

Impacts of tropical hurricanes on the vegetation cover of the lower basin and estuary of San José del Cabo, Baja California Sur, Mexico

Efectos de los ciclones tropicales sobre la cubierta vegetal de la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México

Marcos Shiba-Reyes; Enrique Troyo;
Raúl Martínez-Rincón; Aurora Breceda*

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Av. Instituto Politécnico Nacional 195,
Playa Palo de Santa Rita Sur. C. P. 23096. La Paz, Baja California Sur, México.

*Corresponding author: abreceda@cibnor.mx; tel.: +52 612 123 8484.

Abstract

Introduction: Tropical hurricanes modify composition and structure of ecosystems.

Objective: To analyze the impact of tropical hurricanes on the recovery and resilience of vegetation cover.

Materials and methods: The resilience of the lower basin and estuary of San José del Cabo was evaluated by studying the impact of 11 tropical hurricanes (2013-2017) on the vegetation cover. Landsat images were analyzed for each event and two SPOT-6 images for the Hurricane Lidia. The areas of gain, stability, loss and recovery of vegetation types were estimated based on the analysis of changes in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Results and discussion: Average stability of vegetation cover was 90 %; however, in the case of hurricane Odile (2014) and Lidia (2017), stability decreased considerably, with a loss of 35.4 and 20.5 %, respectively, being the perennial herbaceous vegetation the most affected. One year after Odile and Lidia, recovery was 8.4 % and 25.4 %, respectively; the most recovered vegetation type was reed-tree. The analysis of SPOT-6 images allowed the detailed observation of Lidia's effect on palm grove. The main cause of its loss was runoff from the stream, which favored the growth of invasive species (*Arundo donax* L. and *Tamarix* sp.); furthermore, it was estimated that 1.4 ha were deforested, and an area of 20 ha affected by fire in 2017.

Conclusion: Vegetation is resilient to tropical hurricanes; however, events that provide more than 50 % of annual precipitation decrease the capacity of vegetation to recover.

Keywords: Natural disturbances; resilience; precipitation; Hurricane Lidia; remote sensing.

Resumen

Introducción: Los ciclones tropicales modifican la composición y estructura los ecosistemas.

Objetivo: Analizar el efecto de los ciclones tropicales sobre la recuperación y resiliencia de la cubierta vegetal.

Materiales y métodos: La resiliencia de la cuenca baja y estero San José del Cabo se evaluó mediante el estudio del efecto de 11 ciclones tropicales (2013-2017) sobre la cubierta vegetal. Se analizaron imágenes Landsat para cada evento y dos SPOT-6 para el ciclón Lidia. Las áreas de ganancia, estabilidad, pérdida y recuperación de los tipos de vegetación se estimaron con base en el análisis de los cambios del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Resultados y discusión: La estabilidad promedio de la cubierta vegetal fue de 90 %; sin embargo, en el caso de los ciclones Odile (2014) y Lidia (2017), la estabilidad disminuyó considerablemente, con una pérdida de 35.4 y 20.5 %, respectivamente, siendo la vegetación herbácea perenne la más afectada. Un año después de Odile y Lidia, la recuperación fue 8.4 % y 25.4 %, respectivamente; el tipo de vegetación de mayor recuperación fue el carrizo-tule. El análisis de imágenes SPOT-6 permitió la observación detallada del efecto de Lidia sobre el palmar. La causa principal de su pérdida fue la escorrentía del arroyo, que favoreció el crecimiento de especies invasoras (*Arundo donax* L. y *Tamarix* sp.); además, se estimaron 1.4 ha deforestadas y una superficie de 20 ha afectadas por fuego en el 2017.

Conclusión: La vegetación es resiliente a los ciclones tropicales; sin embargo, eventos que aportan más de 50 % de la precipitación anual disminuyen la capacidad de recuperación de la vegetación.

Palabras clave: Disturbios naturales; resiliencia; precipitación; ciclón Lidia; percepción remota.

Introduction

Tropical hurricanes are one of the main factors of natural disturbance, because they severely influence the state, structure, functioning, and composition of ecosystems (Cada et al., 2016; Gill, Jarvis, Veblen, Pickett, & Kulakowski, 2017; Manson & Jardel, 2009), cause species mortality, and generate opportunities for native and invasive species to establish themselves (Cada et al., 2016). Damage caused by tropical hurricanes depends on factors such as proximity, duration, precipitation, wind speed, and biotic and abiotic factors (Doyle, Krauss, & Wells, 2009).

Ecosystems are able to resist and recover from such disturbances through resilience. Resilience is conceived as the system's ability to return to a state of equilibrium after being affected by a disturbance (Gunderson, 2000). Healthy ecosystems with high species diversity have high resilience (Folke et al., 2004; Thompson, 2011). Some actions or factors that decrease resilience are, land use changes, fragmentation, loss of biodiversity, and species introduction (Cuevas-Reyes, 2010; Thompson, 2011). Ecosystem recovery depends on the intensity of the tropical hurricane, conservation status, existing species, and post-event precipitation (Parker, Martínez-Yrizar, Álvarez-Yépiz, Maass, & Araiza, 2018). Some species take advantage of clearings for development and colonization, causing important changes in the structure and composition of the ecosystem (Jiménez-Rodríguez et al., 2018; Navarro-Martínez et al., 2012). In some sites, this condition is exploited by invasive species that compete with the native ones and simplify the landscape (Jiménez-Rodríguez et al., 2018; Negrón-Juárez, Baker, Chambers, Hurtt, & Goosem, 2014).

The disturbance regime has been altered due to climate change; models suggest a trend of increasing ocean temperatures and, consequently, tropical hurricanes will be more frequent and intense (Maass et al., 2018; Martínez-Yrizar et al., 2018; Sobel et al., 2016; Zhang, Karnauskas, Donnelly, & Emanuel, 2017). Therefore, the analysis of the impact of tropical hurricanes on coastal ecosystems and capacity for resilience is extremely relevant, to contribute to the conservation of biodiversity and ecosystems. One way of assessing the impacts of these disturbances is through the use of remote sensing, which, since the emergence of satellite technology, has been widely used to study hurricanes both temporally and spatially (McDowell et al., 2015). At present, there are few studies on the effects of these phenomena on ecosystems, most of which have focused on the effects produced by wind, such as canopy loss, branch breakage and uprooting (Islebe, Torrescano-Valle, Valdez-Hernández, Tuz-Novelo, & Weissenberg, 2009; Navarro-Martínez, Duran-García, & Méndez-González, 2012).

Introducción

Los ciclones tropicales son uno de los principales factores de disturbios naturales, ya que influyen severamente en el estado, estructura, funcionamiento y composición de los ecosistemas (Cada et al., 2016; Gill, Jarvis, Veblen, Pickett, & Kulakowski, 2017; Manson & Jardel, 2009), causan mortalidad de especies y generan oportunidades de establecimiento para las especies nativas e invasoras (Cada et al., 2016). Los daños ocasionados por los ciclones tropicales dependen de factores como la cercanía, duración, precipitación, velocidad del viento y factores bióticos y abióticos (Doyle, Krauss, & Wells, 2009).

Los ecosistemas tienen capacidad de resistencia y recuperación a dichos disturbios gracias a la resiliencia. Esta se concibe como la facultad del sistema de regresar a un estado de equilibrio después de la afectación por la ocurrencia de un disturbio (Gunderson, 2000). Los ecosistemas sanos y con alta diversidad de especies presentan resiliencia elevada (Folke et al., 2004; Thompson, 2011). Algunas acciones o factores que disminuyen la resiliencia son los cambios de uso de suelo, fragmentación, pérdida de biodiversidad e introducción de especies (Cuevas-Reyes, 2010; Thompson, 2011). La recuperación del ecosistema depende de la intensidad del ciclón tropical, estado de conservación, especies existentes y precipitación posterior al evento (Parker, Martínez-Yrizar, Álvarez-Yépiz, Maass, & Araiza, 2018). Algunas especies aprovechan los claros para su desarrollo y colonización, provocando cambios importantes en la estructura y composición del ecosistema (Jiménez-Rodríguez et al., 2018; Navarro-Martínez et al., 2012). En algunos sitios, dicha condición es aprovechada por especies invasoras que compiten con las nativas y simplifican el paisaje (Jiménez-Rodríguez et al., 2018; Negrón-Juárez, Baker, Chambers, Hurtt, & Goosem, 2014).

