

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala

Trabajo de investigación presentado por
Karen Fernanda Ventura Pérez
para optar al grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala

Trabajo de investigación presentado por
Karen Fernanda Ventura Pérez
para optar al grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala
2025

Vo. Bo.

f.



Dr. Daniel Ariano Sánchez

Tribunal examinador:

f.



Dr. Daniel Ariano Sánchez

f.



Lic. Alejandro Vásquez



f.

Dra. Ana Hacoheh

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala, 02 de diciembre, 2025

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de varios meses de esfuerzo, dedicación y, sobre todo, resiliencia. Representa mis cinco años de formación en la carrera, juntando todos los conocimientos adquiridos y mi crecimiento como bióloga. Quiero comenzar agradeciendo a Dios, quien me acompañó en cada paso. Incluso en los momentos más difíciles, me permitió levantarme día con día. A mis padres, por su apoyo incondicional y por darme el privilegio de estudiar en la capital y dedicarme a lo que hoy realmente me apasiona. A mi papá, por llevarme cada fin de semana de regreso a casa y nuevamente a la universidad, y por creer siempre en mis capacidades. A mi mamá, por escucharme en todo momento y apoyarme durante mis días de foránea. A mi hermana, quien me cuidó durante mis primeros años universitarios y me apoyó en mis primeras clases. A mi abuelita, por todo su amor y apoyo incondicional. Sin ustedes, esta tesis no habría sido posible.

Al departamento de biología, por el acompañamiento, la formación y el apoyo brindado a lo largo de mi carrera. Gracias a las enseñanzas y compromiso, pude fortalecer mis conocimientos, mi vocación y mi deseo de contribuir a la conservación de especies.

A mi asesor, Ph. D. Daniel Ariano Sánchez, por aceptarme para realizar esta investigación y por brindarme su tiempo, paciencia y experiencia para resolver mis dudas y continuar enseñándome. Gracias por ser un catedrático tan especial, no solo para mí, sino para toda mi promoción. Todos necesitamos un maestro como usted.

A Antje Begemann, fundadora del tortugario Manuelita, por abrirnos las puertas de su casa y compartirnos su valiosa experiencia. A Pedro Yanes, guardarrecurso del tortugario, por su invaluable ayuda en la recolección de datos. Ambos continuaron apoyándome incluso después del trabajo de campo en otros proyectos personales, y agradezco profundamente la disposición con la que compartieron su conocimiento.

A mis amigos de Biología, quienes se convirtieron en lo más especial de esta etapa. Agradezco infinitamente haber tomado la decisión de cambiarme de carrera; lo haría mil veces solo para conocerlos de nuevo. Gracias por cada momento en clases, giras y pijamadas. Los llevo a todos en un lugar muy especial de mi corazón, y mi mayor deseo es verlos en el futuro siendo la mejor versión de ustedes mismos.

A mi novio, Sergio. Gracias por llegar a mi vida y convertir mis años universitarios en una etapa tan especial. Me acompañaste en todo momento, madrugando para llevarme a prácticas y eventos, apoyándome todas las noches de desvelo y siendo mi rayo de sol en los momentos más difíciles. Gracias por empujarme a salir de mi zona de confort y animarme a ser más alegre, como tú. Sin ti, no sería la persona que soy hoy en día.

A todos, con respeto y cariño les agradezco por ser parte importante de este logro.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE ÁPENDICES.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. MARCO TEÓRICO	4
A. Efectos del cambio climático sobre los sistemas marino-costeros.....	4
B. Importancia ecológica de las tortugas marinas.....	5
C. Ciclo de vida y reproducción de las tortugas marinas.....	5
D. Factores que afectan el éxito reproductivo de las tortugas marinas	6
E. Temperatura de incubación y proporción de sexos en tortugas marinas.....	6
F. Malformaciones embrionarias en tortugas marinas asociadas a temperatura.....	7
G. Tortuga parlama (<i>Lepidochelys olivacea</i>) como especie modelo.....	7
H. Distribución y estado de conservación de la tortuga parlama	8
I. Estrategias de conservación para tortuga parlama en Guatemala.....	9
J. Limitaciones y retos en la conservación.....	10
IV. OBJETIVOS.....	12
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos.....	12
V. HIPOTÉISIS	13
A. Hipótesis principal.....	13
B. Hipótesis secundarias	13
VI. METODOLOGÍA.....	14
A. Área de estudio	14
B. Consideraciones legales del estudio	15
C. Diseño del estudio	16

D.	Toma de datos.....	17
E.	Análisis experimental	17
F.	Análisis macroscópico de embriones no eclosionados.....	18
VII.	RESULTADOS	20
A.	Temperatura en los nidos (adentro y afuera del tortugario)	20
B.	Selección de modelos estadísticos (GAM).....	21
C.	Éxito de eclosión de los nidos (adentro y afuera del tortugario).....	22
D.	Relación de la temperatura y el porcentaje de eclosión.....	24
E.	Etapas de desarrollo en embriones no eclosionados.....	26
VIII.	DISCUSIÓN.....	44
IX.	CONCLUSIONES.....	50
X.	RECOMENDACIONES	51
XI.	BIBLIOGRAFÍA	52
XII.	APÉNDICE	55
XIII.	GLOSARIO.....	62

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos candidatos y variables predictoras.....	18
Cuadro 2. Clasificación simplificada de embriones no eclosionados de <i>L. olivacea</i> según etapas de desarrollo	19
Cuadro 3. Valores Beta (Estimaciones) y p-valor del modelo GAM para el porcentaje de eclosión.....	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tortuga parlama (<i>Lepidochelys olivacea</i>) en playas guatemaltecas	8
Figura 2. Densidad de anidación de tortugas parlama en la costa del Pacífico de Guatemala	9
Figura 3. Ubicación geográfica del sitio de estudio en la Barra el Jote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala.....	14
Figura 4. Fotografías del tortugario Manuelita en la Barra el Jote, Moyuta, Jutiapa.....	15
Figura 5. Diagrama del diseño del estudio	16
Figura 6. Temperatura del nido por ubicación adentro o afuera del tortugario y por mes de siembra	20
Figura 7. Temperatura del nido solo por ubicación adentro o afuera del tortugario	21
Figura 8. Comparación de índices de modelos en el análisis de datos.....	22
Figura 9. Porcentaje de eclosión por ubicación adentro o afuera del tortugario y por mes de siembra	23
Figura 10. Gráfico de respuesta vs valores ajustados por el modelo.....	24
Figura 11. Relación entre la temperatura del nido (°C) y el porcentaje de eclosión (%)....	25
Figura 12. Distribución de los estadios de desarrollo en embriones no eclosionados de <i>L. olivacea</i>	26
Figura 13. Descripción morfológica de embriones en etapa temprana (estadios 2-11) de <i>L. olivacea</i>	28
Figura 14. Continuación de la descripción morfológica de embriones en etapa temprana (estadios 2-11) de <i>L. olivacea</i>	29
Figura 15. Descripción morfológica de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de <i>L. olivacea</i>	30
Figura 16. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de <i>L. olivacea</i>	31
Figura 17. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de <i>L. olivacea</i>	32
Figura 18. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de <i>L. olivacea</i>	33
Figura 19. Descripción morfológica de embriones en etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	35
Figura 20. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	36
Figura 21. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	37
Figura 22. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	38
Figura 23. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	39

Figura 24. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	40
Figura 25. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	41
Figura 26. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	42
Figura 27. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de <i>L. olivacea</i>	43

LISTA DE ÁPENDICES

Apéndice 1. Carta de exención de comité de ética, uso y cuidado animal de la Universidad Del Valle de Guatemala.....	55
Apéndice 2. Carta de aceptación de asesor a trabajo de graduación.	56
Apéndice 3. Carta solicitando aprobación de protocolo de trabajo de graduación.....	57
Apéndice 4. Carta de confirmación de cumplimiento del marco legal y estratégico del tortugario Manuelita para la conservación de tortugas marinas.	58
Apéndice 5. Recolección de huevos y registrador de temperatura en playa natural.....	59
Apéndice 6. Infraestructura y organización del tortugario Manuelita con el apoyo de Pedro Yanes.	60
Apéndice 7. Huevos no eclosionados analizados en laboratorio.	61

RESUMEN

Actualmente, el cambio climático ha alterado las condiciones térmicas de las playas de anidación de *Lepidochelys olivacea* (tortuga parlama), afectando tanto la temperatura del sustrato como el éxito reproductivo de la especie, lo que amenaza la viabilidad de las poblaciones de tortugas marinas, especialmente cuando las condiciones térmicas son elevadas (Ariano-Sánchez et al., 2023; Ellgutter et al., 2025). El objetivo del estudio fue comparar los perfiles térmicos y el porcentaje de eclosión de nidos artificiales de *L. olivacea* en condiciones de tortugario y playa natural de la Barra, el Jiote, Moyuta, Jutiapa. El estudio se basó en la metodología de Ariano-Sánchez et al. (2023). Se realizaron 36 nidos distribuidos tanto adentro como afuera del tortugario. Se utilizaron 12 registradores de temperatura para medir la arena de todos los nidos y a través de modelos aditivos generalizados (GAM), se analizó la relación de la temperatura y la ubicación en el éxito de eclosión.

Los resultados mostraron diferencias claras, ya que los nidos dentro del tortugario mantuvieron temperaturas estables y bajas, con un promedio de 28.3 ± 2.4 °C y un porcentaje de eclosión cercano al 100 %. Por otro lado, los nidos en la playa natural, expuestos a temperaturas extremas, presentaron un promedio de 32.0 ± 3.4 °C y no lograron eclosionar.

Además, se realizó un análisis de laboratorio para identificar malformaciones embrionarias en las distintas etapas de desarrollo de los embriones, posiblemente debido a las altas temperaturas de la playa natural. De los embriones observados, el 58.4 % presentó malformaciones. Las altas temperaturas de la playa natural parecen haber interrumpido el desarrollo normal de los embriones, lo que resalta la importancia de los tortugarios como refugios térmicos para asegurar condiciones favorables para el desarrollo embrionario

Los resultados evidencian la importancia de los tortugarios como refugios térmicos frente al cambio climático y aportan información clave para optimizar su manejo. Es importante reconsiderar la incubación de nidos en playas naturales debido a los riesgos que presenta esta estrategia.

ABSTRACT

Currently, climate change has altered the thermal conditions of the nesting beaches of *Lepidochelys olivacea* (olive ridley sea turtle), affecting both the substrate temperature and the reproductive success of the species, which threatens the viability of sea turtle populations, especially when thermal conditions are high (Ariano-Sánchez et al., 2023; Ellgutter et al., 2025). The objective of the study was to compare the thermal profiles and hatching success rates of *L. olivacea* artificial nests under tortugario and natural beach conditions at la Barra, el Jiote, Moyuta, Jutiapa. The study was based on the methodology of Ariano-Sánchez et al. (2023), and 36 nests were established both inside and outside the tortugario. Twelve temperature data loggers were used to measure the sand temperature at all nests, and the relationship between temperature and location in the hatching success was analyzed using Generalized Additive Models (GAM).

The results showed clear differences, with the nests inside the tortugario maintaining stable, lower temperatures, averaging 28.3 ± 2.4 °C and achieving nearly 100 % hatching success. On the other hand, the nests on the natural beach, exposed to extreme temperatures, had an average of 32.0 ± 3.4 °C and did not hatch.

Additionally, a laboratory analysis was performed to identify embryonic malformations in the different developmental stages of the embryos, resulting from the high temperatures of the natural beach. Of the embryos observed, 58.4 % showed malformations. The high temperatures on the natural beach appear to have interrupted the normal development of the embryos, highlighting the importance of tortugarios as thermal refuges to ensure favorable conditions for embryonic development.

The results highlight the importance of turtle hatcheries as thermal refuges in the face of climate change and provide key information for optimizing their management. It is important to reconsider nest incubation on natural beaches due to the risks associated with this strategy.

I. INTRODUCCIÓN

La tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) es una de las especies de tortugas marinas más abundantes del Pacífico Oriental Tropical y forma parte fundamental de los ecosistemas marino-costeros de Guatemala (UICN, 2021). A través de su actividad reproductiva y trófica, esta especie contribuye al flujo de nutrientes entre los ambientes marinos y terrestres, desempeñando un papel ecológico clave en las playas de anidación (James & Melero, 2015). Sin embargo, al igual que otras especies de tortugas marinas, enfrenta diversas amenazas que ponen en riesgo su viabilidad a largo plazo, entre las que se incluyen la recolección ilegal de huevos, la pérdida de hábitat y, de forma cada vez más frecuente, los efectos del cambio climático sobre las playas de anidación (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008; IPCC, 2023; Tomillo et al., 2020).

Uno de los factores ambientales más determinantes en el éxito reproductivo de las tortugas marinas es la temperatura de la arena, la cual está bastante relacionada con el porcentaje de eclosión de los huevos y la proporción de sexos (Valverde et al., 2010; Romano, 2007; García Cerdá, 2008). En Guatemala, las playas de arena oscura como las de la Barra, el Jiote, Moyuta en Jutiapa, suelen alcanzar temperaturas superiores a 35 °C que posiblemente amenazan la incubación natural de los nidos. Ya que estudios recientes han demostrado que temperaturas elevadas incrementan la mortalidad embrionaria y reducen el éxito de incubación en distintas especies de tortugas marinas, especialmente en playas con arenas oscuras que absorben mayor radiación solar (Ariano-Sánchez et al., 2023; Wiggins et al., 2023).

En este contexto, los tortugarios han surgido como una alternativa para mitigar los efectos de temperaturas extremas y la depredación de nidos. Sin embargo, más allá de las medidas de protección ya establecidas, aún es necesario comprender mejor como se comparan los resultados de incubación en condiciones naturales y en ambientes controlados. Este tipo de información serviría para orientar prácticas de conservación más efectivas y adaptadas a las condiciones locales, además de enfrentar los efectos del cambio climático.

El presente estudio respalda esta problemática y tiene como objetivo comparar el porcentaje de eclosión y los perfiles térmicos de nidos artificiales de *L. olivacea* en un tortugario comunitario y en la playa natural de la Barra, el Jiote, Moyuta en Jutiapa. Con ello, se busca brindar evidencia científica que fortalezca el manejo y la conservación de esta especie tan importante para el país.

II. JUSTIFICACIÓN

A pesar de los esfuerzos de conservación implementados en Guatemala, como la creación de tortugarios, persisten vacíos críticos de información científica sobre la eficacia real de estas estrategias frente a las condiciones naturales de anidación de las tortugas parlama (*L. olivacea*). A la fecha, existen pocos estudios comparativos que evalúen cómo las diferencias térmicas entre ambientes controlados de tortugario y playas naturales afectan variables clave como la tasa de eclosión, la proporción de sexos o la incidencia de malformaciones embrionarias (Ariano-Sánchez et al., 2023; Kutzari Asociación Civil, 2006; Muccio, 2015; USAID, 2019). Esta falta de datos limita la capacidad de optimizar las prácticas de manejo y adaptarlas al contexto del cambio climático, donde el incremento de temperaturas podría intensificar los riesgos para las poblaciones de tortugas marinas.

