

POTENCIAL CAMBIO DE RÉGIMEN DE UN SISTEMA LAGUNAR EN EL PACÍFICO TROPICAL DE MÉXICO

Potential Regime Shifts in One Estuarine System in the Mexican Tropical Pacific

Carlos Andrés Rodríguez-Perafán

Carlos Eduardo Guevara Fletcher

María Eufemia Freire Tigreros

Resumen:

El enfoque teórico de los cambios de régimen se exploran como una herramienta útil para vislumbrar cómo actuales y futuras perturbaciones antrópicas y eventos naturales podrían alterar los procesos de un sistema lagunar en el Pacífico Tropical de México, donde la pesca de pequeña escala es la principal actividad económica. En términos predictivos, se vinculan datos empíricos con teoría y se discute la forma en que un cambio de régimen en el ecosistema puede dispararse mediante una mezcla de procesos internos y fuerzas externas que afectan la estructura, función y dinámica del ecosistema. Los resultados muestran que múltiples causalidades como la alta presión en los recursos pesqueros, la contaminación del agua por fuentes puntuales y difusas, el impacto potencial del cambio climático y los efectos de un mal manejo de cuenca, pueden estar socavando lentamente la resiliencia en el ecosistema, lo cual puede conducir a un cambio de régimen en la laguna costera. Estos resul-

tados tienen implicaciones en el campo de la ecología y el manejo adaptativo de los recursos naturales y el ecosistema, en casos en los que se requiere tomar decisiones de manejo con altos niveles de incertidumbre.

Palabras claves:

Cambio de régimen, sistemas lagunares, resiliencia, perturbaciones antrópicas y naturales, eutrofización.

Abstract:

It were explored the theoretical approach to regime changes as a useful tool to know how current and future anthropogenic and natural disturbances events could alter the processes of a lagoon system localize in the Tropical Pacific of Mexico, where small-scale fishing is the main economic activity. In predictive terms, empirical and theory data was linked to analyze the way in which a regime change in the ecosystem could altered by a mixture of internal processes and external forces. It were discussed the processes that affect the structure, function and dynamics of the ecosystem. The results showed that multiple causalities such as high pressure on fishery resources, water contamination from punctual and diffuse sources, the potential impact of climate change and the effects of poor management, might be slowly undermining resilience in the ecosystem, which could lead to a regime change in the lagoon coastal system. These results have implications in the field of ecology and the adaptive management of natural resources and the ecosystem, in cases where management decisions with high levels of uncertainty are required.

Key words:

regime changes, lagoon system, resiliencies, anthropic and natural disturbances, eutrophication.

Introducción

Entre los ecosistemas costeros, las lagunas costeras son uno de los sistemas más productivos. En ellos siendo la productividad primaria el punto de partida para la circulación de energía y nutrientes a través de todos los niveles tróficos. Las lagunas costeras también contribuyen exportando energía a ecosistemas aledaños (Stuardo y Valdovinos, 1989), y en combinación con los manglares, son el medio en que se reproducen, crían, alimentan, refugian y cohabitan muchas especies de flora y fauna acuática. La productividad primaria en las lagunas está en función de las descargas fluviales, los movimientos mareales y las áreas de vegetación costera circundante (manglares y pastos de pantano) y sumergida (pastos marinos y macroalgas), que inciden en la productividad secundaria. Esta, representada por la comunidad de peces, es relevante en los ecosistemas costeros, porque contribuye a la regulación energética a través de su capacidad de desplazamiento en el ecosistema y entre ecosistemas (Díaz-Ruiz et al., 2004).

Los ecosistemas pueden presentar cambios repentinos en su estructura, función y dinámica, y a esto se le conoce como cambios en el régimen de un sistema (Marín et al., 2014). Aunque muchos estudios han modelado los cambios de régimen en ambientes marinos (Hare y Mantua, 2000), de agua dulce (Carpenter et al., 1999) y terrestres (DeMenocal et al., 2000), pocos trabajos han explorado vincular la teoría con la observación (Scheffer y Carpenter, 2003), subestimando así el valor que estos estudios tienen en la administración de los recursos naturales y el ecosistema con el fin de alertar a tiempo sobre un posible cambio de régimen. Al vincularse la teoría con la observación, se puede conocer, representar y predecir la realidad que se estudia (Granada, 1984). En este apartado se explora el enfoque teórico de cambio de régimen para vislumbrar cómo las perturbaciones antrópicas y los eventos naturales alteran los procesos del sistema lagunar Chantuto-Panzacola, localizado en la costa sur del Pacífico mexicano, al interior de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada (La REBIEN) (Figura 1). Primero se revisan las bases teóricas del cambio de régimen, para conceptualizar y entender la forma en que responde un sistema al cambio en las condiciones externas. Después, empleando la literatura y datos de campo (Rodríguez-Perafán, 2014), se discute cómo un cambio de régimen en Chantuto-Panzacola puede dispararse mediante una mezcla de procesos internos y fuerzas externas, que generan fluctuaciones en el ecosistema y que pueden llevar a la pesca a colapsar.

Bases Teóricas del Cambio de Régimen

La respuesta de un ecosistema a condiciones cambiantes por efecto de variables como: temperatura, sobreexplotación de recursos o carga de nutrientes puede variar de una forma suave a una discontinua o fuerte (Turner et al. 1990, Redman 1999). En el caso de los sistemas dinámicos, como las lagunas costeras, estos pueden responder suavemente al cambio en las condiciones externas, pero a veces ellos pueden experimentar cambios profundos cuando las condiciones se acercan a un nivel crítico, y en algunos casos pueden tener más de un estado estable bajo ciertas condiciones (Scheffer y Carpenter, 2003) (Figura 2).