El régimen de disturbios ha sido alterado debido al cambio climático; los modelos sugieren una tendencia al incremento de la temperatura oceánica y, en consecuencia, los ciclones tropicales serán más frecuentes e intensos (Maass et al., 2018; Martínez-Yrizar et al., 2018; Sobel et al., 2016; Zhang, Karnauskas, Donnelly, & Emanuel, 2017). Por lo anterior, el análisis del impacto de ciclones tropicales sobre los ecosistemas costeros y su capacidad de resiliencia es de suma relevancia, para contribuir a la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas. Una manera de evaluar los impactos de estos disturbios es mediante el uso de percepción remota, la cual, desde la aparición de la tecnología satelital, ha sido utilizada ampliamente para estudiarlos de manera temporal y espacial (McDowell et al., 2015). En la actualidad existen pocos trabajos referentes a los efectos de estos fenómenos sobre los ecosistemas, la mayoría se ha enfocado en los

In Mexico, Baja California Sur is the state with the highest incidence of tropical hurricanes (Farfán, Alfaro, & Cavazos, 2013). Although hurricanes represent one of the main sources of water in the region (Wurl & Imaz, 2016), they also cause severe damage to urban infrastructure, rural communities, and coastal areas. In this context, the present study aimed to measure the effect of tropical hurricanes on the resilience of the lower basin and estuary of San Jose del Cabo (SJDC) in Baja California Sur, through the evaluation of changes in vegetation cover as an indicator, by means of remote analysis at different scales.

Materials and methods

The study area comprises the lower basin and estuary of San José (23.18° N-109.7° W and 23.04° N-109.67° W) in the SJDC watershed (Figure 1). The estuary is composed of a body of fresh surface water and a sandbar that separates it from the Gulf of California. The source of the water supply is surface runoff and riverbed water from the basin, which converges into San Jose creek, flowing into the estuary (Wurl & Imaz, 2016).

The vegetation in the lower basin and estuary of SJDC is composed of sarcocaulle scrubland, whose predominant species are *Bursera microphylla* A. Gray. (*torote*), *Jatropha cinerea* (Ortega) Muell.-Arg. (*lomboy*), *Stenocereus thurberi*

efectos producidos por el viento como la pérdida de dosel, rompimiento de ramas y desenraizado (Islebe, Torrescano-Valle, Valdez-Hernández, Tuz-Novelo, & Weissenberg, 2009; Navarro-Martínez, Duran-García, & Méndez-González, 2012).

En México, Baja California Sur es la entidad que presenta mayor incidencia de ciclones tropicales (Farfán, Alfaro, & Cavazos, 2013). A pesar de que representan una de las principales fuentes de agua en la región (Wurl & Imaz, 2016), los ciclones también provocan daños severos a la infraestructura urbana, comunidades rurales y zona costera. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo medir el efecto de los ciclones tropicales sobre la resiliencia de la cuenca baja y estero San José del Cabo (SJDC) en Baja California Sur, a través de la evaluación de los cambios en la cubierta vegetal como indicador, mediante el análisis remoto a diferentes escalas.

Materiales y métodos

El área de estudio comprende la cuenca baja y estero San José (23.18° LN-109.7° LO y 23.04° N-109.67° LO) en la cuenca hidrográfica SJDC (Figura 1). El estero está compuesto por un cuerpo de agua dulce superficial y una barra arenosa que lo separa del golfo de California. La fuente de alimentación es la esorrentía superficial

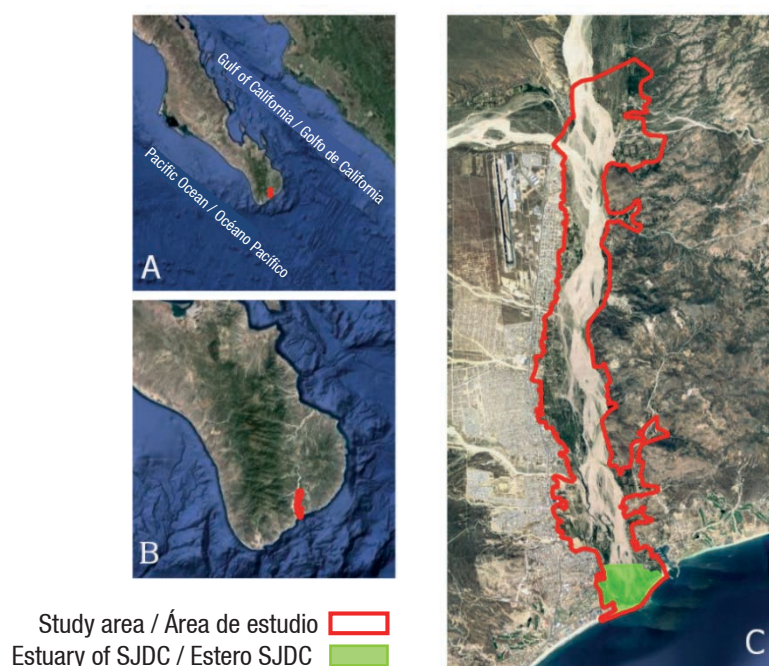


Figure 1. Study area located in the lower basin and estuary of San Jose del Cabo (SJDC): A) Baja California Sur, B) Cape region and C) study area.

Figura 1. Área de estudio localizada en la cuenca baja y estero San José del Cabo (SJDC): A) Baja California Sur, B) región del Cabo y C) área de estudio.

(Engelm.) Buxb. (*pitahaya dulce*), *Fouquieria diguetii* (Tiegh.) I. M. Johnst. (*palo adán*) and *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth (*palo de arco*). Tree species such as *Prosopis articulata* S. Wats (*mezquite*), *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. (*guamúchil*), *Parkinsonia florida* (Benth. ex A. Gray) S. Watson (*palo verde*) and *Tamarix* sp. (*pino salado*), are found on the riverbank of the arroyo, intermixed with shrubby and herbaceous species such as *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. (*vinorama*), *Ambrosia monogyra* (Torr. & A. Gray) Strother & B. G. Baldwin (*romerillo*) and *A. ambrosioides* (Cav.) W. W. Payne (*chicura*). The vegetation of the estuary of SJDC is characterized by the palm grove composed mainly of *Washingtonia robusta* H. Wendl. (*palma de abanico*), and *Phoenix dactylifera* L., and dense stands of reed (*Arundo donax* L. and *Phragmites australis* Trin. ex Steud.) and southern cattail (*Typha domingensis* Pers.) on the margins of the water body; around them can be found specimens of *Parkinsonia aculeata* L. (*palo verde*), *P. articulata*, *P. dulce* and *Vallesia glabra* (Cav.) Link. (*otatave*) (Breceda, 2007).

Because of its biocultural importance, the estuary was decreed in 1993 as a State Ecological Reserve and is the largest coastal wetland in the state, so it has been designated as a Ramsar site, Important Bird Conservation Area (AICA in Spanish) and Important Bird Site (IBA in Spanish) (Pronatura Noroeste A. C., 2010).

The impacts of tropical hurricanes on vegetation cover were evaluated by analyzing 19 satellite images (30 m resolution) from the Landsat-8 sensor (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) for the entire study area, during the period 2013-2017. The images were processed and atmospherically corrected using the QGIS software (QGIS Development Team, 2019) and R programming language libraries (The R Foundation, 2015). Two images (1.5 m resolution) of the SPOT-6 sensor, from the supplier AIRBUS (<https://www.intelligence-airbusds.com/>), were also used to analyze in detail the effects of Hurricane Lidia (2017) on the estuary of SJDC. The database of the National Hurricane Center (2017) of the United States of America was consulted to count the tropical hurricanes that impacted the study zone at a maximum distance of 500 km; in addition, data from the San José del Cabo weather station were analyzed to know the annual precipitation and precipitation per event. In total, 13 tropical hurricanes were detected and catalogued in 11 events due to their proximity to dates. The Oceanic Niño Index (ONI) was used to analyze and compare whether these events occurred during a warm or cold phase of El Niño climate phenomenon.

Changes in vegetation cover caused by tropical hurricanes were analyzed by calculating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for each image; the values ≥ 0.2 were classified as vegetation (De Nova-Vázquez, Castro-Ibarra, & Ramos-Ramos,

y subálvea proveniente de la cuenca, la cual converge al arroyo San José, desembocando en el estero (Wurl & Imaz, 2016).

La vegetación en la cuenca baja y el estero SJDC está compuesta por matorral sarcocaulé, cuyas especies predominantes son *Bursera microphylla* A. Gray. (torote), *Jatropha cinerea* (Ortega) Muell.-Arg. (lomboy), *Stenocereus thurberi* (Engelm.) Buxb. (*pitahaya dulce*), *Fouquieria diguetii* (Tiegh.) I. M. Johnst. (*palo adán*) y *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth. (*palo de arco*). Sobre las laderas del arroyo y en zonas más estables se encuentran especies arbóreas como *Prosopis articulata* S. Wats. (mezquite), *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. (guamúchil), *Parkinsonia florida* (Benth. ex A. Gray) S. Watson (palo verde) y *Tamarix* sp. (pino salado), entremezcladas con especies arbustivas y herbáceas como *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. (vinorama), *Ambrosia monogyra* (Torr. & A. Gray) Strother & B. G. Baldwin (romerillo) y *A. ambrosioides* (Cav.) W. W. Payne (chicura). La vegetación del estero de SJDC se caracteriza por el palmar compuesto principalmente de *Washingtonia robusta* H. Wendl. (palma de abanico) y *Phoenix dactylifera* L., y masas densas de carrizo (*Arundo donax* L. y *Phragmites australis* Trin. ex Steud.) y tule (*Typha domingensis* Pers.) en los márgenes del cuerpo de agua; a sus alrededores pueden encontrarse ejemplares de *Parkinsonia aculeata* L. (palo verde), *P. articulata*, *P. dulce* y *Vallesia glabra* (Cav.) Link. (otatave) (Breceda, 2007).

