

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



---

## Maestría en Ciencias en Ciencias de la Vida

---

Influencia del manejo de hábitat y factores ambientales sobre el  
palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*) en la Ciénega de  
Santa Clara, Sonora, México

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Stefanny Sirleg Villagomez Palma**

Ensenada, Baja California, México  
2024

Tesis defendida por  
**Stefanny Sirleg Villagomez Palma**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Eduardo Palacios Castro**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Osvel Mario Hinojosa Huerta**  
Codirector de tesis

**Dr. Horacio Jesús de la Cueva Salcedo**

**Dr. Alejandro Hinojosa Corona**



---

**Dr. Edgardo Alfredo Sepúlveda Sánchez Hidalgo**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Vida

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Stefanny Sirleg Villagomez Palma** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Vida.

**Influencia del manejo del hábitat y factores ambientales el palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México**

Resumen aprobado por:

---

**Dr. Eduardo Palacios Castro**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Osvel Mario Hinojosa Huerta**  
Codirector de tesis

El palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*), es un ave de marisma endémica de la cuenca baja y delta del río Colorado. Es una especie en peligro y prioritaria para la conservación, tanto en México como en los EE. UU. El 75% de su población se concentra en el humedal de la Ciénega de Santa Clara, noroeste de Sonora. Este humedal recibe agua del distrito agrícola del valle Welton-Mohawk en Yuma, Arizona, EE. UU. Las fluctuaciones en distribución y abundancia del Palmoteador de Yuma están aparentemente asociadas con la dinámica de su hábitat. La cobertura, distribución y estructura de la vegetación emergente en la Ciénega responde a los cambios del sistema hidrológico, lo cual a su vez afecta la distribución y la abundancia de las especies silvestres. Se evaluaron los cambios históricos en la tendencia poblacional del palmoteador de Yuma en la Ciénega y su relación con los elementos del hábitat y factores ambientales en los últimos 10 años. En las últimas dos décadas (1999 – 2022) su abundancia ha fluctuado, pero su población se ha mantenido estable, con un promedio de 2.09 rávidos/punto. Sus fluctuaciones poblacionales están asociadas significativamente a factores ambientales y de hábitat, incluyendo porcentaje de cobertura de vegetación emergente, agua, verdor y temperaturas máximas y mínimas. Los resultados de este trabajo pueden servir para la planeación e implementación de acciones de restauración y estrategias de conservación en éste, y los demás humedales del delta del río Colorado.

**Palabras clave:** aves de marisma, delta del río Colorado, conservación de humedales, Modelo Mixto Aditivo Generalizado

Abstract of the thesis presented by **Stefanny Sirleg Villagomez Palma** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Life in Sciences

**Influence of habitat management and environmental factors on the Yuma Ridgway's Rail (*Rallus obsoletus yumanensis*) in the Cienega de Santa Clara, Sonora, Mexico**

Abstract approved by:

---

**Dr. Eduardo Palacios Castro**  
Thesis codirector

---

**Dr. Osvel Mario Hinojosa Huerta**  
Thesis codirector

The Yuma Ridgway's Rail (*Rallus obsoletus yumanensis*) is a marsh bird endemic to the Lower Colorado River and its delta. It is an endangered and a conservation priority species, both in Mexico and the USA. Seventy five percent of its population is concentrated in the wetland of the Cienega de Santa Clara, in northwestern Sonora, Mexico. This wetland receives water from the Welton-Mohawk Irrigation and Drainage District in Yuma, Arizona, USA. Fluctuations in the Yuma Ridgway's Rail distribution and abundance are apparently associated with the dynamics of its habitat. The cover, distribution, and structure of emergent vegetation in the Cienega respond to changes in the hydrologic system, which in turn affect the distribution and abundance of wildlife species. I evaluated historical changes in the population trend of the Yuma Ridgway's Rail in the Cienega and their relationship with habitat elements and environmental factors. In the last two decades (1999 – 2022) its abundance has fluctuated, but its population has remained stable, with an average of 2.09 rails/point. Their population fluctuations are significantly associated with environmental and habitat factors, including percentage of emergent vegetation cover, water cover, greenness, and maximum and minimum temperatures. The results of this work can be used to help plan and implement restoration actions and conservation strategies in this and the other wetlands of the Colorado River Delta.

**Keywords: Marsh birds, Colorado River Delta, wetland conservation, Generalized Additive Mixed Model**

## **Dedicatoria**

Una dedicación especial a Leonardo, la estrella más hermosa y brillante en el cielo.

También dedico este trabajo a mi familia y amigos, en especial a mi madre Lidia Palma, mi padre Reynaldo Villagomez y a mi gran amigo de toda la vida David Molina quienes han sido motivo de inspiración para poder realizarlo.

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por brindarme el apoyo financiero durante el desarrollo de mi trabajo de investigación de maestría y culminación de mi tesis. También agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por todo el apoyo brindando y sus contribuciones en mi desarrollo profesional y personal durante este trabajo.

A todos los profesores e investigadores que contribuyeron al enriquecimiento de este trabajo, especialmente a mis codirectores de tesis Dr. Eduardo Palacios Castro y Dr. Osvel Mario Hinojosa-Huerta, y mis sinodales Dr. Horacio Jesús de La Cueva Salcedo y Dr. Alejandro Hinojosa Corona. También agradezco por sus aportaciones al Dr. Jorge Cortes Ramos y hago un especial reconocimiento al Dr. Tim Meehan por sus valiosas contribuciones y apoyo en el desarrollo de los análisis de esta tesis.

A todas las instituciones que me proporcionaron sus datos: Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), Servicio Meteorológico Nacional, y particularmente a Pronatura Noroeste quienes fueron parte fundamental para llevar a cabo esta investigación.

A todos mis colegas y amigos que me brindaron todo el apoyo durante este trabajo Miguel Vargas, Gustavo Danemann, Gabriela Caloca, Raquel Castro, Alejandra Calvo, Eduardo Soto, y al valioso equipo de campo José Juan Butron, Juan Butron, Juan Ángel Butron, Benito Brambila y Carlos Medina, sin ellos nada de esto sería posible.

A mi familia, amigos y a mi compañero de vida por siempre brindarme amor y apoyo incondicional.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas .....	xi
<b>Capítulo 1.      Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1    Antecedentes .....	3
1.2    Justificación .....	5
1.3    Hipótesis.....	6
1.3.1    Modelo ecológico conceptual .....	6
1.4    Objetivos .....	11
1.4.1    Objetivo general.....	11
1.4.2    Objetivos específicos.....	11
<b>Capítulo 2.      Metodología .....</b>	<b>12</b>
2.1    Área de Estudio .....	12
2.2    Métodos .....	13
2.2.1    Distribución y abundancia.....	13
2.2.2    Flujos de agua.....	14
2.2.3    Variables ambientales.....	15
2.2.4    Análisis del hábitat .....	16
2.2.5    Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) .....	17

2.2.6	Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) .....	18
2.2.7	Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR) .....	20
2.2.8	Procesamiento de Datos y Análisis Estadísticos.....	21
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>33</b>
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>38</b>
	<b>Literatura citada .....</b>	<b>41</b>
	<b>Anexo .....</b>	<b>47</b>

## Lista de figuras

Página

- Figura 1.** Modelo ecológico conceptual básico para *Rallus obsoletus yumanensis* tomado de Marty y Unnash (2015) y modificado para la población que habita en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México, con base en lo reportado por Hinojosa-Huerta *et al.* (2008) y Conway *et al.* (2010). El color azul indica los factores control, el verde los elementos del hábitat, el naranja los procesos biológicos, el amarillo el resultado en el ciclo de vida. Las flechas indican las relaciones entre los factores, elementos, procesos y el resultado dentro del ciclo de vida..... 10
- Figura 2.** Localización de las estaciones de conteo en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México. El mapa muestra las rutas con sus cinco estaciones de conteo en cada una donde se realiza el monitoreo de las aves de marisma ..... 12
- Figura 3.** Modelo GAMM de la abundancia relativa del palmoteador de Yuma 1999 a 2022. Los puntos grises indican las detecciones promedio por punto en cada una de las rutas y para cada año, la línea de tendencia en color rojo y error estándar en línea azul punteada ..... 26
- Figura 4.** Regresión lineal de la abundancia relativa palmoteador de Yuma 1999 a 2022. Los puntos negros indican las detecciones promedio por punto en cada una de las rutas para cada año, la línea de tendencia está representada en color azul. ( $y = a + 22.33 * x$ ;  $R^2 = 0.002$ ;  $p = 0.3371$ ). ..... 26
- Figura 5.** Mapa del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) para la Ciénega de Santa Clara, Sonora del periodo de estudio (2013 - 2021) ..... 27
- Figura 6.** Mapa del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora del periodo de estudio (2013 – 2021)..... 28
- Figura 7.** Mapa del análisis de severidad de los incendios del año 2017 al lado izquierdo y del año 2019 al lado derecho, utilizando el Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora ..... 29
- Figura 8.** Modelo ecológico con datos de 2013 a 2022. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las características ambientales y de hábitat, y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S=valor estimado de las funciones suavizadas..... 31
- Figura 9.** Modelo ecológico con datos de 2013 a 2019. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las características ambientales y de hábitat, y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S =valor estimado de las funciones suavizadas..... 31
- Figura 10.** Modelo de manejo con datos de 2013 a 2022. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las acciones de manejo indirecto (flujos de agua en temporada primavera, verano, otoño e invierno y los incendios) y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S =valor estimado de las funciones suavizadas..... 32
- Figura 11.** Modelo de manejo con datos de 2013 a 2019. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las acciones de manejo indirecto (flujos de agua

en temporada primavera, verano, otoño e invierno y los incendios) y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica los intervalos de confianza del 95%. S =valor estimado de las funciones suavizadas .....	32
<b>Figura 12.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y los diferentes estratos (agua, plantas rastreras, vegetación emergente, hierbas, arbustos, árboles y suelo desnudo) .....	47
<b>Figura 13.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y los diferentes estratos (agua, plantas rastreras, vegetación emergente, hierbas, arbustos, árboles y suelo desnudo) .....	47
<b>Figura 14.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y las diferentes especies de plantas emergentes ( <i>Cyperus odoratus</i> , <i>Juncus cooperi</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Scirpus americanus</i> , <i>Typha dominguensis</i> , planta no identificada) .....	48
<b>Figura 15.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y las diferentes especies de plantas emergentes ( <i>Cyperus odoratus</i> , <i>Juncus cooperi</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Scirpus americanus</i> , <i>Typha dominguensis</i> , planta no identificada) .....	48
<b>Figura 16.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y el año, NDVI, NDWI, agua, vegetación emergente e incendios .....	49
<b>Figura 17.</b> Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y el año, NDVI, NDWI, agua, vegetación emergente e incendios .....	49
<b>Figura 18.</b> Promedio mensual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022 .....	50
<b>Figura 19.</b> Gráfico de barras apiladas del promedio mensual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022 .....	50
<b>Figura 20.</b> Promedio anual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022 .....	51
<b>Figura 21.</b> Promedio estacional del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara e durante el periodo de 2013 a 2022 .....	51
<b>Figura 22.</b> Gráfico de barras apiladas del promedio mensual Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2021 .....	52
<b>Figura 23.</b> Valores promedio mensuales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021 .....	52
<b>Figura 24.</b> Valores promedio anuales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021 .....	53

<b>Figura 25.</b> Valores promedio estacionales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2021 .....	53
<b>Figura 26.</b> Valores promedio mensuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021 .....	54
<b>Figura 27.</b> Valores promedio anuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021 .....	54
<b>Figura 28.</b> Valores promedio anuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021 .....	55
<b>Figura 29.</b> Gráfico de barras apiladas del promedio mensual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	55
<b>Figura 30.</b> Promedio mensual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	56
<b>Figura 31.</b> Promedio anual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	56
<b>Figura 32.</b> Gráfico de barras apiladas del promedio mensual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	57
<b>Figura 33.</b> Promedio mensual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	57
<b>Figura 34.</b> Promedio anual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022 .....	58
<b>Figura 35.</b> Gráfico de cuantiles que compara los valores residuales del modelo ecológico con una distribución normal .....	58
<b>Figura 36.</b> Gráfico de la respuesta contra los valores ajustados del modelo ecológico .....	59
<b>Figura 37.</b> Histograma de residuos del modelo ecológico. Histograma de residuos del modelo ecológico .....	59
<b>Figura 38.</b> Gráfico de cuantiles que compara los valores residuales del modelo de manejo con una distribución norma .....	60
<b>Figura 39.</b> Gráfico de la respuesta contra los valores ajustados para el modelo de manejo .....	60
<b>Figura 40.</b> Histograma de residuos del modelo ecológico .....	61

## Lista de tablas

Página

**Tabla 1.** Lista de las imágenes de Landsat que fueron usadas para obtener los valores de NDVI en este estudio para la zona del humedal de la Ciénega de Santa Clara..... 18

**Tabla 2.** Lista de las imágenes de Landsat que fueron usadas para obtener los valores de NWVI en este estudio para la zona del humedal de la Ciénega de Santa Clara..... 19

## Capítulo 1. Introducción

---

Las aves de marisma son un grupo caracterizado por ser de carácter sigiloso y depender en gran medida de la vegetación emergente de las marismas de agua dulce, salobres y costeras, donde construyen sus nidos (Conway, 2002). En la región del delta del Río Colorado, la mayoría de las especies de aves de marisma se encontraban distribuidas en casi todos los humedales dominados por vegetación emergente (Eddleman, 1989; Eddleman y Conway, 2020). Sin embargo, la construcción de presas desde 1930 hasta mediados de 1960's, la redistribución del agua para distintas actividades humanas en la cuenca del río Colorado, así como el aumento de la zona agrícola han causado una reducción drástica en la cobertura de los humedales en la cuenca baja del río y en región del delta (Rosenberg *et al.* 1991, Zamora- Arroyo *et al.* 2005). A su vez esto ha causado un gran impacto en el hábitat de reproducción de este grupo de aves en esta región (Anderson y Ohmart, 1985; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2008), incluyendo al palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*; Dickey, 1923), la cual está considerada como especie en peligro de acuerdo con la legislación federal de Estados Unidos de América (Conway y Eddleman, 2000) y como especie prioritaria para su conservación por la Reserva del Alto Golfo y Delta del Río Colorado, en México (CONANP, 2009), además de ser endémica de la cuenca baja y delta del río Colorado. Como consecuencia de la pérdida de humedales, las poblaciones de esta subespecie han disminuido en todo su rango de distribución (Anderson, 1983).

Dentro del delta del río Colorado, la Ciénega de Santa Clara ha sido identificada como uno de los humedales más importantes para las aves de marisma en toda la cuenca del río Colorado y el noroeste de México, debido a que alberga a la población más grande del palmoteador de Yuma (6,000 individuos), así como poblaciones importantes de otras aves de marisma, como el Ralito Negro (*Laterallus jamaicensis coturniculus*; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2001; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2008). Esta ciénega se mantiene principalmente por el agua de retorno agrícola que recibe del distrito de riego de los valles de Welton y Mohawk en Yuma, Arizona a través del canal MODE (*Main Outlet Drain Extension* por sus siglas en inglés; Carrillo-Guerrero *et al.*, 2013). Sin embargo, esta fuente de agua no está asegurada permanentemente, y se sigue planeando su desalinización en Arizona para aprovechamiento humano en la cuenca (Pitt e Hinojosa-Huerta, 2022). Lo anterior genera la necesidad de una regulación de su dedicación para fines ambientales, ya que de lo contrario podría provocar la pérdida de miles de hectáreas de hábitat y en el peor de los escenarios, la desaparición de la Ciénega como hábitat para aves de marisma y la fauna silvestre en general (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013).

A pesar de las incertidumbres asociadas a las estimaciones del tamaño poblacional de las aves de marisma (Conway y Gibbs, 2005), incluyendo al palmoteador de Yuma, las fluctuaciones en su abundancia y cambios en la distribución y densidad de la especie están aparentemente asociadas con las dinámicas del hábitat, tales como la senescencia de la vegetación emergente, los incendios, los cambios en los patrones de flujo de agua y la disponibilidad de agua (Conway *et al.*, 2010; Eddleman y Conway, 2020). En la Ciénega, los incrementos de la población para esta subespecie se han asociado al crecimiento del tule que ocurre posterior a un incendio, mientras que las reducciones se han relacionado con la senescencia del tule y la desecación de áreas de marisma (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013). La cobertura, distribución y estructura de la vegetación emergente en la Ciénega responde a los cambios del sistema hidrológico (Lomeli-Banda *et al.*, 2021), lo cual a su vez afecta la distribución y la abundancia de las aves de marisma y de la demás vida silvestre.

Dichas dinámicas del hábitat y cambios del sistema hidrológico se relacionan con el manejo directo e indirecto que se ejerce sobre la Ciénega de Santa Clara. Como manejo directo se considera el dragado anual de los sedimentos que se acumulan en el canal MODE, lo que permite un flujo más dinámico del agua hacia la Ciénega y las acciones de remoción de vegetación emergente, por guías de ecoturismo del ejido Encinas Johnson, que es la localidad más cercana al sitio. La remoción de vegetación es la mínima necesaria para mantener la conectividad entre los canales dentro de la Ciénega (Carrillo-Guerrero *et al.*, 2013). Como manejo indirecto se consideran los incendios ocurridos, accidentales o intencionales, y las regulaciones de conservación que rigen sobre este humedal por encontrarse dentro de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo y Delta del Río Colorado. La Reserva cuenta con un Plan de Manejo (CONANP, 2009), donde se establecen los lineamientos de manejo y conservación. La mayor parte del área de la Ciénega está dentro de la zona núcleo del área natural protegida, de manera que en el sitio solo se permiten senderos interpretativos y actividades enfocadas a la conservación (control de especies introducidas, ecoturismo de bajo impacto, educación ambiental, investigación enfocada al manejo y conservación, monitoreo de vida silvestre, y restauración ecológica). Queda prohibido el cambio de uso de suelo, la ganadería y toda actividad extractiva sobre la vida silvestre (pesca, acuicultura, agricultura; CONANP, 2009).

La parte norte de la Ciénega forma parte de la zona de amortiguamiento donde se permite el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. En esta zona están permitidas actividades productivas de bajo impacto y llevadas a cabo por personas que habitan en las comunidades aledañas. Entre las actividades permitidas se enumeran la recreación (ej. senderismo, observación y fotografía de la naturaleza), actividades agrícolas, cinegéticas, forestales no maderables, acuícolas y agrícolas,

aprovechamiento del recurso pesquero, además de actividades de control de especies introducidas, investigación y monitoreo de vida silvestre, así como el establecimiento de letreros y sitios de campamento turístico. Están prohibidas aquellas actividades extractivas de minerales y/o especies de flora y fauna nativas, confinamiento de residuos contaminantes, y el uso de vehículos “todo terreno” (CONANP, 2009). Estas actividades sobre el uso de recursos naturales están reguladas y controladas por personal de la reserva.

La conservación y recuperación de las poblaciones del palmoteador de Yuma y otras aves de marisma, depende de la identificación de características críticas de su hábitat, que sean propicias para poder llevar a cabo una gestión y manejo eficaz, y que puedan cubrir las necesidades durante todo su ciclo de vida. El objetivo de este estudio es evaluar la tendencia poblacional del palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*) en la Ciénega de Santa Clara, y analizar si sus cambios en abundancia relativa están asociados con la hidrología y dinámica del ecosistema. La aplicación de este estudio será en las acciones y prácticas de restauración ecológica, así como en la toma de decisiones respecto a la asignación de agua para la conservación y viabilidad de los humedales del delta del río Colorado como hábitat para la fauna silvestre.

## 1.1 Antecedentes

En 1973 México y EE. UU sostuvieron negociaciones sobre el problema de salinidad que ocurría en el agua del río Colorado que llegaba a territorio mexicano. Tras esta discusión se firmó el Acta 242 del Tratado de Aguas entre ambos países para implementar soluciones colaborativas (CILA, 1973). Como resultado de la resolución se construyó un canal de concreto que abarca 80 km de largo para transportar aproximadamente 130 millones de m<sup>3</sup>/año de agua de retorno agrícola a través del canal conocido como *MODE Main Outlet Drain Extension*), hasta la planicie lodosa de la Ciénega en la zona intermareal del río Colorado (Glenn *et al.*, 1988; Zengel *et al.*, 1995). La actual Ciénega comenzó a formarse en 1977 a causa de esta descarga de agua inicialmente temporal y cuyo origen es el acuífero somero y salobre del distrito de riego Wellton-Mohawk, en Yuma, Arizona (Glenn *et al.*, 1992), recibiendo agua en una tasa aproximada entre 4–5 m<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup> y una salinidad de 2–3 g L<sup>-1</sup> (sólidos disueltos totales).

La disposición continua de agua a través del canal dio como resultado la formación, desarrollo y mantenimiento de este humedal (Zengel *et al.*, 1995), el cual en la actualidad abarca cerca de 18,000 ha, se encuentra dentro del área reconocido como Humedal de Importancia Internacional (Sitio Ramsar 814, 2008), es parte de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, es uno de los

sitios con mayor abundancia de aves playeras a nivel continental, y es un importante sitio de descanso, alimentación e invernación de aves acuáticas dentro de la ruta migratoria del Pacífico (CONANP, 2009; Gomez-Sapiens *et al.*, 2013).

El primer espécimen de *Rallus obsoletus yumanensis* fue encontrado en la cuenca baja del río Colorado, en Yuma Arizona, por Brown el 25 de agosto de 1902, sin embargo, fue identificado como *Rallus longirostris levipes*, por lo que no fue descrito en ese momento (Banks y Tomlinson, 1974). Mas adelante Huey y Canfield colectaron tres especímenes (1919 – 1920) en la Presa Laguna, la primera presa que se construyó en el río Colorado en el año de 1909, a lo cual Huey comentó que probablemente antes de 1924 las mayores abundancias se encontraban en el delta del río Colorado en Sonora y Baja California y consideró los encuentros al norte como esporádicos y como individuos desplazados por inundaciones en el delta del río Colorado (Banks y Tomlinson, 1974). En el año de 1923 Dickey hizo la primera descripción de *R. o. yumanensis* con base en características morfológicas y diferencias de color en el plumaje respecto a las otras tres subespecies conocidas en ese momento (Dickey, 1923). Apariciones al norte de la Presa Laguna ocurrieron posteriormente y más tarde en el año de 1966 se localizaron palmoteadores en Topock Marsh (a lo largo del río Colorado entre California y Arizona, cerca de Nevada), que es donde actualmente se encuentra la población más norteña, así como los primeros registros confirmados en del delta del río Colorado en México en 1970 (Todd, 1986). Hoy en día la población en la cuenca baja del río Colorado, en EE.U., está estimada en 1,500 individuos (Piest y Campoy, 1999).

En 1973 Tomlinson y Todd detallaron el área de reproducción de *R. o. yumanensis*. Anderson *et al.* (1985) llevaron a cabo un estudio estacional sobre el uso de hábitat por el palmoteador de Yuma en la cuenca baja del río Colorado y el noroeste de Sonora, México. Más adelante, Eddleman (1989) fue el primero que abordó el estatus de conservación, la ecología reproductiva y el manejo de hábitat relevante para el palmoteador de Yuma en el suroeste de Estados Unidos y noroeste de México. Posteriormente, Abarca *et al.* (1993) hicieron una estimación de las parejas reproductoras en la Ciénega de Santa Clara, y concluyeron que casi la mitad de la población reproductora dependía de este humedal. Piest y Campoy (1998) llevaron a cabo un programa piloto de monitoreo binacional (*unpubl. data* en Hinojosa-Huerta *et al.*, 2008).

Hinojosa-Huerta *et al.* (2001) e Hinojosa-Huerta *et al.* (2013) realizaron una estimación del tamaño poblacional en la región del delta del río Colorado, y encontraron que la Ciénega de Santa Clara fue el sitio de mayor importancia en la región para el ensamble de aves de marisma, tanto en términos de abundancia, como en número de especies reproductivas, incluyendo el palmoteador de Yuma. Este esfuerzo de monitoreo se ha implementado de manera continua desde 1998, con lo que se han podido

determinar cambios poblacionales en relación con la dinámica del hábitat en la Ciénega y otros humedales del delta del Río Colorado (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2008; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013).

Recientemente Harray y Conway (2020) realizaron un estudio sobre los movimientos post reproductivos de las poblaciones en EE. UU., encontrando que algunos individuos se desplazan distancias mayores a los 900 km (desde California hasta las costas de Sonora y norte de Sinaloa), y que dichos movimientos migratorios, involucran individuos provenientes de diferentes localidades.

## 1.2 Justificación

La tendencia poblacional del palmoteador de Yuma se ha asociado con el manejo de flujos de agua, acciones de mantenimiento a los canales que conducen el agua hacia los humedales donde habita esta especie (Eddleman *et al.*, 1988), así como también con la frecuencia y magnitud de los incendios naturales o provocados, y dinámicas relacionadas con el grado de senescencia de la vegetación emergente (Conway *et al.*, 2010; Eddleman y Conway, 2020). En el caso de la Ciénega de Santa Clara, la distribución y abundancia del palmoteador aparentemente han cambiado a lo largo de los años al interior del humedal y el grado de amenaza a la especie está relacionado con la pérdida de hábitat de anidación debido a presiones por actividades humanas que compiten por el aprovechamiento del agua, tales como la agricultura y el consumo urbano, además de incendios naturales o provocados.

Debido al estatus de riesgo de la especie, es importante determinar sus requerimientos de hábitat, identificar amenazas específicas a nivel local y los efectos de los factores antropogénicos y naturales en función de los cambios ambientales. Para fines de manejo adaptativo, resulta necesario actualizar y analizar las tendencias poblacionales del palmoteador de Yuma, con el fin de servir como una línea de investigación para la planeación de los esfuerzos de restauración y el diseño de estrategias de conservación en los humedales tanto dentro del delta del río Colorado, como a nivel binacional.

Si bien los sitios de reproducción o de mayor importancia en la región han sido identificados (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013), el uso de hábitat, sus requerimientos, los efectos de las acciones de manejo tales como los volúmenes de agua que recibe la Ciénega, los incendios, las acciones de dragado y los efectos que las condiciones ambientales (temperatura y precipitación) ejercen sobre la población han sido poco estudiados.

## 1.3 Hipótesis

Las fluctuaciones en la distribución y densidad del palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*), están asociadas positivamente con los flujos de agua que llegan a la Ciénega de Santa Clara, así como a la densidad, verdor de la vegetación emergente, los incendios ocasionales, y a las condiciones ambientales. Con base en esta hipótesis se enuncian las predicciones siguientes:

1. La composición, cobertura, densidad y verdor de la vegetación emergente influye de manera directa y positiva en la abundancia del palmoteador de Yuma
2. Hay una relación negativa entre la senescencia de la vegetación y la densidad del palmoteador de Yuma
3. Existe una relación positiva entre el flujo de agua hacia el humedal y la abundancia del palmoteador de Yuma
4. Los incendios periódicos tienen un efecto benéfico para la población del palmoteador de Yuma

### 1.3.1 Modelo ecológico conceptual

El modelo conceptual (Figura 1) fue tomado de Marty y Unnash (2015) y modificado para la población que habita en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México, con base en lo reportado por Hinojosa-Huerta *et al.* (2008) y Conway *et al.* (2010). El modelo abarca procesos biológicos, así como elementos del hábitat, y factores de control, con la finalidad de encontrar la relación causal que controla la distribución y abundancia de la especie, e identificar los efectos de factores estresantes específicos, en la Ciénega de Santa Clara.

