



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN BAHÍA SAN QUINTÍN, MÉXICO; BAJO
ESCENARIOS DE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR POR CAMBIO CLIMÁTICO Y
POTENCIALES EFECTOS EN LOS HUMEDALES**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGA

PRESENTA:

CRISTINA ADONAY NIETO LUCERO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA; ENERO DE 2024



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA**



**“IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN BAHÍA SAN QUINTÍN, MÉXICO; BAJO
ESCENARIOS DE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR POR CAMBIO CLIMÁTICO Y POTENCIALES
EFECTOS EN LOS HUMEDALES”**

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGA
PRESENTA:

**Cristina Adonay Nieto Lucero
355552**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


**Dra. Violeta Zetzangari Fernández Díaz
DIRECTOR**


**Dra. Patricia Alvarado Graef
SECRETARIO**


**Dra. Gabriela de Jesús Arreguín
Rodríguez
SINODAL**


**Dra. Rosa María Carmona Enríquez
SINODAL**


**Dr. Jorge Manuel López Calderon
SINODAL**

“Por la Realización Plena del Ser”

COMITÉ ASIGNADO:

Directora: DRA. VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

Sinodal: DRA. GABRIELA DE JESÚS ARREGUÍN RODRÍGUEZ

Sinodal: DRA. ROSA MARÍA CARMONA ENRIQUEZ

Sinodal: DR. JORGE MANUEL LÓPEZ CALDERÓN

Secretario: DRA. PATRICIA ALVARADO GRAEF

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS, UABC; ENSENADA, MÉXICO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ



FIRMA

Agradecimientos

A mi madre, que a pesar de todo me apoyó y me sacó adelante para que yo pudiera terminar mi carrera y aún ahora terminar este trabajo.

A mi padre, que ya no está en este mundo, pero sé que está orgulloso de mí, porque él sabía que lo lograría, incluso cuando yo no lo creía.

A mi directora de tesis, la Dra. Violeta Zetzangari Fernández Díaz, por los ánimos y apoyo a lo largo de este trabajo, y principalmente por la paciencia.

A Blanca Portella Les Heil, quien me proporcionó la beca “Blanca” y que fue patrocinada por David Thornton, John Bowers, Jim DeCoursey, Michael Stabler y Carl Johansson a lo largo de toda mi carrera, les estaré eternamente agradecida por brindarme la oportunidad de estudiar lo que me apasiona.

Y por último, pero no menos importante, a mi novia, que me alentó en esos días difíciles y en los no tan difíciles, porque hay días más complicados que otros, pero lo importante es no quitar el dedo del renglón.

RESUMEN

El Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su último informe de evaluación (AR, 2021) establece que el nivel medio del mar global ha mostrado un apresurado aumento y que continuará subiendo en las próximas décadas, alcanzando valores por encima de 1 m. Esto representa una amenaza para ecosistemas costeros como los humedales y sus servicios ecosistémicos, ya que representa una potencial pérdida de ellos. Bajo este contexto, humedales como el de Bahía San Quintín (BSQ), un ecosistema muy importante por la gama de servicios que presenta, se vuelve especialmente relevante para la avifauna local y migratoria, por brindarles hábitat y refugio. En este trabajo se analizaron los efectos potenciales del aumento del nivel del mar en el humedal de BSQ, haciendo énfasis en la disponibilidad del hábitat para la avifauna y el espacio disponible para la migración de la vegetación de marisma. Mediante el método Bathtub y dos escenarios de inundación que consideran la pleamar máxima registrada actual en BSQ y el aumento del nivel del mar proyectado por el IPCC (AR6, 2021) para finales de siglo, se identificaron como zonas propensas a inundarse: Molino Viejo, La Chorera, Brazo Este, el margen del brazo de Punta Mazo, Punta Azufre y la región agrícola norte adedaña a Punta Azufre; siendo Molino Viejo, Brazo Este, Punta Azufre y la región agrícola norte adedaña a esta misma área las que presentan las mayores extensiones de inundación. El área total inundable cuantificada en el escenario actual, es de 24 km² y de 31 km² considerando el aumento del nivel del mar, lo que significa un incremento del área inundable actual en un 29% para finales de siglo. Respecto a la disponibilidad de hábitat, las marismas de Molino Viejo, Brazo Este, Punta Azufre, las adedañas a La Chorera y brazo de Monte Mazo se encontrarán totalmente por debajo del nivel del mar actual para finales de siglo. Con base en la disponibilidad actual de terreno, las áreas en donde el humedal no podría migrar son el Brazo Este, Molino Viejo, la región norte adedaña a El Pedregal y Punta Azufre. Mientras que La Chorera, el margen del brazo de Monte Mazo, la región agrícola norte adedaña a Punta Azufre, así como la región sur de El Pedregal son aquellas regiones que se encuentran libres para que el humedal migre en el futuro. Debido a ello, se recomienda que las áreas adedañas al humedal que no están desarrolladas se mantengan de esta forma, mientras que para las áreas ya ocupadas se plantearan otras opciones, tales como restringir el crecimiento y/o retirar la infraestructura ya establecida, para que se mantengan como áreas de amortiguación que puedan permitir la supervivencia de la especie (*S. foliosa* y *S.*

virginica) mediante la migración e impulsar la resiliencia del humedal, así como garantizar la disponibilidad de hábitat para la avifauna marina.

Palabras clave: aumento del nivel del mar, inundación costera, humedales, Bahía San Quintín.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 <i>Aumento del nivel medio del mar</i>	3
2.2 <i>México y el aumento del nivel medio del mar</i>	5
2.3 <i>Los humedales y el aumento del nivel del mar</i>	6
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
4. HIPÓTESIS	10
5. OBJETIVOS	10
6. METODOLOGÍA	11
6.1 <i>Modelo Digital de Elevación (MDE) para Bahía San Quintín</i>	11
6.3 <i>Identificación de zonas inundables</i>	12
6.4 <i>Usos de suelo y vegetación en BSQ</i>	13
7. RESULTADOS	13
8. DISCUSIÓN	18
9. CONCLUSIONES	22
10. BIBLIOGRAFÍA	24

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización y representación de elevación del terreno en Bahía San Quintín.	9
Figura 2. Escenarios de aumento tomados del IPCC y nivel del mar para las próximas décadas.....	12
Figura 3. Escenarios de inundación y áreas inundables. Elaboración propia.	14
Figura 4. Distribución de dos especies principales de vegetación de marisma en BSQ... ..	15
Figura 5. Zonas de marismas inundadas bajo el escenario B.	16
Figura 6. Principales usos de suelo en BSQ y disponibilidad para la migración del humedal.	17

Lista de tablas

Tabla I. Escenarios de inundación para BSQ.	12
---	----

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático hace referencia a los cambios de largo plazo de la temperatura y de los patrones climáticos globales. Este cambio del clima se ha presentado a lo largo de la historia de la Tierra asociado a causas naturales, como las variaciones de ciclo solar (Bárcena et al. 2020). Sin embargo, desde el siglo XIX, las actividades antrópicas han sido el principal motor del cambio climático debido, principalmente, a la quema de combustibles fósiles para llevar a cabo diversas actividades económicas (Naciones Unidas, sf). El cambio climático no representa únicamente un aumento en la temperatura global. Las variaciones en la temperatura son solo un factor que provoca una cascada de efectos y cambios en el planeta, los cuales se presentan de forma heterogénea según la región o características locales dominantes (Bárcena et al. 2020; Naciones Unidas, sf). En este sentido, dentro de los efectos más sonados del cambio climático está el derretimiento de los glaciares que, junto a la expansión térmica del océano, propicia el aumento del nivel del mar que a su vez, genera una amplia gama de efectos físicos y ecológicos en las costas lo que puede repercutir en el deterioro y potencial pérdida de los ecosistemas costeros y su biodiversidad (Botello & Villanueva-Fragoso, 2011).