A nivel global, *L. olivacea* se encuentra clasificada como “Vulnerable” en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), debido a la combinación de amenazas como la pérdida y degradación del hábitat, la contaminación, la pesca incidental y la recolección ilegal de huevos (UICN, 2021). En Guatemala, la anidación de la tortuga parlama en las playas del litoral pacífico no ocurre de manera uniforme a lo largo de la costa, sino que presenta diferencias marcadas entre regiones. Un estudio realizado entre 2013 y 2021 analizó la densidad de huellas de esta especie en siete playas índice del Pacífico de Guatemala (El Chico, Churirín, el Paredón, Conacaste, Monterrico, Hawaii y la Barrona) y mostró que la actividad de anidación es considerablemente mayor en las playas del suroriente, especialmente en Hawaii y la Barrona, en comparación con las playas del suroccidente (Muccio, 2022). Estos patrones sugieren que la reproducción de *L. olivacea* está influenciada y presionada por condiciones locales, las cuales pueden estar relacionadas con factores ambientales o de manejo, como la presencia de tortugarios, y resaltan la necesidad de comprender mejor las presiones que actúan en cada sitio de anidación (Muccio, 2015; Muccio, 2022). A pesar del uso extendido de los tortugarios como herramienta de conservación, aún no se comprende con claridad en qué medida las condiciones térmicas controladas de estos sistemas influyen en el éxito de eclosión en comparación con las condiciones naturales de las playas (Kutzari Asociación Civil, 2006; USAID, 2020; Ellgutter et al., 2025). La falta de información integral sobre esta relación dificulta el diseño de estrategias de conservación que integren de forma efectiva la viabilidad térmica de los nidos y la dinámica ecológica del ecosistema local (Gatto et al., 2022; Wiggins et al., 2023).

Como antecedente, un estudio reciente sugiere que la incubación natural de nidos es posible en playas guatemaltecas, y recomienda reconsiderar la estrategia nacional de conservación que históricamente ha privilegiado los tortugarios como herramienta central (Morales-Mérida et al., 2023). Sin embargo, dicho estudio presenta limitaciones metodológicas que restringen la generalización de sus resultados. Esto refuerza la necesidad de investigaciones más robustas que permitan determinar con mayor rigor si los tortugarios

constituyen una solución sostenible frente a la crisis climática y las amenazas humanas, o si requieren adaptaciones sustanciales para garantizar su efectividad a largo plazo. Actualmente existen 39 tortugarios registrados ante CONAP, 22 de los cuales se encuentran localizados en áreas prioritarias para la conservación de tortugas (USAID, 2019). Algunos estudios indican a su vez que los tortugarios han logrado aumentar la tasa de eclosión, pero se han observado problemas relacionados con la temperatura interna de los nidos y el impacto del cambio climático sobre la temperatura de la arena en ambientes controlados (Ariano-Sánchez et al., 2023). Pero la comparación con las playas naturales sigue siendo importante. En Guatemala, las temperaturas pueden superar los 35 °C, especialmente en las horas pico del día. Estas altas temperaturas son letales para los embriones, incluso llegando a causar malformaciones. Estas malformaciones no solo reducen el éxito de eclosión, sino que también afectan la sobrevivencia de los neonatos que sí logran emerger de la arena (Ariano-Sánchez et al., 2023) Al estar más vulnerables, tienen mayor riesgo a depredadores y cambios bruscos en el ambiente.

Debido a esto el presente estudio busca contribuir a llenar la brecha de conocimiento mediante la generación de evidencia científica sólida que permita comparar sistemáticamente los resultados de nidos en condiciones naturales y en tortugarios. Este estudio generará evidencia científica para fortalecer el manejo de tortugarios como estrategia adaptativa frente al cambio climático y promover una conservación participativa basada en datos entre comunidades locales, instituciones gubernamentales y organizaciones de conservación.

III. MARCO TEÓRICO

La Universidad del Valle de Guatemala (UVG) junto al tortugario Manuelita en la Barra, el Jiote, Moyuta, Jutiapa, han impulsado con este proyecto de tesis titulado “Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala”, una iniciativa de conservación para la tortuga parlama, generando datos científicos que permitan optimizar las prácticas de manejo en tortugarios. Este proyecto de tesis toma como referencia el trabajo realizado por Adriana Ortega, quien evaluó cómo las temperaturas de la arena y la urbanización afectan las playas de anidación de *L. olivacea* en el litoral Pacífico de Guatemala (Ortega, 2024), y busca continuar con esta línea de investigación aplicándola en la comparación de condiciones de incubación entre nidos dentro de un tortugario y en playa natural.

A. Efectos del cambio climático sobre los sistemas marino-costeros

El cambio climático es un fenómeno climático extremo el cual representa una amenaza fuerte para los ecosistemas marino-costeros y su biodiversidad. A nivel mundial, se ha registrado un aumento promedio de la temperatura superficial del planeta de aproximadamente 1.1 °C y que ha ido acelerando en los últimos 10 años debido a la acumulación de gases de efecto invernadero (IPCC, 2023). Esto ha provocado el aumento del nivel del mar, alteraciones en patrones de precipitación, mayor frecuencia de otros eventos climáticos y olas de calor. Las playas, donde anidan muchas especies de tortugas marinas, son de los hábitats más afectados, ya que sufren de erosión costera, inundaciones y cambios en la temperatura del suelo (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). Y estos efectos pueden verse intensificados en playas de origen volcánico con arena oscura, como las predominantes en el litoral pacífico de Guatemala. Ya que este tipo de sustrato presenta una mayor capacidad de absorción de la radiación solar, lo que favorece el incremento de la temperatura de la arena en comparación con playas de arenas claras, elevando el riesgo de alcanzar umbrales térmicos críticos para el desarrollo embrionario de las tortugas marinas (Ariano-Sánchez et al., 2023; Ortega, 2024).

En el caso de la reproducción de las tortugas marinas el aumento constante de la temperatura de la arena representa uno de los riesgos más significativos, ya que afecta directamente el éxito de eclosión frente a temperaturas extremas. Además, los eventos extremos como El Niño pueden reducir bastante las tasas de anidación y alterar los ciclos reproductivos de especies como *L. olivacea*. Esto pone en riesgo su capacidad de resiliencia ecológica y por esto son tan necesarias las estrategias de conservación frente a la crisis climática (Tomillo et al., 2020).

B. Importancia ecológica de las tortugas marinas

Las tortugas marinas desempeñan papeles importantes en el funcionamiento y la salud de los ecosistemas marino-costeros, ya que actúan como reguladoras ecológicas al mantener el equilibrio de las comunidades donde se alimentan y anidan. Algunas especies se alimentan de pastos marinos y promueven su crecimiento sano al hacerle un mantenimiento a estas praderas (Chacón, 2002). Otras se alimentan de medusas o invertebrados y controlan sus poblaciones, influyendo en la estructura y dinámica de las comunidades biológicas tanto en el mar como en la zona costera.

En particular, la tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) cumple un rol ecológico relevante en los ecosistemas del Pacífico Oriental Tropical, donde es una de las especies más abundantes. Durante la anidación, los huevos no eclosionados y las crías depredadas representan una fuente importante de nutrientes para organismos costeros como cangrejos, aves y otros depredadores, favoreciendo el reciclaje de nutrientes y la productividad de las playas de anidación (James & Melero, 2015). Este aporte energético contribuye a la transferencia de materia orgánica desde el ambiente marino hacia los ecosistemas terrestres adyacentes. Asimismo, la alta frecuencia de eventos reproductivos de *L. olivacea* en playas del Pacífico genera un impacto ecológico acumulativo, especialmente en sitios con anidaciones recurrentes, donde la presencia de nidos influye en la dinámica física y biológica del sustrato arenoso (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). La alteración de estos procesos ya sea por la reducción del éxito de eclosión o por cambios en las condiciones ambientales de incubación, puede afectar no solo a la especie, sino también a las interacciones ecológicas que se desarrollan en los ecosistemas marino-costeros (Seminoff, 2004).

C. Ciclo de vida y reproducción de las tortugas marinas

Las tortugas marinas tienen un largo ciclo de vida y con cambios entre ecosistemas marinos y costeros. Presentan una reproducción ovípara, con fecundación interna y comportamientos migratorios. Las hembras adultas realizan migraciones de larga duración que van desde sus áreas de alimentación hasta playas específicas de anidación, ya que poseen un comportamiento de fidelidad al sitio donde nacieron, conocido como filopatría (Chacón, 2002; Seminoff, 2004). El ciclo reproductivo varía entre las distintas especies, pero en general las hembras pueden anidar varias veces dependiendo de la temporada y depositan entre 80 y 120 huevos por nido, los cuales tienen un periodo de incubación de 45-60 días, esto influenciado por la temperatura de la arena (Valverde et al., 2012; Abreu-Grobois & Plotkin, 2008).

Además de la temperatura superficial de la playa, la profundidad del nido es un factor clave que influye directamente en el microambiente térmico durante la incubación. La

temperatura dentro del nido puede variar según la profundidad a la que se depositan los huevos, ya que los estratos más profundos de la arena suelen presentar mayor estabilidad térmica y menores fluctuaciones diarias, mientras que los estratos más superficiales pueden estar expuestos constantemente a temperaturas extremas (García Cerdá, 2008; Ellgutter et al., 2025).

Por otro lado, tras la eclosión de los huevos, las crías suelen salir de noche y dirigirse al mar, siendo altamente vulnerables frente a depredadores y condiciones ambientales adversas. Al pasar los años, las tortugas juveniles permanecen en mar abierto hasta alcanzar un tamaño adecuado y logran migrar hacia áreas costeras para encontrar sitios de alimentación (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). La madurez sexual puede tardar entre 10 a 30 años dependiendo de la especie, lo que hace que las poblaciones de tortugas marinas sean particularmente sensibles a alteraciones en su éxito reproductivo (Seminoff, 2004).

D. Factores que afectan el éxito reproductivo de las tortugas marinas

La anidación de las tortugas marinas se ve influenciada por varias condiciones ambientales y antropogénicas, que alteran tanto el éxito reproductivo como el desarrollo embrionario. La temperatura de la arena, la humedad, la contaminación lumínica, depredación y actividad humana en las playas son algunos de los elementos importantes que afectan la viabilidad de los nidos (James & Melero, 2015; Muccio, 2015). Las condiciones térmicas de las playas de arena negra en Guatemala pueden llegar a alcanzar niveles extremos y letales que afectan de manera negativa la incubación de los embriones (Ariano-Sánchez et al., 2023). Además, que el cambio climático ha aumentado las temperaturas y también la frecuencia de eventos climáticos extremos que representan un riesgo grande para estas especies que dependen de playas estables para su reproducción (Tomillo et al., 2020).

E. Temperatura de incubación y proporción de sexos en tortugas marinas

En las tortugas marinas, la temperatura de la arena durante el periodo de incubación determina tanto el desarrollo embrionario y también el sexo de las crías. Esto es conocido como determinación sexual dependiente de la temperatura (o *Temperature-dependent Sex Determination*) y es característico de todas las especies de tortuga marina (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). De manera general, temperaturas de incubación relativamente más elevadas favorecen la producción de hembras, mientras que temperaturas más bajas tienden a producir una mayor proporción de machos. Entre estos extremos existe una temperatura pivotal, definida como aquella a la cual se obtiene una proporción aproximada de 1:1 entre sexos, la cual para muchas poblaciones de tortugas marinas se sitúa alrededor de los 29 °C, aunque puede variar según la especie, la población y las condiciones locales del sitio de anidación (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008).

En condiciones normales una proporción de sexos equilibrada es fundamental para mantener la viabilidad reproductiva de las poblaciones. Sin embargo, el aumento progresivo de la temperatura asociado al cambio climático, así como las modificaciones del microambiente térmico causadas por prácticas de manejo como la reubicación de nidos en tortugarios, pueden generar sesgos hacia la producción predominante de hembras (Ariano-Sánchez et al., 2023). En este contexto, el análisis de los perfiles térmicos en nidos ubicados tanto en playas naturales como en tortugarios resulta importante para evaluar posibles diferencias en las condiciones de incubación y su impacto potencial sobre la proporción de sexos.

F. Malformaciones embrionarias en tortugas marinas asociadas a temperatura

Las temperaturas extremas durante el periodo de incubación se han llegado a asociar con el mal desarrollo embrionario en las tortugas. Debido a esto pueden surgir malformaciones en los embriones ya sea en el cráneo, caparazón, aletas o estructuras duplicadas (James & Melero, 2015). En el estudio Ariano-Sánchez et al., (2023), se observó que las playas de Guatemala pueden alcanzar temperaturas superiores a los 35 °C, especialmente en las horas pico del día, esto es letal para los embriones y favorece el desarrollo anormal de estos. Estas malformaciones no solo reducen el éxito de eclosión, sino que también afectan la sobrevivencia de los neonatos que sí logran emerger de la arena para desplazarse al mar, debido a que los hace más vulnerables a depredadores y cambios bruscos en el ambiente.

G. Tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) como especie modelo

La tortuga parlama (*L. olivacea*), pertenece al orden Testudines de la familia Cheloniidae. Es una de las siete especies de tortugas marinas más conocidas y se identifica como la más pequeña de todas, con un caparazón que puede medir entre 60 y 70 cm de largo en adultos y un peso promedio que varía entre 35 y 45 kg (Chacón, 2002). Su caparazón es ligeramente ovalado y tiene una coloración gris verdosa, presenta una cabeza pequeña, pero con mandíbulas fuertes que le permiten una dieta omnívora y diversa (IUCN, 2021).

Figura 1. Tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en playas guatemaltecas



Fuente: IUCN, 2021.

H. Distribución y estado de conservación de la tortuga parlama

La tortuga parlama presenta una amplia distribución geográfica con presencia en el océano Pacífico, Índico y Atlántico (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). Sus sitios de anidación se extienden desde México hasta Perú, incluyendo las costas de Guatemala donde es la especie más abundante (Valverde et al., 2012). A pesar de esta amplia distribución, el estado de conservación de *L. olivacea* es motivo de preocupación a nivel global. La especie se encuentra clasificada como “Vulnerable” en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2021) y está incluida en el Apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES), lo que restringe su comercio internacional con fines comerciales y refuerza su protección legal.

En varios países de Centroamérica, su conservación se respalda por la legislación local y la reubicación de nidos junto con el establecimiento de criaderos han demostrado ser efectivas en la conservación de la tortuga parlama (Valverde et al., 2012). Sin embargo, la evaluación del estado poblacional de la especie requiere el uso de indicadores confiables que permitan monitorear tendencias espaciales y temporales de la anidación. Entre los indicadores más utilizados se encuentran los conteos de huellas de anidación y el registro del número de nidos o huevos recolectados, los cuales permiten identificar patrones de distribución reproductiva y zonas de mayor importancia para la especie (Muccio, 2022). En un escenario de cambio climático, el uso de estos indicadores es relevante para detectar

posibles desplazamientos en los sitios de anidación y cambios en la intensidad reproductiva a lo largo de la costa del Pacífico guatemalteco (Figura 2).