**Los factores de control** se refieren a las condiciones dinámicas, incluyendo las acciones humanas, que determinan la abundancia y distribución espacial del Palmoteador, tales como:

#### *Flujos de agua*

Se refiere a los volúmenes de agua enviados a la Ciénega a través del canal MODE. Los flujos de agua determinan el área total de humedal, la profundidad y el área de espejo de agua, la salinidad, y en

consecuencia la disponibilidad de alimento, así como la composición, cobertura, densidad y distribución de la vegetación.

#### *Incendios*

Incendios que han ocurrido periódicamente en la Ciénega de Santa Clara. Estos incendios pueden restablecer la dinámica de sucesión ecológica de la Ciénega, lo que resulta en un reemplazamiento de vegetación madura, por crecimiento de una vegetación emergente de sucesión temprana. También se ha sugerido que abren marismas con vegetación emergente asfixiada por vegetación muerta y remueve la vegetación decadente, la cual puede reducir la eficiencia de forrajeo de las aves al obstaculizar su movimiento y reducir la disponibilidad de alimento (Conway *et al.*, 2010). Por otra parte, los incendios durante la temporada reproductiva podrían causar la destrucción de nidos y la mortandad de pollos, y los incendios muy intensos y de alta velocidad podrían causar mortandad directa de individuos adultos, especialmente en temporada de muda de plumas.

#### *Temperaturas máximas*

Temperaturas máximas registradas a lo largo del año. La temperatura máxima se relaciona con la supervivencia de pollos, jóvenes e individuos adultos en su primer año, reclutamiento de la población reproductora y disponibilidad de alimento, como crustáceos (langostinos y en menor medida camarones), insectos acuáticos y vertebrados pequeños (peces).

#### *Temperaturas mínimas*

Temperaturas mínimas registradas a lo largo del año. La temperatura mínima se relaciona con la supervivencia de pollos, jóvenes, adultos en su primer año, reclutamiento de la población reproductora y disponibilidad de alimento, como crustáceos (langostinos y en menor medida camarones), insectos acuáticos y vertebrados pequeños (peces).

#### *Metales pesados y agroquímicos*

Los metales pesados existen de manera natural en las capas del suelo en la cuenca. Sin embargo, las prácticas de riego en la agricultura y la evaporación incrementan las posibilidades de generar una acumulación excesiva de los mismos, especialmente en humedales que reciben agua de retorno agrícola en la parte terminal de la cuenca, lo que puede llegar a tener afectaciones sobre los palmoteadores (García-Hernández *et al.*, 2000). Tal es el caso de la bioacumulación de Selenio (Se), la cual puede causar efectos tóxicos, problemas metabólicos y puede llegar a afectar el éxito reproductivo de diversas especies (Rosengber *et al.*, 1991), ya que existe un alto riesgo de teratogenicidad (malformación y desarrollo fetal

adverso) (Rusk, 1991). Otro metal pesado de riesgo para la especie es el Mercurio (Hg) el cual se ha asociado con el desarrollo de anomalías en el desarrollo de las aves.

Los agroquímicos se utilizan en la agricultura para proteger los cultivos y maximizar su rendimiento. Entre ellos podemos encontrar a los herbicidas, insecticidas, acaricidas, fungicidas, fertilizantes y plaguicidas. Entre los efectos potenciales se encuentra la contaminación de la escorrentía llegando a ser tóxicos para las presas que consumen los palmoteadores y por tanto generar una reducción en la disponibilidad de alimento. En ecosistemas como la Ciénega de Santa Clara, que principalmente es alimentado con aguas de retorno agrícola, y sus aguas son llevadas a través de un canal, existe una mayor probabilidad de que se acumulen sedimentos y, por ende, una mayor concentración de contaminantes en la zona de marismas (García-Hernández *et al.*, 2001).

**Los elementos del hábitat** consisten en las condiciones específicas del hábitat que pueden afectar significativamente ya sea en beneficio o perjuicio en las actividades y procesos biológicos de los palmoteadores, tales como:

#### *Ecohidrología*

El concepto de hidrología relaciona la hidrología con la ecología y busca entender la regulación entre el proceso hidrológico y el proceso ecológico (Zalewski *et al.*, 1997). Dentro de este mapa conceptual refiere a cualquier evento o situación que tenga un efecto sobre la hidrología local y la distribución de los flujos de agua en el humedal tales como: fluctuaciones del nivel del agua y la geomorfología, tanto procesos antrópicos (dragados) y geológicos (subsistencia), como geomorfológicos (sedimentación, erosión). La ecohidrología tiene influencia sobre la sucesión de vegetación emergente, disponibilidad de alimento, reclutamiento, productividad y supervivencia de los individuos. Además, define la salinidad en el suelo, y la tasa de acumulación de sedimento y vegetación muerta, lo cual puede obstaculizar el movimiento de las aves y puede reducir la productividad de la marisma, haciendo que los nutrientes no estén disponibles. Este elemento también ayuda en la dispersión de semillas.

#### *Vegetación emergente*

Definida como plantas semiacuáticas que crecen en tierras húmedas blandas, e incluyen tules y juncos. Se ha encontrado que la densidad y abundancia del palmoteador de Yuma están relacionadas con la cobertura y composición de las plantas de vegetación emergente (Eddleman y Conway, 2020). La presencia de vegetación brinda espacios de alimentación, refugio y descanso.

### *Verdor*

Se refiere al verdor de la vegetación, normalmente medido a través del Índice de Diferencia Normalizada ya que es usado como métrica para detectar los cambios en la cobertura vegetal y su estado general de salud (Jarchow *et al.*, 2016), en este caso de la vegetación emergente dentro de la Ciénega. El verdor puede tener influencia sobre la abundancia, distribución y densidad del palmoteador de Yuma, bajo el supuesto de que brinda un hábitat preferente para su reproducción.

### *Disponibilidad de alimento*

Se refiere a la composición, abundancia, densidad y distribución espacial de las presas que consume el palmoteador de Yuma durante cada etapa de su ciclo biológico (Marty y Unnash, 2015). La abundancia de sus presas y su condición tienen efecto en el desarrollo de los pollos e individuos jóvenes, así como en salud de los individuos adultos.

### ***Procesos biológicos***

#### *Temporada reproductiva – ciclo de vida*

Inicia con el establecimiento de los territorios reproductivos en febrero (Eddleman, 1989). Tanto hembras como machos defienden el territorio y la anidación ocurre por lo general de marzo hasta agosto (USFWS 2010), teniendo por lo general la eclosión de los huevos en el mes de junio.

#### *Reclutamiento*

Adición de un individuo a la población, esto va a depender del éxito reproductivo del palmoteador y a la sobrevivencia de sus individuos jóvenes hasta alcanzar la madurez sexual.

#### *Emigración e Inmigración*

Inmigración refiere a la llegada de los nuevos individuos, a menudo, a un área previamente desocupada. Emigración refiere a los movimientos de individuos hacia afuera de un área (Newton, 2008)

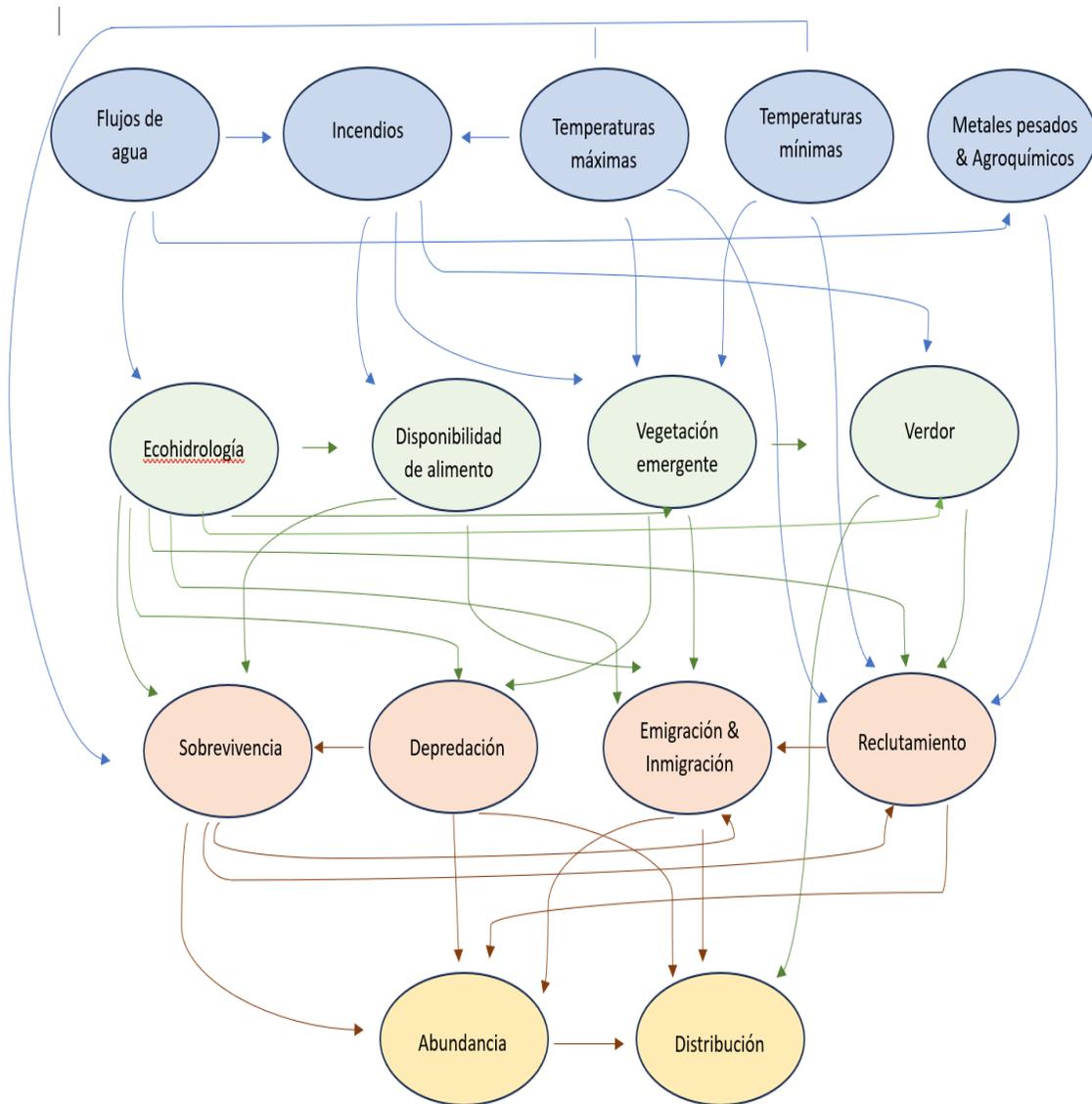
#### *Supervivencia*

Proporción de individuos nacidos durante el mismo periodo que sobreviven hasta una edad determinada (CornellLab, 2016).

#### *Depredación*

La depredación es el consumo de todo o parte de un organismo vivo por otro (Morin, 2011). Se ha considerado una importante fuente de mortalidad para los rálidos (Foin *et al.*, 1997), siendo mayor a

finales del verano y principios del otoño, cuando los coyotes (*Canis latrans*) y los mapaches (*Procyon loton*) se desplazan dentro de la marisma, y a mediados del invierno, cuando los depredadores aviares tienen una mayor densidad (Eddleman, 1989). Actualmente existe poca información acerca de la depredación de nidos, sin embargo, ha sido señalada como un factor importante en el éxito reproductivo (Foerster *et al.* 1990).



**Figura 1.** Modelo ecológico conceptual básico para *Rallus obsoletus yumanensis* tomado de Marty y Unnash (2015) y modificado para la población que habita en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México, con base en lo reportado por Hinojosa-Huerta *et al.* (2008) y Conway *et al.* (2010). El color azul indica los factores control, el verde los elementos del hábitat, el naranja los procesos biológicos, el amarillo el resultado en el ciclo de vida. Las flechas indican las relaciones entre los factores, elementos, procesos y el resultado dentro del ciclo de vida.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

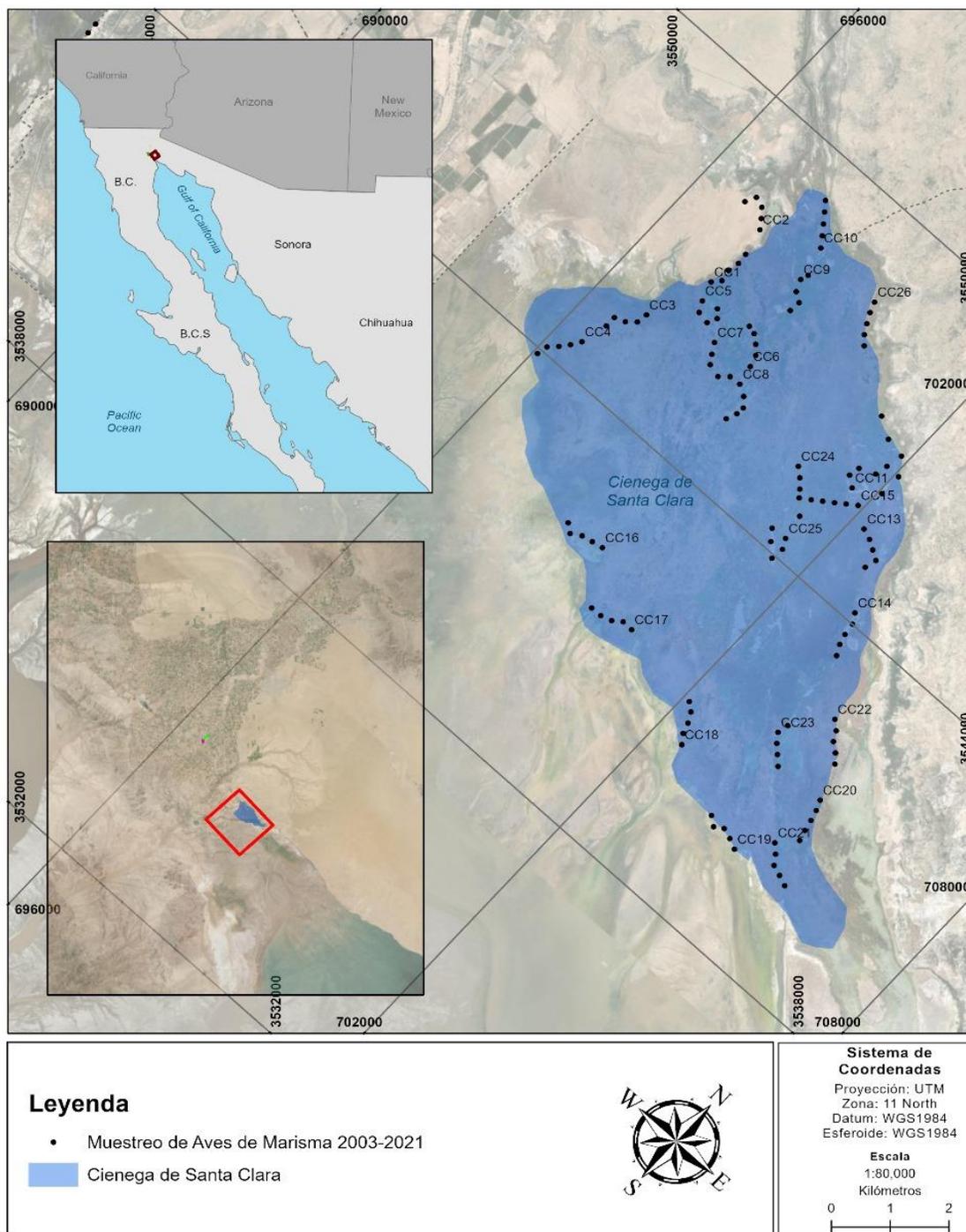
Evaluar la tendencia poblacional y la influencia del manejo del hábitat sobre la población del Palmoteador de Yuma en la Ciénega de Santa Clara, para guiar las acciones de restauración y las decisiones sobre política binacional para la asignación de caudales ambientales y la conservación de humedales en la región

### 1.4.2 Objetivos específicos

- a) Analizar la tendencia de la abundancia relativa del palmoteador de Yuma en los últimos 23 años en la Ciénega de Santa Clara, para entender como la población cambia a lo largo del tiempo y como interactúa con su entorno.
- b) Evaluar la asociación entre los elementos del hábitat y los factores control con la abundancia relativa de la población del palmoteador de Yuma para ayudar a comprender mejor su dinámica poblacional en los humedales en delta del río Colorado.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Área de Estudio



**Figura 2.** Localización de las estaciones de conteo en la Ciénega de Santa Clara, Sonora, México. El mapa muestra las rutas con sus cinco estaciones de conteo en cada una donde se realiza el monitoreo de las aves de marisma

El área de estudio es la Ciénega de Santa Clara, un humedal costero localizado en la porción sureste del delta del río Colorado, en el noroeste del estado de Sonora, México (Figura 2). La profundidad de sus aguas varía de 15 a 30 cm en las zonas más someras localizadas en sus bordes, hasta la zona más profunda que va de 70 a 110 cm al interior de la Ciénega.

La parte sureste está compuesta por planicies lodosas inundables, reciben la influencia de las mareas del Alto Golfo de California. En las zonas inundadas la vegetación dominante está compuesta de especies de vegetación emergente, tales como tule (*Typha domingensis*), junco (*Scirpus spp.*) y carrizo (*Phragmites australis*), mientras que en las zonas de las planicies lodosas la vegetación es escasa, pero se puede encontrar vegetación halófila, incluyendo pasto salado (*Distichlis spicata*) y pino salado (*Tamarix ramossisima*) (Zengel *et al.*, 1995).

De su superficie total de 18,000 ha, el 36% es hábitat de marisma (Carillo – Guerrero *et al.*, 2013) y el resto pertenece a lagunas de aguas abiertas y planicies lodosas. La Ciénega es reconocida como un ecosistema de suma importancia para la avifauna a nivel regional, siendo uno de los sitios en lo que se ha detectado una mayor riqueza y abundancia de aves acuáticas y aves playeras (Hinojosa-Huerta y Valdés-Casillas, 2004). Este humedal pertenece al sitio Ramsar 814 “Humedales del Delta del Río Colorado” (2008), está dentro del Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA 106, 1999) y forma parte de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo y Delta del Río Colorado.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Distribución y abundancia

Para el monitoreo de las aves de marisma y su hábitat se siguió el Protocolo Estandarizado para el Monitoreo de Aves de Marisma en América del Norte (Conway, 2002; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013) el cual consiste en un protocolo de llamado-respuesta. Con esta información se determinó la abundancia (número total de aves dentro del área de interés definida) del palmoteador de Yuma

Las estaciones de conteo son parcelas circulares con un radio de 100 m y una distancia mínima entre estaciones de 200 m (Fig. 2). Estas estaciones están agrupadas en rutas, con cinco estaciones cada una. La selección de las rutas dentro de la Ciénega fue de forma aleatoria, y fueron establecidas previamente por

Hinojosa-Huerta *et al.* (2008). Todas las rutas se encontraron ubicadas ya sea al borde entre la marisma y las tierras altas o al borde entre la marisma y las aguas abiertas.

El protocolo de llamado-respuesta se emplea en cada estación, consiste en un periodo de silencio de cinco minutos, mismo que es seguido de la reproducción de vocalizaciones pregrabadas de las seis especies focales de aves de marisma en el delta del río Colorado en el siguiente orden: ralito negro de California (*Laterallus jamaicensis cotuniculus*), garcita de tular (*Ixobrychus exilis*), sora (*Porzana carolina*), rascón de Virginia (*Rallus limicola*), palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*) y avetoro norteño (*Botarus lentiginosus*). El llamado de cada especie se reproduce durante un periodo de 30 segundos, seguido de otro periodo de silencio de 30 segundos. Las llamadas fueron ordenadas por la dominancia de las especies para aumentar la respuesta de especies subdominantes al principio del repertorio (Conway, 2002).

Se realizaron dos visitas durante la temporada reproductiva, el momento más propicio para monitoreos de tipo sonoro. La primera visita se realizó al inicio de la temporada reproductiva (marzo 15 – abril 15) y la segunda al final de la temporada (mayo 15 - junio 15). Las visitas comenzaron al amanecer y no se extendieron más allá de las 10:30 horas. Los monitoreos se llevaron a cabo con ayuda de canoa o kayak en el interior del humedal y a pie a lo largo de las orillas en aquellas estaciones ubicadas cerca de los bordes de la marisma. La información registrada en cada estación incluye las coordenadas geográficas obtenidas mediante un sistema global de geoposicionamiento (GPS), número de detecciones de las especies de aves de marisma, periodo del día (mañana o tarde), fecha, características del hábitat (composición de la vegetación, porcentaje de cobertura, presencia de agua superficial y profundidad del agua).

### 2.2.2 Flujos de agua

Los flujos de agua del canal Wellton-Mohawk fueron determinados a partir de la estación de medición en el límite internacional de la zona norte, mismos que fueron colectados y proporcionados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), basados en aforo y registro continuo. Estos son medidos por un limnógrafo y medidor Parshall, localizado a 24 metros aguas arriba de la línea divisoria internacional sur, a 168 metros al este del río Colorado y a 2.9 km al oeste de San Luis, Arizona. Los datos tuvieron una periodicidad por hora, cubriendo el periodo de estudio que abarca de 2013 a 2022. Primeramente, se realizó una exploración de todos los datos para buscar valores atípicos, en cada valor atípico que se encontró se hizo la corroboración y/o corrección correspondiente. Posteriormente usando el programa

Rstudio (R Core Team, 2023) y la paquetería Tidyverse (versión 1.3.1; Wickham *et al.*, 2019) se calcularon los volúmenes totales y los promedios de los volúmenes de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) con una frecuencia diaria, mensual, anual y por temporada. Empleando la paquetería de ggplot (versión 3.4.2; Wickham, 2016), se graficaron los datos para observar su tendencia y la distribución de estos (Anexo I).

A excepción del año 2019 la entrega de estos flujos se realizó diariamente de manera regular a lo largo de toda la década de estudio, teniendo un promedio diario de  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , tomando esto en cuenta se emplearon los promedios de agua enviados a la Ciénega estacionalmente para los análisis. La llegada de los flujos es importante para recargar el humedal de la Ciénega de Santa Clara y generar el dinamismo necesario para mantener este humedal. Las condiciones de agua en las que se encuentra el humedal durante el otoño y el invierno pueden tener un efecto en el éxito reproductivo, supervivencia y reclutamiento de los individuos en la temporada reproductiva del siguiente año. Tomando esto en cuenta, el acomodo de las bases de datos se organizó para que este efecto se reflejara en los resultados del modelo, por lo que los datos fueron ordenados de tal manera que los datos de las temporadas de otoño e invierno de un año anterior coincidieran con en los datos de las detecciones del año en cuestión.

### 2.2.3 Variables ambientales

Los datos ambientales fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, obtenidas de la estación automatizada ubicada en San Luis Río Colorado, Sonora. Los datos incluyeron dirección del viento, dirección de la ráfaga, humedad relativa, radiación solar, presión barométrica, temperatura y precipitación. Los datos se colectaron a través de la estación automatizada del municipio de San Luis Río Colorado, Sonora, ubicada a  $\sim 42$  km de la Ciénega de Santa Clara, con una periodicidad de cada 10 minutos, para fines de este estudio se tomaron en cuenta los datos del año 2013 hasta el año 2022 y solo las variables ambientales de temperatura y precipitación.

Se realizó una verificación de los datos y se buscaron valores atípicos. En cada valor atípico que se encontró se hizo la corroboración y/o corrección correspondiente. Una vez concluido el proceso de verificación de los datos se utilizó el programa Rstudio (R Core Team, 2023) y la paquetería Tidyverse (versión 1.3.1; Wickham *et al.*, 2019) para realizar la conversión del dato de la toma de muestras a un formato de fecha. Posteriormente se le extrajo la hora, día y mes por separado y se agruparon los datos para obtener los datos promedio de las temperaturas mínimas y máximas, así como la suma de la precipitación con una frecuencia diaria, mensual, anual y por temporada. De la serie de datos original se extrajeron de las

temperaturas mínimas y máximas registradas mensual, anual y por temporada (Anexo I). Una vez calculados los parámetros, se hizo una revisión de todos los datos. Posteriormente, se graficaron con la ayuda de la paquetería ggplot (versión 3.4.2, Wickham, 2016) para observar las tendencias y distribución de los datos. Para no perder variabilidad en los datos al momento de calcular el promedio (abstrayendo mucha información), se determinó que era mejor utilizar los datos del mes más caluroso y los datos del mes más frío del año (junio y diciembre respectivamente).

De acuerdo con Seneviratne *et al.* (2021) un evento es generalmente considerado extremo si el valor de la variable excede o está por debajo de un umbral generalmente definido por la distribución estadística de los datos. En este caso los umbrales de las temperaturas frías y cálidas para la zona de la Ciénega de Santa Clara fueron calculados sobre la base del mínimo y máximo diario observado y definidos por los percentiles 90 y 10.

Los percentiles son medidas estadísticas que dividen un conjunto de datos previamente ordenado de menor a mayor en 100 partes iguales. De manera que un percentil en este caso 90 y 10 indican el valor por debajo del cual se encuentra un conjunto de datos. Para calcular los percentiles se utilizó la función *quantile* (versión 4.3.1) en Rstudio (R Core Team, 2023). Con base en los análisis exploratorios de las variables ambientales se decidió utilizar los datos ambientales de las temperaturas mínimas y máximas del mes más caluroso (junio) y del mes más frío (diciembre) abarcando de esta manera gran parte de los eventos climatológicos extremos registrados en la región, y que son los que potencialmente podrían tener un mayor efecto en la población del palmoteador de Yuma. De esta manera se conserva la variabilidad de los datos, ya que, de lo contrario al usar promedio de las temperaturas, ya sea de manera estacional o anual, se perdería.

#### 2.2.4 Análisis del hábitat

Con el fin de correlacionar cambios en las poblaciones de aves con los cambios en la disponibilidad de hábitat, a través del tiempo, se cuantificó la proporción de los principales tipos de vegetación en cada estación de conteo de aves. Los datos de vegetación se registraron a nivel de especie, debido a que algunas aves de marisma usan preferentemente sólo una especie de vegetación emergente (Conway, 2002).

En cada estación de muestreo se estimó el porcentaje de cobertura para cada estrato presente (arbóreo, arbustivo, herbáceo, plantas rastreras, vegetación emergente, agua superficial y suelo desnudo) de

acuerdo con su presencia y cobertura dentro de cada estación de muestreo, de manera que la suma total de la cobertura fuera de 100%. Cuando fue posible se hizo la identificación de plantas a nivel de especie, se anotó el nombre de cada planta y su porcentaje de cobertura dentro de la estación de muestreo, teniendo como resultado un 100% en la composición de especies dentro de cada unidad de muestreo. En cada estación de conteo donde se registró presencia de agua superficial, se registró su profundidad empleando una cinta métrica.

### 2.2.5 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

Para evaluar el verdor en la Ciénega de Santa Clara se utilizó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), para cada mes, y año en la zona de interés mediante el programa computacional *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017). La zona de interés se delimito cubriendo la zona de inundación de la Ciénega, a partir del cual se creó el análisis general de los patrones anuales mediante código Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/d05dee39f64a692d4ad0649a81f4c4df>). El NDVI utilizado corresponde al producto Landsat-8 Collection 1 Tier 1 (32-Day NDVI Composite) disponible, al momento de la redacción del presente documento, dentro del catálogo de Google para el periodo 2013 – 2022 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LC08\\_C01\\_T1\\_32DAY\\_NDVI](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_32DAY_NDVI)).

Para los análisis, se extrajo el valor más alto del índice NDVI (pico de verdor) registrado para cada año y para cada estación de conteo de aves a lo largo del periodo 2013-2021 (Tabla 1). Cabe resaltar que el catálogo de Google no contiene valores del producto de Landsat 8, 32-Day NDVI Composite, para el año 2022. El código generado para este propósito se puede consultar en el siguiente enlace: <https://code.earthengine.google.com/4294a1333bbcbcbf2a4eaf4fcc5d48b3>.

