



Complejidad ambiental de una laguna costera de un ecosistema de manglar

Vicente Castro-Castro^{1,*} , Gustavo Rivera-Velázquez² , Miguel Ángel Peralta-Meixueiro² , Francisco Javier López-Rasgado³

- (1) Programa de Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación de Ecosistemas Tropicales. Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente No. 1150, colonia Lajas Maciel, C.P. 29039, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
(2) Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento Norte Poniente No. 1150, colonia Lajas Maciel, C.P. 29039, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
(3) Centro de Investigaciones Costeras, Instituto de Ciencias Biológicas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Calle Juan José Calzada S/N, colonia Evolución, CP 30500 Tonalá, Chiapas, México.

* Autor de correspondencia: V. Castro-Castro [vicente.castro@e.unicach.mx; vicente.castro@unach.mx]

> Recibido el 11 de octubre de 2022 - Aceptado el 21 de septiembre de 2023

Como citar: Castro Castro, V., Rivera Velázquez, G., Peralta Meixueiro, M.Á., López Rasgado, F.J. 2023. Complejidad ambiental de una laguna costera de un ecosistema de manglar. *Ecosistemas* 32(3): 2483. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2483>

Complejidad ambiental de una laguna costera de un ecosistema de manglar

Resumen: Laguna Pampa El Cabildo es una laguna costera dentro de un ecosistema de manglar y que forma parte del área natural protegida El Cabildo Amatal, por lo que su conservación debe ser una prioridad para los tres niveles de gobierno y para la sociedad. El objetivo se centró en la propuesta de construcción de un índice de complejidad ambiental de la laguna de estudio, empleando algunas variables ambientales, a partir de la estadística inferencial ($p < 0.05$), un índice de construcción sencilla y de fácil entendimiento. Bimensualmente, durante la marea alta diurna (MAD) y marea alta nocturna (MAN), se realizaron mediciones por cuadruplicado de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, oxígeno disuelto (mg/L), pH y turbidez (UNT) en 11 sitios (S) de muestreo. Se realizó un análisis descriptivo de las variables analizadas (promedio, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo), se exploraron similitudes espacio-temporales (análisis de conglomerados) y se propuso un índice de complejidad ambiental (ICAM), teniendo como base el análisis de varianza, con niveles que van de un sistema muy heterogéneo/complejo a un sistema homogéneo/no complejo. Se registró una amplia variación promedio de los factores analizados entre meses y una menor variación entre sitios. El análisis de similitud destacó, en cuatro de las cinco variables analizadas, similitudes en los S1 y S2, sugiriendo esta área como una unidad ambiental distinta al resto de la laguna. Los ICAM calculados describen una laguna temporalmente compleja (0.25 y 0.35) y espacialmente poco compleja (0.69 y 0.79) tanto en MAD como en MAN respectivamente. Se sugiere considerar las unidades ambientales y los niveles de complejidad identificadas en este estudio, en decisiones de conservación de la laguna.

Palabras clave: complejidad ambiental; Chiapas; factores fisicoquímicos; índice de complejidad; unidad ambiental

Environmental complexity of a coastal lagoon of a mangrove ecosystem

Abstract: Laguna Pampa El Cabildo is a coastal lagoon within a mangrove ecosystem and is part of the El Cabildo Amatal protected natural area, so its conservation should be a priority for the three levels of government and for society. The objective focused on the proposal to construct an index of environmental complexity of the study lagoon, using some environmental variables, based on inferential statistics ($p < 0.05$), a simple construction index that is easy to understand. Every two months, during the daytime high tide (DHT) and night-time high tide (NHT), in quadruplicate measures of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, dissolved oxygen (mg/L), pH and turbidity (UNT) in 11 sampling points (p) were carried out. A descriptive analysis of the studied variables (average, standard deviation, minimum value and maximum value) was carried out, similarities temporal-spaces were explored (analysis of conglomerates) and environmental complexity index was proposed (ECI), having as a basis the analysis of variance, with levels which go from a very heterogeneous/complex system to a homogeneous/non-complex system. A broad average variation of the analyzed factors among months and a less variation among sampling points were registered. The analysis of similarity highlighted, in four of the five analyzed variables, similarities in the S1 and S2, showing this area as an environmental unit different to the rest of the lagoon. The calculated ECI describe a temporarily complex lagoon (0.25 and 0.35) and spatially a little complex (0.69 and 0.79) as in DHT as in NHT respectively. It is suggested to consider the environmental units and the identified levels of complexity in this study, to make decisions for conservation of the lagoon.

Keywords: environmental complexity; Chiapas; physicochemical factors; complexity index; environmental unit

Introducción

Los sistemas complejos son sistemas fuera de equilibrio termodinámico, constituidos por un conjunto grande de componentes individuales con interacción fuerte entre sí, que presentan una jerarquía de escalas de descripción comúnmente asociados a procesos de auto organización (Miramontes 1999; Dagdug 2014). Los

sistemas complejos buscan explicar, entre otras cosas, como los componentes o elementos simples pueden organizarse como un colectivo y generar nuevos patrones, además de estudiar los cambios o momentos de transformación de un sistema u organización a otra fase o etapa (Mitchell 2009; Luengo 2018), conocer tales cambios, contribuiría a anticiparse a posibles consecuencias nocivas en el sistema. El ecosistema es un conjunto de sistemas com-

plejos, seres vivos (biodiversidad) y ambiente físico, que interactúan en diferentes escalas temporales y espaciales, permiten el cambio entre la materia y energía, por lo que poseen estructura y función específica, consecuentemente son más que la simple suma de sus componentes (Baddi et al. 2007). Muchos científicos y teóricos han manifestado que la complejidad es una característica de importancia del ambiente (Cannon y St. John 2007). Las lagunas costeras pueden ser sistemas más complejos de lo esperado (Pérez-Ruzafa et al. 2004; 2005; 2007; 2008).

Las lagunas costeras son ecosistemas acuáticos complejos que proporcionan valiosos servicios ambientales (producción de oxígeno, captura de carbono, biodiversidad, entre otros), y en los trópicos suelen estar bordeados por manglares (Kennish y Paerl 2010), por lo que es cierto decir (Kathiresan y Bingham 2001; Mitra et al. 2017), que las lagunas costeras (áreas de pesca comercial y pesca de subsistencia) y el manglar (producción de hojarasca que sustenta redes tróficas) son componentes asociados al ecosistema de manglar. Comprender la gran complejidad de los procesos que interaccionan, determinan y mantienen la biodiversidad en los ecosistemas de manglar resultan todo un desafío (Feller et al. 2010), donde las condiciones del agua de la laguna (factores ambientales) resultan importantes al ser condiciones que regulan la biodiversidad a través de procesos de clasificación de especies (Norberg 2004).