La importancia de los ecosistemas costeros y los servicios ecosistémicos que provén a las personas está mundialmente reconocida (Costanza et al. 1997; Daily, 1997; Liu et al. 2011; de Groot et al. 2012; Barbier, 2015). Bajo un contexto de cambio climático y aumento del nivel del mar, los ecosistemas costeros, como los humedales, son de vital importancia ya que brindan protección contra inundaciones de origen marino actuando como barreras naturales que amortiguan el impacto del agua sobre la costa. La vegetación de los humedales protege a diversas especies de peces durante su etapa de vida como juveniles y constituyen uno de los sitios de hibernación más importantes (refugio y sitios de alimentación) a una importante población de aves migratorias (FIR, 2008). Aunado a esto, los humedales también proveen servicios ambientales que brindan valor estético, cultural y recreativo, permitiendo así el desarrollo de actividades económicas que benefician a la población (Shepard et al. 2011; Arkema et al. 2013; Barbier, 2015). Sin embargo, la

provisión de estos servicios depende de la funcionalidad de los ecosistemas y de las presiones naturales y antrópicas a las que estén expuestos. Se sabe que los humedales son ecosistemas resilientes que tienden a adaptarse a condiciones que pueden representar cierto nivel de estrés que no compromete su supervivencia. Ante la amenaza del aumento del nivel del mar, los humedales buscarán adaptarse mediante la migración hacia terrenos de elevaciones mayores, siempre y cuando el espacio tenga condiciones ambientales adecuadas y no esté ocupado por infraestructura o actividades antrópicas que limiten la migración (Aldeco-Ramírez, 2020). Identificar las zonas propensas a ser ocupadas por el agua ante escenarios de aumento del nivel del mar permite inferir sobre la disponibilidad de espacio para la migración y posterior preservación de los humedales y sus servicios, así como el disfrute de ellos para las personas y diversas especies, como las aves. Este tipo de información abona a los esfuerzos enfocados en la protección y aprovechamiento racional de los humedales y los espacios circundantes, y a la toma de decisiones encaminadas en alcanzar el desarrollo sostenible futuro.

Existen antecedentes que identifican a Bahía San Quintín (BSQ), Baja California como una zona susceptible al incremento del nivel del mar (Valdés-Martínez, 2012), y dado que su humedal está reconocido como de importancia internacional por ser el hábitat de diversas especies de aves relevantes, tales como: rascón picudo californiano (*Rallus longirostris levipes*), polluela negra (*Laterallus jamaicensis*), charrán mínimo (*Sterna antillarum browni*), gorrión sabanero (*Passerculus sandwichensis beldingi*), perlita bajacaliforniana norteña (*Polioptila californica atwoodi*) y el chorlo nevado occidental (*Charadrius alexandrinus nivosus*) (FIR, 2008), su estudio es de gran relevancia. En este trabajo se lleva a cabo una identificación de las áreas propensas a ser inundadas por el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático en BSQ y los potenciales efectos sobre los humedales, haciendo énfasis en la futura disponibilidad de hábitat para la avifauna marina y la disponibilidad de espacio para la migración del humedal.

2. ANTECEDENTES

2.1 Aumento del nivel medio del mar

El nivel medio del mar puede definirse como el nivel de las aguas tranquilas que se promedia por un tiempo determinado (a diferentes escalas temporales), de modo que los efectos provocados periódicamente por mareas y oleaje pueden ser compensados (Dawahidi et al. 2019). Los cambios en el nivel medio del mar se producen a distintas escalas espaciales y temporales. A escala global, estos cambios se representan por la variabilidad del volumen de agua en los océanos debido a la expansión térmica, al deshielo de la criósfera y al intercambio entre depósitos de agua superficiales y subterráneos en el continente (IPCC, 2014). A escala regional, la variabilidad del nivel medio del mar está fuertemente ligada a la variabilidad climática natural de la región, aunque también se vincula a procesos de la dinámica oceánica, asociados con el viento, presión atmosférica y circulación de corrientes marinas (Church et al. 2013). A escala local, puede verse afectado por la subsidencia o la elevación del terreno, por lo que su aumento respecto a la referencia del terreno, es lo que realmente se debe considerar para efectos del diseño de estrategias de mitigación y adaptación (Losada et al. 2020).

Se sabe que uno de los primeros en documentar el cambio en el nivel del mar fue Smith (1837), quien estudió depósitos aluviales de Escocia e Irlanda, que contenían restos marinos y se encontraban 24 metros por encima del nivel de la marea más alta (Tovar-Cabañas et al. 2018). A pesar de las variaciones que ha sufrido el nivel del mar, este se ha mantenido estable durante los últimos 3,000 años anteriores a la segunda mitad del siglo XIX. Hacia los 90's, el incremento del nivel medio global se encontraba alrededor de 1.1 mm/año; sin embargo, para el periodo 1993-2012 la media se triplicó al alcanzar 3.1 mm/año. Este incremento se ligó al calentamiento de los océanos y a una pérdida de las masas de hielo de los glaciares como consecuencia del aumento de la temperatura global (Dawahidi et al. 2019). Se sabe que, en los últimos 20 años, la expansión térmica del océano ha contribuido en al menos un tercio del aumento del nivel del mar, mientras que otros dos tercios son contribuidos por la fusión de los glaciares. No obstante, las tasas de incremento no

son geográficamente uniformes; por ejemplo, en algunas regiones como el Pacífico Occidental Tropical las tasas son hasta 3 o 4 veces más altas que la media global (Cazenave & Remy, 2011). El Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) (2007), reportó que el incremento del nivel de los océanos aumentó un 1.9 mm/año en el periodo 1961-1992; mientras que después de 1993 el incremento fue de 3.1 mm/año. Estos autores concluyeron que las costas, así como los ecosistemas costeros, se verán expuestos a la amenaza que representa el aumento del nivel del mar y sus efectos; sobre todo por inundaciones en aquellas regiones con elevaciones bajas y alta presión ejercida por la presencia humana.

Debido al acelerado incremento del nivel del mar en las últimas décadas, se han establecido escenarios proyectados usualmente para 2050, 2080 y 2100. Dentro de estos estudios, y por mencionar alguno, se tiene el de Otto-Bliesner et al. (2006), quienes llevaron a cabo el cálculo de incremento del nivel del mar para las costas Sur, Suroeste y Sureste de Estados Unidos. De acuerdo con este trabajo, dichas costas se verán gravemente afectadas, ya que registraron un incremento de aproximadamente 6 m para finales de siglo; por lo que ciudades como Nueva Orleans podrían desaparecer, así como algunas zonas de Florida. Por otro lado, la Agencia Aeroespacial Estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés), ha dado a conocer que desde el último siglo ha existido un incremento del nivel del mar de 23 cm, lo que muestra una aceleración en los últimos años; proyectando aumentos para el año 2100 de entre 0.80 y 1.20 cm (NASA, 2022).

Recientemente, en el Sexto Informe del IPCC (2021) se menciona que el nivel medio del mar global muestra un apresurado aumento que puede atribuirse a la influencia humana, esto al menos desde 1971. En este sentido, debido al continuo calentamiento del océano y el derretimiento de los mantos de hielo, el nivel del mar seguirá aumentando durante siglos o milenios y permanecerá elevado por miles de años. Se espera que en los próximos 2,000 años el nivel medio del mar aumente entre 2 y 3 m si el calentamiento del planeta se limita a 1.5°C; entre 2 y 6 m si se

limita a 2°C y, en un escenario catastrófico entre 19 y 22 m con un calentamiento de 5°C (IPCC, 2021).

2.2 México y el aumento del nivel medio del mar

México se considera uno de los países con mayor biodiversidad a nivel mundial. Ésta se ve expuesta a impactos naturales como los eventos hidrometeorológicos extremos, principalmente en sus costas (Zavala-Hidalgo et al. 2010). Se han realizado estudios de tendencias del nivel del mar en México, entre los que destaca el de Zavala-Hidalgo et al. (2010), quienes analizaron las tendencias a largo plazo en el nivel del mar para 16 sitios de las costas mexicanas y de los que se tienen 40 años de registro del nivel del mar medidos por mareógrafos del Servicio Mareográfico Nacional (SMN). Sus resultados indican que, en el Golfo de México las tendencias son positivas, resultando Ciudad Madero (Tamaulipas) con el mayor incremento por año de hasta 9.2 +/- 5.1 mm/año y el menor para Alvarado (Veracruz) con 1.8 +/- 2.3 mm/año. Mientras que, para las costas del Pacífico, sobresalen Acapulco (Guerrero) por presentar una serie con una tendencia negativa de 1.4 +/- 3.2 mm/año, y Guaymas (Sonora) con la serie con mayor tendencia de 4.2 +/- 1.7 mm/año en la región. Para Baja California, Ensenada presenta una tendencia positiva de 2.7 +/- 1.7 mm/año.