Se consideró que el que el pico de verdor de un año determinado tendrá un efecto en la supervivencia y reclutamiento del próximo año, en este caso los datos del pico de verdor de verano que fueron considerados para los análisis se acomodaron alineados con la abundancia relativa de palmoteadores del año siguiente, para que este efecto se viera reflejado en el modelo.

**Tabla 1.** Lista de las imágenes de Landsat utilizadas para obtener los valores de NDVI en este estudio para la zona del humedal de la Ciénega de Santa Clara

Fecha	Landsat
16/julio/2013	Landsat-8
13/agosto/2014	Landsat-8
12/julio/2015	Landsat-8
11/julio/2016	Landsat-8
13/agosto/2017	Landsat-8
13/agosto/2018	Landsat-8
13/agosto/2019	Landsat-8
09/junio/2020	Landsat-8
10/junio/2021	Landsat-8

A través del NDVI se midió la densidad de la vegetación verde empleando la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

en donde:

NIR = Valores de luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano

RED = Valores de luz reflejada en el rango rojo del espectro

Esta fórmula está basada en el cálculo entre la diferencia del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED), en donde la vegetación se refleja fuertemente con la banda NIR la vegetación tiene una menor reflectancia en la banda roja. Los valores del NDVI tiene un rango que va de +1 hasta -1, en donde los valores más altos denotan una vegetación más densa y frondosa (Figura 3). Una vez obtenidos los valores para cada uno de los meses, se determinó el pico de verdor (los valores más altos de verdor en un año determinado), todos los cuales fueron registrados durante el verano.

### 2.2.6 Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI)

Para evaluar el agua superficial en la Ciénega de Santa Clara se utilizó el Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) para cada mes, y año en la zona de interés mediante el programa computacional *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017). La zona de interés se delimito cubriendo la zona de inundación

de la Ciénega, a partir del cual se creó el análisis general de los patrones anuales mediante código Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/1ddde71f53ef8002beff3ac824472147>).

El NDWI utilizado corresponde al producto Landsat-8 Collection 1 Tier 1 (32-Day NDWI Composite) disponible, al momento de la redacción del presente documento, dentro del catálogo de Google para el periodo 2013 – 2022 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LC08\\_C01\\_T1\\_32DAY\\_NDWI](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_32DAY_NDWI)).

Para los análisis, se extrajo el valor más alto del índice NDWI registrado para cada año y para cada estación de conteo de aves a lo largo del periodo 2013-2021 (Tabla 2). Cabe resaltar que el catálogo de Google no contiene valores del producto de Landsat 8, 32-Day NDWI Composite, para el año 2022. El código generado para este propósito se puede consultar en el siguiente enlace: (<https://code.earthengine.google.com/4294a1333bbcbcbf2a4eaf4fcc5d48b3>).

**Tabla 2.** Lista de las imágenes de Landsat que fueron usadas para obtener los valores de NDWI en este estudio para la zona del humedal de la Ciénega de Santa Clara

Fecha	Landsat
21/noviembre/2013	Landsat-8
13/agosto/2014	Landsat-8
13/agosto/2015	Landsat-8
11/julio/2016	Landsat-8
13/agosto/2017	Landsat-8
16/octubre/2018	Landsat-8
13/agosto/2019	Landsat-8
01/enero/2020	Landsat-8
19/diciembre/2021	Landsat-8

A través del NDWI se midieron los cambios en el agua haciendo uso de las bandas espectrales NIR y verde y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$$

en donde:

Green = Valores de luz reflejada en el rango verde del espectro

NIR = Valores de luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano

Las longitudes de onda verdes visibles maximizan la reflectancia típica de la superficie del agua. Las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las características del suelo, al tiempo que minimizan la baja reflectancia de las características del agua.

Los valores del NDWI tiene un rango que va de +1 hasta -1, siendo los valores positivos para las características del agua, es decir mayor presencia de agua, y negativos (o cero) para el suelo y la vegetación terrestre (Figura 5).

### 2.2.7 Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR)

Para analizar la severidad de los incendios y el umbral del área quemada (Figura 4), se identificaron los periodos de tiempo antes y después de los incendios ocurridos en la Ciénega a través del *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>). Se trabajó con dos momentos temporales (antes y después del incendio) con la finalidad de evaluar la severidad de éste. Este índice trabaja con bandas del infrarrojo cercano (banda 5) y el infrarrojo de onda corta (banda 7). Cuando la vegetación sana es afectada por un incendio, la energía deja de ser reflejada y descienden bruscamente en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) ascendiendo de manera elevada en el infrarrojo de onda corta (SWIR), la cual es calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

en donde:

NIR = Valores de píxel de la banda infrarroja cercana

SWIR = Valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta

Para su interpretación se tomó como referencia los grupos de valores clave proporcionados por el *United States Geological Survey* (USGS; Figura 4).

NBR -0.500 a -0.251: Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego.

NBR -0.250 a -0.101: Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego.

NBR -0.100 a +0.99: Zonas estables o sin quemar.

NBR +0.100 a +0.269: Zonas quemadas con gravedad baja.

NBR +0.270 a +0.439: Zonas quemadas con gravedad moderada-baja.

NBR +0.440 a +0.659: Zonas quemadas con gravedad moderada-alta.

NBR +0.660 a +1.300: Zonas quemadas con gravedad alta.

Una vez que se obtuvo el mapa con el área quemada calculada, se exportó y se ingresó en ArcGIS, en donde se creó un mapa del área quemada mediante firmas espectrales, posteriormente se realizó una clasificación supervisada, obteniendo de esta manera los valores para cada una de las estaciones.

## 2.2.8 Procesamiento de Datos y Análisis Estadísticos

### *Exploración de datos*

Previo a la construcción de los Modelos Mixtos Aditivos Generalizados (GAMMs) se llevó a cabo una exploración de los datos a través de matrices de diagramas de dispersión para investigar las posibles correlaciones entre la variable de respuesta (abundancia relativa de los palmoteadores de Yuma), y las variables explicativas relacionadas con (1) características del hábitat (porcentaje de cobertura de cada estrato: vegetación emergente, agua, árboles, arbustos, estratos de suelo desnudo; porcentaje individual de especies de plantas, verdor y cambios en el cuerpo de agua); (2) factores ambientales (temperaturas máximas, mínimas y precipitación); y (3) acciones de manejo (flujos de agua enviados a la Ciénega e incendios ocasionales), durante los 12 meses del año y abarcando el periodo de 2013 a 2022 (Anexo I).

De igual manera se realizó una exploración independiente por cada variable, en donde se construyeron gráficos para ver la distribución de sus datos e identificar patrones de haber alguno (Anexo I).

### *Modelos Mixtos Aditivos Generalizados (GAMMs)*

Los GAMMs son modelos de regresión no paramétricos que no están restringidos por relaciones lineales y presentan una extensión flexible de modelos lineales generalizados que permiten a funciones arbitrarias

modelar la influencia de cada covariable. El predictor lineal se compone en parte de una suma de funciones suaves de algunas o todas las covariables (Wood, 2008), y cada función se multiplica por un coeficiente, cada uno de los cuales es un parámetro en el modelo. Los suavizados pueden hacer una variedad de formas para modelar las relaciones que siguen. El modelo se expresa como:

$$Y = \beta_0 + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_n(X_n) + \epsilon,$$

donde Y es la variable respuesta,  $X_i$  son variables predictivas,  $\beta_0$  es el intercepto y  $f_i()$  son las funciones suaves representando las relaciones no lineales.

Además del parámetro de suavizado, el otro factor que afecta a la ondulación de una función GAMM es el número de funciones base que componen una función de suavizado. Para establecer el número de funciones base en un suavizado, usamos el argumento k en la función *smooth* en una fórmula GAMM.

Para observar la tendencia poblacional de los palmoteadores de Yuma se construyó un modelo GAMM utilizando la abundancia relativa de los palmoteadores detectados por punto y tomando en cuenta los datos de las temporadas de reproducción temprana y tardía para el periodo de 1999 a 2022 como variable dependiente y como variable independiente los años y se incluyeron como efecto aleatorio los transectos. Este modelo GAMM representa los efectos relativos de los predictores, donde el efecto medio se establece en cero. La variabilidad poblacional fue caracterizada utilizando el coeficiente de variación de la abundancia relativa en cada uno de esos años. También se calculó el coeficiente de variación (CV) para evaluar la dispersión en las abundancias del palmoteador, ya que nos proporciona información sobre la variabilidad de los datos en relación con su media. El coeficiente de variabilidad fue calculado de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de Variación} = (\text{Desviación estándar}/\text{Media}) * 100$$

Se construyó un GAMM, al cual le llamamos modelo ecológico, tomando en cuenta las características del hábitat preseleccionadas a partir de los análisis exploratorios tales como: cobertura de vegetación emergente, composición de plantas de vegetación emergente, densidad del verdor (NDVI), cambios en el cuerpo de agua (NDWI) así como con factores ambientales (temperaturas mínimas y máximas) y un GAMM, al cual le llamamos modelo de manejo, donde se incluyeron las acciones de manejo (flujos de agua enviados a la Ciénega e incendios ocasionales), ambos en función a la variable de respuesta (abundancia relativa de los palmoteadores de Yuma). De acuerdo en la distribución observada de los datos, en ambos

modelos se asumió que los conteos de palmoteadores seguían una distribución binomial negativa. Para la construcción de este modelo, se excluyeron los datos de NDWI para 2022 y de 2013 para NDVI ya que no se contó con datos los datos.

Con la construcción de dos tipos de GAMMs para ver las relaciones entre variables se evitó un sobreajuste, también conocido como colinealidad, ya que cuando dos variables en un modelo están fuertemente correlacionadas, es difícil ajustar el modelo, porque la variable de resultado podría estar respondiendo a cualquiera de ellas, y el modelo no proveería información única o independiente, el resultado podría resultar en un modelo pobre con intervalos de confianza muy grandes.

Los GAMMs fueron estimados utilizando el paquete mgcv (versión 1.9; Wood, 2017) para el software de computación estadística Rstudio (versión 4.3.1; R Core team, 2023). El modelo ecológico incluyó los efectos aleatorios para los puntos de conteo, transecto y visitas para tener en cuenta las correlaciones entre estas agrupaciones, y los términos suavizados para explorar la relación entre los conteos de palmoteadores y las covariables. El año fue eliminado como efecto aleatorio en el modelo ecológico debido a que su efecto era muy grande enmascarando el efecto de las otras variables ambientales y factores de habitat sobre la abundancia relativa de los palmoteadores.

En el modelo de manejo se incluyeron efectos aleatorios para los puntos de conteo, transecto, visitas y año. Las covariables predictivas empleadas al final en el modelo ecológico y de manejo se seleccionaron de acuerdo con Wood (2001). Las covariables se eliminaron de los modelos si se cumplían los dos criterios siguientes: (i) el intervalo de confianza fue cero en todas partes; y (ii) la puntuación del Criterio de Información de Akaike (AIC) disminuyó cuando se eliminó el término. Los modelos seleccionados fueron aquellos con las puntuaciones AIC más bajas, debido a que los valores más bajos de AIC sugieren un modelo de mejor predicción (Akaike, 1974).

En los modelos ecológico y de manejo se buscó que no ocurriera concurvidad, es decir, que la respuesta, en este caso la curva, no sea resultado de la interacción con otra variable, si no de la variable respuesta. Cuando esto ocurre obtenemos suavizados con intervalos de confianza con formas muy raras y exorbitantes. La concurvidad fue revisada empleando la función *concurvity* dentro de la misma paquetería, la cual informa de tres formas diferentes: peor caso, caso estimado y caso observado. Se observaron los tres casos y en caso de obtener un valor alto en el peor escenario ( $<0.7$ ) se inspeccionó el modelo nuevamente.

De igual manera, se usó la función *gam.check*, para ver si los modelos convergieron, ya que si no ha ocurrido, es probable que los resultados no sean correctos. Esto puede suceder cuando hay demasiados parámetros en el modelo para que no haya suficientes datos y es por ello que en ambos modelos se utilizó una  $k=3$ , para evitar obtener modelos con más parámetros que datos (Anexo I).

Para el modelo ecológico y de manejo se calcularon las puntuaciones de desviación explicada,  $r^2$  ajustada y valores AIC y se graficaron las formas funcionales para las covariables seleccionadas (Figuras 7 y 8). Los resultados fueron visualizados para comprobar los modelos empleando la paquetería *mgcv* (versión 1.9-0; Wood, 2017). Los gráficos generados por la función *plot()* de *mgcv* son gráficos de efectos parciales. Es decir, muestran el efecto componente de cada uno de los términos suavizados o lineales del modelo, que se suman a la predicción global.

## Capítulo 3. Resultados

---

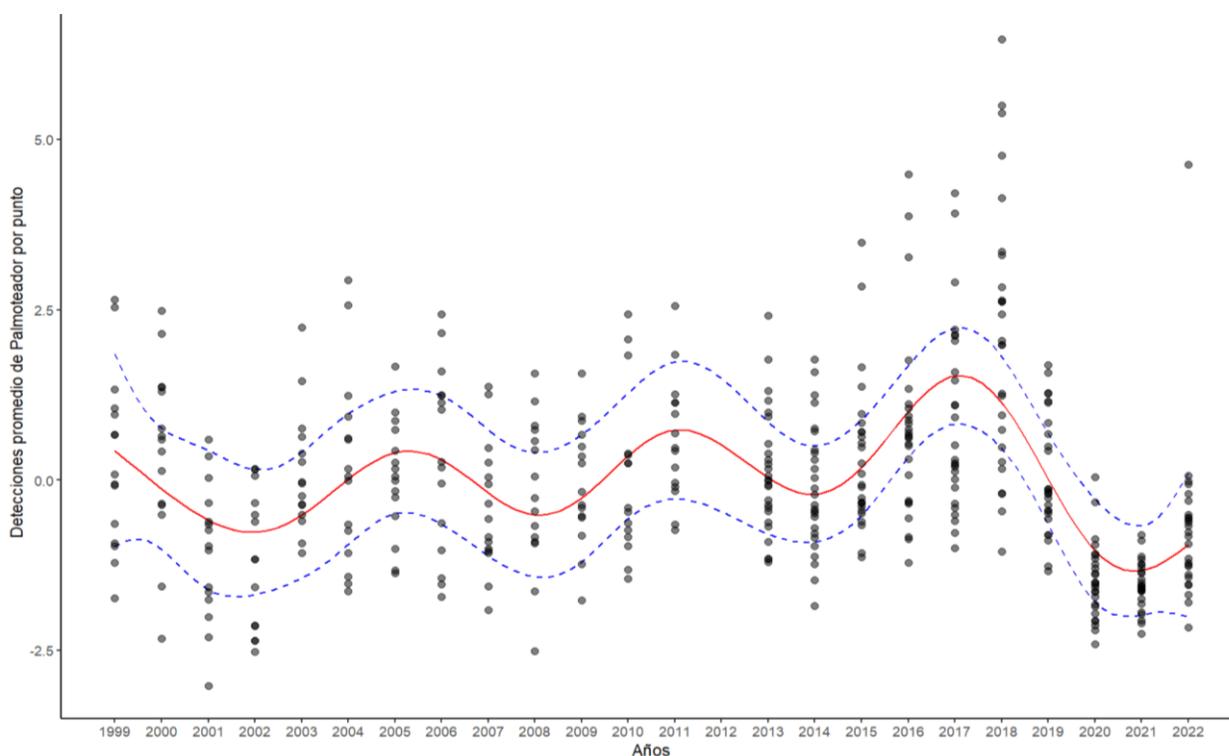
### *Tendencia poblacional*

El promedio de detecciones del palmoteador de Yuma (*Rallus obsoletus yumanensis*) para el periodo de 1999 a 2022 fue de 2.09 rálidos/punto (EE= 1.17), tomando en cuenta ambas visitas (inicio y final de la temporada reproductiva) e incluyendo las 130 estaciones de conteo. De acuerdo con los datos recabados, en términos generales, la tendencia poblacional se ha mantenido estable, con variaciones intra e interanuales significativas para ciertos años (Figura 3). La mayor cantidad de detecciones ocurrió en la temporada de 2018 con un promedio de 4.19 rálidos/punto y el menor número de detecciones se registró en 2021 con 0.52 rálidos/punto, una reducción del 87.6% con respecto al mayor número de registros, y una reducción del 11.86% con respecto al año anterior.

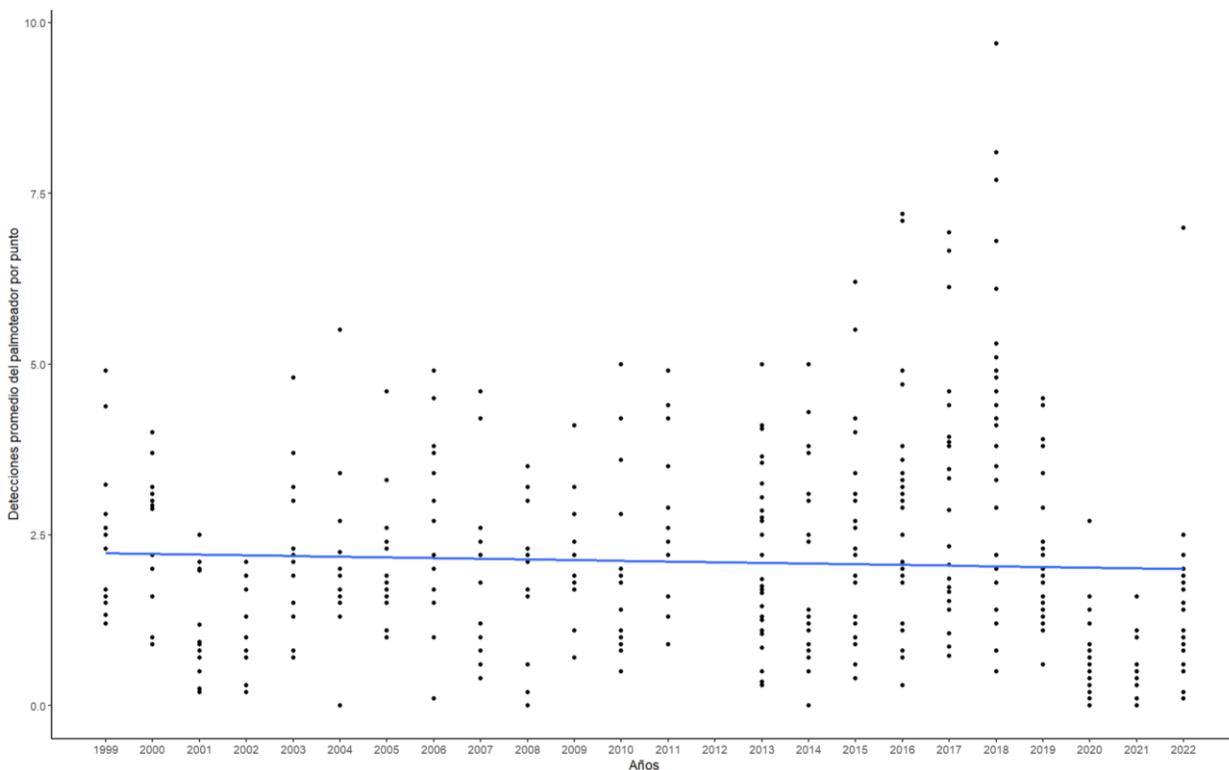
A lo largo del estudio se ha definido un ciclo poblacional aparentemente de cada seis años, lapso en el cual, la población tiende a bajar para después repuntar, por lo que se esperan fluctuaciones en la abundancia relativa (i.e. tamaño poblacional). Sin embargo, en el último “ciclo” el decremento de la población ocurrido en el periodo 2020 -2021 fue anómalo, ya que el promedio de detecciones de dicho lapso estuvo por debajo de 1.00 rálido/punto (Figura 3), e incluso representó una cuarta parte del promedio de detecciones para todo el periodo de estudio.

Se construyó un modelo de regresión lineal para contrastar los resultados del modelo GAMM, en el cual tampoco se muestra alguna tendencia durante estas dos décadas. No hay una relación lineal estadísticamente significativa ( $p=0.3371$ ;  $R^2=0.002$ ) (Figura 4).

El coeficiente de variación fluctuó entre un mínimo de 36.5% (2000) y un máximo de 99.5% (2020); en el periodo con mayor fluctuación, los sitios con mayor número de palmoteadores (aunque con abundancias relativamente bajas) tuvieron una cantidad cinco veces mayor de detecciones sobre la media, mientras que en los lapsos de menor variación fue poco más del doble. En términos generales para el período (1999-2022) el promedio de la variación interanual entre los puntos de muestreo fue de 59.8%. Sin embargo, entre 2020-2022 la variación se incrementó hasta un 93% en promedio. La abundancia relativa de palmoteadores bajó para estos años, y la distribución de la abundancia es menos homogénea en los últimos años, de forma que pocos sitios en la Ciénega concentran el mayor número de registros y una proporción alta de espacios presentan números bajos.



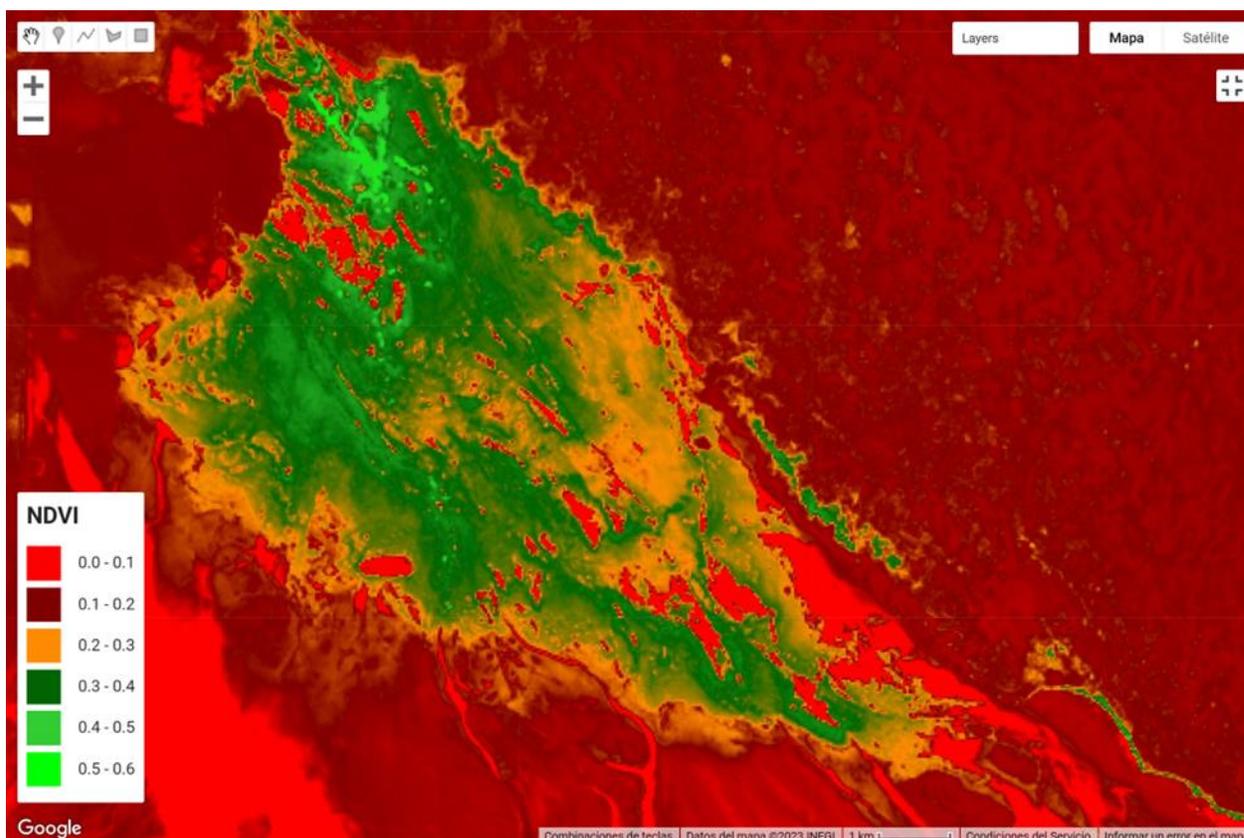
**Figura 3.** Modelo GAMM de la abundancia relativa del palmoteador de Yuma 1999 a 2022. Los puntos grises indican las detecciones promedio por punto en cada una de las rutas y para cada año, la línea de tendencia en color rojo y error estándar en línea azul punteada



**Figura 4.** Regresión lineal de la abundancia relativa palmoteador de Yuma 1999 a 2022. Los puntos negros indican las detecciones promedio por punto en cada una de las rutas para cada año, la línea de tendencia está representada en color azul. ( $y = a + 22.33 * x$ ;  $R^2 = 0.002$ ;  $p = 0.3371$ ).

### *Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)*

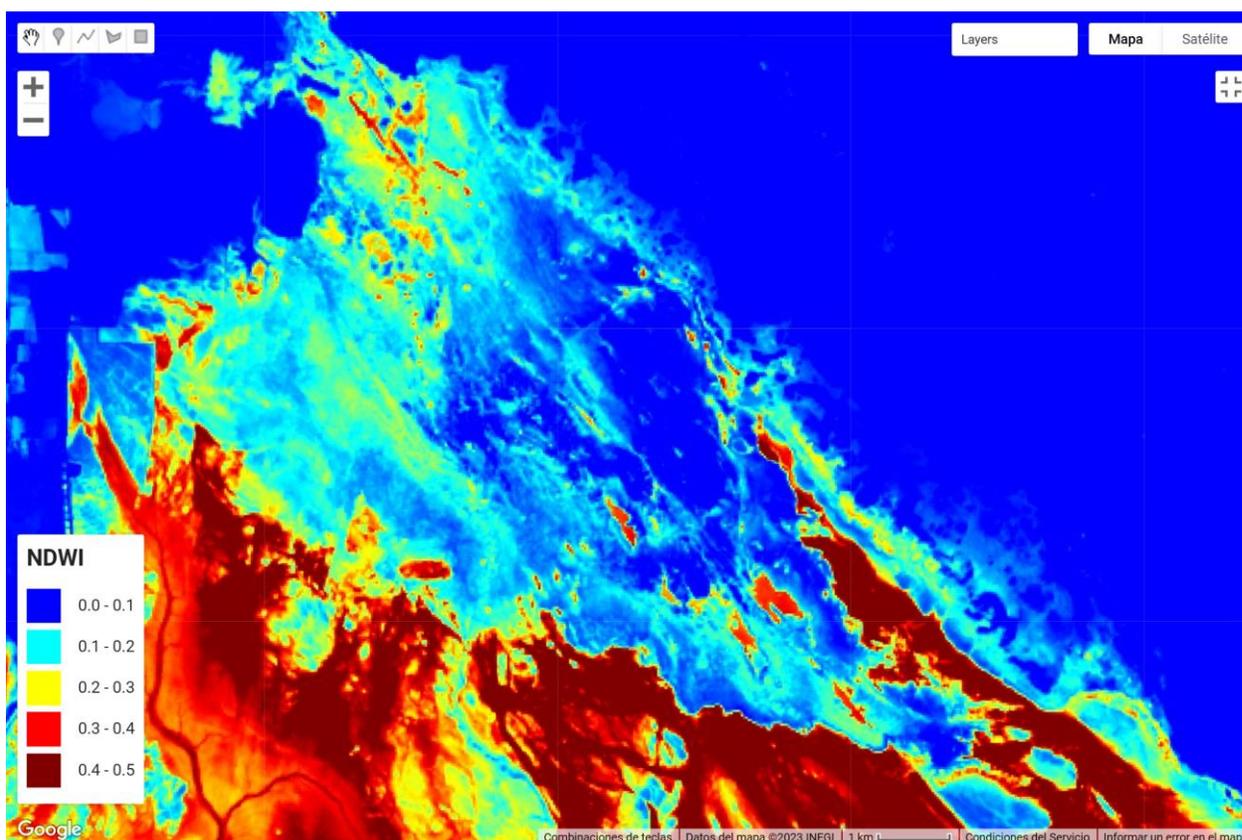
En promedio los valores más altos de NDVI se obtuvieron por lo general durante la temporada de verano y los valores más bajos durante el invierno, siendo agosto el mes que presentó un mayor verdor y enero el mes con menor verdor (Anexo I). La zona con mayor verdor se registró en la parte norte, y la de menor verdor fue la zona sur (Figura 5). Durante el periodo de estudio el año con mayor verdor fue 2016 y el de menor verdor fue 2015, aunque este último pudiera deberse a que no existen datos de los primeros meses (enero – febrero). Pevio al incendio registrado en 2017 se observaron valores bajos de verdor, en comparación con los valores observados para el mes de julio en otros años, lo que pudiera ser un indicador de que parte de la vegetación se encontraba senescente al momento del incendio. Posterior a éste, se observó un alza en los valores de verdor a partir del mes de septiembre y en lo que restó del año, registrando valores de verdor en general más altos en comparación con los demás años que abarca la década de estudio. Sin embargo, este efecto no se vio reflejado posterior al incendio de 2019, en donde se registraron valores de verdor más bajos durante los siguientes cuatro meses, incluso para algunos meses (enero, febrero, marzo) fueron los valores promedio mínimos registrados durante la década de estudio.



