

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
CARRERA DE BIOLOGÍA



**“DIFERENCIA EN LA MORFOLOGÍA GEOMÉTRICA DEL
PLASTRÓN DE LAS ESPECIES DE *Chelonoidis* EN EL CENTRO
DE CRianza FAUSTO LLERENA.”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previa a la obtención del título de:

BIÓLOGO

AUTOR:

López Navarro Alan Jeanpeer

TUTOR:

Blgo. Xavier Piguave Preciado M.Sc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
CARRERA DE BIOLOGÍA

“DIFERENCIA EN LA MORFOLOGÍA GEOMÉTRICA DEL PLASTRÓN DE LAS
ESPECIES DE *Chelonoidis* EN EL CENTRO DE CRIANZA FAUSTO LLERENA.”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previa a la obtención del título de:

BIÓLOGO

AUTOR:

López Navarro Alan Jeanpeer

TUTOR:

Blgo. Xavier Piguave Preciado M.Sc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

DECLARACIÓN DEL DOCENTE TUTOR

En mi calidad de Docente Tutor del Trabajo de Integración Curricular "**Diferencia en la Morfología Geométrica del plastrón de las especies de *Chelonoidis* en el Centro de Crianza Fausto Llerena.**" elaborado por **Alan Jeanpeer López Navarro** estudiante de la Carrera de Biología, Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Biólogo, me permito declarar que luego de haber dirigido su desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por la cual, apruebo en todas sus partes, encontrándose apto para la evaluación del docente especialista

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, reading "Xavier Piguave Preciado", is written over a horizontal line.

Blgo. Xavier Piguave Preciado M.Sc.
DOCENTE TUTOR
C.I. 0913435046

DECLARACIÓN DEL DOCENTE DE ÁREA

En mi calidad de Docente Especialista, del Trabajo de Integración Curricular **"Diferencia en la Morfología Geométrica del plastrón de las especies de *Chelonoidis* en el Centro de Crianza Fausto Llerena."** elaborado por **Alan Jeanpeer López Navarro** estudiante de la Carrera de Biología, Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Biólogo, me permito declarar que luego de haber evaluado el desarrollo y estructura final del trabajo, éste cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por la cual, declaro que se encuentra apto para su sustentación.

Atentamente



Acui. Sonny Mendoza Lombana, PhD,
DOCENTE DE ÁREA
C.I. 0912802816

DEDICATORIA

A mis padres, por forjar al hombre que soy hoy en día y por siempre incentivarme a nunca rendirme, pero en especial por su apoyo incondicional en cada etapa de este camino. A todas las personas que fueron parte de este proceso, ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fuerza para seguir adelante y por ser mi guía en este camino.

Agradezco a la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) por brindarme la formación académica.

Al Biólogo Xavier Piguave, tutor de esta tesis, por su guía constante, su paciencia y su apoyo a lo largo de este proceso.

A todo el personal que conforma Galápagos Conservancy, por su apoyo y compromiso con la conservación de las especies endémicas del archipiélago, y por facilitar el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al personal del Parque Nacional Galápagos, por su disposición y colaboración durante las jornadas de trabajo de campo, y por el cuidado que brindan a las tortugas que hicieron posible este estudio.

A mi familia, por su respaldo incondicional en cada etapa de mi formación profesional.

TRIBUNAL DE GRADO

Trabajo de Integración Curricular presentado por **ALAN JEANPEER LÓPEZ NAVARRO**, como requisito parcial para la obtención del grado de Biólogo/a de la Carrera de Biología, de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Trabajo de Integración Curricular **APROBADO** el: 12/08/2026

Ing. Jimmy Villón Moreno, MSc.
DIRECTOR/A DE CARRERA
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Acui. Sonnya Mendoza Lombana, PhD.
DOCENTE DE ÁREA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Blgo. Xavier Piguave Preciado MSc.
DOCENTE TUTOR
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

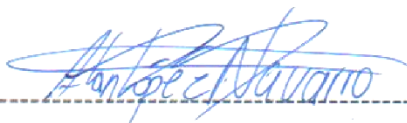
Blgo. Richard Duque Marín, Mgtr.
DOCENTE GUÍA DE LA UIC II
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Lcdo. Pascual Roca-Silvestre, Mgtr.
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los datos, ideas, investigaciones y resultados expuestos en el Trabajo de Integración Curricular denominado: **“Diferencia en la Morfología Geométrica del plastrón de las especies de *Chelonoidis* en el Centro de Crianza Fausto Llerena.”** me corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma está compartido con la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Atentamente



Alan Jeanpeer López Navarro

CI: 2000111282

INDICE GENERAL

ABREVIATURAS.....	13
RESUMEN	14
SUMMARY	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. PROBLEMÁTICA.....	18
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. OBJETIVOS.....	22
4.1. OBJETIVO GENERAL:.....	22
4.2. OBJETOS ESPECÍFICOS:	22
5. HIPÓTESIS.....	23
6. MARCO TEORICO	24
6.1. MORFOLOGÍA GENERAL	24
6.1.1. Fundamentos Evolutivos del Género <i>Chelonoidis</i>	24
6.1.2. Diversificación y adaptación morfológica	25
6.1.3. Importancia ecológica	25
6.2. MORFOLOGÍA GEOMÉTRICA DEL PLASTRÓN.....	26
6.2.1. Anatomía y función del plastrón	26
6.2.2. Variación morfológica.....	28
6.2.3. Morfometría geométrica	30
6.2.4. Aplicaciones y relevancia de la morfometría geométrica en <i>Chelonoidis</i>	30
6.3. ESPECIES DEL GÉNERO <i>Chelonoidis</i>	32
6.3.1. Especies principales de estudio.....	32
6.3.2. Dinámica poblacional.....	34
6.3.3. Interacciones y variabilidad genética	34
6.3.4. Conservación y manejo	35
7. METODOLOGÍA	36
7.1. Área de estudio.....	36

7.2.	Diseño de estudio.....	37
7.3.	Enfoque y tipo de investigación.....	39
7.3.1.	Enfoque cuantitativo	39
7.3.2.	Investigación descriptiva.....	39
7.3.3.	Investigación comparativa	40
7.3.4.	Investigación de campo	40
7.4.	Selección de individuos y recolección de imágenes	41
7.4.1.	Determinación de especies, sexo y edad	42
7.5.	Población y muestra.....	43
7.5.1.	Población.....	43
7.5.2.	Muestra	43
7.5.3.	Tipo de muestreo	44
7.5.4.	Criterios de inclusión	44
7.6.	Instrumentos de recolección de datos	45
7.7.	Descripción técnica de los instrumentos.....	46
7.8.	Condiciones éticas	47
7.8.1.	Bienestar animal.....	48
7.8.2.	Consideraciones institucionales	48
7.8.3.	Conservación de los especímenes.....	49
7.8.4.	Bioseguridad	49
7.9.	Técnicas de análisis de datos	49
8.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	53
8.1.	Variación general de la forma del plastrón.....	53
8.1.1.	Superposición Procrustes generalizada (GPA).....	54
8.1.2.	Análisis de componentes principales (PCA)	55
8.2.	Diferenciación morfológica del plastrón	59
8.2.1.	Diferencias entre especies	59
8.2.2.	Dimorfismo sexual.....	62

8.3.	Variación ontogenética del Plastrón.....	65
8.3.1.	Relación forma-edad	65
9.	DISCUSIÓN	68
9.1.	Diferenciación morfológica entre especies	68
9.2.	Ausencia de dimorfismo sexual en individuos juveniles	71
9.3.	Influencia de la edad sobre la forma del plastrón	73
9.4.	Implicaciones para la conservación y el manejo	75
10.	CONCLUSIONES.....	77
11.	RECOMENDACIONES.....	78
	BIBLIOGRAFIA.....	80
	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Especie Chelonoidis vicina	32
Figura 2.	Especie Chelonoidis guntheri.....	33
Figura 3.	Ubicación geográfica del Centro de Crianza Fausto Llerena	36
Figura 4.	Diseño experimental de la investigación.....	38
Figura 5.	Configuración de Procrustes de los 17 landmarks del plastrón en los 240 individuos de Chelonoidis.....	55
Figura 6.	Scree plot del PCA.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7.	PCA de las especies.	57
Figura 8.	Vectores de cambio del PC1.	58
Figura 9.	CVA por especie.....	60
Figura 10.	Vectores de cambio por especie.....	61
Figura 11.	Distribución por sexo.....	62

Figura 12. Vectores por sexo.	64
Figura 13. Relación forma-edad.....	66
Figura 14. Vectores ontogenéticos.	66

ABREVIATURAS

GPA: Generalized Procrustes Analysis (Superposición Procrustes Generalizada)

PCA: Principal Component Analysis (Análisis de Componentes Principales)

CVA: Canonical Variate Analysis (Análisis de Variables Canónicas)

MANOVA: Multivariate Analysis of Variance (Análisis Multivariado de Varianza)

ANOVA: Analysis of Variance (Análisis de Varianza)

ANCOVA: Analysis of Covariance (Análisis de Covarianza)

R²: Coeficiente de determinación

PC: Principal Component (Componente Principal)

CV: Canonical Variate (Variable Canónica)

F: Estadístico F

p: Valor de significancia estadística

n: Tamaño de muestra

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

TSD: Temperature-Dependent Sex Determination (Determinación del sexo dependiente de la temperatura)

