procambarus clarkii*), que ya es muy abundante en varios puntos de los Altos de Chiapas y la Depresión Central de Chiapas. La eventual llegada de estas especies es una amenaza para la que hay que prepararse con dos acciones principalmente: primero, con campañas de concientización entre los pobladores y visitantes sobre los riesgos del arribo de estas especies, y segundo, con la implementación de programas de monitoreo para tenerla información necesaria en caso de que las especies sean detectadas. En ambos casos, se debe tener una fuerte y constante comunicación con la población local a través de talleres y quizá algunos estímulos para que estos programas sean exitosos.

5.4 Historia del impacto antrópico

El clima en la región ha cambiado a lo largo del tiempo. Se ha detectado una tendencia hacia condiciones gradualmente más secas desde hace 3,400 años, lo cual se asocia con modificaciones en fenómenos climáticos a nivel planetario, que incluyen el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical, así como la frecuencia e intensidad de fenómenos decadales tales como “El Niño” (ENOS). En particular en todo México se ha detectado un periodo de sequía más intensa durante el intervalo cultural Mesoamericano conocido como el Clásico (100 a 900 dC), el cual también ha sido documentado en el registro de

la laguna San Lorenzo en Montebello, en donde se identificaron las condiciones de sequía más intensas entre los años 500 a 900 dC.

Estas variaciones climáticas han influido en gran medida en la ocupación, desarrollo y abandono cultural (asentamientos humanos) de la región. Las condiciones de sequía al final de Clásico (500 a 900 dC) se asociaron con el abandono cultural de la zona en el año 900 a 1200 dC. El abandono permitió la recuperación de la zona boscosa que había sido previamente deforestada por las actividades humanas, de manera que se restablecieron bosques húmedos de montaña con una mezcla de vegetación tropical y templada. El hombre, al eliminar o reducir la cobertura vegetal de extensas zonas para dedicarla a la agricultura, favorece que el clima regional se torne más seco y cálido, de forma tal que el clima resultante es una combinación de fenómenos naturales y actividades antrópicas.

En tiempos más recientes, la región volvió a ser ocupada y nuevamente se presentaron una serie de perturbaciones ligadas a las actividades humanas tales como la deforestación y el aumento en el desarrollo de la agricultura y de áreas urbanas. Estas perturbaciones datan probablemente de inicios de los 1930s y posteriormente tuvieron su máximo impacto en los lagos entre 1960 a 2010. Las actividades antrópicas conllevan un aumento en la erosión de los suelos, en la materia orgánica que ingresa a las lagunas a través del vertimiento de aguas residuales crudas, así como en los inicios del proceso de eutroficación. Las alteraciones registradas a partir de los 1930s corresponden con cambios de uso de suelo asociados a la Reforma Agraria en la década de los 1940s, mientras que entre los 1960s-2000s