Debido a su importancia biocultural, el estero fue decretado en 1993 como Reserva Ecológica Estatal y constituye el humedal costero más grande de la entidad, por lo que ha sido denominado sitio Ramsar, Área de Importancia para la Conservación de Aves (AICA) y Sitio Importante para las Aves (IBA) (Pronatura Noroeste A. C., 2010).

Los efectos de los ciclones tropicales sobre la cubierta vegetal se evaluaron mediante el análisis de 19 imágenes satelitales (resolución de 30 m) del sensor Landsat-8 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) para toda el área de estudio, durante el periodo 2013-2017. Las imágenes se trataron y corrigieron atmosféricamente con el software QGIS (QGIS Development Team, 2019) y librerías del lenguaje de programación R (The R Foundation, 2015). Asimismo, se emplearon dos imágenes (resolución de 1.5 m) del sensor SPOT-6, del proveedor AIRBUS (<https://www.intelligence-airbusds.com/>), con el objeto de analizar con detalle los efectos del ciclón Lidia (2017) sobre el estero SJDC. La base de datos del National Hurricane Center (2017) de Estados Unidos de América se consultó para contabilizar los ciclones tropicales que incidieron en la zona de estudio a una distancia máxima de 500 km; además, se analizaron datos de la estación meteorológica San José del Cabo, para conocer la precipitación anual y la precipitación por evento. En total se detectaron 13

2018; Muñoz, 2013). These values were reclassified in a binary manner and the value of 1 was assigned to the vegetation ($\text{NDVI} \geq 0.2$) and 0 to the soil. The vegetation cover corresponding to each image was calculated; in turn, the difference between the image after and before each event (Table 1) allowed the establishment of the following scenarios: -1 = loss, 0 = stability and 1 = gain of vegetation.

A supervised classification was made for the Landsat sensor dated 6/29/2013. This classification served as a basis and was compared with the loss, stability and gain of vegetation of each registered event, which allowed identifying the most affected plant class. Vegetation cover recovery was analyzed comparing the image of the last hurricane of the year and an image of the following year in May (dry season). The latter was reclassified in a binary way (vegetation = 1, soil = 0) and superimposed on the vegetation zone lost in the last hurricane of each year, obtaining the areas of vegetation recovered. These data were plotted on a box and whisker diagram to indicate which type of vegetation showed higher or lower recovery in the studied period.

In order to study in detail the effects on the estuary, two high resolution SPOT-6 images (5/27/2017 and 6/10/2017) of tropical Hurricane Lidia were obtained, and the loss, stability and gain of vegetation cover was estimated. The pre-hurricane image was classified in a supervised way to know the type of vegetation most affected.

Using Google Earth images, changes in the palm grove (the most representative vegetation type of the Natural Protected Area) were monitored during the period analyzed (2013-2017), observing changes in land use and forest fire trails. The information obtained was complemented with field trips.

Results

According to Table 1, during the period (2013-2017) analyzed, 13 tropical hurricanes were recorded at a distance of less than 500 km from the study area, giving an average of 2.6 hurricanes per year. The highest number of hurricanes was recorded in 2013 with five events, followed by 2014 with three, while the year with the lowest number of events was 2017 with only one event. The most extensive hurricane season occurred in 2015, which began on May 31 and ended on November 28. The farthest tropical hurricane to the study area was Octave with 425 km, while Odile, Newton and Lidia made landfall on the estuary of San Jose del Cabo. Precipitation provided by tropical hurricanes corresponds to 70 % in 2013, 73 % in 2014, 20 % in 2015, 60 % in 2016 and 73 % in 2017. Odile was category 4 and

ciclones tropicales que fueron catalogados en 11 eventos por cercanía de fechas. El Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés) se utilizó para analizar y comparar si dichos eventos se presentaban durante una fase cálida o fría del fenómeno climático El Niño.

Los cambios en la cubierta vegetal provocados por ciclones tropicales se analizaron a través del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada imagen; los valores ≥ 0.2 se clasificaron como vegetación (De Nova-Vázquez, Castro-Ibarra, & Ramos-Ramos, 2018; Muñoz, 2013). Dichos valores se reclasificaron de manera binaria y se asignó el valor de 1 a la vegetación ($\text{NDVI} \geq 0.2$) y 0 al suelo. La cobertura vegetal correspondiente a cada imagen se calculó; a su vez, la diferencia entre la imagen posterior y previa a cada evento (Cuadro 1) permitió establecer los escenarios siguientes: -1 = pérdida, 0 = estabilidad y 1 = ganancia de vegetación.

Se hizo una clasificación supervisada correspondiente al sensor Landsat con fecha 29/6/2013. Esta clasificación sirvió como base y se comparó con la pérdida, estabilidad y ganancia de vegetación de cada evento registrado, lo que permitió la determinación de la clase vegetal más afectada. La recuperación de la cubierta vegetal se analizó comparando la imagen del último ciclón del año y una imagen del siguiente año en el mes de mayo (temporada de secas). Esta última se reclasificó de manera binaria (vegetación = 1, suelo = 0) y se superpuso a la zona de vegetación perdida en el último ciclón de cada año, obteniendo así las áreas de vegetación recuperadas. Dichos datos se graficaron en un diagrama de cajas y bigotes, para indicar qué tipo de vegetación mostró mayor o menor recuperación en el periodo estudiado.

Con la finalidad de estudiar con detalle los efectos sobre el estero, se obtuvieron dos imágenes de alta resolución SPOT-6 (27/5/2017 y 6/10/2017) del ciclón tropical Lidia, y se estimó la pérdida, estabilidad y ganancia de cubierta vegetal. La imagen previa al ciclón se clasificó de manera supervisada, para conocer el tipo de vegetación más afectado.

Mediante imágenes de Google Earth, los cambios en el palmar (tipo de vegetación más representativo del Área Natural Protegida) se monitorearon durante el periodo analizado (2013-2017), observando cambios de uso de suelo y rastros de incendios forestales. La información obtenida se complementó con recorridos de campo.

Resultados

Acorde con el Cuadro 1, durante el periodo analizado (2013-2017), se registraron 13 ciclones tropicales a una distancia menor de 500 km de la zona de estudio,

Table 1. Characteristics of tropical hurricanes that occurred less than 500 km away in the lower basin and estuary of San José del Cabo, Baja California.**Cuadro 1. Características de los ciclones tropicales ocurridos a una distancia menor de 500 km en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.**

Event (month)/ Evento (mes)	Category*/ Categoría	Year/ Año	Maximum wind speed (mph)/ Vel. máx. del viento (mph)	PP (mm)	PTA (mm)	PP (%)	Minimum distance from the hurricane to the estuary (km)/ Distancia mínima del ciclón al estero (km)
Erick (July/Julio)	1	2013	70	5.5	364	1.51	106
Juliette (August/Agosto) + Lorena (September/Septiembre)	TT y TT	2013	55 - 45	20/64	364	23.08	82/116
Manuel (September/Septiembre)	1	2013	65	37	364	10.16	180
Octave (October/Octubre)	TT	2013	55	128	364	35.16	425
Norbert (September/Septiembre)	3	2014	105	117	558.5	20.95	240
Odile (September/Septiembre) + Polo (September/Septiembre)	4 y 1	2014	115-65	265/25	558.5	51.92	0/192
Blanca (June)	4	2015	85	7	301.5	2.32	191
Sandra (November/Noviembre)	3	2015	100	53	301.5	17.58	163
Javier (August/Agosto)	TT	2016	55	42	184.5	22.76	83
Newton (September/Septiembre)	1	2016	70	68	184.5	36.86	0
Lidia (September/Septiembre)	TT	2017	55	400	547	73.13	0

*Category 1, 2, 3 and 4 according to the Saffir-Simpson scale. TT = tropical storm; PP = precipitation per event taken from the weather station 03056 of the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); PTA = total annual rainfall taken from the weather station 03056 of CONAGUA.

*Categoría 1, 2, 3 y 4 según la escala Saffir-Simpson. TT = tormenta tropical; PP = precipitación por evento tomada de la estación meteorológica 03056 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); PTA = precipitación total anual tomada de la estación meteorológica 03056 de CONAGUA.

generated 265 mm of precipitation, representing 47 % of the total annual precipitation recorded for 2014, and Lidia left historical rainfall of 400 mm corresponding to 73 % of the total annual precipitation. In 2017 there were high intensity events such as Blanca (category 4) that left 7 mm of precipitation, and low intensity events such as Lidia (tropical storm) with 400 mm of precipitation, so the category does not determine the amount of precipitation, since the Saffir-Simpson scale is based on wind speed.

