

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ciencias y Humanidades



Efectos de la urbanización y el calentamiento global sobre la temperatura de la arena en las playas de anidación de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral Pacífico de Guatemala.

Trabajo de investigación

presentado por

Adriana Rosdalí Ortega Rehbach

para optar al grado académico de Licenciada en Biología

**Guatemala**

**2024**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ciencias y Humanidades



Efectos de la urbanización y el calentamiento global sobre la temperatura de la arena en las playas de anidación de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral Pacífico de Guatemala.

Trabajo de investigación

presentado por

Adriana Rosdalí Ortega Rehbach

para optar al grado académico de Licenciada en Biología

**Guatemala**

**2024**

## Firmas

Vo. Bo.



---

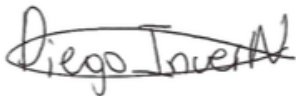
Dr. Daniel Ariano Sánchez

**Tribunal examinador:**



---

Dr. Daniel Ariano Sánchez



---

M. Sc. Diego Josue Incer Nuñez



---

M. Sc. Gabriela Alfaro

Fecha de aprobación de examen graduación:

(Guatemala 14 de junio, 2024)

## AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar por agradecerle a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera, por darme el privilegio de estudiar algo que me apasiona y no negarme la oportunidad de volver a intentarlo cuando he fallado. A mi papá, por siempre hacerme sentir que puedo lograr todo lo que me proponga, por confiar en mí aun cuando yo no lo hago, y por su infinito amor hacia mí. A mi mamá, por escucharme en todo momento, apoyarme y ser mi pilar cuando todo en mi vida está saliendo mal; por su cariño y amistad. A mi hermano, por su ayuda y disposición a resolver mis dudas y por facilitar por mucho el análisis de mis datos. Sin ustedes esta tesis no se habría terminado, de todo corazón, gracias.

Agradezco al departamento de Biología y a la Universidad del Valle de Guatemala, por brindarme los materiales y recursos que necesité para realizar este trabajo. A University of South-Eastern Norway, en especial a Stefanie Reinhardt, por proporcionar los registradores de temperatura sin los cuales no se habría podido realizar esta investigación. Al Centro de Conservación Marina AGHN, en especial a Valerie Syrowicz, por darme hospedaje y apoyo en la búsqueda de los registradores de manera gratuita, y recibarnos con los brazos abiertos en sus instalaciones. Al instituto Privado de Investigación de Cambio Climático, por su amable disposición a brindar los datos climatológicos necesarios para el análisis de los datos.

A mi asesor Ph. D. Daniel Ariano Sánchez quien me brindó su valioso tiempo para resolver mis dudas, orientarme, y sobre todo enseñarme. Sin su apoyo, sus ideas, y su compromiso con mi trabajo, esta tesis no sería lo que es hoy. Gracias por ser un catedrático ejemplar a lo largo de toda mi carrera, y compartir su conocimiento abiertamente.

A Elena Díaz e Irene García, quienes volvieron la experiencia de trabajar 5 horas bajo el sol mucho más alegre. Fue un trabajo muy duro pero ustedes lo volvieron divertido. A Dawison López y Fernando Osorio, sin quienes los últimos registradores no habría encontrado jamás, gracias por su optimismo, sus bromas, y su determinación; y por motivarme a buscar aun cuando ya me había rendido.

A mis amigos de biología. Jamás olvidaré los momentos especiales que compartí con ustedes, y aunque la vida nos distancie, siempre los tendré a todos en un lugar muy especial

de mi corazón. A todos mis catedráticos en la universidad, cada uno me demostró que la biología puede verse de infinitas maneras, cada una más interesante que la otra.

A mis mascotas, Corina, Lizzie, Luna, Kiwi, Jalapeño, Sushi, Tofu, Mango, y Frijol. Mi meta es algún día tener su alegría infinita y su emoción por vivir el día a día como si fuera el último.

A Miguel Santos. No hay palabras que expliquen el apoyo que he recibido de tu parte y todo el aprendizaje que me has dado. Sin tu ayuda, tus ideas, y tu disposición, esta tesis no habría existido. Gracias por hacer el trabajo duro, por asolearte, dormir incomodo, manejar 5 horas, y quedarte despierto a las 2 de la mañana respondiendo todas mis dudas. Gracias por motivarme a ser la mejor versión de mí y a desafiarme a mí misma. Es un privilegio haber coincidido contigo en esta vida. Esta tesis no es mía, es nuestra.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE APÉNDICES.....	x
RESUMEN .....	xiv
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>A. Cambio climático.....</b>	<b>1</b>
<b>B. Importancia de las tortugas marinas.....</b>	<b>2</b>
<b>C. Efecto del cambio climático en playas de anidación de tortugas marinas .....</b>	<b>3</b>
<b>D. Impacto humano en sitios de anidación .....</b>	<b>4</b>
<b>E. Ciclo de vida de tortugas marinas .....</b>	<b>5</b>
<b>F. Determinación de sexo dependiente de la temperatura .....</b>	<b>6</b>
<b>G. Conservación de tortuga Parlama (<i>Lepidochelys olivacea</i>) en Guatemala.....</b>	<b>7</b>
<b>H. Estrategias de conservación.....</b>	<b>8</b>
<b>II. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>III. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>A. General.....</b>	<b>11</b>
<b>B. Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>IV. HIPÓTESIS.....</b>	<b>12</b>
<b>A. Hipótesis principal.....</b>	<b>12</b>
<b>B. Hipótesis secundarias.....</b>	<b>12</b>
<b>V. MÉTODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
<b>A. Área de trabajo.....</b>	<b>13</b>
<b>B. Especie modelo.....</b>	<b>15</b>
<b>C. Toma de datos.....</b>	<b>17</b>
<b>D. Análisis de datos .....</b>	<b>18</b>
1. Análisis de influencias en las temperaturas de la arena.....	18

2.	Modelo predictivo.....	18
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
<b>A.</b>	<b>Temperatura de la arena .....</b>	<b>20</b>
<b>B.</b>	<b>Impacto de variables climatológicas sobre la temperatura de la arena .....</b>	<b>23</b>
<b>C.</b>	<b>Impacto de variables físicas sobre la temperatura de la arena.....</b>	<b>24</b>
<b>D.</b>	<b>Comparación de temperatura de la arena entre 2018-2019 y 2023-2024.....</b>	<b>26</b>
<b>E.</b>	<b>Modelo predictivo.....</b>	<b>29</b>
<b>VII.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>IX.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>X.</b>	<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>41</b>
<b>XI.</b>	<b>APÉNDICE .....</b>	<b>48</b>
<b>XII.</b>	<b>GLOSARIO.....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama del ciclo vital generalizado de las tortugas marinas. ....	6
<b>Figura 2. Mapas de ubicación de los transectos realizados.</b> A. Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio en la costa del Pacífico de Guatemala, en Centroamérica. B. Transectos planificados que se llevarán a cabo en las playas de El Banco (puntos azules), La Candelaria (puntos verdes) y Hawái (puntos rojos). Las estaciones meteorológicas de las cuales se recopilarán los datos climáticos están marcadas con estrellas en el mapa. ....	14
<b>Figura 3. Ubicación exacta de transectos.</b> Ubicación exacta de los puntos a muestrear en las playas La Candelaria (puntos verdes), El Banco (puntos azules), y Hawái (puntos rojos). ....	15
<b>Figura 4.</b> Tortuga Parlama ( <i>Lepidochelys olivacea</i> ) anidando en playa Hawái, Guatemala .....	16
<b>Figura 5. Estaciones utilizadas.</b> Ubicación de los transectos previos al estudio actual. Las estaciones empleadas para cada transecto están marcadas con una estrella negra y las mismas fueron utilizadas para el estudio actual. ....	17
<b>Figura 6. Relación entre la temperatura promedio diaria de la arena y las variables climatológicas.</b> Relación de la temperatura de la arena (°C) con <b>a)</b> la humedad (%), <b>b)</b> temperatura del aire (°C), y con <b>c)</b> la precipitación (mm), desde el 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. Las líneas punteadas roja y verde representan, respectivamente, la temperatura máxima crítica térmica (>35°C) y la temperatura pivotal (<30.5°C) para los embriones de tortugas marinas. ....	24
<b>Figura 7. Gráficos de violín que muestran la distribución de la temperatura promedio diaria de la arena (°C) durante el período del 16 de octubre de 2023 al 16 de marzo de 2024.</b> El gráfico <b>a)</b> analiza la temperatura en función de las categorías registradas que rodean cada punto, mientras que el gráfico <b>b)</b> considera las dos profundidades analizadas (30 cm y 50 cm). En ambos gráficos, se destaca la temperatura crítica máxima para los embriones con una línea punteada roja, y la temperatura pivotal se muestra con una línea punteada verde. El ancho de cada violín refleja la frecuencia relativa de ocurrencia de cada valor de temperatura de la arena, y cada violín incluye un diagrama de caja que proporciona información sobre la distribución de los datos de temperatura. ....	25
<b>Figura 8. Temperatura promedio diaria de la arena para las playas El Banco, La Candelaria y Hawái.</b> Temperatura de la arena (°C) (máxima, promedio, y mínima) combinando la profundidad (30 y 50 cm) para las playas <b>a)</b> El Banco, <b>b)</b> La Candelaria, y <b>c)</b> Hawái, registrada desde el 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. La temperatura máximo crítica térmica para los embriones se ve resaltada por la línea punteada roja, y la temperatura pivotal de los embriones se ve resaltada por la línea punteada verde. ....	26
<b>Figura 9. Diagrama de caja de bigotes para datos de temperatura de la arena (°C) de 2018-2019 y 2023-2024.</b> Diagrama de caja de bigotes ilustrando el promedio mensual de la temperatura de la arena durante cada mes de los años monitoreados. Los meses son	

identificados por sus cifras en su formato numérico, siendo 10 = octubre, 11 = noviembre, 12 = diciembre, 1 = enero, 2 = febrero, y 3 = marzo. .... 28

**Figura 10. Temperatura promedio diaria de todas las playas en el estudio de 2018-2019.**

Temperaturas de arena (máxima diaria, promedio y mínima) registradas en la costa del Pacífico de Guatemala (Hawái y El Banco) desde el 26 de mayo de 2018 hasta el 3 de noviembre de 2019, combinando datos de profundidad (30 y 50 cm). La temperatura crítica máxima para los embriones de tortuga Parlama se muestra como una línea punteada roja (35°C). La temperatura pivotal para la tortuga parlama se muestra como una línea punteada verde (30.5°C). Se indican con flechas dos fuertes tormentas tropicales (Vicente y Selma) que ocurrieron durante el período de estudio. .... 29

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1. Temperatura promedio diaria de la arena según la playa y el alrededor.</b> Resumen de la temperatura promedio de la arena (°C) de los registradores encontrados en cada playa según la categoría que rodea el punto registrado durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. ....	20
<b>Cuadro 2. Temperatura promedio diaria de la arena según el alrededor y la profundidad.</b> Resumen de las temperaturas promedio de la arena (°C) en las tres playas analizadas durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. ....	21
<b>Cuadro 3. Número y porcentaje de días con temperatura promedio diaria de arena &gt;35°C o &lt;30.5°C.</b> Resumen del número y porcentaje de días y puntos cuya temperatura de arena (°C) promedio sobrepasa el máximo crítico térmico que los embriones de la tortuga Parlama pueden sobrevivir, y cuya temperatura se encuentra debajo del rango de temperatura pivotal para los embriones de la tortuga Parlama, registrado durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. ....	22
<b>Cuadro 4. Selección de Modelos Lineales (ML).</b> Resumen de la selección de modelos lineales (ML) para la temperatura de la arena (°C) en datos tomados durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. Los datos en la cuadro son la probabilidad logarítmica (LL), el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc), el delta en AICc ( $\Delta AICc$ ) y el peso de AICc ( $\omega AICc$ ). El modelo en negrita es el que mejor se ajustó. ....	22
<b>Cuadro 5. Variables predictoras para temperatura de la arena (°C).</b> Resumen de variables predictoras seleccionadas para el mejor modelo predictor de cambios en la temperatura de la arena para los datos tomados durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024; con el tamaño del efecto ( $\beta$ ), error estándar, e intervalos de confianza inferiores (LCI) y superiores (UCI) respectivamente descritos. ....	23
<b>Cuadro 6. Datos climatológicos mensuales para 2018-2019 y 2023-2024.</b> Resumen de promedio de datos climatológicos mensuales para cada año que se realizó el monitoreo. ..	27
<b>Cuadro 7. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) para el escenario climático optimista.</b> Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático optimista (SSPs-126), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024). ....	30
<b>Cuadro 8. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) bajo el escenario climático moderado.</b> Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático moderado (SSPs-245), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024). ....	30
<b>Cuadro 9. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) bajo el escenario climático pesimista.</b> Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas	

para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático moderado (SSPs-585), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024).. ..... 31

## LISTA DE APÉNDICES

<b>Apéndice 1.</b> Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa Hawái. ....	48
<b>Apéndice 2.</b> Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa La Candelaria (Centro de Conservación Marina). .....	51
<b>Apéndice 3.</b> Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa El Banco..	54

## RESUMEN

El cambio climático afecta diversos hábitats naturales, incluyendo las tortugas marinas, una de las especies más vulnerables a esta problemática (Santidrián et al., 2020). Las tortugas dependen de playas para anidar, y cualquier deterioro en estos entornos aumenta significativamente la amenaza para ellas. El aumento de la temperatura de la arena es crítico, ya que puede alterar la proporción de machos y hembras en las crías y reducir su supervivencia. Además, la actividad humana, como urbanización y reducción de vegetación, también afecta a las tortugas (Hays et al., 2001). El objetivo del estudio fue evaluar cómo las variables meteorológicas y la presencia de vegetación costera afectan a las temperaturas de la arena y a la ecología térmica de la anidación de la tortuga Parlama en el litoral Pacífico de Guatemala. El estudio se basó en la metodología de Ariano-Sánchez et al. (2023) y se realizó en las playas El Banco, Hawái y La Candelaria, variando en urbanización y vegetación, con temperaturas anuales alrededor de 27°C.

Se utilizaron 60 registradores de temperatura para medir la arena a 30 y 50 cm de profundidad. Los datos meteorológicos se obtuvieron de estaciones cercanas. Se emplearon modelos lineales para analizar las temperaturas de la arena, considerando variables climáticas y de vegetación. Un modelo predictivo proyectó las temperaturas futuras de la arena bajo diferentes escenarios climáticos (SSPs-126, SSPs-245, SSPs-585), comparando datos históricos con proyecciones para 2021-2080. Los resultados indicaron un alarmante aumento en las temperaturas de la arena en las playas de anidación de las tortugas Parlama en el litoral Pacífico de Guatemala durante los últimos cinco años. Este aumento fue consistente con los escenarios climáticos proyectados, especialmente el escenario pesimista, que prevé un incremento significativo en las temperaturas durante los meses de mayor anidación (junio a octubre). Es crucial implementar medidas de conservación efectivas, como programas de revegetación, áreas protegidas y limitación de la urbanización, así como un monitoreo continuo para desarrollar estrategias de conservación a largo plazo.