En BSQ no se tienen registros de la tendencia de aumento del nivel del mar, debido a que esta localidad no forma parte de los 16 sitios que el Servicio Mareográfico Nacional ha venido monitoreando y tampoco se tiene un registro robusto de datos del que se pueda obtener información. Sin embargo, cuando no se tienen registros de nivel del mar medidos *in situ*, como es el caso de BSQ, es práctica común utilizar proyecciones globales que permitan establecer escenarios potenciales para llevar a cabo análisis de inundación y sus efectos en las costas.

En este sentido, se puede mencionar el trabajo de Valdés-Martínez (2012), quien estableció escenarios de aumento del nivel del mar para BSQ de 0.10 m, 0.30 m y

0.50 m con base en lo reportado en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (2001) proyectados para 2018, 2048 y 2068, respectivamente. Con estos escenarios identificó zonas potenciales a inundarse por el aumento del nivel del mar tomando como referencia la elevación del terreno.

Algunos Programas de Ordenamiento en el Estado de Baja California han reconocido a BSQ como una región de alto riesgo ante inundaciones costeras debido, sobre todo, a las características morfológicas del terreno, a la exposición al embate de las olas y a fenómenos hidrometeorológicos como tormentas (POETBC, 2007; POESQ, 2007; Valdés-Martínez, 2012). El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), en los recursos sobre riesgo y vulnerabilidad a inundaciones, identifica a BSQ como un área potencial a sufrir inundación en su costa (CENAPRED, 2012).

2.3 Los humedales y el aumento del nivel del mar

La Convención de Ramsar (1971), define a los humedales como “*extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas por agua, sean éstas naturales o artificiales, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo además, aquellas extensiones de agua marina que no superen los seis metros de profundidad*”. Por lo tanto, los humedales son ecosistemas costeros que dependen directamente de la profundidad, un factor que condiciona su supervivencia (Seoáñez-Calvo & Gutiérrez de Ojesto, 1999).

El bienestar de los humedales es de vital importancia e interés tanto para las organizaciones internacionales como para la comunidad científica y la comunidad en general (Costanza et al. 1997; de Groot et al. 2012). Esto debido a que ofrecen una amplia gama de servicios ambientales, como contribuir al bienestar de la biósfera al mantener una rica diversidad de flora y fauna, abastecimiento de agua dulce, producción de alimentos, filtración y por tanto limpieza de agua, retención de sedimentos, amortiguador del impacto del oleaje y atenuación de inundación (Seoáñez-Calvo & Gutiérrez de Ojesto, 1999; Moya et al. 2005; SEMARNAT, 2012).

Por su naturaleza, los humedales son ecosistemas que se localizan en zonas donde el terreno posee cotas bajas, lo que los hace sensibles al aumento del nivel del mar (Moya et al. 2005). El aumento en la profundidad del agua en el océano, resulta en una mayor exposición a inundaciones, mayor exposición a la intrusión salina y un desbalance hídrico; esto debido principalmente a que el bienestar del humedal se encuentra ligado al hidropereodo, el cual se define por su duración (tiempo que permanece inundado), frecuencia (cantidad de veces que se inunda en un determinado tiempo), profundidad y época de inundación. Aunado a otros factores antrópicos como el desarrollo de construcciones, agricultura, contaminación del agua y suelo, que ponen mayor presión sobre estos ecosistemas (Yáñez-Arancibia et al. 2014). La subsidencia del terreno es otro factor importante que pone en riesgo a los humedales ante el aumento del nivel del mar, ya que en regiones en donde la subsidencia es significativa, como es el caso del delta del río Grijalva-Usumacinta y el delta del Mississippi (3 a 10 mm/año) en el Golfo de México, el incremento del nivel del mar causará impactos importantes en los humedales costeros, ya que se trata de extensiones de tierra de menor altitud (Yáñez-Arancibia et al. 2014).

Diversos estudios documentan que los humedales costeros pueden llegar a adaptarse, ser resilientes y persistir por cientos de años (Yáñez-Arancibia et al. 2014; Schuerch et al. 2018) ganando la batalla al aumento del nivel del mar. Sin embargo, para que esto suceda, se requiere que los humedales tengan una acreción vertical derivada de la acumulación de sedimentos que sea igual o mayor a la tasa de aumento del nivel del mar. Además de considerar la adaptación vertical expresada anteriormente, la adaptación horizontal es otro factor importante para la resiliencia de los humedales, ya que esta se encuentra regida por la interacción entre el espacio adyacente disponible, las barreras antrópicas existentes y la capacidad de migración de este ecosistema (Schuerch et al. 2018). Incluso, podría ser posible una ganancia global de humedales hasta en un 60% siempre y cuando el 40% de los humedales actuales del mundo cuenten con el espacio disponible

para migrar y asentarse y el suministro de sedimento disponible se mantenga (Schuerch et al. 2018).

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

BSQ se localiza en la costa oeste del Pacífico hacia los 30°30'N y 116°W. Es una laguna costera que presenta forma en Y, con aproximadamente 5,438 ha de superficie y una profundidad promedio de 2 m (Figura 1). Su brazo Este se conoce como San Quintín y el brazo Oeste como Bahía Falsa. La laguna mantiene conexión directa con el océano Pacífico por medio de una sola boca, que tiene un ancho de aproximadamente 700 m y se encuentra separada por dos estructuras sedimentarias, un tómbolo de 8 km con orientación Noroeste y una barra de arena de aproximadamente 5 km con orientación Este. El intercambio de agua marina entre el Pacífico y el interior de la bahía se da principalmente por efecto de la marea, ya que presenta un rango de marea promedio de 2 m y 1 m para mareas vivas y muertas respectivamente, siendo 2 m la marea máxima reportada (MartoriOxamendi, 1989; Valdés-Martínez, 2012).

BSQ posee un humedal que fue designado de importancia internacional #1775 por la Convención Ramsar el 02 de febrero de 2008. Este humedal tiene un área de 5,438 ha y está formado por una planicie costera y una laguna costera ligeramente hipersalina. Presenta, al menos, diez especies de plantas endémicas de la zona mediterránea como el matorral costero, prados de plantas marinas y vegetación de marismas, dentro de las cuales se destacan *Spartina foliosa* y *Salicornia virginica* por ser las especies de marismas más abundantes dentro del humedal (Terra Peninsular, 2022).

Este humedal es especialmente importante por ser el hábitat, zona de reproducción e hibernación de especies y subespecies de aves, ya que se ha registrado que más de 25,000 aves migratorias pertenecientes a la Ruta Migratoria del Pacífico en América (RMPA), se benefician de la vegetación más abundante de marismas durante el invierno (Terra Peninsular, 2022). Además, alberga las poblaciones reproductoras más importantes de una especie y cinco subespecies que se

encuentran en peligro de extinción, siendo éstas: rascón picudo californiano (*Rallus longirostris levipes*), polluela negra (*Laterallus jamaicensis*), charrán mínimo (*Sterna antillarum browni*), gorrión sabanero (*Passerculus sandwichensis beldingi*), perlita bajacaliforniana norteña (*Polioptila californica atwoodi*) y el chorlo nevado occidental (*Charadrius alexandrinus nivosus*) (Terra Peninsular, 2022).