**Figura 5.** Mapa del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) para la Ciénega de Santa Clara, Sonora del periodo de estudio (2013 - 2021)

### Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI)

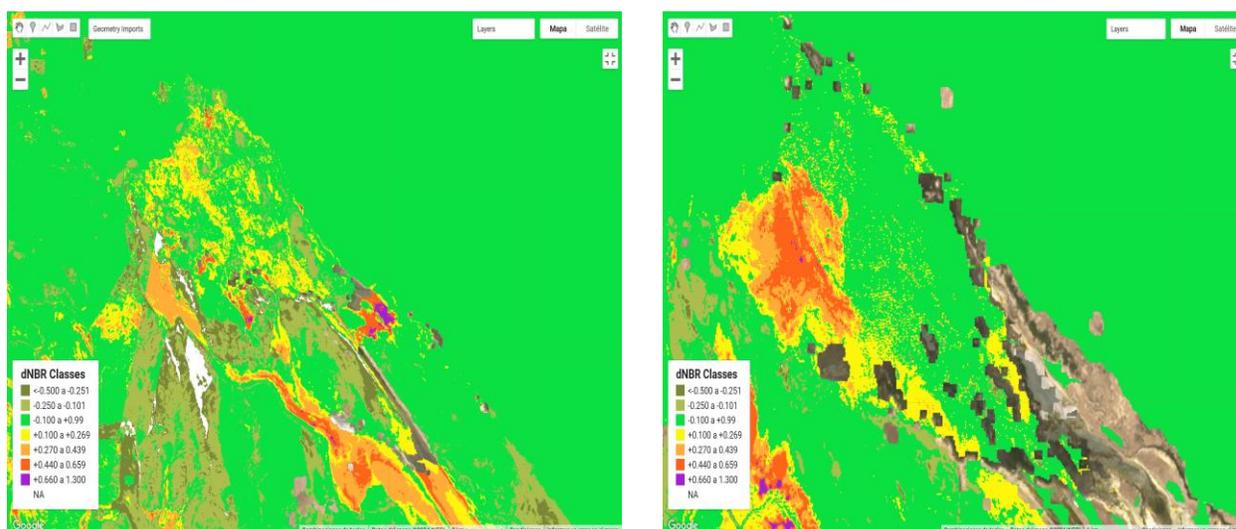
Para el NDWI se observó una tendencia similar a la del índice de verdor, valores promedio más altos durante la temporada de verano y valores promedio más bajos durante el invierno, registrándose en febrero los valores más bajos y los mayores en agosto. El año con mayores valores promedio fue 2014, y el de menores valores promedio fue 2019 debido al corte de flujo durante los meses de agosto – diciembre por acciones de reparación y mantenimiento del canal MODE (Anexo I). Al igual que el verdor, los valores más grandes se obtuvieron en la zona norte, pero a diferencia del verdor, la parte central obtuvo los valores menores (Figura 6), quizá debido a que en la zona sur se refleja más el agua por la poca vegetación presente. Durante el incendio de 2017 los valores promedio fueron bajos (NDWI=0.13), y durante el incendio de 2019 se determinaron frecuencias altas de valores negativos, lo que indica ausencia de agua, con un promedio general de NDWI=0.0044. Asimismo, las acciones de reparación y mantenimiento del canal MODE (agosto – diciembre) tuvieron un efecto en los valores de NDWI ya que en ese lapso el NDWI muestra una tendencia de decremento de manera que hacia el mes de diciembre la Ciénega refleja en algunas zonas un mayor grado de sequedad (a veces total) o niveles mínimos de agua.



**Figura 6.** Mapa del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora del periodo de estudio (2013 – 2021)

### Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR)

A través del FIRMS se localizaron dos incendios ocurridos durante la última década en la Ciénega de Santa Clara con fechas aproximadas del 08 de julio al 10 de julio de 2017 y del 26 de octubre al 01 de noviembre 2019, con una duración entre tres y cinco días respectivamente. Mediante el análisis de severidad de los dos incendios ocurridos durante la década de estudio, se observó que el incendio de 2017 se expandió por más zonas del humedal, sin embargo, aunque tuvo la mayor extensión su intensidad fue en general baja, en comparación con el incendio de 2019 el cual se concentró principalmente en la parte noroeste de la Ciénega y en algunas zonas hacia el sur con intensidades de moderadas a altas (Figura 7). Debido a su intensidad y a que estuvo concentrado en la zona con mayor abundancia relativa de palmoteadores en el humedal, es muy posible que el incendio de 2019 generase un mayor impacto sobre la población de palmoteadores en la Ciénega.



**Figura 7.** Mapa del análisis de severidad de los incendios del año 2017 al lado izquierdo y del año 2019 al lado derecho, utilizando el Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora

### Modelos Mixtos Aditivos Generalizados (GAMMs)

Respecto al modelo ecológico, las formas funcionales para las covariables seleccionadas del modelo ecológico (Figura 8) indican que el palmoteador mostró respuestas no lineales a todas las covariables ambientales y de hábitat, excepto a la temperatura máxima. La presencia de los palmoteadores de Yuma está relacionada no linealmente, pero significativamente con temperaturas bajas ( $p<0.001$ ) y altas ( $p<0.001$ ), la abundancia relativa (i.e. detecciones) exhibe una respuesta negativa a eventos climáticos extremos con un umbral de  $> 45 \text{ }^\circ\text{C}$  para temperaturas máximas y una medida óptima, para temperaturas mínimas de entre 1 a 2  $^\circ\text{C}$ . Aparentemente la temperatura es mejor para los palmoteadores entre estas temperaturas. En el modelo se encontró que los principales factores de hábitat que determinan la

abundancia de los palmoteadores es la cobertura de agua ( $p < 0.001$ ), la vegetación emergente ( $p < 0.01$ ) y el verdor ( $p < 0.001$ ). Mostrando una correlación positiva por aquellas áreas que tienen al menos una cobertura del 40% de agua, una cobertura entre 50% y 70% de vegetación emergente y un verdor por encima del 40% (Figura 8).

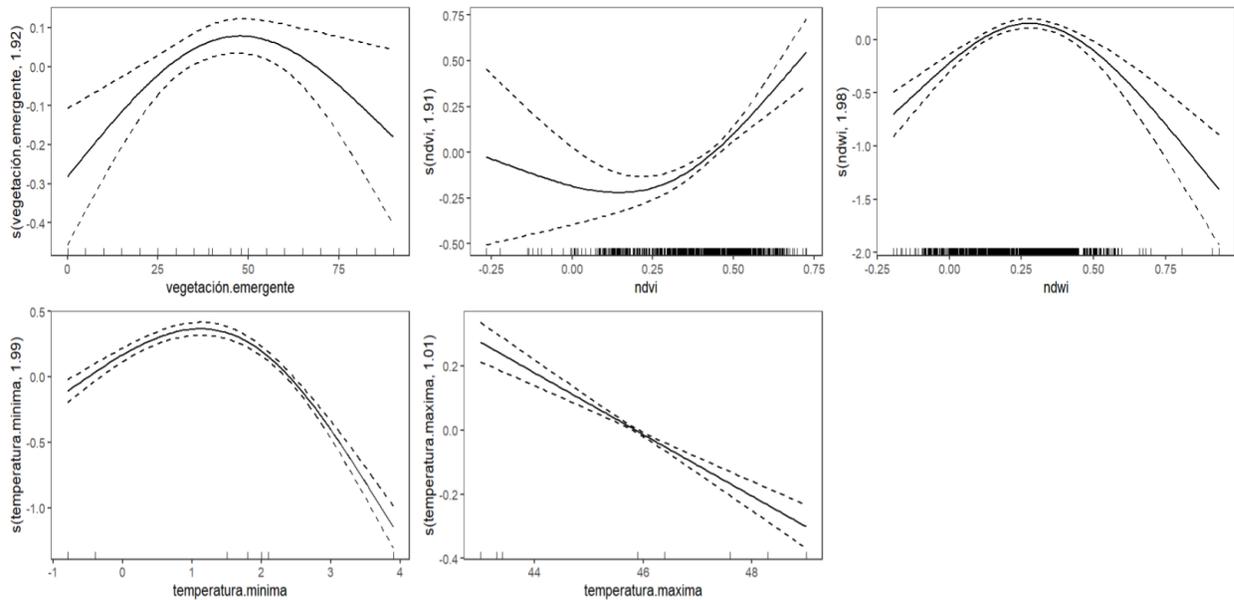
Estos resultados fueron contrastados con otro modelo ecológico, que solo contenía datos de 2013 a 2019 para asegurar que no fueron resultados del efecto de los eventos más recientes ocurridos en la Ciénega, tales como el incendio y el corte de agua por cuatro meses durante el otoño – invierno de 2019. Los resultados de ambos modelos fueron similares, a excepción de las temperaturas mínimas en donde se registró un umbral para las temperaturas mínimas de  $< 2$  °C, es decir, temperaturas iguales o menores a 2 °C se relacionan negativamente con la población y la relación del índice de agua de diferencia normalizada se correlaciono casi linealmente, pero igual de manera significativa ( $p = < 0.01$ ) con la abundancia relativa de los palmoteadores (Figura 9).

En el modelo de manejo también encontramos una respuesta no lineal para los flujos de agua durante el verano, mientras que las otras correlaciones fueron lineales. A partir de este modelo, se determinó que entregas de agua mayores a  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  durante la temporada reproductiva (primavera), está correlacionada con un aumento en la abundancia relativa del palmoteador. En verano los niveles de agua óptimos para el palmoteador se encuentran entre  $4.5 - 6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Durante el otoño se muestra una correlación positiva con mayores niveles de aguas, mientras que durante el invierno los altos flujos de agua (hasta  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) mostraron un efecto negativo en la abundancia relativa del palmoteador.

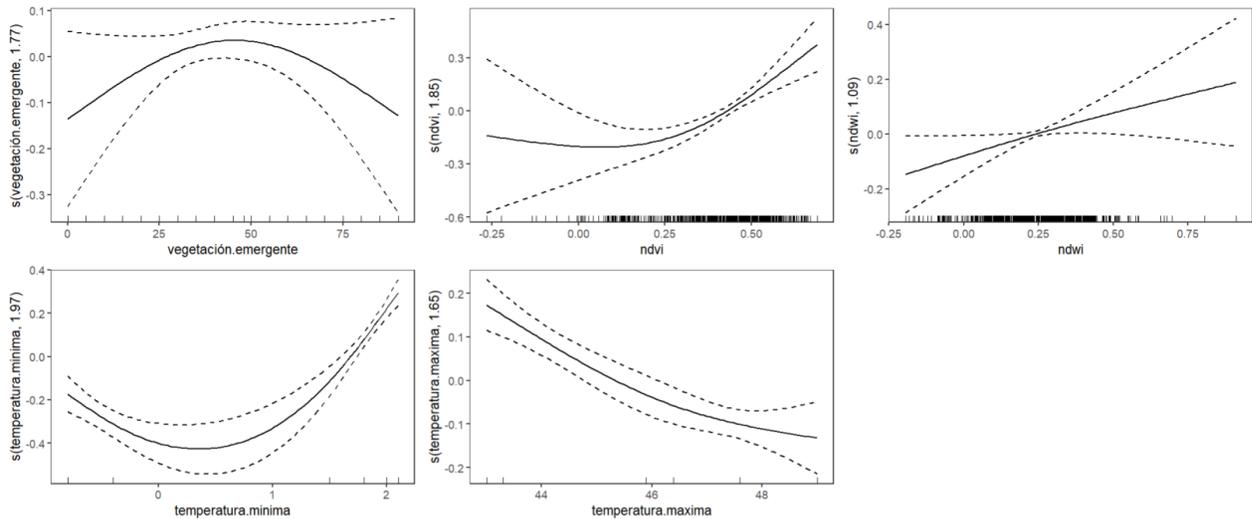
En cuanto a los dos incendios analizados en este estudio, se observó que ambos se asociaron aparentemente con un efecto negativo en la subespecie, ya que disminuyó la abundancia relativa del palmoteador. Es importante señalar que ambos incendios ocurrieron después de la temporada reproductiva, el primero a mitad de verano en 2017 y el segundo durante mediados del otoño de 2019. Se asume que el incendio ocurrido en 2019 tuvo un mayor impacto sobre la población, ya que fue más severo y quemó una mayor extensión (Figura 10)

Para este modelo también se realizó una comparación con el modelo construido con datos de 2013 a 2019, en donde la relación de primavera y otoño se conservan muy similares, indicando una correlación positiva entre la abundancia relativa del palmoteador y mayores niveles de agua durante la primavera y otoño ( $6 - 7 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Para el caso de los flujos de agua para verano se registró una correlación negativa, a niveles altos

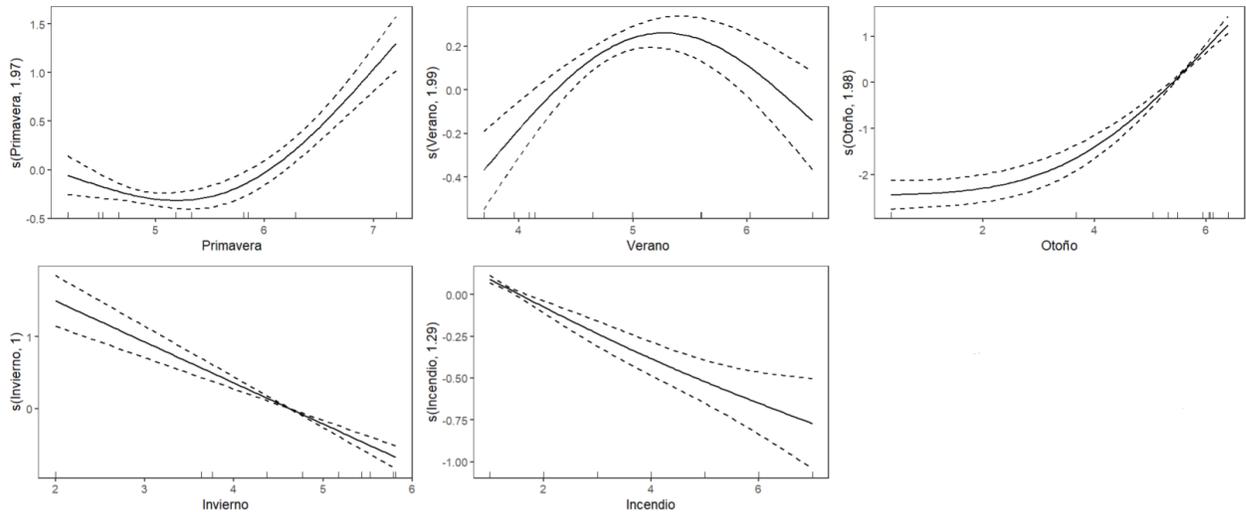
de agua ( $<5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), menor abundancia relativa de palmoteadores y durante el invierno sugiere que flujos más bajos de agua son más favorables para los palmoteadores (Figura 11)



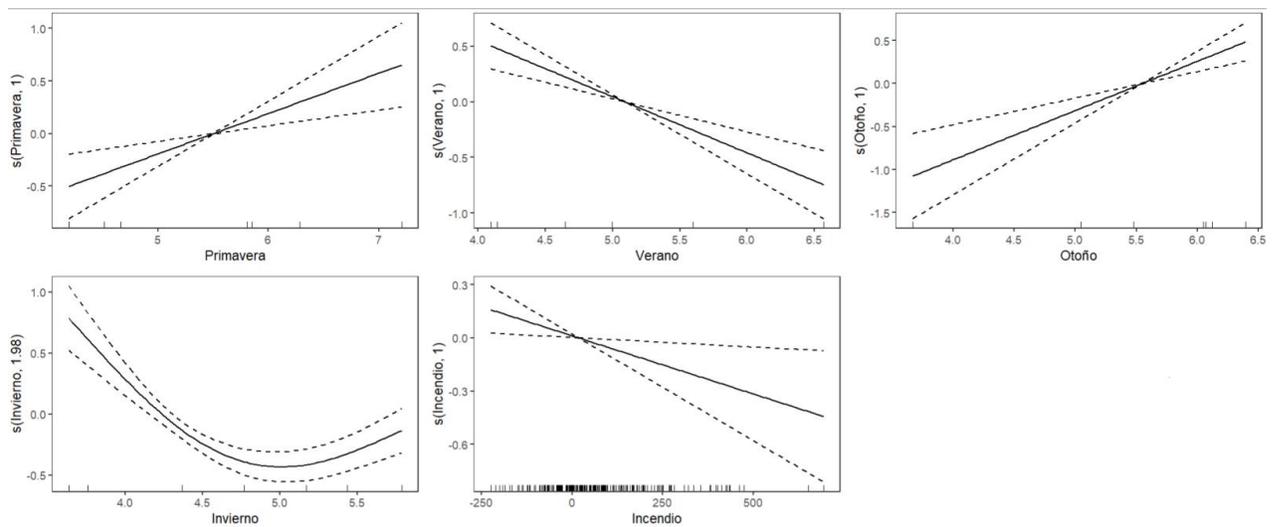
**Figura 8.** Modelo ecológico con datos de 2013 a 2022. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las características ambientales y de hábitat, y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S=valor estimado de las funciones suavizadas



**Figura 9.** Modelo ecológico con datos de 2013 a 2019. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las características ambientales y de hábitat, y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S=valor estimado de las funciones suavizadas



**Figura 10.** Modelo de manejo con datos de 2013 a 2022. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las acciones de manejo indirecto (flujos de agua en temporada primavera, verano, otoño e invierno y los incendios) y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica intervalos de confianza del 95%. S =valor estimado de las funciones suavizadas



**Figura 11.** Modelo de manejo con datos de 2013 a 2019. Muestra los ajustes suavizados de las covariables, teniendo como variables predictivas las acciones de manejo indirecto (flujos de agua en temporada primavera, verano, otoño e invierno y los incendios) y como variable de respuesta, la abundancia relativa del palmoteador. La línea punteada indica los intervalos de confianza del 95%. S =valor estimado de las funciones suavizadas

## Capítulo 4.      Discusión

---

La tendencia poblacional del palmoteador de Yuma está influenciada por la probabilidad de detección, misma que puede ser afectada por el método de muestreo, esfuerzo (número de visitas, número de estaciones de conteo), la hora en la que se realizaron los monitoreos, época del año, experiencia del observador, características físicas del hábitat (cobertura y profundidad del agua, densidad, y cobertura de la vegetación) y factores ambientales (velocidad del viento, temperatura) (Conway y Gibbs, 2001; Conway y Gibbs 2005). En este estudio el método utilizado para determinar la abundancia y tendencia de la población está basado en el grado de respuesta que los individuos tuvieron a las grabaciones reproducidas en campo, por lo cual no es una vía directa de registro, sin embargo, este método ha demostrado ser una de las técnicas más eficientes para detectar a las aves de marisma que generalmente son crípticas (Conway, 2009), de manera que se provee de un índice más preciso y robusto sobre la abundancia de los palmoteadores (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2001).

De acuerdo con otros estudios, la tasa de respuesta tiene variaciones (algunas significativas) a lo largo de la temporada de reproducción, con picos entre mediados de abril y mediados de mayo y con una probabilidad mayor de detección a inicios de la temporada reproductiva (Anderson y Ohmart, 1985; Todd, 1986; Eddleman, 1989; Conway *et al.*, 1993). Sin embargo, en este estudio se observó que dichas variaciones no son significativamente diferentes si el muestreo sucede ya sea al principio (marzo) o final de la temporada reproductiva (junio), concordando con lo reportado para este humedal por Hinojosa-Huerta *et al.* (2001), quienes no detectaron diferencias en la población en relación con el periodo de muestreo dentro de la temporada de reproducción.

En cuanto a la tasa de detección respecto a la hora en la que ocurre el monitoreo (mañana o tarde), lo registrado en este estudio coincide con lo observado en otros sitios, donde se ha encontrado que la probabilidad de detección es mayor durante el periodo matutino, por lo que recomiendan realizar los monitoreos por la mañana (Gibbs y Melvin, 1993; Ribic *et al.*, 1999; Yuma Clapper Rail Recovery Team, 2000), si bien contrasta con lo reportado por Hinojosa-Huerta *et al.* (2002), donde se tuvieron detecciones ligeramente mayores en las tardes, dichas diferencias no fueron significativas. Para reducir el coeficiente de variación y optimizar los esfuerzos de monitoreo, es imprescindible implementar los muestreos dentro del marco temporal del periodo reproductivo y de preferencia conducirlos por la mañana para tener una mayor probabilidad de detección.

De acuerdo con el coeficiente de variación, la abundancia relativa de los palmoteadores, aunque variable

dentro de cierto intervalo (36 – 96%), ha bajado, y su distribución es menos homogénea a lo largo del humedal, aguzándose aún más en los últimos años, de tal manera que pocas zonas en la Ciénega concentran un número alto de individuos, mucho mayor al promedio general. Esta disminución y menor homogeneidad en la distribución puede vincularse con la pérdida de hábitat, así como con las afectaciones ambientales debidas al manejo de hábitat como a la intensidad y extensión de los incendios o la interrupción del flujo hídrico por un tiempo prolongado.

Conway (1993) sugiere que los palmoteadores no usan las zonas de un humedal acuerdo con la proporción de hábitat disponible, si no que los individuos muestran al parecer una preferencia por tulares y juncales evitando las porciones dominadas por cobertura de pino salado (*Tamarix* sp.), también argumenta que la preferencia por estas especies de plantas emergentes (tule y junco) ha sido sobreestimada y el uso de otras zonas del humedal con otras especies de vegetación emergente ha sido posiblemente subestimado. De acuerdo con este estudio, los palmoteadores mostraron una asociación positiva con otras especies de vegetación emergente, como por ejemplo el coquillo (*Cyperus odoratus*), cuando se encuentra en una proporción del 40 – 100% dentro de la unidad de muestreo; los registros importantes de ocupación del palmoteador para cobertura de coquillo se dieron en el año 2018, el año con la mayor abundancia relativa registrada históricamente. Ninguna asociación con otra especie de planta emergente fue significativa, lo cual pudiera deberse a que la cobertura de dichas especies no fue dominante en ninguna de las estaciones de muestreo, y en cambio estuvieron ocupadas en su mayoría por tule y junco, por lo que algún posible efecto quede enmascarado. La cobertura de vegetación emergente es un aspecto crítico que define la abundancia de los palmoteadores, ya que usan mayoritariamente áreas con una cobertura media a media alta, evitando los espacios con alta densidad, y aquellos con muy poca vegetación. Además, los palmoteadores tienden a evadir espacios con coberturas de pino salado (*Tamarix* sp), cachanilla (*Pluchea* sp) y aguas abiertas. Esto último concuerda con lo reportado anteriormente por Conway *et al.* (1993). Smith (1975) también observó que los palmoteadores eran más abundantes en un hábitat con una densidad moderada de tule y junco, y Anderson y Ohmart (1985) reportan que a pesar de que los palmoteadores están asociados con una vegetación densa, más frecuentemente alcanzan sus mayores densidades en tulares y juncales con densidades de follaje moderadas.

La cobertura de agua, de mediana a alta, poca vegetación residual y baja densidad en la vegetación cerca del suelo son características de vegetación emergente joven, solían ser condiciones que se presentaban de manera natural cuando ocurrían los deshielos en primavera y llegaban hasta el delta, lo que permitía un mayor dinamismo del humedal, en contraste, hoy en día se ha documentado que son condiciones que se dan posteriores a un incendio (Conway *et al.*, 2010). Los incendios en la Ciénega, por el contrario, no

ocurren de manera periódica naturalmente, sino más bien son de carácter ocasional y se considera que son de origen antrópico en su mayoría, sean generados de forma accidental o voluntaria.

La intensidad de los incendios se ha vinculado con la senescencia de la vegetación y su ausencia y presencia es un factor significativo que controla la densidad de la vegetación verde al igual que las tasas del flujo de agua. (Mexicano *et al.*, 2013). En este estudio se encontró que las condiciones hidrológicas en que se encuentra el humedal cuando ocurre un incendio son cruciales para que se generen efectos positivos en la abundancia del palmoteador. Un ejemplo de lo anterior es el incendio ocurrido en el otoño de 2019, el cual coincidió con un periodo sin flujo de agua hacia la Ciénega. La reducción en los niveles de agua en el humedal, traducida en una proporción pequeña de zonas inundadas, en conjunto con la disminución en la cobertura de la vegetación por el incendio resultó en una recuperación tardía de la vegetación, generando un hábitat menos adecuado para los palmoteadores y condiciones de estrés para la población debidas al incendio (i.e. menor cobertura de vegetación, mayor riesgo de depredación), además sucedió durante otoño – invierno, periodo anual crítico de su ciclo de vida, ya que es cuando se asume acontece la mayor mortalidad para los palmoteadores (Eddleman, 1989). En invierno, al tener menos cobertura de hábitat y disponibilidad de alimento los palmoteadores tienden a dispersarse y a ampliar su ámbito hogareño, estos movimientos los hacen más propensos a ser depredados (Conway *et al.*, 1993), por lo que un incendio en otoño o invierno temprano puede causar un efecto mayor al disminuir aún más el hábitat disponible y deterioro a las zonas de refugio y alimentación de la especie propiciando una dispersión aún mayor y probable mortalidad.

Por otro lado, cuando no ocurre un incendio en un periodo de tiempo prolongado, las condiciones del hábitat se tornan inadecuadas para los palmoteadores, ya que, con la ausencia de incendios o mecanismos de regulación, la vegetación tiende a invadir todos los espacios disponibles, alcanzando cierto grado de cobertura y densidad que reduce potencialmente la cobertura de agua superficial, además de que la vegetación emergente comienza a tornarse senescente, e incrementa la acumulación de vegetación residual, por lo que el hábitat para los palmoteadores se ve comprometido. El incremento en la cobertura de la vegetación posiblemente afecta la dinámica de forrajeo de los palmoteadores o es poco atractivo para la especie, lo que pudiera favorecer su dispersión.