# I. INTRODUCCIÓN

## A. Cambio climático

En la actualidad, el cambio climático continúa siendo un problema de alta importancia para el bienestar del medio ambiente, los sistemas naturales, y los humanos. Este fenómeno es capaz de alterar la distribución de especies, así como su éxito reproductivo y su comportamiento. Algunos de los efectos del cambio climático más estudiados y notorios son: el aumento de la temperatura promedio global de la superficie, la alteración a los patrones de precipitaciones, el derretimiento de los glaciares, y un aumento del nivel del mar (Santidrián et al., 2020). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), si no se logra reducir el calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero, se podría observar un aumento de la temperatura promedio de la superficie de 0.3 a 4.8°C a finales del siglo XXI (2081–2100) (IPCC, 2014).

Muchas especies se ven especialmente amenazadas por esta problemática debido a que se alteran señales ambientales cruciales para su desarrollo y reproducción. Muchos animales terrestres no tienen la posibilidad de desplazarse y adaptarse lo suficientemente rápido como para enfrentar los efectos del cambio climático en sus hábitats naturales. En el caso de los organismos marinos, se ven afectados por el aumento del nivel del mar, disminución de niveles de oxígeno, acidificación del océano, y aumento a temperaturas extremas del agua, las cuales son factores que podrían resultar mortales para ellos (IPCC, 2014).

Este impacto se ve mucho más notorio en el fenómeno climatológico El Niño Oscilación del Sur (abreviado ENSO por sus siglas en inglés), el cual implica una alternancia entre una fase caracterizada por el aumento de la temperatura de la superficie del mar, la disminución de la productividad oceánica, y sequías, siendo esta fase conocida como El Niño (Ariano-Sánchez, et al., 2020). Por otro lado, la fase de La Niña muestra efectos totalmente contrarios, implicando disminución de temperatura de la superficie del mar y alteración en los patrones de precipitación (Stenseth, et al., 2003).

Centroamérica se ha denominado un área muy susceptible a los efectos del cambio climático debido a su alta biodiversidad que depende de ecosistemas naturales, y su ubicación geográfica (Ariano-Sánchez et al., 2020). Fenómenos climatológicos como el ENSO tendrán consecuencias mucho más graves en los países que se encuentran en esta región a comparación de otras áreas. A nivel local, los efectos se ven empeorados por la destrucción del hábitat y la urbanización, ocasionando que los paisajes degradados sean considerablemente más cálidos y secos que los paisajes naturales y conservados (Ariano-Sánchez et al., 2023).

## **B. Importancia de las tortugas marinas**

Las tortugas marinas son organismos claves para los ecosistemas en los que habitan. Su importancia puede variar desde un rol importante dentro de la cadena alimenticia, hasta el transporte de nutrientes entre ecosistemas marinos y terrestres. Gracias a sus migraciones de larga distancia, son capaces de transportar nutrientes encontrados en el fondo del mar, hasta las playas de anidación (Bjorndal, 1997). Adicional a esto, durante el proceso de anidación se depositan grandes cantidades de huevos que introducen nutrientes en playas que suelen carecer de estos (Bouchard y Bjorndal, 2000). Esto no solo enriquece el ecosistema terrestre costero, sino que los nutrientes también pueden integrarse a través de varias vías del ecosistema: estos pueden retornar al mar como crías, pero también pueden ser aprovechados por descomponedores, plantas, y depredadores locales (Bouchard y Bjorndal, 2000).

Además de estos aportes ecológicos, las tortugas marinas son especies emblemáticas con un gran valor cultural y atractivo turístico (Katdare, 2012). Además, desempeñan funciones ecológicas clave, entre estas se encuentran: mantener saludables los pastos marinos al pastar, mejorando la oxigenación y el ciclo de nutrientes; controlar el crecimiento de especies invasivas (como esponjas) en los arrecifes, favoreciendo así el desarrollo de corales; y algunas especies regulan las poblaciones de medusas, previendo desequilibrios causados por la sobrepesca (Patel et al., 2022). Estas acciones indirectas benefician a muchos otros organismos marinos. También son presas importantes en la cadena alimenticia, especialmente en sus primeras etapas de vida, por lo que su desaparición afectaría gravemente a numerosas especies depredadoras (Patel et al., 2022).

## **C. Efecto del cambio climático en playas de anidación de tortugas**

### **marinas**

En este contexto, es fundamental comprender cómo los organismos ectotermos podrían verse afectados por la variabilidad climática. Estos organismos dependen de señales ambientales para poder realizar actividades indispensables para su desarrollo, tales como la regulación de su tasa metabólica, la proporción de sexos, los patrones de migración y sus ciclos fenológicos (Ariano-Sánchez et al., 2022). Entre estos se encuentran los reptiles, algunos peces, y todas las especies de tortugas marinas (Montero et al., 2018).

En el caso de las tortugas marinas, los aumentos de temperatura son un factor crítico para su ciclo de vida. Estos organismos tienen una alta dependencia de distintos tipos de hábitat a lo largo de su vida, y, por lo tanto, tener condiciones climáticas estables es crucial. En la actualidad estas condiciones se ven cada vez más amenazadas por el calentamiento global, y su ecología se ve gravemente afectada. El aumento de la temperatura de la arena de las playas de anidación de las tortugas marinas es un factor que no siempre es tomado en cuenta al momento de evaluar qué variables afectan el desarrollo de estas, ni cómo puede empeorar conforme aumentan las implicancias del cambio climático (Bowne et al., 2018).

El constante aumento del calentamiento global, y por lo tanto de la temperatura de la arena, podría alterar el éxito reproductivo para las poblaciones de tortugas marinas que aniden en playas de arena volcánica oscura. Este tipo de hábitats son caracterizados por tener un albedo mucho más bajo que las playas de arena blanca (Laloë et al., 2014). Al tener un albedo más bajo, las temperaturas altas se ven más elevadas en la arena debido a que la cantidad de radiación solar que se transforma en energía térmica es mucho mayor, ocasionando que la arena se caliente considerablemente (Hays et al., 2001).

El estudio realizado por Oliver et al. (2014) compara datos históricos de temperatura de arena, mediciones en campo y proyecciones de cambio climático en las Islas de Cabo Verde, Atlántico, en donde se determina que las playas con diferentes colores influyen de manera significativa en las proporciones de sexos de las crías de tortuga marina, lo cual comprueba que la interacción entre temperatura, determinación de sexos y dinámicas

poblacionales en un entorno de calentamiento influyen en el proceso de incubación de las tortugas marinas.

En Guatemala, se han realizado diversas investigaciones orientadas a la ecología de las tortugas marinas. En el estudio titulado *Impact of climate change and habitat degradation on two endangered reptiles: the Guatemalan Beaded Lizard and the Olive Ridley Sea turtle* Ariano-Sánchez (2023) examinó cómo el cambio climático y la degradación de hábitat puede afectar la ecología del Lagarto Espinoso Guatemalteco (*Heloderma charlesbogerti*), y de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*). En el caso de la tortuga Parlama, se buscó evaluar si los efectos del fenómeno climático de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) pueden alterar su ciclo fenológico anual en Centroamérica. Este estudio no encontró un efecto claro de la variabilidad de ENSO en el número de nidos, sin embargo, se determinó que se observó una disminución en la tasa de cambio de huevos enterrados en los años posteriores a eventos extremos de ENSO. Adicional a esto, se determinó que las temperaturas de la arena se veían influenciadas por la temperatura del aire, y la humedad relativa.

#### **D. Impacto humano en sitios de anidación**

La rápida expansión de la población humana también ejerce un impacto grave en los hábitats naturales de las tortugas marinas. Las acciones antropogénicas generan una presión considerable sobre muchos ecosistemas frágiles, pero son especialmente graves en las zonas costeras, ya que estas áreas tienen una alta densidad humana y atractivo turístico. Entre estas acciones se encuentra: el uso de vehículos en las playas, urbanización en hábitats naturales, la influencia de la iluminación artificial, y actividades realizadas por los turistas tanto de día como de noche. Estas actividades pueden alterar el comportamiento de las tortugas marinas, afectando la selección del lugar de anidación (Antworth et al., 2006).

La acelerada expansión urbana y por consecuencia, la pérdida de cobertura vegetal en zonas costeras, es de las principales amenazas para las especies que dependen de ecosistemas costeros. Al perder vegetación y tener un aumento en infraestructuras urbanas, se da un aumento de temperatura en la arena que podría afectar al éxito reproductivo de las tortugas marinas (Ariana-Sánchez, et al., 2023). En Guatemala, gran parte de sus playas se han visto

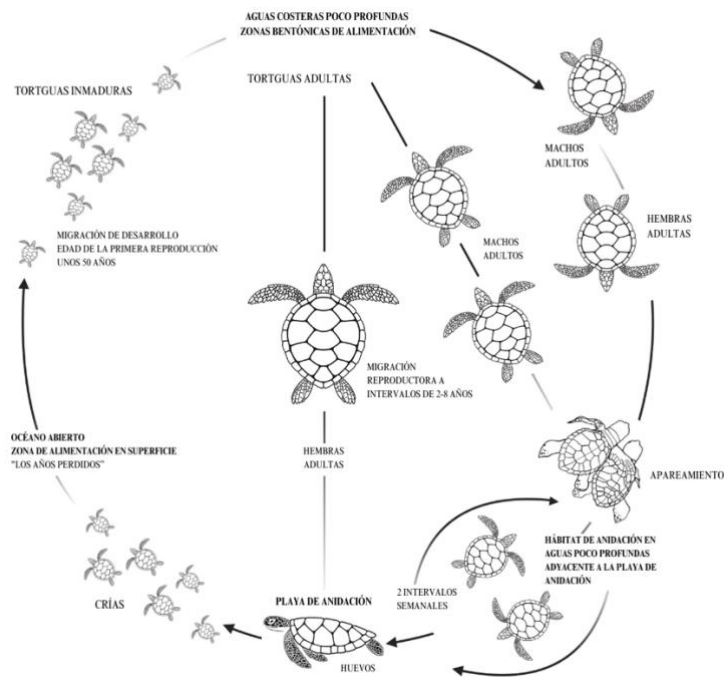
afectadas por urbanización extrema, incluyendo la reducción o eliminación de áreas con vegetación en las zonas.

En el artículo “Developed black beaches - too hot to emerge? Factors affecting sand temperatures at nesting grounds of olive ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*)” por Ariano-Sánchez et al., (2023), se estudió cómo la pérdida de vegetación y la urbanización pueden influir en el perfil térmico de las playas de anidación de tortugas Parlama en Centroamérica, y cómo podría afectar la ecología reproductiva de las tortugas marinas. En este se determinó las áreas que se veían rodeadas por cobertura vegetal reportaron temperaturas más bajas, a comparación de áreas rodeadas por infraestructuras urbanas, o arena. Estos resultados revelan la importancia de la presencia de vegetación en las playas de anidación, y lo esencial que es frenar la perturbación de estos lugares con el fin de mitigar los efectos del cambio climático en las tortugas marinas.

## **E. Ciclo de vida de tortugas marinas**

Las tortugas marinas invierten una gran cantidad de energía en la búsqueda de un lugar adecuado para anidar, la excavación de una cavidad y la posterior cobertura y camuflaje del nido, por lo que un cambio en su sitio de anidación podría alterar el comportamiento de incubación del organismo (Tucker et al., 2017). Además, las hembras suelen estar expuestas a elevados riesgos de depredación durante el proceso de anidación, y cambios en la ubicación de anidación seleccionada pueden afectar al riesgo de depredación de las crías durante la incubación (Antworth et al., 2006).

El ciclo de vida de las tortugas marinas suele ser bastante similar en todas las especies, con algunas variaciones (Bowen y Karl, 2007). Este incluye la migración de zonas de alimentación hasta zonas de apareamiento de hembras y machos; posterior a esto, los machos vuelven a las zonas de alimentación y las hembras se movilizan a zonas de anidación. Al finalizar el periodo de reproducción, las hembras vuelven a las zonas de alimentación y permanecen ahí hasta el próximo ciclo de reproducción (Hart, et al., 2014) (Figura 1).



**Figura 1.** Diagrama del ciclo vital generalizado de las tortugas marinas.

(Adaptado de Hancock, 2020).

## **F. Determinación de sexo dependiente de la temperatura**

Es por eso que la vulnerabilidad de las tortugas marinas a los cambios de temperatura se torna más grave al considerar la importancia que la temperatura de la arena tiene sobre la incubación de sus crías. El desarrollo embrionario de las tortugas marinas se debe de dar a una temperatura constante, dentro de un rango de tolerancia térmica (Thermal Tolerance Range, TTR) de 28°C a 31°C (dependiendo de la especie) (Ariano et al., 2010). Por encima o por debajo de este, el desarrollo embrionario se ve comprometido.

Además, las tortugas marinas presentan un sistema de determinación del sexo dependiente de la temperatura (Temperature-Dependent Sex Determination, TSD) (Mrosovsky y Yntema, 1980), el cual consiste en la producción exclusiva de un solo sexo al estar por debajo (producción exclusiva de machos) o por encima (producción exclusiva de hembras) de un rango transicional de temperatura (Transitional Range of Temperature, TRT) (Wibbels, 2003). Dentro del TRT, la proporción de sexos será relativa a la temperatura de incubación, existiendo una temperatura pivotal, en la cual la proporción será 1:1 (Mrosovsky

y Pieau, 1991). Estas características convierten al desarrollo embrionario de las tortugas marinas en una fase especialmente vulnerable a condiciones climáticas cambiantes. Aún más al tomar en cuenta que una fluctuación de apenas 3°C en la temperatura pivotal podría significar la producción exclusiva de un solo sexo (Ewert et al., 1994).

El sesgo de sexo no es la única preocupación dentro de la anidación de los huevos de tortugas marina, ya que cuando se da un aumento extremo de temperatura prolonga es necesario tomar en cuenta el máximo crítico térmico de los embriones. El máximo crítico térmico se refiere a la temperatura más alta en la cual los embriones de tortugas marinas pueden desarrollarse sin sufrir daños graves o mortalidad, para muchas especies de tortugas marinas, este máximo crítico térmico se sitúa alrededor de los 35°C (Mrosovsky y Yntema 1980). Si la temperatura de la arena supera el máximo crítico térmico durante un período prolongado, puede provocar deformidades en los embriones, reducir su tasa de supervivencia y afectar negativamente a la eclosión de los huevos (Ariano-Sánchez et al., 2023).

## **G. Conservación de tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en**

### **Guatemala**

La tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) enfrenta graves amenazas a su ecología debido a los efectos del calentamiento global. Es una de las tortugas marinas más comunes en todo el mundo, y tiene una alta sensibilidad a los cambios de temperatura, los cuales afectan sus ciclos fenológicos, su reproducción, y su comportamiento (Da Silva *et al.* 2007b). A pesar de esto, la tortuga Parlama ha demostrado tener una alta recuperación poblacional en los últimos años (Peavey et al., 2017). Sin embargo, esto no es indicativo de una adaptabilidad de los cambios de temperatura. A lo largo de los años, los efectos del calentamiento global han aumentado junto con la degradación de su hábitat natural. Esto ha llevado a que los esfuerzos por la conservación de esta especie hayan incrementado y tomado más importancia recientemente. Durante las últimas décadas, la incubación *in situ* de las tortugas parlama ha ido desapareciendo, y ha sido reemplazada por tortugarios o voluntarios que tienen como fin proteger las crías y sitios de anidación de las tortugas (Ariano-Sánchez et al., 2022).

## H. Estrategias de conservación

En Guatemala se han observado diversos esfuerzos por proteger a las tortugas marinas, especialmente a la tortuga Parlama, la cual es una especie que se encuentra catalogada como “En Peligro” según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza («*Lepidochelys olivacea*: Abreu-Grobois y Plotkin, (IUCN SSC Marine Turtle Specialist Group)», 2008), y que utiliza diversas playas en litoral Pacífico en Guatemala para incubar a sus crías.