Sin pretender entrar en un análisis detallado sobre las formas de medir la complejidad, algunas formas de realizarlo son las simulaciones de cómputo, análisis de fragmentación, índices de bifurcación Horton-Strahler, el índice de ramificación Carrillo-Mendoza, la complejidad de Kolmogorov entre otros (Casas y Romero 2016); sin embargo, el gran desafío es lograr medir de una manera clara, y lo más sencillo posible, el nivel de complejidad de un sistema. El reto es lograr convertir la información obtenida en un modelo matemático, que refleje lo que ocurre en el sistema, por lo tanto, debe reducir el sistema al mínimo sin omitir variables de alta importancia y saber cuáles pueden ser ignoradas, sin renunciar a la complejidad del modelo (ser tan sencillo como sea posible sin perder la complejidad), lo que facilitará su análisis y procesamiento (Holling 2001; Green et al. 2005; Casas y Romero 2016). Los índices compuestos responden a esta propuesta de ser lo más sencillo posible sin perder complejidad, ya que pueden reflejar un “sistema complejo” formado por numerosos “componentes” y facilita su comprensión como un conjunto y no en piezas individuales (Greco et al. 2019); además, han sido aplicados en estudios ambientales (Juwana et al. 2012; Wirehn et al. 2015). Así, resulta necesario y de gran interés construir un índice de complejidad ambiental de una laguna costera, a partir de un procedimiento sencillo y de fácil comprensión, que contribuya a entender las condiciones y procesos socioecológicos que existen (pesca, acuacultura, biodiversidad, dinámica entre otros), que a su vez aporte elementos para su conservación y manejo. El presente estudio aporta en este sentido.

Los estudios sobre la complejidad estructural del bosque de manglar, incluyendo en Chiapas, son comunes (Blanco et al. 2001; Samper-Villarreal y Silva-Benavides 2015; Torres 2019 y Velázquez-Pérez et al. 2019 entre otros), otros estudios centran su interés en la complejidad de la estructura de comunidades de peces (Padilla-Serrato et al. 2017), mientras que otros analizan la complejidad de las lagunas costeras a partir de diversos índices como los de ocupación costera, afectación agrícola, de incidencia mixta, impacto de fragmentación entre otros (García-Ayllón 2017); sin embargo, el desarrollo, análisis y entendimiento resultan complejos. No obstante, y considerando la relevancia de las características ambientales del agua lagunar, no se localizó estudio alguno que abordará la complejidad ambiental acuática, por lo que el presente trabajo plantea que es posible la construcción, desarrollo y análisis de un índice de complejidad ambiental sencillo y de accesible comprensión de un sistema lagunar.

Dado que es posible evaluar lo complejo, y uno de los modelos de evaluación es el de medición estadística (Le Moigne 1990; Ta-

ride 1995), el presente trabajo propone, utilizando la estadística inferencial, construir un índice compuesto, el índice de complejidad ambiental (ICAM). Nuestra propuesta inicia considerando que al realizar un análisis estadístico inferencial, deseamos conocer si entre los sitios de muestreo o tratamientos experimentales existe o no diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). En el caso de los análisis ambientales, si comparamos sitios, podemos considerar que, a mayor número de sitios comparados con diferencias estadísticas significativas, entonces el ambiente es más diferente, heterogéneo y/o complejo, mientras que, a mayor número de sitios con no existencia de diferencias estadísticas significativas, el ambiente es más similar, homogéneo y/o no complejo. El objetivo se centró en la propuesta de construcción de un índice de complejidad ambiental de la laguna de estudio, empleando algunas variables ambientales, a partir de la estadística inferencial, un índice de construcción sencilla y de fácil entendimiento.

Materiales y métodos

Laguna de estudio

La investigación de campo se realizó en “Laguna Pampa El Cabildo”, una laguna costera tropical que forma parte de la zona sujeta a conservación ecológica (ZSCE) y humedal de importancia internacional (sitio Ramsar 1771) “El Cabildo Amatal”, área natural protegida (ANP) localizada entre los municipios de Tapachula y Mazatán, Chiapas, México (Fig. 1). De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificado por García y CONABIO (1998), su clima es cálido subhúmedo (Aw1), con temperatura media anual superior a 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. La vegetación dominante es manglar (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) y popal (Ovalle-Estrada et al. 2022).

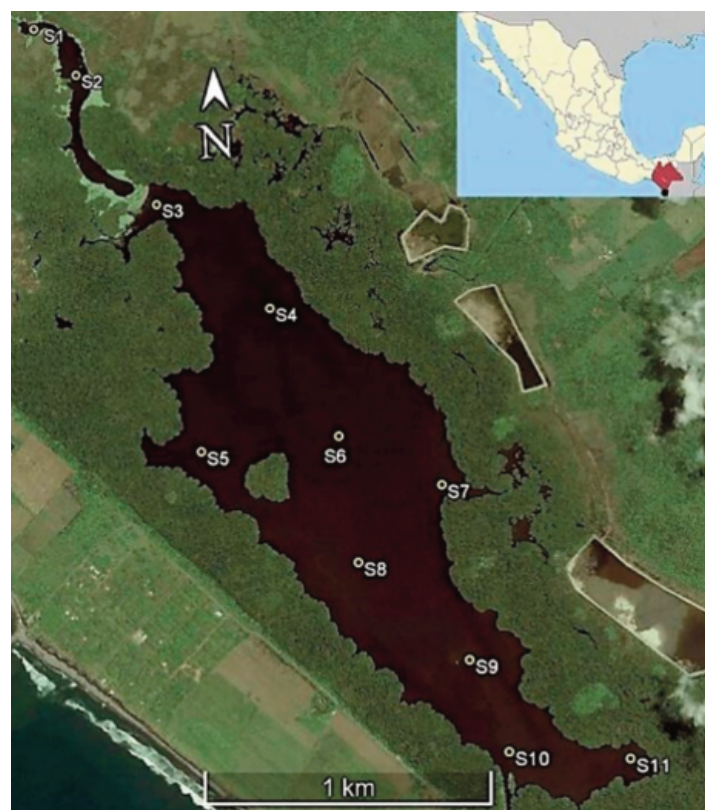


Figura 1. Laguna Pampa El Cabildo, Tapachula, Chiapas.

Figure 1. Laguna Pampa El Cabildo, Tapachula, Chiapas.

Trabajo de campo

Bimensualmente de octubre 2019 a julio 2020 se realizaron por cuadruplicado, durante la marea alta diurna (MAD) y la marea alta nocturna (MAN), registros de temperatura (°C) y pH con un potenciómetro Hanna (HI98108), salinidad con un refractómetro Hanna (HI96822), turbidez (UNT) con un turbidímetro Hanna (HI98703) y oxígeno disuelto (mg/L) con un oxímetro Hanna (HI9146) del agua superficial (cinco a 10 centímetros de profundidad) de la laguna en 11 sitios de trabajo (**Fig. 1**), los cuales se establecieron de forma que permitiera abarcar la mayor superficie posible de la laguna y permitiera abarcar el intervalo de marea alta que se calculó en aproximadamente cinco horas en promedio.

Análisis de la información

Los datos ambientales (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH y turbidez), fueron analizados inicialmente, por estaciones y meses de trabajo, mediante un análisis exploratorio de datos que permitió tener una primera valoración de patrones o tendencias. También se realizó un análisis multivariado de conglomerados (AMC), empleando el índice de similitud de Bray-Curtis con el fin de definir similitudes entre sitios y meses de muestreo de las variables analizadas. Seguidamente se realizó un análisis inferencial a partir de un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía ($\alpha=0.05$) para comparar cada factor ambiental (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto y turbidez) por meses y por sitios, cuando no se logró la normalidad ni la homogeneidad de los datos, fue necesario un análisis de varianza por permutaciones (PERMANOVA) que permitió ver los sitios y meses de muestreo estadísticamente diferentes. El análisis por factor permitió conocer que tan cambiante resulta cada variable y su aportación a la complejidad lagunar. La información fue procesada con los programas computacionales Excel y Past 4.03 (**Hammer et al. 2001**).