RESUMEN

Las tortugas gigantes del género *Chelonoidis*, nativas de las islas Galápagos, son un componente clave de la biodiversidad de Galápagos y también desempeñan un importante papel ecológico en la conservación de sus ecosistemas. Este estudio buscó cuantificar las diferencias presentes en la morfología del plastrón entre las especies de este género. Aquí utilizamos una metodología de morfometría geométrica, basada en digitalizar las coordenadas de puntos anatómicos de referencia seleccionados. En la Estación Biológica Fausto Llerena, situada en la Isla Santa Cruz, fue donde se obtuvieron los datos recopilados. Comprendiendo ejemplares juveniles de tres especies distintas entre los cero y cinco años, la muestra para el estudio de "nudging" (0–5 años) incluyó un total de 240 individuos; entre ellos, ciento veinte pertenecían a *Chelonoidis guntheri*, sesenta a *Chelonoidis niger* y también sesenta a *Chelonoidis vicina*. Imágenes digitales fueron adquiridas, específicamente de la cara ventral de estos especímenes. Para poder extraer las coordenadas de los tentáculos, se hizo uso del software TPSDig2 (que se dedica a la digitalización de puntos y contornos); posteriormente, para el análisis de la morfometría geométrica, utilizando también enfoques basados en redes, se empleó el programa MorphoJ. Para estandarizar las formas, aplicamos la Superposición de Procrustes Generalizada (GPA), posteriormente llevando a cabo análisis multivariados de componentes principales (PCA), análisis discriminante canónico (CVA) y regresión. Existieron distinciones morfológicas de considerable significancia estadística entre los diversos taxones, siendo el valor de $p < 0.0001$ el nivel de significancia alcanzado. Se determinó que *Chelonoidis niger* exhibe una divergencia morfológica más acentuada en su plastrón al contrastarlo con las formas oriundas de Isla Isabela; no obstante, estas disparidades se localizan principalmente en el segmento anterior de dicho apéndice óseo. La morfología del plastrón en especímenes juveniles, sin distinción de sexo, no mostró variaciones manifiestas de importancia ($p > 0.05$). Este hallazgo sugiere que no hay dimorfismo sexual en las fases tempranas del desarrollo. La edad de los ejemplares resultó ser un factor de influencia notable en la forma del plastrón, con un valor de $p < 0.0001$, más sólo representaba el 3,58% de la varianza total observada. Finalmente, reafirmamos el valor del plastrón como carácter morfológico distintivo para la discriminación entre especies. Igualmente, se recalca a la morfometría geométrica como herramienta adicional de inmenso provecho en los programas de preservación y manejo de las tortugas gigantes galapagueñas.

Palabras clave: *Chelonoidis*, morfometría geométrica, plastrón, conservación, variación morfológica.

SUMMARY

The giant tortoises of the genus *Chelonoidis*, native to the Galápagos Islands, are a key component of Galápagos biodiversity and play an important ecological role in the conservation of their ecosystems. This study sought to quantify differences in plastron morphology among species within this genus. We employed a geometric morphometrics methodology based on digitizing the coordinates of selected anatomical reference points. Data collection was conducted at the Fausto Llerena Biological Station, located on Santa Cruz Island. The sample for the "nudging" study (0–5 years) comprised a total of 240 juvenile individuals from three distinct species between zero and five years of age: one hundred and twenty of *Chelonoidis guntheri*, sixty of *Chelonoidis niger*, and sixty of *Chelonoidis vicina*. Digital images were acquired specifically from the ventral surface of these specimens. To extract the coordinate data, TPSDig2 software (dedicated to digitization of points and contours) was employed; subsequently, MorphoJ software was used for geometric morphometric analysis, including network-based approaches. To standardize shapes, we applied Generalized Procrustes Analysis (GPA), followed by multivariate Principal Component Analysis (PCA), Canonical Variate Analysis (CVA), and regression analyses. Statistically significant morphological distinctions were detected among the various taxa ($p < 0.0001$). *Chelonoidis niger* exhibited more pronounced plastron morphological divergence when compared to forms native to Isabela Island; however, these disparities were primarily located in the anterior region of this bony structure. Plastron morphology in juvenile specimens, regardless of sex, did not show any significant variations ($p > 0.05$). This finding suggests an absence of sexual dimorphism in early developmental stages. Individual age proved to be a notable factor influencing plastron shape ($p < 0.0001$), though it accounted for only 3.58% of the total observed variance. Finally, we reaffirm the value of the plastron as a distinctive morphological character for species discrimination. Similarly, we emphasize geometric morphometrics as an invaluable tool in conservation and management programs for Galápagos giant tortoises.

Keywords: *Chelonoidis*, geometric morphometrics, plastron, conservation, morphological variation.

1. INTRODUCCIÓN

Las tortugas gigantes pertenecientes al género *Chelonoidis*, constituyen emblemáticos símbolos de la riqueza biológica del Ecuador dada su función ecológica y su relevancia para la teoría de la evolución (Chiari et al., 2009). No obstante, sus poblaciones han sufrido importantes caídas por la actividad humana. Esto llevó a crear programas de conservación, como los del Centro de Crianza Fausto Llerena, que se enfocan en la reproducción y reintroducción de estas especies.

La coraza ventral ostenta misiones primordiales dentro de la anatomía quelonia. Provee resguardo a las vísceras y coadyuva su desplazamiento. Adicionalmente, revela disparidades fenotípicas intersexuales, conexas a los ciclos procreadores, a la par de mutaciones capaces de denotar acomodos a variados hábitats (Rice et al., 2016). Dichas discrepancias podrían asociarse a las esferas de vida que pueblan los géneros de *Chelonoidis*. La morfometría geométrica es una herramienta útil para estudiar la variación morfológica.

Esta técnica puede detectar diferencias que no son obvias con métodos tradicionales (Claude et al., 2003). Se ha investigado mucho el caparazón, mientras que el plastrón ha recibido menos atención, a pesar de ser adecuado para el análisis de puntos de referencia.

Dado esto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la variación de la forma del plastrón entre especies de *Chelonoidis* en el Centro de Cría Fausto Llerena utilizando morfometría geométrica basada en puntos de referencia. Esto sirve como información importante para la conservación y el manejo de estas especies. Además, este estudio facilitó la detección de rasgos morfológicos diagnósticos para cada taxón.

2. PROBLEMÁTICA

Los métodos basados en la morfología de la concha utilizados para clasificar especies dentro del género *Chelonoidis* son rudimentarios. Pero los métodos descritos aquí son insuficientes para especies morfológicamente similares, y estos métodos identifican incorrectamente a los híbridos (Caccone et al., 2002; Jensen et al., 2022). Esta limitación amenaza la salud genética de los programas de cría y reintroducción, como evidencia la dificultad para discriminar especies crípticas y las estadísticas sobre identificaciones erróneas históricas.

Los procesos de hibridación y diferenciación genética entre poblaciones de tortugas gigantes de Galápagos contribuyen a una mayor complejidad en su clasificación y manejo. A esta intrincada situación surgen retos, sobre todo para los planes de preservación *ex situ*; así lo señalan Miller y colegas en su investigación de 2017. Por ello, hay una necesidad de artefactos más precisos y menos subjetivos, para poder afinar la identificación de especies y hacer más eficientes las labores de conservación en el mencionado Centro de Cría Fausto Llerena.

En cuanto a la morfometría geométrica, se propone como una técnica con gran potencial para escudriñar la configuración del plastrón. A diferencia de los métodos tradicionales, permite cuantificar las variaciones morfológicas y discriminar los efectos del tamaño y la forma (Claude et al., 2003; Zelditch et al., 2012). El plastrón constituye una estructura adecuada para este tipo de análisis por la presencia de

puntos de referencia homólogos identificables. No obstante, los estudios sobre morfología geométrica del plastrón en *Chelonoidis* aún son escasos, lo que evidencia un vacío de conocimiento en este campo (Chiari et al., 2009).

De igual forma, la variabilidad morfológica del plastrón no es exclusiva de las especies, sino que puede verse influenciada por factores como el sexo y la edad de los ejemplares. La morfometría geométrica permite cuantificar estas diferencias y aportar información relevante sobre la identificación sexual y el desarrollo morfológico (Berry & Shine, 1980; Barros et al., 2012). Sin embargo, en las especies del género *Chelonoidis* aún existe información limitada sobre la influencia de estos factores en la forma del plastrón, especialmente en individuos mantenidos bajo programas de conservación ex situ. Esta situación evidencia la necesidad de emplear herramientas cuantitativas que permitan caracterizar con mayor precisión la variación morfológica y mejorar los procesos de clasificación y manejo de las especies (Miller et al., 2017; Poulakakis et al., 2020).

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Existen diferencias significativas en la morfología geométrica del plastrón entre las especies del género *Chelonoidis* y hasta qué punto estas variaciones están asociadas al sexo y la edad de los individuos en el Centro de Crianza Fausto Llerena?

3. JUSTIFICACIÓN

La morfometría geométrica se presenta como una potente y poderosa herramienta para el análisis cuantitativo de la forma en biología evolutiva y taxonomía. Este método permite la medición, análisis y visualización de diferencias de forma de una manera altamente eficiente, reproducible, precisa y estadísticamente sólida. Es una técnica muy utilizada en estudios de biología evolutiva y taxonomía para analizar formas físicas y explorar las relaciones que existen entre diferentes especímenes y taxones (Cardini, 2010; Cardini, 2025). La morfometría geométrica, en contraposición a la morfometría clásica enfocada en medidas lineales (longitudes, anchos), investiga las relaciones geométricas entre puntos homólogos designados como puntos de referencia. Un beneficio significativo recae en su aptitud para desglosar componentes del tamaño y forma. Esto habilita una examinación más minuciosa de las variaciones en la forma, aislando efectivamente el efecto del tamaño. Adicionalmente, la morfometría geométrica facilita una presentación visual sencilla de las divergencias en forma mediante gráficas y deformaciones. Así se fomenta una comprensión intuitiva de las diferencias morfológicas.