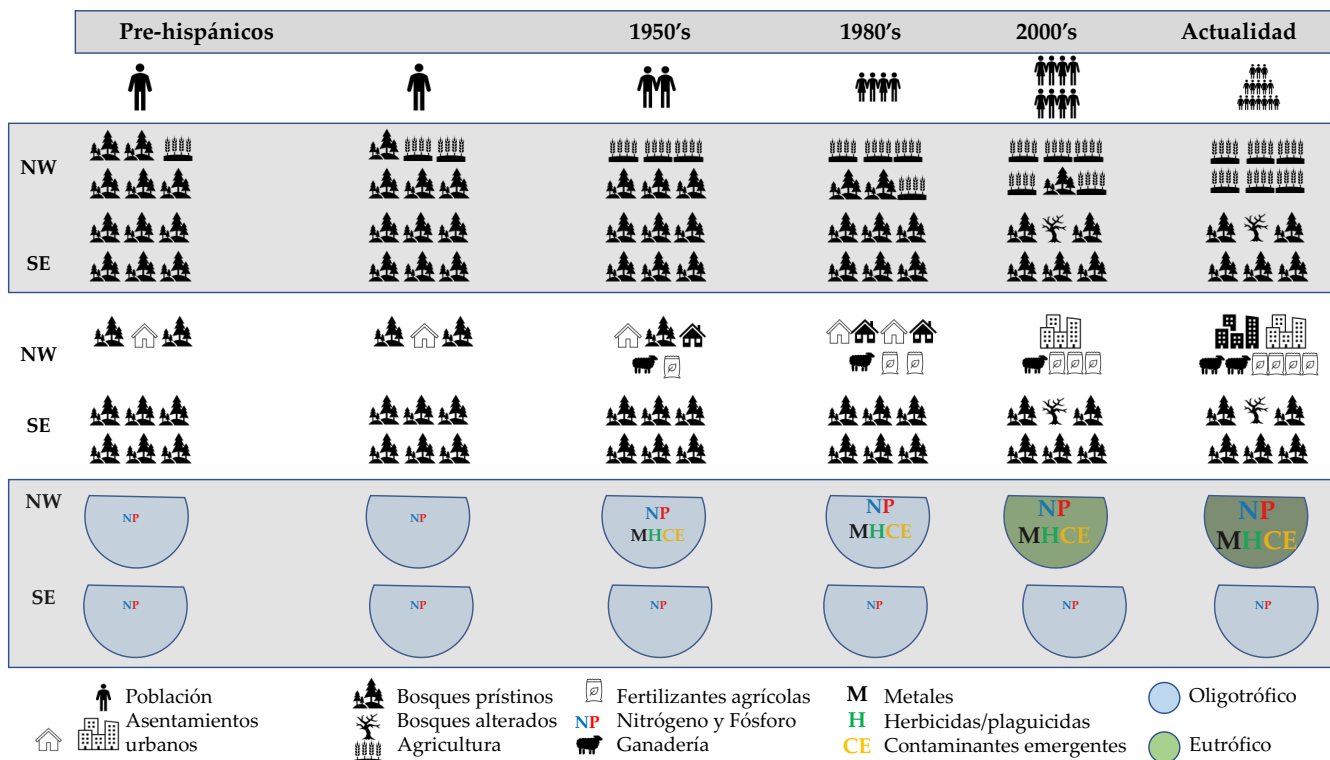


Diagrama que muestra el desarrollo histórico de los cambios acaecidos en la cuenca de drenaje y las “Lagunas de Montebello”.

reflejan el aumento de asentamientos humanos y la expansión de la agricultura intensiva en la zona. Fue precisamente en 2003 cuando los locales evidenciaron la presencia de la eutrofización en las lagunas al tornarse verdes, turbias, con natas, con olor a “huevo podrido” y con mortandad de peces.





Capítulo 6

CONCLUSIONES

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

Conclusiones

Javier Alcocer, Óscar Escolero y Fernando Álvarez

El conjunto numeroso de lagunas conocidas genéricamente con el nombre de las “Lagunas de Montebello”, que existen en la porción sureste del estado de Chiapas, constituyen un hermoso paisaje compuesto por cuerpos acuáticos de color azul turquesa y aguas transparentes rodeadas de densos bosques tropicales. Estos cuerpos acuáticos se formaron por la disolución de la roca caliza de manera análoga a los cenotes de la Península de Yucatán.

Desafortunadamente, el desarrollo humano y sus actividades crecientes en la región han estado impactando a las lagunas de manera continua y más importante desde los años 1950s. La natural resistencia ecológica de las lagunas al cambio, es decir su resiliencia, aplazó por casi 50 años la aparición de signos evidentes del impacto humano, hasta que en 2003 se comenzaron a manifestar cambios importantes que alarmaron a los pobladores. Pasaron de tener una coloración azul a verde, se perdió la transparencia del agua y se tornaron turbias, aparecieron natas verde amarillentas flotando sobre la superficie del agua, hubo mortandad de peces e incluso comenzaron a desprender un olor desagradable como a “huevo podrido”.