Para la construcción el ICAM, se partió del ANDEVA de una vía realizado por sitios y meses (unidades de muestreo), seguidamente se calculó la complejidad de cada factor (**Ecuación 1**):

$$CFA = 1 - (nUMD/nTUM) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

CFA= Complejidad de cada factor ambiental analizado

nUMD= número de unidades de muestreo con diferencia estadística significativa

nTUM= número total de unidades de muestreo

A continuación, se aplicó una ponderación equitativa para cada factor ambiental analizado, considerando que esta ponderación es la más utilizada en el desarrollo de índices compuestos (**Bandura 2008; OECD 2008; Greco et al. 2019**), y se procedió al cálculo del ICAM (**Ecuación 2**):

$$ICAM = (\sum CFA) / nFA \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

ICAM= Índice de complejidad ambiental

nFA= número de factores ambientales analizados

El valor del ICAM obtenido se comparó con la escala de complejidad ambiental propuesta en la **Tabla 1** para definir el ICAM lagunar.

Finalmente se aplicó un análisis de varianza de dos vías para tener un escenario adicional de la influencia de los meses-mareas y sitios-mareas en los factores ambientales, de esta manera considerar posibles cambios en la complejidad ambiental de la laguna.

Tabla 1. Escala propuesta de complejidad ambiental.

Table 1. Proposed scale of environmental complexity.

0.00-0.20	0.21-0.40	0.41-0.60	0.61-0.80	0.81-1.00
Sistema muy heterogéneo/complejo	Sistema heterogéneo/complejo	Sistema medianamente heterogéneo/complejo	Sistema poco heterogéneo/complejo	Sistema homogéneo/no complejo

Resultados

Los cambios de los factores ambientales en MAN y MAD en la laguna, por meses de trabajo, se muestran en la **Figura 2**. La temperatura del agua mostró el valor promedio más elevado durante la MAD con 36.0 ± 0.7 °C durante el mes de julio, inicios de la temporada de lluvias, y el valor promedio más bajo durante la MAN con 25.7 ± 2.2 °C en el mes de enero. Importante destacar la amplia diferencia entre el valor mínimo (23.3 °C) y valor máximo (37.0 °C) registrado en la laguna (13.7 °C). La salinidad registró los mayores valores durante el pico de la temporada de estiaje (enero y marzo) y los valores más bajos durante el pico de la temporada de lluvias (octubre y noviembre), tanto en MAN como en MAD. El oxígeno disuelto (OD), registró valores más homogéneos, siendo, generalmente, más elevados durante la MAD. Los valores promedio de pH oscilaron de 6.7 ± 0.3 en el mes de mayo durante la MAN, hasta 8.7 ± 0.5 en el mes de noviembre también durante la MAN. Finalmente, la turbidez presentó el valor promedio más bajo en MAD (5.0 ± 3.1 UNT) y el valor promedio más alto en MAN (46.0 ± 7.5 UNT).

Los cambios de los factores ambientales en MAN y MAD en la laguna, por sitios de trabajo se muestran en la **Figura 3**. Las temperaturas más cálidas se registraron siempre durante la MAD, que en promedio fue 5.5 °C superior que en MAN. Tanto en MAN como en MAD, las temperaturas promedio más bajas registradas se dieron en los sitios 1 y 2. Los valores promedio presentaron una clara tendencia a disminuir del sitio 11 (sitio más próximo a la zona marina) hacia el sitio 1 (sitio con mayor influencia del agua proveniente del río Coatán), lo cual fue más notorio durante la MAN. También fue claro que los sitios 1 y 2 presentaron, tanto en MAN como en MAD, los valores mínimos. El OD promedio osciló de 4.5 ± 1.7 (S2, MAN) a 9.7 ± 5.0 mg/L (S5, MAD), los valores promedios más altos se registraron durante la MAD, mientras que los valores más bajos se registraron en los S1 y S2, en MAN como en MAD. El pH presentó valores más homogéneos, donde el promedio general de la MAN sólo fue 0.2 unidades de pH menor que el promedio general de la MAD, al igual que las variables anteriores, los S1 y S2, presentaron los promedios más bajos, tanto en MAN como en MAD. Finalmente, la turbidez presentó amplias variaciones promedio, oscilando de 7.7 ± 1.2 (S9, MAN) a 22.1 ± 20.6 (S5, MAD) UNT.

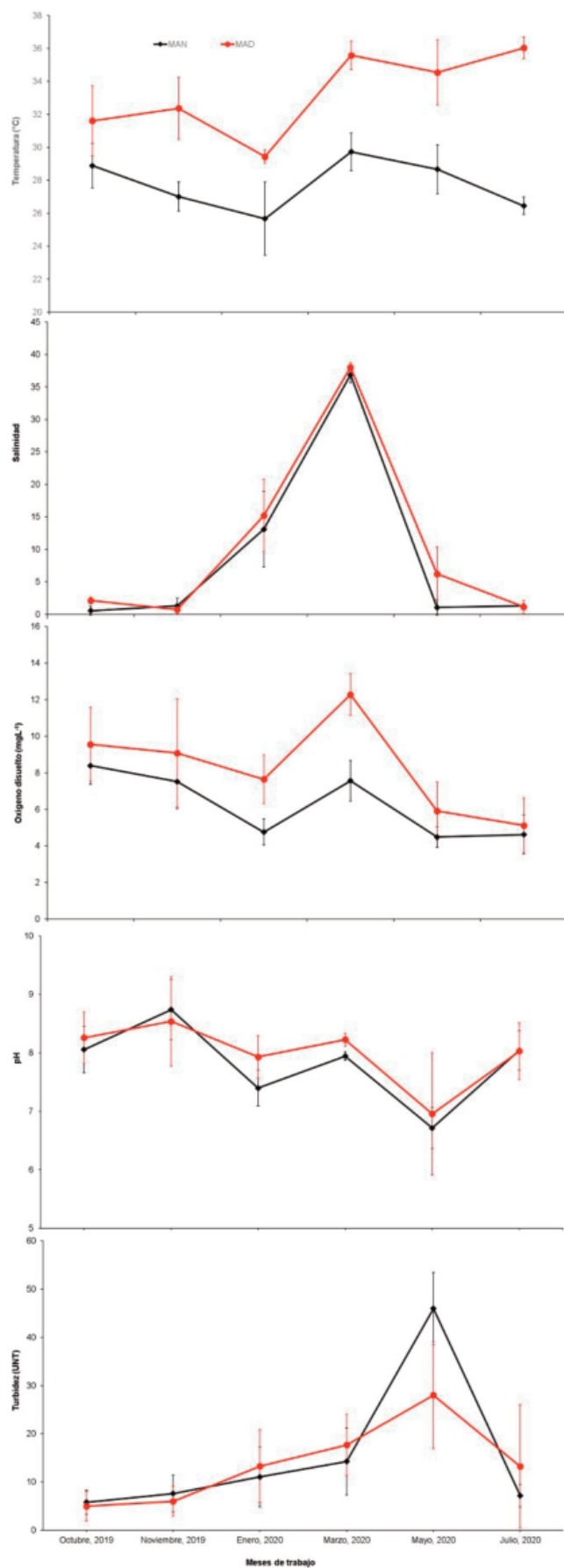


Figura 2. Variaciones de los factores ambientales analizados en Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas, México. Se presentan valores promedio \pm desviación estándar de marea alta nocturna (MAN) y marea alta diurna (MAD) por meses de trabajo.

Figure 2. Variations of the environmental factors analyzed in Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas, Mexico. Mean values \pm standard deviation of nocturnal high tide (NHT) and diurnal high tide (DHT) are presented by months of work.