El uso de morfometría geométrica en estudios de la forma del plastrón de especies de *Chelonoidis* tiene un gran potencial para revelar patrones morfológicos únicos y característicos que permitan una identificación más precisa de cada una de estas especies (Myers et al., 2006). Si la configuración geométrica del plastrón es característica de cada especie, esta información puede utilizarse como una valiosa

herramienta de diagnóstico para complementar los métodos tradicionales y genéticos actualmente en uso.

La identificación precisa de especies de Chelonoidis mediante morfometría geométrica puede complementar los métodos genéticos y morfológicos tradicionales que ya se utilizan en el centro. La información obtenida en este estudio puede ser de gran utilidad para optimizar los programas de cría, asegurar el apareamiento adecuado de individuos de una misma especie y así evitar hibridaciones no deseadas. Además, las diferencias morfológicas específicas por edad son clave para identificar un mejor momento para la liberación de tortugas rehabilitadas de regreso a sus áreas de distribución naturales, con el fin de maximizar las consecuencias en cuanto a la aptitud. En particular, dado que la morfometría geométrica emplea análisis de imágenes y se basa en la digitalización de un pequeño número de puntos de referencia, se plantea como un enfoque que parece menos invasivo que las pruebas genéticas tradicionales y, además, más rápido para proporcionar evaluaciones repetibles a nivel poblacional.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL:

Determinar las diferencias en la morfología del plastrón entre especies del género *Chelonoidis*, comparando patrones morfológicos distintivos asociados a cada especie mediante el uso de morfometría geométrica basada en puntos de referencia.

4.2. OBJETOS ESPECÍFICOS:

- Describir la forma del plastrón entre especies de *Chelonoidis* usando morfometría geométrica basadas en la digitalización de puntos de referencia.
- Comparar las regiones del plastrón que presenten mayores diferencias según el sexo, verificando si hay disimilitud entre machos y hembras.
- Analizar los cambios en la estructura del plastrón con relación a la edad de cada especie registrada en el Centro de Crianza Fausto Llerena.

5. HIPÓTESIS

Hipótesis Alterna (H1): Existen diferencias en la morfología geométrica del plastrón entre las distintas especies de Chelonoidis; además, esta presenta variaciones asociadas al sexo y a la edad de los individuos.

6. MARCO TEORICO

6.1. MORFOLOGÍA GENERAL

6.1.1. Fundamentos Evolutivos del Género *Chelonoidis*

El archipiélago de las Galápagos constituye uno de los escenarios más importantes para el estudio de la evolución y la biogeografía de islas. En este contexto, las tortugas gigantes del género *Chelonoidis* representan un grupo clave por su relevancia ecológica y su aporte histórico a la teoría evolutiva (Chiari et al., 2009; Jensen et al., 2022)

Desde el punto de vista taxonómico, estas especies fueron originalmente clasificadas dentro del género *Geochelone*; sin embargo, estudios filogenéticos demostraron que este grupo era polifilético, por lo que se estableció su reclasificación dentro del género *Chelonoidis* (Yale University, 2019). La evidencia molecular indica que el linaje se originó hace aproximadamente dos a tres millones de años, coincidiendo con la formación de las islas más antiguas del archipiélago (Poulakakis et al., 2020).

6.1.2. Diversificación y adaptación morfológica

Las tortugas gigantes colonizaron Galápagos mediante dispersión pasiva desde el continente sudamericano. A partir de este evento inicial, las poblaciones experimentaron procesos de radiación adaptativa que dieron lugar a distintas especies con características morfológicas diferenciadas (Chiari et al., 2017).

Uno de los ejemplos más importantes de adaptación es la presencia de morfotipos de concha: tipo cúpula y tipo silla de montar. Estas formas están asociadas a diferentes condiciones ambientales y estrategias de alimentación (Chiari et al., 2017).

6.1.3. Importancia ecológica

Las tortugas gigantes desempeñan un papel fundamental como ingenieros del ecosistema, ya que modifican la estructura de la vegetación y contribuyen a la dispersión de semillas (Falcón & Hansen, 2018). La ausencia de estas especies puede generar cambios significativos en la dinámica ecológica, afectando la biodiversidad del ecosistema (Sterling et al., 2010).

6.2. MORFOLOGÍA GEOMÉTRICA DEL PLASTRÓN

6.2.1. Anatomía y función del plastrón

El plastrón constituye la estructura ventral del caparazón de las tortugas y está formado por diversos elementos óseos como epiplastrón, entoplastrón, hioplastrón, hipoplastrón y xifiplastrón (Gilbert et al., 2001). Esta estructura ósea, recubierta externamente por escudos epidérmicos de queratina, cumple funciones esenciales para la supervivencia de los quelonios terrestres.

- Desde una perspectiva defensiva, el plastrón actúa como una barrera biomecánica que protege los órganos vitales y los tejidos blandos de los depredadores y del daño ambiental. A nivel microestructural representa una organización de tipo diploe con una capa central de hueso trabecular rodeada por placas de hueso compacto, lo que permite combinar la resistencia mecánica con la capacidad de absorber y disipar energía en caso de impacto (Sander & Scheyer, 2007).
- Con respecto a la locomoción, el plastrón se une lateralmente con el caparazón dorsal a través del portal óseo, formando una caja rígida característica de los testudínidos acinéticos. En grandes tortugas terrestres, como las del género *Chelonoidis*, esta estructura

soporta cargas gravitacionales elevadas durante la marcha lenta y mantiene el centro de masa del animal a cierta distancia del sustrato, lo que también afecta su capacidad de autoenderezamiento en caso de un volcán involuntario (Rubin et al., 2018).

- Desde el punto de vista reproductivo, el plastrón tiene un pronunciado dimorfismo sexual. En los machos, la concavidad del plastrón facilita el anclaje al caparazón curvado de la hembra durante la cópula, estabilizando la unión. Asimismo, la región gular puede usarse en interacciones agonísticas relacionadas con el acceso reproductivo. En cambio, las hembras presentan un plastrón más plano, lo que aumenta el volumen de la cavidad del celoma y favorece la fecundidad al permitir el desarrollo de huevos de mayor o mayor tamaño (Berry & Shine, 1980; Valenzuela, 2001).

Además, el plastrón participa en la locomoción y en procesos reproductivos. En este sentido, presenta dimorfismo sexual, ya que en los machos se observa una concavidad que facilita la cópula, mientras que en las hembras es más plano (Berry & Shine, 1980).

6.2.2. Variación morfológica

La morfología del plastrón varía entre especies, sexos y etapas de desarrollo. Estas diferencias pueden estar influenciadas por factores ecológicos, condiciones ambientales y procesos evolutivos, lo que convierte a esta estructura en un elemento clave para estudios morfológicos comparativos (Barros et al., 2012).

Durante la ontogenia, el plastrón presenta cambios estructurales progresivos. En etapas juveniles, las diferencias entre especies son poco evidentes; sin embargo, en individuos adultos se desarrollan características que permiten su diferenciación (Caccone et al., 2002).

Además, el plastrón forma la zona anatómica donde se manifiesta más claramente el dimorfismo sexual. Aunque el tamaño del cuerpo y la forma del caparazón pueden servir como indicadores generales, las diferencias más consistentes y cuantitativas se observan en la estructura abdominal (Berry & Shine, 1980).

En los machos, el plastrón presenta una concavidad marcada en la región central y posterior. Esta característica representa una adaptación funcional que facilita la estabilidad durante la cópula al permitir el encaje con el caparazón de la hembra (Berry & Shine, 1980; Barros et al., 2012).

Asimismo, los machos muestran escudos femorales y anales más desarrollados en el lóbulo posterior. Estas estructuras cumplen una función de soporte durante la monta y protegen la región pélvica, lo que refuerza su papel en la reproducción (Barros et al., 2012).

Por el contrario, las hembras presentan un plastrón más plano y una muesca anal más amplia. Esta morfología favorece la oviposición, permitiendo el paso adecuado de los huevos y reduciendo la probabilidad de obstrucción durante este proceso (Berry & Shine, 1980; Valenzuela, 2001).

Otro rasgo asociado con el dimorfismo sexual es la longitud de la cola. En los machos la cola es más larga y robusta, lo que facilita el apareamiento, mientras que en las hembras es más corta y menos pronunciada (Pritchard, 1996; Barros et al., 2012).

Estas diferencias morfológicas se pueden cuantificar mediante técnicas morfométricas geométricas. Por ejemplo, la relación entre sutura interfemoral y sutura interpectoral (FS/PS) permite la diferenciación estadística de hombres y mujeres, mostrando cambios relacionados con la forma (Chiari et al., 2009).

6.2.3. Morfometría geométrica

La morfometría geométrica constituye una herramienta que permite analizar la forma biológica mediante la digitalización de puntos anatómicos de referencia o landmarks. A diferencia de la morfometría tradicional, este enfoque preserva la información espacial de las estructuras que se evalúan permitiendo el estudio de la variación de la forma independientemente del tamaño, posición y orientación de los organismos (Bookstein, 1997).

Entre los métodos más utilizados destacan la Superposición Generalizada de Procrustes (GPA) y el Thin Plate Spline (TPS), que permiten detectar, visualizar e interpretar con precisión los cambios morfológicos. El GPA elimina el efecto de la escala, la rotación y la traslación, mientras que el TPS facilita la representación gráfica de las deformaciones observadas entre individuos o grupos, contribuyendo a la comprensión de los patrones de variación biológica (Zelditch et al., 2012).