Los cambios de régimen se presentan cuando la resiliencia de un sistema es excedida y se produce un gran cambio casi imposible de revertir (Raffa et al., 2008) (Figura 2); lo que en el caso de los sistemas dinámicos ocurre por una perturbación o el envejecimiento del sistema (Marín et al., 2014). Además, los cambios de régimen son los grandes cambios del sistema que están más allá del rango normal visto a escalas microscópicas (e.g., puntos estables, ciclos límite y atractores extraños) (Figura 2). Los cambios de régimen, también conocidos como sorpresas ecológicas (Genkai-Kato, 2007), normalmente resultan de interacciones entre múltiples causalidades y están influenciados por la heterogeneidad espacial en múltiples escalas (Scheffer y Carpenter, 2003).

Los cambios de régimen se atribuyen fácilmente a eventos estocásticos como los huracanes o las invasiones de especies, lo cual da una idea generalizada de que un cambio de régimen nada más corresponde a situaciones catastróficas (e.g., cambios sincrónicos en la abundancia de las poblaciones en un ecosistema, el proceso erosivo que conduce a la desertización y los cambios en el estado trófico de un cuerpo de agua). Sin embargo, esto también puede representar una retroalimentación positiva del sistema, a través de un proceso de sucesión ecológica (Scheffer y Carpenter, 2003).

El estudio de los cambios de régimen se puede hacer mediante observación de datos de campo, y los modelos y experimentos que intentan representar un sistema a pequeña escala. Para el caso de los estudios basados en observación, existen al menos dos indicadores de regímenes estables alternativos que se pueden obtener a partir de datos de campo. Uno de ellos son los saltos en series de tiempo y el otro es la existencia de fronteras marcadas entre estados contrastantes.

Potencial Cambio de Régimen: Interacciones entre Múltiples Causalidades

Indicios de Sobrepesca, Mal Manejo de Cuenca y Efectos de Fenómenos Hidrometeorológicos

La causalidad múltiple es la regla en los cambios de régimen, pero muchas de las causas socavan lentamente la resiliencia en el ecosistema antes de que ocurra el cambio de régimen. Tras más de 70 años de pesca en el sistema lagunar Chantuto-Panzacola (Figura 1) es evidente que en la mitad de esos años se han involucrado artes de pesca sin control normativo y manejo técnico (Rodríguez-Perafán et al., 2013) lo cual ha afectado la comunidad de peces, y con ella sus aportes en la regulación energética al ecosistema. La pesca en este lugar se realiza mediante una combinación del esquema tradicional de tenencia de los recursos y el modelo de pesca cooperativizado que impulsó el Estado mexicano desde sus inicios en 1941 con la fundación de la cooperativa pesquera La Palma. Posterior a ella le han seguido las cooperativas Los Cerritos (en 1942), Barra de Zacapulco (en 1977) y Unión Santa Isabel (en 1993). Los Cerritos cuentan con una sección pesquera (una facción de pescadores legitimada por la autoridad de pesca), denominada Embarcadero Río Arriba todas ellas con problemas en la gestión pesquera.

En la actualidad, amparadas en títulos de concesión pesquera, las cooperativas operan con 649 pescadores que emplean artes de pesca prehispánicos y otros de más reciente data. Entre 1950 y 1960 el uso de artes de pesca de alto impacto (“copos” y artes semifijas como los “tapos” o “atravesadas”) se ha popularizado entre las cooperativas, y con ello se ha aumentado la productividad pesquera (Rodríguez-Perafán et al., 2013). Estas artes no son selectivas y sumadas al incremento histórico en el número de usuarios compitiendo y ejerciendo mayor presión sobre los recursos, pueden estar ocasionando un efecto en la regulación energética del ecosistema. La Figura 3 apoya esta idea, al presentar un sostenido avance en la captura histórica de peces (años 2002-2009), en respuesta a una notoria merma en la captura histórica de camarón para el mismo período de análisis. Algunos autores han reportado series históricas discontinuas de producción pesquera (entre 1983 y 2009) para al menos 9 especies de peces en el sistema lagunar (7 carnívoras y 2 omnívoras), lo cual sugiere evidencia de saltos en series de tiempo, como indicador de un probable cambio de régimen en el sistema (Rodríguez-Perafán et al., 2012). Aunque el número preciso de especies afectadas es difícil de estimar, debido a que en la venta del pescado se agrupan las especies por tallas, pesos y grupos

de interés comercial, estos datos sugieren cambios en la composición de especies y marcadas fluctuaciones poblacionales en más de 70 años de pesca en Chantuto-Panzacola. Todo ello se ve enmarcado en la posición de las especies de peces en la red trófica donde un efecto potencial de la pérdida de los grandes depredadores altera el control de arriba abajo de la población de sus presas en la pirámide alimenticia (Humphries y Winemiller, 2009).