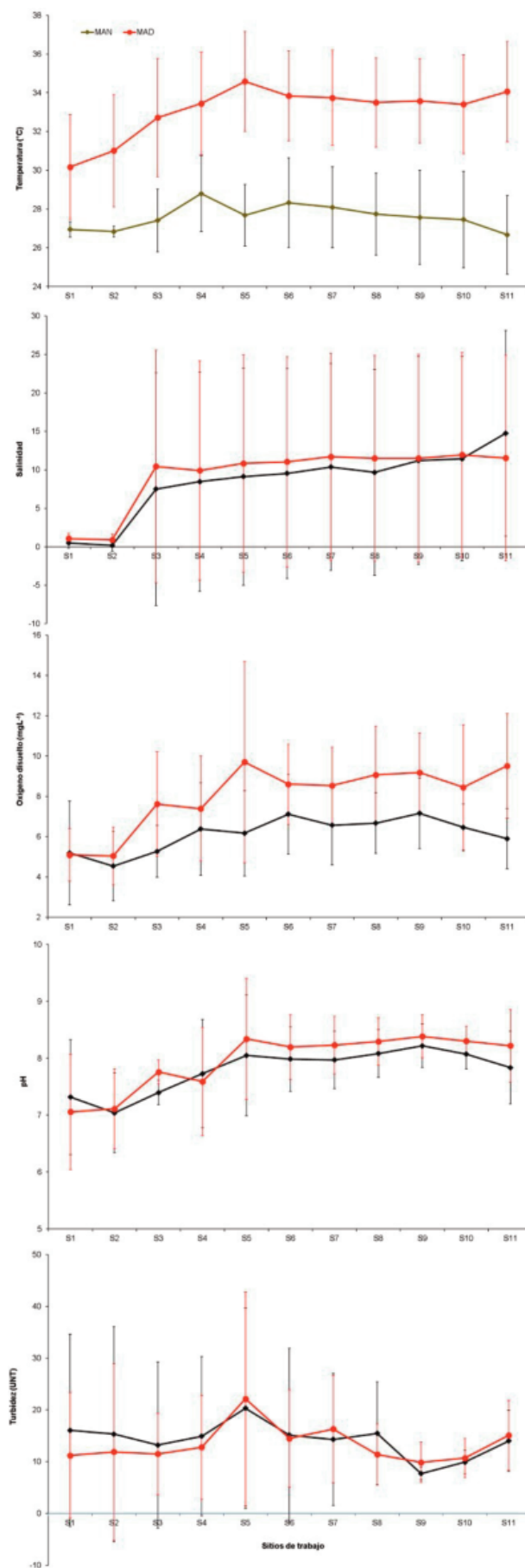


Figura 3. Variaciones de los factores ambientales analizados en Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas, México. Se presentan valores promedio \pm desviación estándar de marea alta nocturna (MAN) y marea alta diurna (MAD) por sitios de trabajo.

Figure 3. Variations of the environmental factors analyzed in Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas, Mexico. Mean values \pm standard deviation of nighttime high tide (NHT) and daytime high tide (DHT) are presented by work sites.

A partir del AMC la temperatura del agua no presentó similitudes importantes, y si mostró que enero fue un mes, tanto en MAN y MAD, separado de cualquier otro mes (promedio general más bajo, 27.5 ± 2.5 °C), mientras que la salinidad presentó similitud entre los meses de enero y marzo (periodo de estiaje), tanto en MAN como en MAD. El pH presentó alta similitud (mayor a 0.98) entre los meses de julio (de los primeros meses de lluvia) y octubre (de los últimos meses de lluvias), mientras que mayo fue un mes atípico, que se separó totalmente del resto de los meses que se analizaron. El OD y la turbidez, no presentaron patrones claros de similitud. Por sitios de trabajo, el AMC destacó claramente que, con excepción de la turbidez, los sitios 1 y 2 fueron muy similares (Fig. 4).

Referente al análisis inferencial, el ANDEVA mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la MAN vs MAD para todas las variables ambientales analizadas, excepto la turbidez; sin embargo, no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre meses y entre sitios (Fig. 5) para la temperatura del agua de la laguna. Por su parte la salinidad, OD y pH mostraron diferencias significativas entre MAN vs MAD, entre meses y sitios de muestreo (Fig. 5).

Considerando que a mayor número de meses y sitios de trabajo con diferencias significativas mayor es la complejidad ambiental, en cuanto a la temperatura es claro que la laguna es homogénea tanto entre meses como entre sitios de muestreo. Entre meses de muestreo, la salinidad presentó el 80% de las comparaciones con diferencias significativas durante la MAN, y el 100% en la MAD (Fig. 6). El OD mostró diferencias significativas en el 73.3% de las comparaciones durante la MAN y de 93.3% durante la MAD (Fig. 6). El pH registró diferencias significativas del

80 y 86.7% en las comparaciones durante la MAN y MAD respectivamente (Fig. 6). La turbidez, al no existir diferencias significativas entre la MAN vs MAD, se analizó juntando los datos de ambas mareas y el 93.3% de las comparaciones presentaron diferencias significativas (Fig. 6).

En el análisis por sitios de muestreo, la salinidad durante la MAN fue totalmente homogénea (0% de sitios con diferencias significativas), mientras que en la MAD el 32.7% de las comparaciones fueron diferentemente significativas (Fig. 7). Para el OD, durante la MAN y MAD, el porcentaje de comparaciones con diferencias significativas fue de 32.7 y 43.6 respectivamente (Fig. 7). El pH presentó un 41.8 % de comparaciones con diferencias significativas en MAN y de 50.98 % en MAD (Fig. 7). Finalmente, la turbidez al no presentar diferencias entre mareas, el análisis de los datos en conjunto mostró un 29.1 % de diferencias significativas (Fig. 7).

Los valores de complejidad ambiental obtenidos por factor analizado, por sitios y por meses de trabajo, y el ICAM lagunar se presentan en las Tablas 2 y 3. El análisis por sitios mostró que la complejidad, por factor analizado, va de no complejo a medianamente complejo, donde el ICAM lagunar fue el de una laguna poco compleja; mientras que el análisis por meses mostró que, por factor analizado, va de no complejo a muy complejo, y el ICAM lagunar se calculó como de una laguna ambientalmente compleja.

El análisis de varianza de dos vías, meses-mareas/ factores ambientales mostró que si existió interacción significativa ($p < 0.05$) en todos los casos (Tabla 4), mientras que en el caso de sitios-mareas/ factores ambientales, las interacciones significativas se presentaron en temperatura y oxígeno disuelto (Tabla 4).

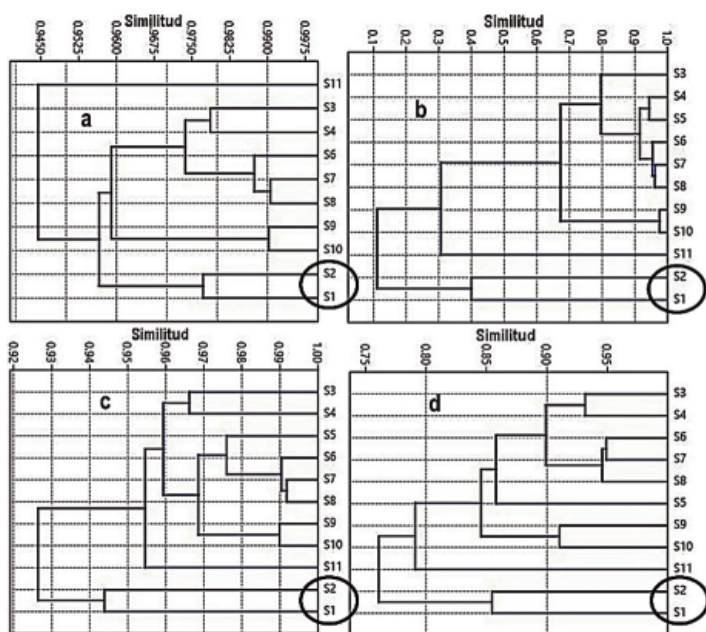


Figura 4. Similitud por sitios de trabajo. a= temperatura, b= salinidad, c= pH y d= OD. Los círculos muestran la similitud de los sitios 1 y 2. Las gráficas integran MAN y MAD.