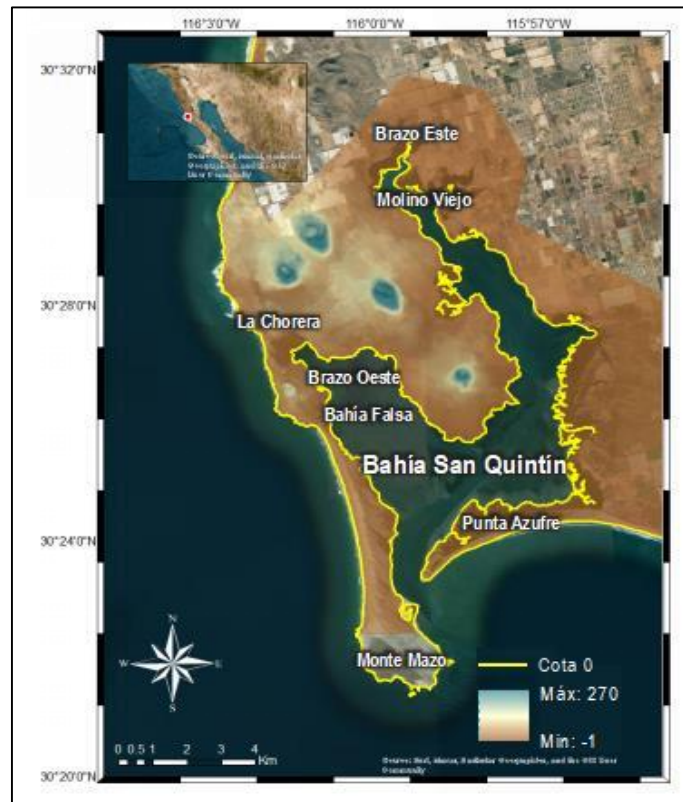


Figura 1. Mapa de localización y representación de elevación del terreno (en metros) en Bahía San Quintín. Datos tomados de LiDAR de INEGI.

Las actividades económicas que se realizan en BSQ son variadas. Debido a la alta productividad primaria y secundaria en la laguna, se considera excelente para la acuicultura, especialmente para el cultivo de ostión (FIR, 2008). La producción de ostión ha aumentado con el paso de los años y actualmente esta actividad comercial da empleos directos al 3% de las personas de la localidad y de igual manera beneficia indirectamente al 33% del sector comercial. Este cultivo cubre 300 ha de agua superficiales que equivale aproximadamente al 7% del área de la bahía con una producción estimada de 2,500 toneladas anuales (FIR, 2008). Además del cultivo de ostión, BSQ es de gran importancia por las actividades agrícolas que se

llevan a cabo en tierra firme. Se tienen campos agrícolas al Este y al Norte en las planicies costeras y en los deltas adyacentes a los humedales. Aunado a estas actividades, se tiene la extracción de pétreos en el exterior de la bahía en la zona de La Chorera e infraestructura residencial y turística en los márgenes interiores de la bahía (Pro Esteros, 2022).

4. HIPÓTESIS

La identificación de áreas propensas a inundación permitirá inferir los efectos potenciales del aumento del nivel del mar en el humedal de Bahía San Quintín.

5. OBJETIVOS

Objetivo general:

Analizar los efectos potenciales del aumento del nivel del mar en Bahía San Quintín, haciendo énfasis en la disponibilidad de hábitat para la avifauna y el espacio disponible para la migración del humedal.

Objetivos particulares:

1. Identificar las zonas propensas a inundación por aumento del nivel del mar considerando la Trayectoria Socioeconómica Compartida 5-8.5 (SSP5-8.5 por sus siglas en inglés) del IPCC proyectada para finales de siglo.
2. Analizar la futura disponibilidad de hábitat para la avifauna marina con base en la distribución de la vegetación de marismas y las zonas inundables identificadas.
3. Identificar las zonas en donde los humedales afectados por el aumento del nivel del mar, pueden migrar considerando la disponibilidad de espacio actual.

6. METODOLOGÍA

6.1 Modelo Digital de Elevación (MDE) para Bahía San Quintín

Se descargaron 8 mosaicos de alta resolución LiDAR (*Light Detection And Ranging*) de bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que corresponden a las cartas topográficas 1:10,000 identificadas para Bahía San Quintín en el portal Mapa Digital de México del INEGI. Los mosaicos se encuentran en formato ráster con una resolución de 5 m (horizontal) y 1 m (vertical) y representan un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar derivado de la obtención de puntos mediante tecnología LiDAR. Estos 8 mosaicos fueron unidos para generar el MDE utilizando herramientas de geoprocésamiento (Figura 1).

6.2 Escenarios de inundación

Se llevó a cabo una revisión de los escenarios de aumento del nivel del mar establecidos por el IPCC en su último Informe de Evaluación (AR6, 2021). El escenario de aumento de nivel del mar seleccionado corresponde al SSP5-8.5 que establece 0.80 m de aumento para el año 2100 (Figura 2), ya que se pretende analizar el peor escenario potencial a presentarse. Considerando la resolución vertical que tiene el MDE LiDAR, se decidió tomar como valor 1 m para poder representarlo en el terreno. En la figura 2, los rangos del nivel del mar muestran los percentiles 17 a 83 y las proyecciones son relativas a una línea base de 1995 a 2014.

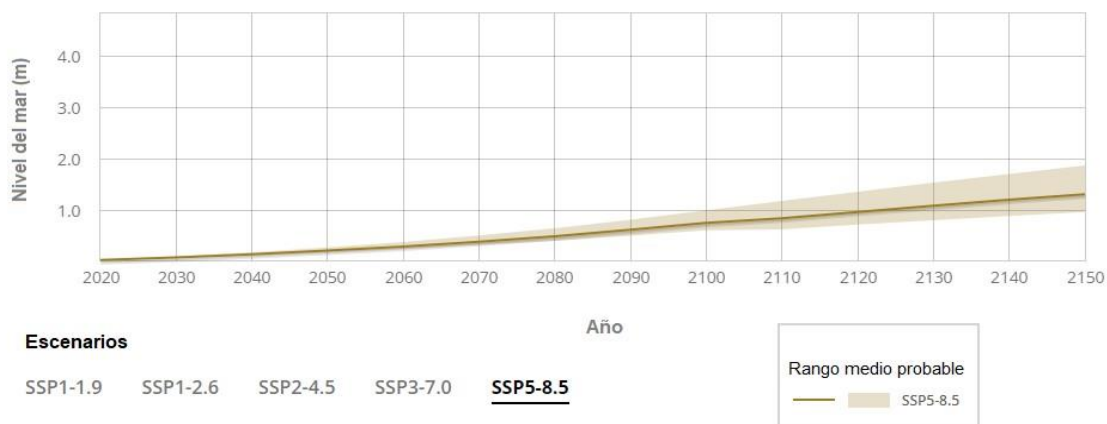


Figura 2. Escenarios de aumento tomados del IPCC y nivel del mar para las próximas décadas. Modificada de: IPCC AR6 (2021) Sea Level Projection Tool, NASA.

Los escenarios de inundación analizados en este trabajo se muestran en la tabla I, en donde el escenario A considera únicamente la lámina de agua asociada a la pleamar máxima registrada en BSQ, sin tomar en cuenta el aumento del nivel del mar por cambio climático. El escenario B suma al valor de la pleamar máxima registrada, el aumento de 1 m del nivel del mar establecido por el IPCC en su sexto informe de evaluación. Esto permite capturar dos momentos extremos en donde la inundación puede presentarse y, a su vez, hacer comparaciones entre condiciones actuales y proyectadas.

Tabla I. Escenarios de inundación para BSQ.

Escenario	Pleamar máxima	Aumento del nivel del mar
A	2.0 m	0 m
B	2.0 m	1.0 m

6.3 Identificación de zonas inundables

Tomando como datos de entrada el MDE generado y los escenarios de inundación establecidos, se aplicó el método de análisis espacial “Bathtub” (Afanador y Ruíz, 2009). En este método se identifican como inundables las celdas del MDE que presenten una cota igual o menor al escenario de inundación analizado; estas celdas adquieren un valor numérico de uno. Las áreas que no son propensas a

inundarse adquieren un valor de cero, siendo aquellas que tienen valores topográficos mayores al nivel del mar analizado. El análisis espacial se realizó utilizando herramientas de geoprocésamiento, con las que posteriormente, se generaron mapas de inundación para los escenarios presentados en la tabla I y se calculó el área de inundación para ambos escenarios.