6.2.4. Aplicaciones y relevancia de la morfometría geométrica en Chelonoidis

La morfometría geométrica ha sido ampliamente utilizada en estudios taxonómicos y evolutivos debido a su capacidad para detectar diferencias morfológicas que no pueden identificarse mediante mediciones tradicionales. Las aplicaciones

primordiales de esta técnica abarcan la discriminación de especies, el estudio del dimorfismo sexual y la valoración de las transformaciones inherentes al desarrollo orgánico.

Distintos investigadores han subrayado la eficacia de dicho procedimiento con anfibios. Claude et al. (2003) hicieron hincapié en su relevancia para discernir la influencia de variables ambientales y evolutivas en la morfología, a la vez que Zelditch et al. (2012) señalaron su virtud para resguardar la cohesión espacial de los puntos de referencia. Por su parte, Chiari et al. (2009) demostraron que los patrones morfológicos observados en tortugas gigantes de Galápagos guardan relación con la diferenciación genética de las poblaciones.

Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en el caparazón dorsal o en individuos adultos, existiendo escasa información sobre la variación geométrica del plastrón en individuos juveniles del género *Chelonoidis*. Este vacío de conocimiento justificó el desarrollo de la presente investigación, orientada a generar información sobre la variabilidad morfológica del plastrón y su utilidad para estudios de conservación y manejo de estas especies.

6.3. ESPECIES DEL GÉNERO *Chelonoidis*

6.3.1. Especies principales de estudio

El género *Chelonoidis* agrupa diversas especies distribuidas en las islas Galápagos, cada una adaptada a condiciones ambientales particulares. Entre ellas destacan *Chelonoidis vicina*, *Chelonoidis guntheri* y *Chelonoidis niger*, presentes en la isla Isabela.

Chelonoidis vicina se distribuye principalmente en Cerro Azul y presenta un caparazón tipo domo. Esta especie se encuentra catalogada en peligro de extinción debido a la disminución de sus poblaciones (Arteaga & Guayasamin, 2024). En la Figura 1 se observa un ejemplar de *Chelonoidis vicina*.

Figura 1.

Especie Chelonoidis vicina



Fuente: Propia del autor

Chelonoidis guntheri vive en Sierra Negra y Cinco Cerros. Su población ha disminuido significativamente, ubicándola en condición crítica entre las especies del archipiélago (von May, 2021). En la Figura 2 se presenta un ejemplar.

Figura 2.

Especie Chelonoidis guntheri



Fuente: Propia del autor

Chelonoidis niger, hace referencia al complejo de tortugas gigantes de las islas Galápagos. Son las tortugas terrestres más grandes del mundo, pudiendo pesar más de 250 kg y superar el metro de longitud. Destacan por su increíble longevidad, viviendo frecuentemente más de 100 años (Arteaga & Guayasamin, 2024). La Figura 3 muestra un ejemplar de *Chelonoidis niger*.

Figura 3.

Chelonoidis niger



6.3.2. Dinámica poblacional

Las poblaciones de tortugas gigantes en el sur de Isabela han sufrido una reducción significativa debido a actividades humanas y a la introducción de especies invasoras. Estos factores han afectado la supervivencia de las especies a largo plazo (Galápagos Conservancy, 2024).

Sin embargo, programas de conservación han permitido registrar poblaciones actuales de aproximadamente 4.146 individuos de *C. vicina* y 461 individuos de *C. guntheri*, evidenciando esfuerzos de recuperación en la zona.

6.3.3. Interacciones y variabilidad genética

En áreas como Cinco Cerros, ambas especies coexisten en simpatría, lo que ha favorecido procesos de hibridación. Esta mezcla genética dificulta la identificación de especies mediante características externas (Miller et al., 2017).

Por tanto, el uso de herramientas moleculares y morfométricas es fundamental para distinguir correctamente a los individuos y evitar errores en su clasificación.

6.3.4. Conservación y manejo

Los programas de conservación, como los desarrollados en el Centro de Crianza Fausto Llerena, buscan mantener la integridad genética de las especies mediante el control reproductivo y el monitoreo poblacional (Galápagos Conservancy, 2023).

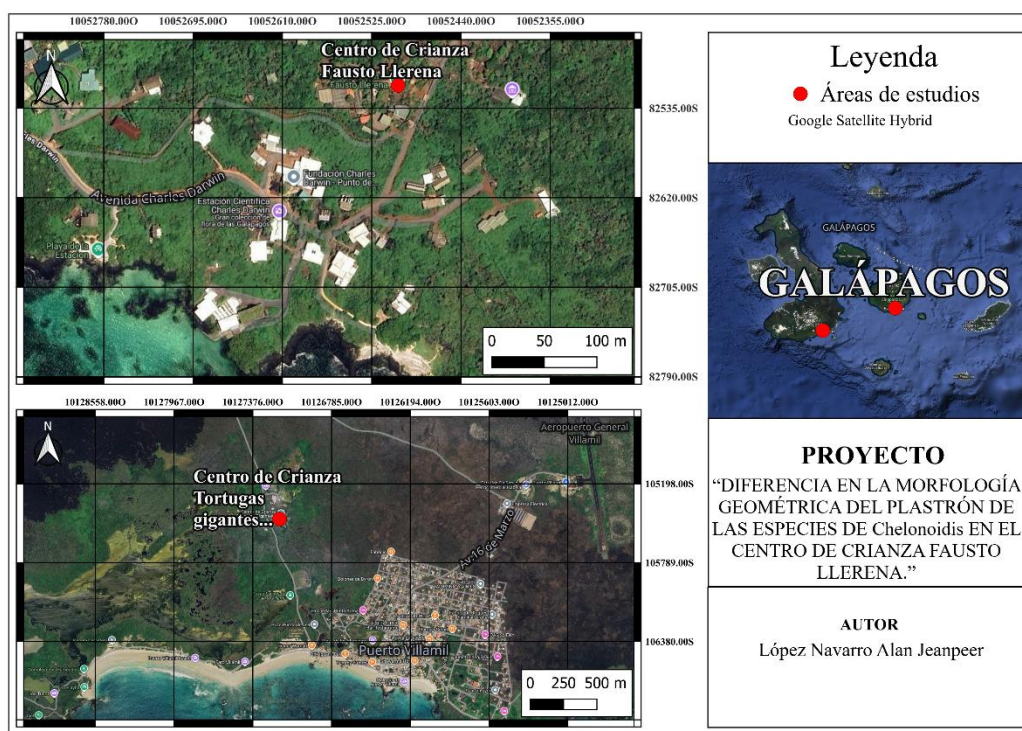
Estas estrategias incluyen el control de la temperatura de incubación (TSD) y el análisis morfológico de los individuos. Su uso adecuado es fundamental para la recuperación y sostenibilidad de las poblaciones de *Chelonoidis*.

7. METODOLOGÍA

7.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Crianza Fausto Llerena, un sitio clave para la conservación de tortugas del género *Chelonoidis* (Galápagos Conservancy, 2023), ubicado en la isla Santa Cruz, dentro del Parque Nacional Galápagos, en las coordenadas aproximadas 0°44'38"S, 90°18'06"O, junto a las instalaciones de la Estación Científica Charles Darwin, en Puerto Ayora (Figura 4). Para evaluar ejemplares pertenecientes a las especies *Chelonoidis vicina* y *Chelonoidis guntheri*, también se incluyeron ejemplares mantenidos en el Centro de Crianza Arnaldo Tupiza Chamaidán ubicado en la Isla Isabela.

Figura 4. Ubicación geográfica del Centro de Crianza Fausto Llerena



La técnica de digitalización fotográfica de plastrones validada por Cardini (2025) utilizó una cámara de alta resolución montada sobre un soporte fijo con iluminación y distancia focal estandarizadas. Esta estructura anatómica era adecuada para el análisis morfológico como lo indican Jesen et al. (2022), quienes destacaron sus características diagnósticas en estudios taxonómicos y evolutivos. Además, el intervalo quincenal aplicado siguió las recomendaciones de Sterling et al. (2020) para reducir el estrés en los especímenes durante la recolección de datos.

7.2. Diseño de estudio

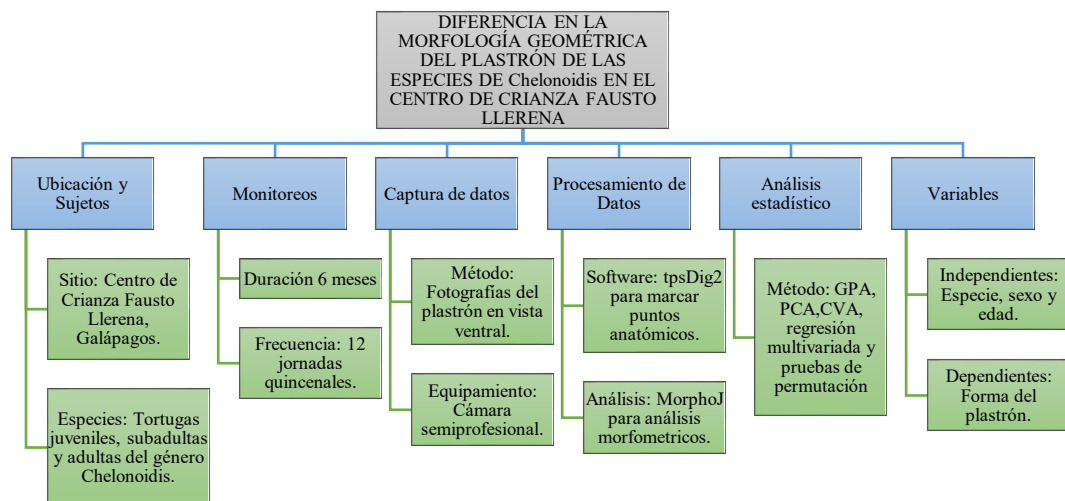
La presente investigación se desarrolló bajo un diseño no experimental, debido a que las variables de estudio no fueron manipuladas deliberadamente por el investigador, sino observadas y analizadas tal como se presentaron en los individuos evaluados. Según Hernández Sampieri y Mendoza (2018), los estudios no experimentales se caracterizan por examinar fenómenos en su contexto natural sin intervención directa sobre las variables.