The ONI is used to determine whether the El Niño phenomenon is in its warm or cold phase. According to Table 2, this index catalogued the year 2013 as neutral, showing little intensity in meteors, since the most intense event was category 1. 2014 had a warm phase of El Niño for the months of September to January, two high-intensity tropical hurricanes occurred (Norbert category 3 and Odile category 4) and was the year with the highest total annual precipitation. The entire year of 2015 showed warm conditions of El Niño, being one of the most extreme years with the longest hurricane season (June to November), in which two high-intensity events were recorded (categories 3 and 4). In July 2016, a cold phase of El Niño started, which lasted until the end of that year, in this period only two events were recorded (category 1 and tropical storm) and the lowest precipitation in the period studied. In September 2017,

dando un promedio de 2.6 ciclones por año. El mayor número de ciclones se registró en el 2013 con cinco eventos, seguido del 2014 con tres, mientras que el año con menor número de eventos fue 2017 con solo uno. La temporada de ciclones más extensa ocurrió en 2015, la cual empezó el 31 de mayo y terminó el 28 de noviembre. El ciclón tropical más lejano al área de estudio fue Octave con 425 km, en tanto que Odile, Newton y Lidia tocaron tierra en el estero San José del Cabo. La precipitación aportada por los ciclones tropicales corresponde a 70 % en el 2013, 73 % en 2014, 20 % en 2015, 60 % en 2016 y 73 % en 2017. Odile fue categoría 4 y generó precipitaciones de 265 mm representando 47 % de la precipitación total anual registrada para 2014, y Lidia dejó lluvias históricas de 400 mm correspondiente al 73 % de la precipitación total anual. En el 2017 existieron eventos de alta intensidad como Blanca (categoría 4) que dejó 7 mm de precipitación, y de baja intensidad como Lidia (tormenta tropical) con precipitación de 400 mm, por lo que la categoría no determina la cantidad de precipitación, toda vez que la escala Saffir-Simpson se basa en la velocidad del viento.

El ONI es utilizado para determinar si el fenómeno El Niño se presenta en su fase cálida o fría. De acuerdo con el Cuadro 2, este índice catalogó el año 2013 como neutral, presentando poca intensidad en los meteoros,

Table 2. El Niño Ocean Index values from 2010 to 2019. Hot periods are represented by positive values ≥ 0.5 (El Niño phenomenon) and cold periods by negative values ≤ -0.5 (La Niña phenomenon).

Cuadro 2. Valores del Índice Oceánico El Niño de 2010 a 2019. Los periodos cálidos están representados por valores positivos ≥ 0.5 (fenómeno El Niño) y los fríos por valores negativos ≤ -0.5 (fenómeno La Niña).

Year/Año	Quarterly/Trimestre											
	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1	0.5	0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8
2019	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5

Source/Fuente: Climate Prediction Center Internet Team (2019).

a cold El Niño phase started, with only one tropical hurricane, but with atypical rainfall close to 400 mm.

Figure 2 illustrates the results regarding changes in vegetation cover. Based on the NDVI analysis, 2013 had the highest land cover in the studied period. This year had the highest hurricane activity; however, the five events recorded were of low intensity and with a hurricane precipitation of 254 mm over four months. In 2014, with the incidence of Hurricane Odile, the vegetation cover was significantly reduced (35.6 %) and did not fully recover during the following years (2015-2017). In 2016, the vegetation cover increased by 24.9 %, but Hurricane Lidia reduced the vegetation cover by 20.6 %. During the period analyzed, there was a decrease in the vegetation cover; the events that marked this reduction were Hurricane Odile and Lidia.

Figure 3 shows the results of vegetation loss, stability and gain analysis for each event. Table 3 shows that the stability of the area predominated with an average of 90 %, with Odile (2014) and Lidia (2017) causing less stability. Vegetation cover gain was registered in low intensity events. Important losses were associated with Odile (category 4) and Lidia (tropical storm); the common characteristic was high precipitation. The loss of vegetative cover in these riparian ecosystems is mainly related to the dragging of vegetation and transport of sediment caused by the volume of water in the stream.

To evaluate the loss per type of vegetation, a supervised classification was created with the Landsat image prior to the hurricane Erick (6/29/2013) and it was compared with the loss and recovery of each one of the

ya que el evento más intenso fue categoría 1. El 2014 presentó una fase cálida del Niño para los meses de septiembre a enero, ocurrieron dos ciclones tropicales de alta intensidad (Norbert categoría 3 y Odile categoría 4) y fue el año con mayor precipitación total anual. Todo el año 2015 mostró condiciones cálidas del Niño, siendo uno de los años más extremos con la temporada ciclónica más extensa (junio a noviembre), en la que se registraron dos eventos de alta intensidad (categorías 3 y 4). En julio de 2016 inició una fase fría del Niño que se prolongó hasta el final de ese año en el que se registraron solo dos eventos (categoría 1 y tormenta tropical) y la menor precipitación del periodo estudiado. En septiembre del año 2017 inició una fase fría del Niño, ocurriendo solamente un ciclón tropical, pero con lluvias atípicas cercanas a 400 mm.

La Figura 2 ilustra los resultados respecto a los cambios en la cubierta vegetal. Con base en el análisis de NDVI, el 2013 tuvo la mayor cubierta vegetal del periodo analizado. Este año presentó la mayor actividad ciclónica; sin embargo, los cinco eventos registrados fueron de baja intensidad y con una precipitación ciclónica de 254 mm a lo largo de cuatro meses. En el año 2014, con la incidencia del huracán Odile, la cubierta vegetal se redujo de manera importante (35.6 %) y no volvió a recuperarse en su totalidad durante los años posteriores (2015-2017). En el 2016, la cubierta vegetal incrementó 24.9 %, pero el ciclón Lidia redujo la cobertura en 20.6 %. Durante el periodo analizado existió disminución de la cubierta vegetal; los eventos que marcaron esta reducción fueron Odile y Lidia.

La Figura 3 muestra los resultados del análisis de pérdida, estabilidad y ganancia de vegetación para cada

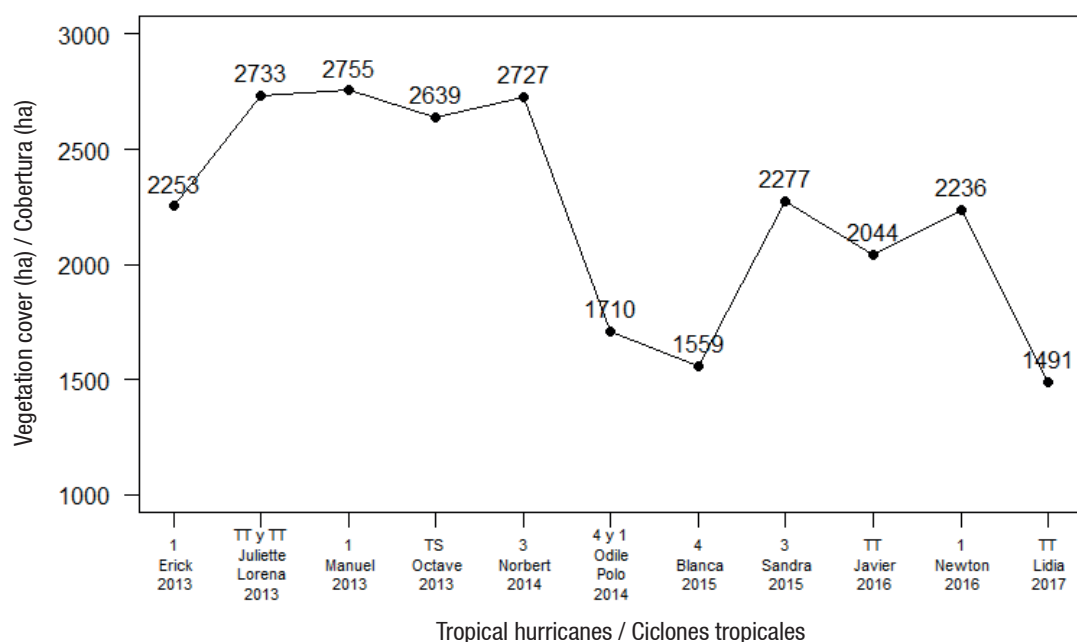


Figure 2. Vegetation cover after tropical hurricanes (category 1, 2, 3 and 4 according to the Saffir-Simpson scale; TT = tropical storm) occurred in the lower basin and estuary of San José del Cabo, Baja California Sur, Mexico. Calculation based on the values of the Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI \geq 0.2$).

Figura 2. Cobertura vegetal posterior a los ciclones tropicales (categoría 1, 2, 3 y 4 según la escala Saffir-Simpson; TT = tormenta tropical) ocurridos en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México. Cálculo con base en los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada ($NDVI \geq 0.2$).