6.4 Usos de suelo y vegetación en BSQ

Se identificó la distribución espacial del humedal, su vegetación principal y áreas que son utilizadas por la avifauna como sitios de hábitat, tomando como base fichas de identificación RAMSAR y reportes de Asociaciones Civiles (Pro esteros y Terra peninsular). Con información del 2015 de la Secretaría de Fomento Agropecuario (SEFOA) y reportes de Pro esteros (2022) se identificaron tres usos de suelo principales: a) acuicultura; b) residencial y turístico, y c) agrícola. Posteriormente, se generaron mapas de distribución de vegetación, presencia de avifauna y usos de suelo identificados utilizando herramientas de geoprocésamiento. Estos mapas se cotejaron con el escenario de inundación B para identificar zonas en donde la lámina de agua se extiende más allá de los humedales. Esto con la finalidad de identificar aquellos sitios en donde los humedales afectados pueden migrar si el uso actual del espacio lo permite.

7. RESULTADOS

Los resultados de inundación muestran que para los dos escenarios analizados espacialmente (Tabla I), la mancha de inundación tiene influencia prácticamente sobre todo el margen interior de la bahía (Figura 3). Sin embargo, bajo el escenario B, que es en donde se considera el aumento del nivel del mar más la pleamar máxima, se alcanzan extensiones de tierra que actualmente se encuentran secas y/o tienen algún uso. Las zonas identificadas como inundables bajo este escenario son Molino Viejo, La Chorera, Brazo Este, el margen del brazo de Punta Mazo, Punta Azufre y la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre; siendo Molino Viejo,

Brazo Este, Punta Azufre y la región agrícola norte adyacente a esta misma área, los que presentan las mayores extensiones de inundación (Figura 3).

Actualmente, el área total inundable debido a la pleamar máxima (escenario A) es de 24 km², mientras que bajo el escenario B proyectado para finales de siglo es de 31 km². Esto representa una diferencia de 7 km² de tierra seca que será inundada por el aumento del nivel del mar en Bahía San Quintín, lo que significa un incremento del área inundable actual en un 29%.

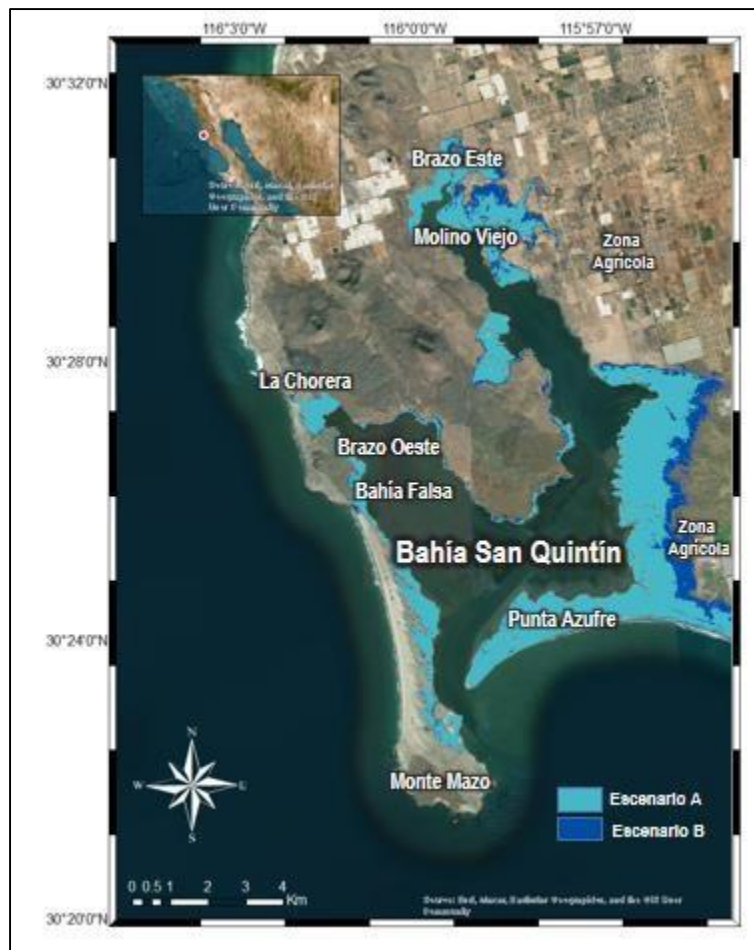


Figura 3. Escenarios de inundación y áreas inundables (azul claro corresponde al escenario A y azul fuerte al escenario B).

En el humedal de BSQ, destacan por su abundancia las especies de plantas de marisma *S. foliosa* y *S. virginica*, las cuales se ubican prácticamente en todo el

margen interno de la bahía, en donde *S. virginica* está distribuida a manera de cordones por detrás de *S. foliosa* (Figura 4). La revisión de los reportes y fichas RAMSAR emitidos por Asociaciones Civiles, permitieron identificar que las zonas en donde se distribuyen estas dos especies de marismas, son las que diversas especies de aves marinas habitan, como es el caso del rascón picudo californiano (*R. longirostris levipes*) y la branta negra (*Branta bernicla nigricans*). Al sobreponer los resultados de la distribución de marismas con la lámina de inundación del escenario B, se observa que los espacios de marismas en donde la inundación por el aumento del nivel del mar es menor corresponden a la región sur del sitio conocido como El Pedregal (ver polígono naranja, Figura 5).

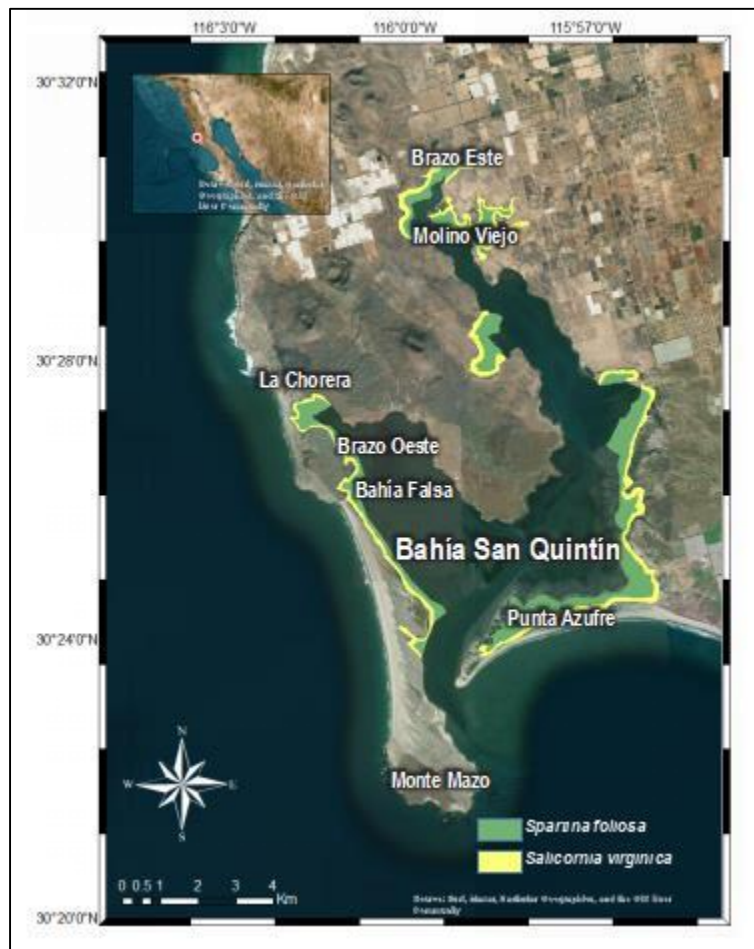


Figura 4. Distribución de dos especies principales de vegetación de marisma en BSQ. Datos de la Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR, 2008).

Por otro lado, las marismas de Molino Viejo, Brazo Este, La Chorera, la zona al norte de El Pedregal (ver óvalo rojo, Figura 5), el brazo de Monte Mazo, Punta Azufre y la región agrícola norte adena a esta zona, quedan totalmente por debajo del agua. Esto supone una repercusión directa en la disminución de hábitat disponible para la avifauna marina que utiliza las marismas mencionadas como espacios para vivir y llevar a cabo otras funciones (alimentación, reproducción y crianza de polluelos).