Los recursos pesqueros (peces y camarones) y el mismo ecosistema también se han visto afectados por la pérdida y la degradación del hábitat de las especies, debido a un mal manejo de cuencas que propicia la contaminación y la sedimentación, que puede agravarse por fenómenos hidrometeorológicos. Desde 1979 a 1991, el “Plan Hidráulico de la Costa de Chiapas” condujo a un cambio en el uso del suelo, al modificar el cauce de los ríos en la región, en un área estimada de 50,231 Ha. El objetivo del proyecto era fortalecer la infraestructura de caminos, drenes y bordos, y la ampliación de la frontera agrícola (Rodríguez-Perafán et al., 2012). Un efecto combinado del proyecto hidráulico, y de importantes fenómenos hidrometeorológicos (años 1998 y 2005), son las fuertes inundaciones en la zona y el azolvamiento de áreas de pesca en el sistema lagunar. De acuerdo a Rodríguez (2000) (citado en Calva et al., 2006), en septiembre de 1998, durante la tormenta tropical Javier, en tan sólo 5 días la precipitación pluvial alcanzó los 1,200 mm (un 113% por encima de la media histórica). El evento ocasionó avalanchas con cantidades excepcionales de material sedimentario (bloques de rocas, arena, lodo y material vegetal), que en el estado de Chiapas sepultaron por completo a poblaciones humanas, y en el sistema lagunar y la planicie costera provocaron el azolvamiento en 0.8 m y hasta 3.0 m, respectivamente. El otro evento importante es el del 5 de octubre de 1995, que corresponde al paso del huracán Stan, donde se registraron lluvias de 136.91 mm (un 40% de la media histórica) (Pasch y Roberts, 2006). Estos eventos no favorecieron el patrón habitual de depósito de sedimentos finos y material orgánico, pero sí indujeron el transporte y el depósito de arenas en el sistema lagunar (Figura 4). Incluso desde el año 2000, los dragados efectuados en el sistema lagunar han incidido en esta relación (Calva et al., 2006).

Además de poderse evidenciar la causalidad múltiple en el sistema, es posible vislumbrar la coexistencia marcada de más de un estado estable alternativo (histéresis) en Chantuto-Panzacola. En condiciones ordinarias, en el sistema lagunar los valores promedio de carbono orgánico (C.O.) son mayores en el período de lluvias (mayo a noviembre) y menores en el de secas (diciembre a abril). Esto tiene una distribución espacial particular, en la que los mayo-

res valores promedios se presentan en áreas de escasa circulación: lagunas Chantuto y Panzacola, que son áreas de pesca de las cooperativas Unión Santa Isabel y Los Cerritos, respectivamente (Figura 5a y 5b). En contraste, la distribución espacial de los sedimentos se presenta con la mayor proporción de arenas cerca de Boca San Juan (BSJ), la boca del sistema (área de pesca de La Palma), y con los sedimentos más finos en áreas alejadas de la influencia marina y con escasa circulación (principalmente lagunas Chantuto y Panzacola) (Figura. 4a).

Eutroficación Súbita en el Ecosistema

En un sistema lagunar un cambio súbito de régimen es la eutroficación. De acuerdo a Jeppesen et al. (1998) y Scheffer (1998) (citados en Genkai-Kato, 2007), un sistema lagunar puede tener dos estados contrastantes en la claridad del agua, debido a un excesivo ingreso de fósforo: un estado de agua clara frente a un estado de agua turbia. Durante el estado de agua clara, regularmente, se encuentran densas macrófitas dominando cerca de la costa, y floraciones de algas dominando la turbidez de la zona pelágica. Las macrófitas son piezas claves para el funcionamiento de un importante mecanismo de retroalimentación en la laguna. Ellas reducen el fósforo reciclándolo del fondo a la columna de agua, mediante la estabilización de sedimentos. También reducen la presión de los peces sobre el zooplancton, al proporcionarle a éste refugio. En consecuencia, contribuyen a aumentar la presión del pastoreo sobre el fitoplancton.

En un estado de agua turbia, cuando un ingreso excesivo de fósforo estimula el crecimiento del fitoplancton, el mecanismo se revierte, porque la abundancia del fitoplancton disminuye la luz que llega al sedimento afectando el crecimiento de las macrófitas. De esta forma se da un proceso de desaparición de las macrófitas y de baja presión sobre el fitoplancton (Genkai-Kato, 2007). Además de afectar el proceso de fotosíntesis de las macrófitas y su aporte de oxígeno al sistema, otros efectos esperados en un estado de turbidez son el incremento de la temperatura en el agua, debido a que las partículas suspendidas en el sistema absorben el calor de la luz solar. El incremento de la temperatura en el sistema, baja la disponibilidad de Oxígeno Disuelto (OD) en el agua para muchos organismos acuáticos, especialmente para los que se encuentran cerca de la superficie de la columna de agua. Las partículas suspendidas en el agua también pueden reducir la capacidad de los peces para encontrar alimen-

to, obstruir sus branquias, sepultar los organismos bentónicos y los huevos de muchas especies ovíparas durante el período de reproducción (Barko, 1981). Además, las partículas suspendidas en el agua pueden traer consigo diversidad de contaminantes al sistema (e.g., metales pesados), y con el tiempo, estos pueden ser resuspendidos en el cuerpo de agua al ser liberados de las zonas de depósito de sedimentos, como consecuencia de las actividades de dragado.

La eutroficación de Chantuto-Panzacola puede ocurrir como consecuencia de la contaminación del agua por fuentes puntuales (descargas de asentamientos humanos) y difusas (contaminación agrícola y atmosférica), en las inmediaciones del sistema o en la parte alta de la cuenca hidrográfica. Un estudio reciente (Gómez et al., 2014) ha clasificado las aguas del sistema lagunar con baja calidad, haciendo notar que las lagunas Chantuto y Los Cerritos son consideradas a Eutrófico durante la época de estiaje. La figura 6 ilustra un hipotético proceso de eutroficación en Chantuto-Panzacola, lo cual ayuda a poner en relieve posibles consecuencias en la composición, estructura y dinámica del ecosistema.

Efectos Esperados del Cambio Climático

El cambio climático es uno de los temas que mayor preocupación genera en el mundo. Este fenómeno tiene la capacidad de afectar notoriamente los ecosistemas, y la distribución, abundancia y ecología de las especies biológicas que sustentan. En la actualidad, es evidente su efecto temporal, en términos de temperatura, en vastas zonas a nivel mundial, incluyendo México y sus costas (Rosenzweig et al., 2008).