Figura 2. Densidad de anidación de tortugas parlama en la costa del Pacífico de Guatemala



Nota: Conteos de huellas por kilómetro desde el 2013 al 2021. Fuente: Muccio, 2022.

I. Estrategias de conservación para tortuga parlama en Guatemala

En Guatemala, la conservación de tortugas marinas, especialmente en *L. olivacea*, se ha basado en un modelo que combina la participación de las comunidades locales con la gestión técnica de tortugarios. La playa de la Barra, el Jiote, en Moyuta, Jutiapa, es uno de los sitios de anidación importantes para la tortuga parlama en Guatemala. Las características de la zona, como la de arena volcánica influyen de manera directa en las condiciones térmicas del lugar, las cuales afectan el desarrollo embrionario y la proporción de sexos en las crías (Ariano-Sánchez et al., 2023).

Estudios recientes han demostrado que playas con arena volcánica, pueden alcanzar temperaturas letales para los embriones en su periodo de incubación, afectando la viabilidad si no hay un manejo adecuado (Ariano-Sánchez et al., 2023). Ante esta amenaza, los tortugarios han demostrado ser una estrategia clave de conservación, estos criaderos permiten un manejo más controlado de los huevos recolectados de tortuga parlama, protegiéndolos de

depredadores y temperaturas extremas (Muccio, 2015). Además, si los nidos dentro de los tortugarios son diseñados correctamente, pueden replicar las condiciones naturales de incubación, lo que incrementa las probabilidades de una eclosión exitosa de las crías (Kutzari, 2006). Esta estrategia no solo ayuda al éxito de eclosión de las tortugas, sino que también forma un vínculo entre la conservación y la participación de las comunidades locales, que son clave para proteger a especies vulnerables como la tortuga parlama frente al cambio climático (Barbanti et al., 2022).

La tortuga parlama también ha sido una fuente económica importante para las comunidades costeras del Pacífico de Guatemala, especialmente durante las temporadas de anidación (Muccio, 2015). Localidades como las Lisas, el Jiote y la Barrona dependen en gran medida de la recolección de huevos su sustento. Para equilibrar el aprovechamiento con la conservación, Guatemala implementó en 2002 la Estrategia Nacional de Manejo y Conservación de Tortugas Marinas (ENTM), promovida por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). La cual exige la entrega del 20 % de los huevos recolectados por los parlameros a tortugarios autorizados por CONAP para su incubación y liberación controlada (Kutzari, 2006). Esto ha generado beneficios tanto ecológicos como sociales y actualmente se han empezado a crear campañas de educación ambiental, monitoreos científicos de las especie y redes de voluntarios locales que fortalecen esta sensibilización y también la participación de ONG's, comunidades y el gobierno para la protección de estos organismos.

Además, estudios recientes han demostrado tendencias positivas en las poblaciones de tortugas marinas en áreas con programas de conservación a largo plazo. Un estudio realizado en un periodo de 16 años de datos de anidación de la tortuga parlama en la costa del Pacífico de Guatemala identificó una tendencia ascendente en la abundancia de anidación. A pesar de la variabilidad climática, especialmente por los eventos de El Niño y La Niña (Ariano-Sánchez et al., 2020). Mostrando que los esfuerzos comunitarios y las estrategias de conservación, como el manejo de tortugarios, son muy importantes para la recuperación de la población de *L. olivacea*, incluso en escenarios de cambio climático.

J. Limitaciones y retos en la conservación

A pesar de los esfuerzos realizados en la conservación de las tortugas marinas en Guatemala todavía existen limitaciones importantes. Entre las principales se encuentran la falta de financiamiento a proyectos locales, la dependencia de voluntarios para llevar a cabo estos proyectos de conservación y la poca vigilancia en playas donde no cuentan con instituciones permanentes asociadas a la conservación de especies (Muccio, 2015).

Asimismo, aunque la recolección y comercialización de huevos de tortuga marina se encuentra actualmente más regulada, la presión económica sobre los recolectores continúa siendo un factor relevante, lo que favorece la persistencia de esta práctica en algunos sectores del país (Tomillo et al., 2020). Esta situación limita la efectividad del sistema de conservación

basado en la entrega de un porcentaje de los huevos recolectados a los tortugarios, el cual constituye una de las principales estrategias de manejo en la costa del Pacífico de Guatemala. En este contexto, Morales-Mérida et al. (2023) sugirieron que, en determinadas condiciones, la incubación natural de los nidos podría ser viable sin la intervención de tortugarios. No obstante, dicho estudio presenta algunas limitaciones metodológicas, ya que se basa en un número reducido de nidos incubados en una playa privada, cuyas condiciones difieren significativamente de las playas abiertas del Pacífico guatemalteco. Además, no se incorporaron variables clave como la depredación por perros ferales, el saqueo de nidos ni otras presiones antropogénicas comunes en la región, lo cual dificulta la extrapolación de sus resultados a un contexto más amplio.

Por lo tanto, los tortugarios continúan siendo una herramienta relevante dentro de las estrategias de conservación, no solo para aumentar la viabilidad de los huevos frente a amenazas directas, sino también para promover la participación comunitaria y la educación ambiental (Tomillo et al., 2020). Adicionalmente, una gestión adecuada de las condiciones de incubación dentro de los tortugarios, en particular de la temperatura y la densidad de los nidos, resulta fundamental para maximizar el éxito de eclosión y reducir sesgos en la proporción de sexos. Estudios previos han documentado que las variaciones térmicas durante la incubación, influenciadas tanto por factores ambientales como por la configuración de los nidos, pueden afectar significativamente la proporción de sexos en las crías (Valverde et al., 2012; Ariano-Sánchez et al., 2023).

Por lo que este proyecto de tesis titulado “Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la tortuga parlama (*L. olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala”, proporcionará datos comparativos entre nidos incubados en tortugario y playa natural, teniendo en cuenta las condiciones reales de las playas guatemaltecas. Esta investigación permitirá valorar la efectividad de los tortugarios frente a las amenazas ambientales actuales y podrá servir de base para futuras estrategias de conservación más adaptadas.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Comparar los perfiles térmicos y porcentaje de eclosión de nidos artificiales de huevos de la tortuga parlama (*L. olivacea*) en condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Comparar el éxito de eclosión en nidos artificiales de *L. olivacea* ubicados en el tortugario y en la playa natural.
- Comparar los perfiles térmicos de los nidos artificiales de *L. olivacea* en condiciones de tortugario y playa natural.
- Caracterizar los estadios de desarrollo embrionario en los huevos no eclosionados.

V. HIPOTÉISIS

A. Hipótesis principal

- La temperatura de la arena influye significativamente en el éxito de eclosión de *L. olivacea* con mayores tasas de eclosión adentro del tortugario en comparación con los de la playa natural.

B. Hipótesis secundarias

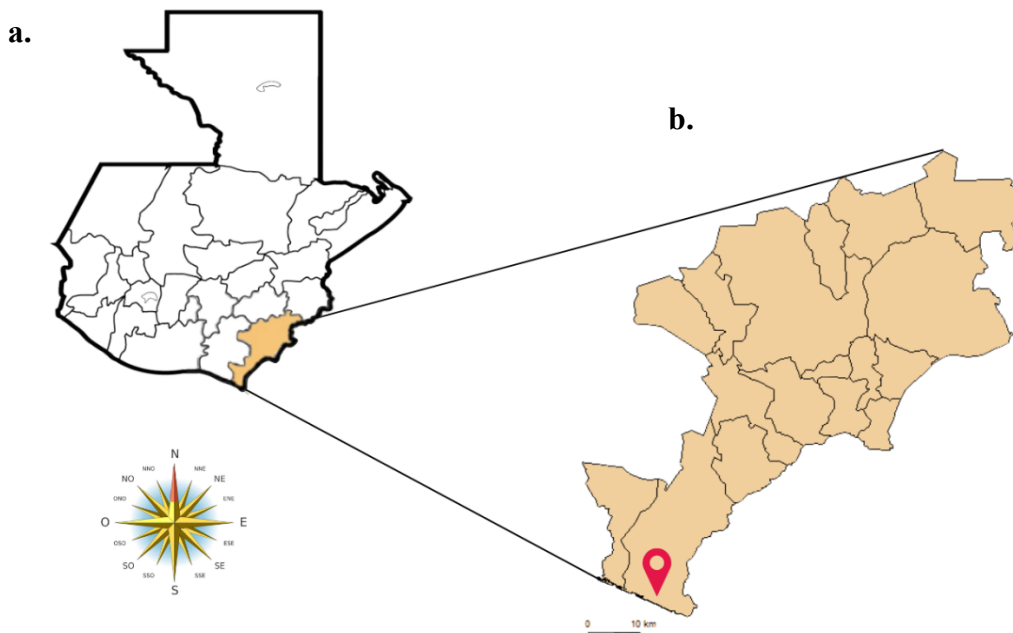
- El desarrollo embrionario de *L. olivacea* se verá afectado por las variaciones térmicas de la arena, con mayor presencia de malformaciones en nidos expuestos a temperaturas extremas.
- Las temperaturas de la arena en la playa natural tendrán mayor fluctuación diaria y alcanzarán valores extremos más altos en comparación con las del tortugario.

VI. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la playa las Lisas, Jutiapa, Guatemala. Específicamente el trabajo de campo se hará adentro del tortugario Manuelita ubicado en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa y en la playa natural adyacente (Figura 3 y 4). El área de estudio se caracteriza por playas de arena oscura, resultado de la actividad volcánica en la región. Estas playas presentan un clima cálido y húmedo, con dos estaciones bien definidas: una lluviosa y otra seca. La temperatura media anual ronda los 27 °C, alcanzando máximos de 30 °C durante el mes de abril. La temporada de lluvias coincide con el período de anidación de la tortuga parlama, que es de junio a noviembre. Además, la zona no está altamente urbanizada, ya que no cuenta con grandes complejos vacacionales, sino principalmente con casas que pertenecen a las comunidades locales del Jiote. Según registros recientes, el 99 % de los nidos de tortugas marinas en esta zona corresponden a la tortuga parlama (*L. olivacea*), mientras que las especies como la tortuga verde (*Chelonia mydas*) y la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) tienen una presencia mucho menos frecuente (Ariano-Sánchez et al., 2023).

Figura 3. Ubicación geográfica del sitio de estudio en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala



Nota: A) Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio en Guatemala, con énfasis en el sitio de estudio en la costa del Pacífico. B) Detalle ampliado del departamento de Jutiapa, donde se visualiza el lugar de estudio, resaltado en rojo. Elaboración: propia.

Figura 4. Fotografías del tortugario Manuelita en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa



Nota: A) Vista general del tortugario Manuelita, con el área de incubación de los nidos, se muestran estructuras de protección que resguardan los huevos. B) Vista panorámica de la instalación desde la playa natural. Fuente: propia.

B. Consideraciones legales del estudio

Antes de iniciar el estudio, se formalizó un acuerdo con Antje Begemann, responsable del tortugario Manuelita, para garantizar el acceso a las instalaciones y el apoyo logístico necesario. Dicho acuerdo incluyó el alojamiento durante los viajes de campo, lo que facilitó la ejecución del estudio. Además, se coordinó con el personal del tortugario, en particular con Pedro Yanes, encargado de la siembra de los huevos y la gestión de los nidos. El

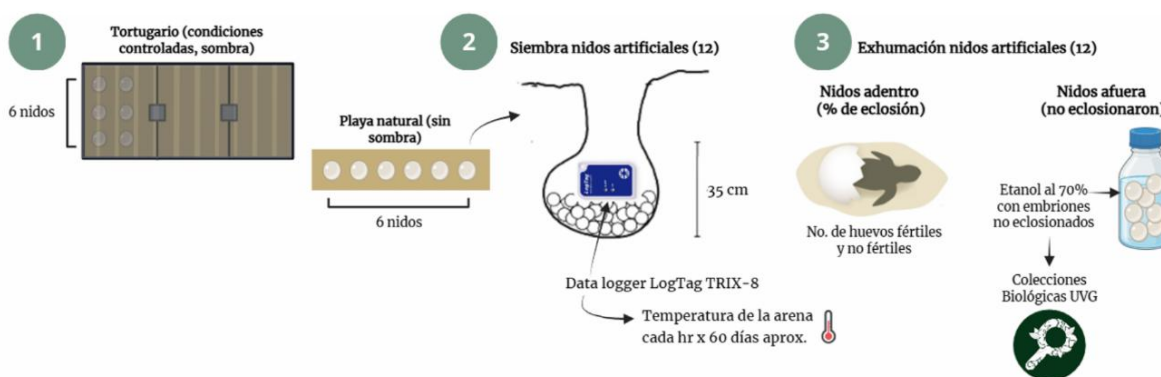
tortugario proporcionó acceso a sus registros históricos de temperatura y éxito de eclosión, lo que permitió realizar una comparación con los datos obtenidos durante el estudio.

El estudio se desarrolló bajo las licencias de investigación y colecta autorizadas por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). Dichas licencias incluyen el permiso para la colecta científica de especies silvestres, entre ellas reptiles, dentro de un marco ético y regulado nivel nacional. Esto garantiza que el estudio se desarrolle con respaldo legal y ético.

C. Diseño del estudio

En cuanto al sitio de estudio, este se llevó a cabo en la playa de la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, específicamente en el tortugario Manuelita y en la playa natural adyacente. En total, se sembraron 36 nidos, distribuidos en tres rondas de siembra (12 nidos por ronda). De estos 36 nidos, 18 se ubicaron dentro del tortugario y 18 en la playa natural adyacente. Cada nido fue preparado con una profundidad estándar de 35 cm, que es la profundidad típica a la que las tortugas parlama entierran sus huevos (Figura 5) (Valverde et al., 2010). Además, se reutilizaron 12 registradores de temperatura o *dataloggers* para medir la temperatura de la arena en cada nido durante todo el período de incubación.

Figura 5. Diagrama del diseño del estudio



Nota: Se presentan las tres etapas del diseño experimental del estudio. 1) Tortugario: se indica el número de nidos y el esquema de incubación en condiciones controladas. 2) Siembra de nidos artificiales: representación de la metodología de preparación de nidos. 3) Exhumación de nidos artificiales: procedimientos para la exhumación de los nidos, indicando la recolección de datos de eclosión y el análisis de embriones.

Elaboración: propia.

En la primera ronda se utilizaron 48 huevos por nido, mientras que en la segunda y tercera ronda se usaron 36 huevos por nido. Estos huevos fueron recolectados por los parlameros locales y vendidos al tortugario. Los nidos artificiales fueron sembrados siguiendo el

protocolo estandarizado para tener condiciones similares en todos. Durante el período de incubación, se monitoreo la temperatura de la arena y se registró el éxito de eclosión en cada nido, contando cuantos huevos eclosionaron y cuantos no lo hicieron. Para este último, se esperó de 3 a 4 días adicionales para dar más tiempo a los embriones para emerger.