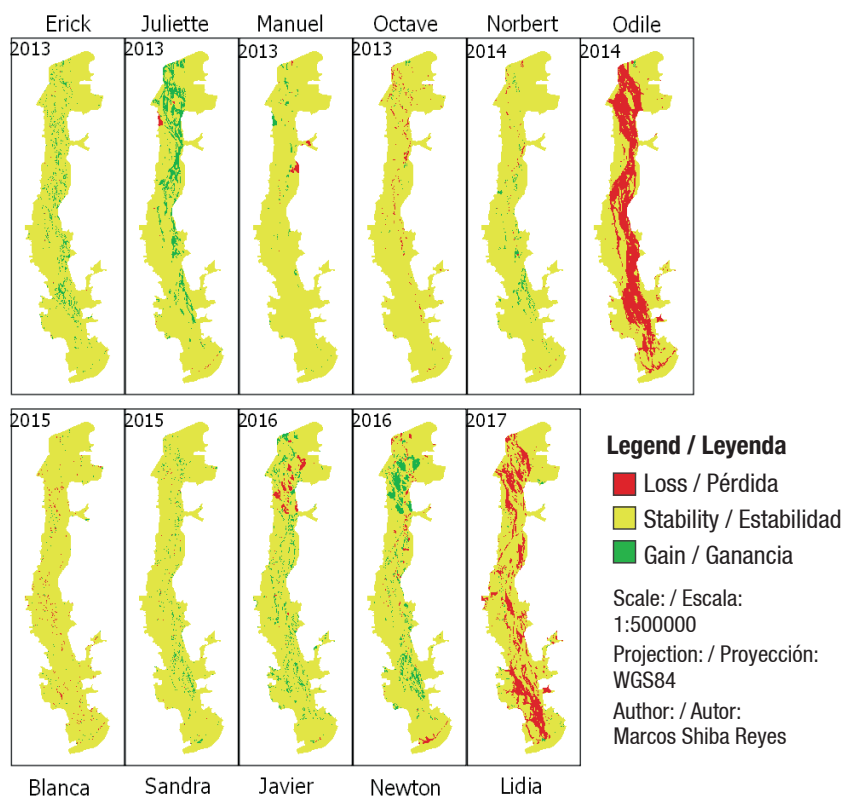


Figure 3. Loss, stability and gain of vegetation cover after each hurricane in the lower basin and estuary of San Jose del Cabo, Baja California Sur, Mexico.

Figura 3. Pérdida, estabilidad y ganancia de la cobertura vegetal después de cada ciclón en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Table 3. Vegetation changes after tropical hurricanes: loss, stability and gain of vegetation cover in the lower basin and estuary of San Jose del Cabo, Baja California Sur, Mexico.**Cuadro 3. Cambios de la vegetación posteriores a los ciclones tropicales: pérdida, estabilidad y ganancia de cubierta vegetal en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.**

Year/ Año	Event/ Evento	Loss (ha)/ Pérdida (ha)	Stability (ha)/ Estabilidad (ha)	Gain (ha)/ Ganancia (ha)	Loss (%)/ Pérdida (%)	Stability (%)/ Estabilidad (%)	Gain (%)/ Ganancia (%)
2013	Erick	3.17	2 724.14	161.87	0.11	94.29	5.60
2013	Juliette-Lorena	16.31	2 517.21	355.66	0.56	87.13	12.31
2013	Manuel	21.94	2 821.39	45.86	0.76	97.65	1.59
2013	Octave	61.67	2 816.48	11.03	2.13	97.48	0.38
2014	Norbert	21.24	2 790.90	77.04	0.74	96.60	2.67
2014	Odile-Polo	1 027.82	1 858.73	2.63	35.57	64.33	0.09
2015	Blanca	51.84	2 813.33	24.01	1.79	97.37	0.83
2015	Sandra	7.67	2 792.68	88.83	0.27	96.66	3.07
2016	Javier	68.29	2 617.38	203.51	2.36	90.59	7.04
2016	Newton	63.11	2 569.07	257.00	2.18	88.92	8.90
2017	Lidia	595.98	2269.62	23.58	20.63	78.56	0.82
Average/ Promedio		176.28	2 599.18	113.73	6.10	89.96	3.94

hurricanes studied. Because of the temporality, it was decided not to use the soil class, since a great variation in the later images was observed due to dynamics of annual vegetation that grows in the rainy season and disappears in the dry season.

Table 4 shows the percentage of cover loss per type of vegetation; hurricanes Odile and Lidia were the most devastating and the most affected vegetation was perennial herbaceous, urban, shrub and palm grove. The other events caused vegetation cover losses below 5 % for all plant associations. Recovery per type of vegetation is shown in Figure 4. The vegetation with the least recovery was perennial herbaceous and scrubland because the images used in May correspond to the dry season in the region; these types of vegetation are very sensitive, so their presence is reduced by the lack of rain. The other types of vegetation had a recovery of more than 60 % of the lost area, being reed-southern cattail the most recovered.

According to Table 5, in the period studied (2013-2017) an average of 349.4 ha was lost, of which 15 % corresponding to 52.2 ha was recovered. In 2014, Hurricane Odile caused the loss of 1 028 ha of vegetation cover, but 8.5 % was recovered. In 2017, Tropical Storm Lidia caused the loss of 590 ha of vegetation cover, recovering 25.4 % after eight months.

Vegetation loss, stability and gain were calculated using the SPOT sensor for tropical cyclone Lidia in the finer scale analysis (1.5 m) of the estuary of SJDC; the results are shown in Figure 5 and Table 6. The vegetation gain was mainly in the area where there was a forest fire

evento. En el Cuadro 3 se observa que la estabilidad de la zona predominó con un promedio de 90 %, siendo Odile (2014) y Lidia (2017) los que causaron menor estabilidad. La ganancia de cubierta vegetal se registró en eventos de baja intensidad. Las pérdidas importantes estuvieron asociadas con Odile (categoría 4) y Lidia (tormenta tropical); la característica en común fue la alta precipitación. La pérdida de cobertura vegetal en estos ecosistemas riparios se relaciona principalmente con el arrastre de vegetación y transporte de sedimento ocasionado por el volumen de agua del arroyo.

Para evaluar la pérdida por tipo de vegetación, se elaboró una clasificación supervisada con la imagen Landsat previa al ciclón Erick (29/6/2013) y se comparó con la pérdida y recuperación de cada uno de los ciclones estudiados. Debido al efecto de la temporalidad se decidió no utilizar la clase de suelo, ya que se observó gran variación en las imágenes posteriores por la dinámica de la vegetación anual que crece en la temporada de lluvias y desaparece en la de secas.

El Cuadro 4 muestra el porcentaje de pérdida de cubierta por tipo de vegetación; los ciclones Odile y Lidia fueron los más devastadores y la vegetación más afectada fue herbácea perenne, urbana, matorral y palmar. Los demás eventos provocaron pérdidas de cubierta vegetal por debajo del 5 % para todas las asociaciones vegetales. La recuperación por tipo de vegetación se muestra en la Figura 4. La vegetación con menor recuperación fue herbácea perenne y matorral, debido a que las imágenes usadas del mes de mayo corresponden a la temporada de secas de la región; estos tipos de vegetación son muy sensibles, por lo

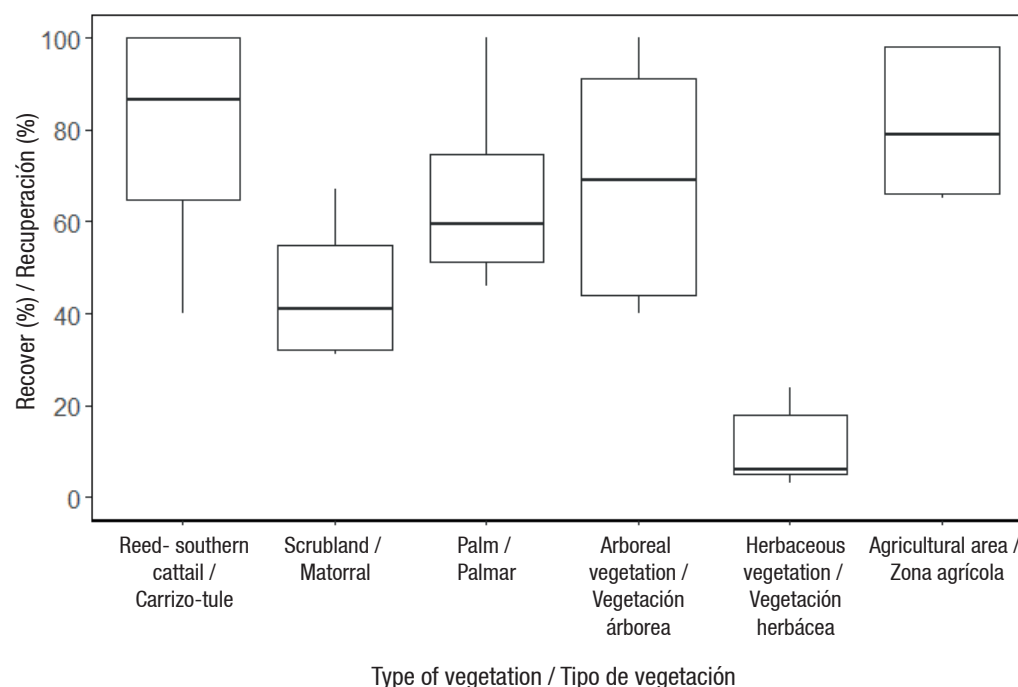


Figure 4. Box and whisker diagram of the cover recovery per type of vegetation in the lower basin and estuary of San José del Cabo, Baja California Sur, Mexico. Solid line = median, box = first and third quartile, whisker = median $\pm$ 1.5 * interquartile range.