Asimismo, correspondió a un estudio de corte transversal, ya que cada individuo fue evaluado una sola vez durante el periodo de investigación, permitiendo analizar las diferencias morfológicas entre especies, sexos y categorías de edad sin realizar un seguimiento temporal de los ejemplares. De acuerdo con Arias (2012), los diseños transversales recolectan los datos en un único momento de evaluación con

el propósito de describir variables y analizar su comportamiento dentro de una población.

La investigación abordó una dimensión descriptiva y comparativa. Esto se debió a que se enfocó en dilucidar la estructura morfológica del plastrón, cotejando luego las discrepancias formales entre diversas colectividades biológicas. Conforme a lo expuesto por Tamayo y Tamayo (2004), las investigaciones de índole descriptiva facilitan la caracterización de fenómenos a través de la observación metódica. A su vez, las indagaciones comparativas buscan establecer tanto las semejanzas como las disparidades entre colectivos ya definidos.

Figura 5. *Diseño experimental de la investigación.*



En la Figura 5 se exponen las fases integrantes de la investigación. Abarcando así el criterio de escogencia de especímenes, la captación visual de plastrones, la transformación digital de puntos craneofaciales y subsecuentemente, el escrutinio

de formas valiéndose de TPSDig2 y MorphoJ. De igual modo, se designan análisis estadísticos para escudriñar disimilitudes entre especies, géneros y grupos etarios. El acopio de información se prolonga por el transcurso de un semestre, integrando 12 momentos de vigilancia con intervalos quincenales en el Centro de Crianza Fausto Llerena.

7.3. Enfoque y tipo de investigación

7.3.1. Enfoque cuantitativo

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamentó en la medición objetiva de variables morfológicas mediante coordenadas cartesianas obtenidas a partir de puntos anatómicos de referencia (landmarks). Estas medidas fueron procesadas mediante procedimientos estadísticos y morfométricos que permitieron la evaluación de patrones de variación y diferenciación morfológica entre grupos. Hernández Sampieri y Mendoza (2018) indican que el enfoque cuantitativo utiliza la medición numérica, la recolección sistemática de datos y el análisis estadístico para contrastar hipótesis y explicar fenómenos de manera objetiva.

7.3.2. Investigación descriptiva

La investigación fue de tipo descriptiva, ya que tuvo como finalidad caracterizar la forma del plastrón de las especies del género *Chelonoidis* presentes en el Centro de Crianza Fausto Llerena, identificando los patrones morfológicos predominantes y la variación existente dentro de la población estudiada. Según Tamayo y Tamayo (2004), la investigación descriptiva busca especificar características, propiedades y rasgos relevantes de un fenómeno o población determinada.

7.3.3. Investigación comparativa

El estudio presentó además un componente comparativo, puesto que evaluó las diferencias morfológicas entre especies, sexos y categorías etarias, estableciendo semejanzas y contrastes en la configuración geométrica del plastrón. Arias (2012) señala que los estudios comparativos permiten analizar las diferencias existentes entre grupos con el propósito de determinar relaciones y patrones de variación.

7.3.4. Investigación de campo

La investigación fue igualmente de campo, debido a que la información se recolectó directamente en el lugar donde se encontraban los organismos objeto de estudio, sin trasladarlos a condiciones experimentales distintas. Las fotografías y registros biológicos fueron obtenidos directamente en el Centro de Crianza Fausto Llerena, permitiendo el análisis de los individuos en su entorno de manejo y conservación.

Arias (2012) define la investigación de campo como aquella que consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos.

7.4. Selección de individuos y recolección de imágenes

Se emplearon ejemplares del género *Chelonoidis* mantenidos en el Centro de Crianza Fausto Llerena, seleccionados de manera deliberada según su estado físico, accesibilidad y representatividad. La muestra incluyó individuos de ambos sexos y de diferentes categorías etarias, con el fin de garantizar una adecuada variabilidad morfológica para los análisis realizados.

La muestra estuvo constituida por 240 individuos pertenecientes a las especies *Chelonoidis guntheri*, *Chelonoidis niger* y *Chelonoidis vicina*, de acuerdo con la disponibilidad existente en el centro de crianza. Los individuos fueron seleccionados considerando el cumplimiento de los criterios de inclusión establecidos para el estudio.

Durante un periodo de seis meses se realizaron doce jornadas de monitoreo con frecuencia quincenal. Estas jornadas permitieron completar progresivamente la obtención de registros fotográficos de los individuos incluidos en la investigación, minimizando el estrés asociado a la manipulación y evitando intervenciones innecesarias sobre los especímenes.

Las imágenes del plastrón en vista ventral fueron registradas mediante una cámara Nikon D3500 (24 MP), ubicada aproximadamente a 80 cm del individuo y bajo condiciones estandarizadas de iluminación y orientación. Este procedimiento siguió protocolos utilizados en estudios de morfometría geométrica aplicados a quelonios, garantizando la calidad y reproducibilidad de las imágenes obtenidas.

7.4.1. Determinación de especies, sexo y edad

La identificación taxonómica de los individuos se realizó mediante la información registrada en las bases de datos institucionales de Galápagos Conservancy y de los centros de crianza participantes. Las especies *Chelonoidis guntheri*, *Chelonoidis vicina* y *Chelonoidis niger* fueron identificadas con base en los registros genealógicos, procedimentales y de manejo disponibles para cada ejemplar dentro de los programas de conservación *ex situ*.

La información relativa a la edad y el sexo se obtuvo de los registros institucionales asociados a cada individuo. La determinación del sexo se realizó de acuerdo con los protocolos establecidos por los programas de manejo y conservación de las tortugas gigantes de las Islas Galápagos, mientras que la edad se expresó en español a partir de la fecha de nacimiento registrada de cada ejemplar.

7.5. Población y muestra

7.5.1. Población

La población estuvo conformada por los individuos de tortugas gigantes del género *Chelonoidis* mantenidos en los centros de crianza Fausto Llerena (Santa Cruz) y Arnaldo Tupiza Chamaidán (Isabela), Galápagos.

7.5.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por 240 individuos del género *Chelonoidis* mantenidos en el Centro de Crianza Fausto Llerena. Del total evaluado, 120 individuos correspondieron a *Chelonoidis guntheri*, 60 a *Chelonoidis niger* y 60 a *Chelonoidis vicina*. Asimismo, se registró información asociada al sexo y la edad de cada ejemplar para el posterior análisis de la variación morfológica del plastrón.

El tamaño muestral estuvo determinado por la disponibilidad de individuos pertenecientes a las especies *Chelonoidis guntheri*, *Chelonoidis niger* y *Chelonoidis vicina* registrados en los centros de crianza participantes durante el período de estudio. Debido a que se trabajó con una población bajo programas de conservación ex situ, se incluyeron todos los individuos que cumplieron los criterios de inclusión

establecidos, permitiendo maximizar la representatividad biológica de las especies evaluadas. Esta estrategia garantizó una variabilidad morfológica suficiente para la aplicación de los análisis de morfometría geométrica y fortaleció la validez de las comparaciones realizadas entre especies, sexos y categorías de edad.

7.5.3. Tipo de muestreo

Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia o intencional, debido a que los individuos fueron seleccionados en función de su disponibilidad dentro del centro de crianza y del cumplimiento de los criterios establecidos para el estudio. Hernández Sampieri y Mendoza (2018) indican que este tipo de muestreo se utiliza cuando los sujetos son seleccionados deliberadamente por su accesibilidad y pertinencia para los objetivos de investigación.

7.5.4. Criterios de inclusión

Para la selección de los individuos se consideraron los siguientes criterios:

- Presentar un estado sanitario aparente adecuado.
- Estar disponibles para la captura fotográfica durante las jornadas de monitoreo.

- Contar con información biológica registrada en las bases de datos institucionales (sexo y edad).
- Corresponder a especímenes vivos mantenidos en el Centro de Crianza Fausto Llerena.
- Permitir la obtención de imágenes de calidad suficiente para la digitalización de landmarks.

7.6. Instrumentos de recolección de datos

La obtención de información morfológica se realizó mediante técnicas de registro fotográfico digital y procesamiento computacional de imágenes. Para garantizar la calidad y reproducibilidad de los datos, se emplearon instrumentos y programas especializados utilizados en estudios de morfometría geométrica.

Los instrumentos utilizados durante las etapas de captura, digitalización y procesamiento de la información se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Instrumentos utilizados para la recolección y procesamiento de datos

variable o actividad	Instrumento
CAPTURA DE IMÁGENES DEL PLASTRÓN	Cámara Nikon D3500
Digitalización y marcaje de landmarks	Software TPSDig2
Análisis de morfometría geométrica	Software MorphoJ
Organización y respaldo de datos	Microsoft Excel

7.7. Descripción técnica de los instrumentos

La captura de imágenes se realizó mediante una cámara Nikon D3500, utilizada para registrar la vista ventral del plastrón de cada individuo. En un escenario de rigurosa estandarización, las imágenes fotográficas se adquirieron. El control minucioso de la iluminación y de la distancia focal fue un factor crucial. Asimismo, la cámara ocupó una posición predeterminada. Se situó la lente a unos ochenta centímetros de la muestra. La resolución intrínseca de estas capturas visuales, rondando los seis mil por cuatro mil píxeles, o sea, veinticuatro megapíxeles. Esto es, para ser exactos, 24 megapíxeles. Una tal nitidez, resulta indispensable. Proporciona la granularidad requerida para discernir con precisión puntos anatómicos clave. Para mitigar la formación de sombras y atenuar fluctuaciones en el contraste, se implementó un sistema de iluminación de intensidad constante y nivelada. Esto propició una visualización nítida. Hizo posible una apreciación inequívoca de las suturas plastrales.