El cambio climático impacta los sistemas hidrológicos, debido a los cambios que se producen en distintas variables que intervienen en la regulación de estos sistemas (i.e., regímenes de lluvias, procesos de evaporación y escorrentías que se pierden, al igual que parte del agua contenida en el suelo). Estos cambios afectan la redistribución espacio-temporal de los recursos acuáticos, los cuales tienen influencia en la oferta y demanda de los balances de aguas (Fu et al., 2008). Una de las principales consecuencias radica en que el aumento de temperatura del agua genera cambios hidrológicos, como el aumento de las descargas máximas o largos períodos de bajo caudal. Esto último también puede conducir a una mayor carga de nutrientes y, en algunas regiones, a la salinización y/o acidificación de las aguas.

En arroyos, el aumento de la temperatura puede conducir a la extinción de especies características. En las aguas estancadas, las comunidades bióticas se verán afectadas por una serie de procesos, como una mayor frecuencia de períodos de estratificación, desecación de áreas y aumentos de productividad y floraciones de algas. El cambio climático también puede hacer variar las temperaturas en las lagunas costeras, agravando los efectos de la eutrofización en ellas, lo cual es preocupante en Chantuto-Panzacola, si las fuentes de contaminación identificadas permanecen sin control agregando gran cantidad de nutrientes al ecosistema, conduciendo definitivamente al cambio de régimen debido a la eutrofización. De ser así, el sistema dejaría de prestar los servicios ecosistémicos que caracterizan estos cuerpos de agua.

En los océanos el efecto del cambio climático puede generar el incremento en el nivel de aguas afectando las zonas costeras, el desplazamiento (migración) de las especies a otros lugares, la productividad del plancton y con ello la cadena trófica, además de generar problemas en el desarrollo de los estadios tempranos de las especies lo cual afecta la biomasa y distribución de las poblaciones. Otros efectos esperados del cambio climático en los océanos incluyen el aumento en las concentraciones de contaminantes (IPC, 2014; Rosenzweig et al., 2008; Whitehead et al., 2009).

Para Latinoamérica y particularmente para México, el efecto del cambio climático es evidente. Su localización entre dos océanos, y su latitud y relieves, lo hacen estar particularmente expuesto a diferentes fenómenos físicos e hidrometeorológicos, como las sequías, las altas temperaturas, las inundaciones y las precipitaciones (Figura 7 y 8). En el caso del sistema lagunar Chantuto-Panzacola, al suroeste de México, se prevé que experimentará los efectos del cambio climático, debido principalmente a estar expuesto a altas temperaturas, con pérdidas de hasta un 10 % en precipitaciones, esto pese a ser considerada una zona de alta pluviosidad. Esta condición, la hace ser catalogada como una zona susceptible a inundaciones en épocas de fuertes lluvias (Figura 7 y 8).

Conclusiones e Implicaciones para el Manejo Adaptativo

Los datos observados y las reflexiones teóricas sugieren varias líneas de evidencia sobre un potencial cambio de régimen en Chantuto-Panzacola, si la resiliencia del sistema es excedida, al alcanzarse un umbral en el que se produzca un gran cambio que sería casi imposible de revertir. La alta presión en

los recursos pesqueros, la contaminación del agua y los efectos de un mal manejo de cuenca, se erigen como las actuales perturbaciones antrópicas al ecosistema. Futuras perturbaciones antrópicas y eventos naturales podrían esperarse para los recursos pesqueros y el ecosistema, como consecuencia del cambio climático.

Los resultados de este trabajo distan de ser concluyentes, pero tienen la capacidad de alertar a tiempo sobre la probable existencia de indicadores alternativos en el sistema lagunar, lo cual permite construir escenarios posibles a futuro, diseñar intervenciones, implementar y evaluar estrategias de manejo del ecosistema y los recursos que sustenta. Los esquemas de manejo adaptativo de los recursos naturales y el ecosistema, que operan bajo condiciones de incertidumbre por la complejidad de los socio-ecosistemas que gestionan, se pueden beneficiar de trabajos como éste, para ajustar sus programas de manejo.

Bibliografía

- Barko, J. W., & Smart, R. M. (1981). Sediment-based nutrition of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 10, 339-352.
- Calva, L., Pérez, A., & Márquez, A. (2006). Contenido de carbono orgánico y características textuales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiológica*, 16(2), 127-136. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/pdf/578/57816204.pdf>
- Carpenter, S., Ludwig, D., & Brock, W. (1999). Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications*, 9(3), 751-771. Recuperado a partir de <http://ib.berkeley.edu/labs/power/classes/2006fall/ib250/4.pdf>
- DeMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., & Yarusinsky, M. (2000). Abrupt onset and termination of the African Humid Period: Quaternary Science Reviews, 19(1-5), 347-361. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00081-5)
- Díaz-Ruiz, S., Cano-Quiroga, E., Aguirre-León, A., & Ortega-Bernal, R. (2004). Diversidad, abundancia y conjuntos ictiofaunísticos del sistema lagunar-estuario Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 52(1), 187-199.
- Fu, C., Jiang, Z., Guan, Z., He, J., & Xu, Z. (2008). Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China. En *Regional Climate Studies of China* (pp. 447-464). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79242-0_11
- Genkai-Kato, M. (2007). Regime shifts: catastrophic responses of ecosystems to human impacts. *Ecological Research*, 22(2), 214-219. <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0304-5>