El creciente desarrollo urbano, agrícola, pecuario, industrial, así como la deforestación y la elevada

erosión en la región, han tenido un fuerte impacto, contaminando las lagunas por varias vías: a) fuentes puntuales (Río Grande de Comitán) y b) difusas (p.ej., drenaje agrícola y agua subterránea), principalmente a las lagunas ubicadas en la zona de planicie, esto es, al noroeste del Parque Nacional, debido a la proximidad a todas estas actividades y a la interconexión de las lagunas mediante canales. Afortunadamente las lagunas ubicadas en la zona de montaña, al sureste del Parque Nacional y alejadas de las actividades humanas, se mantienen aún prístinas.

La principal afectación de las lagunas está asociada al aporte de cantidades elevadas de fertilizantes (nitrógeno y fósforo) que promueven el crecimiento desmedido de fitoplancton y plantas acuáticas, fenómeno que se conoce como eutrofización. La eutrofización degrada la calidad de agua de las lagunas restringiendo el uso que se les puede dar.

Los escurrimientos superficiales que llegan a las lagunas traen consigo no solo fertilizantes, sino también otros contaminantes peligrosos como plaguicidas, desechos fecales (microorganismos y otros agentes patógenos), metales pesados e incluso fármacos, es decir, todo un “coctel” de contaminantes. La contaminación del agua de las lagunas conlleva a la pérdida de los



bienes y servicios que naturalmente proveerían de encontrarse en estado prístino. Aunque el monitorear, mejorar y conservar la calidad del agua de todas las lagunas será determinante, no se debe perder de vista que hay que conservar la biota acuática nativa con acciones específicas. Por ejemplo, se han llevado a cabo múltiples introducciones de especies invasoras que están teniendo un impacto negativo sobre la biota nativa.

El estado de Chiapas destaca en la República Mexicana por su elevada biodiversidad y este paisaje hermoso compuesto por lagunas de aguas transparentes de color azul turquesa rodeadas de densos bosques no es la excepción. Sin embargo, la peculiaridad que se ha registrado es lo que cada

laguna en lo individual aporta a la biodiversidad regional, esto es, cada laguna alberga su biota particular y que es diferente a la de las otras lagunas. En otras palabras, no hay una biota común que habite en todas las lagunas. Este maravilloso fenómeno natural conlleva asimismo un enorme peligro de pérdida de biodiversidad ya que, con cada laguna que se contamina y pierde su biodiversidad individual, también se pierde y disminuye la biodiversidad acuática regional.

Es urgente diseñar un plan de ordenamiento en la región que permita compatibilizar las actividades antrópicas con la conservación y el uso sustentable de los recursos hídricos regionales, tanto superficiales como subterráneos. Es muy importante regular aquellas actividades que más

impacto tienen sobre las lagunas a través de buscar alternativas que den mejores rendimientos con menores impactos.

Es necesario implementar una campaña permanente de información y educación ambiental para concientizar a los pobladores sobre la importancia de los recursos hídricos y los bienes y servicios que proporcionan y que benefician a las comunidades.