En los flujos de agua, se ha determinado que la reducción en el flujo de agua afecta el grado de salinidad del humedal; esto es clave ya que se ha sugerido que la salinidad es un factor importante en determinar el tamaño de área cubierta de vegetación (Zengel *et al.*, 1995; García-Hernández *et al.*, 2013), así como la distribución de especies dentro del hábitat. Además, el aumento en la salinidad en el ecosistema puede influir en la biomasa de las presas potenciales para el palmoteador, ya que en general es posible que en

condiciones de hipersalinidad la calidad y disponibilidad de las presas adecuadas para los palmoteadores disminuyan. Aunque se ha observado que los períodos cortos sin flujo de agua no representan un impacto significativo en la estimación de la población (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013).

De acuerdo con lo observado en este estudio mayores flujos de agua durante la temporada reproductiva (primavera) son favorables, mientras que en invierno los niveles de agua pueden ser menores sin afectar la marisma ya que es un período donde la vegetación se encuentra latente (García-Hernández *et al.*, 2013), además de ser un periodo con una tasa más baja de evapotranspiración (Mexicano *et al.*, 2013), pero es importante mantener los flujos de invierno ya que es la temporada del año cuando ocurre la mayor salida del flujo hacia los planos lodosos, previniendo condiciones hipersalinas y permitiendo la creación y el mantenimiento de hábitat para las aves playeras que llegan a invernar a esta región (Gomez-Sapiens *et al.*, 2013).

Eddleman (1989) encontró que los principales factores que determinan el uso del hábitat son el rango anual de profundidad de agua y la existencia de parches residuales de vegetación de marisma. Conway *et al.* (2010) mencionan que el hábitat ideal para los palmoteadores está conformado por parches de vegetación de distintas edades en combinación con aguas poco profundas. En contraste, en este estudio se encontró que la disponibilidad de condiciones adecuadas de microhábitats como porcentaje de cobertura de vegetación emergente, coberturas diferenciales de diversas especies de vegetación emergente, verdor y porcentaje de cobertura de agua son de los principales factores que determinan el uso de hábitat y abundancia relativa de la especie, además de que las condiciones ambientales también juegan un papel importante en esto último. Las características del hábitat y ambientales no solo son críticas durante su etapa reproductiva sino también en la etapa post reproductiva ya que, cuando el ecosistema alcanza condiciones óptimas, se proporciona un escenario para un incremento natural en la aptitud física de los individuos. Ello se traduce, generalmente, en un mayor éxito reproductivo de las parejas y en un aumento en el reclutamiento de jóvenes a la población, consecuentemente se denota en una estimación que refleja un mayor tamaño de su población.

En el caso del hábitat se favorecen mejores condiciones para forrajear, y una mayor disponibilidad y calidad de presas (diversidad, biomasa). El riesgo por depredación tanto de huevos como de pollos disminuye cuando la vegetación presenta condiciones de densidad media, ya que permite que las crías se puedan desplazar de manera más rápida y eficiente; esto es favorable para la especie, ya que es una especie nidífuga, los polluelos siguen a los adultos a través de la marisma dentro de las 48 horas posteriores a la eclosión.

Otra de las implicaciones que no se revisó en este estudio es la depredación sobre la población de palmoteadores. Se considera que la depredación tiende a aumentar cuando los niveles de agua decrecen, ya que se crean condiciones adecuadas (puentes de tierra) lo cual muy probablemente favorezca una mayor accesibilidad de los depredadores al interior de la marisma. Entre los principales depredadores terrestres presentes en la región y que potencialmente depredan directamente adultos, pollos o huevos se pueden mencionar a los coyotes (*Canis latrans*) y los mapaches norteros (*Procyon lotor*). La exposición a depredadores pudiera incrementarse durante el otoño y el invierno, debido a la llegada de las aves rapaces migratorias en la región (e.g. *Falco peregrinus*, *Circus cyaneus*). Por otra parte, durante dicho periodo de invierno y otoño, se puede generar competencia trófica con la llegada de especies de aves acuáticas migratorias a la Ciénega; esto pudiera ocurrir, ya que se ha documentado en algunos humedales, que cuando la temperatura baja muy por debajo del promedio, las poblaciones de invertebrados disminuyen en densidad, con una potencial incremento de la competencia trófica, aunque una manera de contrarrestar lo anterior pudiera ser la dispersión activa (nomadismo) de los individuos en el humedal.

Así mismo, no se hicieron estudios para evaluar la calidad del agua y del sustrato, en cuanto a contenidos de metales pesados o contaminantes, pero se conoce que el Selenio ha sido identificado como un químico de preocupación en la Ciénega (García-Hernández *et al.*, 2000), aunque en estudios realizados por García-Hernández *et al.* (2001, 2006) sugieren que no se han alcanzado niveles de Selenio a tal grado que pudiera tener una afectación en los palmoteadores, principalmente por ser un sistema abierto que permite la salida de flujos de agua, lo cual reduce la acumulación de contaminantes en agua, suelo y en la cadena trófica (bioacumulación).

En el caso de las acciones de manejo directo, el dragado realizado de manera controlada sugiere un efecto positivo hacia la población del palmoteador ya que de lo contrario los sedimentos que son arrastrados podrían contribuir a formar tapones en el escurrimiento disminuyendo el flujo del agua, así como propiciar la formación de zonas con poca profundidad, lo cual puede resultar en un reemplazamiento de la vegetación (colonización del sustrato por especies terrestres) y por tanto una consecuente pérdida de hábitat de vegetación emergente de marismas (Mexicano *et al.*, 2013). Sin embargo, también hay que considerar que un dragado excesivo o mal diseñado, podría resultar en una posible desviación del flujo de agua, además de que podría liberar formas solubles de Selenio al sedimento y columna de agua, aumentando el riesgo de bioacumulación (García-Hernández *et al.*, 2000; García-Hernández *et al.*, 2001; García-Hernández *et al.*, 2006).

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

---

La cooperación binacional es esencial en la administración de los recursos naturales compartidos. En el caso particular del palmoteador de Yuma y aves de marisma que habitan en la porción mexicana del delta del río Colorado, podemos afirmar que la calidad y cantidad del hábitat depende en gran medida del agua proveniente de la cuenca del río Colorado en EE. UU. Este recurso hídrico es capital para la sostenibilidad del humedal y todos los procesos ecológicos y evolutivos en la región.

Nuestros resultados muestran los requerimientos de hábitat para el palmoteador de Yuma en la Ciénega de Santa Clara, y remarca la importancia de los flujos de agua que recibe la Ciénega para crear y mantener un hábitat óptimo para los palmoteadores de Yuma. Sin embargo, aún hay aspectos desconocidos sobre su ecología que son necesarios estudiar para proponer estrategias de conservación más efectivas. Mucha de la información ecológica de esta especie ha sido determinada en la cuenca baja del río Colorado en EE. UU. (Anderson y Ohmart, 1985; Conway *et al.*, 1993; Conway *et al.*, 2010; Harrity y Conway, 2020) mientras que en la porción mexicana del delta solo se tienen estudios de su distribución, abundancia, y aspectos poblacionales (tendencia y estimación de su población) (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2001; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2008; Hinojosa-Huerta *et al.*, 2013) siendo este el primer estudio que explora el requerimiento y uso de hábitat de la especie, además de los efectos de las condiciones ambientales sobre la población en el delta del río Colorado, México.

Siendo que la conservación y recuperación del palmoteador de Yuma depende de la identificación de características del hábitat, se recomienda ampliar el estudio del uso y requerimientos de hábitat durante todo su ciclo, de tal manera que se tenga una mejor comprensión de sus requerimientos antes, durante y después de su temporada reproductiva, además de caracterizar el uso de hábitat durante el invierno. De igual manera se recomienda estudiar los movimientos post reproductivos, para determinar la frecuencia de sus movimientos estacionales de dispersión, migración y de conectividad entre sitios, ya que recientemente se ha descubierto que los palmoteadores tienen individuos migratorios (Harrity *et al.*, 2020), de lo contrario es plausible que las acciones de conservación para esta especie durante su temporada reproductiva no sean compensatorias de los peligros y amenazas durante todo su ciclo de vida. Estos estudios pudieran realizarse a través del uso de transmisores satelitales o el uso de telemetría automatizada Motus.

Por otro lado, la identificación de sus presas y sus principales recursos alimenticios han sido mayormente analizados en la cuenca baja, mientras que para el delta solo se tiene resultado de un análisis estomacal

en 4 individuos hace más 27 años (Ohmart y Tomlinson, 1977), por lo que se propone realizar un nuevo estudio para identificar la o las principales presas del palmoteador, así como un análisis de los cambios estacionales en la disponibilidad de alimento, lo cual pudiera explicar la dinámica de cambios en la distribución de la abundancia y en sus fluctuaciones.

La evaluación de los niveles de riesgo por contaminantes través de los niveles tróficos en los humedales del delta del río Colorado fue realizado por el Laboratorio de Investigación Ambiental de la Universidad de Arizona (García-Hernández *et al.*, 2000). Sin embargo, no hay información específica sobre los niveles de contaminantes en los palmoteadores o ninguna especie de ave de marisma y sus huevos y tampoco se cuentan con estudios sobre los efectos que la exposición al Selenio puede llegar a tener sobre la reproducción de esta especie, por lo que también se recomienda implementar un análisis de los niveles de riesgo en este grupo de aves y sus huevos para conocer más sobre estos aspectos y el nivel de riesgo en el que se encuentra la población de la Ciénega actualmente.

La estrategia de conservación del palmoteador de Yuma debe incluir acciones de dragado controlado en el canal MODE. Esta actividad tiene una enorme influencia, indirecta, sobre la ecología de las aves de marisma, ya que es crucial en la dinámica hidrológica del área. Se debe gestionar que el dragado en el canal MODE, continúe para propiciar la entrada de volúmenes de agua a la Ciénega, asegurando que el diseño del trazo permita una distribución uniforme a las distintas zonas del humedal. Dado que volúmenes de agua altos aparentemente favorecen un mayor éxito reproductivo, se recomienda que los dragados sean realizados preferente antes de la temporada de reproducción.

La dinámica del agua y más específicamente los flujos de agua que recibe la Ciénega son clave para mantener condiciones óptimas de hábitat para el palmoteador, por lo que se recomienda continuar con los flujos de agua hacia la Ciénega, incrementando el flujo de agua hacia el humedal durante la temporada reproductiva (primavera) y el otoño ( $<6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mantener un flujo moderado durante el verano ( $4 - 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y durante el invierno podrían reducirse los flujos en una medida de entre  $2 - 4 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin embargo, en este trabajo se recomienda mantener un flujo de al menos  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , debido a los impactos que una gran reducción en su flujo durante esta temporada puede tener en otro grupos de aves (acuáticas y playeras) que utilizan el humedal y sus planicies lodosas. No se recomienda el corte de flujo de agua durante un tiempo prolongado (mayor a tres meses) ya que potencialmente reduciría el hábitat disponible para los palmoteadores, forzándolos a tener una mayor dispersión y/o migración incrementando el riesgo de depredación y mortalidad.

También se propone implementar incendios para mantener y mejorar el dinamismo de la vegetación en este humedal, ya que naturalmente esto ya no sucede y la vegetación tiende a llegar a un periodo de senescencia, creando un hábitat menos preferible para los palmoteadores. Se recomienda coordinar el esfuerzo con personal de la reserva (CONANP) e iniciar con un diseño experimental de dos años para evaluar los efectos de los fuegos en el hábitat, el palmoteador y las demás especies de aves de marisma que habitan en la Ciénega, antes de recomendar un plan de incendios prescritos a largo plazo. Las recomendaciones para los fuegos prescritos que se proponen a continuación han sido basadas en la evaluación biológica llevada a cabo en este estudio y en las recomendaciones hechas por Conway *et al.* (2010), sobre el tema. Como medidas de conservación se considera que los incendios deben tener cierta frecuencia para mantener hábitat óptimo para los palmoteadores, (ej. fuegos periódicos en un ciclo de 5 – 6 años). Se recomienda que se realicen durante finales de la temporada de invierno y/o principios de primavera, en donde los palmoteadores se encuentran menos vulnerables que se realicen en un horario matutino, y el día que se lleve a cabo el incendio sea un día con poco viento para evitar la dispersión del fuego a zonas fuera de la extensión planeada para el incendio. También se recomienda realizar brechas corta fuego en la delimitación de los polígonos establecidos.

Referente a las consideraciones espaciales, se sugiere seguir la recomendación de Conway *et al.* (2010) en donde, los fuegos deben estar restringidos a un porcentaje pequeño (< 15%) del hábitat local disponible en un año, y con al menos dos estaciones control adyacentes para que las aves residentes tengan áreas habitables en lo que la vegetación emergente que se quemará tenga tiempo de recuperarse. También se propone un monitoreo de las fatalidades después de cada incendio, una evaluación de la composición de especies, remoción de material residual, monitoreo de salinidad, análisis a través del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), el Índice Normalizado del Área Quemada (dNBR), además de modelos de ocupación para el palmoteador y análisis comparativos de las abundancias relativas para todas las especies de aves de marisma antes, durante y después del incendio.

## Literatura citada

- Abarca, F.J., Ingraldi, M.J. and Varela-Romero, A. (1993). Observations on the desert pupfish (*Cyprinodon macularius*), Yuma clapper rail (*Rallus longirostris yumanensis*), and shorebird communities in the Cienega de Santa Clara, Sonora, Mexico. Nongame and Endangered Wildlife Program Technical Report, Arizona Game and Fish Department, Phoenix, AZ. [Archivo PDF].
- Akaike, H. (1974). A New Look at the Statistical Model Identification. In: Parzen, E., Tanabe, K., Kitagawa, G. (eds) Selected Papers of Hirotugu Akaike. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_16)
- Anderson, B. W., Ohmart, R.D, and Rice J. (1983). Avian and vegetation community structure and their seasonal relationships in the lower Colorado River valley. *The Condor*, 85, 392-405. <https://doi.org/10.2307/1367978>
- Anderson, B.W. and Ohmart, R.D. (1985). Habitat use by Clapper Rails in the lower Colorado River valley. *The Condor*, 87(1), 116–126. <https://doi.org/10.2307/1367143>
- Banks R.C. and Tomlinson R.E. (1974). Status of Certain Clapper Rails of Southwestern United States and Northwestern Mexico. *Wilson Ornithological Society*, 86(4), 325 -335. <https://www.jstor.org/stable/4160533>
- Carrillo-Guerrero, Y.K., Flessa K., Hinojosa-Huerta O. and López-Hoffman L. (2013). From accident to management: The Cienega de Santa Clara ecosystem. *Ecological Engineering*, 59, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.003>
- Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) de México y Estados Unidos. (1973). Acta 242. Solución Permanente y Definitiva del Problema Internacional de la salinidad del Río Colorado. México, D.F. <https://www.gob.mx/sre/acciones-y-programas/actas-de-la-cila-mex-eua>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2009). Programa de Conservación y Manejo, Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, México. México, D.F., 319. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>
- Conway, C. J., Eddleman, W. R., Anderson, S. H., and Hanebury, L. R. (1993). Seasonal Changes in Yuma Clapper Rail Vocalization Rate and Habitat Use. *The Journal of Wildlife Management*, 57(2), 282–290. <https://doi.org/10.2307/3809425>
- Conway, C.J., W. R. Eddleman. (2000). Yuma Clapper Rail. In: Endangered animals: a reference guide to conflicting issues Greenwood Press, Westport, CT, 20, 277–284. <https://doi.org/10.1890/09-1624.1>
- Conway, C.J. and Gibbs J. (2001). Factors influencing detection probability and the benefits of call broadcast surveys for monitoring marsh birds. *Research gate*. [Archivo PDF] [https://www.researchgate.net/publication/228924896\\_Factors\\_influencing\\_detection\\_probability\\_and\\_the\\_benefits\\_of\\_call\\_broadcast\\_surveys\\_for\\_monitoring\\_marsh\\_birds](https://www.researchgate.net/publication/228924896_Factors_influencing_detection_probability_and_the_benefits_of_call_broadcast_surveys_for_monitoring_marsh_birds)
- Conway, C.J. (2002). Standardized Protocols for Monitoring Marsh Birds in North America. Arizona Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, United States Geological Survey and School of Renewable Natural Resources. University of Arizona, Tucson, AZ.

- Conway, C.J. and Gibbs, J.P. (2005). Effectiveness of call-broadcast surveys for monitoring marsh birds. *The Auk* 122 (1), 26–35. <https://doi.org/10.1093/auk/122.1.26>
- Conway, C.J. (2009). Standardized North American Marsh Bird Monitoring Protocols. Version 2009-2. Wildlife Research Report #2009-2. U. S. Geological Survey, Arizona Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, Tucson, AZ., 57. [F:\\!! MY FOLDER\\! MarshBirdMonitoring\\PROTOCOL\\North American Marsh Bird Survey Protocol May 2009.wpd \(arizona.edu\)](F:\\!! MY FOLDER\\! MarshBirdMonitoring\\PROTOCOL\\North American Marsh Bird Survey Protocol May 2009.wpd (arizona.edu))
- Conway, C.J., Nadeau, C.P. and Piest, L. (2010). Fire helps restore natural disturbance regime to benefit rare and endangered marsh birds endemic to the Colorado River. *Ecological Applications*, 20, 2024–2035. <https://doi.org/10.1890/09-1624.1>
- Cornell Lab of Ornithology. (2019). Bird Academy 's A-to-Z Glossary of Bird Terms. Consultado el 10 de noviembre de 2023, de <https://www.allaboutbirds.org>.
- Dickey, D. R. (1923). Description of a new Clapper Rail from the Colorado River Valley. *The Auk*, 40, 90-94. <https://doi.org/10.2307/4073685>
- Eddleman, W.R. (1989). Biology of the Yuma Clapper Rail in southwestern U.S. and northwestern Mexico. Wyoming Cooperative Research Unit, University of Wyoming, Laramie, WY, 127. [play.google.com/store/books/details/Biology\\_of\\_the\\_Yuma\\_Clapper\\_Rail\\_in\\_the\\_Southwest?id=2MIRd71OGYcC&gl=US](play.google.com/store/books/details/Biology_of_the_Yuma_Clapper_Rail_in_the_Southwest?id=2MIRd71OGYcC&gl=US)
- Eddleman, W.R., Conway, C.J., Poole, A., & Gill, F. (1998). Clapper Rail (*Rallus longirostris*). *The Birds of North America Online*. <https://doi.org/10.2173/bna.340>
- Eddleman, W. R. and C. J. Conway. (2020). Ridgway's Rail (*Rallus obsoletus*), version 1.0. In *Birds of the World* (P. G. Rodewald, Editor). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. <https://doi.org/10.2173/bow.ridrai1.01>
- Foerster, K.S., Takekawa, J.E. and Albertson, J.D. (1990). Breeding density, nesting habitat, and predators of the California clapper rail. Report to the San Francisco Bay National Wildlife Refuge, US Fish and Wildlife Service. [Archivo PDF].
- Foin, T.C, García J.E., Robert E. Gill, Steven D. Culberson and Joshua N. Collin. (1997). Recovery strategies for the California clapper rail (*Rallus longirostris obsoletus*) in the heavily - urbanized San Francisco estuarine ecosystem. *Landscape and Urban Planning*, 38, 229-243. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(97\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)00036-4)
- García-Hernández, J., Glenn, E.P., Artiola, J. and Baumgartner, D.J. (2000). Bioaccumulation of selenium (Se) in the Cienega de Santa Clara wetland, Sonora, Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46, 298–30. <https://doi.org/10.1006/eesa.1999.1908>
- García-Hernández, J., King, K.A., Velasco, A.L., Shumilin, E., Mora, M.A. and Glenn, E.P. (2001). Selenium selected inorganic elements, and organochlorine pesticides in bottom material and biota from the Colorado River delta. *Journal of Arid Environments*, 49, 65–89. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0836>
- García-Hernández, J., Sapozhnikova, Y.V., Schlenk, D., Mason, A.Z., Hinojosa-Huerta, O., Rivera-Díaz, J.J., Ramos-Delgado, N.A. and Sánchez-Bon, G. (2006). Concentration of contaminants in breeding bird eggs from the Colorado River Delta, Mexico. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(6), 1640–1647. <https://doi.org/10.1897/05-185R.1>

- García-Hernandez J., Flessa K., Santiago-Serrano E., Romero-Hernández S. and Zamora-Arroyo F., (2013). Salinity responses to inflow alterations in a 6500 ha Typha wetland. *Ecological Engineering*, 52, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.102>
- Gibbs, J.P. y Melvin, S.M. (1993). Call-response surveys for monitoring breeding waterbirds. *Journal of Wildlife Management*, 57 (1), 27–34. <https://doi.org/10.2307/3808996>
- Glenn, E.P., Felger, R.S., Burquez, A., Turner, D.S. (1992). Cienega de Santa Clara: endangered wetland in the Colorado River Delta Sonora, México. *Natural Resources Journal*, 32, 817–824. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(94\)00050-F](https://doi.org/10.1016/0925-8574(94)00050-F)
- Glenn, E.P., Lee, C., Felger, R., Zengel, S. (1996). Effects of water management on the wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology*, 10, 1175-1186. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041175.x>
- Glenn, E., Tanner, R., Mendez, S., Kehret, T., Moore, D., Garcia, J. y Valdes, C. (1998). Growth rates, salt tolerance and water use characteristics of native and invasive riparian plants from the delta of the Colorado River, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 40(3), 281–294. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0443>
- Gomez-Sapiens, M., Soto-Montoya, E. and Hinojosa-Huerta, O. (2013). Shorebird abundance and species diversity in natural intertidal and non-tidal anthropogenic wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering*, 59, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.004>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. <https://earthengine.google.com>
- Harrity, E. and Conway, C. (2020). Satellite transmitters reveal previously unknown migratory behavior and wintering locations of Yuma Ridgway's Rails. *Journal of Field Ornithology*, 91, 300-312. <https://doi.org/10.1111/jfo.12344>
- Hinojosa-Huerta, O., DeStefano, S. and Shaw, W. (2001). Abundance and distribution of the Yuma Clapper Rail (*Rallus longirostris yumanensis*) in the Colorado River delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 49, 171–182. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0841>
- Hinojosa-Huerta, O., DeStefano, S., Shaw, W.W. (2002). Evaluation of call-response surveys for monitoring breeding Yuma Clapper Rails (*Rallus longirostris yumanensis*). *Journal of Field Ornithology*, 73, 151–155. <https://doi.org/10.1648/0273-8570-73.2.151>
- Hinojosa-Huerta O., Valdes-Casillas C. (2004). Waterbird communities and associated wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Studies in Avian Biology*, 27, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.004>
- Hinojosa-Huerta, O., Rivera-Díaz, J.J., Iturribarría-Rojas, H. and Calvo-Fonseca, A. (2008). Population trends of Yuma Clapper Rails in the Colorado River delta, Mexico. *Studies in Avian Biology*, 37, 69-73. [\[PDF\] Population Trends of Yuma Clapper Rails in the Colorado River delta, Mexico \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/312222222)
- Hinojosa-Huerta, O., Guzmán-Olachea R., Butrón-Méndez J., Butrón-Rodríguez J. J., and Calvo-Fonseca A. (2013). Status of marsh birds in the wetlands of the Colorado River delta, Mexico. *Ecological Engineering*, 59, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.058>

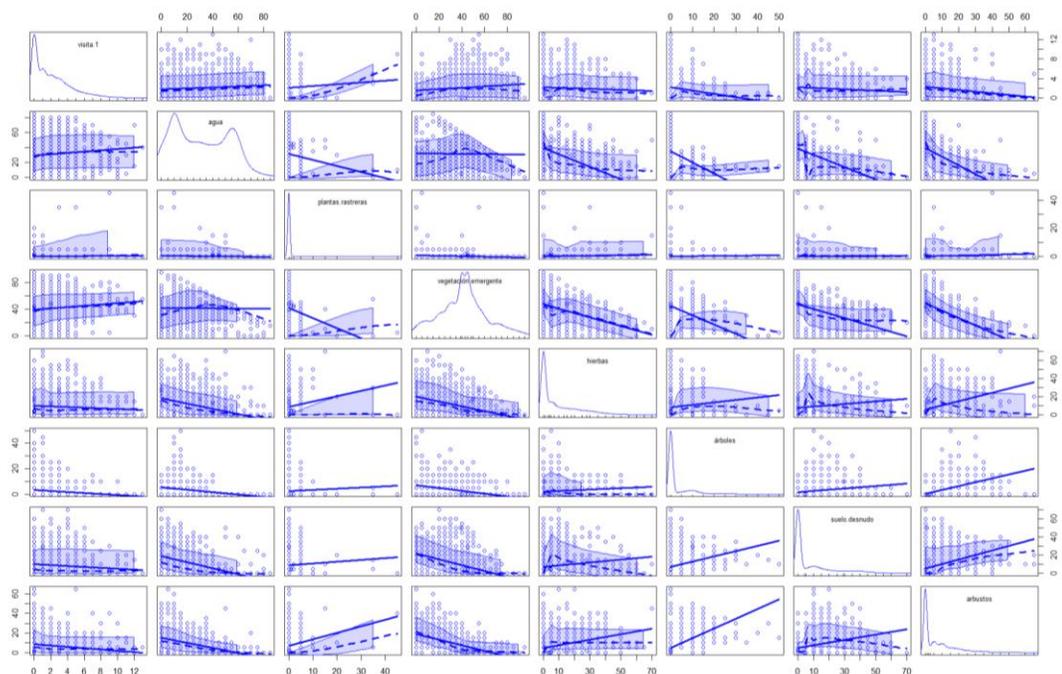
- Jarchow C.J, Nagler P.L and Glenn E.P. (2016). Greenup and evapotranspiration following the Minute 319 pulse flow to Mexico: An analysis using Landsat 8 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data. *Ecological Engineering*, 106, 776-783. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.007>
- Lomeli-Banda M., Ramírez-Hernández J., Rodríguez-Burgueño J.E and Salazar -Briones C. (2021). The role of hydrological processes in ecosystem conservation: Comprehensive water management for a wetland in an arid climate. *Hydrological Processes*, 35(2), 1 -16. <https://doi.org/10.1002/hyp.14013>
- Marty, J., and R. Unnasch. (2015). Yuma Clapper Rail (*Rallus longirostris yumanensis* Dickey) (CLRA) Basic Conceptual Ecological Model for the Lower Colorado River. Lower Colorado River Multi-Species Conservation Program. Submitted to the Bureau of Reclamation, Boulder City, Nevada, by Sound Science, LLC, Boise, Idaho. 89. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34990.51528>
- Mexicano L., Glenn E.P, Hinojosa-Huerta O., Garcia-Hernandez J., Flessa K and Hinojosa-Corona A. (2013). Long-term sustainability of the hydrology and vegetation of Cienega de Santa Clara, an anthropogenic wetland created by disposal of agricultural drain water in the delta of the Colorado River, Mexico. *Ecological Engineering*, 59, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.096>
- Mexicano L, Nagler P.L, Zamora-Arroyo F. y Glenn P.E. (2013). Vegetation dynamics in response to water inflow rates and fire in a brackish *Typha domingensis* Pers. marsh in the delta of the Colorado River, Mexico. *Ecological Engineering*, 59, 167 175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.046>
- Morin P.J. (2011). *Community Ecology*. (2<sup>nd</sup> ed). Blackwell Publishing. The Atrium Southern Gate, Chichester, West Sussex, 90 -110.
- Newton I. (2008). *The Migration Ecology of Birds*. Elsevier publishing, San Diego, CA. 823 -835.
- Ohmart, R. D. and R. E. Tomlinson. (1977). Foods of western Clapper Rails. *Wilson Bulletin*, 89, 332-336. [Foods of Western Clapper Rails \(unm.edu\)](https://www.unm.edu/~ohmart/Foods%20of%20Western%20Clapper%20Rails.pdf)
- Piest, L. and Campoy, J. (1999). Report of Yuma clapper rail surveys at the Cienega de Santa Clara, Sonora. Report to Arizona Game and Fish Department, Yuma, AZ and the Upper Gulf of California and Colorado River Delta Biosphere Reserve — INE/SEMARNAP Mexico. [ArchivoPDF]
- Pitt, J. e Hinojosa-Huerta, O. (2022). How the Colorado River Delta Might Survive the Compact. Robison J. A. (Ed). *Cornerstone at the Confluence: Navigating the Colorado River Compact's Next Century*. The University of Arizona Press, 108- 135 <https://doi.org/10.2307/j.ctv2z6qfp2.10>
- R Core Team. 2023. R: A language and environmental for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Australia. Version 4.3.1. <https://www.R-project.org/>.
- Ribic, C. A., Lewis, S J., Melvin, Bart J y Peterjohn B. (1999). Proceedings of the marsh bird monitoring workshop—Patuxent Research Refuge, 26–28 April 1998. U.S. Fish Wildlife Service and U.S. Geological Survey, Laurel, MD, 1 – 57. [Proceedings of the Marsh Bird Monitoring Workshop \(fdlp.gov\)](https://www.fdlp.gov/~/media/USFWS/Reports/Proceedings_of_the_Marsh_Bird_Monitoring_Workshop_1998.pdf)
- Rosenberg K.V., Ohmart R.D., Hunter W.C., and Anderson B.W. (1991). *Birds of the Lower Colorado River Valley*. The University of Arizona. Arizona, 416 pp.
- Rusk, M. K. (1991). Selenium risk to Yuma clapper rails and other marsh birds of the lower Colorado River. [M.S. Thesis, University of Arizona, Tucson.] <https://repository.arizona.edu/handle/10150/278053>

- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Servicio de Información sobre Sitios Ramsar.(2022). Sistema de Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado. Consultado el 12 de Julio del 2022. <https://rsis Ramsar.org/es/ris/1822?language=es>
- Smith P. M. (1975). Habitat requirements and observations on the Clapper Rail (*Rallus longirostris yumanensis*). [MSc. thesis. Arizona State University] [Archivo PDF].
- Todd, R.L. 1986. A saltwater marsh hen in Arizona: a history of the Yuma Clapper Rail (*Rallus longirostris yumanensis*). Arizona Game and Fish Department, Federal Aid Project W-95-R, Completion Report, Phoenix, AZ. [Archivo PDF]
- Un-spider, “Normalized Burn Radio (NBR)”, website, USGS: <http://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
- Wickham H. (2016). Ggplot2: Elegant graphics for data analysis. (2<sup>nd</sup> ed). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open-Source Software*, 4(43), pp. 1686. <https://tidyverse.tidyverse.org/articles/paper.html>
- Wood S. N. (2001). mgcv: GAMs and generalized ridge regression for R. *R News*, 1, 20-25. <https://journal.r-project.org/articles/RN-2001-015/>
- Wood, Simon N. (2008). "Fast stable direct fitting and smoothness selection for generalized additive models". *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 70 (3), 495–518. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2007.00646.x>
- Wood S.N. (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. (2<sup>nd</sup> ed). Chapman and Hall/CRC Press.
- Yuma Clapper Rail Recovery Team. (2000). Yuma Clapper Rail survey protocol. U.S Fish and Wildlife Service, Phoenix, AZ. [Archivo PDF].
- Zalewski M., Janauer G.A and Jolankai G. (1997). “Ecohydrology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources”, UNESCO International Hydrological Programme (IHP), Technical Document in Hydrology No. 7. IHP-V Projects 2.3/2.4, Paris, France. [https://www.academia.edu/84413365/Ecohydrology\\_a\\_new\\_paradigm\\_for\\_the\\_sustainable\\_use\\_of\\_aquatic](https://www.academia.edu/84413365/Ecohydrology_a_new_paradigm_for_the_sustainable_use_of_aquatic)
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., Garcia, J., Nagler, P., de la Garza, M., Parra, I. (2005). Conservation Priorities in the Colorado River delta Mexico and the

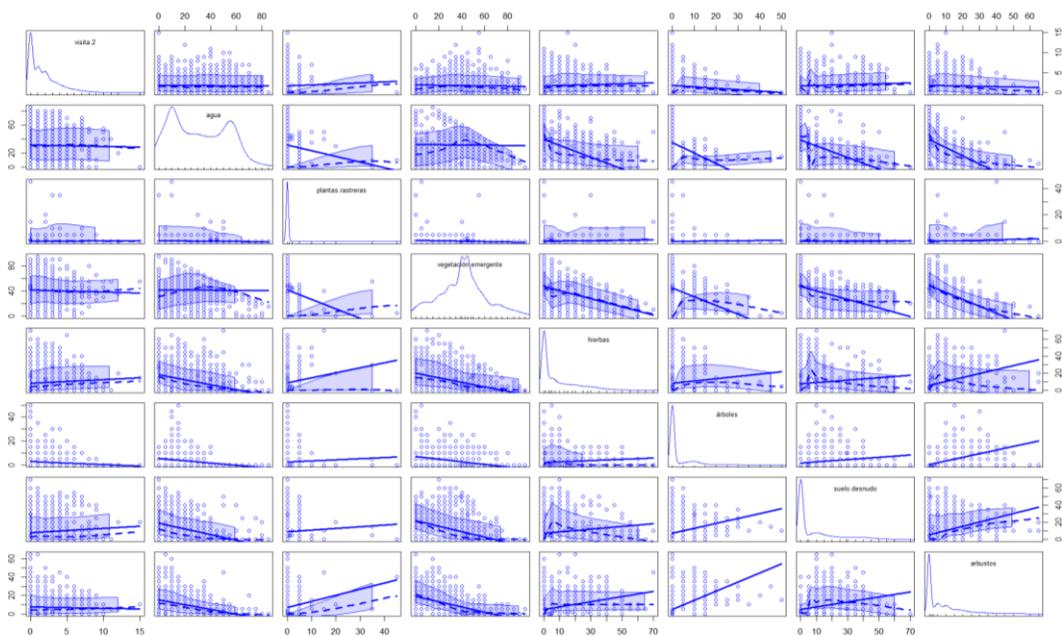
United States. Reporte preparado por Sonoran Institute, Environmental Defense, University of Arizona, Pronatura Noroeste Dirección de Conservación Sonora, CIAD y WWF. ISBN 968-817-726-1, 109 pp. [Archivo PDF].

Zengel S.A., Meretsky V.J., Glenn E., Felger R.S., and Ortiz D. (1995). Cienega de Santa Clara, a remnant wetland in the Rio Colorado Delta (Mexico): vegetation distribution and the effects of water flow reduction. *Ecological Engineering*, 4, 19-36. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(94\)00050-F](https://doi.org/10.1016/0925-8574(94)00050-F)

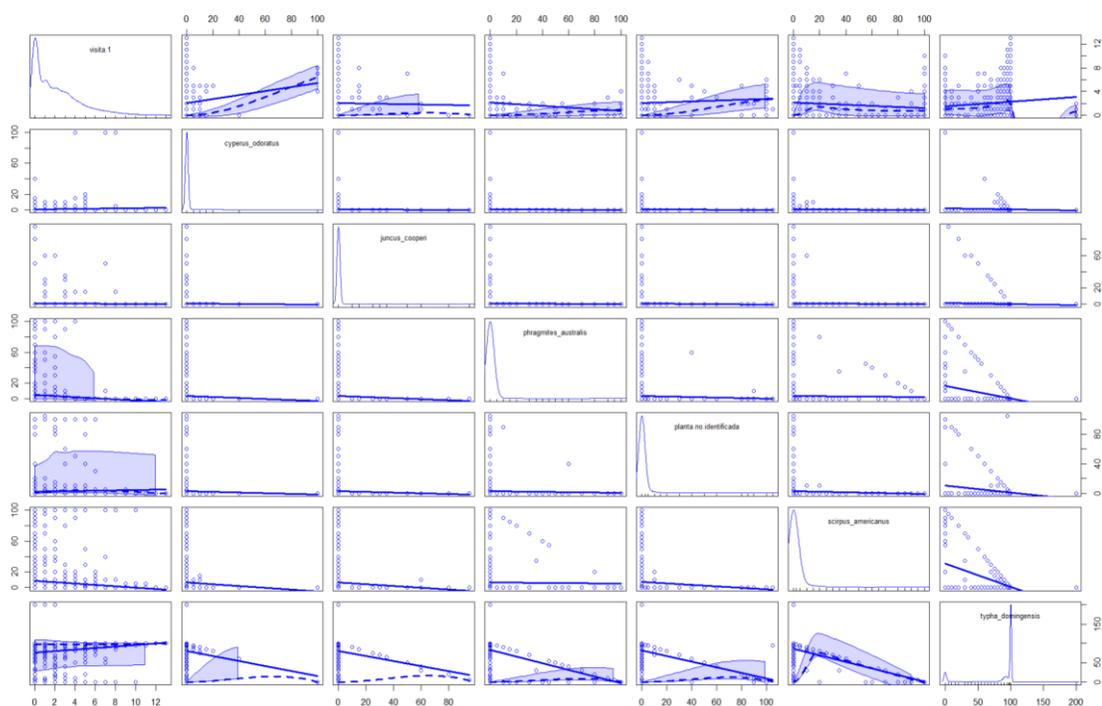
## Anexo I. Material suplementario



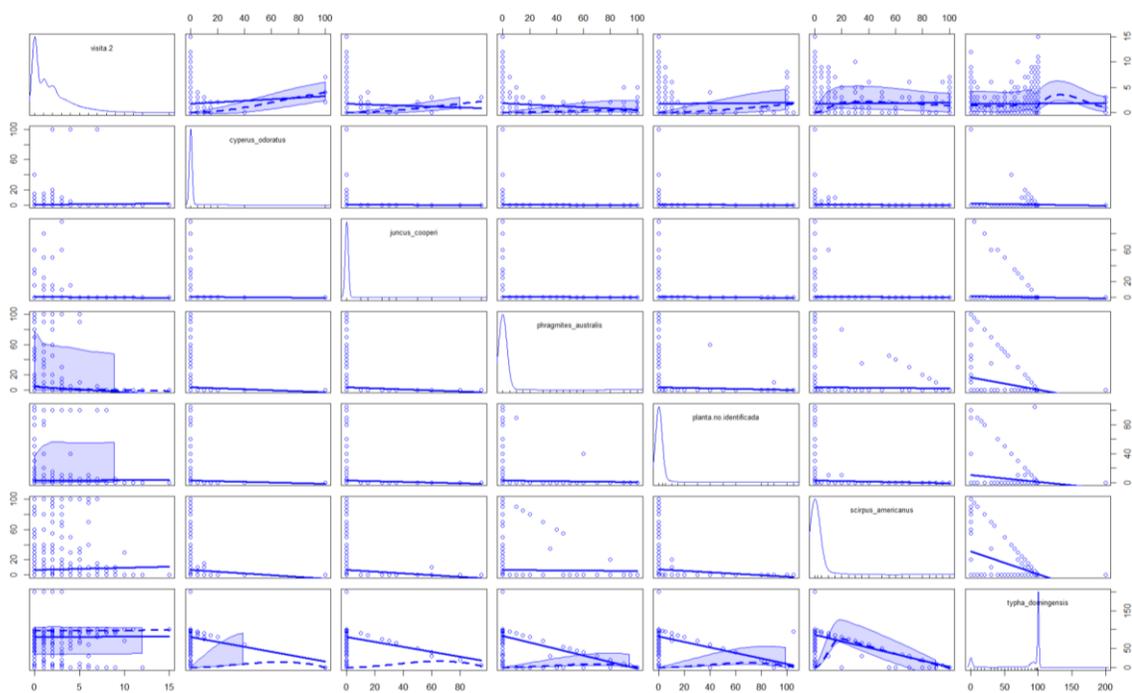
**Figura 12.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y los diferentes estratos (agua, plantas rastreras, vegetación emergente, hierbas, arbustos, árboles y suelo desnudo)



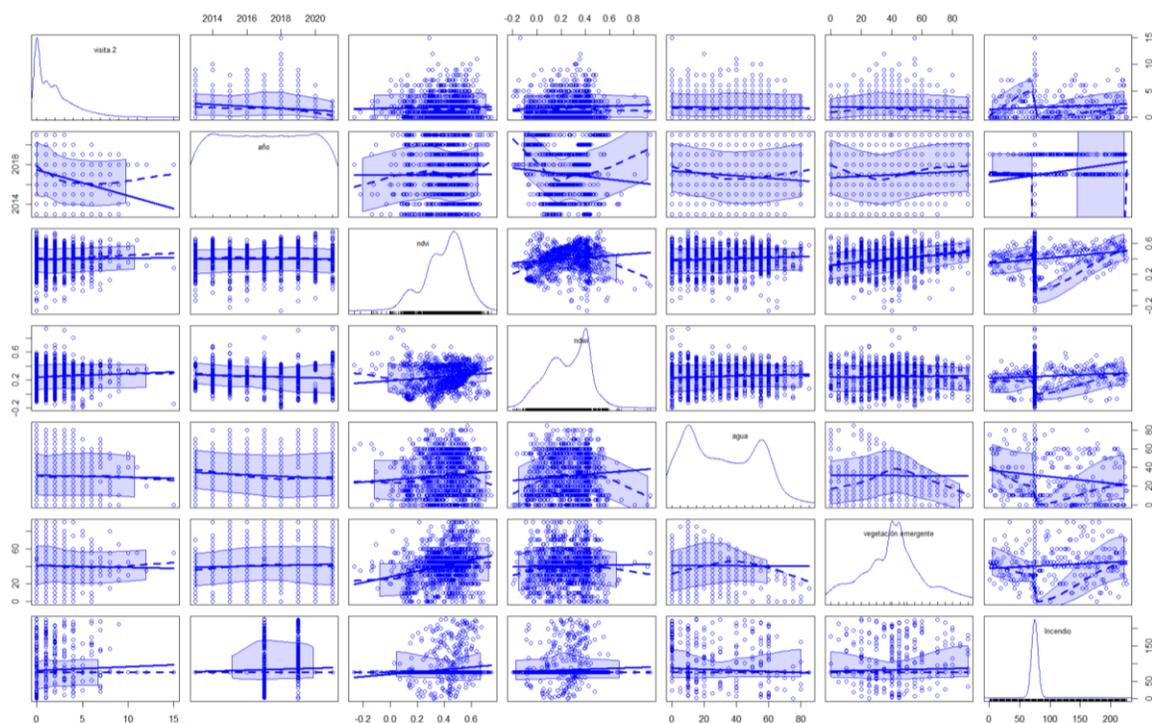
**Figura 13.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y los diferentes estratos (agua, plantas rastreras, vegetación emergente, hierbas, arbustos, árboles y suelo desnudo)



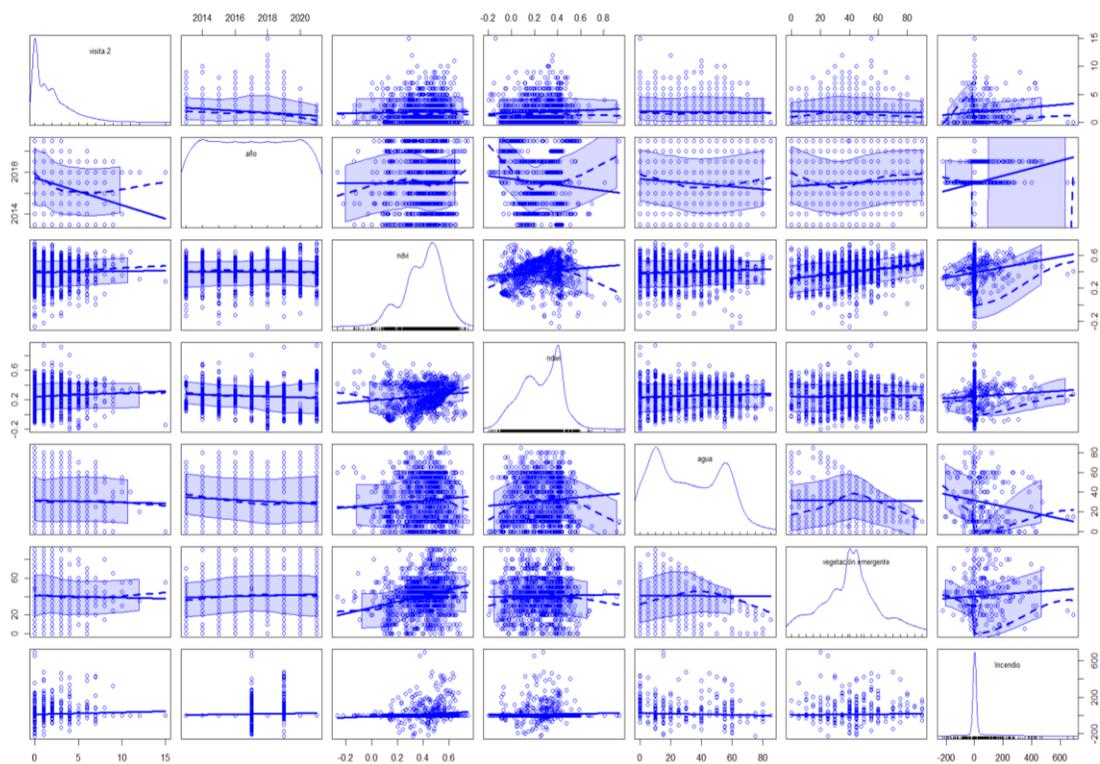
**Figura 14.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y las diferentes especies de plantas emergentes (*Cyperus odoratus*, *Juncus cooperi*, *Phragmites australis*, *Scirpus americanus*, *Typha dominguensis*, planta no identificada)



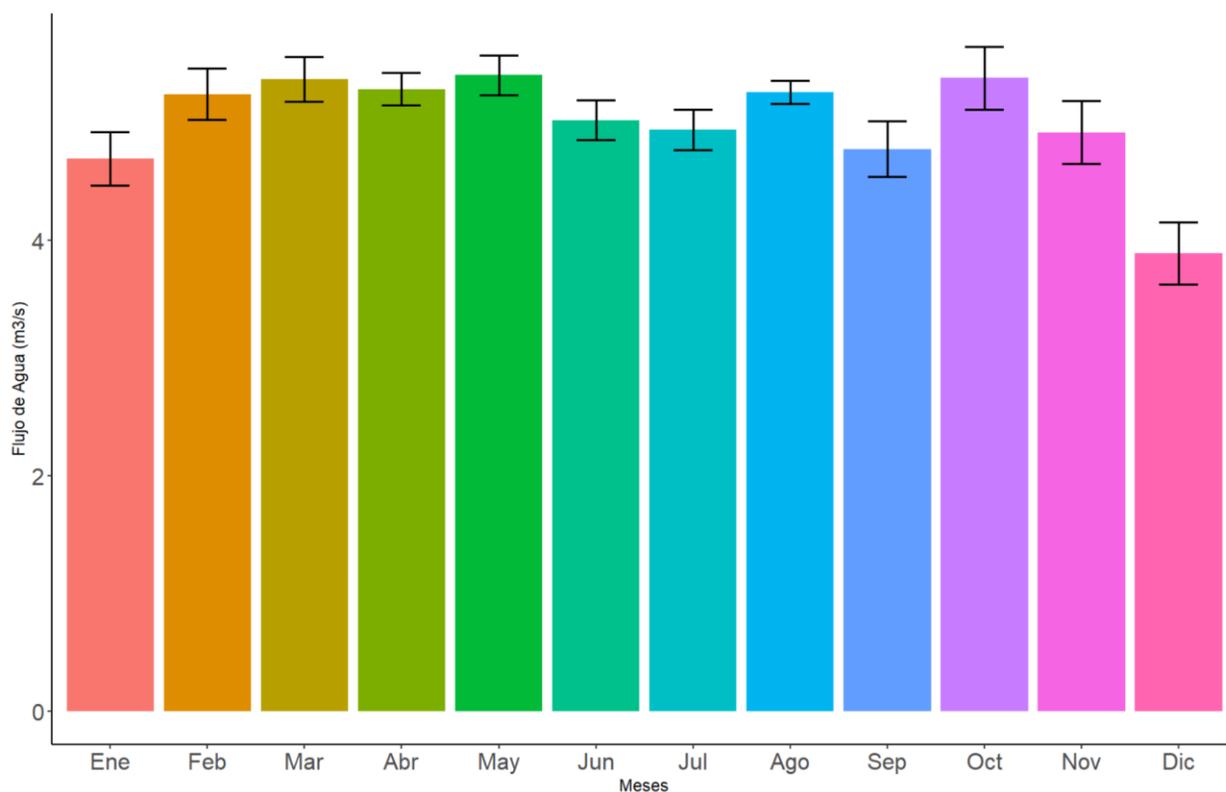
**Figura 15.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y las diferentes especies de plantas emergentes (*Cyperus odoratus*, *Juncus cooperi*, *Phragmites australis*, *Scirpus americanus*, *Typha dominguensis*, planta no identificada)



**Figura 16.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la primera visita) y el año, NDVI, NDWI, agua, vegetación emergente e incendios



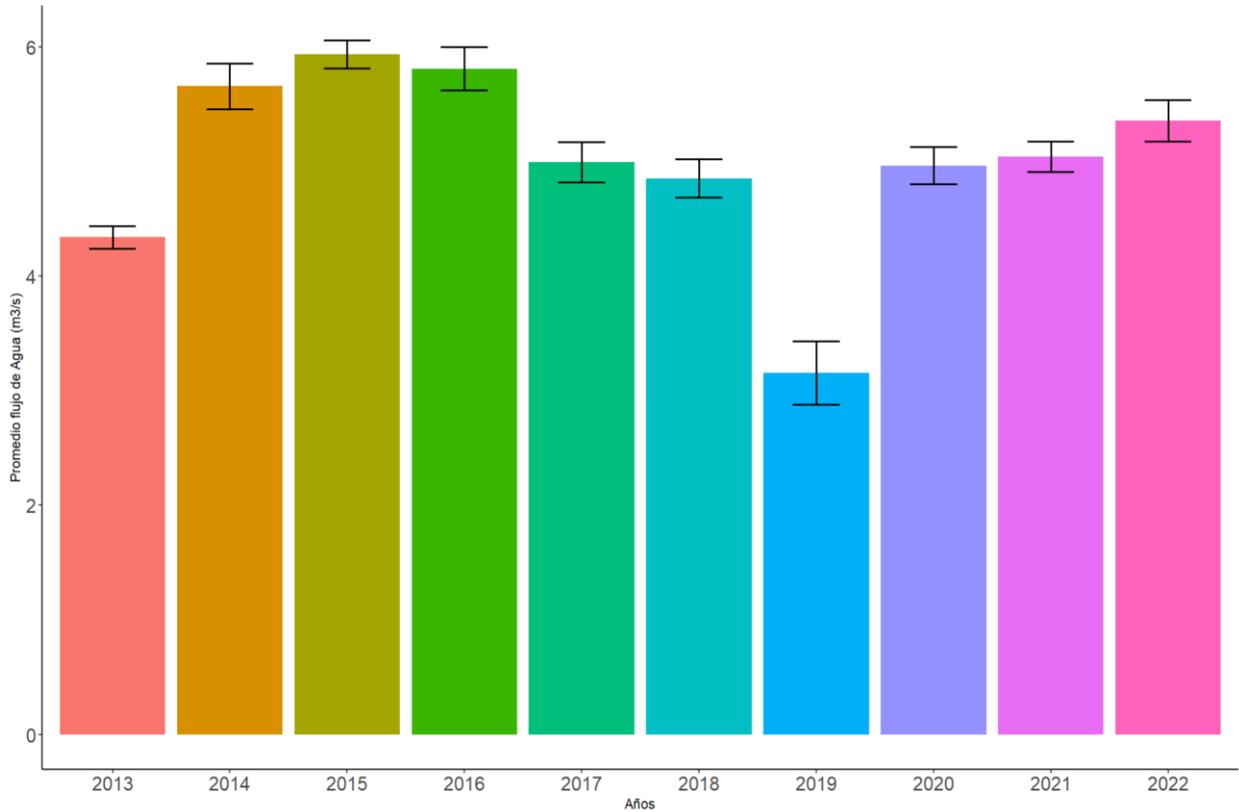
**Figura 17.** Matriz de dispersión donde se muestran la correlación entre la variable respuesta (abundancia relativa de la segunda visita) y el año, NDVI, NDWI, agua, vegetación emergente e incendios



**Figura 18.** Promedio mensual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022



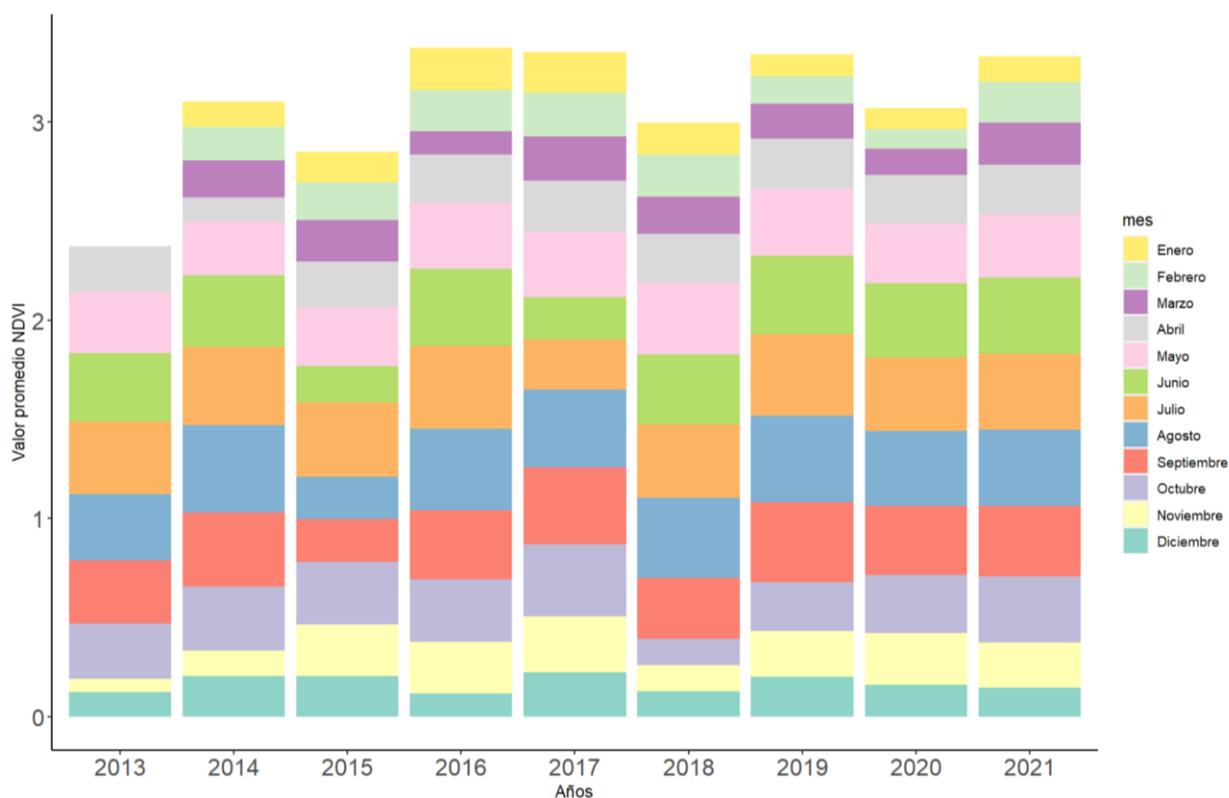
**Figura 19.** Gráfico de barras apiladas del promedio mensual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022