Asimismo, los huevos no eclosionados de los nidos ubicados afuera del tortugario, fueron recolectados y conservados en frascos con etanol al 70 %, con el fin de analizar en laboratorio posibles malformaciones embrionarias.

D. Toma de datos

Para la recolección de datos de temperatura en la arena se siguió la metodología de Ariano-Sánchez et al. 2023. Por lo que se utilizaron 12 registradores de temperatura o *dataloggers*, marca LogTag TRIX-8 (rango de medición: - 40 °C a + 85 °C, precisión ± 0.5 °C para - 20 °C a + 40 °C) los cuales están fabricados con un recubrimiento de policarbonato que los vuelve resistentes al agua y a las zonas costeras.

Cada registrador se programó para tomar datos de temperatura cada hora durante todo el tiempo de incubación de los nidos artificiales. Los registradores fueron colocados a la profundidad promedio de los nidos de *L. olivacea*, con el fin de reflejar de manera representativa las condiciones térmicas a las que estuvieron expuestos los embriones. La toma de datos se llevó a cabo mediante cuatro visitas de campo al tortugario Manuelita, ubicado en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa, en los meses de agosto, octubre y diciembre del 2024 y febrero del 2025. Las visitas se planificaron de manera que permitieran abarcar diferentes momentos de la temporada de anidación, incluyendo fases tempranas y avanzadas de incubación, con el objetivo de tener variaciones temporales en los perfiles térmicos.

Durante cada visita se realizó la descarga de los datos de temperatura registrados por los *dataloggers*, así como la exhumación de nidos eclosionados y la recolección de muestras de embriones no eclosionados provenientes de los nidos monitoreados, las cuales fueron utilizadas para evaluar el éxito de eclosión y ver posibles anomalías embrionarias.

E. Análisis experimental

Para el análisis de los datos recolectados por *dataloggers*, se utilizó el lenguaje de programación R (Rstudio) 4.0.2., aplicando modelos aditivos generalizados (GAMs) con el paquete mgcv (Wood, 2017). Con el objetivo de evaluar la relación entre la temperatura de la arena y el porcentaje de eclosión de *L. olivacea*.

La base de datos incluyó información sobre la temperatura de los nidos por hora, su ubicación (adentro del tortugario o playa natural), el mes de recolección y el porcentaje de eclosión. Se realizarán graficas utilizando ggplot2 (Wickham, 2016) para observar la

distribución de la temperatura del nido y el porcentaje de eclosión según la ubicación y el mes. Posteriormente, se compararon cuatro modelos candidatos para evaluar los efectos de la temperatura y la ubicación sobre el porcentaje de eclosión (Cuadro 1).

La selección del modelo se basó en el rendimiento de los modelos utilizando el criterio de rendimiento con el paquete performance (Lüdecke et al., 2021), comparando los AIC y los resultados de las validaciones gráficas con DHARMA (Hartig, 2021). Los efectos marginales de los predictores se presentaron a través de gráficos generados con ggeffects (Lüdecke, 2018) y gratia (Simpson, 2021).

Cuadro 1. Modelos candidatos y variables predictoras

Modelo	Variables predictoras	Descripción
Modelo 1	Temperatura + Ubicación	Modelo con temperatura y ubicación como predictores.
Modelo 2	Temperatura	Modelo con solo la temperatura como predictor.
Modelo 3	Ubicación	Modelo con solo la ubicación como predictor.
Modelo 4 (nulo)	-	Modelo sin ninguna variable predictora.

Nota: Modelos estadísticos evaluados para analizar la relación entre la temperatura de la arena, la ubicación del nido (tortugario o playa natural) y el porcentaje de eclosión de *L. olivacea*.

F. Análisis macroscópico de embriones no eclosionados

Los huevos no eclosionados fueron preservados en etanol al 70 % y trasladados a la Universidad del Valle de Guatemala, específicamente a las instalaciones de colecciones biológicas, para su análisis posterior. Cada huevo fue abierto cuidadosamente mediante el uso de pinzas finas, con el fin de minimizar daños adicionales a los embriones. Los embriones recuperados fueron observados bajo un estereoscopio para realizar una evaluación macroscópica de su desarrollo. Durante el análisis se registraron características morfológicas generales, como tamaño relativo, coloración y estado general del tejido, así como la presencia de malformaciones externas visibles en la cabeza, el caparazón y las extremidades. La evaluación macroscópica de estas características es ampliamente utilizada en estudios de incubación de tortugas marinas para identificar fallas en el desarrollo embrionario (García Cerdá, 2008; Ariano-Sánchez et al., 2023), siendo suficiente para cumplir con los objetivos descriptivos del presente estudio.

Para la clasificación de las etapas de desarrollo embrionario, se tomaron fotografías de cada embrión y se utilizó como base metodológica la guía de estadios embrionarios propuesta para la tortuga *Caretta caretta* (García Cerdá, 2008). Esta referencia fue usada debido a la

ausencia de una descripción detallada y publicada de los estadios embrionarios específicos para *Lepidochelys olivacea*. A partir de dicha guía, se elaboró una adaptación simplificada que permitió agrupar los embriones no eclosionados en categorías amplias de desarrollo: embriones en etapas tempranas, intermedias y avanzadas, basadas en características morfológicas externas fácilmente observables.

Adicionalmente, se estableció una categoría independiente para los embriones que presentaron malformaciones externas evidentes, independientemente de la etapa de desarrollo en la que se encontraran. Esta clasificación se utilizó solamente para fines descriptivos, sin la aplicación de análisis estadísticos, con el objetivo de identificar patrones generales en la interrupción del desarrollo embrionario y comparar las etapas en las que este se detuvo bajo las diferentes condiciones de incubación evaluadas.

Cuadro 2. Clasificación simplificada de embriones no eclosionados de *L. olivacea* según etapas de desarrollo

Etapas	Porcentaje estimado de desarrollo (%)	Características principales	Estadios de referencia
Sin desarrollo visible	0%	Huevo sin embrión visible y no se aprecia escudo embrionario. Albumina densa y vitelo intacto. Sospecha de huevo infértil.	Estadio 1
Etapas tempranas	10-30%	Inicio de diferenciación embrionaria, se observa tubo neural, formación de cabeza y estructuras básicas.	Estadios 2-11
Etapas intermedias	31-60%	Se observan los ojos y extremidades, el caparazón en un desarrollo inicial.	Estadios 12-15
Etapas avanzadas	61-100%	Embrión formado casi por completo o totalmente formado. Caparazón y plastrón definidos, con pigmentación.	Estadios 16-20
Malformaciones en cualquier etapa	Varía	Anomalías evidentes en cabeza, caparazón, extremidades o duplicaciones.	Varía

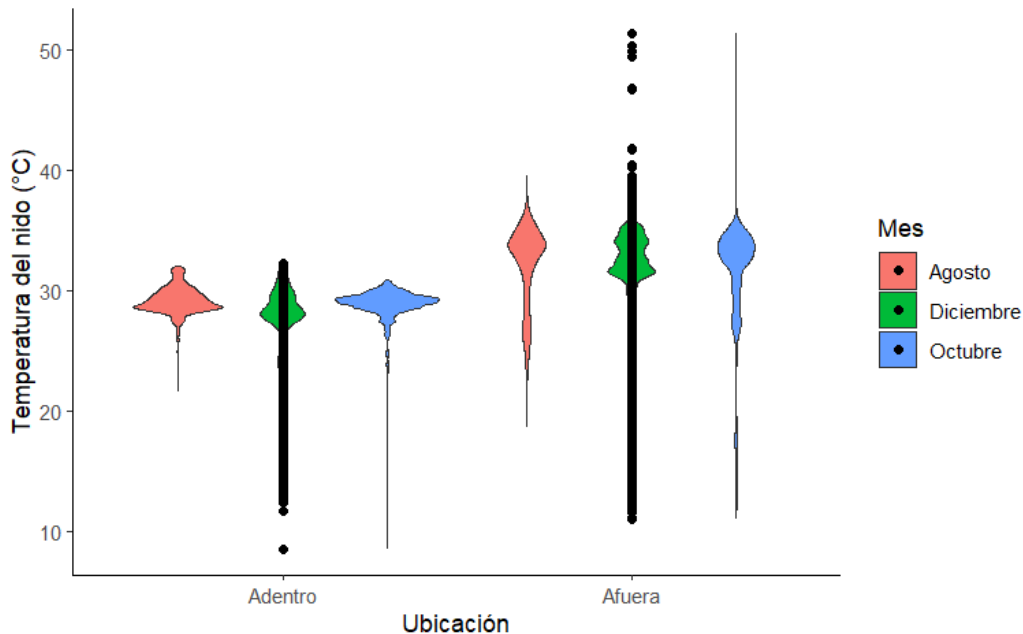
Nota: Clasificación adaptada a partir de la guía propuesta por García Cerdá (2008) para *Caretta caretta*. Permite organizar los resultados de los embriones no eclosionados en cuatro categorías que muestran el progreso del desarrollo embrionario, además de una quinta categoría adicional para malformaciones observadas en cualquier etapa.

VII. RESULTADOS

A. Temperatura en los nidos (adentro y afuera del tortugario)

Los datos de temperatura se organizaron y analizaron según la ubicación de los nidos (dentro del tortugario y en la playa natural) y la ronda de siembra (agosto, octubre, diciembre). Aunque inicialmente se sembraron 12 nidos por ronda, para un total de 36 nidos al final del estudio, no se pudo incluir todos los datos en los análisis finales, debido a fallos en los registradores de temperatura.

Figura 6. Temperatura del nido por ubicación adentro o afuera del tortugario y por mes de siembra



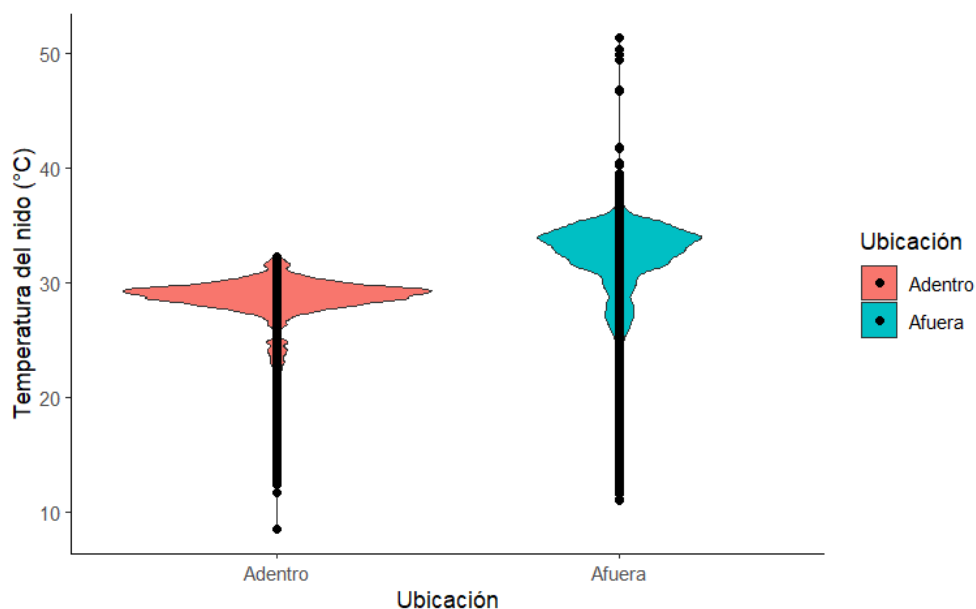
Nota: Se muestra la distribución de la temperatura y se observa que los nidos que estaban afuera del tortugario tienen una mayor dispersión y temperaturas más altas, especialmente en agosto y octubre. Por otro lado, los nidos que estaban adentro del tortugario mantienen temperaturas más estables y bajas con menor variabilidad.

En total, se excluyeron los registros de cuatro nidos ubicados dentro del tortugario y tres nidos en la playa natural, por lo que el análisis se realizó con información completa de 29 nidos. Los datos abarcan el período comprendido entre el 5 de octubre de 2024 y el 1 de marzo de 2025, y fueron recolectados durante las cuatro visitas al sitio de estudio, incluyendo tanto meses correspondientes a la temporada alta como a la temporada baja de anidación de *L. olivacea*. Los nidos ubicados dentro del tortugario presentaron temperaturas promedio de 28.3 ± 2.4 °C, con un rango de 8.6 a 32.3 °C. En cambio, los nidos en la playa natural

registraron una temperatura promedio mayor (32.0 ± 3.4 °C) y un rango térmico más amplio, alcanzando valores máximos de hasta 51.3 °C (Figura 6). Especialmente, durante las rondas de siembra de agosto y octubre, los nidos en la playa natural alcanzaron temperaturas cercanas a los 40 °C (Figura 6). De igual manera, durante el período de estudio, los registros de temperatura ambiental obtenidos de la estación meteorológica más cercana (Pasaco, Jutiapa) mostraron valores máximos superiores a los promedios históricos, con incrementos de hasta 1.8 °C respecto a la media registrada para la región (ICC, 2024).

El tortugario se diferenció por tener temperaturas más controladas y bajas llegando a temperaturas máximas de solo 32.3 °C, mientras que la playa natural alcanzó temperaturas de hasta 51.3 °C. Estas diferencias se observaron de forma consistente tanto al analizar la temperatura por mes de siembra (Figura 6) como al comparar de manera general las condiciones térmicas entre ubicaciones (Figura 7).

Figura 7. Temperatura del nido solo por ubicación adentro o afuera del tortugario



Nota: Se muestran valores más altos para los nidos afuera del tortugario, mientras que los nidos adentro del tortugario tienen una distribución de temperatura más estrecha y baja. Esto sugiere que los nidos de afuera poseen variaciones térmicas más amplias por las condiciones ambientales extremas.

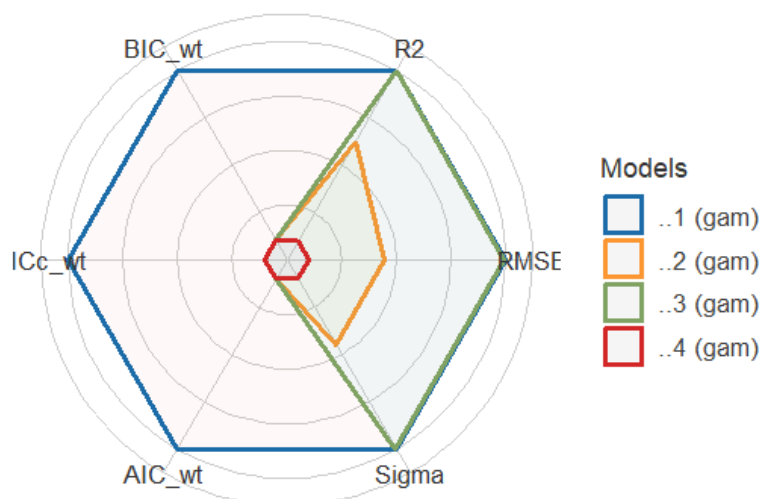
B. Selección de modelos estadísticos (GAM)

Se evaluaron cuatro modelos aditivos generalizados (GAM) para analizar la relación entre la temperatura de la arena, la ubicación de los nidos y el porcentaje de eclosión de *L.*

olivacea. Los modelos fueron comparados mediante distintos índices de ajuste, incluyendo AIC, BIC, R², RMSE y la desviación (Figura 8).