El Instituto Nacional de Bosques (INAB) fundó el primer tortugario en la playa de Hawái, lo cual fomentó la creación de más tortugarios a lo largo del litoral Pacífico en Guatemala (Tanner et al., 2019). Muchos de los esfuerzos por la conservación de los sitios de anidación de las tortugas marinas en Guatemala se dan gracias a estos tortugarios. Estos son los encargados de la reubicación de los huevos, su incubación controlada y su posterior liberación a las playas (ARCAS, 2015). La Asociación de Rescate y Conservación de la Vida Silvestre (ARCAS) opera varios tortugarios en el Parque Hawái y en el pueblo El Rosario, reubicando e incubando entre 40,000 y 60,000 huevos de tortuga al año (Brittain et al., 2007). Asimismo, existen organizaciones que buscan promover la educación ambiental y la conservación de la fauna marina. Entre estas se encuentra el Centro de Conservación Marina AGHN (CCM), ubicado en la aldea Madre Vieja en Taxisco, Santa Rosa. Esta es una organización que cuenta con programas interactivos de educación, investigación, y conservación que se enfocan principalmente en las tortugas marinas y el ecosistema marino (Aurora, 2020).

Existe una estrategia de conservación dirigida a las tortugas marinas denominada Estrategia Nacional de Manejo y Conservación de tortugas Marinas (ENTM), la cual fue implementada en el año 2002 por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). Durante el año 2018, se estableció una normativa adicional, con el fin de gestionar y conservar las tortugas marinas, buscando regular el uso, manejo y conservación de estas especies, así como fomentar los mecanismos necesarios de carácter institucional para preservar las playas naturales utilizadas para la anidación de tortugas marinas (CONAP, 2018).

Se han realizado diversos estudios sobre la importancia que la temperatura ejerce sobre las tortugas marinas. Investigaciones previas han demostrado que un aumento de temperatura en zonas de anidación de poblaciones de tortugas marinas de diferentes especies significa un incremento en la proporción de crías con sesgo femenino (Tanner et al., 2019).

Además, se prevé una tendencia de aumentos en las tasas de mortalidad de embriones de tortugas marinas debido al incremento de la temperatura (Pike, 2013). Todos estos hallazgos destacan la creciente gravedad sobre los efectos del cambio climático en los hábitats de anidación, y remarcan la urgencia de abordar estas consecuencias para la conservación de las tortugas marinas. A medida que aumenta la investigación de los efectos negativos que el cambio climático continúa ejerciendo sobre los ecosistemas naturales y las especies que dependen de ellos, se evidencia la necesidad de comprender debidamente cómo las especies pueden adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes, y determinar si es necesario intervenir para poder mantener su existencia a salvo.

## II. JUSTIFICACIÓN

A medida que aumenta la investigación de los efectos negativos que el cambio climático continúa ejerciendo sobre los ecosistemas naturales y las especies que dependen de ellos, se evidencia que las tortugas marinas son una de las especies más amenazadas ante esta problemática (Santidrián et al., 2020). Las tortugas marinas utilizan las playas como zonas de anidación para incubar sus huevos, y, por lo tanto, la degradación de estos ambientes significa un aumento de riesgo para las crías.

Para que las playas de anidación de las tortugas marinas sean óptimas para depositar los huevos, deben de cumplir con varios requisitos, como lo son la alta humedad, la oceanografía de la costa, la inundabilidad de la playa, y la baja salinidad (Miller, 1997). Las fuertes lluvias ocasionadas por los efectos del cambio climático hacen que las condiciones de la arena no sean las adecuadas para excavar los nidos e incubar los huevos. Además, pueden opacar las señales que incitan a las hembras para llegar a las playas, debido a que provocan turbidez en las aguas costeras y disminuyen la salinidad (Limpus et al., 2001). Las playas que se ven más afectadas por esto son las que tienen una alta antropización en la costa, y que, por lo tanto, impide la evolución natural de las playas (Poloczanska et al., 2009).

El proceso de incubación de este organismo se ve estrechamente ligado a las condiciones térmicas del nido, ya que afecta directamente la proporción de sexos, el éxito de eclosión, la morfología, y la capacidad de movilización de las crías (Hart, et al., 2014). Se han realizado estudios que demuestran que un aumento de temperatura significa un sesgo femenino en la proporción de crías de las tortugas marinas (Oliver et al., 2014). Asimismo, investigaciones previas en Guatemala han demostrado que la temperatura de los sitios de anidación de las tortugas marinas en Guatemala ha aumentado drásticamente en menos de un año (Ariano-Sánchez et al., 2023).

A pesar de que en Guatemala existen diversos establecimientos dedicados a la protección y conservación de las tortugas marinas, es importante conocer qué alcance tendrán las condiciones climáticas actuales y futuras sobre las temperaturas de arena de los sitios de anidación de la especie en el país. Es fundamental determinar qué acciones futuras se deben de tomar para poder asegurar que no se dé la extinción de las tortugas marinas.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. General**

Evaluar cómo las variables meteorológicas y la presencia de vegetación costera afectan a las temperaturas de la arena y a la ecología térmica de la anidación de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral Pacífico de Guatemala.

#### **B. Específicos**

Monitorear la temperatura de la arena en los sitios de anidación de tortuga Parlama en el litoral Pacífico de Guatemala, durante los meses de octubre 2023 a marzo 2024 utilizando registradores automáticos de temperatura.

Evaluar cómo la temperatura de la arena varía de acuerdo con la temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, profundidad, y cobertura de vegetación en el litoral Pacífico de Guatemala.

Modelar las temperaturas futuras de la arena de playa para diferentes escenarios climáticos (SPPs-126, SSPs-245 y SSPs-585) proyectados a los años 2040, 2060 y 2080, basado en la relación entre la temperatura del aire y la temperatura de arena para el período 2018-2024 en el litoral Pacífico de Guatemala.

## IV. HIPÓTESIS

### A. Hipótesis principal

Las temperaturas en los sitios de anidación de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral Pacífico de Guatemala se ven influenciadas por las variables meteorológicas, así como el tipo de uso de suelo circundante, manteniendo una tendencia creciente comparada con el período 2018-2019.

### B. Hipótesis secundarias

Las temperaturas de los sitios de anidación de tortugas marinas en el litoral Pacífico de Guatemala excederán a las temperaturas reportadas durante 2018-2019.

Los puntos desprovistos de vegetación costera en los sitios de anidación de tortugas marinas en el litoral Pacífico de Guatemala presentarán una mayor temperatura a comparación de los puntos con vegetación costera.

Las temperaturas de la arena de los sitios de anidación de tortugas marinas en el litoral Pacífico de Guatemala aumentarán con respecto a las temperaturas actuales para los diferentes escenarios climáticos (SPPs-126, SSPs-245 y SSPs-585) proyectados a los años 2040, 2060 y 2080,

## V. MÉTODOLÓGÍA

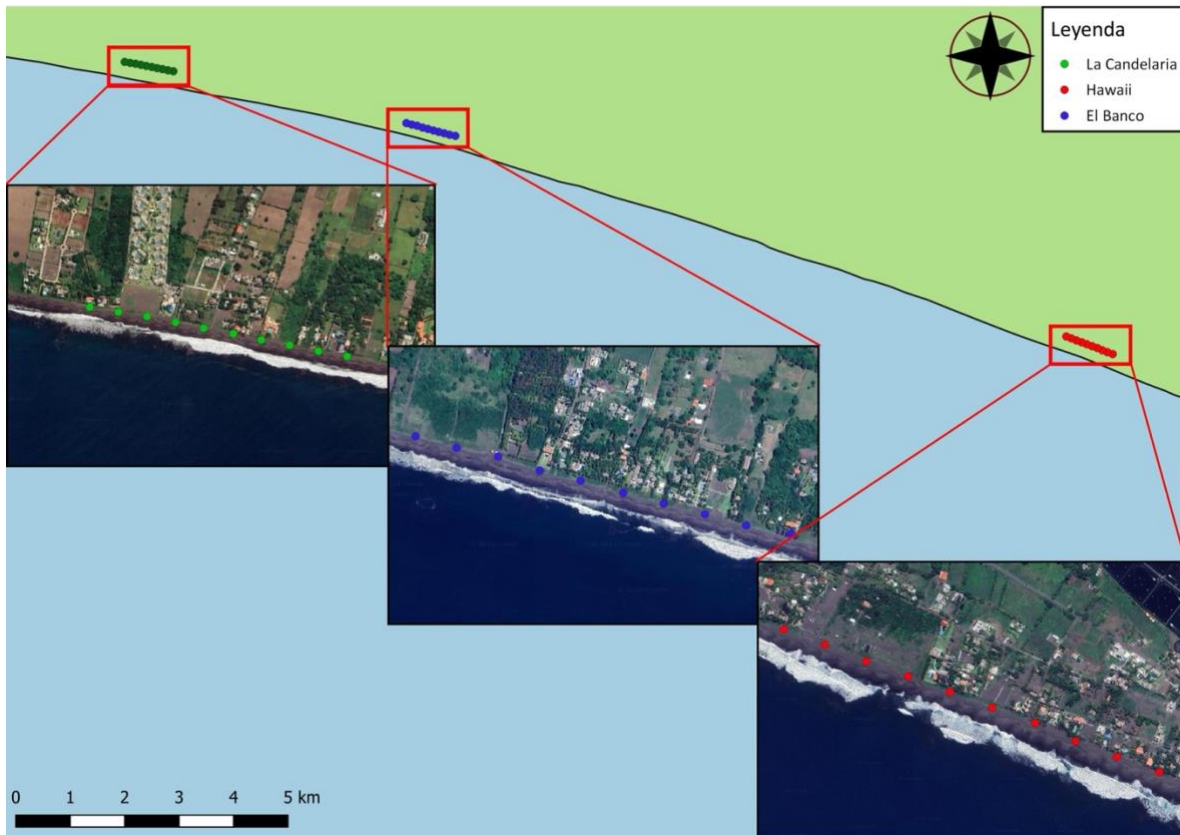
### A. Área de trabajo

El estudio se llevó a cabo en el litoral Pacífico de Guatemala, en las playas de anidación de la tortuga Parlama El Banco (13.905685 °N, -90.536711 °O), Hawái (13.869012 °N, -90.419519 °O), y La Candelaria (13.914435 °N, -90.572804 °O) (Figuras 2 y 3). La playa El Banco se encuentra levemente urbanizada, y posee zonas con vegetación abiertas, pero también estructuras de concreto. La playa Hawái se encuentra a 12 kilómetros de El Banco, con la ciudad de Monterrico en medio de ellas. Esta área se encuentra considerablemente más urbanizada que El Banco debido a que es un punto turístico más popular, y se ve rodeada por complejos vacacionales y urbanizaciones grandes con pequeños hoteles rodeando toda la costa. La playa La Candelaria se encuentra en Taxisco, Santa Rosa, muy cerca de Monterrico y a 6.7 kilómetros de El Banco, y se encuentra moderadamente urbanizada, con áreas de centros turísticos pero rodeados de mucha vegetación y poca actividad antropogénica.

Todas las ubicaciones son playas de arena oscura debido a la actividad volcánica de la zona, y sus condiciones climáticas suelen ser cálidas y húmedas, con estaciones lluviosas y secas pronunciadas (Ariano-Sánchez et al., 2023). La temperatura media anual se encuentra alrededor de los 27°C, con temperaturas máximas de 30°C en abril; sin embargo, las fluctuaciones a lo largo del año son relativamente escasas. La época lluviosa del área coincide con el periodo de anidación de la tortuga Parlama, que es de junio a noviembre. Se ha reportado que al menos un 99% de los nidos de tortugas marinas registrados cada año han sido de tortuga Parlama, con poca frecuencia de tortuga verde y tortuga laúd (Ariano-Sánchez et al., 2023).



**Figura 2. Mapas de ubicación de los transectos realizados. a)** Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio en la costa del Pacífico de Guatemala, en Centroamérica. **b)** Transectos planificados que se llevarán a cabo en las playas de La Candelaria (puntos verdes), El Banco (puntos azules) y Hawái (puntos rojos). Las estaciones meteorológicas de las cuales se recopilarán los datos climáticos están marcadas con estrellas en el mapa. Las estaciones meteorológicas empleadas para cada transecto están marcadas con una estrella negra, siendo La Candelaria para El Banco y La Candelaria, y La Máquina para Hawái.



**Figura 3. Ubicación exacta de transectos.** Ubicación exacta de los puntos a muestrear en las playas La Candelaria (puntos verdes), El Banco (puntos azules), y Hawái (puntos rojos).

## B. Especie modelo

La tortuga Parlama, con nombre científico de *Lepidochelys olivacea*, tiene una distribución circunglobal en áreas tropicales (Da Silva et al., 2007), y se encuentra clasificada como En Peligro según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza («*Lepidochelys olivacea*: Abreu-Grobois y Plotkin, (IUCN SSC Marine Turtle Specialist Group)», 2008). La tortuga Parlama es la tortuga más común que anida en las playas del Pacífico de Guatemala, y suele ser de un tamaño pequeño, no sobrepasando los 45 kilogramos (Ariano-Sánchez et al., 2020). El comportamiento de anidación del género *Lepidochelys* se puede dividir en dos categorías: arribada y anidación solitaria. Arribada es un comportamiento en el cual grupos numerosos de hembras emergen simultáneamente del mar con el propósito de poner huevos (Jensen et al., 2006). Este fenómeno caracteriza el proceso de anidación de las tortugas parlama (Plotkin et al., 2006).

En Guatemala, la anidación de estas tortugas se da entre junio y octubre, teniendo una mayor actividad en agosto y septiembre, ocurriendo durante todo el año de forma esporádica (Brittain et al., 2007). Tiene aproximadamente dos eventos de anidación al año, los cuales se separan entre 16 y 25 días (Ariano-Sánchez *et al.* 2023). Como se mencionó anteriormente, la incubación *in situ* de la especie es casi inexistente debido a la actividad económica local, y la venta de los huevos de la tortuga para su consumo (Ariano-Sánchez et al., 2023).

Sin embargo, existe un sistema que busca proteger las crías de la tortuga Parlama en el cual los aldeanos locales recolectan los huevos y los venden a criaderos para que estos puedan ser enterrados y supervisados. Además del costo de la compra de los huevos, los criaderos deben de cumplir con una cuota de conservación establecida por las regulaciones gubernamentales con el fin de respaldar iniciativas de conservación de las tortugas marinas en la región (Brittain et al., 2007).



**Figura 4.** Tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) anidando en playa Hawái, Guatemala.

Fuente: Arcas, 2015.

## C. Toma de datos

La metodología para la toma de datos se basó en el artículo: “Developed black beaches - too hot to emerge? Factors affecting sand temperatures at nesting grounds of olive ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*)” por Ariano-Sánchez et al., (2023).

Para recopilar los datos de temperatura de la arena se utilizaron 60 registradores de temperatura (LogTag Trix-8 rango de medición:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ , precisión  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  para  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ ), los cuales fueron precalibrados por el fabricante. Estos están fabricados con un recubrimiento de policarbonato que los vuelve resistentes al agua y a entornos costeros. Cada registrador se programó para tomar datos de temperatura cada hora.