Para asegurar la constancia angular y de magnitud en las representaciones gráficas, se empleó un soporte tripodal para la cámara. En lo referente a las unidades reproductivas, la toma de imágenes obedeció a metodologías previamente definidas. Se siguieron diligentemente pautas de manipulación conservadora, designando entre uno y dos minutos por adquisición. La configuración de la cámara, empleada de manera homogénea, requirió tiempos de exposición que oscilaron

entre 1/125 y 1/250 s. Es más, la sensibilidad ISO se moduló con flexibilidad entre 100 y 400, ajustándose según la luminosidad de cada momento.

Las imágenes obtenidas pasaron por un tratamiento en TPSDig2, un programa informático que permitió la digitalización precisa de las localizaciones de marcadores anatómicos concretos. Posteriormente, estas localizaciones se sometieron a un escrutinio concienzudo en MorphoJ. Allí, al aplicar la superposición generalizada de Procrustes, se llevó a cabo la concordancia de las formas. Después, se iniciaron análisis estadísticos profundos de la morfología. Como último paso, todos los datos recopilados se organizaron con esmero y se registraron en plantillas de Microsoft Excel. Esta maniobra estratégica asegura la administración diestra de los corpus de datos, junto con la meticulosa alistamiento de los expedientes requeridos para posteriores exámenes estadísticos.

7.8. Condiciones éticas

La presente investigación se desarrolló respetando los principios éticos aplicables a estudios con fauna silvestre y organismos de conservación, garantizando el bienestar de los especímenes evaluados y el cumplimiento de la normativa vigente.

7.8.1. Bienestar animal

Todos los procedimientos realizados fueron estrictamente no invasivos, basándose únicamente en la observación y registro fotográfico externo de los individuos. Durante la toma de imágenes se efectuó una manipulación mínima y controlada, procurando reducir el tiempo de manejo y minimizar cualquier fuente potencial de estrés para los ejemplares.

7.8.2. Consideraciones institucionales

La ejecución de la investigación contó con la autorización correspondiente del Centro de Crianza Fausto Llerena y se desarrolló dentro de los lineamientos establecidos para el manejo de especies protegidas. Si hiciera falta, las actividades también se adaptarían a los mandatos y normativas publicados por la Dirección del Parque Nacional Galápagos, organización encargada de la gestión y preservación de los tesoros naturales de este archipiélago.

El estudio se llevó a cabo dentro del contexto de las tareas permitidas por Galápagos Conservancy y las estaciones de cría que participaban, aderéndose a los criterios institucionales y las leyes vigentes relativas a investigación y custodia de especies amenazadas en Galápagos.

7.8.3. Conservación de los especímenes

El estudio no implicó alteraciones físicas, extracción de muestras biológicas ni procedimientos que comprometieran la integridad de los individuos evaluados. El uso de los ejemplares se limitó exclusivamente a la observación, identificación y registro fotográfico de su morfología externa, contribuyendo al conocimiento científico sin afectar los programas de conservación existentes.

7.8.4. Bioseguridad

Durante las actividades de campo se aplicaron medidas básicas de bioseguridad para prevenir la contaminación cruzada entre individuos. Estas incluyeron el uso de guantes cuando fue necesario, la limpieza y desinfección periódica de los equipos utilizados y el mantenimiento de condiciones higiénicas adecuadas durante el manejo de los especímenes. Estas acciones contribuyeron a preservar la salud de las tortugas y a garantizar la calidad de la información obtenida.

7.9. Técnicas de análisis de datos

Los datos morfométricos obtenidos a partir de la digitalización de los landmarks fueron analizados mediante un enfoque multivariado basado en coordenadas de forma estandarizadas. Previamente, las coordenadas fueron sometidas a una Superposición Generalizada de Procrustes (GPA), procedimiento que permitió eliminar los efectos de traslación, rotación y escala, conservando únicamente la información asociada a la forma del plastrón. Este método constituye una de las técnicas fundamentales de la morfometría geométrica para el estudio de variaciones morfológicas entre individuos y grupos.

Posteriormente, las configuraciones de forma fueron procesadas en el software MorphoJ (Klingenberg, 2011), con el propósito de evaluar la variación morfológica entre especies, sexos y clases de edad del género *Chelonoidis*. Para explorar los patrones generales de variación de la forma se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA), el cual permitió resumir la variabilidad morfológica en un conjunto reducido de componentes ortogonales.

Antes de realizar las comparaciones estadísticas se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Cuando los datos cumplieron los supuestos paramétricos se aplicaron análisis de varianza apropiados; en caso contrario, se recurrió a pruebas no paramétricas como Kruskal-Wallis.

Para determinar diferencias morfológicas entre grupos se utilizaron análisis multivariados basados en distancias de Procrustes y pruebas de permutación. Sumado a ello, se aplicó el Análisis de Variables Canónicas (CVA), con el propósito de amplificar la disimilitud entre agrupaciones y calibrar si la configuración del plastrón era eficaz al distinguir entre especies y sexos. Las distancias de Mahalanobis y Procrustes se determinaron para completar las brechas intergrupales, brindando la facultad de medir la magnitud de la divergencia morfológica apreciada.

Al indagar la repercusión etaria en la arquitectura del plastrón, se llevaron a cabo análisis de regresión multivariada, contrastando las mediciones de Procrustes con la edad de los participantes. Aquello permitió discernir tendencias en la evolución ontogenética y las zonas anatómicas de notoria alteración a través del crecimiento.

Asimismo, se examinaron los vectores de modificación morfológica que surgieron de las diversas metodologías, posibilitando la apreciación de los sectores del plastrón con mayor peso en la divergencia entre taxones, sexos y estratos etarios, además de simplificar la comprensión biológica de las conformaciones manifestadas.

Para todas las pruebas estadísticas se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Asimismo, las diferencias entre grupos fueron evaluadas mediante el contraste de hipótesis, considerando como hipótesis nula (H_0) que la morfología geométrica del plastrón no presenta variaciones entre las especies de *Chelonoidis* ni asociaciones con el sexo o la edad de los individuos. Por su parte, la hipótesis alternativa (H_1) planteó que la morfología geométrica del plastrón varía entre las especies de *Chelonoidis* y se encuentra asociada al sexo y a la edad de los individuos.

8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

8.1. Variación general de la forma del plastrón

Se analizaron 240 individuos del género *Chelonoidis*, correspondientes a tres especies: *C. guntheri* (n = 120), *C. niger* (n = 60) y *C. vicina* (n = 60), todos con edades entre 0 y 5 años. La muestra estuvo compuesta por 176 hembras (73.3 %) y 64 machos (26.7 %), proporción que refleja la composición real de la población del centro de crianza y no un sesgo de muestreo. Las discrepancias entre las magnitudes grupales en absoluto comprometieron la firmeza de la conclusión. El basamento reposa en la ejecución de pruebas de permutación, y estas, dada su cualidad inherente, no presuponen la homogeneidad de las cifras grupales ni exigen estructuras de datos preestablecidas.

En el transcurso de la investigación, se procedió a la digitalización de diecisiete puntos de referencia catalogados como de tipo I, colocados de forma estratégica en la cara ventral del caparazón de cada organismo sometido a análisis. Estos marcadores, cuya identificación se vio facilitada por su huella anatómica incuestionable y su discernibilidad biológica, como aquellos que se encuentran en las confluencias de las líneas de sutura de las escamas, asegurando la obtención de una correlación fiable a través de la totalidad de los especímenes objeto de estudio.

8.1.1. Superposición Procrustes generalizada (GPA)

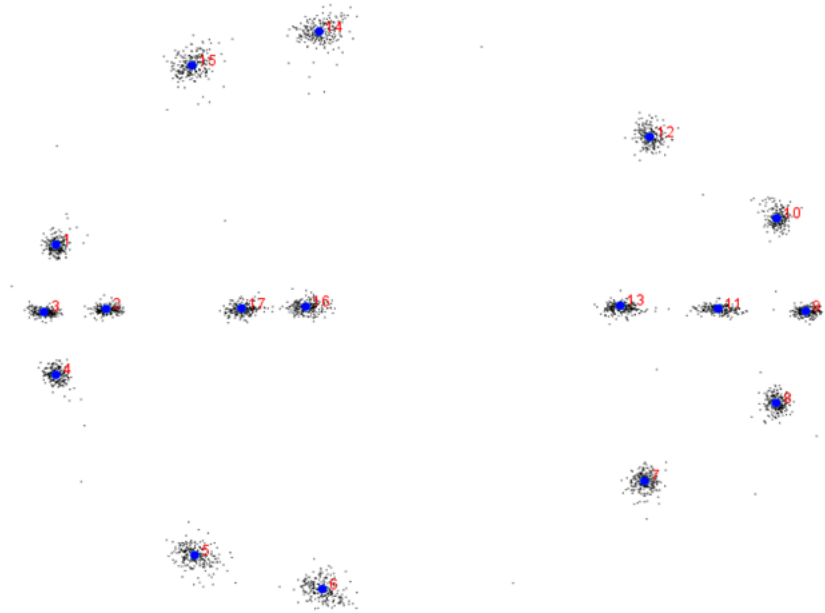
La Superposición Procrustes Generalizada (GPA) permitió eliminar las diferencias de tamaño, posición y orientación entre especímenes, obteniéndose así las coordenadas Procrustes, adimensionales, que describen exclusivamente la forma pura y constituyeron la base de todos los análisis posteriores. Es importante destacar que todas las variables morfométricas de este estudio de sumas de cuadrados, distancias, estadísticos F, salvo la edad medida en días, se expresan en unidades Procrustes, que no corresponden a unidades físicas.