Figure 4. Similarity by work sites. a= temperature, b= salinity, c= pH and d= OD. The circles show the similarity of sites 1 and 2. The graphs integrate NHT and DHT.

Temperatura del agua de la laguna			
MAN vs. MAD		Entre meses	
		Entre sitios	
p<0.05		p>0.05	
Salinidad del agua de la laguna			
MAN vs. MAD		Entre meses	
		Entre sitios	
p<0.05		p>0.05	
Oxígeno disuelto del agua de la laguna			
MAN vs. MAD		Entre meses	
		Entre sitios	
p<0.05		p>0.05	
pH del agua de la laguna			
MAN vs. MAD		Entre meses	
		Entre sitios	
p<0.05		p>0.05	
Turbidez del agua de la laguna			
MAN vs. MAD		Entre meses	
		Entre sitios	
p<0.05		p>0.05	

Figura 5. Diferencias significativas (rojo) y no significativas (negro) de las variables ambientales analizadas en Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas.

Figure 5. Significant (red) and non-significant (black) differences of the environmental variables analyzed in Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas.

Salinidad									
MAN					MAD				
Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio	Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio
Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo	Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo
Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio	Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio
Oxígeno disuelto									
MAN					MAD				
Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio	Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio
Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo	Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo
Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio	Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio
pH									
MAN					MAD				
Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio	Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio
Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo	Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo
Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio	Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio
Turbidez									
MAN					MAD				
Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio	Oct.-Nov.	Oct.-Enero	Oct.-Marzo	Oct.-Mayo	Oct.-Julio
Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo	Nov.-Enero	Nov.-Marzo	Nov.-Mayo	Nov.-Julio	Enero-Marzo
Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio	Enero-Mayo	Enero-Julio	Marzo-Mayo	Marzo-Julio	Mayo-Julio

Figura 6. Comparación entre meses de trabajo, durante la MAN y MAD, en Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas. Rojo = diferencias significativas, negro= no diferencias significativas.

Figure 6. Comparison between months of work, during NHT and DHT, in Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas. Red = significant differences, black = no significant differences.

Salinidad																			
MAN										MAD									
S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11	S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11
S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4	S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4
S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7	S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7
S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11	S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11
S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9	S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9
S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11						S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11					
Oxígeno disuelto																			
MAN										MAD									
S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11	S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11
S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4	S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4
S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7	S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7
S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11	S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11
S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9	S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9
S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11						S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11					
pH																			
MAN										MAD									
S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11	S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11
S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4	S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4
S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7	S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7
S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11	S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11
S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9	S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9
S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11						S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11					
Turbidez																			
MAN										MAD									
S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11	S1-S2	S1-S3	S1-S4	S1-S5	S1-S6	S1-S7	S1-S8	S1-S9	S1-S10	S1-S11
S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4	S3-S5	S2-S4	S2-S5	S2-S6	S2-S7	S2-S8	S2-S9	S2-S10	S2-S11	S3-S4
S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7	S3-S5	S3-S6	S3-S7	S3-S8	S3-S9	S3-S10	S3-S11	S4-S5	S4-S6	S4-S7
S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11	S4-S8	S4-S9	S4-S10	S4-S11	S5-S6	S5-S7	S5-S8	S5-S9	S5-S10	S5-S11
S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9	S6-S7	S6-S8	S6-S9	S6-S10	S6-S11	S7-S8	S7-S9	S7-S10	S7-S11	S8-S9
S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11						S8-S10	S8-S11	S9-S10	S9-S11	S10-S11					

Figura 7. Comparación entre sitios de trabajo, durante la MAN y MAD, en Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas. Rojo = diferencias significativas, negro= no diferencias significativas.

Figure 7. Comparison between work sites, during NHT and DHT, in Laguna Pampa El Cabildo, Chiapas. Red = significant differences, black = no significant differences.

Tabla 2. Complejidad de cada variable analizada espacialmente e ICAM lagunar, por régimen de marea.**Table 2.** Complexity of each variable analyzed spatially and lagoon ICAM, by tidal regime.

	Variable analizada					ICAM Lagunar
	Temperatura	Salinidad	pH	Oxígeno disuelto	Turbidez	
MAN	1.00	1.00	0.58	0.67	0.71	0.79
MAD	1.00	0.67	0.56	0.49	0.71	0.69

Tabla 3. Complejidad de cada variable analizada temporalmente e ICAM lagunar por régimen de marea.**Table 3.** Complexity of each variable analyzed temporally and lagoon ICAM by tidal regime.

	Variable analizada					ICAM Lagunar
	Temperatura	Salinidad	pH	Oxígeno disuelto	Turbidez	
MAN	1.00	0.20	0.27	0.20	0.07	0.35
MAD	1.00	0.00	0.07	0.13	0.07	0.25

Tabla 4. Valores de significancia de las interacciones (ANDEVA de dos vías) meses-marea/factores ambientales y sitios-marea/factores ambientales.**Table 4.** Significance values of the interactions (two-way ANOVA) months-tide/environmental factors and sites-tide/environmental factors.

	Temperatura	Salinidad	OD	pH	Turbidez
Meses-Mareas	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Sitios-Mareas	0.002	0.999	0.012	0.519	0.935

Discusión

En los sistemas lagunares-estuarinos, la mezcla de aguas marinas y epicontinentales fluctúa en el tiempo y espacio, e influye en las variaciones fisicoquímicas del agua y de la diversidad acuática; consecuentemente, el conocimiento de las condiciones ambientales de una laguna costera resulta fundamental para entender su funcionamiento e implicaciones para su manejo sostenible (Kjerfve 1994; De la Lanza-Espino et al. 1998; Sanderson y Taylor 2003; De Lanza-Espino y Gómez-Rojas 2004).

En Laguna Pampa El Cabildo, la temperatura ambiental del agua mostró variaciones significativas ($p < 0.05$) entre la MAN y la MAD, esto por influencia directa de ausencia-presencia del calor solar; esta diferencia estadística no se observó entre meses y entre sitios de trabajo. La salinidad, el OD y el pH del agua, mostraron diferencias significativas entre los regímenes de marea; así como, entre meses y entre sitios. La turbidez, si bien no mostró diferencias entre MAN y MAD, si presentó diferencias entre meses y sitios. Los resultados muestran la evidente heterogeneidad ambiental de la laguna (Fig. 2 y 3), las diferencias fueron más destacadas entre meses que entre sitios. Diversos estudios han evidenciado las amplias variaciones ambientales en las lagunas costeras tropicales como resultado de diferentes factores como la lluvia, la magnitud de las mareas, la aportación de las aguas epicontinentales, las corrientes costeras e internas, el grado de insolación entre otros (Lara-Domínguez et al. 2011; Snedden et al. 2012; Aguirre-León et al. 2014), factores que seguramente están influyendo en la heterogeneidad ambiental de Laguna Pampa El Cabildo.