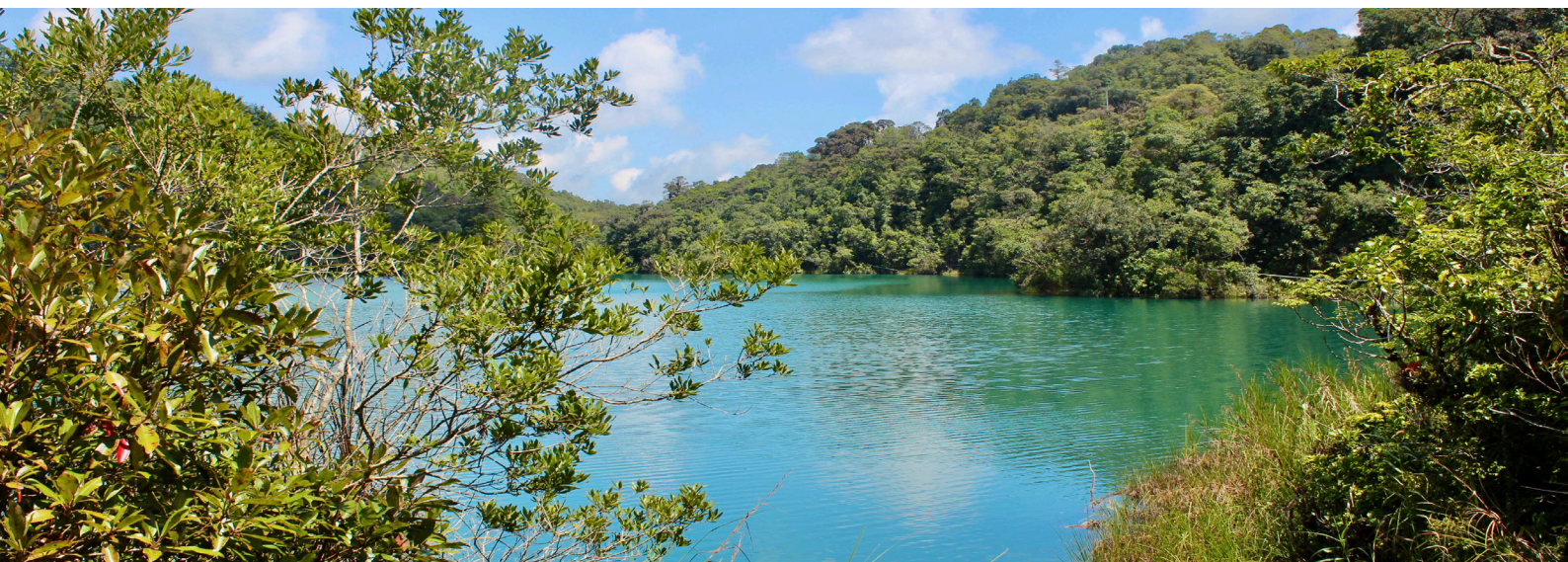
La información incluida en este libro evidencia la importancia que tiene el llevar a cabo estudios científicos que permitan generar la información validada científicamente requerida para identificar claramente la problemática presente, en este caso en las “Lagunas de Montebello”, lo cual es indispensable para diseñar un plan de acciones con alternativas que aporten soluciones a la problemática identificada.

Por lo anterior, sería indispensable montar un programa de monitoreo científico de largo plazo para dar seguimiento cercano a las lagunas y denotar si se presentan cambios tanto en las características fisicoquímicas del agua como de las comunidades bióticas y en particular reconocer los indicadores tempranos de deterioro que permitan actuar con prontitud y celeridad

para evitar impactos mayores que se tornen comparativamente irreversibles.

Aunque es posible el implementar acciones de restauración en aquellas lagunas que han sido impactadas, hay que tomar en cuenta que las respuestas a las medidas de restauración no son inmediatas, y que, así como les tomó a las lagunas 50 años de acumular el deterioro para evidenciar el impacto, también se requerirá un periodo largo para obtener resultados visibles de las medidas de restauración.

Solamente la acción inmediata y decidida a favor tanto de las lagunas que aún no muestran un grado de impacto significativo, como de aquellas que ya han sido contaminadas y transformadas, garantizará la conservación de esta maravilla de la naturaleza para generaciones futuras.



Financiamientos

La información incluida en el libro fue generada a través de las investigaciones financiadas por el Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua CONAGUA-CONACYT a través del proyecto 167603, así como por la DGAPA/UNAM a través de los Proyectos PAPIIT-IN219215, PAPIIT-IV200319 y PAPIIT- IV200122.