- Gómez, R., Tovilla, C., Barba, E., Castañeda, O., Valle, F., Romero, E., & Ramos, E. (2014). Índices tróficos de importancia ecológica y su relación con algunas variables físico-químicas en el sistema lagunar estuarino Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. *Revista cubana de investigaciones pesqueras*, 31(2), 47–57. Recuperado a partir de <http://www.ocean-docs.org/handle/1834/9096>
- Granada, H. (1984). La teoría: su estructura e importancia en la investigación científica. *Revista de Psicología* (Vol. 2). Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado a partir de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/psicologia/article/view/4494/4475>
- Hare, S., & Mantua, N. (2000). Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, 47(2–4), 103–145. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00033-1)
- Humphries, P., & Winemiller, K. (2009). Historical Impacts on River Fauna, Shifting Baselines, and Challenges for Restoration. *BioScience*, 59(8), 673–684. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.8.9>
- IPC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. SUMMARY FOR POLICYMAKERS*. Iñigo J. Losada (Spain), Graciela O. Magrin (Argentina), José A. Marengo (Brazil), Anil Markandya (Spain). Cambridge University Press. Recuperado a partir de http://www.hko.gov.hk/climate_change/ed_package/doc/impacts_av.pdf
- Marín, V., Delgado, L., Vila, I., Tironi, A., Barrera, V., & Ibáñez, C. (2014). Regime shifts of Cruces River wetland ecosystem: current conditions, future uncertainties. *Latin American Journal of Aquatic Research* *Latin American Journal of Aquatic Research Lat Am. J. Aquat. Res.*, 42(1), 160–171. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=175030002013>
- Pasch, R., & Roberts, D. (2006). *Tropical Cyclone Report Hurricane Stan. 1-5 October 2005*. Recuperado a partir de http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL202005_Stan.pdf
- Raffa, K., Aukema, B., Bentz, B., Carroll, A., Hicke, J., Turner, M., & Romme, W. (2008). Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *BioScience*, 58(6), 501–517. <https://doi.org/10.1641/B580607>
- Redman, C.. (1999). *Human Impact on Ancient Environments*. Tucson (AZ): University of Arizona Press.

- Rodríguez-Perafán, C. (2014). Análisis multidimensional del aprovechamiento pesquero en el sistema estuarino Chantuto-Panzacola, Chiapas, México (tesis doctoral). El Colegio de la Frontera Sur, México.
- Rodríguez-Perafán, C., Rodiles-Hernández, R., & Nahed-Toral, J. (2012). Sustentabilidad pesquera: factores que socavan y potencian la resiliencia pesquera en Chantuto-Panzacola. En P. Muñoz, S. Villerías, & P. Tello (Eds.), *La Pesca: un Solo Espacio, Diferentes Enfoques de Estudio* (Primera Ed, pp. 13–24). Toluca de Lerdo: Universidad Autónoma de Guerrero.
- Rodríguez-Perafán, C., Rodiles-Hernández, Nahed-Toral, J., & Pombo-López, A. (2013). Social institutions for fisheries management in the mexican Tropical Pacific. *Research Journal of Biological Sciences*, 8(6), 193–205. Recuperado a partir de <http://docsdrive.com/pdfs/medwell-journals/rjbsci/2013/193-205.pdf>
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., ... Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), 353–357. <https://doi.org/10.1038/nature06937>
- Turner B., I. Clark; W. Kates; R. Richards; J. Matthews; J. Meyer; W. (1990). *The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 Year s*. New York: Cambridge University Press.
- Scheffer, M., & Carpenter, S. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(12), 648–656. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2003.09.002>
- Stuardo, J., & Valdovinos, C. (1989). Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile central. *Amb. y Des*, 1, 107–115. Recuperado a partir de http://www.cipmachile.com/web/200.75.6.169/RAD/1989/1_Stuardo-Valdovinos.pdf
- Whitehead, P., Wilby, R., Battarbee, R., Kernan, M., & Wade, A. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101–123. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>

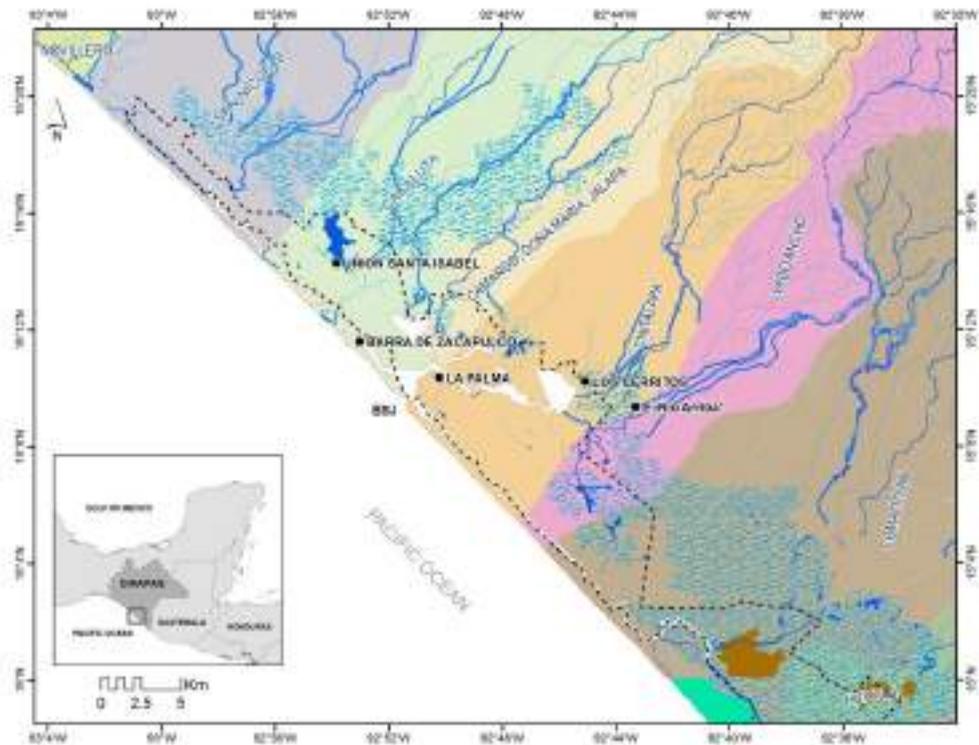


Figura 1. Localización del sistema lagunar, Boca San Juan (BSJ), las cooperativas pesqueras (*incluyendo la sección pesquera), cuencas hidrográficas y zona núcleo de La REBIEN (línea punteada) (Rodríguez-Perafán et al., 2013).