Un aspecto por destacar en el análisis de similitud es, con excepción de la turbidez, la similitud constante del sitio 1 con el sitio 2 y separados de los otros sitios de muestreo (Fig. 4). Para acentuar la similitud de los S1 y S2, así como su distanciamiento del resto de la laguna, un elemento relevante es la vegetación, que en los sitios 1 y 2 es predominantemente tular, vegetación acuática flotante y sumergida (Fig. 8a) mientras que en los otros sitios es totalmente manglar (Fig. 8b).

El distintivo de ANP de LPEC, destaca su relevancia incuestionable de conservación y manejo sostenible; sin embargo, inicialmente debe conocerse a mayor detalle posible todos sus componentes, en principio, el ambiental. Diferentes estudios sugieren que cuando un humedal es muy grande o complejo, realizar descripciones diferenciadas puede ser inicialmente útil (Ramsar Convention Secretariat 2010). Desafortunadamente lograr diferenciar áreas en un cuerpo de agua resulta altamente complejo, pues no es fácil distinguir áreas distintas por observación directa y se requieren estudios de campo y laboratorio para conocer las características de las aguas (Castro-Castro y Sokolov 2010). En este sentido la Ramsar Convention Secretariat (2010) sugirió establecer subsitios (unidades de manejo) cuando el humedal es extenso o cuando se pueden distinguir diversas características, mientras que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza sugirió que los límites de las unidades ambientales deben ser con bases ecológicas (IUCN 2004). El análisis de similitud mostró claramente que los sitios 1 y 2 integraron un grupo distinto al resto de los sitios de muestreo, aun cuando los últimos presentan disimilitudes al interior del grupo, por lo que es posible considerar a los sitios de trabajo 1 y 2 como una unidad ambiental estuarina, la que es definida como la porción de agua con características similares dentro de un sistema lagunar (Castro-Castro y Sokolov 20120), distinta al resto de la laguna. Adicionalmente, reforzando esta diferenciación, es claro observar (Fig. 8a y 8b) las diferencias en los tipos de vegetación para cada conjunto de sitios de trabajo.

Medir la complejidad, redundando, resulta altamente complejo, donde las herramientas estadísticas, matemáticas, de informática y de ciencias computacionales son esenciales (Green et al. 2005). Existen diversas propuestas que miden la complejidad ambiental (Casas y Romero 2016); sin embargo, su construcción y comprensión resultan complicados, por ejemplo, índices como los de homogeneidad múltiple, ganancia de información media, complejidad de fluctuación, complejidad de Kolmogorov entre otros (Jaimes 1988; Bates y Shepard 1993; Wackerbauer et al. 1994; Parrot 2010; Zenil 2013), más aún en un contexto de administración pública por tomadores de decisiones.

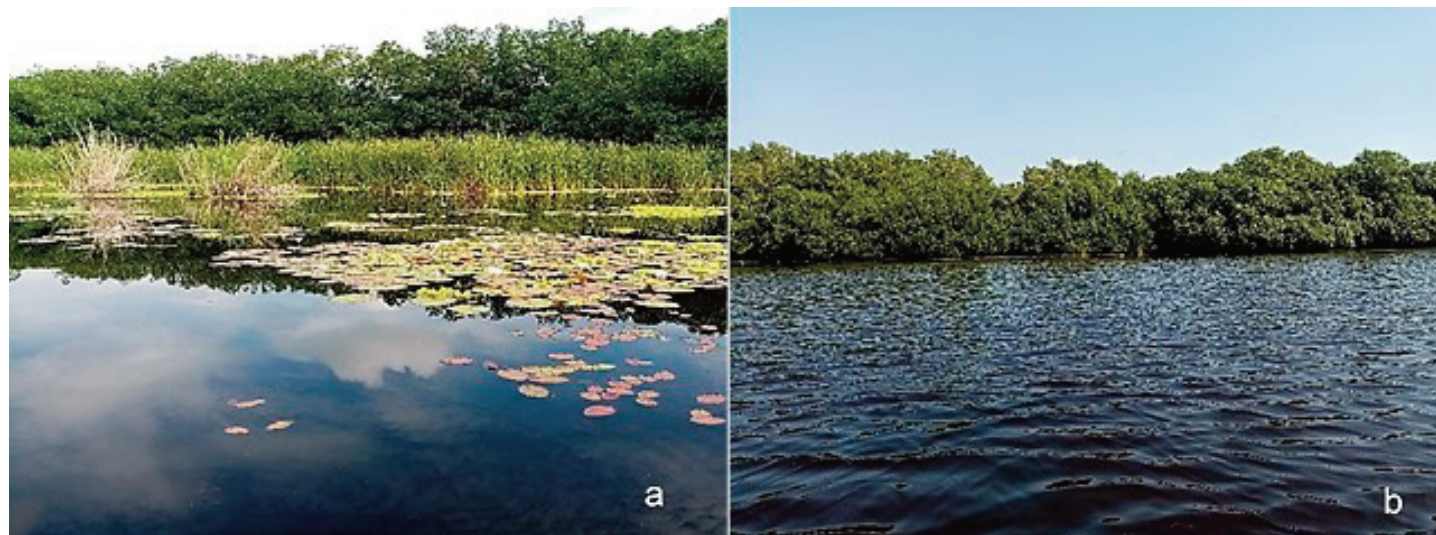


Figura 8. Tipos de vegetación encontrados en LPEC. a= tular, popal, vegetación acuática flotante y sumergida; b= manglar.

Figure 8. Types of vegetation found in LPC. a= tular, popal, floating and submerged aquatic vegetation; b= mangrove.

Los índices compuestos, como el índice de complejidad ambiental aquí propuesto, parte del análisis de la estadística inferencial por factor con un análisis de varianza de una vía (para una construcción y comprensión más sencilla), planteando como base que un análisis con comparaciones con gran número de diferencias significativas, implica una mayor complejidad (mayor heterogeneidad), y comparaciones con mayor número de no diferencias significativas, corresponde a mínima complejidad (mayor homogeneidad), sugiriendo de esta forma una escala de complejidad que va desde un nivel muy heterogéneo o complejo (0.00-0.20) hasta un nivel homogéneo o no complejo (0.81-1.00). Es importante aclarar que una mayor complejidad/heterogeneidad o mínima complejidad/heterogeneidad no debe entenderse como algo negativo, cada nivel y extremo de complejidad tienen sus propias particularidades, ventajas y desventajas que deberán irse describiendo y complementando con otros factores como la diversidad de especies acuáticas (peces, crustáceos, reptiles, mamíferos y aves), calidad del agua (contaminación), profundidad y actividades humanas, entre otros, además de procurar actualizar estos estudios cuando se detecte algún cambio relevante en las características o condición del área de estudio.

Otra ventaja de los índices compuestos, como el que proponemos, es que pueden seguir añadiéndose nuevas variables, lo que permitirá un índice cada vez más robusto. Es importante destacar que la herramienta descrita parte de la estadística inferencial, por lo que cada experto debe realizar la interpretación ecológica/ambiental correcta del resultado estadístico, en el presente estudio fue claro que la mayor complejidad se presentó en el contexto temporal, lo cual resulta coherente cuando observamos los cambios en las variables ambientales entre los periodos de lluvias y secas (Fig. 2). Cabe destacar que es necesario comprender la complejidad de las lagunas costeras para diseñar métodos de restauración que concilien la integridad del ecosistema con sus usos (Pérez-Ruzafa et al. 2018).