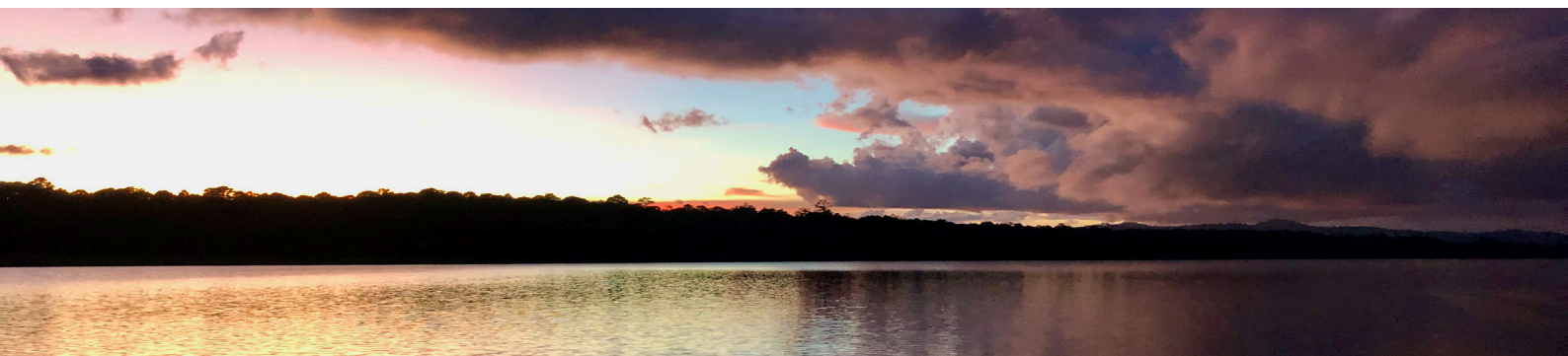


Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el personal del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), por la comunidad local y los Comisariados Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tziscoac por facilitar el acceso a las lagunas. También se agradece el apoyo del Comité de Administración de Tziscoac (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), presidente del Comité de Turismo de Tziscoac (Armando Hernández) y al Comisario Ejidal de Tziscoac (Enrique M. Hernández). Asimismo, el apoyo ofrecido por el personal del hotel Villas Tziscoac (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) y a René Morales Hernández y colaboradores por su apoyo durante los trabajos de campo. El apoyo de Mariana Vargas Sánchez fue invaluable para la elaboración de los mapas y figuras, así como por proporcionar fotografías de las lagunas. Elizabeth Ortega Mayagoitia, Tomás Almeida Becerril, Rocío Fernández y Erick O. Soto García proporcionaron las fotografías que ilustran el fitoplancton, zooplancton y bentos de

las lagunas de Montebello.

Se agradece el apoyo de todos los alumnos que han desarrollado sus investigaciones de tesis de licenciatura y posgrado en el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” y parte de cuyos datos fueron incluidos en el libro: Aída Isabel Sánchez Salas, Daniela Ávila García, Daniela Cortés Guzmán, Diego López Dávila, Elías Jiménez Sánchez, Eloísa Estefanía Maya García, Erick Osvaldo Soto García, Erika Montserrat Rivera Herrera, Héctor Coronel Pastrana, Jannice Alvarado Velázquez, José Roberto Reyes Santiago, Juana Iisel Durán Calderón, Kenia Vianey Segundo Fuerte, Lesli Belén Villalpando Alaníz, Lina Elisa Santillán Espinoza, Mariana Vargas Sánchez, Maya Nastenka Vera Franco, Montserrat Martínez Ángeles, Patricia Paulina Hernández Victoria, Sandra Guadarrama Hernández, Sara López Rivera, Selene Olea Olea, Stephany Josefina Hernández Flores, Tomás Almeida Becerril, Areli Morán Faustinos. Se reconoce el apoyo recibido por parte de la Dirección de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala a través de su directora la Dra. María del Coro Arizmendi Arriaga, así como al personal de



la Coordinación Editorial de la FESI por el apoyo logístico para la publicación del presente libro. Finalmente, a la Dra. Elva Escobar Briones por sus valiosos comentarios y sugerencias, así como por su apoyo incondicional.