Figura 4. Diagrama de caja y bigote de la recuperación por tipo de cobertura vegetal en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México. Línea sólida = mediana, caja = primer y tercer cuartil, bigotes = mediana $\pm$ 1.5 * rango intercuartílico.

Table 4. Loss by type of vegetation in the lower watershed and estuary of San José del Cabo, Baja California Sur, Mexico, using as a basis the Landsat supervised classification dated June 26, 2013.

Cuadro 4. Pérdida por tipo de vegetación en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México, usando como base la clasificación supervisada Landsat con fecha 26 de junio de 2013.

Event / Evento	Type of vegetation (%) /						
	Palm grove / Palmar	Tree / Árborea	Herbaceous / Herbácea	Reed- southern cattail / Carrizo-Tule	Agricultural / Agrícola	Urban / Urbana	Scrubland / Matorral
Erick	0.00	0.00	0.20	0.00	0.03	1.85	0.00
Juliette-Lorena	0.00	0.00	0.36	0.00	0.09	0.00	1.09
Manuel	0.04	0.66	0.38	0.00	1.17	0.00	1.13
Octave	0.00	0.01	1.03	0.00	1.16	2.38	0.04
Norbert	0.00	0.01	0.38	0.00	0.67	0.00	0.04
Odile-Polo	9.13	7.19	60.52	4.38	3.88	27.51	12.77
Blanca	0.14	0.43	2.41	0.15	1.55	4.76	1.94
Sandra	0.04	0.13	0.34	0.06	0.23	0.53	0.08
Javier	0.04	0.01	4.40	0.00	1.86	0.00	1.41
Newton	1.80	1.33	1.92	0.46	1.65	1.32	0.43
Lidia	19.36	16.84	31.10	10.18	8.77	20.37	19.43
Average / Promedio	2.78	2.42	9.37	1.38	1.91	5.34	3.49

Table 5. Vegetation area of the last event of each year and area recovered in May of the following year in the lower basin and estuary basin of San José del Cabo, Baja California Sur, Mexico.

Cuadro 5. Área de vegetación del último evento de cada año y área recuperada en mayo del año siguiente en la cuenca baja y estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Year / Año	Last event of the year / Último evento del año	Lost vegetation (ha) / Vegetación perdida (ha)	Recovery in May (ha) / Recuperación en mayo (ha)	Recovery (%) / Recuperación (%)
2013	Octave	60	7	11.67
2014	Odile	1 028	87	8.46
2015	Sandra	8	2	25.00
2016	Newton	61	15	24.59
2017	Lidia	590	150	25.42
Average / Promedio		349.4	52.2	15.00

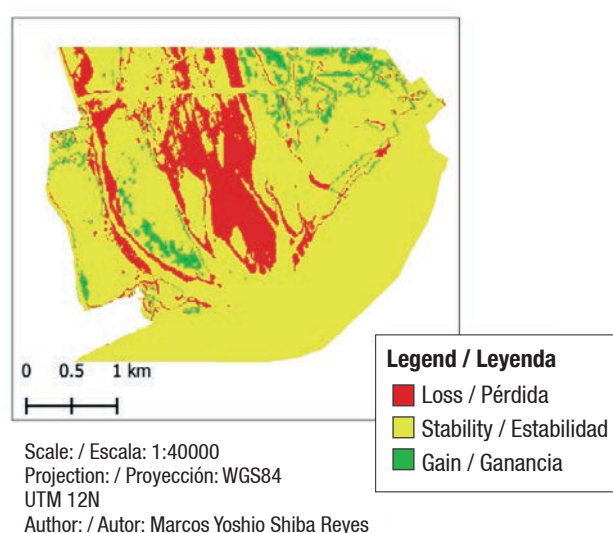


Figure 5. Loss, stability and gain of vegetation after Tropical Hurricane Lidia on the estuary of San Jose del Cabo, Baja California Sur, Mexico.

Figura 5. Pérdida, estabilidad y ganancia de vegetación después del ciclón tropical Lidia sobre el estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Table 6. Loss, stability and gain per class after Tropical Hurricane Lidia, calculated using the SPOT sensor for the area of the estuary of San Jose del Cabo, Baja California Sur, Mexico.

Cuadro 6. Pérdida, estabilidad y ganancia por clase después del ciclón tropical Lidia, calculados con el sensor SPOT, para la zona del estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Class / Clase	Loss (%) / Pérdida (%)	Stability (%) / Estabilidad (%)	Gain (%) / Ganancia (%)
Water body / Cuerpos de agua	3.98	95.47	0.56
Soil / Suelo	3.84	83.82	12.35
Palm grove / Palmar	26.10	73.89	0.01
Arboreal vegetation / Vegetación arbórea	18.95	81.05	0.00
Perennial herbaceous vegetation / Vegetación herbácea perenne	38.50	57.44	4.06
Burned vegetation / Vegetación quemada	10.17	53.73	36.10
Reed- southern cattail / Carrizo-tule	38.11	61.29	0.60
Agricultural area / Zona agrícola	12.12	87.88	0.00
Urban vegetation / Vegetación urbana	6.89	86.59	6.52
Average / Promedio	17.62	75.68	6.68

months ago (April 2017). The classes that had greater cover loss were perennial herbaceous vegetation and reed-southern cattail. The analysis in the 30 m spatial scales indicated that perennial herbaceous vegetation was the most affected, but, at a fine scale (1.5 m), reed-southern cattail was the most affected. The areas with vegetation loss maintained the same spatial pattern, which was located over the stream bed.

In order to know how the palm grove is affected, a monitoring was carried out through field trips and Google Earth images. The results indicate that the Odile and Lidia events affected the area over the main course of the stream, removing the existing palm grove, which did not show recovery in the following months. The areas around the stream lost canopy vegetation but recovered later. Through field trips, it was observed that the palm grove removed was replaced by invasive species such as *A. donax* and *Tamarix* sp. An area of 1.4 ha was estimated to have been deforested due to changes in land use on the east side of the estuary, affecting part of the existing palm grove in this area (Figure 6), and an area of 20 ha affected by fire in April 2017.

Image analysis indicated that in heavy rains there are tributaries on the west side of the estuary, which puts the historic center of San Jose del Cabo at risk of flooding. The residents mentioned the need to build hydraulic protection works as it is a vulnerable site. Over the lower basin, irregular human settlements and a large number of debris and garbage were observed. The large volumes of water present in the San José stream carry these materials to the estuary of SJDC, generating contamination.

que su presencia se ve reducida ante la falta de lluvia. Los demás tipos de vegetación tuvieron recuperación superior al 60 % del área perdida, siendo carrizal-tular el de mayor recuperación.

De acuerdo con el Cuadro 5, en el periodo estudiado (2013-2017) se perdieron en promedio 349.4 ha, de las cuales se recuperó 15 % correspondiente a 52.2 ha. En el 2014, el ciclón Odile causó la pérdida de 1 028 ha de cubierta vegetal, pero se recuperó 8.5 %. En 2017, la tormenta tropical Lidia provocó la pérdida de 590 ha de cubierta vegetal, recuperándose, a los ocho meses, 25.4 % de la misma.

En el análisis a escala más fina (1.5 m) del estero SJDC, la pérdida, estabilidad y ganancia de vegetación se calcularon mediante el sensor SPOT para el ciclón tropical Lidia; los resultados se muestran en la Figura 5 y Cuadro 6. La ganancia de vegetación se presentó principalmente en el área donde existió un incendio forestal meses atrás (abril de 2017). Las clases que presentaron mayor pérdida de cobertura fueron la vegetación herbácea perenne y carrizo-tule. El análisis en las escalas espaciales de 30 m indicó que la vegetación herbácea perenne fue la más afectada, pero, a escala fina (1.5 m), el carrizo-tule resultó el más afectado. Las zonas con pérdida de vegetación mantuvieron el mismo patrón espacial, el cual se localizó sobre el cauce del arroyo.

Con la finalidad de conocer cómo es afectado el palmar, se hizo un monitoreo mediante visitas de campo e imágenes Google Earth. Los resultados indican que los eventos Odile y Lidia afectaron la zona sobre el cauce



Figure 6. SPOT images corresponding to before and after Hurricane Lidia dated May 21, 2017 and October 6, 2017 in the estuary of San Jose del Cabo, Baja California Sur, Mexico.

Figura 6. Imágenes SPOT anteriores y posteriores al ciclón Lidia con fechas 21 de mayo de 2017 y 06 de octubre de 2017 en el estero San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Discussion

There are studies that use different methodologies and indicators in the study of the effect of tropical cyclones on ecosystems. In the present study, satellite images were used, at different spatial and temporal scales, applying vegetation indices as indicators, similar to that done by Negrón-Juárez et al. (2014), McDowell et al. (2015), Savage, Lawrance, y Squires (2017) and Parker et al. (2018).