Satisfactoriamente, el GPA se aplicó a las 240; como resultado se obtuvo una suma de cuadrados de Procrustes de 0,6351 y, además, una suma de cuadrados de tangente de 0,5811, las dos cifras sin dimensión. Esta notable coincidencia entre esos valores demostró que la variación de la forma era mínima. Por lo tanto, la proyección al espacio tangente no generó distorsión significativa, lo cual subraya la robustez de los futuros análisis estadísticos.

La configuración promedio de los 17 puntos de referencia después de la superposición (Figura 7) mostró nubes de dispersión relativamente compactas alrededor de cada punto medio, lo que indica una digitalización consistente (con un

bajo error de medición) y una variación morfológica moderada entre las especificaciones.

Figura 6. Configuración de Procrustes de los 17 landmarks del plastrón en los 240 individuos de *Chelonoidis*.



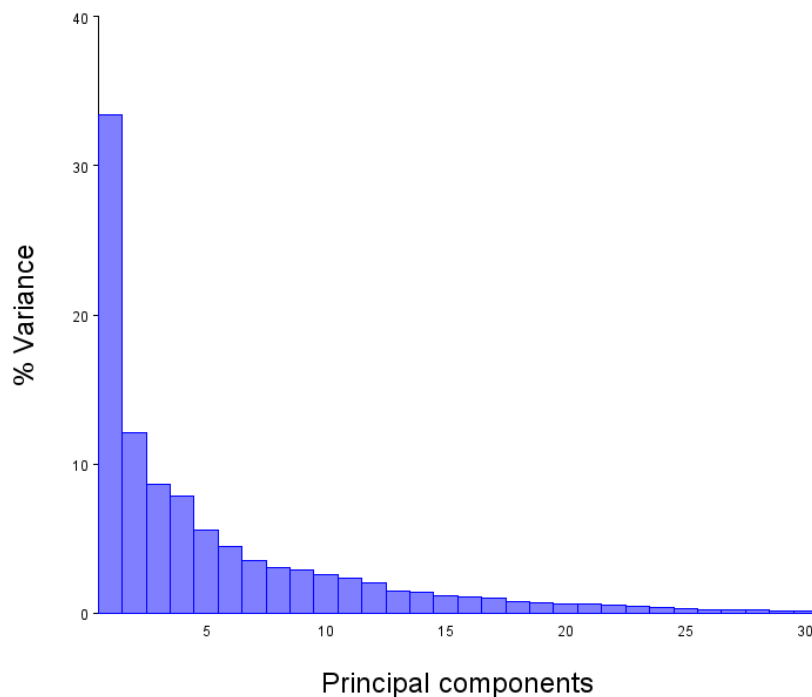
Nota. Los puntos azules representan las posiciones promedio de cada landmark; las nubes de puntos negros indican la variación interespecífica e individual.

8.1.2. Análisis de componentes principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales (PCA) permitió resumir la variación de forma en un número reducido de ejes jerarquizados según la cantidad de variación explicada. La varianza total se separó en treinta componentes distintos. El componente principal inicial, el PC1, acaparó un 33.4% de la varianza completa; enseguida vino el PC2 con un 12.1%, luego el PC3 aportando un 8.6% y finalmente el PC4 con un 7.9%. En conjunto, esos cuatro ejes centrales abarcaron el 61.9% de

la varianza que se observó. Del gráfico de sedimentación se pudo discernir una pronunciada caída después de los primeros componentes; esto indica que estos resumen la variación morfológica de importancia biológica; los demás componentes parecen tener más que ver con el azar.

Figura 7. *Scree plot del PCA.*



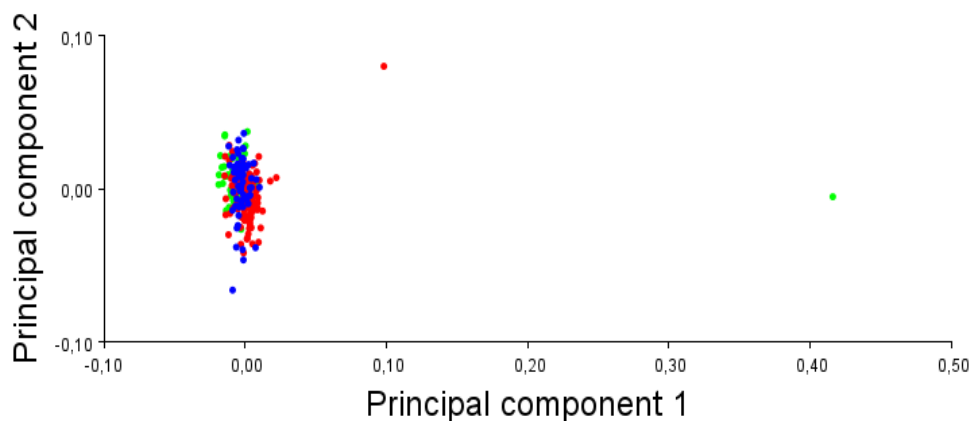
Nota. Se muestra el porcentaje de varianza explicado por cada componente principal. Los primeros cuatro componentes acumulan el 61.9 % de la variación total de forma.

En el espacio morfológico resultante del PCA (figura 8), los doscientos cuarenta especímenes examinados se agruparon en una nube densa, careciendo de una clara distinción visual entre las distintas especies. No obstante, este panorama no significa la inexistencia de variaciones interespecíficas, sino que más bien refleja una deficiencia inherente a la metodología empleada; el PCA, al focalizarse en resumir la varianza total de la muestra, deja de lado la afiliación de cada organismo

a su respectivo grupo taxonómico. El diseño no se orienta a acentuar la brecha existente entre tales agrupaciones. Más tarde, el análisis discriminante canónico (CVA) vino a arrojar más luz sobre las disimilitudes específicas.

Dos supuestos singulares emergieron: un ejemplar de la especie *C. guntheri* exhibiendo una marcada elevación en el primer eje principal (PC1, aproximado a 0,41), y otro de *C. niger* destacando por un valor considerable en el segundo eje principal (PC2, cercano a 0,08). Escrupulosos exámenes de ambas instancias no revelaron falencias en la captura de información. Así se corroboró que tales fluctuaciones representaban discrepancias biológicas verídicas, las cuales, por ende, se conservaron en el escrutinio.

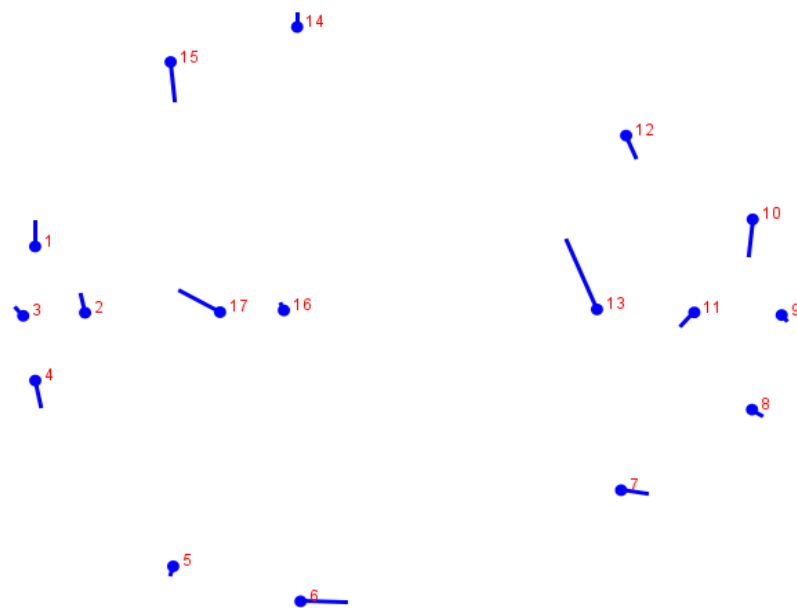
Figura 8. PCA de las especies.



Nota. Se muestra la dispersión de PC1 vs PC2 coloreada por especie (*C. guntheri* en rojo, *C. niger* en verde, *C. vicina* en azul). La superposición de las tres especies es esperada dado que el PCA no maximiza la separación entre grupos.

Los vectores de deformación asociados al primer componente principal (PC1) se anclaron en los puntos de referencia 1, 4, 10, 13 y 17. Estos puntos de referencia denotan notablemente las suturas laterales del área medial del plastrón. Este patrón puso de manifiesto que la génesis primordial de la variación morfológica en el conjunto de datos radicó en modificaciones de la amplitud relativa del plastrón. A su vez, esto incidió en la disposición de dichas suturas laterales.

Figura 9. *Vectores de cambio del PC1.*



Nota. Vectores de cambio de forma asociados al PC1. Los desplazamientos más pronunciados se observan en los landmarks laterales (1, 4, 10) y mediales (13, 17) del plastrón.