La teoría de estados estables alternativos, describe la respuesta de un sistema a alguna condición externa:

“Las implicaciones de los estados estables alternativos pueden ser más claras por medio de “paisajes” representando las propiedades de estabilidad en diferentes condiciones externas (Figura 2a). La bola (representando el estado del ecosistema) tiende a establecerse en los valles, que corresponden a equilibrios estables. Las colinas corresponden a la línea punteada, que representa equilibrios inestables, y marca la frontera entre valles alternativos (también llamados “cuencas de atracción”). El cambio en las condiciones externas afecta la estabilidad del paisaje. Esto conduce generalmente a cambios menores en la posición de la parte inferior de un valle (el equilibrio). Sin embargo, el valle puede contraerse, y cuando desaparece eventualmente (esto es una bifurcación; e.g. F_2) una “transición catastrófica” a otro valle ocurre. Para inducir un nuevo interruptor de cambio al valle original, no basta con restaurar las condiciones ambientales presentes antes del colapso. En su lugar, se necesita ir más allá a otro punto de bifurcación (F_1), donde el sistema se desplace hacia atrás. La diferencia entre interruptores de avance y regreso es conocida como histéresis.”

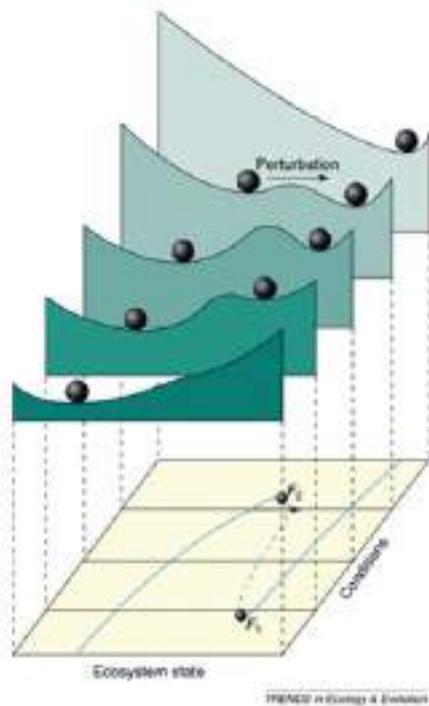


Figura 2a. Paisajes de estabilidad mostrando cómo las condiciones externas pueden afectar la resiliencia del equilibrio.

“Para las condiciones en las que existen equilibrios alternativos, el estado inicial (la posición en el paisaje) determina el equilibrio en el que se asentará el sistema. Esto se conoce como “dependencia de la trayectoria” e implica, entre otras cosas, que una perturbación suficientemente grave (e.g., fuego eliminando parte de la biomasa) puede inducir un cambio a otro estado estable. Obviamente, un sistema es llevado más fácilmente al interior de un estado alternativo si la cuenca de atracción alrededor del estado actual es pequeña. El tamaño de la cuenca de atracción es también llamado resiliencia. Hay que tomar en cuenta, que el cambio en las condiciones externas puede reducir la resiliencia sin afectar mucho al estado de equilibrio. Esto implica, que el sistema parece inalterado, pero se ha vuelto frágil en el sentido de que cada vez más perturbaciones pequeñas pueden inducir un cambio a otro estado.”

“En ocasiones, los modelos no se establecen en un estado estable (o equilibrio), sino que convergen en un patrón oscilante (e.g., un ciclo predador-presa) o un patrón de fluctuaciones erráticas. Todos los regímenes a los cuales un sistema se mueve asintóticamente se conocen como “atractores” (e.g., un atractor de puntos, un ciclo o un atractor extraño). En contraste, las estructuras inestables se conocen como “repelentes”, y se refieren a puntos, ciclos u otras estructuras.”

Figura 2. Bases teóricas de estados estables alternativos (Scheffer & Carpenter, 2003).

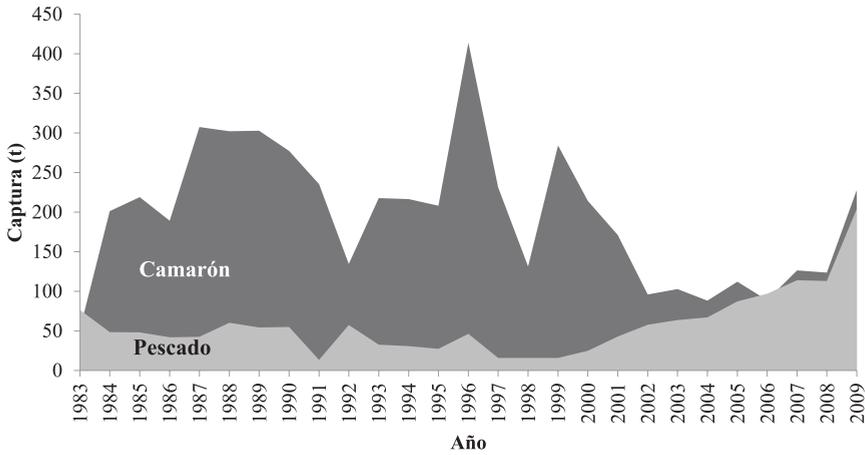


Figura 3. Captura histórica de camarón y pescado en el sistema lagunar Chantuto-Panzacola (1983-2009)*.