El modelo que incluyó simultáneamente la temperatura de la arena y la ubicación de los nidos presentó el mejor desempeño general. Los parámetros del modelo GAM seleccionado mostró que el intercepto tuvo una estimación de 93.05 ($p < 2e-16$), mientras que la ubicación del nido en la playa natural presentó una estimación negativa significativa ($\beta = -92.90$, $p < 2e-16$). El efecto suavizado de la temperatura fue altamente significativo (edf = 8.76, $F = 194.4$, $p < 2e-16$), lo que indica una relación no lineal entre la temperatura de la arena y el porcentaje de eclosión. Estos resultados respaldan el mejor desempeño de este modelo en comparación con los modelos alternativos (Figura 8).

Figura 8. Comparación de índices de modelos en el análisis de datos



Nota: Se comparan los índices de ajuste (BIC, AIC, R², RMSE, y otros) de diferentes modelos de regresión (modelos con y sin temperatura o ubicación). El modelo más completo, que incluye tanto la temperatura como la ubicación de los nidos, se desempeña mejor en la mayoría de los índices, indicando que este modelo es el más adecuado para predecir el porcentaje de eclosión en los nidos.

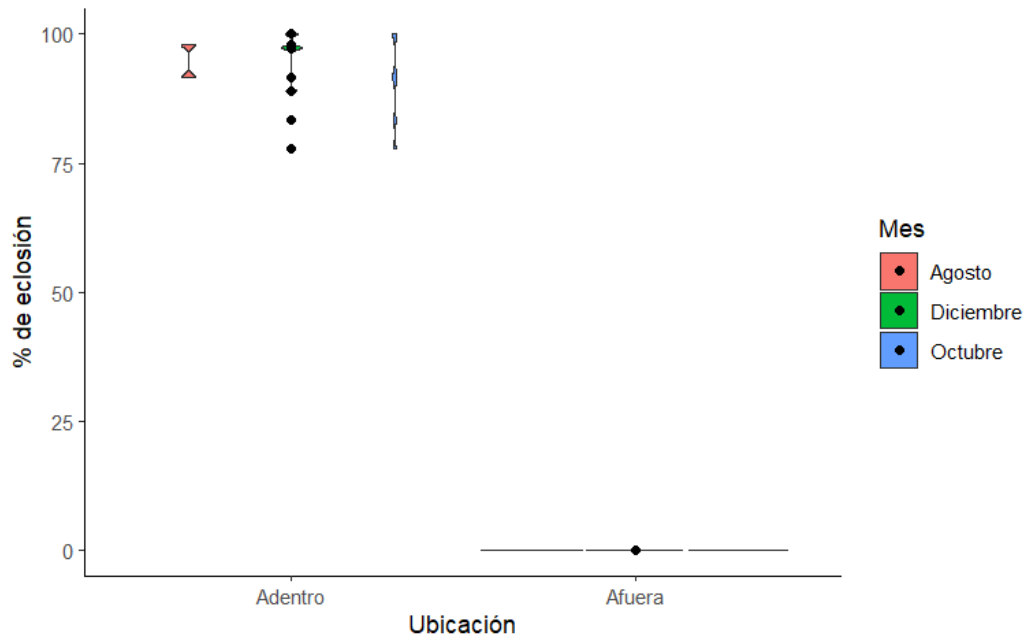
C. Éxito de eclosión de los nidos (adentro y afuera del tortugario)

El éxito de eclosión mostró diferencias significativas entre los 36 nidos ubicados dentro del tortugario y en la playa natural. Los 18 nidos dentro del tortugario presentaron un porcentaje de eclosión bastante alto, con una media de 93.2 ± 6.7 % (rango: 77.8 – 100 %) en todos los meses de siembra.

En contraste, los nidos ubicados en la playa natural presentaron un 0 % de eclosión en el 100 % de los nidos monitoreados en todos los meses de siembra. En total, los 18 nidos que

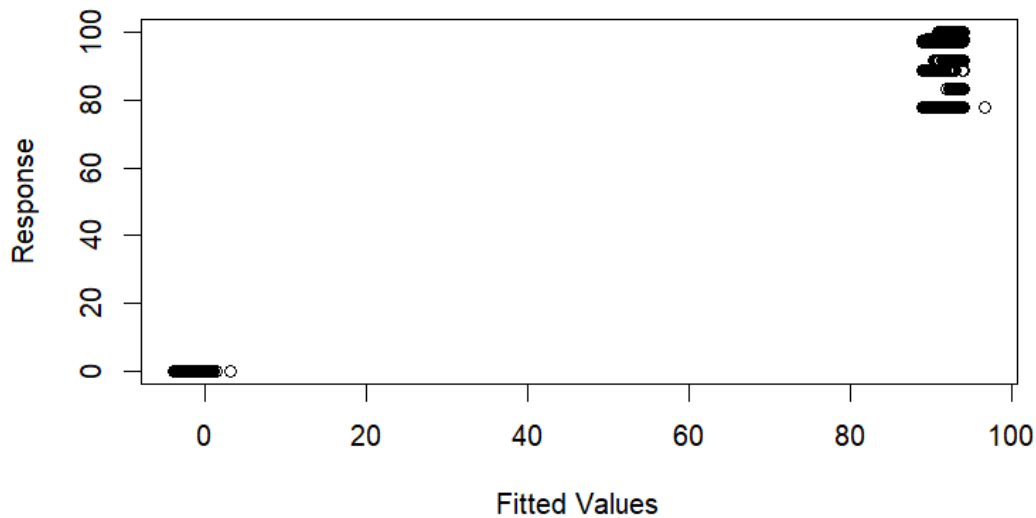
estaban registrados en playa natural mostraron ausencia completa de eclosión durante el período de estudio (Figuras 9 y 10).

Figura 9. Porcentaje de eclosión por ubicación adentro o afuera del tortugario y por mes de siembra



Nota: Se observa que, sin importar el mes de siembra, los nidos adentro del tortugario muestran una tasa de eclosión alta (cerca al 100 %), mientras que los nidos afuera del tortugario, en la playa natural, tienen un porcentaje mucho menor, del 0 % en todos los meses.

Figura 10. Gráfico de respuesta vs valores ajustados por el modelo

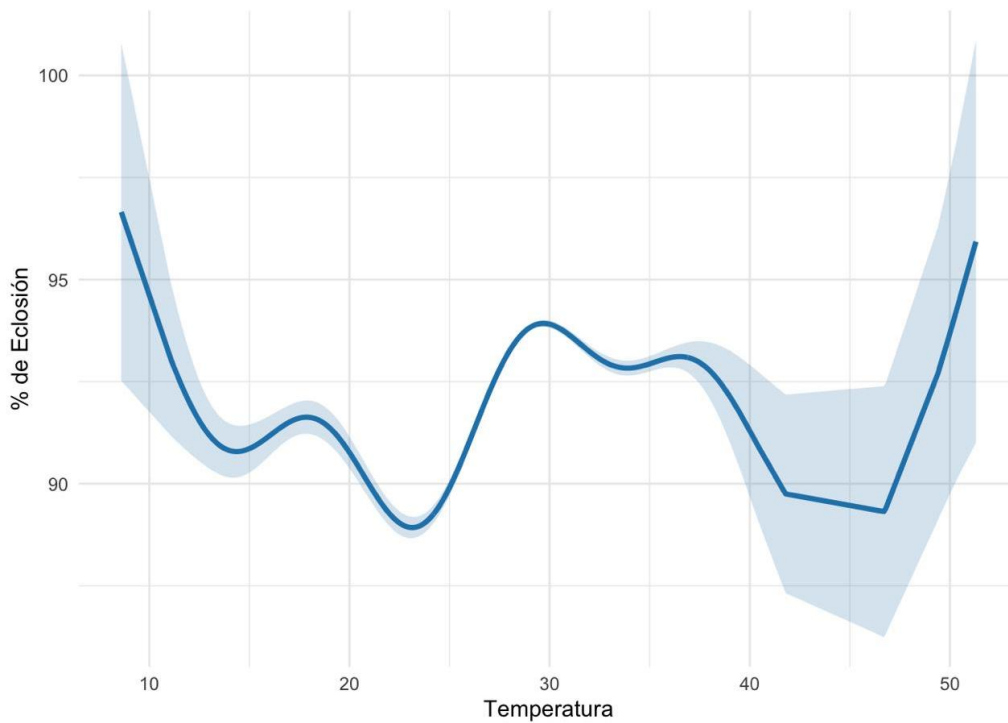


Nota: Se observa una gran concentración de puntos en valores bajos de respuesta (cerca de 0), especialmente para los nidos afuera del tortugario, indicando que el modelo tiene dificultades para predecir con precisión el porcentaje de eclosión en estos nidos. Sin embargo, los nidos adentro del tortugario se ajustan mejor al modelo, con un porcentaje más alto de eclosión.

D. Relación de la temperatura y el porcentaje de eclosión

La relación entre la temperatura del nido y el porcentaje de eclosión mostró un patrón no lineal a lo largo del rango térmico registrado durante el estudio (aprox. 25 – 35 °C, con valores extremos en playa natural). El porcentaje de eclosión fue mayor en temperaturas intermedias, cercanas a 28 – 30 °C, y disminuyó progresivamente a temperaturas más elevadas, particularmente por encima de 32 °C (Figura 11). Este patrón fue respaldado por el modelo aditivo generalizado (GAM), en el cual la temperatura presentó un efecto significativo sobre el porcentaje de eclosión ($s(\text{Temperatura})$): $\text{edf} = 8.76$, $F = 194.4$, $p < 2e-16$) (Cuadro 3). El intercepto del modelo, correspondiente a los nidos dentro del tortugario, mostró un valor estimado de 93.05, reflejando un alto porcentaje de eclosión bajo condiciones controladas. Por otro lado, la variable de ubicación (afuera del tortugario) presentó una estimación negativa significativa ($\beta = -92.90$; $p < 2e-16$), indicando una reducción marcada del porcentaje de eclosión en los nidos incubados en la playa natural en comparación con los nidos dentro del tortugario (Cuadro 3).

Figura 11. Relación entre la temperatura del nido (°C) y el porcentaje de eclosión (%)



Nota: Se observa un efecto no lineal de la temperatura sobre el éxito de eclosión. Basado en los intervalos de confianza, el modelo es válido para temperaturas entre 25 °C y 35 °C. Y se observa que el porcentaje de eclosión aumenta con temperaturas entre 25 °C y 30 °C. Sin embargo, a medida que la temperatura supera los 30 °C, el éxito de eclosión comienza a disminuir drásticamente.

Cuadro 3. Valores Beta (Estimaciones) y p-valor del modelo GAM para el porcentaje de eclosión

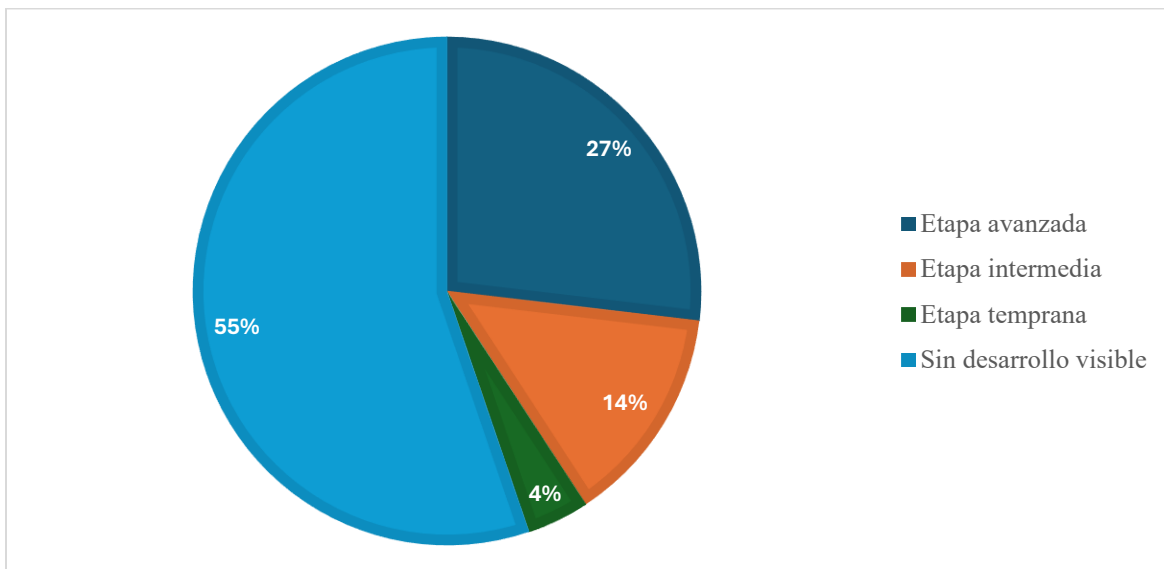
Variables	Estimación	Error estándar	t valor	p-valor
Intercepto	93.05	0.04663	1996	<2e-16 ***
Ubicación (Afuera)	-92.90	0.07440	-1249	<2e-16 ***
Variables	Edf	Ref.df	F	p-valor
s(Temperatura)	8.763	8.977	194.4	<2e-16 ***

Nota: Se muestran los valores Beta (Estimaciones) para el intercepto y el parámetro de Ubicación (Afuera) en la playa natural, indicando los valores p para cada uno. Y las cifras relacionadas con la significancia estadística (***) y los valores clave del modelo.

E. Etapas de desarrollo en embriones no eclosionados

Los nidos de la playa natural que no lograron eclosionar en todas las rondas de siembra mostraron una distribución diversa de las etapas de desarrollo embrionario (Figura 11). Con un total de 200 embriones, hubo una mayoría de 111 embriones en la etapa de “Sin desarrollo visible” (55 %), esta etapa representa a los huevos en los que el embrión aún no es visible y hay todavía bastante albumina con el vitelo intacto. Seguida de 54 embriones en la “Etapa avanzada” (27 %), con un embrión formado casi por completo o totalmente formado, cuenta con el caparazón y plastrón definidos, con pigmentación. Después, 27 embriones en la “Etapa intermedia” (14 %), donde ya se observan los ojos y extremidades, el caparazón en un desarrollo inicial. Por último, solamente 8 embriones en la “Etapa temprana” (4 %), donde se ve el inicio de diferenciación embrionaria y la formación de estructuras básicas.