Figura 5. Zonas de marismas inundadas bajo el escenario B. El polígono rojo corresponde a la región norte del Pedregal y el polígono naranja a la región sur del Pedregal.

Aunque queda fuera del alcance de este trabajo analizar el fenómeno de migración del humedal, con los resultados obtenidos se logran identificar zonas en donde, considerando únicamente la disponibilidad de espacio actual (aquel en donde no hay actividades antrópicas presentes), el humedal podría migrar. En la Figura 6 se muestra una caracterización general de los principales usos de suelo en el margen

de la BSQ y su distribución espacial. Se puede identificar el Brazo Este, Molino Viejo, la región norte aledaña a El Pedregal y Punta Azufre, como aquellas zonas en donde el humedal necesitará migrar, pero no tendrá espacio disponible para hacerlo, ya que ahí se llevan a cabo actividades principalmente de agricultura (principalmente cultivo de frutos del bosque como frambuesa, fresa, mora y arándanos) y/o se encuentran cercanos a la zona urbana. En cambio, en La Chorera, el margen del brazo de Monte Mazo, la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre, así como en la región sur de El Pedregal, sí hay disponibilidad de espacio para que el humedal migre. Es importante recordar que estos resultados consideran únicamente si hay o no espacio libre para los humedales en la actualidad.

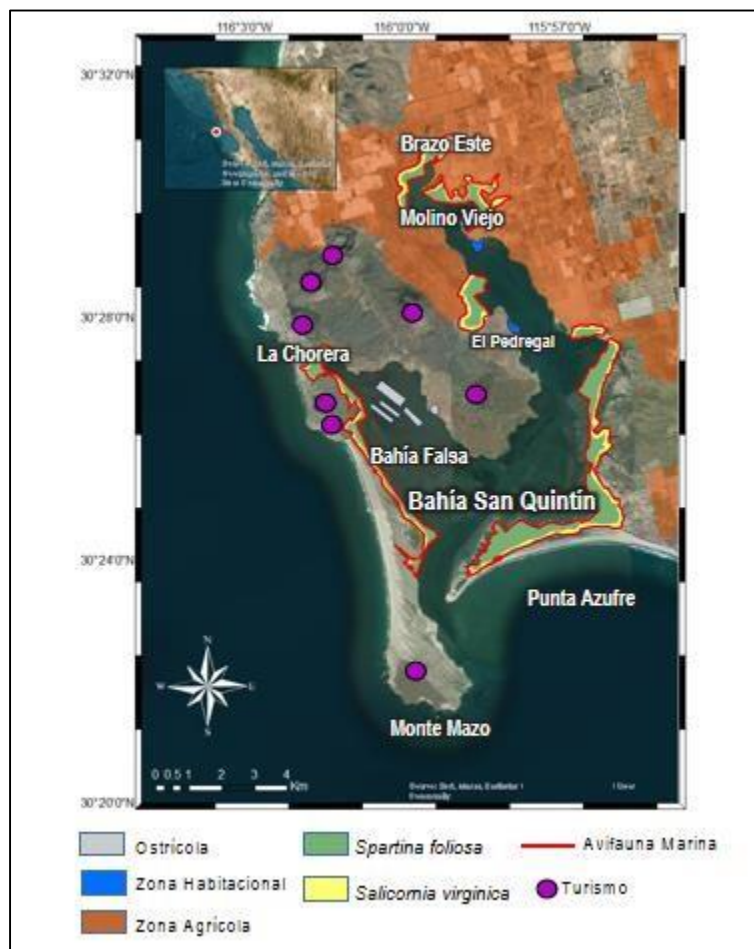


Figura 6. Principales usos de suelo en BSQ y disponibilidad para la migración del humedal.

8. DISCUSIÓN

El nivel del mar aumenta a un ritmo acelerado y continuará subiendo en el futuro (Kopp et al. 2016). Aunado a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (como huracanes y fuertes tormentas) que podrían intensificarse (Kirezci et al. 2020), dejando a los humedales del mundo expuestos a inundaciones y otros efectos asociados como la erosión. Esto conduce a su degradación y a la potencial pérdida de sus servicios ambientales, haciendo que las costas y las comunidades costeras sean más vulnerables (Bárcena et al. 2020; Fernández et al. 2022).

Bajo este contexto, cada vez son más los estudios e investigaciones que se centran en el tema desde diferentes enfoques (Nicholls et al. 2011; de Groot et al. 2012; Arkema et al. 2013; Ruckelshaus et al. 2020; Hagedoorn et al. 2021; Fernández et al. 2022). Sin embargo, para BSQ los estudios previos enfocados en identificar áreas de inundación y los potenciales efectos del aumento del nivel del mar se reducen a uno.

En 2012, Valdés-Martínez analizó tres escenarios de aumento del nivel del mar para BSQ y encontró que La Chorera, Punta Azufre, Molino Viejo, El Pedregal, Las Lajas y el Camino de Acceso, son las regiones más afectadas bajo los escenarios planteados. Los resultados que aquí se presentan coinciden con los sitios reportados en dicho trabajo. Sin embargo, tomando en cuenta la diferencia en las metodologías aplicadas (Valdés-Martínez [2012] utiliza levantamientos topográficos y encuestas a pobladores), en el presente trabajo se identifican también otras áreas potenciales a inundarse como el Brazo Este de la bahía, el margen del brazo de Punta Mazo y la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre, las cuales no son identificadas en el estudio de Valdés-Martínez (2012). En el presente estudio se establece además que el área inundable bajo el aumento del nivel del mar para finales de siglo es de 31 km², representando un incremento del 29% con respecto al área inundable en la actualidad, debido solamente a la pleamar (Figura 3). Lo anterior se debe a que el método Bathtub junto con el modelo digital de elevación

(MDE) generado para BSQ, permite representar topográficamente el terreno, identificar las cotas de elevación más bajas localizadas en las inmediaciones de la bahía (las cuales son las más propensas a inundarse) y hacer análisis espaciales. En BSQ el terreno adyacente al cuerpo de agua es relativamente homogéneo, con cotas que van desde los 0 m (línea amarilla) en los márgenes y zona costera hasta elevaciones máximas de 270 m en los volcanes (Figura 1).

Para el humedal de BSQ, las especies de marisma con mayor abundancia fueron *S. foliosa* y *S. virginica*, cuya ubicación corresponde al margen interno de la bahía, donde *S. virginica* se distribuye a manera de cordones por detrás de *S. foliosa* (Figura 4). Al relacionar los resultados de la distribución de marisma con el escenario de inundación por aumento del nivel del mar, se obtuvo que las marismas de Molino Viejo, Brazo Este, Punta Azufre, las aldeañas a La Chorera y brazo de Monte Mazo, se encontrarán totalmente por debajo del nivel del mar para finales de siglo, lo que podría comprometer la disponibilidad futura de estas especies, ya que se encontrarían sujetas a un mayor tiempo de inmersión (por lo tanto un cambio en el hidropereodo) y cambios en la salinidad (principalmente un incremento) que serían perjudiciales para el sistema ecológico del humedal (Gallego-Tévar et al. 2020). Sin embargo, estudios previos (Baldwin & Mendelssohn, 1998; Gallego-Tévar et al. 2020) han reportado que la resistencia a la salinidad y/o el tiempo de inmersión varía entre las especies de halófitas. Por ejemplo, la respuesta ecofisiológica de *S. foliosa*, la caracteriza como una especie resistente al incremento de la salinidad, pero no al estrés infringido por la inundación. Por otro lado, las marismas del género *Salicornia* son resistentes a la salinidad, sin embargo a medida que aumenta la salinidad el porcentaje de germinación disminuye, además de sobrellevar el estrés infringido por la inundación (Ungar, 1981; Rueda-Puente, 2003; Rueda-Puente et al. 2017). En este sentido, para BSQ sería recomendable que aquellas áreas no desarrolladas se mantuvieran de esa forma, mientras que para las áreas ocupadas podría restringirse el crecimiento o en su defecto de ser posible retirar la infraestructura y/o cultivos aldeaños a la zona del humedal, y de esta forma se mantengan como áreas de amortiguación que puedan de alguna manera permitir la supervivencia de las

especies de marismas mediante la migración y preservar la resiliencia del humedal, así como garantizar la disponibilidad de hábitat para la avifauna marina. En un estudio realizado por Smith *et al.* (2004), demuestran que las comunidades de aves reproductoras tienen mayores densidades y una mayor diversidad cuando la proporción de agua y vegetación en los humedales se encuentra equilibrada en 50:50, a diferencia de aquellos que tiene una proporción mayor o menor; esta respuesta se debe principalmente a un aumento o disminución del alimento, el aislamiento visual e incluso el espaciamiento entre las aves reproductoras. Es por esto que para BSQ la disponibilidad de estas especies de marisma determinarán la presencia de la avifauna marina, ya que utilizan estos espacios del humedal para vivir y llevar a cabo diversas funciones (Pro Esteros, 2022); por lo que la disponibilidad de hábitat estará en función de la adaptación de la vegetación y del humedal mismo.