Los registradores fueron colocados a lo largo de tres transectos (uno en playa El Banco, otro en La Candelaria, y el último en playa Hawái) paralelos a la costa a aproximadamente un metro de distancia de la línea de marea alta en las zonas en las cuales se ha observado la anidación de tortugas parlama anteriormente.

El tipo de entorno fue definido con base en lo que rodeaba cada punto de medición. Estos fueron divididos en tres categorías, siendo estas: “rodeado de arena”, refiriéndose a los entornos que no tenían ningún tipo de cubierta vegetal ni se encontraban cerca de estructuras de concreto y “rodeado de vegetación”, refiriéndose a entornos rodeados en su mayoría de vegetación (ver glosario).

Cada transecto fue de 1 kilómetro de distancia, compuesto de 10 puntos con 100 metros de distancia entre ellas. Se midió la temperatura a la profundidad de 30 y 50 centímetros en cada parcela, debido a que estas eran las profundidades promedio a las cuales la tortuga Parlama enterraba sus huevos en condiciones naturales (Valverde et al. 2010).

Para obtener los datos de temperatura diaria del aire, precipitación, y humedad relativa se utilizó la información del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, descargando los datos de la estación meteorológica La Candelaria que se encuentra a 1 kilómetro de la playa El Banco y a 6.7 kilómetros de la playa La Candelaria. Para el transecto de Hawái se utilizó la estación meteorológica La Máquina que se encuentra a 4 kilómetros de la playa (Figura 3).

## **D. Análisis de datos**

### **1. Análisis de influencias en las temperaturas de la arena**

Para comprender las variaciones de las temperaturas de la arena en distintas ubicaciones y condiciones climáticas, se recolectaron registros diarios de temperatura de la arena para estimar su temperatura promedio diaria. Se utilizaron 6 posibles modelos para evaluar qué factores influyen en la temperatura de la arena, siendo estos, las condiciones climáticas locales (temperatura del aire, precipitaciones, humedad relativa), la ubicación (playa del transecto, profundidad, categoría que rodea la parcela).

Para analizar la relación entre estas variables y las temperaturas de la arena, se empleó un modelo lineal utilizando el paquete `lm`, en el cual se emplearon las variables de temperatura promedio diaria de la arena, y la temperatura promedio diaria del aire.

En todos los análisis estadísticos se utilizó el enfoque de modelos candidatos y se seleccionó el mejor modelo con base al Criterio de Información de Akaike para muestras pequeñas (AICc) utilizando el paquete `MuMIn` con un  $\delta < 2$  (Barton, 2023). Previo a la realización de los modelos candidatos se evaluó colinearidad con coeficientes de correlación de Pearson  $< 0.5$  y el Factor de Inflación de Varianza de los efectos fijos con  $VIF < 3$  (Zuur et al., 2010). Para los análisis multi año se utilizaron únicamente los datos de las playas de El Banco y de Hawái.

### **2. Modelo predictivo**

Se realizó un modelo predictivo a futuro con el propósito de determinar las posibles temperaturas de la arena en diferentes escenarios climáticos (SPPs-126, SSPs-245 y SSPs-585) en un futuro.

Estos escenarios representan diferentes trayectorias futuras de emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en la temperatura global. El escenario moderado (SSPs-245) representa un futuro donde las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen considerablemente. El escenario optimista (SPPs-126) representa un futuro donde se toman medidas significativas para reducir las emisiones y mitigar el cambio climático. El escenario

pesimista (SSPs-585) asume un aumento continuo en las emisiones de gases de efecto invernadero (Riahi, et al.,2017).

Para esto, se utilizaron datos históricos de temperatura de la arena y temperatura del aire. Los datos de temperatura de la arena corresponden al periodo desde el 16 de octubre de 2023 hasta el 16 de marzo de 2024, así como a datos del estudio realizado por Ariano-Sánchez et al., en 2018-2019. Los datos climatológicos fueron generosamente brindados por el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Estos datos se filtraron para excluir la playa La Candelaria, debido a que esta no se incluyó en el estudio de 2018-2019. Se creó un modelo lineal utilizando los datos históricos filtrados, donde la temperatura de la arena se eligió como variable respuesta, y la temperatura del aire como variable predictiva.

Se calcularon los coeficientes del modelo, incluyendo el intercepto y el coeficiente estimado para crear una ecuación que predijera la temperatura de la arena basada en la temperatura del aire a futuro (Temperatura de la arena a futuro (°C) = Temperatura del aire a futuro (°C) \* Coeficiente estimado + Intercepto). Se cargaron los datos futuros de temperatura del aire para los escenarios optimista (SSPS\_126), moderado (SSPS\_245) y pesimista (SSPS\_585) para cada periodo de años (2021-2040, 2041-2060, y 2061-2080). Estos datos fueron descargados de WordClim para cada playa analizada en cada rango de años. La temperatura de la arena se proyectó utilizando el modelo lineal anteriormente mencionado. Esto se hizo para cada mes y cada combinación de escenario climático y periodo.

Finalmente, se calcularon los promedios mensuales de la temperatura de la arena tanto para los datos históricos (2018-2024) como para los datos proyectados en el futuro. Esto permitió comparar las tendencias y variaciones estacionales de la temperatura de la arena en el tiempo presente y en el futuro. Esta comparación se realizó para los diferentes escenarios climáticos (optimista, moderado y pesimista) y para cada rango de años proyectado (2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080).

## VI. RESULTADOS

### A. Temperatura de la arena

De los 60 registradores de temperatura enterrados, se recuperaron 52 dispositivos (18 en Hawái, 16 en La Candelaria y 18 en El Banco). Los dispositivos restantes no se encontraron debido a cambios en el área circundante y errores en las mediciones tomadas inicialmente. De los 52 obtenidos, 20 demostraron fallos en la batería o en los datos registrados (8 en El Banco, 5 en La Candelaria, y 7 en Hawái), por lo que no fue posible incluirlos en el análisis. Los datos fueron tomados a partir del 16 de octubre del 2023 hasta el 16 de marzo del 2024 (6 meses consecutivos), periodo que abarca el final de la temporada de anidación de las tortugas Parlama (junio a noviembre) (Ariano Sánchez, et al., 2023), y los últimos meses del fenómeno climatológico de El Niño (ENSO) (ICC, 2024).

La playa en la cual se catalogaron mayores puntos como rodeados de arena fue Hawái, teniendo 5 puntos, y 6 puntos catalogados como rodeados de vegetación. En La Candelaria se encontraron solamente 2 puntos de arena, y 9 puntos de vegetación. En El Banco solo se catalogó 1 punto como arena, y 9 como vegetación (Cuadro 1). El número total de registradores encontrados en cada playa (independientemente de la categoría) es bastante homogéneo, lo cual beneficia al análisis de la temperatura para cada playa.

**Cuadro 1. Temperatura promedio diaria de la arena según la playa y el alrededor.** Resumen de la temperatura promedio de la arena (°C) de los registradores encontrados en cada playa según la categoría que rodea el punto registrado durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024.

Playa	Alrededor	# de Puntos	Temperatura promedio diaria de la arena (°C)
La Candelaria		11	33.89
	Arena	2	33.6
	Vegetación	9	34.0
El Banco		10	33.79
	Arena	1	34.7
	Vegetación	9	33.7
Hawái		11	34.68
	Arena	5	34.7
	Vegetación	6	34.7

La temperatura promedio diaria de la arena en todas las playas fue de 34.14°C (en un rango de 24°C a 36.70°C). La temperatura promedio diaria del aire fue de 27.69°C (en un rango de 24.70°C a 30.24°C), la precipitación promedio diaria fue de 0.58 mm (en un rango de 0.0 mm a 31.6 mm), y la humedad relativa promedio diaria fue de 78.69% (en un rango de 37.90% a 98.20%) (ICC, 2024). Se puede observar que la temperatura promedio diaria de la arena en los puntos rodeados por vegetación es ligeramente más baja que en los puntos rodeados únicamente por arena (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Temperatura promedio diaria de la arena según el alrededor y la profundidad.** Resumen de las temperaturas promedio de la arena (°C) en las tres playas analizadas durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024.

VARIABLES	Nivel	# de Puntos	# de Registros	Temperatura promedio diaria de la arena (°C)
Todos los puntos		32	4712	34.14
Profundidad	30 cm	14	2048	33.89
	50 cm	18	2664	34.32
Alrededor	Vegetación	23	3335	33.99
	Arena	19	1377	34.80

El porcentaje de días en los que la temperatura de la arena superó el máximo crítico térmico de los embriones de tortugas marinas (>35°C) fue más alto en los puntos enterrados a 50 cm. En los puntos rodeados solo por arena, la temperatura superó este umbral en un 28.76% de los días a 30 cm de profundidad y en un 36.6% de los días a 50 cm de profundidad. En comparación, en los puntos rodeados por vegetación, el porcentaje de días por encima del máximo crítico térmico fue menor: 25.46% a 30 cm y 16.04% a 50 cm de profundidad (Cuadro 3). Estos datos indican que la arena es más caliente a 50 cm de profundidad, especialmente en áreas sin cobertura vegetal.

**Cuadro 3. Número y porcentaje de días con temperatura promedio diaria de arena >35°C o <30.5°C.** Resumen del número y porcentaje de días y puntos cuya temperatura de arena (°C) promedio sobrepasa el máximo crítico térmico que los embriones de la tortuga Parlama pueden sobrevivir, y cuya temperatura se encuentra debajo del rango de temperatura pivotal para los embriones de la tortuga Parlama, registrado durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024.

Profundidad	30 cm		50 cm	
	Arena	Vegetación	Arena	Vegetación
Número promedio de días (n) por encima del máximo crítico térmico (>35°C)	44	38.7	56	24.54
Porcentaje de días (%) registrados por encima del máximo crítico térmico (>35°C)	28.76	25.46	36.6	16.04
Número de puntos (máximo crítico térmico)	3	9	5	10
Número promedio de días (n) por debajo de la temperatura pivotal (<30.5°C)	3	13.7	0	0.15
Porcentaje de días (%) registrados por debajo de la temperatura pivotal	1.96	9.13	0.4	0.1
Número de puntos (temperatura pivotal)	2	7	1	1

El modelo que mejor se ajustó para predecir la temperatura de la arena fue el que se conformó por las variables de temperatura de aire, precipitación, profundidad, humedad, alrededor, y playa. Este fue seleccionado por medio de DREGDE (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Selección de Modelos Lineales (ML).** Resumen de la selección de modelos lineales (ML) para la temperatura de la arena (°C) en datos tomados durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. Los datos en la cuadro son la probabilidad logarítmica (LL), el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc), el delta en AICc ( $\Delta AICc$ ) y el peso de AICc ( $\omega AICc$ ). El modelo en negrita es el que mejor se ajustó.

Modelo	LL	AICc	$\Delta AICc$	$\omega AICc$
<b>Temperatura de arena ~ Temperatura de aire + Precipitación + Profundidad + Humedad + Alrededor + Playa</b>	<b>-8295.949</b>	<b>16609.9</b>	<b>0.00</b>	<b>1</b>
Temperatura de arena ~ Profundidad + Alrededor + Playa	-8365.304	16742.6	132.71	0
Temperatura de arena ~ Precipitación + Humedad + Temperatura de aire	-8545.838	17101.7	491.77	0
Temperatura de arena ~ Año	-8591.370	17188.7	578.83	0
Temperatura de arena ~ 1	-8604.733	17213.5	603.55	0

Con base en el tamaño del efecto ( $\beta$ ) y los intervalos de confianza al 95% obtenido por el modelo lineal mejor ajustado, todas las variables pertenecientes al modelo muestran tener un efecto significativo sobre la temperatura de la arena. Estas variables incluyen factores ambientales y de ubicación que influyen en la temperatura de la arena, y sus respectivos coeficientes reflejan la magnitud y dirección de su impacto (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Variables predictoras para temperatura de la arena (°C).** Resumen de variables predictoras seleccionadas para el mejor modelo predictor de cambios en la temperatura de la arena para los datos tomados durante el periodo del 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024; con el tamaño del efecto ( $\beta$ ), error estándar, e intervalos de confianza inferiores (LCI) y superiores (UCI) respectivamente descritos.

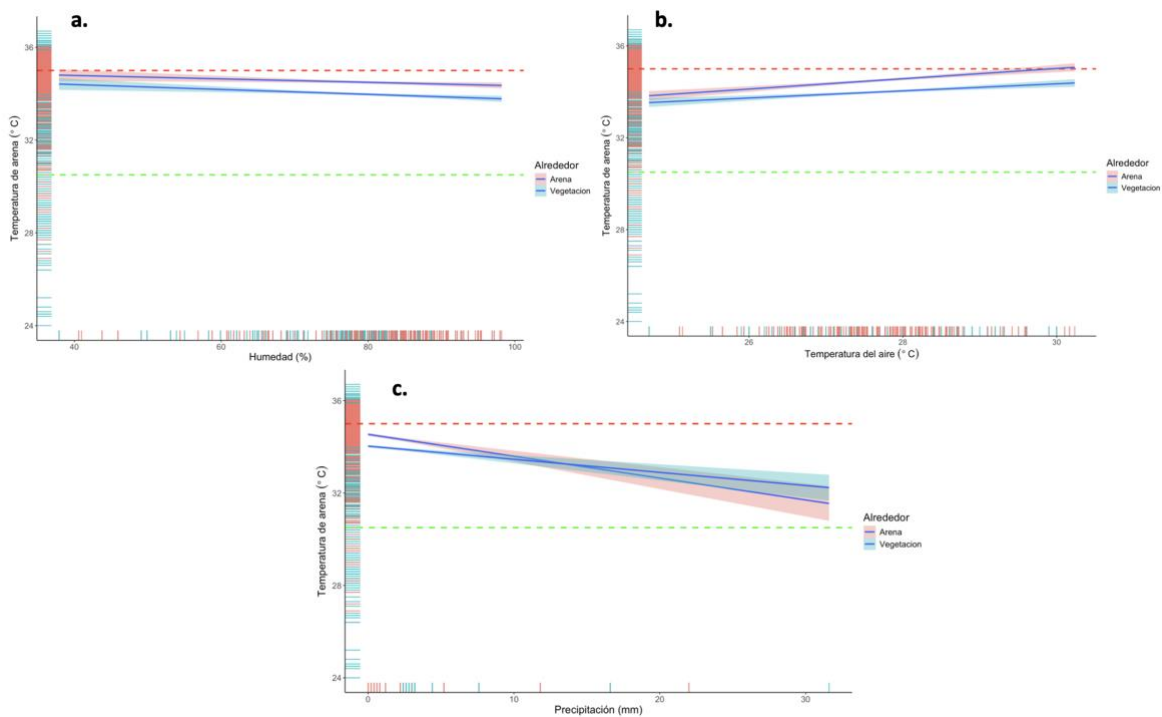
VARIABLES	Tamaño de efecto ( $\beta$ )	Error estándar	LCI	UCI
Intercepto	30.57297096	0.708083479	29.18479566	31.961146264
Alrededor Vegetación	-0.15020040	0.049842222	-0.24791450	-0.052486294
Humedad	-0.01032979	0.002304171	-0.01484704	-0.005812532
Playa El Banco	-0.10879668	0.051503033	-0.20976675	-0.007826605
Playa Hawái	0.76739012	0.053553550	0.66240008	0.872380166
Precipitación	-0.04816948	0.007294348	-0.06246982	-0.033869144
Profundidad 50 cm	0.45491414	0.041446149	0.37366028	0.536168010
Temperatura de aire	0.14501885	0.023445717	0.09905426	0.190983436

## B. Impacto de variables climatológicas sobre la temperatura de la arena

Las variables climatológicas demostraron tener un efecto sobre la temperatura de la arena (Cuadro 5). La precipitación tuvo un efecto negativo, lo cual indica que un aumento en esta significará una disminución en la temperatura de la arena. La humedad demuestra un efecto negativo menor, pero significativo, indicando que cuando esta aumente la temperatura de la arena disminuirá ligeramente. La temperatura del aire presentó un efecto positivo, confirmando que, si esta aumenta, también lo hará la temperatura de la arena.