Bibliografía de referencia

- Alcocer J., L.A. Oseguera, V. Ardiles, L. Mora & B. Prado. 2018. Sediment characteristics of 18 tropical, karst lakes in Chiapas, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34: 77-82. <https://doi.org/10.20937/2018.34.M6ISSM>
- Alcocer J., Oseguera L.A. y Escobar E. 2016. 4.18. Contenido de carbono elemental en sedimentos lacustres de un conjunto de lagos tropicales con distinto estado trófico. pp. 357-365. En: F. Paz Pellat, J. Wong González y R. Torres Alamilla (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco, Estado de México, México. 732 pp. ISBN 978-607-96490-4-3*
- Alcocer J., Oseguera L.A., Sánchez G., González C.G., Martínez J.R. & González R. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello lakes, Chiapas. *Journal of Limnology* 75(s1): 56-65 <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1343>
- Alcocer J., Prado B., Mora L. Oseguera L.A. & Caballero M. 2021. Sediment characteristics of tropical, karst lakes and their relationship with watershed topography, lake morphometry, and human activities. *Journal of Paleolimnology* 66: 333-353. <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00210-z>.
- Alcocer, J., M. Merino-Ibarra, L.A. Oseguera & O. Escolero. 2018. Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello”, Chiapas. *Ecology* 11(8): e2029. <https://doi.org/10.1002/eco.2029>.
- Alvarado Velázquez, J., García-Meneses, P.M., Esse, C., Saavedra, P., Morales Trosino, R., Bonifáz Alfonzo, R., Mazari-Hiriart, M. 2022. Spatially explicit vulnerability analysis of contaminant sources in a karstic watershed in southeastern Mexico. *Applied Geography* 138, 102606. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102606>
- Caballero, M., Mora, L., Muñoz, E., Escolero, O., Bonifaz, R., Ruiz, C. & Prado, B. 2020. Anthropogenic influence on the sediment chemistry and diatom assemblages of Balamtetik Lake, Chiapas, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 15935–15943. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04581-9>
- Calic, J. 2011. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. *Geomorphology*, 134(1-2), 32-42.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 9-10 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua, Estudio para monitorear los parámetros de calidad del agua de las lagunas de Montebello. 17-29 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Plan de gestión de la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello, Chiapas, México. 37-45 pp.
- Cortés-Guzmán, D. & Alcocer, J. 2022. Turnover drives high benthic macroinvertebrates' beta diversity in a tropical karstic lake district. *Diversity* 14, 259. <https://doi.org/10.3390/d14040259>
- Cortés-Guzmán, D., Alcocer J. y Oseguera L.A. 2017. 4.2. Biomasa de los macroinvertebrados

- bentónicos en el perfil batimétrico de lagos de Montebello, Chiapas, México. pp. 159-165. En: F. Paz Pellat y R. Torres Alamilla (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México. 656 pp. ISBN: 978-607-96490-5-0.
- Cortés-Guzmán, D., Alcocer, J. & Oseguera, L.A. 2021. Benthic macroinvertebrate communities of three tropical, warm monomictic lakes. *Limnologia* 89 (2021) 125888. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2021.125888>
 - Cortés-Guzmán, D., J. Alcocer & Oseguera, L.A. 2019. Benthic macroinvertebrate community diversity of Montebello Lakes, Chiapas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 90: e902769 (SCI). <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.279>.
 - Díaz-Cancino, C.E., Castañón-González, J.H., Villalobos-Maldonado J.J., Ruiz-Valdiviezo, V.M., Baez-Sanudo, R., Gómez-De Jesús, A. & Trejo-Valencia, R. 2018. Quantification of pesticides and heavy metals in sediments of the "Enchanted" lake of the national park ponds of Montebello, Chiapas, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34: 99-104. <https://doi.org/10.20937/2018.34.M6ISSM>
 - Durán Calderón, I., Escolero Fuentes, O., Muñoz Salinas, E., Castillo Rodríguez, M. y Silva Romo, G. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66(2): 263-277.
 - Fernández R., Alcocer J. & Oseguera L.A. 2021. Mycrocystins presence threatens the ecosystem health of a tropical National Park: Lagunas de Montebello, Chiapas. *Brazilian Journal of Botany* 44: 207-212. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00686-5>.
 - Fernández, R., Alcocer, J. & Oseguera, L.A. 2020. Regional pelagic rotifer biodiversity in a tropical karst lake district. *Diversity* 12: 454. <https://doi.org/10.3390/d12120454>
 - Fernández, R., Alcocer, J. & Oseguera, L.A. 2022. Microcrustacean (Cladocera and Copepoda) assemblages of a tropical karst lake district. *Diversity* 14, 564. <https://doi.org/10.3390/d14070564>.
 - Fernández, R., Oseguera, L.A. y Alcocer, J. 2020. 3.6. Biomasa del zooplancton de un sistema de lagos kársticos del sureste de México, Chiapas. pp. 125-130. En: Hernández, J. M., M. Rojo., M. Fuentes., A. Velázquez y M. Bolaños (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Texcoco, Estado de México, México. ISSN en trámite. 602 pp.
 - Fernández, R., Oseguera, L.A. & Alcocer, J. 2020. Zooplankton biodiversity in tropical karst lakes of southeast Mexico, Chiapas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91: e913184. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3184>
 - Franco-Gaviria, F., Correa-Metrio, A., Cordero-Oviedo, C., López-Pérez, M., Cárdenes-Sandí, G.M. & Romero, F.M. 2018. Effects of late Holocene climate variability and anthropogenic stressors on the vegetation of the Maya highlands. *Quaternary Science Reviews* 189: 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.004>
 - Franco - Gaviria, F., Correa - Metrio, A., Núñez - Useche, F., Zawisza, E., Caballero, M., Prado, B., Wojewódka, M. & Olivares, G. 2020. Millennial - to - centennial scale lake system development in the mountains of tropical Mexico, *Boreas* 49(2): 363-374. <https://doi.org/10.1111/bor.12430>
 - Guadarrama-Hernández S., Alcocer, J., Ardiles-Gloria, V., Gaytán-Caballero, G., Escobar, E. y Oseguera, L.A. 2015. 4.4. Estudio preliminar de la comunidad bentónica de los Lagos de Montebello, Chiapas, México. pp. 223-229. En: J. Alcocer, M. Merino-Ibarra, E. Escobar-Briones. (Eds.). *Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias*