Bajo condiciones naturales, en donde se considera que no hay estresores antrópicos, los humedales pueden tener el tiempo suficiente para acoplarse a un cambio en el nivel del mar, ya que cuentan con alternativas para subsistir tales como: crecer en la vertical, si el suministro de sedimento es suficiente para amortiguar el incremento del nivel del mar, así como migrar y ocupar una nueva porción de tierra detrás de la actual línea de costa; razón por la cual se les considera ecosistemas resilientes (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014; Schuerch *et al.*, 2018). Un estudio realizado por Schuerch *et al.* (2018), reportan que sería posible una ganancia global de humedales hasta en un 60% siempre y cuando el 40% de los humedales actuales del mundo cuenten con el espacio disponible para migrar y el suministro actual de sedimento disponible se mantenga.

La caracterización de las actividades que actualmente se llevan a cabo en los márgenes de BSQ (Figura 6) permite identificar que, la mayor parte de suelo del Valle de San Quintín se encuentra explotado por la actividad agrícola en las inmediaciones del humedal y las marismas. Lo anterior podría ser perjudicial para el humedal ya que el Brazo Este, Molino viejo y la región norte aledaña a El Pedregal

son las zonas en donde el humedal necesitaría migrar en un futuro. No obstante, esto no sería posible ya que estas zonas se encuentran rodeadas por la actividad agrícola, mientras que la zona de Punta Azufre es un cordón de dunas estrecho que podría no permitir que el humedal migre de manera adecuada. Por otro lado, zonas como La Chorera, el margen el brazo de Monte Mazo, la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre, así como también la región sur de El Pedregal, sí cuentan con disponibilidad de espacio en el margen del humedal, lo cual permitiría migrar en un futuro. Es importante recordar que estos resultados consideran únicamente si hay o no espacio libre en la actualidad para los humedales y dejan de lado aspectos del terreno (como la pendiente) y demás factores biogeográficos.

De forma general, la pérdida y/o degradación del humedal de BSQ y su vegetación dominante, así como la disponibilidad de hábitat para la avifauna marina, se verá condicionada por factores físicos (tasa paulatina del aumento del nivel del mar y la topografía en los márgenes de la bahía) y antropogénicos (actividades que en el futuro limiten la disponibilidad de sedimentos finos, la disponibilidad de espacio tierra adentro que les permita migrar y re-acomodarse, actividades agrícolas y desarrollo de infraestructura) (SEMARNAT, 2012).

Consideraciones importantes

Los resultados presentados en este trabajo corresponden a un escenario que toma como base la máxima pleamar registrada para BSQ y 1 m de aumento del nivel del mar por cambio climático para finales de siglo. El valor de la pleamar máxima es el actual, no el proyectado. El método aplicado puede considerarse estático, por lo que no considera fenómenos físicos importantes como la influencia del oleaje, eventos hidrometeorológicos extremos o las variaciones en la batimetría y rugosidad del fondo en la bahía. Se sabe que el oleaje es el principal fenómeno que genera cambios en la costa; no obstante, para el interior de la bahía, el mayor forzante y que causa una mayor repercusión es la marea. Es por esto que para mejorar este análisis es importante hacer proyecciones de la marea para los periodos establecidos y así mismo sean sumados a los aumentos del nivel del mar que sean

considerados. El uso de suelo y las actividades que se consideran en la bahía son las actuales. Aplicar un modelo que simule posibles cambios en el uso de suelo puede permitir analizar el efecto sobre el humedal aunado al aumento del nivel del mar.

9. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten hacer una primera aproximación en la identificación de las zonas propensas a inundarse y los potenciales efectos en el humedal.

Bajo el escenario B (1 m de aumento del nivel del mar más el valor de la pleamar máxima) se identificaron seis zonas propensas a inundarse para finales de siglo las cuales son: Molino Viejo, La Chorera, Brazo Este, el margen del brazo de Punta Mazo, Punta Azufre y la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre. Las zonas que presentan mayores extensiones de inundación son Molino Viejo, Brazo Este, Punta Azufre y la región agrícola norte aledaña a esta misma área.

Se pronostica un aumento del 29% del área inundable, de 24 km² a 31 km² para el escenario proyectado hacia finales de siglo.

Bajo el escenario B se pronostica que la futura distribución de la vegetación del humedal de BSQ se verá afectada, principalmente las regiones de: Molino Viejo, Brazo Este, Punta Azufre, las zonas aledañas a La Chorera y brazo de Monte Mazo, ya que se encontrarán sujetas a un mayor tiempo de inmersión y a cambios de salinidad que serán perjudiciales para el sistema ecológico del humedal. La pérdida total y/o parcial del sistema del humedal afectará directamente la disponibilidad de hábitat para la avifauna marina, ya que el ecosistema juega un papel importante en la estrecha relación existente entre las aves y el humedal.

Las zonas en donde el humedal no podrá migrar para lograr adaptarse son: el Brazo Este, Molino Viejo, la región norte aledaña a El Pedregal y Punta Azufre. Mientras que La Chorera, el margen del brazo de Monte Mazo, la región agrícola norte aledaña a Punta Azufre, así como la región sur de El Pedregal son aquellas regiones que se encuentran libres para que el humedal migre en el futuro.

10. BIBLIOGRAFÍA

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) (15 septiembre de 2022). Sea Level Projection Tool. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection><https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?type=global>

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) (22 de marzo de 2023). Sea Level Projection Tool. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection><https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?type=global>

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) (21 de junio del 2022). Aumento de Nivel del Mar. Global Climate Change. https://climate.nasa.gov/climate_resources/274/aumento-del-nivel-del-mar/

Afanador, F., and Ruíz, A. (2009). “Inundación por ascenso del nivel medio del mar mediante fotografía aérea y datos lidar,” in Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral. Eds. I. D. C. A. J. Alcántara Carrió, F. I. Isla Mendy, M. Alvarado Ortega, A. H. F. Klein, A. Cabrera Hernández and R. Sandoval (Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo: España), 79–99.

Aldeco Ramírez, J. (2020). Posibles respuestas del humedal costero de Mandinga, México, a algunas presiones por el Cambio Climático Global. *Revista de Investigación Proyección Científica*, 2(1), 35–45. <https://doi.org/10.56785/ripc.v2i1.44>

Arkema, K. K., Guannel, G., Verutes, G., Wood, S. A., Guerry, A., Ruckelshaus, M., Kareiva, P., Lacayo, M., Silver, J.M. (2013). Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nat. Climate Change* 3 (10), 913–918. <https://doi.org/10.1038/nclimate1944>

Baldwin, A. H., & Mendelssohn, I. A. (1998). Effects of salinity and water level on coastal marshes: An experimental test of disturbance as a catalyst for vegetation change. *Aquatic Botany*, 61(4), 255–268. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00073-4)

Barbier, E. B. (2015). Valuing the storm protection service of estuarine and coastal ecosystems. *Ecosystem Serv.* 11, 32–38.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.010>

Botello, A.V. & Villanueva-Fragoso, S. (2011). Introducción. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT, INE, UNAM, ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

Cazenave, A., & Remy, F. (2011). Sea level and climate: Measurements and causes of changes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(5), 647–662.
<https://doi.org/10.1002/wcc.139>

Centro Nacional de Prevención de Desastres (21 de junio del 2022). CENAPRED.
<https://www.gob.mx/cenapred>

Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387 (6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

Convención sobre los humedales Ramsar (1971). Documento informativo Ramsar No. 1 ¿Qué son los humedales? Documento Informativo Ramsar, 1, 3–4. Ramsar, Irán.

Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D. and Unnikrishnan, A. S., 2013, 'Sea level change', in: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., et al. (eds), *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge; New York, pp. 1137–1216.

- Daily, G. (1997). Introduction: What are ecosystem services? In: G.C. Daily, Ed., *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Island Press, Washington DC, 1–10.
- Dawahidi, T., Marinas, D. I., & Gomariz-Castillo, F. (2019). Accuracy measurement of sea level rise due to effect of Climate Change through tide gauge data and NASA TopexPoseidon/Jason satellite series. The case of Valencia. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 39(1), 39–58. <https://doi.org/10.5209/aguc.64676>
- de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Fernández-Díaz, V. Z., Canul Turriza, R. A., Kuc Castilla, A., & Hinojosa-Huerta, O. (2022). Loss of coastal ecosystem services in Mexico: An approach to economic valuation in the face of sea level rise. *Frontiers in Marine Science*, 9(July), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.898904>
- Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) (2008). http://www.ramsar.org/ris/key_ris_index.htm
- Gallego-Tévar, B., Peinado-Torrubia, P., Álvarez, R., Grewell, B. J., & Castillo, J. M. (2020). From physiology to salt marsh management challenges with sea level rise: The case of native *Spartina foliosa*, invasive *S. densiflora* and their hybrid. *Conservation Physiology*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa053>
- Hagedoorn, L. C., Appeaning Addo, K., Koetse, M. J., Kinney, K., & van Beukering, P. J. H. (2021). Angry waves that eat the coast: An economic analysis of nature-based and engineering solutions to coastal erosion. *Ocean and Coastal Management*, 214 (August 2020), 105945. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105945>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (26 de junio de 2022). Mapa Digital de México V6. <https://onx.la/323be>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas,” in Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, eds., C.B. Field et al. (Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, 2014), p. 34.

IPCC. (2007). Cambio Climático 2007: Informe de síntesis 2007. Ginebra, Suiza.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. 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. [V. Masson-Delmotte and P. A.S.L.C.S.N. Zhai Pirani Connors Péan Berger (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Muis, S., Nicholls, R. J., Lincke, D., & Hinkel, J. (2020). Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>

Kopp, R. E., Kemp, A. C., Bittermann, K., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Gehrels, W. R., Hay, C. C., Mitrovica, J. X., Morrow, E. D., & Rahmstorf, S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(11), E1434–E1441. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517056113>

Liu, S., Portela, R., Rao, N., Ghermandi, A., and Wang, X. (2011). “12.04 environmental benefit transfers of ecosystem service valuation,” in *Treatise on estuarine and coastal science*. Eds. E. Wolanski and D. McLusky (Academic Press: Netherlands), 55–77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.01204-3>

Losada, I.J., M. Gómez-Erache, C. Lacambra, E. Rivera, R. Silva y A. Toimil, 2020: Zonas costeras. En: *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países*

- iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT. [Moreno, J.M., C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo Buendía, J.A. Marengo y U. Oswald Spring (eds.)]. McGraw-Hill, Madrid, España, pp. 571-613.
- Martori-Oxamendi, J. (1980). Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín, B.C. [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Moya, B. V., Hernández, A. E., & Elizalde Borrell, H. (2005). Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas*, 37, 127. <https://doi.org/10.14198/ingeo2005.37.07>
- Nicholls, R. J., Marinova, N., Lowe, J. A., Brown, S., Vellinga, P., De Gusmão, D., Hinkel, J., & Tol, R. S. J. (2011). Sea-level rise and its possible impacts given a “beyond 4°C world” in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 161–181. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0291>
- Otto-Bliesner, B. L., Marshall, S. J., Overpeck, J. T., Miller, G. H., & Hu, A. (2006). Simulating arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 311(5768), 1751–1753. <https://doi.org/10.1126/science.1120808>
- POESQ. (2007). Programa de Ordenamiento Ecológico de San Quintín. Baja California: Gobierno del Estado.
- POETBC. (2007). Programa de Ordenamiento Ecológico de Baja California. Colegio de la Frontera Norte. Baja California: Gobierno del Estado.
- Pro Esteros (21 de junio de 2022). Los Humedales. Pro Esteros. <https://proesteros.org/loshttps://proesteros.org/los-humedales/humedales/>
- Pro Esteros (21 de junio de 2022). Bahía de San Quintín: perfil del humedal. Pro Esteros. <https://proesteros.org/inventarios/humedales/SanQuintin/esp/sqperfil.htm>

- Ramsar Irán. (1971). Documento informativo Ramsar No. 1 ¿Qué son los humedales?
Documento Informativo Ramsar, 1, 3–4.
- Ruckelshaus, M., Reguero, B. G., Arkema, K., Compeán, R. G., Weekes, K., Bailey, A., & Silver, J. (2020). Harnessing new data technologies for nature-based solutions in assessing and managing risk in coastal zones. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101795>
- Rueda-Puente, E. (2003). Estudio de la fenología y potencial productivo de la Halófito *Salicornia bigelovii* (Torr.) con la asociación de bacterias fijadoras de nitrógeno. *Centro de Investigaciones Biológicas Del Noroeste, S.C.*, 1–131.
- Rueda-Puente, E. O., Murillo-Amador, B., García, J. O., Preciado, P. R., Garibay, A. N., Peña, R. J. H., Ahumada, G. A. L., Félix, F. R., Vargas-López, J. M., & Corral, F. J. W. (2017). Desarrollo natural de la halófito *salicornia bigelovii* (tor.) en zona costera del estado de sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1), 1–9.
<https://doi.org/10.56369/tsaes.1573>
- Sánchez-R, M., & Riosmena, F. (2021). *Cambio climático global, ecología política y migración. Revista de Estudios Sociales* 76: 2-6
<https://doi.org/10.7440/res76.2021.01>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Humedales en México. Oportunidades para la sociedad*. Primera edición. 23 p. México.
- Secretaría de Fomento Agropecuario (29 de marzo de 2023). Panorama General de “Zona San Quintín”, Baja California. Secretaría de Fomento Agropecuario (2015).
<https://n9.cl/go62t>
- Seoáñez-Calvo, M., Gutiérrez de Ojeda, A. (1999). *Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Schuerch, M., Spencer, T., Temmerman, S., Kirwan, M. L., Wolff, C., Lincke, D., McOwen,

- C. J., Pickering, M. D., Reef, R., Vafeidis, A. T., Hinkel, J., Nicholls, R. J., & Brown, S. (2018). Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 561(7722), 231–234. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0476-5>
- Shepard, C. C., Crain, C. M., & Beck, M. W. (2011). The protective role of coastal marshes: A systematic review and meta-analysis. *PLS One* 6 (11), e27374. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0027374>
- Smith, J. (1837). *On the last changes in the relative levels of the land and sea in the British Islands*. Mem. Wernerian Nat. Hist. Soc, 49-88.
- Smith, L. M., Haukos, D. A., & Prather, R. M. (2004). Avian Response to Vegetative Pattern in Playa Wetlands during Winter. *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)*, 32(2), 474–480. <http://www.jstor.org/stable/3784987>
- Terra Peninsular (21 de junio de 2022). Sitio Ramsar Bahía de San Quintín. Terra Peninsular. <https://terrapeninsular.org/sitio-ramsar-bahia-san-quintin/>
- Tovar-Cabañas, R., Jáuregui-Díaz, Vargas-Castilleja, R.C. & Vázquez-Espinosa, S.A. (2018). Línea de costa teórica de la República Mexicana bajo el supuesto del descongelamiento total de los casquetes polares. *UD y la Geomática*, 13.
- Valdés-Martínez, E.S. (2012). Identificación de las zonas de riesgo ante el aumento paulatino del nivel medio del mar como posible insumo para el manejo de la acuicultura y el turismo de Bahía San Quintín en Baja California, México. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Baja California.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., & Day, R. H. (2013). Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques*, 20(1998), 39–75. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.200147>
- Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las*

zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT, INE, UNAM, ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.