Figura 12. Distribución de los estadios de desarrollo en embriones no eclosionados de *L. olivacea*




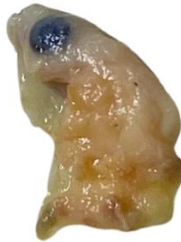



Nota: Gráfico de pie que muestra distribución en porcentaje (%) de los estadios de desarrollo observados en los embriones no eclosionados. Se observa que la mayoría de los embriones se encuentran en “Sin desarrollo visible” que cubre solamente el estadio 1 (55 %). Seguida de la “Etapa avanzada” que cubre los estadios 16-20 (27 %), la “Etapa intermedia” que cubre los estadios 12-15 (14 %) y la “Etapa temprana” que cubre los estadios 2-11 (4 %).

Se realizó la descripción morfológica de 89 embriones en sus distintas etapas de desarrollo. En la etapa temprana de desarrollo, se identificaron aproximadamente 8 embriones: 1 corresponde a la ronda 1 (agosto), 4 a la ronda 2 (octubre) y 3 a la ronda 3 (diciembre) (Figura 14 y 15). En esta etapa, se observó el inicio de la diferenciación embrionaria, con la formación del tubo neural y estructuras básicas como los ojos y las




extremidades en desarrollo. Esta etapa suele ocurrir durante los primeros 15-20 días de incubación (García Cerdá, 2008). Sin embargo, es importante mencionar que, en todos los nidos de la playa natural, los embriones tuvieron un tiempo de incubación de aproximadamente 60 días, tiempo en el cual no lograron eclosionar.. Ahora en cuanto a las malformaciones embrionarias, se observa que, en todos los casos, los embriones no presentan irregularidades o no se logran distinguir adecuadamente en esta etapa.

Figura 13. Descripción morfológica de embriones en etapa temprana (estadios 2-11) de *L. olivacea*

Etapa Temprana (estadios 2-11), Ronda 1 (agosto)		
Foto del embrión	Descripción	Malformaciones observadas
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
Etapa Temprana (estadios 2-11), Ronda 2 (octubre)		
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en octubre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en octubre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en octubre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en octubre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen

Nota: se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 1, agosto) y nido 2 (ronda 2, octubre) en playa natural. En esta etapa, los embriones presentan los primeros signos de diferenciación, como la formación del tubo neural y las estructuras básicas de la cabeza. En la mayoría de los embriones no se observaron malformaciones en ninguna de las rondas de siembra.

Figura 14. Continuación de las descripción morfológicas de embriones en etapa temprana (estadios 2-11) de *L. olivacea*







Etapa Temprana (estadios 2-11), Ronda 3 (diciembre)		
Foto del embrión	Descripción	Malformaciones observadas
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 5 , ronda de siembra en diciembre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 5 , ronda de siembra en diciembre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen
	Embrión en etapa temprana de desarrollo, del nido 6 , ronda de siembra en diciembre 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra los primeros signos de diferenciación, con la formación del tubo neural y estructuras básicas visibles.	No se distinguen

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 5 y 6 (ronda 3, diciembre) en playa natural.

En la etapa intermedia de desarrollo, se identificaron aproximadamente 27 embriones: 17 corresponden a la ronda 1 (agosto), 8 a la ronda 2 (octubre) y 2 a la ronda 3 (diciembre) (Figura 16, 17, 18 y 19). Esta etapa muestra características morfológicas bien definidas, como los ojos y las extremidades en desarrollo, así como el inicio de la formación del caparazón. Esta etapa suele ocurrir hacia los 30 días de incubación, lo cual es la mitad del tiempo normal en que un embrión logra eclosionar (García Cerdá, 2008). De acuerdo con las observaciones morfológicas, la mayoría de los embriones en esta etapa empezaron a mostrar pequeñas irregularidades o malformaciones poco significativas.

Se encontró que 8 embriones no presentaron irregularidades o no se lograron distinguir adecuadamente. 12 presentaron atrofia leve del caparazón, del plastrón o de las aletas y 7 presentaron atrofia moderada del caparazón, de las aletas y del plastrón que incluso contaban con un desarrollo anormal de los órganos fuera del plastrón.

Figura 15. Descripción morfológica de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de *L. olivacea*

Etapa Intermedia (estadios 12-15), Ronda 1 (agosto)		
Foto del embrión	Descripción	Malformaciones observadas
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.


Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 1, agosto) en playa natural. En esta etapa, los embriones presentan signos claros de diferenciación de ojos y extremidades, así como el inicio de la formación del caparazón. La mayoría de los embriones no presentan malformaciones visibles, pero algunos muestran signos leves de atrofia en el caparazón y las aletas.

Figura 16. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>Caparazón moderadamente atrofiado, igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>Caparazón moderadamente atrofiado.</p>
	<p>Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.</p>	<p>Caparazón moderadamente atrofiado.</p>








Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 y 2 (ronda 1, agosto) en playa natural.

Figura 17. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de *L. olivacea*

	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que el plastrón.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, desarrollo de órganos fuera del plastrón.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado
Etapa Intermedia (estadios 12-15), Ronda 2 (octubre)		
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Plastrón levemente atrofiado.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 2 (ronda 1, agosto) y nido 1 (ronda 2, octubre) en playa natural.

Figura 18. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones en etapa intermedia (estadios 12-15) de *L. olivacea*

	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón moderadamente atrofiado.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón moderadamente atrofiado.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón levemente atrofiado
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	No se distinguen
Etapa Intermedia (estadios 12-15), Ronda 3 (diciembre)		
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 5 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Desarrollo de órganos fuera del plastrón.
	Embrión en etapa intermedia de desarrollo, del nido 5 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión presenta la diferenciación de los ojos y extremidades, con el comienzo de la formación del caparazón.	Caparazón moderadamente atrofiado.







Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 y 2 (ronda 2, octubre) y nido 5 (ronda 3, diciembre) en playa natural.

En la etapa avanzada de desarrollo, se identificaron aproximadamente 54 embriones: 32 corresponden a la ronda 1 (agosto), 9 a la ronda 2 (octubre) y 13 a la ronda 3 (diciembre) (Figura 16, 17, 18 y 19). Esta etapa muestra una formación casi completa, con la definición clara del caparazón y el plastrón, así como la pigmentación de las estructuras. Suele ocurrir ya en los últimos días de incubación, preparando al embrión para que logre eclosionar (García Cerdá, 2008). De acuerdo con las observaciones morfológicas, la mayoría de los embriones en esta etapa empezaron a mostrar pequeñas irregularidades, aunque el desarrollo fue casi completo. Además, que la mayoría de los embriones aún presentaban restos de material nutritivo llamado vitelo, el cual normalmente es absorbido por completo antes de la eclosión. Sin embargo, el vitelo se encontraba en un tamaño intermedio y su consistencia era dura, similar a la de un material cocido.

En cuanto a las malformaciones, se encontró que 21 embriones no presentaron irregularidades o no se lograron distinguir adecuadamente. 22 presentaron atrofia leve del caparazón, del plastrón o de las aletas y 11 presentaron atrofia moderada del caparazón, de las aletas y del plastrón que incluso contaban con un desarrollo anormal de los órganos fuera del plastrón. A pesar de estas leves irregularidades, la mayoría de los embriones alcanzaron una formación adecuada.








En total de los 89 embriones analizados, 52 embriones presentaron malformaciones en distintas etapas de desarrollo. En la etapa temprana, no se observaron malformaciones, ya que los embriones eran demasiado pequeños para su identificación. Sin embargo, en la etapa intermedia, se identificaron 19 malformaciones y en la etapa avanzada, 33 malformaciones un poco más evidentes.

Figura 19. Descripción morfológica de embriones en etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

Etapa Avanzada (estadios 16-20), Ronda 1 (agosto)		
Foto del embrión	Descripción	Malformaciones observadas
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón moderadamente atrofiado.
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen








Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 1, agosto) en playa natural. En esta etapa, los embriones muestran una formación casi completa, con la definición clara del caparazón y el plastrón, así como la pigmentación de las estructuras. Se observó que la mayoría de los embriones presentaban un desarrollo adecuado, sin malformaciones significativas. Sin embargo, algunos mostraron signos de atrofia leve en el caparazón y plastrón.

Figura 20. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón levemente atrofiado</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón levemente atrofiado</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón levemente atrofiado</p>








Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 1, agosto) en playa natural.

Figura 21. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Desarrollo de órganos fuera del plastrón.
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón y plastrón levemente atrofiado
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón y plastrón levemente atrofiado
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón y plastrón levemente atrofiado
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón y plastrón levemente atrofiado
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón moderadamente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón moderadamente atrofiado, igual que las aletas.


Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 1, agosto) en playa natural.

Figura 22. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón moderadamente atrofiado, igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado, igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón levemente atrofiados.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado</p>

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 2 (ronda 1, agosto) en playa natural.

Figura 23. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Caparazón moderadamente atrofiado, igual que las aletas.
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	Plastrón levemente atrofiado.
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen
Etapa Avanzada (estadios 16-20), Ronda 2 (octubre)		
	Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1 , ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.	No se distinguen

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 2 (ronda 1, agosto) y nido 1 (ronda 2, octubre) en playa natural.

Figura 24. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 1, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>




Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 1 (ronda 2, octubre) en playa natural.

Figura 25. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón moderadamente atrofiados. Falta de estructuras oculares.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 2, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón moderadamente atrofiados. Estructura de la cabeza moderadamente destruida.</p>
<p>Etapa Avanzada (estadios 16-20), Ronda 3 (diciembre)</p>		
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado. Desarrollo de órganos fuera del plastrón.</p>



Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 2 (ronda 2, octubre) y nido 5 (ronda 3, diciembre) en playa natural.

Figura 26. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón levemente atrofiado.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón moderadamente atrofiados.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Caparazón y plastrón moderadamente atrofiados. Igual que las aletas.</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>Plastrón levemente atrofiado.</p>

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 5 (ronda 3, diciembre) en playa natural.

Figura 27. Continuación de las descripciones morfológicas de embriones etapa avanzada (estadios 16-20) de *L. olivacea*

	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 5, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>
	<p>Embrión en etapa avanzada de desarrollo, del nido 6, ronda de siembra en agosto 2024, ubicado en playa natural. En esta etapa, el embrión muestra una formación casi completa, con el caparazón y plastrón bien definidos. La pigmentación de las estructuras es clara.</p>	<p>No se distinguen</p>

Nota: Se observan los embriones correspondientes al nido 5 y 6 (ronda 3, diciembre) en playa natural.

VIII. DISCUSIÓN

El presente estudio permite interpretar cómo las condiciones térmicas durante la incubación influyen directamente en el desarrollo embrionario y el éxito reproductivo de *Lepidochelys olivacea*. Más allá de las diferencias observadas entre nidos incubados en tortugario y playa natural, los patrones registrados sugieren que la estabilidad térmica es un factor clave para la viabilidad de los embriones. Temperaturas elevadas, particularmente en rangos cercanos o superiores a 32–35 °C, pueden generar estrés térmico, alterar las tasas metabólicas normales y favorecer la deshidratación embrionaria, procesos que comprometen el desarrollo adecuado y aumentan la mortalidad durante la incubación (Ariano-Sánchez et al., 2022).

En este contexto, el mes de siembra también es un factor temporal relevante en la incubación de *L. olivacea*. En el presente estudio, aunque se registraron diferencias térmicas entre los meses de agosto, octubre y diciembre, ninguno de los nidos ubicados en playa natural logró eclosionar, independientemente del periodo de incubación. Este resultado sugiere que las variaciones estacionales no fueron suficientes para amortiguar las condiciones térmicas desfavorables de la playa, lo que indica una exposición sostenida a temperaturas potencialmente letales durante todo el periodo de desarrollo embrionario. Estudios previos han señalado que temperaturas elevadas y prolongadas pueden generar estrés térmico crónico, alterar el metabolismo embrionario y aumentar significativamente la mortalidad antes de la eclosión (Romano, 2007; Ariano-Sánchez et al., 2022). La ausencia total de eclosión en los nidos incubados in situ sugiere que, bajo las condiciones térmicas actuales, la incubación natural en la playa podría ser inviable sin algún tipo de manejo.

En cambio, los nidos incubados en el tortugario mantuvieron altas tasas de eclosión a lo largo de los distintos meses, lo que sugiere que el manejo ex situ permitió amortiguar los efectos de la estacionalidad mediante una mayor estabilidad térmica. También asociado a prácticas de manejo como la sombra, el riego constante y la protección física de los nidos, lo que favorece condiciones más compatibles con el desarrollo embrionario exitoso y la salida de neonatos (Tomillo et al., 2020). Estos resultados refuerzan la idea de que, bajo las condiciones climáticas actuales del litoral Pacífico de Guatemala, la incubación natural podría verse severamente comprometida sin medidas de manejo, especialmente durante temporadas cálidas asociadas al cambio climático (Ariano-Sánchez et al., 2023).

Hay que tener en cuenta a su vez que en playas de arena volcánica negra como las del Pacífico guatemalteco, la incubación natural puede verse severamente limitada bajo las condiciones climáticas actuales. El bajo albedo de este tipo de sustrato favorece una mayor absorción de radiación solar, elevando la temperatura de la arena y generando microambientes térmicos potencialmente letales para los embriones (Ariano-Sánchez et al., 2022; Tomillo et al., 2020). En este contexto, los tortugarios adquieren un papel importante,

ya que permiten mitigar los efectos de la radiación directa mediante sombra y manejo activo, reduciendo la exposición a picos térmicos extremos. Además, el incremento sostenido de la temperatura de la arena, asociado al cambio climático, no solo compromete el éxito de eclosión, sino que también puede alterar las proporciones sexuales al favorecer la producción de hembras, con posibles consecuencias a largo plazo para la viabilidad poblacional de la especie (Valverde et al., 2010; Abreu-Grobois & Plotkin, 2008).

El uso de modelos aditivos generalizados (GAM) en este estudio permitió evaluar de forma integrada la influencia de la temperatura de la arena y la ubicación del nido sobre el éxito de eclosión de *L. olivacea*. El modelo al incluir ambas variables presentó el mejor ajuste e indicó que el éxito reproductivo no depende únicamente de la temperatura, sino también del contexto físico y de manejo asociado a la ubicación del nido. Por lo que, la ubicación dentro del tortugario no solo se relaciona con un régimen térmico más favorable, sino también con condiciones adicionales como mayor sombra, retención de humedad, protección frente a depredadores y un manejo activo de los nidos. Estos factores pueden reducir el estrés embrionario y aumentar la probabilidad de eclosión (Kutzari, 2006; Tomillo et al., 2020). Los resultados respaldan la hipótesis principal del estudio, al demostrar que los tortugarios proporcionan condiciones ambientales más adecuadas para la incubación que las playas naturales, especialmente en escenarios donde las temperaturas de la arena alcanzan valores críticos.

A pesar de las claras ventajas de los tortugarios en comparación con las playas naturales, donde las condiciones térmicas son más variables y extremas, el estudio Morales-Mérida et al. (2023), sugiere que la mejor opción es permitir que los nidos permanezcan en las playas naturales. Este enfoque se basa en que las intervenciones ex situ pueden alterar los patrones naturales de anidación y afectar a la población. Sin embargo, no aborda los desafíos específicos que enfrentan las playas naturales en Guatemala, las cuales ya no brindan las condiciones térmicas adecuadas debido al albedo de las arenas y las temperaturas extremas relacionadas al cambio climático (Ellgutter et al., 2025). Aunque la reducción de la intervención humana es válida, este enfoque no asegura altos porcentajes de eclosión o la supervivencia de las crías en las condiciones actuales de las playas naturales.