Las variables climatológicas también demostraron tener una relación con las dos categorías de cobertura analizadas (arena y vegetación). La temperatura del aire evidenció tener un efecto en el aumento de temperatura para ambas categorías (Figura. 5-b). Se observa que, en general, la temperatura de la arena tiende a disminuir cuando la humedad relativa aumenta, tanto en los puntos rodeados de vegetación como los puntos rodeados de arena

(Figura. 5-a). La precipitación significó una disminución de temperatura para las dos categorías, pero se ve un efecto más marcado para la categoría de ‘arena’ (Figura. 5-c).



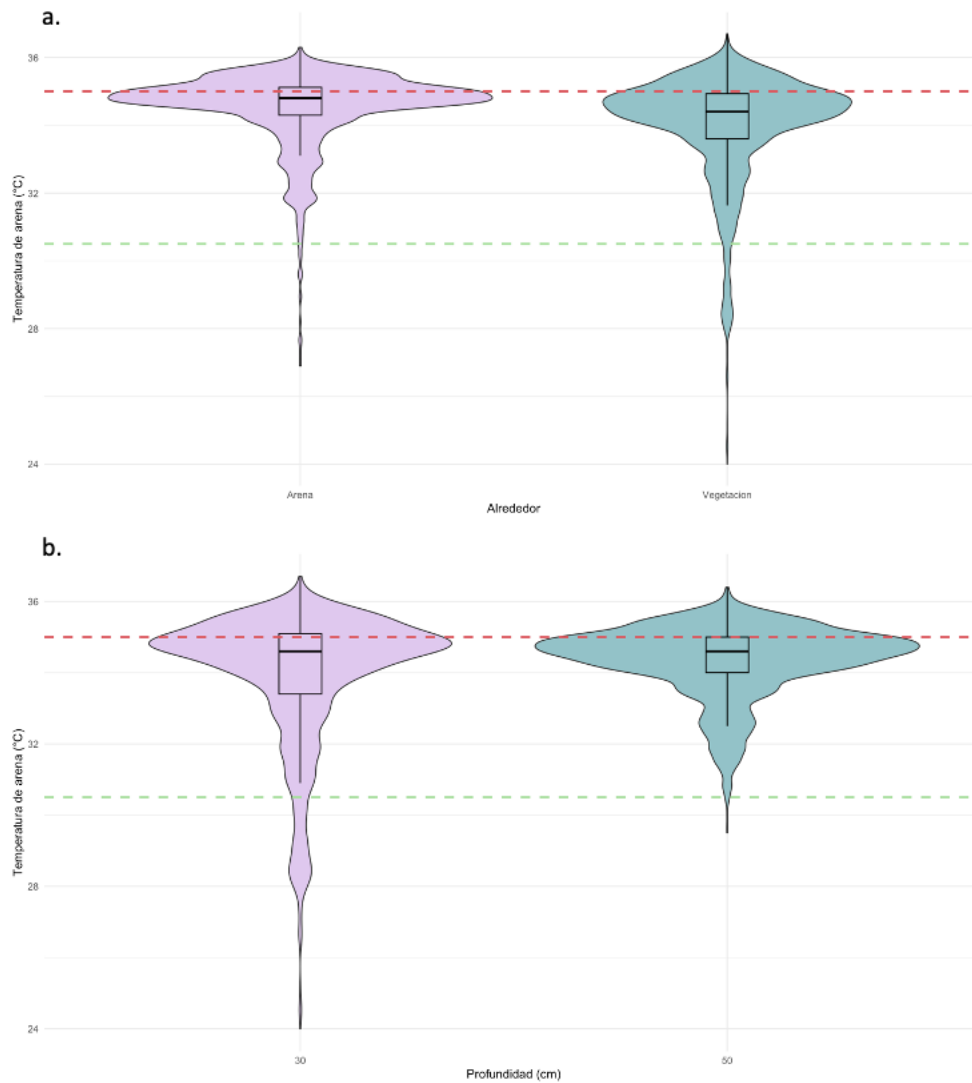
**Figura 5. Relación entre la temperatura promedio diaria de la arena y las variables climatológicas.** Relación de la temperatura de la arena (°C) con **a)** la humedad (%), **b)** temperatura del aire (°C), y con **c)** la precipitación (mm), desde el 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. Las líneas punteadas roja y verde representan, respectivamente, la temperatura máxima crítica térmica (>35°C) y la temperatura pivotal (<30.5°C) para los embriones de tortugas marinas.

### C. Impacto de variables físicas sobre la temperatura de la arena

Las variables físicas tuvieron un efecto claro sobre la temperatura de la arena (Cuadro 5). El efecto de la variable vegetación fue negativo, indicando que cuando hay vegetación que rodea el punto, la temperatura de la arena se reduce. Esto se puede observar en la Figura 7-a. Las temperaturas de la arena se vieron más bajas o dispersas en los puntos rodeados por vegetación (34.0°C), que en los puntos rodeados únicamente de arena (34.8°C). Además, es importante destacar que la temperatura promedio diaria de la arena en los puntos rodeados de arena está extremadamente cerca del máximo crítico térmico de los embriones de tortugas marinas (>35°C) (Howard, et al., 2014).

La profundidad a 50 cm tuvo un efecto positivo considerable, lo cual significa que, a mayor profundidad de medición, mayor será la temperatura. En la Figura 6-b se evidencia en

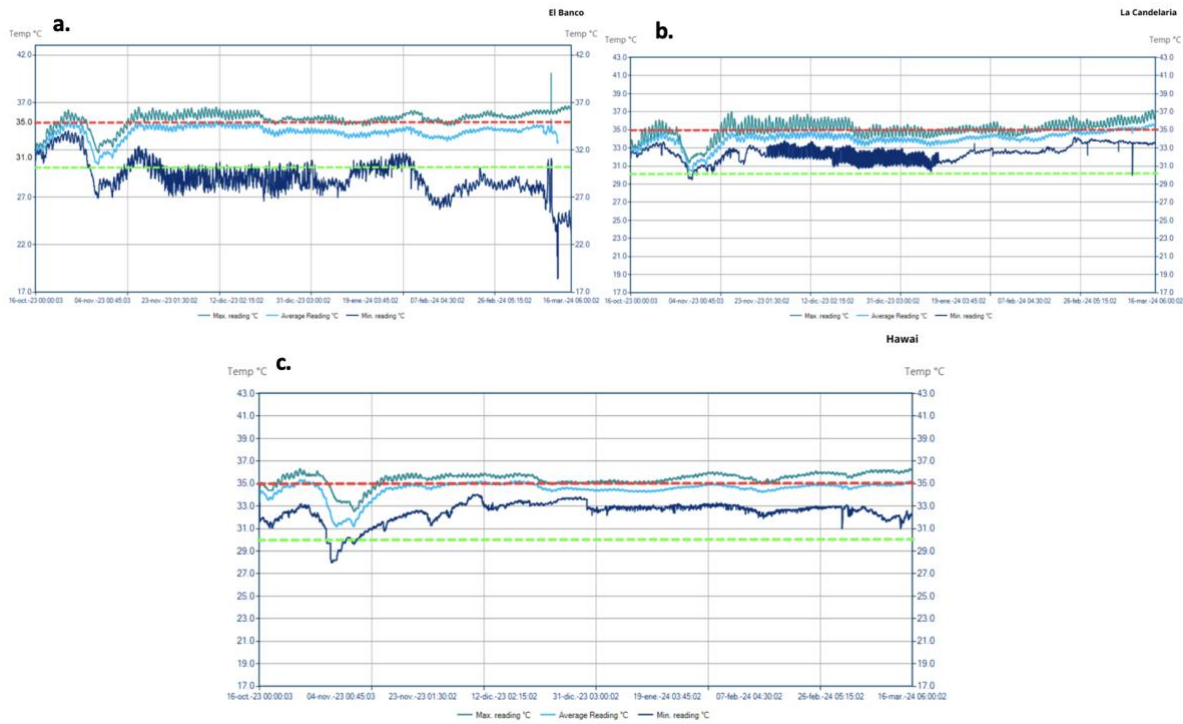
la dispersión de la gráfica de violín para 50 cm de profundidad, habiendo una mayor concentración de los puntos alrededor de 34°C, encontrándose muy cerca del máximo crítico térmico.



**Figura 6. Gráficos de violín que muestran la distribución de la temperatura promedio diaria de la arena (°C) durante el período del 16 de octubre de 2023 al 16 de marzo de 2024.** El gráfico **a)** analiza la temperatura en función de las categorías registradas que rodean cada punto, mientras que el gráfico **b)** considera las dos profundidades analizadas (30 cm y 50 cm). En ambos gráficos, se destaca la temperatura crítica máxima para los embriones con una línea punteada roja, y la temperatura pivotal se muestra con una línea punteada verde. El ancho de cada violín refleja la frecuencia relativa de ocurrencia de cada valor de temperatura de la arena, y cada violín incluye un diagrama de caja que proporciona información sobre la distribución de los datos de temperatura.

La variable de playa demostró tener un efecto positivo significativo para Hawái, indicando que la temperatura de la arena es más caliente en comparación a otras playas. En el caso de El Banco se indicó que los puntos en esta playa tendrán una menor temperatura

que las otras playas. Esto se puede observar en la Figura 7, siendo la temperatura de Hawái de 34.68°C (Figura. 7-c), la de La Candelaria de 33.89°C (Figura. 7-b) y la de El Banco de 33.79°C, siendo esta la más fría (Figura. 7-a) (Cuadro 1). En las tres playas se observó una disminución abrupta de temperatura a finales de octubre y principios de noviembre por fuertes precipitaciones durante esos días (31 mm de agua durante un día). En todas las playas se observa una temperatura promedio cercana al máximo crítico térmico.



**Figura 7. Temperatura promedio diaria de la arena para las playas El Banco, La Candelaria y Hawái.** Temperatura de la arena (°C) (máxima, promedio, y mínima) combinando la profundidad (30 y 50 cm) para las playas **a)** El Banco, **b)** La Candelaria, y **c)** Hawái, registrada desde el 16 de octubre, 2023 hasta el 16 de marzo, 2024. La temperatura máximo crítica térmica para los embriones se ve resaltada por la línea punteada roja, y la temperatura pivotal de los embriones se ve resaltada por la línea punteada verde.

#### **D. Comparación de temperatura de la arena entre 2018-2019 y 2023-2024**

La temperatura promedio de la arena demuestra un claro aumento al comparar los datos de 2018-2019 con los de 2023-2024. Para ambos periodos se tomaron los meses de octubre a marzo, y solamente se analizaron las playas de Hawái y El Banco. La temperatura de la arena para 2018 en octubre fue de 30.6°C, y la temperatura registrada para 2024 fue de 34.2°C, demostrando un aumento de aproximadamente 4°C. Los meses de diciembre y enero presentaron temperaturas más altas respectivamente para los años de 2023-2024, a

comparación de 2018-2019. Las temperaturas en enero y febrero del 2024 se vieron relativamente similares a las del 2019, presentando un ligero incremento de la temperatura en febrero.

La temperatura promedio del aire se mantuvo relativamente estable entre 2018 y 2024, con un ligero incremento en algunos meses. Por ejemplo, en octubre, la temperatura del aire aumentó de 26.9 °C en 2018 a 27.5 °C en 2023. En noviembre y diciembre de 2023, la temperatura del aire fue ligeramente más alta que en los mismos meses de 2018 y 2019. Los niveles de humedad mostraron variabilidad entre los años. En octubre, la humedad promedio disminuyó ligeramente de 87.5% en 2019 a 86.9% en 2023.

La precipitación demostró tener una alta variabilidad, teniendo un valor bastante alto en octubre de 2023 (2.43 mm). Es interesante destacar que hubo mayor precipitación en los meses de octubre, noviembre y diciembre para el 2018, 2019, y 2023.

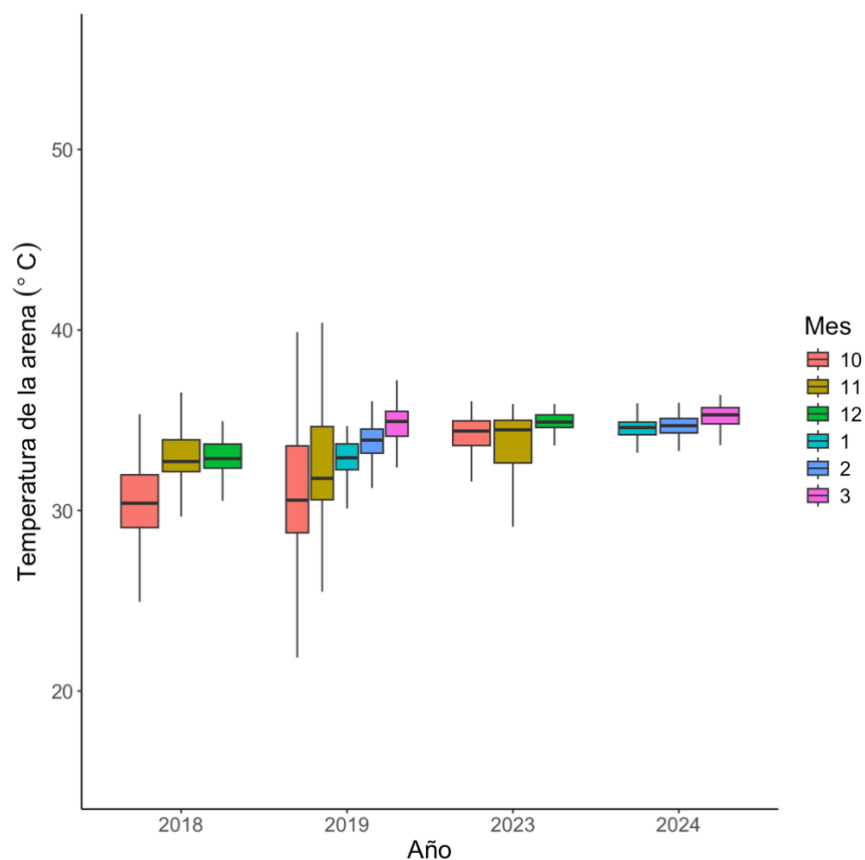
**Cuadro 6. Datos climatológicos mensuales para 2018-2019 y 2023-2024.** Resumen de promedio de datos climatológicos mensuales para cada año que se realizó el monitoreo.

Mes	Año	Temperatura de arena promedio (°C)	Temperatura de aire promedio (°C)	Humedad promedio (%)	Precipitación (mm)
Octubre	2018	30.6	26.9	86.0	0.0205
Octubre	2019	31.6	26.9	87.5	0.0548
Octubre	2023	34.2	27.5	86.9	2.43
Noviembre	2018	33.5	27.6	80.5	0.00269
Noviembre	2019	33.1	26.9	89.0	0
Noviembre	2023	33.7	27.8	85.8	1.24
Diciembre	2018	33.0	26.2	74.0	0
Diciembre	2023	34.6	27.8	74.7	0
Enero	2019	32.7	26.2	75.7	0
Enero	2024	34.3	27.8	77.3	0
Febrero	2019	33.4	27.0	78.0	0
Febrero	2024	34.3	27.2	73.2	0.217
Marzo	2019	34.4	28.1	76.5	0
Marzo	2024	34.5	28.0	81.3	0

Datos de 2018-2019 brindados por Ariano-Sánchez, et al., 2023.