Nuestros resultados mostraron que temporalmente “Laguna Pampa El Cabildo” es una laguna totalmente heterogénea, mientras que espacialmente es mayormente heterogénea, esta heterogeneidad resulta coincidente con lo expresado por Pérez-Ruzafa (2015), quien afirma que los ecosistemas lagunares son caracterizados por su alta heterogeneidad (complejidad). Si bien la complejidad analizada en este trabajo se centra en las características fisicoquímicas del agua, es un inicio para el futuro análisis práctico de la complejidad lagunar, sobre todo si consideramos la complejidad del ecosistema lagunar, resulta un proceso/atributo lagunar y un servicio ecológico/bien social (Pérez-Rizafa et al. 2019).

Nuestra propuesta de Índice de Complejidad Ambiental, resulta novedosa, sencilla de calcular y con amplia posibilidad de aplicarse a otros cuerpos de agua, y áreas naturales protegidas en general, que cuenten con la información suficiente y accesible para calcular este índice; además, su sencilla comprensión permitirá a tomadores de decisión mejores elementos para la conservación de áreas naturales protegidas. Lo anterior, permite afirmar el cumplimiento del objetivo e hipótesis planteados.

Los resultados obtenidos en el ANDEVA de dos vías mostraron claramente que las interacciones meses/mareas fueron significativas en la totalidad de los factores analizados, mientras que en la interacción sitios/mareas las diferencias significativas se dieron en los factores temperatura y oxígeno disuelto (Tabla 4), lo anterior refuerza la consideración del tiempo como el de mayor influencia en la heterogeneidad (complejidad) de la laguna. La mayor incidencia de la temporalidad en los factores analizados, seguramente es debido a la fuerte diferencia entre las dos estaciones climáticas presentes en la región, lluvias y estiaje.

Conclusiones

Laguna Pampa El Cabildo presentó variaciones espacio-temporales, siendo las variaciones de la temperatura, por régimen de mareas (nocturno-diurno), las más pronunciadas como consecuencia directa de la ausencia-presencia del calor solar. Entre meses la variación más pronunciada se registró en la salinidad como consecuencia del régimen de lluvias-estiaje.

El análisis de similitud mostró claramente dos áreas distintas, una integrada por los S1 y S2, otra integrada por los sitios del 3 al 11, lo cual también se ve reflejado por los diferentes tipos de vegetación presente en cada área o unidad ambiental.

En general LPEC presentó, espacialmente, un nivel de laguna poco compleja, mientras que temporalmente el ICAM describe una laguna compleja. Los niveles, espacio-temporales, de complejidad ambiental identificados para esta laguna costera, debe entenderse como un componente inicial de diagnóstico, y debe ser tomado en cuenta en decisiones de conservación y manejo temporal de la laguna, diagnóstico que debe actualizarse cada seis años, como lo sugiere la Ramsar Convention Secretariat (2010).

El índice propuesto, resulta de construcción práctica y de comprensión sencilla.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Sociedad Cooperativa Pescadores del Cabildo por su apoyo en el trabajo de campo.

Contribución de los autores

V. Castro-Castro: Conceptualización, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Análisis estadístico, Validación, Visualización, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición. G. Rivera-Velázquez: Conceptualización, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Redacción-revisión. M. A. Peralta-Meixueiro: Investigación, Metodología, Validación, Redacción-revisión. F. J. López-Rasgado: Investigación, Metodología, Análisis estadístico, Validación, Redacción-revisión.

Referencias

- Aguirre-León, A., Pérez-Ponce, H.E., Díaz-Ruiz, S. 2014. Heterogeneidad ambiental y su relación con la diversidad y abundancia de la comunidad de peces en un sistema costero del Golfo de México. *Revista Biología Tropical* 6(2), 145-163. <https://doi.org/10.15517/RBT.V62I1.8212>
- Badii, M., Landeros, J., Cerna, E. 2007. Papel de los Ecosistemas en la Sustentabilidad. *Cultura Científica y Tecnológica* 21(4), 19-28. Disponible en: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/437/416>
- Bandura, R. 2008. *A survey of composite indices measuring country performance: 2008 update*. Technical report, Office of Development Studies, United Nations Development Programme (UNDP), Nueva York. Estados Unidos.
- Bates, J.E., Shepard, H. K. 1993. Measuring complexity using information fluctuation. *Physics Letters A* 172(6), 416-425. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)90232-O](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)90232-O)
- Blanco, J.F., Bejarano, A.C., Lasso, J., Cantera, J.R. 2001. A new look at computation of the complexity index in mangroves: do disturbed forests have clues to analyze canopy height patchiness? *Wetlands Ecology and Management* 9, 91-101. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:101115220126>
- Cannon, A.R., St. John, C.H. 2007. Measuring Environmental Complexity. A Theoretical and Empirical Assessment. *Organizational Research Methods* 10(2), 296-321. <https://doi.org/10.1177/1094428106291058>
- Casas, P.D., Romero, F.J. 2016. Alcance de la definición de la complejidad enfocada hacia el estudio de lo ambiental. Monografía. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/4220>
- Castro-Castro, V., Sokolov, M. 2010. Unidades ambientales estuarinas. Una propuesta para el manejo de cuerpos de aguas en áreas naturales protegidas. En: Lus, L., Bustos, H. (coords). *Memorias del XV Congreso Nacional de Oceanografía*, pp. 303-310. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.
- Dagdud, L.L. 2014. La diversidad en el estudio de los sistemas complejos. *ContactoS* 92, 26-32. Disponible en: <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/revista/92/pdfs/complejos.pdf>
- De la Lanza-Espino, G., Gómez-Rojas, J.C. 2004. Características fisicoquímicas del Golfo de México. En: Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra, E. (comp.). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*, pp. 105-132. SEMARNAT-INE-IE-HRIGMS, D.F. México.
- De la Lanza-Espino, G., Sánchez-Santillán, N., Esquivel-Herrera, A. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica* 8(2): 89-96. Disponible en: <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/715/306>
- Feller, I.C., Lovelock, C.E., Berger, U., McKee, K.L., Joye, S.B., Ball, M.C. 2010. Biocomplexity in mangrove ecosystems. *Annual Review of Marine Science* 2, 395-417. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1091.6236&rep=rep1&type=pdf>
- García-Ayllón, S. 2017. Integrated management in coastal lagoons of highly complexity environments: Resilience comparative analysis for three case-studies. *Ocean and Coastal Management* 143(1), 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.007>
- García, E., CONABIO. 1998. Climas (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). México. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html> [Accedido 20 de septiembre de 2023].
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., Torrisi, G. 2019. On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research* 141, 61-94. <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>
- Green, J.L., Hastings, A., Arzberger, P., Ayala, F.J., Cottingham, K.L., Cuddington, K., Davis, F., et al. 2005. Complexity in ecology and conservation: mathematical, statistical, and computational challenges. *BioScience* 55(6), 501-510. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0501:CIEACM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0501:CIEACM]2.0.CO;2)
- Hammer, Æ., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistical Software package for education and data analysis. *Paleontología electrónica* 4(1). 9 p. Disponible en: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Holling, C. 2001. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems* 4(5), 390-405. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5>
- IUCN. 2004. Managing marine protected areas. A toolkit for the western Indian Ocean. Eastern African Regional Programme. IUCN (International Union for Conservation of Nature). Nairobi, Kenya. Disponible en: https://www.iucn.org/sites/default/files/import/downloads/mpa_toolkit_wio.pdf
- Jaimes, E. 1988. Determinación de índices de homogeneidad múltiples globales en sistemas pedogeomorfológicos de la Cordillera de la Costa, Serranía del Litoral Central. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Juwana, I., Muttill, N., Perera, B.J.C. 2012. Indicator-based water sustainability assessment-A review. *Science of the Total Environment* 438(1), 357-371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>
- Kathiresan, K., Bingham, B.L. 2001. Biology of mangroves and mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology* 40, 81-251. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(01\)40003-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(01)40003-4)
- Kennish, M.J., Paerl, H.W. 2010. Coastal lagoons critical habitats of environmental change. En: Kennish, M. J., Paerl, H.W. (eds.). *Coastal Lagoons. Critical habitats of environmental change*, pp. 1-15. CRC Press, Boca Ratón, FL. Estados Unidos.
- Kjerfve, B. 1994. *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Science. Amsterdam, Países Bajos.
- Lara-Domínguez, A. L., Contreras-Espinosa, F., Castañeda-López, O., Barba-Macias, E., Pérez-Hernández, M.A. 2011. Lagunas costeras y estuarios. En: Cruz-Angón, A. (ed.). *La Biodiversidad en Veracruz: Estudio del Estado*, pp. 301-317. CONABIO, México.
- Le Moigne, J.L. 1990. *La modélisation des systèmes complexes*. DUNOD. Paris, Francia.
- Luengo, G.E. 2018. *Las vertientes de la complejidad: pensamiento sistémico, ciencias de la complejidad, pensamiento complejo, paradigma ecológico y enfoques holistas*. ITESO. Guadalajara, México.
- Miramontes, O. 1999. Los sistemas complejos como instrumentos de conocimiento y transformación del mundo. En: Ramírez (ed.), *Perspectivas sobre teoría de sistemas*, pp. 83-92, UNAM-Siglo XXI, México.
- Mitchell, M. 2009. *Complexity: a guided tour*. OXFORD University Press. New York, USA.
- Mitra, A., Banerjee, K., Chaudhuri, T.R. 2017. *Recent developments in mangrove research: A works based on cutting-edge research and ground realities of the Indian ecosystem*. Hindustan Publishing Corporation. New Delhi, India.
- Norberg, J. 2004. Biodiversity and ecosystem functioning: A complex adaptive systems approach. *Limnology and Oceanography* 49(4, part 2), 1269-1277. https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.4_part_2.1269
- OECD 2008. *Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and user guide*. OECD. Paris, France. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Ovalle-Estrada, F., Vázquez-Lule, A.D., Tovilla-Hernández, C., Alcántara-Maya, J.A., Rodríguez-Zúñiga, M.T. 2022. Caracterización del sitio de manglar PS27 Lagunas Cabildo-Amatal-Gancho Murillo. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Actualización con datos a 2020. *Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica*. CONABIO, México, CDMX. Disponible en: <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/15048.pdf>
- Padilla-Serrato, J., López-Martínez, J., Rodríguez-Romero, J., Acevedo-Cervantes, A., Galván-Magaña, F., Lluch-Cota, D. 2017. Changes in fish community structures in a coastal lagoon in the Gulf of California, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 52(3), 567-579. <https://www.redalyc.org/pdf/479/47954027013.pdf>
- Parrot, L. 2010. Measuring ecological complexity. *Ecological Indicators* 10, 1069-1076. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.03.014>