- en Latinoamérica. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología. México. ISBN 978-607-02-7199-1.
- Guadarrama-Hernández, S., Alcocer, J., Cuevas-Lara, D., Oseguera-Pérez, L.A. y Quiroz-Martínez, B. 2020. 3.4. Variación interanual de la concentración de clorofila a total (1998 a 2018) del lago de Alchichica, Puebla. pp. 112-117. En: Hernández, J. M., M. Rojo., M. Fuentes., A. Velázquez y M. Bolaños (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Texcoco, Estado de México, México
 - Jiménez-Sánchez, E., Alcocer, J., Cortés-Guzmán, D. y Oseguera, L.A. 2020. 3.3. Morfometría y estado trófico determinan la biomasa de los macroinvertebrados bentónicos en lagos kársticos tropicales. pp. 105-111. En: Hernández, J. M., M. Rojo., M. Fuentes., A. Velázquez y M. Bolaños (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Texcoco, Estado de México, México. ISSN en trámite. 602 pp.
 - Lazcano-Barrero, M.A. y Vogt, R.C. 1992. Peces de la Selva Lacandona, un recurso potencial. En: Vásquez-Sánchez, M. A. y M. A. Ramos (eds.). Reserva de la Biósfera Montes Azules, Selva Lacandona: Investigación para su Conservación. Publicaciones Especiales Ecosfera 1: 135-144.
 - March Mifsut, I.J. y Flamenco Sandoval, A. 1996. Evaluación rápida de la deforestación en las áreas naturales protegidas de Chiapas (1970-1993). El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. 66 pp.
 - Olea-Olea, S. & Escolero, O. 2018. Nutrients load estimation to a lake system through the local groundwater flow: Los Lagos de Montebello, México. *Journal of South American Earth Sciences* 84: 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.03.016>
 - Mora L., Bonifaz R. y López-Martínez R. 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 683: 377-394.
 - Olea-Olea, S. & Escolero, O. 2018. Nutrients load estimation to a lake system through the local groundwater flow: Los Lagos de Montebello, México. *Journal of South American Earth Sciences* 84: 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.03.016>
 - Palacios-Vargas, J.G., Cortés-Guzmán, D. & Alcocer, J. 2018. Springtails (Collembola, Hexapoda) from Montebello Lakes, Chiapas. *Inland Waters* 8(3): 264-272. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1439863>
 - Rivera-Herrera E.M., Vargas-Sánchez M., Alcocer J. y Oseguera-Pérez L.A. 2019. 2.16. Impacto antrópico en la biomasa fitoplanctónica de lagos kársticos, Chiapas, México. pp. 318-324. En: Paz-Pellat, F. A. Velázquez y M. Rojo (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono sus Interacciones en México. Síntesis a 2019. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología, Universidad Autónoma de Nayarit, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Nayarit y Stanford University-México Economía Limpia 2050-USAID. Texcoco, Estado de México, México. 541 pp.
 - Rodiles-Hernández, R., González-Díaz, A.A. y Chan-Sala, C. 2005. Lista de peces continentales de Chiapas, México. *Hidrobiológica* 15 (2 Especial): 245-253.
 - Sosa-Aranda, I. & Zambrano, L. 2020. Relationship between turbidity and the benthic community in the preserved Montebello Lakes in Chiapas, Mexico. *Marine and Freshwater Research* 71: 824-831. <https://doi.org/10.1071/MF19090>
 - Vargas-Sánchez M., Alcocer J. & Oseguera, L.A. 2022. Seston and eutrophication on a tropical karst lake district: Lagunas de Montebello, Chiapas, Mexico. *Limnetica* 41(2). <https://doi.org/10.1007/s11531-022-10000-0>