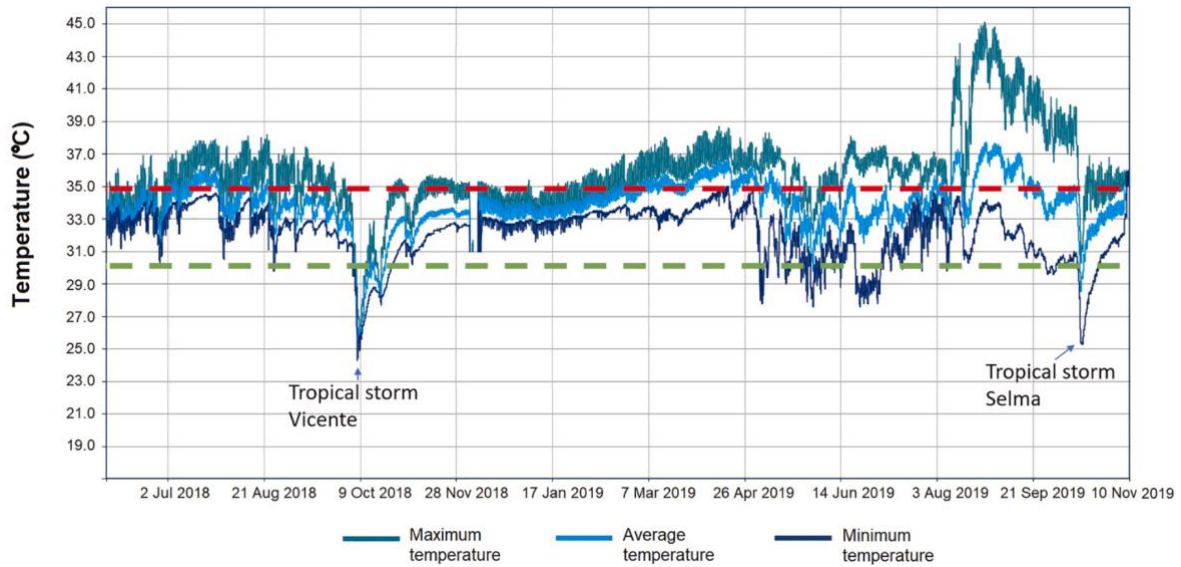
En la Figura 8 se evidencia de forma gráfica el aumento de temperatura que la arena ha tenido a lo largo de los años. Se puede observar que los meses de octubre (10) y noviembre (11) fueron aumentando de temperatura en cada monitoreo. El mes de diciembre también presentó un aumento relativamente alto de temperatura al comparar el dato de 2019 con el

del 2023. En general, todos los meses evaluados en 2023-2024 presentan un aumento de temperatura al compararlos con los datos de 2018-2019.



**Figura 8. Diagrama de caja de bigotes para datos de temperatura de la arena (°C) de 2018-2019 y 2023-2024.** Diagrama de caja de bigotes ilustrando el promedio mensual de la temperatura de la arena durante cada mes de los años monitoreados. Los meses son identificados por sus cifras en su formato numérico, siendo 10 = octubre, 11 = noviembre, 12 = diciembre, 1 = enero, 2 = febrero, y 3 = marzo.

En la Figura 9 es posible destacar comportamientos similares de las temperaturas promedio de la arena en el estudio de 2018-2019 con el estudio actual. Como se mencionó anteriormente, a finales de octubre y principios de noviembre del 2023 se observó una tormenta fuerte que ocasionó una disminución abrupta de temperatura durante estas fechas (Figura 8). Este fenómeno se dio en el estudio anterior durante las mismas fechas por tormentas tropicales en los años 2018 y 2019.



**Figura 9. Temperatura promedio diaria de todas las playas en el estudio de 2018-2019.** Temperaturas de arena (máxima diaria, promedio y mínima) registradas en la costa del Pacífico de Guatemala (Hawái y El Banco) desde el 26 de mayo de 2018 hasta el 3 de noviembre de 2019, combinando datos de profundidad (30 y 50 cm). La temperatura crítica máxima para los embriones de tortuga Parlama se muestra como una línea punteada roja (35°C). La temperatura pivotal para la tortuga parlama se muestra como una línea punteada verde (30.5°C). Se indican con flechas dos fuertes tormentas tropicales (Vicente y Selma) que ocurrieron durante el período de estudio.

(Fuente: Ariano-Sánchez et al., 2023).

## E. Modelo predictivo

Para realizar la comparación de los datos históricos con los datos futuros se combinaron las bases de datos del estudio actual con los del estudio hecho por Ariano-Sánchez, et al., 2023. Para los datos climáticos se utilizaron los escenarios climatológicos obtenidos por WordClim. Con esta información, se construyó una ecuación para estimar la temperatura futura de la arena en tres periodos proyectados: 2021–2040, 2041–2060 y 2061–2080. La ecuación generada se basó en una regresión lineal entre la temperatura del aire y la temperatura de la arena. Al ingresar los respectivos datos, se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \textit{Temperatura Futura de la Arena (}^{\circ}\text{C)} \\ & = \textit{Temperatura Futura del Aire (}^{\circ}\text{C)} \times 0.17266 + 29.35809 \end{aligned}$$

Esta fórmula permite estimar cómo podrían cambiar las condiciones térmicas de las playas de anidación bajo distintos escenarios climáticos.

En el escenario optimista (SSPs-126, Cuadro 7) suelen mantenerse relativamente estables. Durante el periodo de 2021-2040 las temperaturas promedio de la arena se mantienen ligeramente superiores a las del periodo base, mostrando poca variabilidad entre este periodo y el de 2018-2024. En el periodo de 2041-2060 se observa un aumento de temperatura en los meses de verano, teniendo temperaturas un poco más altas que periodo anterior, teniendo valores cercanos a 34.2°C. En el último periodo de 2061-2080 se da un aumento constante en las temperaturas promedio, teniendo una temperatura constante de 34.0°C.

**Cuadro 7. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) para el escenario climático optimista.** Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático optimista (SSPs-126), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024).

Periodo	SSPS_126											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018-2024	33.4	33.8	34.5	35.5	33.8	32.7	32.8	32.7	32.6	31.6	33.5	33.9
2021-2040	33.0	33.3	33.9	34.2	34.1	34.0	34.0	34.0	33.6	33.5	33.5	32.6
2041-2060	33.3	33.5	34.1	34.4	34.2	34.2	34.2	34.2	33.7	33.6	33.6	32.7
2061-2080	33.3	33.6	34.1	34.4	34.2	34.2	34.3	34.2	34.0	33.6	33.6	32.8

Datos obtenidos de WordClim.

En el escenario moderado (SSPs-245, Cuadro 8) se observa un comportamiento similar en escenario optimista. Durante el periodo de 2021-2040 se observan temperaturas muy cercanas al periodo 2018-2024, teniendo algunas temperaturas ligeramente más bajas. En el periodo 2041-2060 los valores siguen siendo menores en comparación al periodo base. Durante el último periodo se observa un aumento en la temperatura promedio en comparación a los periodos anteriores, mostrando nuevamente temperaturas más altas en los meses de verano.

**Cuadro 8. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) bajo el escenario climático moderado.** Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático moderado (SSPs-245), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024).

SSPS_245												
Periodo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018-2024	33.4	33.8	34.5	35.5	33.8	32.7	32.8	32.7	32.6	31.6	33.5	33.9
2021-2040	32.2	32.5	33.1	33.5	33.5	33.3	33.3	33.3	33.0	32.9	32.8	31.8
2041-2060	32.2	32.4	33.1	33.5	33.5	33.3	33.3	33.3	33.0	32.8	32.7	31.8
2061-2080	32.8	33.1	33.6	34.0	33.9	33.9	33.9	33.6	33.4	33.2	33.2	32.3

Datos obtenidos de WordClim.

En el escenario pesimista (SSPs-585, Cuadro 9) se observan mayores variaciones de temperatura. Durante el periodo 2021-2040 las temperaturas son muy estables y se asemejan las temperaturas del periodo base. En el periodo 2041-2060 se da un aumento de la temperatura promedio, destacando el aumento en los meses de abril y mayo, donde se alcanzan temperaturas de 34.0°C y 33.9°C. En el periodo final las temperaturas de la arena aumentan significativamente, teniendo nuevamente un aumento notorio en los meses de verano, llegando 34.8°C en julio y agosto.

**Cuadro 9. Predicción de la temperatura promedio mensual de la arena (°C) bajo el escenario climático pesimista.** Temperaturas promedio mensuales de la arena predichas para los años 2021-2024, 2041-2060, y 2061-2080 bajo el escenario climático moderado (SSPs-585), y su comparación con el promedio mensual de la temperatura de la arena con los datos presentes (2018-2024).

SSPS_585												
Periodo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018-2024	33.4	33.8	34.5	35.5	33.8	32.7	32.8	32.7	32.6	31.6	33.5	33.9
2021-2040	32.2	32.5	33.1	33.6	33.5	33.4	33.3	33.3	33.0	32.9	32.8	31.8
2041-2060	33.0	33.1	33.7	34.0	33.9	33.8	34.0	33.9	33.5	33.2	33.2	32.4
2061-2080	33.5	33.9	34.4	34.7	34.5	34.4	34.8	34.8	34.1	33.7	33.8	33.0

Datos obtenidos de WordClim.

## VII. DISCUSIÓN

El presente estudio investigó cómo las variables meteorológicas y la vegetación costera (afectada por la urbanización del litoral) afectan a las temperaturas de la arena y a la ecología térmica de la anidación de la tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral Pacífico de Guatemala. Los resultados obtenidos brindan una mejor idea sobre cómo estos factores pueden llegar a afectar de manera negativa a la ecología y desarrollo de estos organismos.

Es innegable que la temperatura promedio diaria en las tres playas analizadas supera la temperatura pivotal ( $<30.5^{\circ}\text{C}$ ) de las tortugas marinas (Figura. 7). Sin embargo, lo que resulta más alarmante es que las temperaturas registradas están muy próximas al máximo crítico térmico de los embriones de tortugas marinas ( $>35^{\circ}\text{C}$ ), significando no solo una posibilidad de un sesgo femenino en sus poblaciones, sino también un aumento significativo en la mortalidad embrionaria (Ariano-Sánchez, et al., 2023).

Diversos estudios se han realizado donde se han observado sesgos de sexo evidentes cuando se dan cambios de temperatura en las playas de anidamiento de las tortugas marinas. Por ejemplo, las tortugas bobas, que habitan en la costa este de Estados Unidos, viven en un hábitat donde se dan cambios estacionales que alteran la temperatura de la arena (Mrosovsky, et al., 1984). Esto ocasiona que al inicio y al final de la temporada de anidación se produzcan principalmente machos (10% hembras), y en medio de este periodo se produzcan principalmente hembras (80% hembras) (Mrosovsky, et al., 1984). Esto resalta la importancia de monitorear a largo plazo las playas que se ven especialmente vulnerables a cambios climatológicos ocasionados por contaminación, o por consecuencias del cambio climático.

El estudio actual se realizó por un periodo de tiempo muy corto (6 meses) a comparación de este tipo de investigaciones, por lo que no es posible concluir con seguridad que las poblaciones futuras tendrán un sesgo femenino, ya que no se cubren todas las estaciones que se dan en la costa del litoral pacífico de Guatemala dentro del tiempo registrado. Además, las proporciones de sexos de las tortugas marinas tienen una gran variabilidad interanual, por lo que realizar muestreos durante varios años es necesario para

establecer si se observará un sesgo de sexo significativo para la población. No obstante, es posible comparar los resultados actuales con el estudio realizado en 2018-2019, en el cual se replicó la metodología y se tomaron los mismos datos, con el fin de determinar si la temperatura de la arena se ha visto alterada a lo largo de los últimos 5 años.

La investigación: “Developed black beaches - too hot to emerge? Factors affecting sand temperatures at nesting grounds of olive ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*)” por Ariano-Sánchez et al., (2023), reportó temperaturas de arena promedio diarias de  $33.1 \pm 2.7^{\circ}\text{C}$  para la playa El Banco, y de  $32.9 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$  durante el 26 de mayo, 2018 hasta el 3 de noviembre, 2019 (dos años consecutivos). La temperatura promedio diaria de la arena actual para la playa El Banco es de  $33.79^{\circ}\text{C}$  y para la playa Hawai es de  $34.68^{\circ}\text{C}$  (Cuadro 1). Siendo El Banco y Hawai aproximadamente  $0.7^{\circ}\text{C}$  y  $1.8^{\circ}\text{C}$  respectivamente más cálidas que 5 años atrás.

Al comparar directamente la temperatura promedio mensual de la arena entre los dos estudios, es evidente que se ha dado un aumento drástico en esta, reflejando el impacto que el cambio climático ha tenido sobre estas zonas recientemente. Es interesante recalcar que en ambos estudios realizados el fenómeno de El Niño estaba ocurriendo en las zonas analizadas. Esto permite controlar de cierta medida la influencia que estos eventos climatológicos puedan tener en los resultados, es decir, al comparar dos periodos en los que se registraron fenómenos climáticos similares, se reduce el riesgo de que las diferencias observadas en temperatura se deban únicamente a eventos climáticos extremos puntuales.

Los aumentos de temperatura más drásticos se observaron en los meses de octubre, noviembre y diciembre, siendo hasta aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  de diferencia entre los meses de octubre analizados en 2018-2019 y los meses analizados en 2023-2024 (Cuadro 6). El hecho de que se estén registrando temperaturas tan altas resulta alarmante, pues estos valores ya se están acercando al máximo crítico térmico con tan solo 5 años de diferencia entre registros, levantando la preocupación de cómo se verán alterados los datos actuales 5 años en el futuro. Este argumento cobra aún más importancia, ya que la tendencia de incremento térmico va más allá de la variabilidad natural asociada al ENSO.

Según el estudio de Fuentes, et al., (2023), se predice que debido a los efectos del cambio climático, zonas de anidamiento en la Gran Barrera de Coral, Australia, se

encontrarán sobre la temperatura pivotal y por encima del máximo crítico térmico de los embriones de tortugas marinas para el 2030 debido al aumento de temperatura en las playas de anidamiento. Además, se indica que de todas las variables climáticas que pueden afectar las zonas de anidamiento de las tortugas marinas (aumento de temperatura, actividad ciclónica, aumento de nivel del mar), el aumento de temperatura de la arena es el factor que causará mayor impacto a estas áreas a largo plazo (2070).

Estos pronósticos son especialmente relevantes para la situación en las playas de Guatemala, ya que los resultados indican que la temperatura promedio de las playas analizadas ha aumentado recientemente. En el estudio realizado en 2018-2019, las temperaturas ya habían superado la temperatura pivotal, y se encontraban peligrosamente cercanas al máximo crítico térmico (Figura. 9). Estos datos presentan un grado mayor de gravedad a nivel local, debido a que las playas de Guatemala son de arena volcánica oscura, lo cual quiere decir que retienen más calor que playas de arena blanca (Hays, et al., 2001). Adicional a esto, estas zonas son lugares con alta actividad turística, lo cual vuelve las playas un hábitat mucho más vulnerable de lo ya establecido.