Además del éxito de eclosión, la temperatura de la arena influye directamente en la determinación sexual dependiente de la temperatura (TSD) en las tortugas marinas. En *L. olivacea*, temperaturas altas durante la incubación pueden sesgar la producción de crías hacia hembras y temperaturas extremas por encima de los 35 °C incluso resultan letales para los embriones (Valverde et al., 2010). En este estudio, los nidos incubados en playa natural alcanzaron temperaturas superiores a los 32–35 °C, lo que sugiere que, de haber ocurrido eclosión, habría existido un sesgo fuertemente femenino en las crías. Además, se debe tomar en cuenta la fidelidad al sitio de anidación, que es otro factor clave en la ecología reproductiva de las tortugas marinas, ya que las hembras tienden a regresar a las playas donde nacieron para depositar sus huevos. No obstante, la exposición recurrente a condiciones térmicas

extremas puede reducir la calidad de estos sitios y afectar su uso a largo plazo (Barbanti et al., 2022). Ambos escenarios representan riesgos adicionales para la viabilidad poblacional de la especie, ya que una proporción de sexos desequilibrada o el abandono de playas de anidación pueden comprometer el éxito reproductivo a largo plazo, especialmente en playas del Pacífico guatemalteco expuestas a temperaturas cada vez más altas debido al cambio climático.

Esto resalta la importancia de estrategias de manejo como los tortugarios, que permiten amortiguar las condiciones térmicas locales con condiciones más estables y contribuir a la conservación de playas para la reproducción de la especie. Como se evidenció en este estudio, los nidos incubados en el tortugario Manuelita alcanzaron porcentajes de eclosión elevados ($93.2\% \pm 6.7\%$), mientras que en la playa natural no se registró eclosión, lo que sugiere que, bajo las condiciones térmicas actuales, el manejo ex situ puede ser una herramienta necesaria para asegurar el éxito reproductivo de *L. olivacea* en playas guatemaltecas. Además, la efectividad de los tortugarios está en la combinación de prácticas de manejo que favorecen la estabilidad térmica y reducen el estrés embrionario, más que en la simple reubicación de los nidos (Kutzari, 2006). En el presente estudio la estandarización de la carga de huevos por nido permitió aislar el efecto de la temperatura y la ubicación. Sin embargo, se recomienda que futuros estudios evalúen, a lo largo de varios años, cómo la carga de huevos por nido interactúa con las condiciones térmicas para optimizar las prácticas de manejo en tortugarios.

Estudios previos han señalado que la densidad y el tamaño de los nidos influyen en la viabilidad de los huevos de *Lepidochelys olivacea*, al afectar procesos como la circulación de oxígeno, la retención de humedad y la disipación del calor en el sustrato (Abreu-Grobois & Plotkin, 2008). Sin embargo, los resultados de este estudio sugieren que, en playas del Pacífico guatemalteco, estos factores pueden verse superados por condiciones térmicas extremas. Esto debido a que todos los nidos incubados en playa natural no sobrevivieron, independientemente de que la carga de huevos se mantuviera constante, lo que indica que la capacidad de disipación térmica del sustrato posiblemente fue insuficiente para evitar temperaturas letales. Aunque investigaciones realizadas en Costa Rica reportan porcentajes de eclosión superiores al 80 % en corrales de incubación con manejo adecuado (James & Melero, 2015), la extrapolación directa de estos resultados a Guatemala debe realizarse cuidadosamente, debido a diferencias en el tipo de arena, el albedo del sustrato y los regímenes térmicos locales. En este contexto, la evidencia obtenida refuerza la necesidad de adaptar las estrategias de manejo a las condiciones específicas de las playas guatemaltecas, donde la incubación natural parece no ser viable sin intervención activa.

Al analizar los nidos ubicados en la playa natural que no lograron eclosionar, se observó una variabilidad significativa en las etapas de desarrollo de los embriones (Figura 11). Una proporción considerable de los huevos correspondió a embriones sin desarrollo visible (55 %), mientras que un 27 % alcanzó etapas avanzadas antes de interrumpir su

desarrollo. Este patrón sugiere que las condiciones térmicas extremas y altamente variables registradas en la playa natural pudieron afectar de diferente manera a los embriones, interrumpiendo el desarrollo en distintas fases. En especial, el elevado número de huevos sin desarrollo observable, que fue de 111 huevos, podría estar asociado no solo a la exposición térmica durante la incubación, sino también a factores previos a la puesta. Como estrés fisiológico en las hembras, intervalos cortos entre eventos reproductivos o una menor calidad del esperma de los machos, aspectos que han sido documentados como influyentes en la fertilidad de los huevos de tortugas marinas (Romano, 2007). Aunque el diseño de este estudio no permitió evaluar directamente aspectos genéticos, reproductivos o endocrinos de los individuos adultos, se recomienda estudiar esta interacción entre condiciones ambientales adversas y posibles limitaciones reproductivas de la población.

Además, en un escenario ideal, se esperaría que los embriones presentaran un desarrollo relativamente parecido al finalizar el período de incubación, que en *L. olivacea* es cercano a los 60 días. Sin embargo, los registros térmicos de este estudio muestran que los nidos en playa natural estuvieron expuestos a una alta variabilidad térmica diaria, con fluctuaciones marcadas y picos de temperatura que superaron los 32 °C. Esto pudo generar episodios de estrés térmico agudo durante las horas más cálidas del día, así como estrés térmico crónico cuando las temperaturas elevadas se mantienen de forma constante a lo largo del periodo de incubación. Ambos escenarios pueden alterar las tasas metabólicas embrionarias, provocar deshidratación del contenido del huevo y afectar procesos clave del desarrollo, lo que se refleja en la coexistencia de embriones detenidos en etapas tempranas y otros que alcanzaron fases avanzadas antes de morir (Romano, 2007; Ariano-Sánchez et al., 2023). Además, futuros estudios podrían profundizar en el estrés térmico crónico y agudo mediante el análisis detallado de las temperaturas específicas a las que estuvieron expuestos los nidos y su relación directa con los distintos estadios de desarrollo embrionario, con el fin de comprender mejor la relación con la mortalidad observada en playas naturales.

Por otro lado, al analizar las malformaciones embrionarias de los embriones que no lograron eclosionar se observa una relación entre el desarrollo morfológico anómalo y las condiciones térmicas extremas registradas en la playa natural (Figuras 16-28). Diversos estudios han documentado que temperaturas elevadas durante la incubación pueden interferir con el desarrollo normal en tortugas marinas, generando alteraciones en el caparazón, plastrón y extremidades, así como malformaciones internas (Romano, 2007; Ariano-Sánchez et al., 2022). En este estudio, la presencia de atrofia leve en 34 embriones y moderadas en 18 embriones en estructuras externas coincide con estos patrones previamente descritos para embriones expuestos a temperaturas cercanas o superiores a los umbrales de tolerancia. Algunas malformaciones graves como órganos aparentemente fuera del plastrón representan un hallazgo poco común y no ha sido ampliamente documentado en otras especies de tortugas marinas bajo condiciones naturales. No obstante, dado el estado avanzado de fragilidad de algunos embriones y la necesidad de manipularlos para su análisis, no puede descartarse que esta condición haya sido provocada por el proceso de apertura del huevo. Aun así, la alta

cantidad de anomalías morfológicas observadas refuerza la hipótesis de que la exposición a temperaturas extremas y la falta de manejo en playas naturales puede comprometer seriamente el desarrollo embrionario y reducir la viabilidad de las crías.

Otro factor para tomar en cuenta fue la presencia de restos de vitelio en la mayoría de los embriones no eclosionados. Esto refuerza la idea de que el proceso de desarrollo fue interrumpido antes de completarse. Ya que, bajo condiciones normales, estas reservas energéticas deberían ser absorbidas progresivamente a lo largo de la incubación y consumidas casi en su totalidad previo a la eclosión (Muccio, 2015). La retención de vitelo observada en este estudio podría estar relacionada con una desaceleración o detención del metabolismo embrionario, posiblemente asociada al estrés térmico generado por las altas temperaturas y la variabilidad térmica registrada en la playa natural.

En este contexto, donde el estrés térmico es parte de otras amenazas que enfrentan las tortugas marinas en Guatemala, los resultados de este estudio aportan evidencia científica que respalda el papel de los tortugarios como una estrategia de manejo relevante. La ausencia total de eclosión en los nidos incubados en playa natural, en comparación con los altos porcentajes de eclosión registrados en el tortugario, sugiere que bajo las condiciones térmicas actuales la incubación in situ puede ser inviable sin algún tipo de intervención. Por lo que, a nivel nacional, los tortugarios han sido promovidos como parte de la Estrategia Nacional de Conservación de Tortugas Marinas, la cual establece que el 20 % de los huevos recolectados por parlameros deben destinarse a proyectos comunitarios de conservación. En el presente estudio, el monitoreo térmico continuo permitió documentar cómo estas condiciones ex situ amortiguan los picos térmicos extremos, además de reducir amenazas como la depredación y el saqueo ilegal de huevos (Ellgutter et al., 2025).

No obstante, a pesar de su efectividad en la protección de los nidos, los tortugarios aún enfrentan limitaciones importantes, entre ellas la falta de financiamiento sostenido, el escaso apoyo institucional y la ausencia de criterios estandarizados en su manejo (Muccio, 2015). Esta falta de estandarización puede incluir aspectos clave como la profundidad de los nidos, el número de huevos por nido, el uso y tipo de sombra, la frecuencia de riego y el monitoreo sistemático de la temperatura de la arena. Y según los resultados de este estudio donde los nidos manejados en tortugario mostraron condiciones térmicas más estables y altas tasas de eclosión. Es necesario que los tortugarios no solo existan, sino que logren adaptarse activamente a escenarios de cambio climático. Fortalecer su gestión técnica, asegurar recursos financieros adecuados y promover lineamientos de manejo basados en evidencia científica para mantener su efectividad como herramienta de conservación a largo plazo.

Sin embargo, es importante reconocer tanto las limitaciones generales asociadas al manejo de los tortugarios como las propias del diseño del presente estudio. Una de las principales limitantes fueron los pocos datos de variabilidad térmica extrema observada en la playa natural, donde todos los nidos presentaron 0 % de eclosión, lo que restringió la capacidad del modelo aditivo generalizado (GAM) para describir adecuadamente el extremo

superior de la relación entre temperatura y éxito de eclosión. Que el modelo GAM seleccionado haya sido el mejor modelo implica que explicó de manera más consistente la variación observada en los datos disponibles. Sin embargo, su interpretación debe ser cuidadosa ya que la escasa variación en los valores altos de temperatura limita la extrapolación de los resultados. La importancia de la ubicación y la temperatura como variables explicativas refleja las diferencias térmicas marcadas entre playa natural y tortugario, así como su influencia directa sobre el desarrollo embrionario.

Adicionalmente, solo se evaluó un sitio y una temporada reproductiva, sin considerar variaciones interanuales ni otros factores ambientales como humedad o compactación de la arena. Además de factores genéticos o reproductivos de los adultos. Por ello, entre las mejoras que pueden implementarse en futuros estudios se sugiere ampliar la muestra de nidos para evitar la limitación con el modelo GAM, incluir varias temporadas de anidación y agregar sensores de humedad o datos meteorológicos, con el fin de obtener una visión más integral del proceso de incubación. Ya que aún con estas limitaciones, este estudio contribuye a una mejor comprensión de la biología reproductiva de *L. olivacea* en Guatemala, ofreciendo lineamientos prácticos para mejorar la gestión de los tortugarios y proponiendo criterios que pueden ser útiles para el análisis y conservación de otras especies de tortugas marinas en el litoral Pacífico del país.

IX. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió comparar los perfiles térmicos y el porcentaje de eclosión de nidos artificiales de *Lepidochelys olivacea* incubados en condiciones de tortugario y playa natural en la Barra el Jiote, Moyuta, Jutiapa. En relación con el éxito de eclosión, los nidos incubados dentro del tortugario Manuelita alcanzaron un porcentaje promedio de eclosión de $93.2 \% \pm 6.7 \%$, mientras que los nidos artificiales incubados en playa natural presentaron un 0% de eclosión en todos los casos, lo que indica que, bajo las condiciones actuales, la incubación en playa natural resultó inviable sin manejo activo.

Respecto a los perfiles térmicos, los nidos ubicados en el tortugario mostraron temperaturas promedio más estables ($28.3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2.48 \text{ }^\circ\text{C}$), en comparación con los nidos en playa natural, donde la temperatura promedio fue más alta y con fluctuaciones diarias ($32.0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3.47 \text{ }^\circ\text{C}$), donde se registraron picos extremos de hasta $51.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Estas condiciones térmicas extremas en la playa natural se asocian con un alto estrés térmico y explican la ausencia total de eclosión observada en este sitio.

El análisis de los estadios de desarrollo embrionario en los huevos no eclosionados de la playa natural mostró una amplia variabilidad en el desarrollo, con 55% de embriones sin desarrollo visible, 4% en estadios tempranos, 14% en estadios intermedios y 27% en estadios avanzados, lo que sugiere interrupciones del desarrollo embrionario en distintas fases del proceso de incubación. Asimismo, se identificaron alteraciones morfológicas relevantes, registrándose 34 embriones con malformaciones leves y 18 con malformaciones moderadas del caparazón, plastrón o aletas, lo cual refuerza la relación entre las condiciones térmicas extremas y la mortalidad embrionaria.

Se destaca la importancia de los tortugarios como estrategia de manejo para incrementar el éxito de eclosión de *L. olivacea* en playas de arena volcánica del Pacífico guatemalteco. No obstante, el estudio presenta limitaciones, como la ausencia de variabilidad en el éxito de eclosión en playa natural (0% en todos los nidos), lo que restringe la capacidad de evaluar respuestas térmicas intermedias. Aun así, la información generada aporta evidencia científica valiosa para orientar estrategias de conservación, fortalecer programas comunitarios y apoyar la toma de decisiones en el manejo reproductivo de la especie en Guatemala.

X. RECOMENDACIONES

Fortalecer y mantener los tortugarios comunitarios como una estrategia clave para la conservación de *Lepidochelys olivacea* en Guatemala, a través del mejoramiento de su infraestructura. Esto incluye la implementación y mantenimiento de sistemas de sombra, cercas de protección, señalización, áreas adecuadas de incubación y equipos de monitoreo, con el fin de asegurar condiciones térmicas más estables y reducir la exposición de los nidos a amenazas ambientales y antrópicas.