*Datos de captura proporcionados por la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA), Subdelegación Chiapas, México.

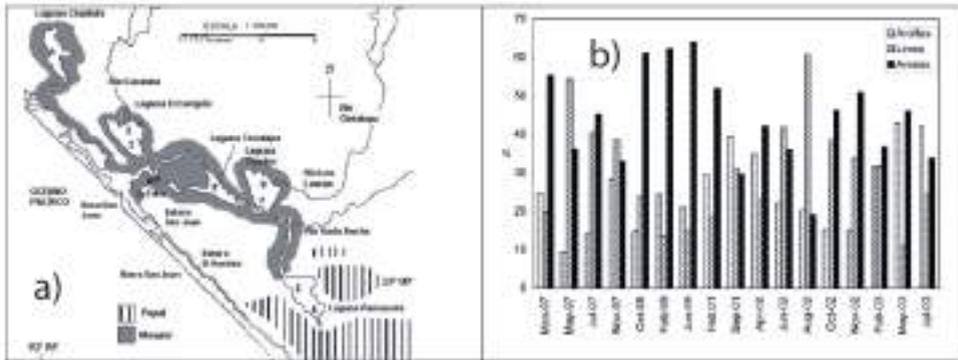


Figura 4. Características texturales de los sedimentos en Chantuto-Panzacola (Calva et al., 2006). (a) Estaciones de muestreo; (b) promedio de granulometría (marzo de 1997- julio de 2003), evidenciando incrementos de arena (barras negras) en el sistema lagunar para el mes de octubre de 1998, un mes después del paso de la tormenta tropical Javier.

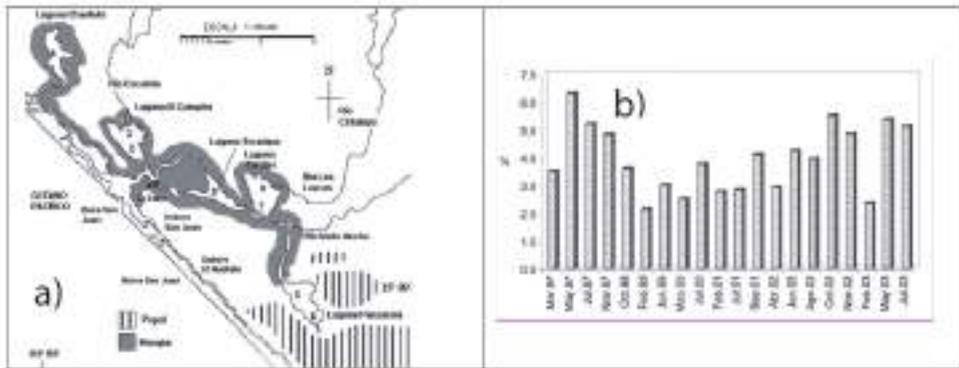


Figura 5. Contenido de carbono orgánico (C.O.) en temporada de lluvias (mayo a noviembre) y secas (diciembre a abril) en Chantuto-Panzacola (Calva et al., 2006). (a) Estaciones de muestreo; (b) promedio de C.O., mostrando comportamientos habituales en temporada de secas y lluvias.

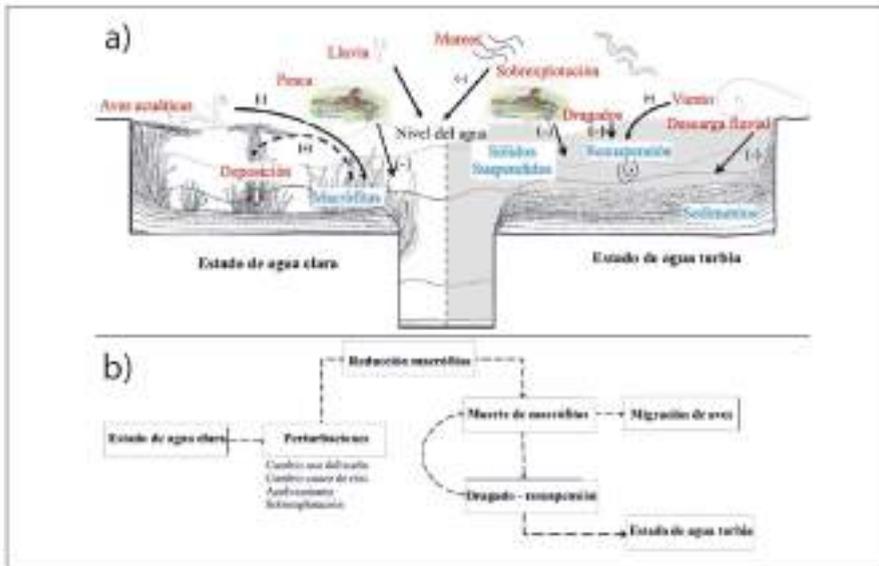


Figura 6. Hipotético proceso de eutrofización en Chantuto-Panzacola (con base en Marín, 2010). (a) Modelo conceptual del cambio de estado, presentando en rojo las fuerzas externas y en azul los procesos internos; (b) diagrama esquemático del modelo conceptual de cambio de estado.