Díaz (2010) and Farfán, D'sa, and Liu (2014) analyzed the frequency of tropical hurricanes that impacted Baja California Sur. Díaz (2010) calculated 0.7 hurricanes per year from 1963-2009 and Farfán et al. (2014) estimated 0.9 hurricanes per year on average from 1970-2010. In the present study, 1.4 hurricanes per year were calculated, being a higher average than the one described by the authors. The study period was short in comparison with the above-mentioned studies; however, it is important to analyze as long as possible the timelines to identify if the trend in the frequency of hurricanes in the area is increasing, as suggested by the data of this research.

Most studies on effects of tropical hurricanes on vegetation evaluate mainly wind damage, reporting defoliation and uprooted trees as the most common, which depends on the existing species and their individual characteristics (Islebe et al., 2009; Navarro-Martínez et al., 2012); for example, trees with denser wood trunks are more resistant to wind than those with less dense wood (Jimenez-Rodriguez et al., 2018). In contrast, the present study concentrates on a riparian zone, where the action of water is the main abiotic factor shaping vegetation.

The main limitation of vegetation in arid and semi-arid zones is water availability, so that frequent low-intensity tropical hurricanes favor the increase of greenness in vegetation, as was the case in 2013. These green gains promote faster recovery (Jimenez-Rodriguez et al., 2018; Parker et al., 2018), which is related to growth rates of plant species; the faster growing ones will take advantage of the resource availability favoring their establishment (Walker, 1991). After a disturbance, the ecosystem tends to return to its previous state; a conserved ecosystem will achieve this more quickly and easily (Folke et al., 2004).

Sediment transport and water flow in San José creek is increased by land clearing and land use changes over the upper watershed, causing less soil retention and moisture. Banks of material exist over the course of the stream, which modify the topography and direction of water flow, as well as the amount of sediment it transports.

principal del arroyo, removiendo el palmar existente, el cual no evidenció recuperación en los meses posteriores. Las zonas alrededor del cauce perdieron dosel de vegetación, pero se recuperó posteriormente. Mediante visitas a campo se observó que el palmar removido es sustituido por especies invasoras como *A. donax* y *Tamarix* sp. Se estimó un área de 1.4 ha deforestadas por cambio de uso de suelo en el margen este del estero, afectando parte del palmar existente en esta zona (Figura 6), y una superficie de 20 ha afectadas por fuego en abril de 2017.

El análisis de imágenes indicó que en lluvias intensas existen afluentes sobre el margen oeste del arroyo, lo que pone en riesgo de inundación el centro histórico de San José del Cabo. Los pobladores mencionaron la necesidad de construcción de obras de protección hidráulica al ser un sitio vulnerable. Sobre la cuenca baja se observaron asentamientos humanos irregulares y gran cantidad de escombros y basura. Los grandes volúmenes de agua presentes en el arroyo San José arrastran dichos materiales hasta el estero SJDC, generando contaminación.

Discusión

Existen estudios que emplean varias metodologías e indicadores en el estudio del efecto de los ciclones tropicales sobre los ecosistemas. En el presente trabajo se utilizaron imágenes satelitales, a varias escalas espaciales y temporales, aplicando índices de vegetación como indicadores, similar a lo realizado por Negrón-Juárez et al. (2014), McDowell et al. (2015), Savage, Lawrance, y Squires (2017) y Parker et al. (2018).

Díaz (2010) y Farfán, D'sa, y Liu (2014) analizaron la frecuencia de ciclones tropicales que impactaron en Baja California Sur. Díaz (2010) calculó 0.7 ciclones por año entre 1963-2009 y Farfán et al. (2014) estimaron 0.9 ciclones por año en promedio entre 1970-2010. En la presente investigación se calcularon 1.4 ciclones por año, siendo un promedio mayor que el descrito por dichos autores. El periodo de estudio fue corto en comparación con los estudios antes mencionados; no obstante, es importante el análisis de líneas temporales lo más extensas posibles, para identificar si la tendencia en la frecuencia de ciclones en la zona está aumentando, como lo sugieren los datos de la presente investigación.

La mayoría de los estudios sobre efectos de ciclones tropicales en la vegetación evalúan principalmente los daños provocados por el viento, reportando la defoliación y árboles desenraizados como los más comunes, lo cual depende de las especies existentes y sus características individuales (Islebe et al., 2009; Navarro-Martínez et al., 2012); por ejemplo, los árboles con troncos de madera más densa son más resistentes al viento que los de

In the most dynamic zone of the riverbed, it was observed that, among the first species present after the disturbance, the invasive species (*Tamarix* sp. and *A. donax*) are very abundant. Because of their ease of dispersion and growth, the invasive species compete directly with native species for space and resources (Flores-Maldonado, Prado-Navarro, Domínguez-Orozco, Mendoza, & Gonzáles-Martínez, 2008), being one of the main causes of loss of resilience in ecosystems. In a scenario where the intensity and frequency of tropical hurricanes increase, invasive species will cause negative effects such as the extinction or displacement of native species of flora and fauna (Jiménez-Rodríguez et al., 2018).

The estuary of SJDC is located in an area of high commercial importance in the center of the San Jose del Cabo tourism development. The State Reserve site has undergone changes in 2004 and 2010 that favor tourism development and fragment and isolate this ecosystem. In addition to these pressures, it is worth noting the increase in the frequency and intensity of fires in the palm grove, as happened in 2017 when a forest fire impacted 20 hectares of vegetation. All these factors put a strong pressure on the ecosystem, with the consequent deterioration and decrease in its capacity of resilience.

Ecosystem resilience is provided by the biodiversity of species and functional groups that provide ecosystem services necessary for conservation and functioning (Folke et al., 2004; Thompson, 2011). As observed in previous analyses, the site remains stable and resilient to tropical hurricanes; however, the presence of these with large volumes of runoff, coupled with the effects of anthropogenic activities, compromise the resilience of this ecosystem.

Conclusions

The vegetation of the lower basin and estuary of San Jose del Cabo is resilient to hurricanes; however, events whose precipitation contributes more than 50 % of the total annual precipitation decrease the capacity for recovery. Changes in land use, increased frequency and intensity of fires and incidence of hurricanes with high precipitation compromise the resilience of the vegetation cover; evidence suggests that the frequency of intense events does not allow the recovery of the ecosystem until its initial state. The main factor of vegetation cover loss is the runoff caused by San José stream; the opening of clearings favors the establishment of invasive species such as *Arundo donax* and *Tamarix* sp.

Acknowledgements

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship for

madera menos densa (Jiménez-Rodríguez et al., 2018). En contraste, el presente estudio se concentra en una zona riparia, donde la acción del agua es el principal factor abiótico que moldea a la vegetación.

La principal limitante de la vegetación en zonas áridas y semiáridas es la disponibilidad de agua, de tal modo que los ciclones tropicales frecuentes de baja intensidad favorecen el incremento de verdor en la vegetación, como fue el caso del año 2013. Estas ganancias de verdor promueven una recuperación más rápida (Jiménez-Rodríguez et al., 2018; Parker et al., 2018), la cual está relacionada con las tasas de crecimiento de las especies vegetales; las de crecimiento más rápido aprovecharán la disponibilidad de recursos favoreciendo su establecimiento (Walker, 1991). Después de un disturbio, el ecosistema tiende a regresar a su estado previo; un ecosistema conservado lo logrará de manera más rápida y sencilla (Folke et al., 2004).

El transporte de sedimento y el flujo hídrico que presenta el arroyo San José está incrementado por desmontes y cambios de uso de suelo sobre la cuenca alta, provocando menor retención del suelo y humedad. Sobre el cauce del arroyo existen bancos de material, los cuales modifican tanto la topografía y dirección del flujo de agua, como la cantidad de sedimento que transporta.

En la zona más dinámica del cauce se observó que, entre las primeras especies presentes después del disturbio, las invasoras (*Tamarix* sp. y *A. donax*) son muy abundantes. Por su facilidad de dispersión y crecimiento, las invasoras compiten directamente con especies nativas por espacio y recursos (Flores-Maldonado, Prado-Navarro, Domínguez-Orozco, Mendoza, & Gonzáles-Martínez, 2008), siendo una de las principales causas de pérdida de resiliencia en los ecosistemas. En un escenario donde la intensidad y frecuencia de ciclones tropicales incrementen, las especies invasoras provocarán efectos negativos como la extinción o desplazamiento de especies nativas de flora y fauna (Jiménez-Rodríguez et al., 2018).

El estero SJDC está ubicado en un área de alta importancia comercial en el centro del desarrollo turístico San José del Cabo. El polígono de la Reserva Estatal ha sufrido cambios en 2004 y 2010 que favorecen el desarrollo turístico y que fragmentan y aíslan este ecosistema. Sumado a estas presiones, cabe señalar el aumento en la frecuencia e intensidad de fuegos provocados en el palmar, como sucedió en 2017 cuando un incendio forestal impactó 20 ha de vegetación. Todos estos factores ejercen una fuerte presión sobre el ecosistema, con el consiguiente deterioro y disminución de su capacidad de resiliencia.