Promover un manejo adaptativo de los tortugarios, basado en el monitoreo continuo de la temperatura de la arena y del éxito de eclosión. El uso sistemático de estos datos permitirá realizar ajustes en la ubicación de los nidos, la profundidad de siembra, la densidad de huevos y las estructuras de sombra, especialmente bajo escenarios de cambio climático y aumento de la temperatura ambiental. Con relación a esto, es importante reevaluar de manera crítica la incubación de nidos en playas naturales abiertas, considerando los riesgos asociados a la alta variabilidad térmica y a las temperaturas extremas registradas.

Involucrar activamente a las comunidades locales en los programas de conservación, fortaleciendo su rol en la protección, monitoreo y gestión de los tortugarios. La participación comunitaria, acompañada de capacitación técnica y educación ambiental, contribuye a reducir la recolección ilegal de huevos, fomenta el sentido de apropiación del recurso y aumenta la sostenibilidad a largo plazo de las iniciativas de conservación.

Desarrollar e implementar estrategias de adaptación al cambio climático, tales como proyectos de reforestación con manglares u otra vegetación costera en playas adyacentes a los sitios de anidación, con el objetivo de generar sombra natural, disminuir la temperatura de la arena y mejorar la viabilidad de los nidos en condiciones naturales cuando sea apropiado.

Finalmente, se recomienda asegurar recursos financieros y apoyo institucional para los proyectos de conservación de tortugas marinas, con el fin de fortalecer la gestión técnica de los tortugarios, garantizar la continuidad del monitoreo y facilitar la toma de decisiones basada en evidencia científica.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abreu-Grobois, A & Plotkin, P. (2008). *Lepidochelys olivacea*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2008. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T11534A3292503.en>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoachg.2023.100074>
- 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*. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3990>
- Barbanti, A., Blumenthal, J. M., Broderick, A. C., Godley, B. J., Prat-Varela, A., Turmo, M., Pascual, M., & Carreras, C. (2022). The architecture of assisted colonisation in sea turtles: building new populations in a biodiversity crisis. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29232-5>
- Ellgutter, J. a. C., Bik, I. M., Renssen, H., Rosell, F., Hawkes, L. A., & Reinhardt, S. (2025). Temperature conditions in artificial sea turtle nests: Toward Optimized hatchery management. *Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1002/ece3.71750>
- García Cerdá, R. M. (2008). Desarrollo embrionario de *Caretta caretta*: análisis descriptivo de su evolución morfológica - Tesis doctoral. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. <https://acedacris.ulpgc.es/handle/10553/1873>
- Gatto, C. R., Williamson, S. A., & Reina, R. D. (2022). Mitigating the effects of climate change on the nests of sea turtles with artificial irrigation. *Conservation Biology*. <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cobi.14044>
- Hartig, F. (2021). DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multilevel/Mixed) Regression Models. *R package version 0.3.3*. <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMa/DHARMa.pdf>
- ICC. (2025). Resumen meteorológico del sur de Guatemala 2024. *Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático*. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/248.pdf>
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

- James, R., & Melero, D. (2015). Anidación y conservación de la tortuga lora (*Lepidochelys olivacea*) en playa Drake, península de Osa, Costa Rica (2006 a 2012). *Revista de Biología Tropical*. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v63i1.23099>
- Kutzari Asociación Civil. (2006). Manual de técnicas para el establecimiento y manejo de corrales de incubación para tortugas marinas. *WIDECAS*. https://www.widecast.org/Resources/Docs/Kutzari_AC_2006_Manual_Tecnicas_de_Corrales_de_Tortugas_Marinas.pdf
- Lüdecke, D. (2018). ggeffects: Tidy Data Frames of Marginal Effects from Regression Models. *R package version 0.3.2*. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggeffects/ggeffects.pdf>
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., & Waggoner, P. (2021). performance: Assessment of Regression Models Performance. *R package version 0.8.1*. <https://cran.r-project.org/web/packages/performance/performance.pdf>
- Morales-Mérida, B. A., Morales-Cabrera, A., Chúa, C., & Girondot, M. (2023). Olive Ridley sea turtle incubation in natural conditions is possible on Guatemalan beaches. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151914196>
- Muccio, C. (2015). Guía para la conservación de las tortugas marinas en Guatemala, con énfasis en el manejo de tortugarios. *ARCAS*. <https://www.arcasguatemala.org/wp-content/uploads/Arcas-Guia-conservacion-2015.pdf>
- Muccio, C. (2022). Análisis Situacional de la Conservación de la Tortuga Marina en Guatemala. *ARCAS*. <https://arcasguatemala.org/wp-content/uploads/Analisis-Situacional10-2022.pdf>
- Ortega, A. (2024). 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. *Universidad del Valle de Guatemala*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/5048>
- Romano, M. (2007). Relación de la temperatura de incubación en la muerte embrionaria de la tortuga marina laúd (*Dermochelys coriacea*) en el playón de Mexiquillo, Michoacán. *UNAM*. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/8429a087-69fe-46b8-b08d-2f529af46251/content>
- Simpson, D. (2021). gratia: GRAPHS and Tables for Generalized Additive Models. *R package version 0.4.1*. <https://cran.r-project.org/web/packages/gratia/gratia.pdf>
- Tomillo, P. S., 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*. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02658-w>

- USAID (2019). Guía para el diagnóstico de tortugarios – Proyecto de biodiversidad de USAID Guatemala. CONAP. <https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2021/09/40.-Diagnostico-de-tortugarios-del-Pacifico-de-Guatemala.pdf>
- Valverde, R., Wingard, S., Gómez, F., Tordoir, M & Orrego, C. (2010). Field lethal incubation temperature of olive ridley sea turtle *Lepidochelys olivacea* embryos at a mass nesting rookery. *ENDANGERED SPECIES RESEARCH*. <https://doi.org/10.3354/esr00296>
- USAID (2020). Plan de Manejo sobre la excepción para la cosecha de subsistencia de huevos de *Lepidochelys olivacea*. CONAP. <https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2021/09/33.-Programa-Monitoreo-Tortuga-Parlama.pdf>
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. *Springer*. <https://ggplot2.tidyverse.org/>
- Wiggins, J., Baum, D., Broderick, A. C., Capel, T., Colman, L. P., Hunt, T., Simmons, D. L., McGurk, J., Mortlock, L., Nightingale, R., Weber, N., & Weber, S. B. (2023). Efficacy of artificial nest shading as a climate change adaptation measure for marine turtles at Ascension Island. *Wildlife Society Bulletin*. <https://doi.org/10.1002/wsb.1497>
- Wood, S. N. (2017). Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd ed.). *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>

XII. APÉNDICE

Comité de Ética, Uso y Cuidado animal de la Universidad del Valle de Guatemala



CEUCA - UVG

Investigadores Principales: Karen Fernanda Ventura Pérez (Tesisista) y Dr. Daniel Ariano (Asesor)
Edificio y oficina: Departamento de Biología
E-Mail: ven19715@uvg.edu.gt / dariano@uvg.edu.gt
Teléfono: 35754802

Guatemala, 11 de agosto 2025.

Estimados investigadores,

Por este medio se hace constar que la propuesta del proyecto titulado: **“Comparación del porcentaje de eclosión y los perfiles térmicos de nidos artificiales de la Tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en La Barra El Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala”**, ha sido recibida al Comité de Ética para el Uso y Cuidado Animal de la Universidad del Valle de Guatemala (CEUCA – UVG).

Se ha determinado que el proyecto de investigación **queda exento** de revisión por parte del CEUCA – UVG debido a que el estudio se realizará con huevos no eclosionados y no habrá interacción directa con los animales para obtenerlos. Para llevar a cabo el estudio se determinó que no se realizará manipulación ni se tendrá contacto con animales vivos.

Se solicita que, si hubiese necesidad de hacer modificaciones en el protocolo que involucren el manejo, sujeción, transporte, manipulación, muestreo y/o enjaulamiento de animales vivos, se comunique de nuevo con el comité para que dichas enmiendas sean evaluadas de manera que se pueda garantizar que se cumple a cabalidad con los lineamientos del CEUCA-UVG y de la ley de Bienestar Animal del país. También se pide que al finalizar el estudio envíe al comité vía correo electrónico, copia de los resultados del estudio para adjuntar a su expediente.

Sin otro particular quedo a sus órdenes,



MV Vanessa Granados B
Médico Veterinario
Colegiado 997
CEUCA – UVG (Comité de Ética, Uso y Cuidado Animal, Universidad del Valle de Guatemala).

Apéndice 1. Carta de exención de comité de ética, uso y cuidado animal de la Universidad Del Valle de Guatemala.



Guatemala, 21 de octubre de 2025

M. Sc. Gabriela Alfaro
Directora del Departamento de Biología
Presente

Estimada Lic. Alfaro:

A requerimiento de la estudiante **Karen Fernanda Ventura Pérez**, carne **19715**, he aceptado asesorar el trabajo de graduación titulado: **“Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la Tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en La Barra El Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala”**, para la obtención del grado de licenciada en biología, comprometiéndose a revisar todo el material del mismo, señalándole las correcciones pertinentes.

De antemano agradezco su atención.

Atentamente,

Dr. Daniel Ariano Sánchez
Director a.i.
Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad

Apéndice 2. Carta de aceptación de asesor a trabajo de graduación.

Guatemala, 23 de octubre de 2025

Lic. Gabriela Alfaro
Directora del Departamento de Biología
Presente

Estimada Lic. Alfaro:

Atentamente me permito adjuntar para su aprobación el protocolo titulado: “Comparación de perfiles térmicos de nidos artificiales y porcentaje de eclosión de huevos de la Tortuga Parlama (*Lepidochelys olivacea*) entre condiciones de tortugario y playa natural en La Barra El Jiote, Moyuta, Jutiapa, Guatemala.”, el cual es requisito previo para la obtención del grado de Licenciada en Biología.

Asimismo, propongo como asesor al Dr. Daniel Ariano Sánchez para el acompañamiento y guía durante la realización de esta investigación.

De antemano agradezco su atención.

Atentamente,



Karen Fernanda Ventura Pérez, Carné 19715

Apéndice 3. Carta solicitando aprobación de protocolo de trabajo de graduación.

Guatemala, 17 de noviembre de 2025

Dra. Pamela Pennington
Decana, Facultad de Ciencias y Humanidades
Universidad del Valle de Guatemala
Presente

Estimada Dra. Pennington:

Por este medio me permito informar que el Tortugario "Manuelita", ubicado en Barra del Jiote, Jutiapa, está debidamente supervisado por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) y opera conforme al marco legal vigente para el manejo de vida silvestre en Guatemala. En particular, sus actividades se desarrollan bajo las facultades establecidas en la Ley de Áreas Protegidas (Decreto 4-89) y su Reglamento (Acuerdo Gubernativo 759-90), instrumentos que confieren a CONAP la autoridad para autorizar, supervisar y regular centros de manejo como los tortugarios.

Asimismo, es importante destacar que la adquisición regulada de huevos de tortuga marina por tortugarios autorizados es legal, siempre y cuando se realice conforme a las resoluciones administrativas que CONAP emite cada temporada de anidación, en las cuales se definen los lineamientos técnicos y administrativos de la colecta, el transporte y el porcentaje obligatorio destinado a conservación.

De forma especial, deseo enfatizar que el tortugario opera alineado con la Estrategia Nacional de Conservación y Manejo de Tortugas Marinas en Guatemala, instrumento rector oficialmente adoptado por CONAP. Esta estrategia establece los principios técnicos y operativos para la protección de nidadas, la administración del sistema nacional de tortugarios, y los mecanismos autorizados para el manejo de huevos y liberación de crías. Su cumplimiento es parte integral de la gestión legal y responsable de los tortugarios registrados, y todo el proceso de compra de huevos para la tesis de la estudiante Karen Ventura, siguió la normativa vigente.

Con base en este marco jurídico y estratégico, se confirma que el Tortugario Manuelita opera conforme a derecho y dentro de los lineamientos técnicos vigentes para la conservación de tortugas marinas en el país.

Agradezco su atención y quedo a disposición para cualquier aclaración adicional.

Atentamente,



Antje Begemann
Directora Tortugario Manuelita



Apéndice 4. Carta de confirmación de cumplimiento del marco legal y estratégico del tortugario Manuelita para la conservación de tortugas marinas.



Apéndice 5. Recolección de huevos y registrador de temperatura en playa natural.



Apéndice 6. Infraestructura y organización del tortugario Manuelita con el apoyo de Pedro Yanes.



Apéndice 7. Huevos no eclosionados analizados en laboratorio.

XIII. GLOSARIO

Atrofia: disminución en el tamaño o desarrollo de una parte del cuerpo, como las estructuras embrionarias del caparazón, las aletas o el plastrón. Puede ser leve, moderada o alta.

Caparazón: estructura externa dura que cubre el cuerpo de las tortugas y las protege de depredadores y otros peligros.

Depredación: acto de consumo de los huevos o las crías de tortuga por parte de animales como aves, mamíferos u otros depredadores. Es una de las principales amenazas en las playas de anidación.

Desviación estándar: medida estadística que describe la cantidad de variación o dispersión de un conjunto de datos. Indica cuán dispersos están los valores de las mediciones con respecto a la media.

El Niño: fenómeno climático que se caracteriza por un mayor calentamiento de las aguas del océano Pacífico, lo que provoca un aumento de las temperaturas globales, afectando las condiciones de los ecosistemas marinos y costeros.

Estrés térmico: condición que ocurre cuando los embriones u organismos experimentan temperaturas fuera de su rango óptimo, lo que puede interferir en su desarrollo y aumentar la mortalidad.

Exhumación: proceso de desenterrar los nidos de tortuga luego de aproximadamente 3 a 4 días después de la eclosión, para limpiar el tortugario de restos de huevos y demás materiales, asegurando así un ambiente adecuado para las nuevas incubaciones.

Malformación embrionaria: anomalías o deformidades en los embriones durante su desarrollo, que pueden ser causadas por condiciones ambientales desfavorables, como fluctuaciones térmicas o temperaturas excesivas.

Plastrón: parte ventral o inferior del caparazón de las tortugas, que cubre el abdomen y proporciona soporte estructural.

Porcentaje de eclosión: proporción de huevos que logran eclosionar con éxito en relación con el número total de huevos puestos, expresado como un porcentaje.

Ronda de siembra: período en el que se siembran los nidos artificiales, generalmente dividido por mes durante la temporada de anidación.

Temperatura pivotal: temperatura crítica a la cual se determina el sexo de las crías de tortuga.

Tortugario: instalación controlada donde se incuban los huevos de tortuga marina en condiciones protegidas, para asegurar su supervivencia y evitar depredadores o condiciones climáticas adversas.

Umbral crítico: temperatura específica más allá de la cual el desarrollo de los embriones de tortuga se ve comprometido.

Vitelo: sustancia nutritiva contenida en el huevo de las tortugas, que proporciona energía para el desarrollo del embrión hasta que es absorbido durante la incubación.

GAM (*Generalized Additive Model*): modelo estadístico que permite analizar relaciones no lineales entre variables predictoras y una variable de respuesta.

Índices de ajuste: medidas estadísticas utilizadas para evaluar la calidad de un modelo de regresión que indican qué tan bien el modelo se ajusta a los datos observados.