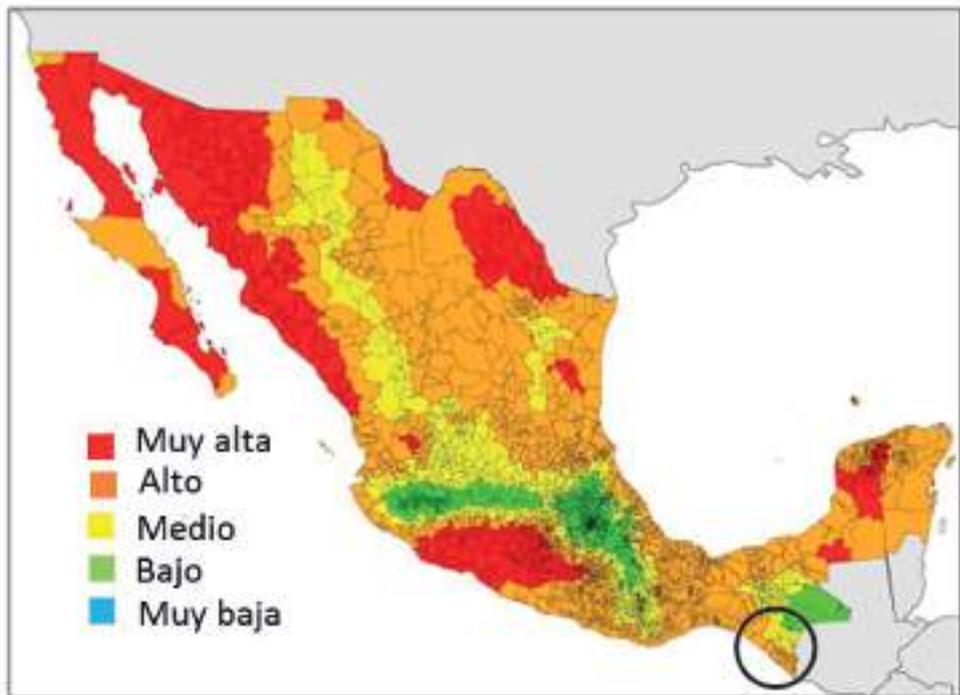


Figura 7. Temperaturas máximas diarias registradas en 340 estaciones climatológicas en México* (IPC, 2014). El círculo hace referencia el área de estudio.

*Datos corresponden a al menos 30 años de registro.

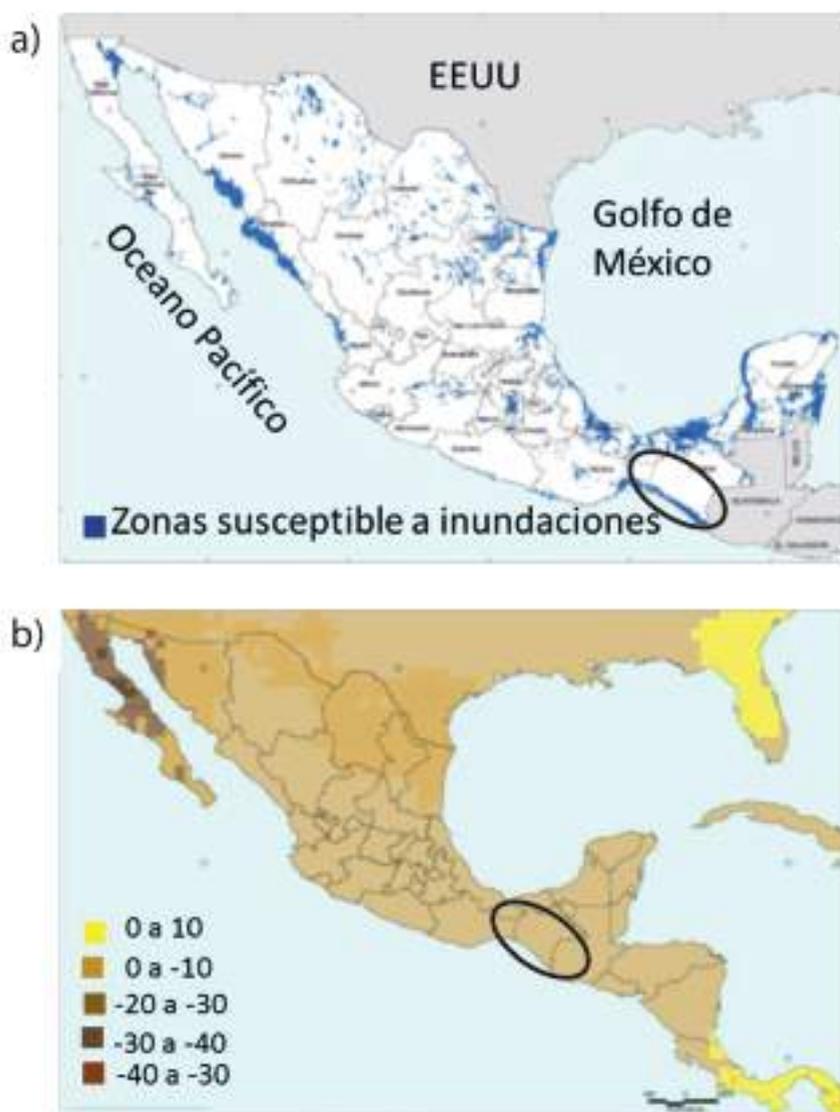


Figura 8. Vulnerabilidad a inundaciones y cambios proyectados en precipitación en México (IPC, 2014). (a) Zonas susceptibles a inundaciones (con base en criterios topográficos, geomorfológicos, geológicos, edafológicos, de densidad de drenaje, de cobertura vegetal y de precipitación. Incluye información hemerográfica, estadística y bibliográfica); (b) cambios en el promedio de precipitación anual proyectados (2015-2039). Los óvalos hacen referencia al área de estudio.