En este estudio no se midieron temperaturas de puntos con nidos de tortuga Parlama, por lo que la temperatura promedio de la arena registrada no representa en su totalidad la temperatura real que tendría al momento de que hayan huevos incubados y se genere calor metabólico. Este calor suele aumentar hacia el final del desarrollo embrionario, por lo que no se considera influyente en la proporción de sexos (Ariano-Sánchez, et al., 2023). Sin embargo, es un factor importante a tomar en cuenta para estudios futuros que busquen evaluar el aumento de temperatura en los nidos de tortuga de una forma más directa.

Las categorías que rodeaban las áreas circundantes de los puntos analizados en este estudio (arena y vegetación), demostraron influir en la temperatura promedio diaria de la arena (Figura 6-a, Cuadro 1). La presencia de vegetación puede servir como un superficie protectora para los nidos de las tortugas Parlama ya que las plantas absorben gran parte del calor y la radiación del sol, amortiguando los efectos de temperaturas muy altas sobre la arena. La temperatura promedio diaria de la arena para los puntos rodeados de vegetación fue de 33.99°C, mientras que los puntos rodeados de arena se encontraban a 34.80°C.

Este patrón también es observado en la colonia de tortugas verdes en el Tortuguero, Costa Rica. En esta investigación se observó que la temperatura de los nidos podía disminuir hasta 3°C, dependiendo de la cantidad de sombra proporcionada por la vegetación supra-litoral en el área circundante al nido. En el caso de la Isla Ascensión, no se obtuvo un aumento o disminución de la temperatura significativo debido a la escasa presencia de vegetación supra-litoral. Aunque en el caso de estas playas se destaca la presencia de vegetación como un factor influyente en la temperatura de la arena, se recalca que la sombra brindada por la vegetación es la que demuestra ser el factor de impacto en la variación de temperatura de la arena.

En las playas de Guatemala suele haber una cantidad relativamente alta de vegetación, no obstante, la planta principal que se encuentra en las costas, llamada *Ipomoea pes-caprae*, es una especie caracterizada por ser similar a un enredadera perenne. Esta planta no produce ningún tipo de sombra sobre la arena debido a su tallo rastrero (*Tropicos, s.f.*). Esto explicaría por qué la diferencia de temperatura entre las categorías 'arena' y 'vegetación' no es muy drástica, pues en las playas de Guatemala no hay vegetación supra-litoral que produzca una cantidad de sombra considerable como para que la temperatura de la arena disminuya drásticamente.

Sorprendentemente, los puntos enterrados a 50 cm de profundidad en puntos rodeados únicamente de arena registraron temperaturas más altas que los puntos a 30 cm de profundidad, tanto en áreas rodeadas de arena como de vegetación. Este resultado contrasta con lo esperado, ya que se anticipaba que los puntos más cercanos a la superficie (30 cm) fueran más calientes debido a su mayor exposición a la radiación solar directa. Sin embargo, los resultados de este estudio demostraron que los puntos a 50 cm de profundidad en áreas sin cobertura vegetal alcanzaron un 36.6% de los días con temperaturas superiores al máximo crítico térmico (>35°C), mientras que los puntos a 30 cm rodeados de arena o vegetación alcanzaron un 28.76% y 25.46% respectivamente, y los puntos a 50 cm rodeados de vegetación registraron solo un 16.04%.

Estos datos probablemente se deben a la falta de cobertura vegetal en las áreas rodeadas únicamente de arena, lo que permite que la arena absorba y retenga grandes cantidades de calor que penetran a mayores profundidades. La arena volcánica de estas playas

tiene una alta capacidad de absorción de calor, lo que contribuye a mantener altas temperaturas durante más tiempo y a mayores profundidades.

Monitorear la pérdida de cobertura vegetal en las dunas costeras de las playas de Guatemala también podría representar un paso clave para la conservación de las tortugas Parlama. De las tres playas analizadas, Hawái fue la que presentó una temperatura promedio diaria de la arena más alta (34.68°C). Esta fue la playa más transitada que se analizó, en donde se observó una gran cantidad de turistas y de actividad humana todas las veces que se visitó. Además, por ser un punto turístico había mucha más urbanización que en las otras playas (El Banco y La Candelaria), lo cual significó una disminución en la vegetación presente en los puntos analizados. Hawái fue la playa con menor cantidad de puntos rodeados de vegetación y la playa con mayor cantidad de puntos rodeados de arena (Cuadro 1). Esto puede explicar el por qué se observó una temperatura más alta a comparación de las otras dos playas. Es por eso que se destaca la importancia de mantener las playas de anidamiento lo menos perturbadas que se pueda, o implementar planes de conservación que promuevan la protección de la vegetación y controlen la urbanización y el tipo de actividades turísticas que se da en estas zonas.

Positivamente, al momento de realizar este estudio, personas locales de las áreas examinadas indicaron que hay comunidades que se encargan de proteger la especie *Ipomoea pes-caprae* y que existen grupos de personas que se encuentran detrás de la conservación de la vegetación en las zonas costeras. Esto presenta un pronóstico provechoso para el futuro de las playas, y puede representar una mejora significativa al hábitat natural a futuro si se mantiene esta iniciativa.

Aunque se den esfuerzos por la protección y conservación de estas zonas, los efectos del cambio climático continuarán afectando a estos lugares que ya se encuentran vulnerables. Proyecciones a futuro realizadas en centroamerica indican que habrá un calentamiento promedio de aproximadamente 1 a 1.5°C para el período futuro entre 2021 y 2050 en la región. Además, se espera una reducción de la precipitación durante la temporada de lluvias, así como el fortalecimiento de la Sequía de Medio Verano, lo que puede tener implicaciones para la agricultura y la producción de energía (Imbach, et al., 2018). La temperatura de la arena puede aumentar con la temperatura del aire (Figura 5-b) y disminuir con la

precipitación (Figura 5-c), por lo que los pronósticos anteriores plantean un mal panorama para la población de tortugas Parlama que anide en las playas de Guatemala.

Estos efectos pudieron ser puestos a prueba por medio del modelo predictivo a futuro realizado utilizando los escenarios climatológicos. En este se demuestra que el escenario optimista y moderado se dan ligeros aumentos de la temperatura de la arena en los periodos de 2041-2060 a comparación del periodo base, teniendo un aumento de temperatura repentino en el periodo de 2061-2080 (Cuadro 7 y 8). Sin embargo, las temperaturas oscilan entre 32.2°C y 34.3°C hacia el final del siglo, lo cual no presenta un riesgo de mortalidad para los embriones de las tortugas.

En el escenario pesimista, la temperatura de la arena aumenta significativamente en los periodos 2041-2060 y 2061-2080, teniendo datos especialmente altos en los meses de verano, con temperaturas de hasta 34.8°C en julio y agosto. Estos valores son preocupantes ya que para el año 2080 se están registrando valores extremadamente altos durante la temporada de anidamiento de las tortugas marinas (junio a septiembre). Las temperaturas predichas se encuentran demasiado cerca de sobrepasar el crítico máximo térmico que soportan los embriones de la especie, demostrando una gran vulnerabilidad para las tortugas marinas a largo plazo.

Las probabilidades de que en Guatemala se tomen acciones que mitiguen los efectos del cambio climático no parecen ser muy altas. Cinco años después del primer estudio realizado en las playas de anidamiento de tortugas marinas en Guatemala, las temperaturas de la arena no han mejorado, al contrario, han empeorado. Conocer los impactos que tienen las variables climatológicas sobre la temperatura de la arena es de suma importancia para determinar qué acciones se pueden realizar para mitigarlas dentro de las playas de anidamiento. Por ahora, es posible sugerir programas de revegetación, designar áreas protegidas dentro de las playas para anidamiento de tortugas marinas, y limitar la urbanización a un punto donde la flora y fauna natural no se vea drásticamente afectada.

Es crucial continuar con investigaciones a largo plazo que monitoreen las tendencias de la temperatura y los efectos que el cambio climático está teniendo en las playas de

anidación. Solo con datos robustos y continuos será posible desarrollar estrategias de conservación eficaces y adaptativas.

## VIII. CONCLUSIONES

La temperatura promedio diaria de la arena en las playas estudiadas supera la temperatura pivotal de las tortugas marinas, y se encuentra peligrosamente cercana al máximo crítico térmico de los embriones. Esto podría representar un posible aumento en la mortalidad embrionaria. Al comparar estos resultados con estudios previos (2018-2019) indica un aumento en la temperatura de la arena, lo que refuerza la necesidad de investigaciones continuas y a largo plazo.

La presencia de vegetación costera demostró ser un factor protector que amortigua las altas temperaturas de la arena. Los puntos de arena sin cobertura vegetal mostraron temperaturas más altas a mayores profundidades, indicando que la falta de vegetación permite una mayor absorción y retención de calor.

Los resultados obtenidos de este estudio indican un aumento alarmante en las temperaturas de la arena en las playas de anidación de las tortugas Parlama en el litoral Pacífico de Guatemala durante los últimos cinco años. Este aumento es consistente con los escenarios climáticos proyectados, que prevén un incremento significativo en las temperaturas durante los períodos de anidación (junio a octubre). Ante esta situación, es crucial implementar medidas de conservación efectivas y adaptativas, como programas de revegetación, designación de áreas protegidas y limitación de la urbanización en las playas.

Además, se requiere un monitoreo continuo y a largo plazo para entender mejor las tendencias climáticas y sus efectos en estas poblaciones vulnerables, y así desarrollar estrategias de conservación que aseguren la supervivencia a largo plazo de las tortugas Parlama en Guatemala.

## **IX. RECOMENDACIONES**

Si se desea replicar este estudio se recomienda diseñar una metodología de entierro y recuperación de registradores de temperatura muy detallado. Entre los mayores desafíos enfrentados durante este estudio, se destaca la búsqueda y recuperación de los dispositivos.

Es esencial tomar varias fotografías de los puntos en los que se estén enterrando, incluyendo videos, y detallando puntos de referencia específicos. Además, asegurarse que las medidas fueron tomadas adecuadamente y que se tienen tres medidas hacia el punto es de gran ayuda al momento de recuperarlos.

Se recomienda usar puntos de referencia fijos, pero de no tenerlos, utilizar objetos (palas, barretas, entre otros), como medida hacia un lugar seleccionado para que puedan ser utilizados para llegar al punto de entierro del dispositivo. Al menos 4 personas son necesarias para agilizar la búsqueda, pero de poder llevar más personas se facilitará el proceso.

Debido a que este estudio fue de una duración corta (6 meses), los datos obtenidos mostraron problemas en su distribución. Se recomienda dejar los dispositivos enterrados por lo menos 1 año para tener una muestra significativa de la temperatura de la arena.

Replicar el transecto en la playa La Candelaria podría brindar información valiosa sobre las temperaturas de la arena de esa playa a futuro, por lo que se exhorta a la comunidad científica con interés en las tortugas marinas que se tome en cuenta esta área en investigaciones futuras.

## X. LITERATURA CITADA

- Abreu-Grobois, A & Plotkin, P. (IUCN SSC Marine Turtle Specialist Group). 2008. *Lepidochelys olivacea*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2008: e.T11534A3292503. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T11534A3292503.en>. Accessed on 22 August 2023.
- Antworth, R. L., Pike, D. A., & Stiner, J. C. (2006). Nesting ecology, current status, and conservation of sea turtles on an uninhabited beach in Florida, USA. *Biological Conservation*, 130(1), 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.11.028>
- Arcas. (2015). Guía para la conservación de las tortugas marinas en Guatemala, con énfasis en el manejo de tortugarios. Nueva Guatemala de la Asunción. Guatemala. 11pp.
- Ariano-Sánchez, D. (2023). *Impact of climate change and habitat degradation on two endangered reptiles: the Guatemalan Beaded Lizard and the Olive Ridley Sea turtle*. [Disertación en doctorado, University of South-Eastern Norway]. [https://openarchive.usn.no/usn-xmloi/bitstream/handle/11250/3069363/2023\\_165\\_Ariano\\_Sanchez.pdf?sequence=1](https://openarchive.usn.no/usn-xmloi/bitstream/handle/11250/3069363/2023_165_Ariano_Sanchez.pdf?sequence=1)
- Ariano-Sánchez, D., Mortensen, R. M., Wilson, R. P., Bjureke, P., Reinhardt, S., & Rosell, F. (2022). Temperature and barometric pressure affect the activity intensity and movement of an endangered thermoconforming lizard. *Ecosphere*, 13(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3990>
- Ariano-Sánchez, D., Muccio, C., Rosell, F. & Reinhardt, S. (2020). Are trends in Olive Ridley sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) nesting abundance affected by El Niño Southern Oscillation (ENSO) variability? Sixteen years of monitoring on the Pacific coast of northern Central America. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01339. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01339
- Ariano-Sánchez, D., Nesthus, A., Rosell, F., & Reinhardt, S. (2023). Developed black beaches - too hot to emerge? Factors affecting sand temperatures at nesting grounds

- of olive ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*). *Climate change ecology*, 5, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2023.100074>
- Aurora. (2020, 25 mayo). *AGHN* – *La Aurora Zoo*. <https://www.aurorazoo.org.gt/2020/05/25/agnh/>
- Bjorndal, K. A. 1997. Foraging ecology and nutrition of sea turtles. Pages 199–232 in P. L. Lutz and J. A. Musick, editors. *The biology of sea turtles*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Bowen, B., y Karl, S. (2007). Population genetics and phylogeography of sea turtles. *Molecular ecology*, 16(23), 4886-4907.
- Bowne, D. R., Cosentino, B. J., Anderson, L. J., Bloch, C. P., Cooke, S., Crumrine, P. W., Dallas, J., Doran, A., Dosch, J. J., Druckenbrod, D. L., Durtsche, R. D., Garneau, D., Genet, K. S., Fredericksen, T. S., Kish, P. A., Kolozsvary, M. B., Kuserk, F. T., Lindquist, E. S., Mankiewicz, C., . . . Zimmermann, C. R. (2018). Effects of urbanization on the population structure of freshwater turtles across the United States. *Conservation Biology*, 32(5), 1150-1161. <https://doi.org/10.1111/cobi.13136>
- Bouchard, S. S., & Bjorndal, K. A. (2000). SEA TURTLES AS BIOLOGICAL TRANSPORTERS OF NUTRIENTS AND ENERGY FROM MARINE TO TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. *Ecology*, 81(8), 2305–2313. doi:10.1890/0012-9658(2000)081[2305:stabto]2.0.co;2
- Brittain, R., C. Muccio, and R. Nunny. 2007. Project Parlama - sea turtle conservation on Guatemala's Pacific coast. *Testudo* 6:43–52.
- C.E. Tanner, A. Marco, S. Martins, E. Abella-Perez, L.A. Hawkes, Highly feminized sex-ratio estimations for the worlds third-largest nesting aggregation of loggerhead sea turtles, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 621 (2019) 209–219, <https://doi.org/10.3354/meps12963>.