- Pérez-Ruzafa, A. 2015. El papel de la conectividad restringida en la construcción de los ecosistemas marinos semiaislados: el ejemplo de las lagunas costeras y los archipiélagos. *Revista de la Academia Canaria de Ciencias* 27(1), 411–456.
- Pérez-Ruzafa, A., Quispe-Becerra, J.I., García-Charton, J.A. Marcos, C. 2004. Composition, structure and distribution of the ichthyoplankton in a Mediterranean coastal lagoon. *Journal of Fish Biology* 64, 202–218. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2004.00301.x>
- Pérez-Ruzafa, A., Fernández, A.I., Marcos, C. Gilabert, J., Quispe, J.I., García-Charton, J.A. 2005. Spatial and temporal variations of hydrological conditions, nutrients and chlorophyll *a* in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, Spain). *Hydrobiologia* 550:11–27. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-4356-2>
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I.M., Barcala, E., Hegazi, M.I. Quispe, J. 2007. Detecting changes resulting from human pressure in a naturally quick-changing and heterogeneous environment: Spatial and temporal scales of variability in coastal lagoons. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75(12), 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.04.030>
- Pérez-Ruzafa, A., Hegazi, M.I., Pérez-Ruzafa, I.M., Marcos, C. 2008. Differences in spatial and seasonal patterns of macrophyte assemblages between a coastal lagoon and the open sea. *Marine Environmental Research* 65, 291–314. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.11.008>
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I.M. 2018. Cuando mantener la integridad ecológica y la complejidad es la mejor herramienta de restauración: el caso de la laguna del Mar Menor. En: Quintana, X., Boix, D., Gascón, S., Sala, J. (coords). *Gestión y restauración de lagunas costeras mediterráneas en Europa*, pp. 67–95. Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis. Torroella de Montgrí, España. https://www.museudelamediterrania.cat/pujades/files/_Recerca_i_Territori_10_ESP_MdM%20internet.pdf
- Pérez-Ruzafa, A., Pérez-Ruzafa, I.M., Newton, A., Marcos, C. 2019. Coastal Lagoons: Environmental Variability, Ecosystem Complexity, and Goods and Services Uniformity. In Wolanski, E., Day, J. W., Elliott, M., Ramachandran, R. (eds.). *Coasts and Estuaries. The Future* (253–276). Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Ramsar Convention Secretariat 2010. *Managing wetlands: Frameworks for managing Wetlands of International Importance and other wetland sites. Ramsar handbooks for the wise use of wetlands*, 4th edition, vol. 18. Disponible en: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-18.pdf>
- Samper-Villarreal, J., Silva-Benavides, A.M. 2015. Complejidad estructural de los manglares de Playa Blanca, Escondido y Rincón de Osa, Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 63(1), 199–208. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.23103>
- Sanderson, P.G., Taylor, D.M. 2003. Short-term water quality variability in two tropical estuaries, Central Sumatra. *Estuaries* 26(1), 156–165. <https://doi.org/10.1007/BF02691702>
- Snedden, G.A., Cable, J.E., Kjerfve, B. 2013. Estuarine geomorphology and coastal hydrology. En: Day, J.W., Crump, B.C., Kemp, W.M., Yáñez-Arancibia, Y. (eds.), *Estuarine ecology*, pp. 19–38, Wiley-Sons. New Jersey, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118412787>
- Taride, M. 1995. Complejidad y sistemas complejos. *História, Ciências, Saúde - Manguinhos* 1(1), 46–66. Disponible en: <https://www.scielo.br/hj/hcsm/a/cfGJmwpVSg8rwYJX3bXPjpv/?format=pdf&lang=es>
- Torres, D.J.A. 2019. Complejidad estructural aérea de bosques de manglar y su relación con contenido de carbono azul en suelos. Universidad Nacional de Colombia. Repositorio institucional UNAL. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75951/1018411325.2019.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Velázquez-Pérez, C., Tovilla-Hernández, C., Romero-Bermy, E.I., De Jesús-Navarrete, A. 2019. Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. *Madera y Bosques* 25(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531885>
- Wackerbauer, R., Witt, A., Atmanspacher, H., Kurths, J., Scheingraber, H. 1994. A comparative classification of complexity measures. *Chaos, Solitons and Fractals* 4, 133–173. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(94\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0960-0779(94)90023-X)
- Wiréhn, L., Danielsson, A., Neset, T.S.S. 2015. Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change. *Journal of Environmental Management* 156, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.020>
- Zenil, H. 2013. Complejidad y aleatoriedad. *Ciencia* 64(4), 56–63. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/64_4/PDF/Complejidad.pdf