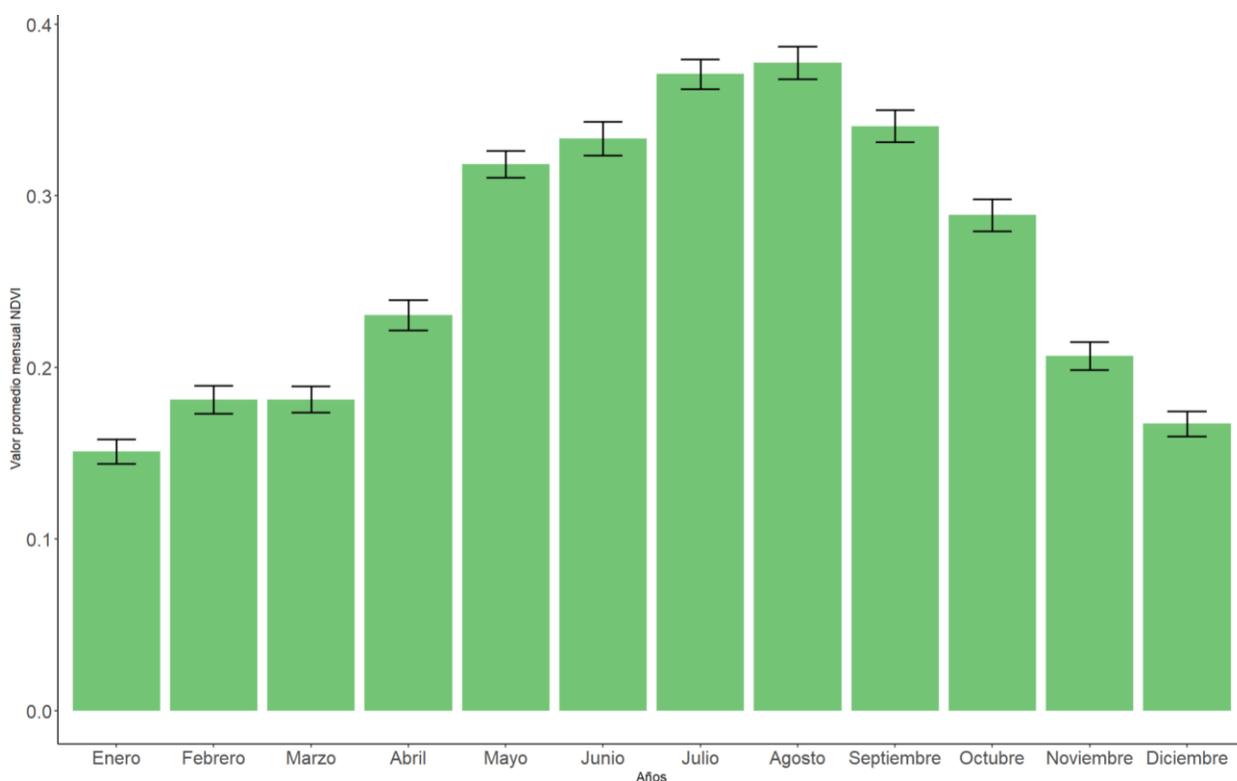
**Figura 20.** Promedio anual del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2022



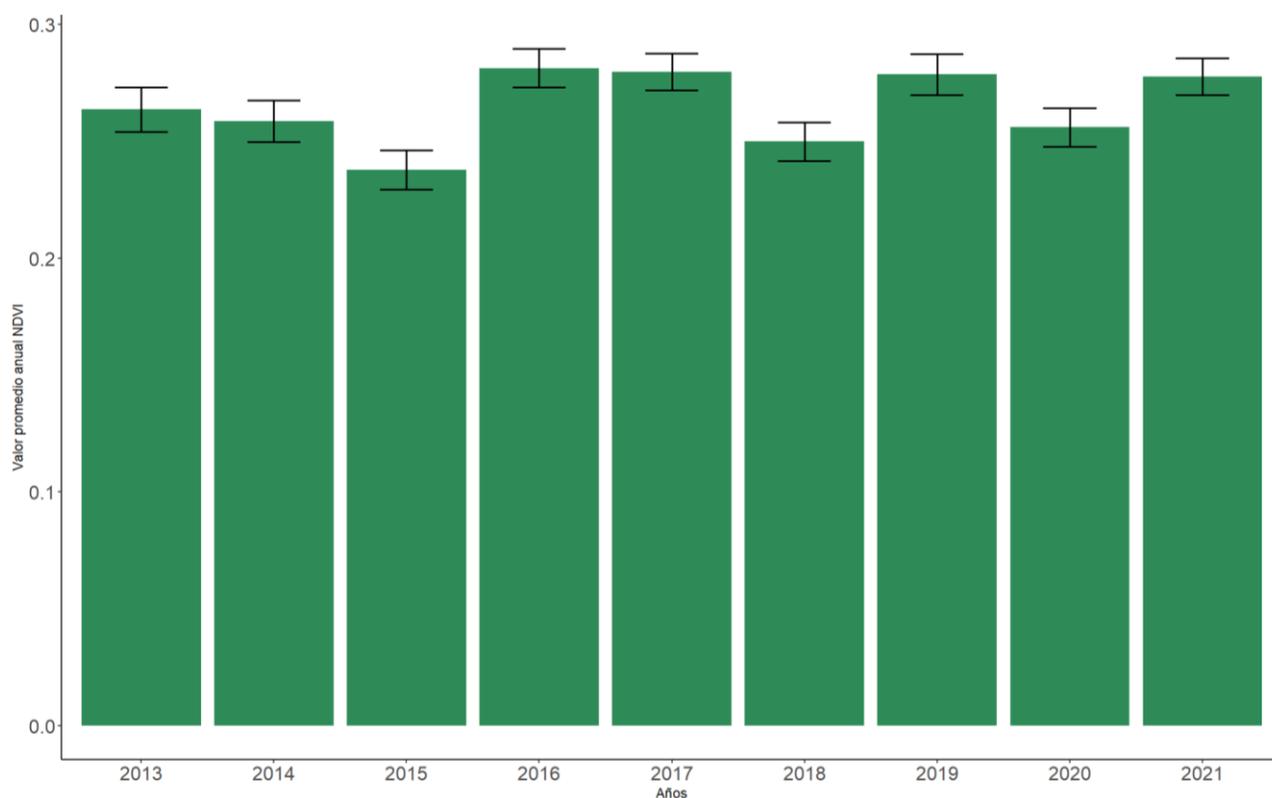
**Figura 21.** Promedio estacional del volumen de los flujos de agua enviados a la Ciénega de Santa Clara e durante el periodo de 2013 a 2022



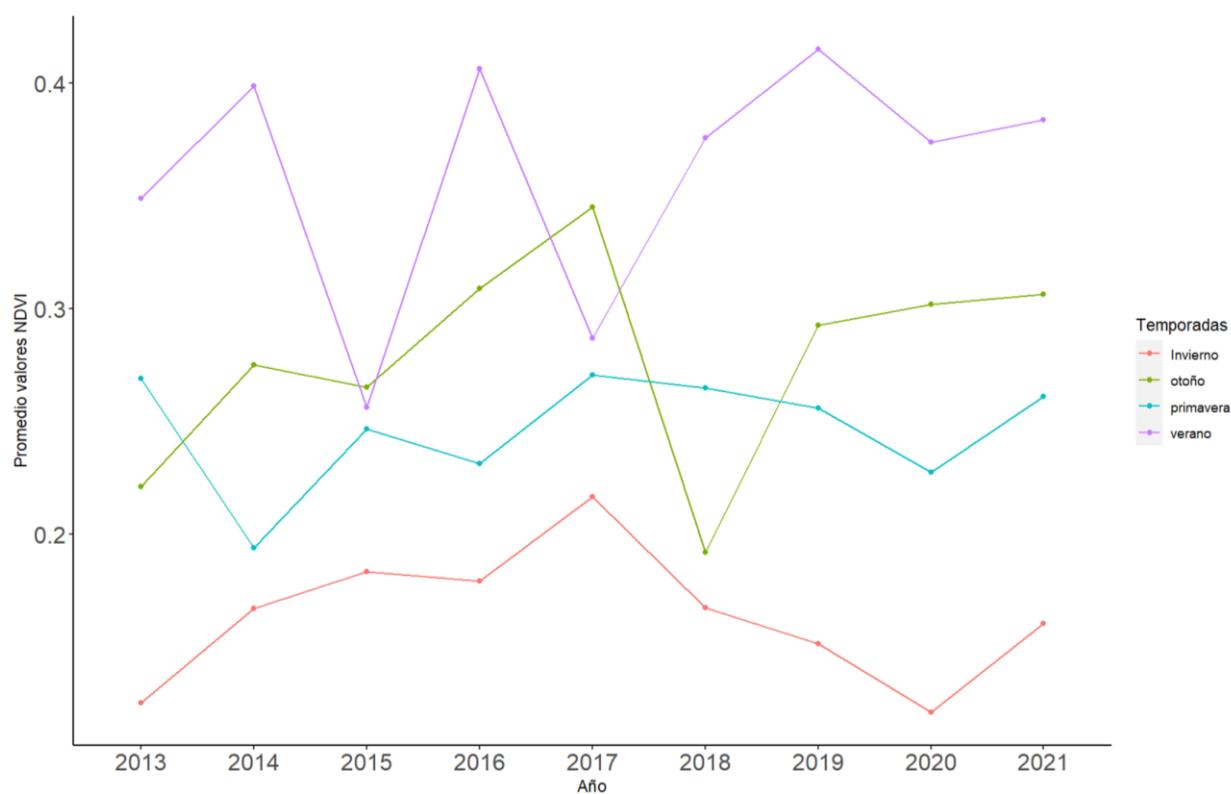
**Figura 22.** Gráfico de barras apiladas del promedio mensual Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2021



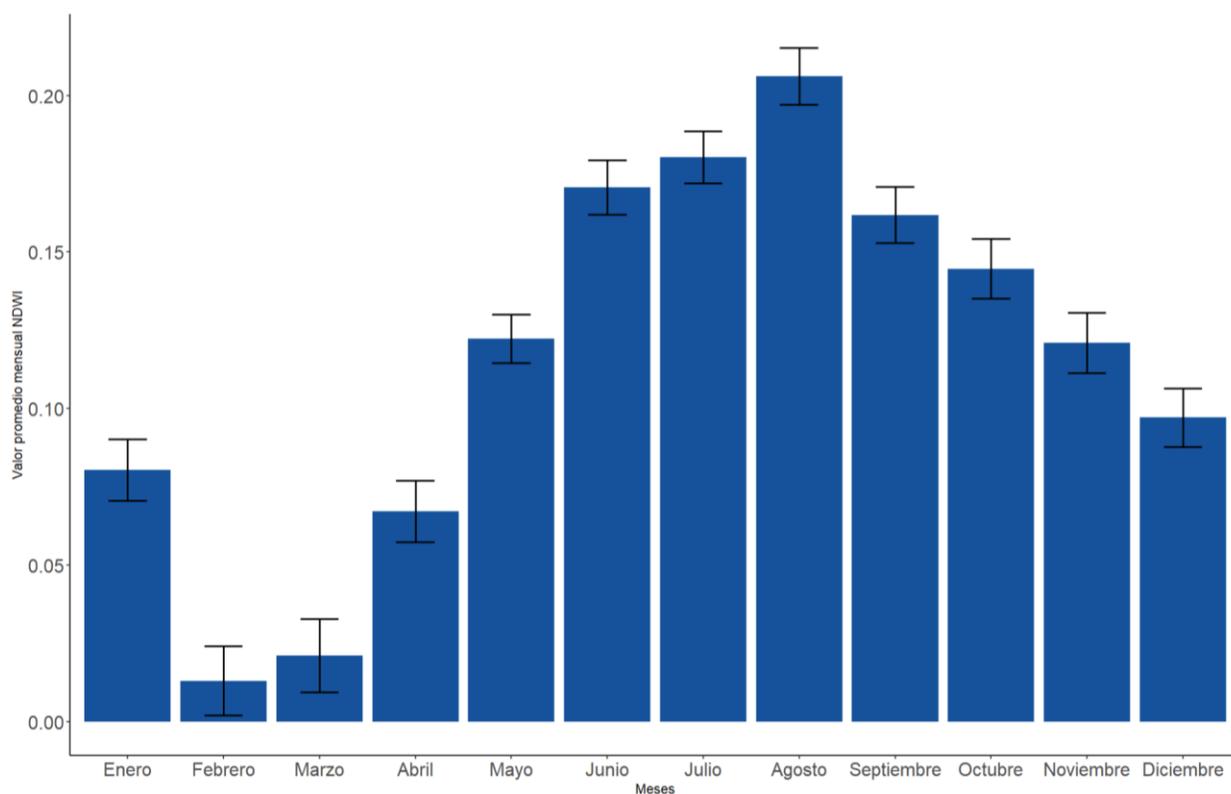
**Figura 23.** Valores promedio mensuales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021



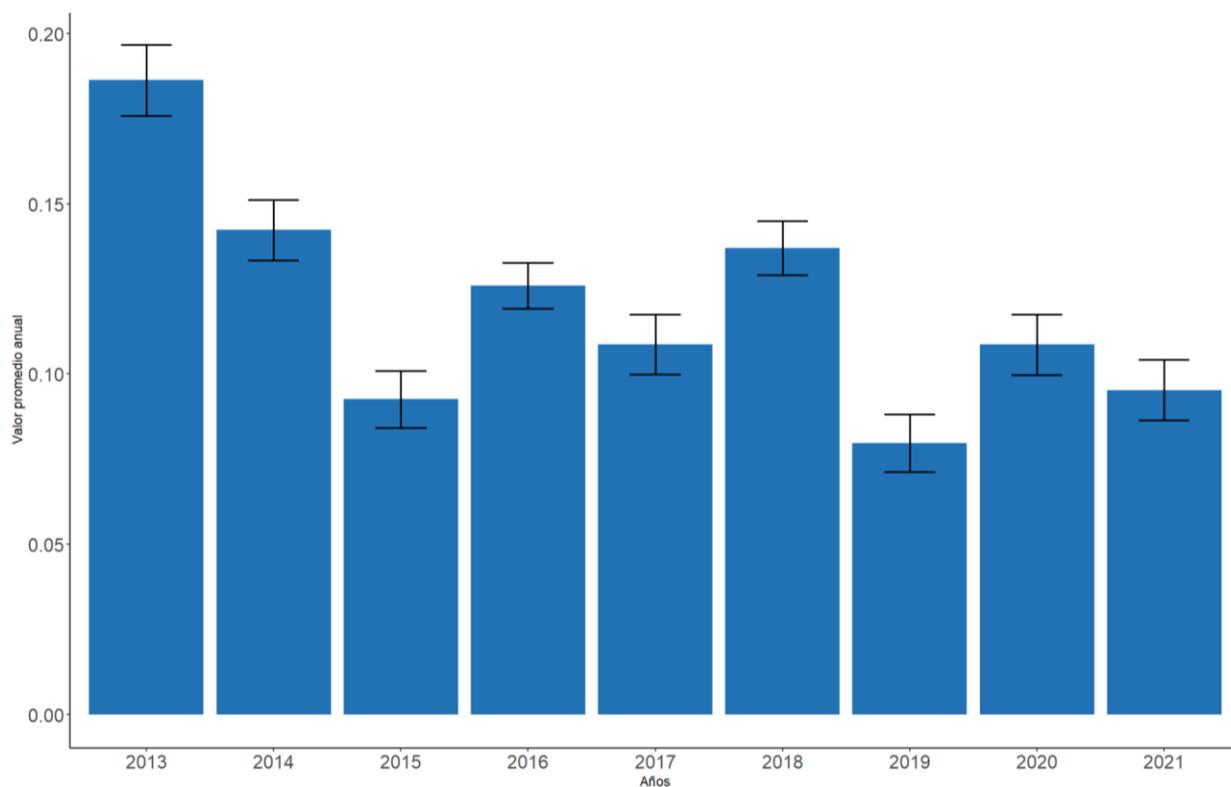
**Figura 24.** Valores promedio anuales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021



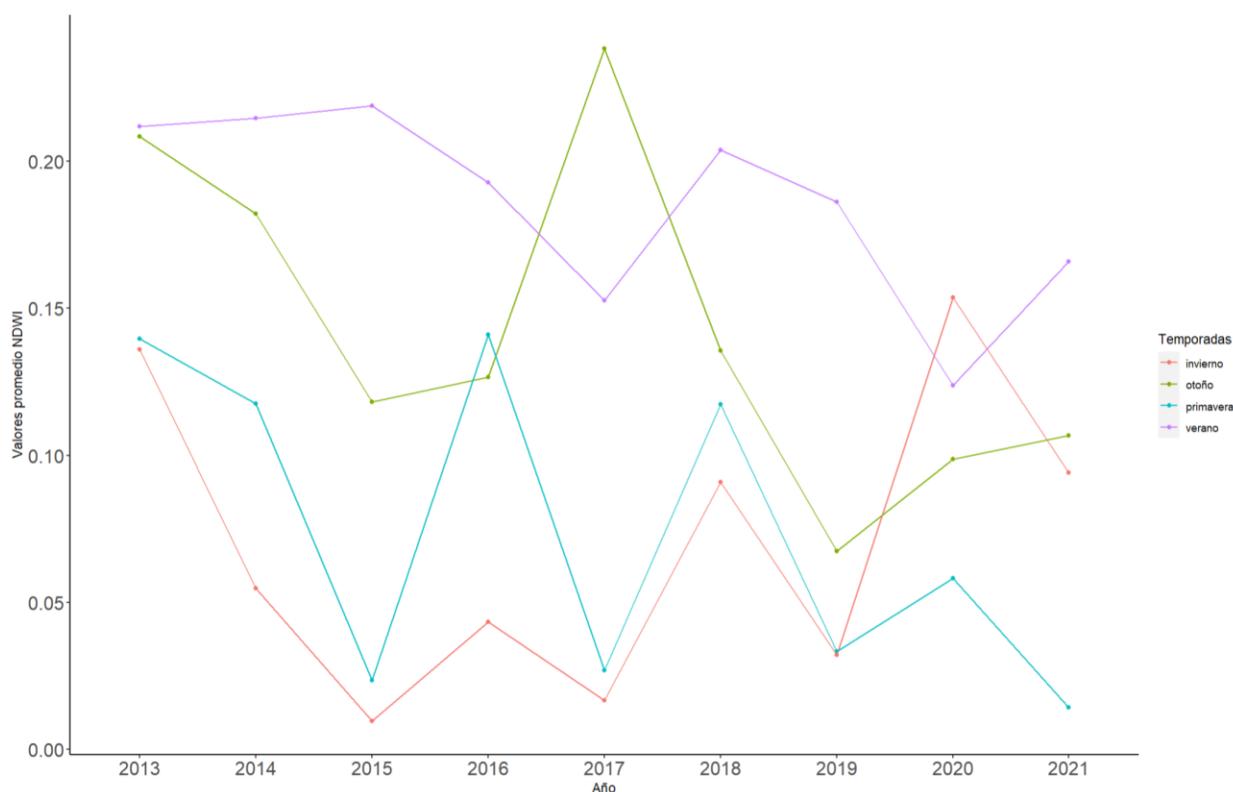
**Figura 25.** Valores promedio estacionales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) de la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de 2013 a 2021



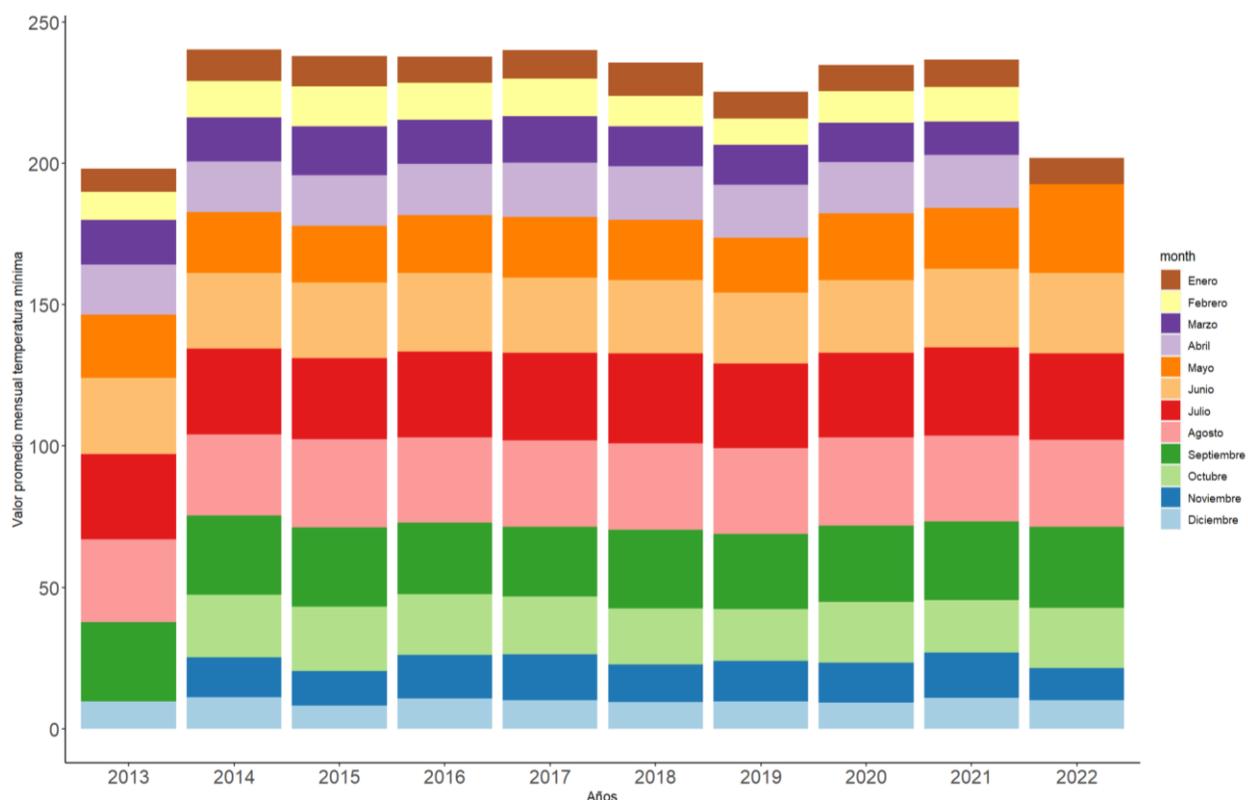
**Figura 26.** Valores promedio mensuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021



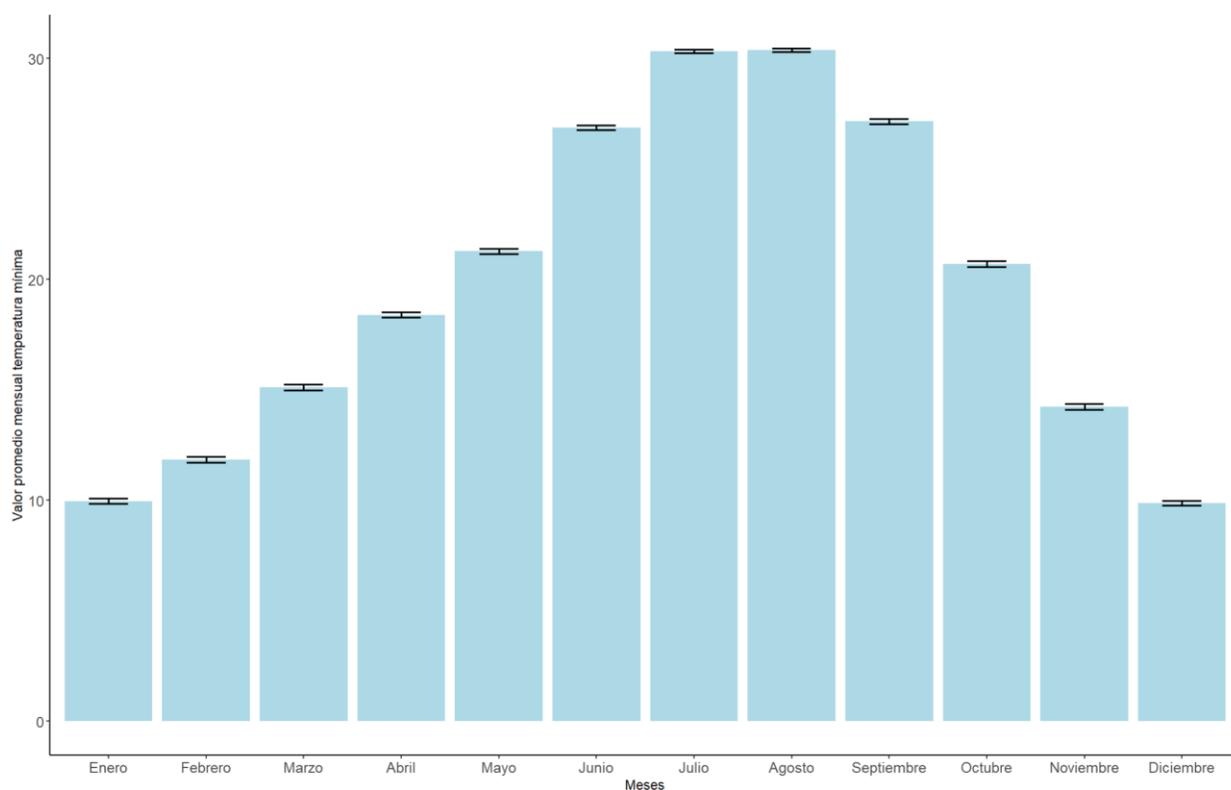
**Figura 27.** Valores promedio anuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021



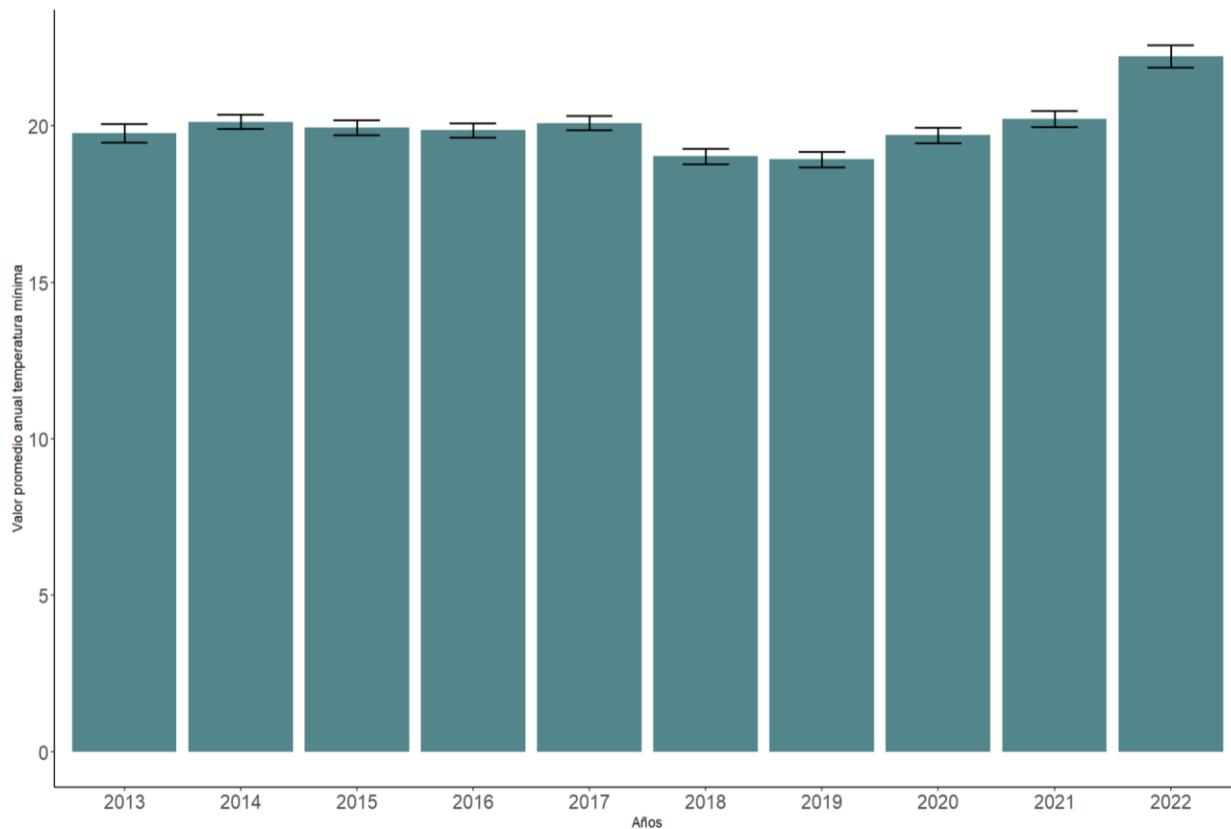
**Figura 28.** Valores promedio anuales del Índice de Agua de Diferencia Normalizado (NDWI) en la Ciénega de Santa Clara, Sonora para el periodo de 2013 a 2021