- CONAP. (2010). Guía para la conservación de las tortugas marinas de Guatemala, con énfasis en el manejo de tortugarios. Nueva Guatemala de la Asunción. Guatemala. 61pp.
- Da Silva, A. C. C., Castilhos, J. C., Lopez, G. G., & Barata, P. C. R. (2007b). Nesting Biology and Conservation of the Olive ridley Sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) in Brazil, 1991/1992 to 2002/2003. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 87(4), 1047-1056. <https://doi.org/10.1017/s0025315407056378>
- Ewert MA, Jackson DR, Nelson CE (1994) Patterns of temperature-dependent sex determination in turtles. *J Exp Zool* 270:3 – 15
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fuentes, M., Limpus, C., & Hamann, M. (2010). Vulnerability of sea turtle nesting grounds to climate change. *Global Change Biology*, 17(1), 140-153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02192.x>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Suiza: IPCC.
- Hancock, J. M. (2020). *The Sea Turtles of São Tomé and Príncipe : Ecology, genetics and current status of distinct species nesting on an oceanic archipelago*. [https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/45585/1/ULSD898452\\_td\\_Joana\\_Hancock.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/45585/1/ULSD898452_td_Joana_Hancock.pdf)
- Hart, C., Ley, C., Maldonado, A., Zavala, A., y Abreu, A. (2014). Nesting characteristics of olive ridley turtles (*Lepidochelys olivacea*) on el naranjo beach, Nayarit, Mexico. *Herpetological Conservation and Biology*, 9(2), 524–534.

- Hays, G. C., Adams, C. R., Mortimer, J. A., & Speakman, J. R. (1995). Inter- and Intra-Beach Thermal Variation for Green Turtle Nests on Ascension Island, South Atlantic. *Journal Of The Marine Biological Association Of The United Kingdom/Journal Of The Marine Biological Association Of The UK*, 75(2), 405-411. <https://doi.org/10.1017/s0025315400018269>
- Hays, G. C., Ashworth, J., Barnsley, M. J., Broderick, A. C., Emery, D. R., Godley, B. J., Henwood, A., & Jones, E. L. (2001). The importance of sand albedo for the thermal conditions on sea turtle nesting beaches. *Oikos*, 93(1), 87-94. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.930109.x>  
<https://doi.org/10.3354/esr00636>.
- Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., Siqueira, G., Silva, A., Garofolo, L., & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PloS One*, 13(4), e0193570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193570>
- Instituto privado de investigación sobre cambio climático [ICC]. (2024, 14 marzo). *EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)*. Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático. Recuperado 9 de mayo de 2024, de <https://icc.org.gt/books/el-nino-oscilacion-del-sur-enos-febrero-2024/>
- Jensen, M. P., Abreu-Grobois, F. A., Frydenberg, J., & Loeschke, V. (2006). Microsatellites provide insight into contrasting mating patterns in arribada vs. non-arribada Olive Ridley Sea Turtle Rookeries. *Molecular Ecology*, 15(9), 2567-2575. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2006.02951.x>
- Laloë, J., Cozens, J., Renom, B., Taxonera, A., & Hays, G. C. (2014). Effects of rising temperature on the viability of an important sea turtle rookery. *Nature Climate Change*, 4(6), 513-518. <https://doi.org/10.1038/nclimate2236>
- Limpus, C. J., Villiers, D. L., Villiers, M. A., Limpus, D. J., & Read, M. A. (2001). The loggerhead turtle, *Caretta caretta* in Queensland: Observations on feeding ecology in warm temperate waters. *Memoirs of the Queensland Museum*, 46:631-645.

Katdare, B. 2012. An update on olive ridley nesting along the west coast of Maharashtra, India in 2011-2012. *Indian Ocean*

*Turtle Newsletter* 15: 3-4.

Miller, J. D. (1997). Reproduction in sea turtles. En: Wynekn, J., Lohmann, K. J., & Musick, J. A. (Eds.). *The biology of sea turtles III* (pp. 51-58). Boca Raton: CRC Press.

Montero, N., dei Marcovaldi, M. A., Lopez–Mendilaharsu, M., Santos, A. S., Santos, A. J., y Fuentes, M. M. (2018). Warmer and wetter conditions will reduce offspring production of hawksbill turtles in Brazil under climate change. *PLoS One*, 13(11), e0204188.

Mrosovsky, N., Hopkins-Murphy, S. R. and Richardson, J. I. 1984. Sex-ratio of sea turtles – seasonal changes. – *Science* 225: 739–741.

Mrosovsky, N., Pieau, C. (1991) Transitional range of temperature, pivotal temperature and thermosensitive stage for sex determination in reptiles. *Amphib-reptil* 12:169–179

Patel, E., Kotera, M., & Phillot, A. D. (2022). The roles of sea turtles in ecosystem processes and services. *Indian Ocean Turtle Newsletter*, 36, 23-31.

Pike, D. A. (2013). Forecasting the viability of sea turtle eggs in a warming world. *Global Change Biology*, 20(1), 7-15. <https://doi.org/10.1111/gcb.12397>

Plotkin, P.T., D.C. Rostal, R.A. Byles, & D.W. Owens. 2006. Reproductive and developmental synchrony in female *Lepidochelys olivacea*. *Journal of Herpetology* 31: 17.

Poloczanska, E. S., Limpus, C. J., & Hays, G. C. (2009). Vulnerability of marine turtles to climate change. *Advances in marine biology*, 56:151-211.

[R. Howard, I. Bell, D.A. Pike, Thermal tolerances of sea turtle embryos: current](#)

*Red de Estaciones Meteorológicas - ICC*. Instituto privado de investigación sobre cambio climático, (2021, 28 mayo). <https://icc.org.gt/es/red-de-estaciones-meteorologicas/>

Riahi et al., 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change* 42 (2017) 153–168, [doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009)

Santidrián Tomillo, P.; Fonseca, L. G.; Ward, M.; Tankersley, N.; Robinson, N. J.; Orrego, C. M.; Paladino, F. V.; Saba, V. S. (2020). The impacts of extreme El Niño events on sea turtle nesting populations. *Climatic Change*, (), [doi:10.1007/s10584-020-02658-w](https://doi.org/10.1007/s10584-020-02658-w)

Stenseth, N. C., Ottersen, G., Hurrell, J. W., Mysterud, A., Lima, M., Chan, K. S., ... & Ådlandsvik, B. (2003). Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1529), 2087-2096.

*Tropicos* | *Ipomoea pes-caprae* (L.) R. Br. (s. f.). <http://legacy.tropicos.org/Name/8500011>

Tucker, Charles R.; Strickland, Jeramie T.; Delaney, David K.; Ligon, Day B. (2017). Thermal consequences of subterranean nesting behavior in a prairie-dwelling turtle, the Ornate Box Turtle (*Terrapen ornata*). *Canadian Journal of Zoology*, 95(2), 123–131. [doi:10.1139/cjz-2016-0143](https://doi.org/10.1139/cjz-2016-0143)

[understanding and future directions, \*Endanger. Species Res.\* 26 \(2014\) 75–86.](#)

Valverde, R. A., Wingard, S., Gómez, F. M., Tordoir, M. T., & Orrego, C. M. (2010). Field lethal incubation temperature of olive ridley sea turtle *lepidochelys olivacea* embryos at a mass nesting rookery. *Endangered Species Research*, 12(1), 77-86. <https://doi.org/10.3354/esr00296>

Wibbels, T. (2003) Critical approaches to sex determination in sea turtles. In: Lutz PL, Musick JA, Wyneken J (eds) *The biology of sea turtles II*. CRC Press, Boca Raton, FL, p 103–134

*WorldClim* — *Future climate 1 documentation*. (s. f.). 2020-2022, [worldclim.org](https://www.worldclim.org). [https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6\\_clim10m.html](https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim10m.html)

- Yntema, C. L., & Mrosovsky, N. (1980). Temperature Dependence of sexual differentiation in sea turtles: Implications for conservation practices. *Biological Conservation*, 18(4), 271-280. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(80\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0006-3207(80)90003-8)
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2009). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(1), 3-14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2009.00001.x>

## XI. APÉNDICE

### PLAYA HAWAII

#### PUNTO 1 (H150 Y H130)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	ENTRADA HOTEL (DERECHA)		32° A 17.87 M
2	CENTRO DE CERCA CAÍDA IZO		38° A 16.80 M
3	CARTEL HOTEL (PARTE MAS CERCA)		46° A 7.58 M

#### PUNTO 2 (H230 Y H250)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	GRADAS (LADO DERECHO)		30° A 16.37 M
2	MITAD DE CERCA DE OLAS		35° A 14.72 M
3	OLA 5		39° A 15.77 M

#### PUNTO 3 (H330 Y H350)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	CERCA BLANCA PALO 1		365° A 19.98 M
2	CERCA PALO 4		385° A 20.19 M
3	FINAL DE CERCA		44° A 30.65 M

#### PUNTO 4 (H430 Y H450)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALMERA 3		29° A 13.66 M
2	TROZO MADERA		35° A 11.85 M
3	PALMERA 7		42° A 13.12 M

**Apéndice 1.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa Hawái.

PUNTO 5 (H530 Y H550)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO 6 (DER A IZO)		32° A 2127 M
2	INICIO MURO		35° A 1931 M
3	MITAD MURO		42° A 13.12 M

PUNTO 6 (630 Y H650)


PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PRIMER PALO		31° A 1654 M
2	PALO 5		38° A 13.87 M
3	PALO FINAL		425° A 17.23 M

PUNTO 7 (H730 Y H750)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	MONTAÑITA		32° A 17.53 M
2	HORNO OXIDADO		35° A 13.23 M
3	PALO A LADO DE PALMERA		38° A 29.52 M



PUNTO 8 (H830 Y H850)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO BLANCO		26° A 17.74 M
2	TRONCO ENTRE HATCH ?		34° A 24.21 M
3	PALO MADERA ALTA		40° A 26.22 M

Apéndice 1. Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa Hawái.

PUNTO 9 (H930 Y H950)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	ESTRUCTURA CONCRETO		32° A 23.94 M
2	PALMERA		31° A 28.73 M
3	CABANA		40° A 30.80 M



PUNTO 10 (H1030 Y H1050)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO DERECHA ENTRADA	NO SE TOMARON FOTOS.	27° A 22.14 M
2	PALO 9 CERCA (IZA A DER)		34° A 18.35 M
3	FINAL CERCA		37° A 18.76 M

\* SE HIZO EL PUNTO EN FRENTE DE UN HOTEL


**Apéndice 1.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa Hawái.

## CENTRO DE CONSERVACIÓN MARINA

### PUNTO 1 (C130 Y C150)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	INICIO PALO 9		245° A 18.83 M
2	PALO DERECHO DE LETRERO CCM		34.5° A 11.87 M
3	FINAL DE LA CERCA DEL LETRERO		41° C A 15.80 M

### PUNTO 2 (C230 Y C350)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO GRANDE IZQUIERDA		18° A 16.10 M
2	PALMERA CENTRO		35.5° A 13.80 M
3	INICIO DE CERCA		39° A 16.12 M

### PUNTO 3 (C330 Y C350)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO BLANCO IZQUIERDA		30° A 12.21 M
2	PALMERA PEQUEÑO CENTRO		37° A 12.71 M
3	PALO BLANCO DERECHO		41° A 13.56 M

### PUNTO 4 (C430 Y C450)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	CERCA BLANCA 1*		29° A 14.13 M
2	CERCA BLANCA 3		34.5° A 9.43 M
3	CERCA BLANCA 5		42° A 16.14 M

\* CREO QUE ME FALTÓ SEÑALAR UN PALO (1) QUE NO SALE EN LA FOTO

**Apéndice 2.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa La Candelaria (Centro de Conservación Marina).

PUNTO 5 (C530 Y C550)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALMERA 1 (IZQUIERDA)		305° A 1126 M
2	CENTRO POSTE BLANCO		34° A 8.18 M
3	PALMERA 1 (DERECHA)		43° A 9.62 M

PUNTO 6 (C630 Y C650)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	INICIO PARED		27° A 196 M
2	POSTE EN MEDIO *		38° A 15.43 M
3	POSTE IZQUIERDA		385° A 55.6 M

\* HAY UN POSTE BAJITO QUE POSIBLEMENTE NO SE VE EN LA FOTO PORQUE NO ALACANZÓ EL METRO



PUNTO 7 (C730 Y C750)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	MURO BLANCO		° A M
2	PARED MEDIO DERECHA		° A M
3	FINAL CERCA		° A M

**Apéndice 2.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa La Candelaria (Centro de Conservación Marina).

PUNTO 8 (C830 Y C850)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	CERCA ROTA IZQUIERDA		25° A 23.32 M
2	CENTRO DE CERCA (PALO CENTRAL TORCIDO)		34° A 13.21 M
3	CERCA ROTA DERECHA		37.5° A 15.83 M



PUNTO 9 (C930 Y C950)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO ESCONDIDO IZQUIERDA		32° A 18.25 M
2	POSTE CENTRO		34° A 17.25 M
3	MURO DERECHA		36° A 16.59 M



PUNTO 10 (C1030 Y C1050)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALMERA IZO (CERCA DE DUCHA)		29.5° A 16.70 M
2	PALMERA CENTRO		31° A 13.07 M
3	PALMERA DER (CERCA DE PISCINA)		35° A 19.12 M




**Apéndice 2.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa La Candelaria (Centro de Conservación Marina).

## PLAYA EL BANCO

### PUNTO 1 (B130 Y B150)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	LETRERO FUNDACIÓN EL BANCO		4.9 M
2	DOS PALAS RECTO DESDE LETRERO		
3			

### PUNTO 2 (B230 Y B250)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO 8		29.5° A 218 M
2	PALO 5		43.5° A 295 M
3	PALO 1		41° A 10.4 M

### PUNTO 3 (B330 Y B350)


PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	BUNGALOW 1		26° A 2167 M
2	BUNGALOW 4		33° A 1366 M
3	CABAÑA ÚLTIMO PALO		39° A 24.34 M

### PUNTO 4 (B430 B450)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	CABAÑA		29.5° A 298 M
2	PALMERA 3		37° A 215 M
3	BUNGALOW 2		43° A 2147 M

**Apéndice 3.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa El Banco.

PUNTO 5 (B530 Y B550)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALMERA 1		28° A 2167 M
2	CARTEL 'EN VENTA'		36° A 228 M
3	PALMERA 2 PEQUE		38° A 2190 M

PUNTO 6 (B630 Y B650)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALMERA 1		28° A 2167 M
2	VALLA 12 PALITO		36° A 228 M
3	PALMERA PEQUEÑA		38° A 2190 M



PUNTO 7 (B730 Y B750)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	INICIO CERCA ROJA		° A M
2	PALITO 8 CERCA		° A M
3	FINAL DE LA CERCA		° A M

**Apéndice 3.** Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa El Banco.

PUNTO 8 (B830 Y B850)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO		12° A 4.44 M
2	PALMERITA SOLA		30.5° A 15.25 M
3	COLUMNA HORMIGÓN		37.4° A 14.16 M




PUNTO 9 (B930 Y B950)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO BLANCO		26° A 16.77 M
2	PALO 9 (SIN CONTAR BLANCO)		34.5° A 17.72 M
3	PALO DE MADERA		40° A 21.18 M



PUNTO 10 (B1030 Y B1050)

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA	IMÁGEN	DATOS BRÚJULA
1	PALO 12		27° A 19.53 M
2	PALO 16		33° A 16.53 M
3	PALO 20		39° A 19.32 M



Apéndice 3. Fotografías de los puntos analizados para el transecto de la playa El Banco.

## **XII. GLOSARIO**

**Arena:** Ausencia de vegetación y de concreto, con presencia únicamente de arena a menos de 2 metros del punto de analizar.

**Vegetación:** Presencia de vegetación a menos de 2 metros del punto a analizar.