La resiliencia de los ecosistemas está dada por la biodiversidad de especies y de grupos funcionales

postgraduate study and the Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C.; the authors also thank the technician Juan Vega Mayagoitia from the Hydrology Laboratory and the M. C. Christian Silva Bejarano responsible for the Plant Biology Laboratory for his valuable support in the field. This study was carried out with the funding support of the "Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua, proyecto núm. 0249265", in collaboration with the Consorcio Agua-CONACYT.

End of English version

References / Referencias

- Breceda, A. (2007). Ficha informativa de los humedales de RAMSAR (FIR). Retrieved from <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1827RIS.pdf>
- Cada, V., Morrissey, R., Michlová, Z., Bace, R., Janda, P., & Svoboda, M. (2016). Frequent severe natural disturbance and non-equilibrium landscape dynamics shaped the mountain spruce forest in central Europe. *Forest Ecology and Management*, 363, 169–178. doi: 10.1016/j.foreco.2015.12.023
- Climate Prediction Center Internet Team. (2019). National Weather Service. Climate prediction center. Retrieved March 20, 2019 from <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- Cuevas-Reyes, P. (2010). Importancia de la resiliencia biológica como posible indicador del estado de conservación de los ecosistemas: implicaciones en los planes de manejo y conservación de la biodiversidad. *Biológicas*, 12(1), 1–7. Retrieved from <https://www.biologicas.umich.mx/index.php?journal=biologicas&page=article&op=view&path%5B%5D=67&path%5B%5D=67>
- De Nova-Vázquez, E., Castro-Ibarra, G., & Ramos-Ramos, H. (2018). Identificación de la vegetación urbana en la Ciudad de México; evaluación de cuatro métodos para la determinación de umbrales en el índice normalizado de diferencias de vegetación y de la clasificación supervisada. *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(3), 58–73. Retrieved from http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/sitios/rdebeta/rde_26a/RDE26.pdf
- Díaz, S. (2010). Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México. *Interciencia*, 35(4), 306–310. Retrieved from <http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2786/1436.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Doyle, T., Krauss, K., & Wells, C. (2009). Landscape analysis and pattern of hurricane impact and circulation on mangrove forest of the Everglades. *Wetlands*, 29(1), 44–53. doi: 10.1672/07-233.1
- Farfán, L., Alfaro, E., & Cavazos, T. (2013). Characteristics of tropical cyclone making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970-2010. *Atmósfera*, 26(2), 163–182. doi: 10.1016/S0187-6236(13)71070-1
- Farfan, L., D'Sa, E., & Liu, K. (2014). Tropical cyclone impacts on coastal regions: the case of the Yucatán and the Baja California Peninsulas, México. *Estuaries and Coasts*, 37, 1388–1402. doi: 10.1007/s12237-014-9797-2
- Flores-Maldonado, J. J., Prado-Navarro, A., Domínguez-Orozco, A. L., Mendoza, R., & Gonzáles-Martínez, A. I. (2008). El carrizo gigante, especie invasora de ecosistemas riparios. *Biodiversitas*, 81, 6–10. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/283318716_El_carrizo_gigante_especie_invasora_de_ecosistemas_riparios
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2004). Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 557–81. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711
- Gill, N., Jarvis, D., Veblen, T., Pickett, S., & Kulakowski, D. (2017). Is initial post-disturbance regeneration indicative of

Conclusiones

La vegetación de la cuenca baja y estero San José del Cabo es resiliente a los ciclones; sin embargo, eventos cuya precipitación aporta más del 50 % de la precipitación total anual disminuyen la capacidad de recuperación. Los cambios de uso de suelo, el incremento en la frecuencia e intensidad de fuegos y la incidencia de ciclones con precipitación elevada comprometen la resiliencia de la cubierta vegetal; las evidencias sugieren que la frecuencia de eventos intensos no permite la recuperación del ecosistema hasta su estado inicial. El factor principal de pérdida de cobertura vegetal es la escorrentía causada por el arroyo San José; la apertura de claros favorece el establecimiento de especies invasoras como *Arundo donax* y *Tamarix* sp.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para estudio de posgrado y al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C.; al Técnico Juan Vega Mayagoitia del Laboratorio de Hidrología y al M. C. Christian Silva Bejarano responsable del Laboratorio de Biología Vegetal por su valioso apoyo en campo. Este estudio se realizó con el apoyo económico del "Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua, proyecto núm. 0249265", en colaboración con el Consorcio Agua-CONACYT.

Fin de la versión en español

- longer-term trajectories? *Ecosphere*, 8(8), e01924. doi: 10.1002/ecs2.1924
- Gunderson, L. (2000). Ecological resilience in theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 425–439. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425
- Islebe, G. A., Torrescano-Valle, N., Valdez-Hernández, M., Tuz-Novelo, M., & Weissenberg, H. (2009). Efectos del impacto del huracán Dean en la vegetación del sureste de Quintana Roo, México. *Foresta Veracruzana*, 11(1), 1–6. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49711999001>
- Jiménez-Rodríguez, D. L., Álvarez-Añorve, M. Y., Pineda-Cortés, M., Flores-Puerto, J. I., Benítez-Malvido, J., Oyama, K., & Avila-Cabadilla, L. D. (2018). Structural and functional traits predict short-term response of tropical dry forest to a high intensity hurricane. *Forest Ecology and Management*, 426, 101–114. doi: 10.1016/j.foreco.2018.04.009
- Maass, M., Ahedo-Hernández, R., Araiza, S., Verduzco, A., Martínez-Yrizar, A., Jaramillo, V., ...Sarukhán, J. (2018). Long-term (33 years) rainfall and runoff dynamics in a tropical dry forest ecosystem in western Mexico: Management implication under extreme weather events. *Forest Ecology and Management*, 426, 7–17. doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.040
- Manson, R., & Jardel, E. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. In CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 131–184). México: Author. Retrieved from <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/13328.pdf>
- Martínez-Yrizar, A., Jaramillo, V., Maass, M., Búrquez, A., Parker, G., Álvarez-Yépiz, J. C., ...Sarukhan, J. (2018). Resilience of tropical dry forest productivity to two hurricanes of different intensity in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426, 53–60. doi: 10.1016/j.foreco.2018.02.024
- Mcdowell, N., Coops, N., Beck, P., Chambers, J., Gongodamage, C., Hicke, J., ...Allen, C. (2015). Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbance. *Trend in Plant Science*, 20(2), 114–123. doi: 10.1016/j.tplants.2014.10.008
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: Índices de vegetación. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion
- National Hurricane Center. (2017). National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. Retrieved November 7, 2017 from <https://www.nhc.noaa.gov/data/>
- Navarro-Martínez, A., Duran-García, R., & Méndez-González, M. (2012). El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México. *Maderas y Bosques*, 18(1), 57–76. doi: 10.21829/myb.2012.1811138
- Negrón-Juárez, R., Baker, D. B., Chambers, J. Q., Hurtt, G. C., & Goosem, S. (2014). Multi-scale sensitivity of Landsat and MODIS to forest disturbance associated with tropical cyclone. *Remote Sensing of Environment*, 140, 679–689. doi: 10.1016/j.rse.2013.09.028
- Parker, G., Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Yépiz, J. C., Maass, M., & Araiza, S. (2018). Effect of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426, 39–52. doi: 10.1016/j.foreco.2017.11.037
- Pronatura Noroeste, A. C. (2010). Plan de conservación del estero San José del Cabo, B. C. S., México. Retrieved from http://mexicobirdingtrail.org/wp-content/uploads/2013/06/Plan-de-Conservacion-ESJC_ver.2.pdf
- QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Retrieved March 20, 2019 from <http://qgis.osgeo.org>
- Savage, S., Lawrance, R., & Squires, J. (2017). Mapping post-disturbance landscape composition with Landsat satellite imagery. *Forest Ecology and Management*, 399, 9–23. doi: 10.1016/j.foreco.2017.05.017
- Sobel, A., Camargo, S., Hall, T., Lee, C., Tippet, M., & Wing, A. (2016). Human influence on tropical cyclone intensity. *Natural Hazard*, 353(6296), 242–246. doi: 10.1126/science.aaf6574
- The R Foundation. (2015). The R project for Statistical Computing. Vienna, Australia: Author. Retrieved from <https://www.r-project.org/>
- Thompson, I. (2011). Biodiversidad, umbrales ecosistémicos, resiliencia y degradación forestal. *Unnasyva*, 238(62), 25–30. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s05.pdf>
- Walker, L. R. (1991). Tree damage and recovery from hurricane Hugo in Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Biotropica*, 23(4), 379–385. doi: 10.2307/2388255
- Wurl, J., & Imaz, M. A. (2016). Las condiciones hidrológicas en la cuenca San José del Cabo, Baja California Sur, México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 2(2), 91–102. doi: 10.18242/anpscripta.2016.02.02.0005
- Zhang, L., Karnauskas, K., Donnelly, J., & Emanuel, K. (2017). Response of the North Pacific tropical cyclone climatology to global warming: Application of dynamical downscaling to CMIP5 Models. *American Meteorological Society*, 30(4), 1233–1243. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0496.1