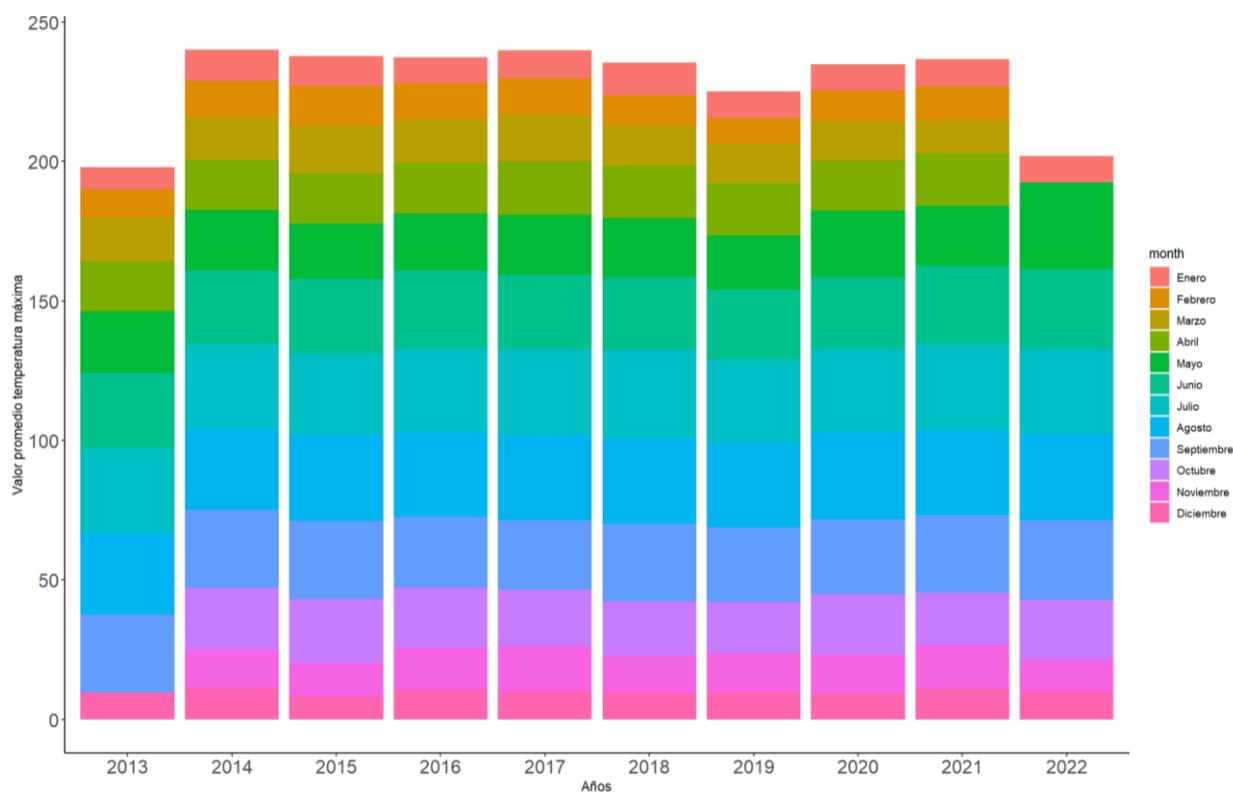
**Figura 29.** Gráfico de barras apiladas del promedio mensual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022



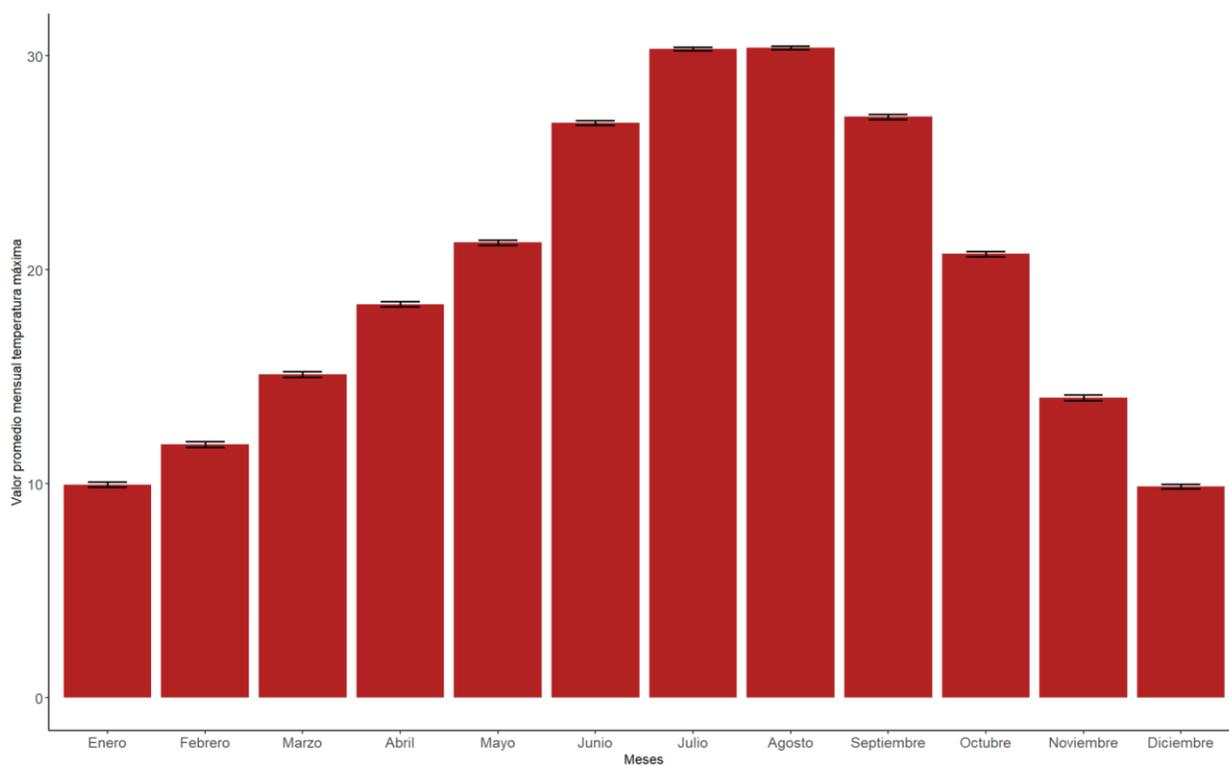
**Figura 30.** Promedio mensual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022



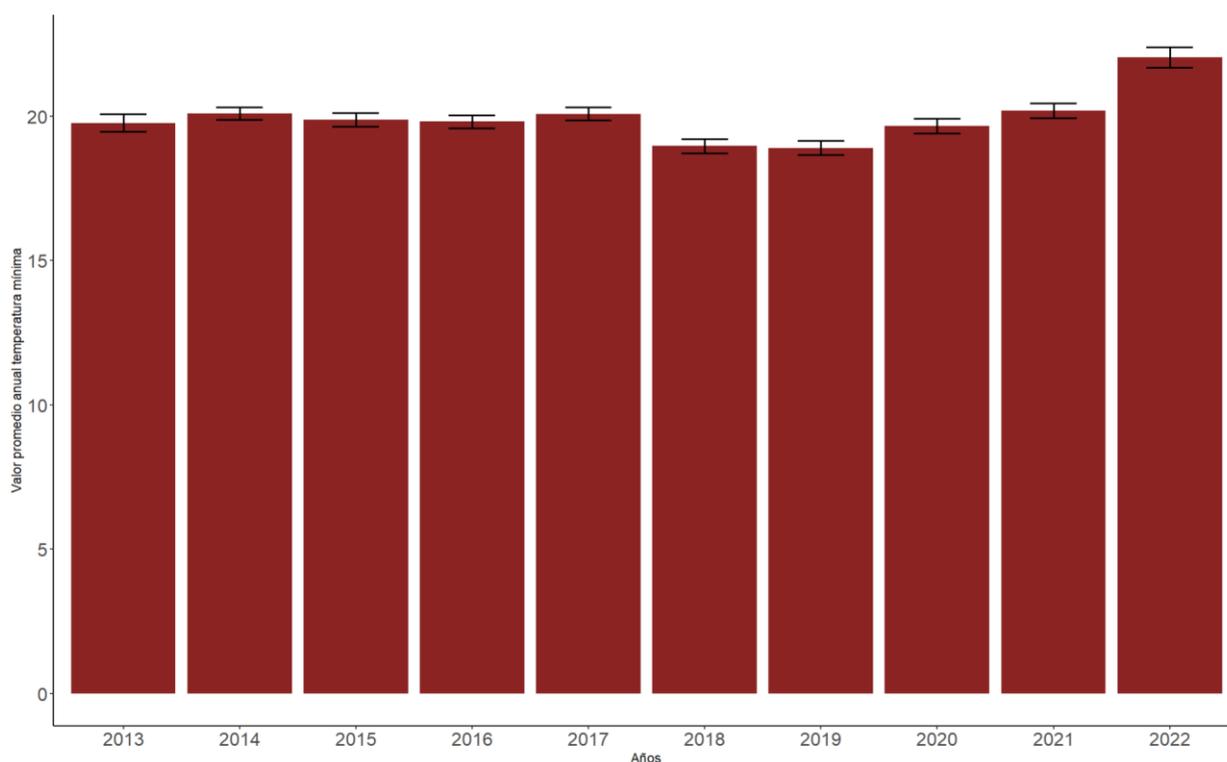
**Figura 31.** Promedio anual de la temperatura mínima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022



**Figura 32.** Gráfico de barras apiladas del promedio mensual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022

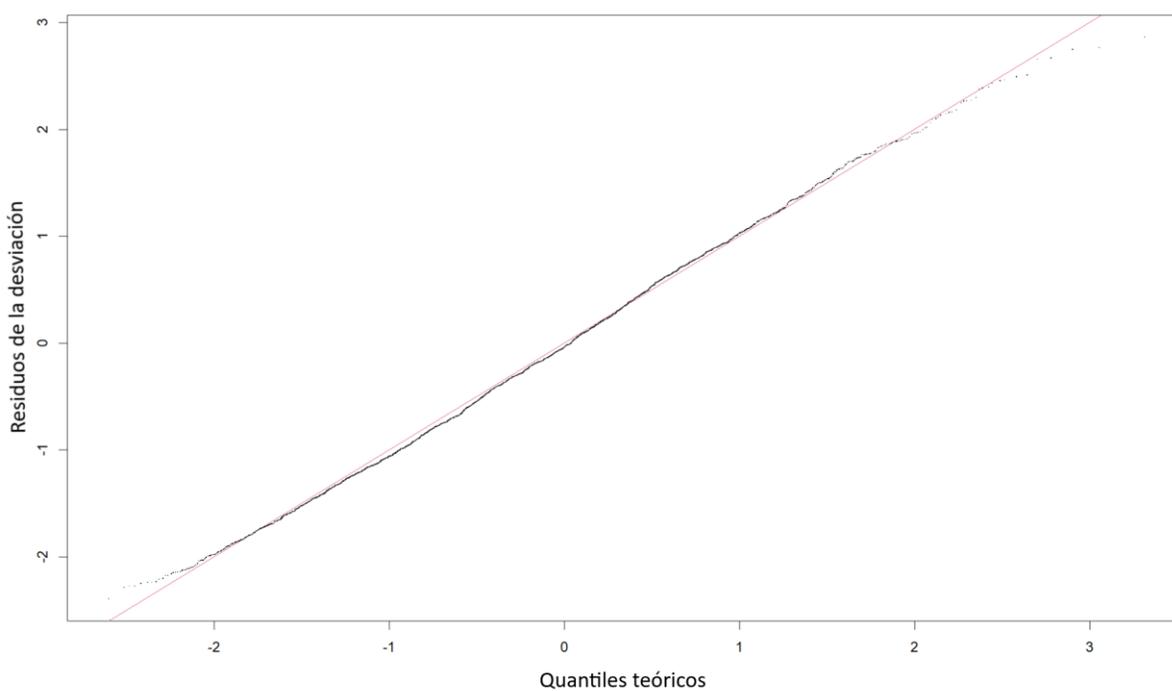


**Figura 33.** Promedio mensual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022

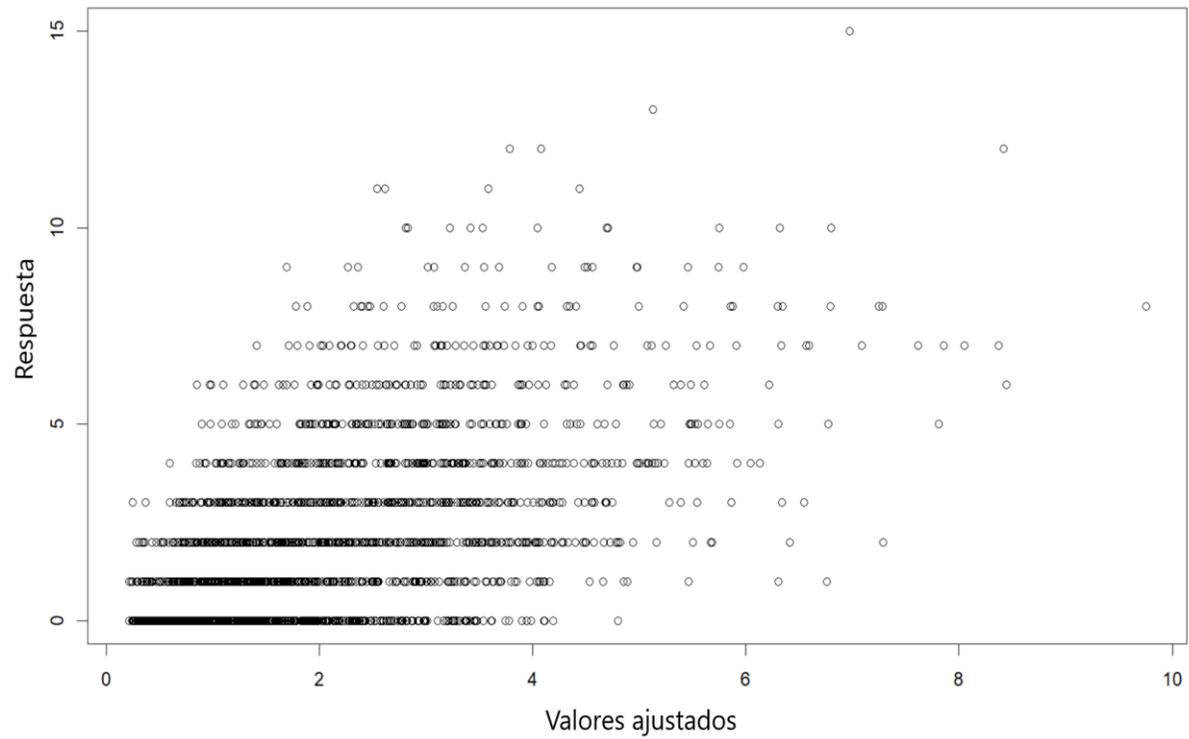


**Figura 34.** Promedio anual de la temperatura máxima para la Ciénega de Santa Clara (tomada de la estación automatizada de San Luis Río Colorado) para el periodo de 2013 a 2022

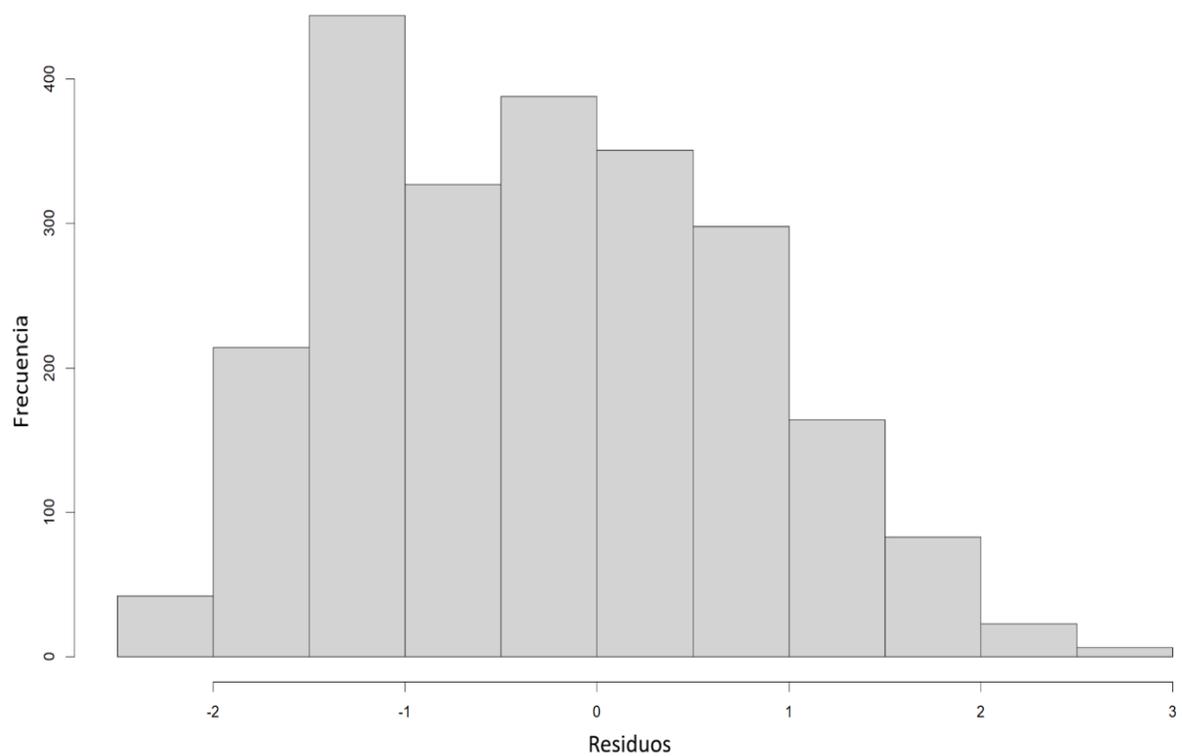
### Resultados de la verificación del modelo ecológico (2013 a 2022)



**Figura 35.** Gráfico de cuantiles que compara los valores residuales del modelo ecológico con una distribución normal



**Figura 36.** Gráfico de la respuesta contra los valores ajustados del modelo ecológico



**Figura 37.** Histograma de residuos del modelo ecológico. Histograma de residuos del modelo ecológico

### Resultados de la verificación del modelo de manejo (2013 a 2022)

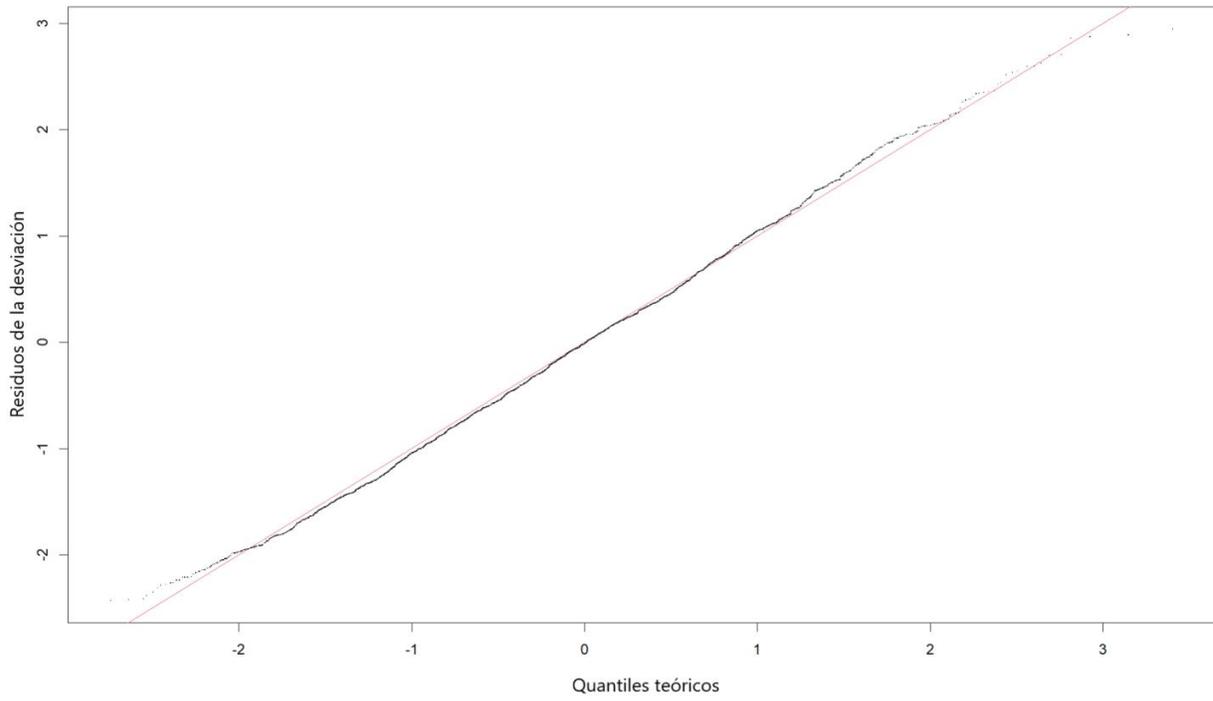


Figura 38. Gráfico de cuantiles que compara los valores residuales del modelo de manejo con una distribución normal

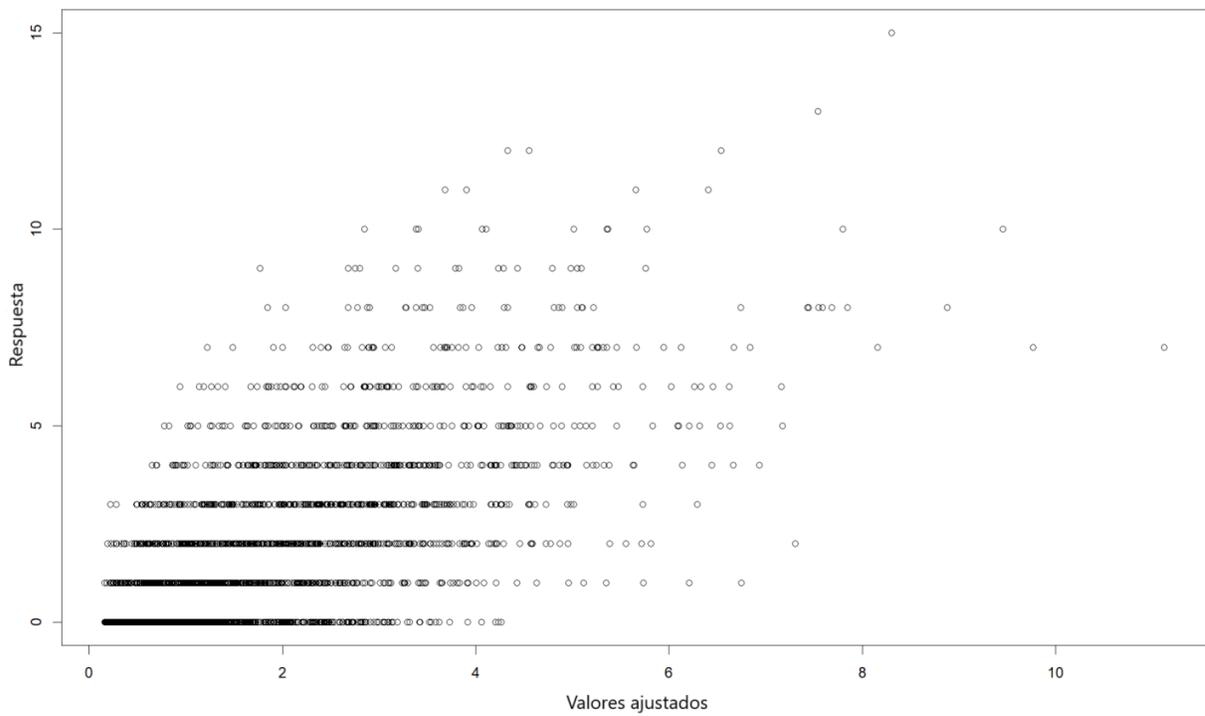
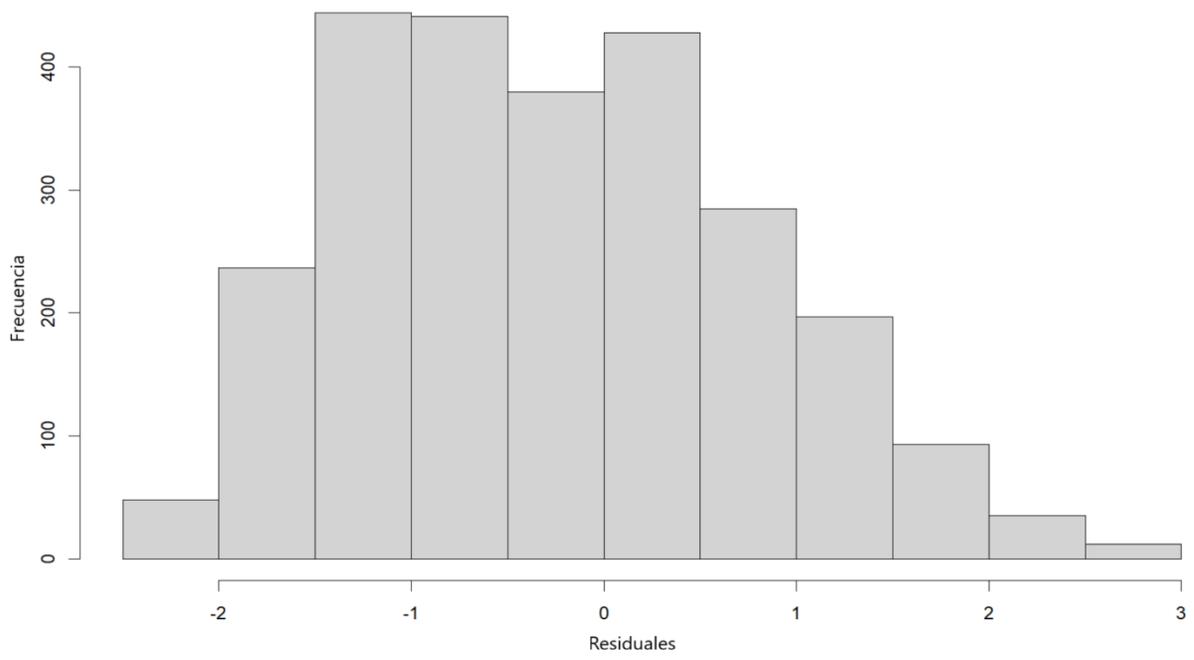


Figura 39. Gráfico de la respuesta contra los valores ajustados para el modelo de manejo



**Figura 40.** Histograma de residuos del modelo ecológico