org/10.23818/limn.41.16

- Vargas-Sánchez, M., Alcocer, J., Sánchez-Carrillo, S., Oseguera, L.A., Rivera-Herrera, E.M., Soria-Reinoso, I., Guzmán-Arias, A. & Merino-Ibarra, M. 2023. Carbon dioxide concentration and emissions along a trophic gradient in tropical karst lakes. *Water* 15, 13. <https://doi.org/10.3390/w15010013>
- Vera-Franco, M.N., Hernández-Victoria, P., Alcocer, J., Ardiles-Gloria, V. y Oseguera L.A. 2015. 2.6. Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. pp. 107-114. En: J. Alcocer, M. Merino-Ibarra, E. Escobar-Briones. (Eds.). *Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica*. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología. México. ISBN 978-607-02-7199-1.
- Yanez-Montalvo, A., Águila, B., Gómez-Acata, E.S., Guerrero-Jacinto, M., Oseguera, L.A., Falcón, L.I. & Alcocer, J. 2022. Shifts in water column microbial composition associated to lakes with different trophic conditions: “Lagunas de Montebello” National Park, Chiapas México. *PeerJ* 10:e13999, <http://doi.org/10.7717/peerj.13999>



El libro Las “Lagunas de Montebello” Joya de la naturaleza amenazada muestra de manera simple y con lenguaje accesible uno de los ecosistemas de mayor belleza paisajística del país y de gran importancia ecológica, las Lagunas de Montebello, en el Estado de Chiapas. El libro presenta con una visión holística: a) la cuenca hidrográfica, espacio en el cual interactúan naturaleza y sociedad desde tiempos ancestrales y contemporáneos y que han ido moldeando los recursos hídricos. b) Las lagunas, objeto central del libro y que hasta en fechas muy recientes eran prácticamente desconocidas para la ciencia la colectividad, a pesar de ser reconocidas por su belleza escénica. c) La biota acuática que habita las Lagunas de Montebello, característica

de la megadiversidad del país, muestra una gran riqueza biológica regional y al mismo tiempo una elevada singularidad en cada laguna. Y d) el deterioro ambiental alcanzado tras años de ocupación desde tiempos prehispánicos y con un intenso desarrollo de actividades antrópicas en los años 1950s y posteriormente, a partir de los años 2000s, las lagunas comenzaron a mostrar los signos evidentes del impacto humano que, desafortunadamente, sigue avanzando, deteriorando cada vez más lagunas. Esta obra es la primera en su tipo que presenta de manera sencilla lo que hoy en día se conoce sobre esta maravillosa área natural protegida en la categoría de Parque Nacional.



ISBN 978-607-30-7360-8