8.2. Diferenciación morfológica del plastrón

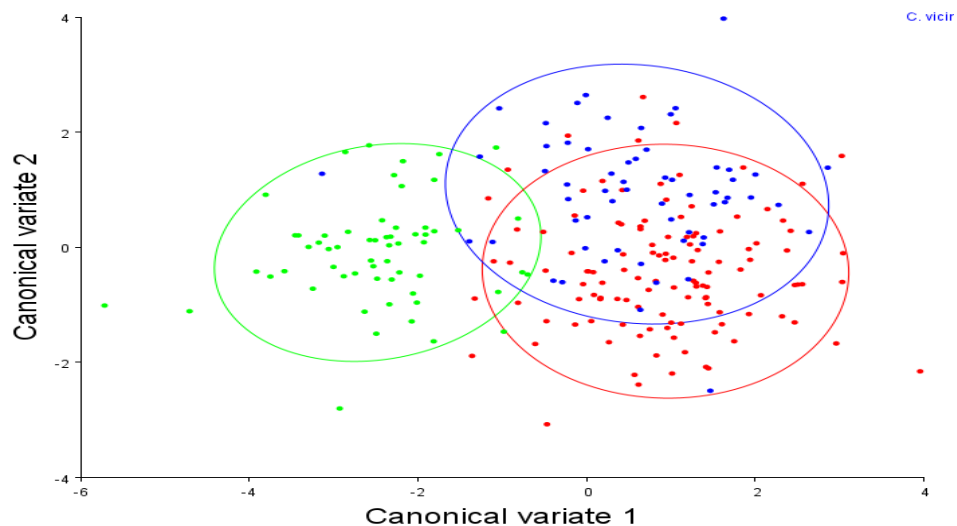
8.2.1. Diferencias entre especies

El Análisis de Variables Canónicas (CVA), aplicado con la especie como variable de agrupación, evidenció diferencias marcadas entre las tres especies. El primer eje canónico (CV1) explicó el 87.2 % de la separación entre grupos y el segundo (CV2) el 12.8 % restante, de modo que casi toda la discriminación interespecífica se concentró en un único eje. La prueba de permutación (10 000 repeticiones) arrojó resultados altamente significativos tanto para el estadístico F de Goodall ($F = 6.447$; $p < 0.0001$) como para la traza de Pillai (0.911; $p < 0.0001$), lo que indicó que la probabilidad de que estas diferencias se debieran al azar fue inferior a 1 entre 10 000, permitiendo descartar el azar con alta confianza.

La divergencia inter-específica se manifiesta palmariamente en el Morfoespacio canónico. Dicho espacio se halla ejemplificado por elipses, las cuales engloban el noventa por ciento de cada clúster taxonómico (Fig. once). Las agrupaciones afines a *C. guntheri* (en tonos rojizos) y *C. vicina* (con tonalidades azulejas) se ubicaron adyacentes. Estas no exhibieron una solapación total, cualidad que resuena con la significancia estadística de sus diferencias. En cuanto a *C. niger* (de tinte verdoso), se localizó de forma separada, inclinándose hacia los valores negativos del primer eje canónico (CV1). Con las otras especies, la superposición fue muy reducida. Este

patrón coincide con lo esperado desde el punto de vista biológico. Esto ocurre porque *C. niger* crece en la isla Floreana, que tiene una ubicación y condiciones ecológicas que la hacen aislada. En cambio, las otras dos especies tienen su origen en la isla Isabela.

Figura 10. CVA por especie.



Nota. CV scores del CVA por especie con elipses de frecuencia igual al 90 %. *C. guntheri* en rojo, *C. niger* en verde, *C. vicina* en azul. La elipse de *C. niger* muestra la mayor separación respecto a las especies de Isabela.

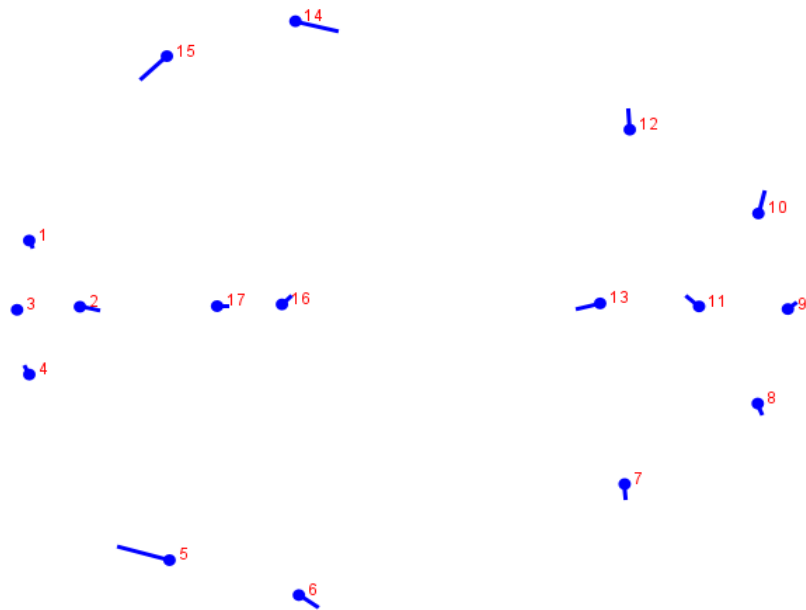
Hubo diferencias importantes entre los grupos. Estas diferencias se encontraron al hacer un análisis de distancias de Mahalanobis y Procrustes. La diferencia más grande se dio entre *C. guntheri* y *C. niger*. La distancia de Mahalanobis fue de 3,429 y el resultado fue muy significativo, con un p menor que 0,0001.

La diferencia entre *C. niger* y *C. vicina* también fue muy grande. La distancia de Mahalanobis alcanzó un valor de 3,239, arrojando un resultado de suma trascendencia, pues su valor p se situó muy por debajo de 0,0001. Entre *C. guntheri* y *C. vicina*, la disparidad observada resultó ser la mínima. Dicha distancia de

Mahalanobis se cifró en 1,385, obteniendo una significancia estadística notable, con un valor p de 0,0015. Aun representando el menor de los contrastes, esta diferencia demostró ser de considerable relevancia.

El estudio de los cambios de forma en el CV1 (Figura 12) mostró que las mayores diferencias entre especies se encontraban en la parte delantera del plastrón. Esto fue especialmente notable en los puntos de referencia 14 y 15, que son las uniones de los escudos gulares y humerales anteriores, y también en el punto de referencia 5, que es la unión entre el escudo abdominal y el femoral izquierdo. Estos resultados indican que la principal diferencia entre las especies de *Chelonoidis* se debe a la forma de la parte delantera del plastrón y a la anchura de la transición entre la parte abdominal y la femoral. Esto es algo que ya se puede observar en las etapas tempranas de la vida de estos animales.

Figura 11. *Vectores de cambio por especie.*



Nota. Vectores de cambio de forma del CV1 del CVA por especie. Los landmarks con vectores más pronunciados (14, 15 y 5) indican las regiones del plastrón más informativas para la diferenciación interespecífica.

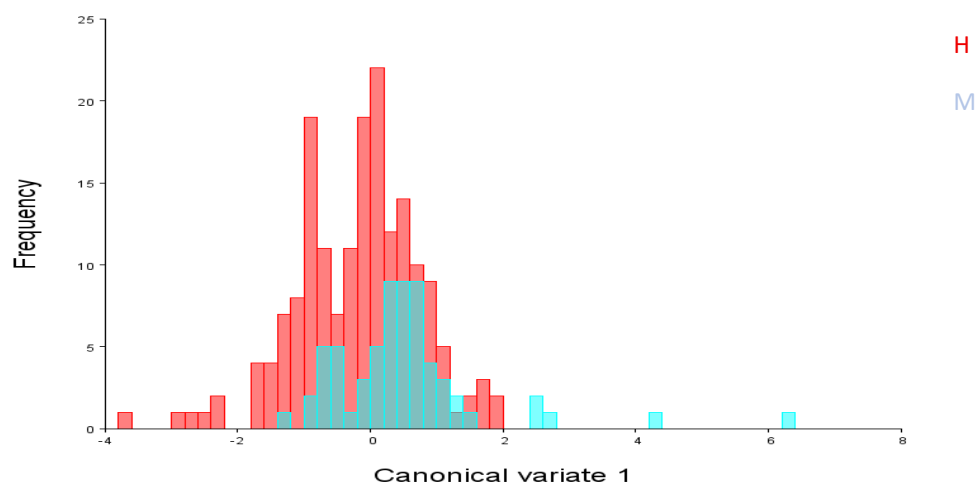
8.2.2. Dimorfismo sexual

El CVA aplicado con el sexo como variable de agrupación no reveló diferencias estadísticamente significativas entre las 176 hembras y los 64 machos. Se obtuvo un estadístico F de Goodall de 1,033 ($p = 0,370$), una traza de Pillai de 0,091 ($p = 0,891$), una distancia de Mahalanobis de 0,712 ($p = 0,894$) y una distancia de Procrustes de 0,007 ($p = 0,378$). Dado que todos los valores p fueron superiores al umbral de significancia ($\alpha = 0,05$), se infiere que las diferencias observadas entre géneros no son estadísticamente significativas y podrían atribuirse a la variabilidad aleatoria. La diferencia en el número de individuos entre sexos no cambió los

resultados. Las pruebas de permutación son fuertes aunque los tamaños de muestra no sean iguales.

El histograma de los valores canónicos (Figura 13) muestra la distribución de hembras (en rojo) y machos (en azul). Se puede ver que los centros de distribución de hembras y machos se superponen casi por completo. Esto se ajusta a lo que se sabe sobre *Chelonoidis*. La diferencia entre sexos en el plastrón, que es principalmente la concavidad en machos adultos para que puedan subir, se nota cuando son adultos y no se puede detectar en individuos menores de 5 años. Por lo tanto, no haber encontrado diferencias entre sexos en este grupo de edad es algo esperado debido a cómo crece la especie, más que un problema del diseño experimental.

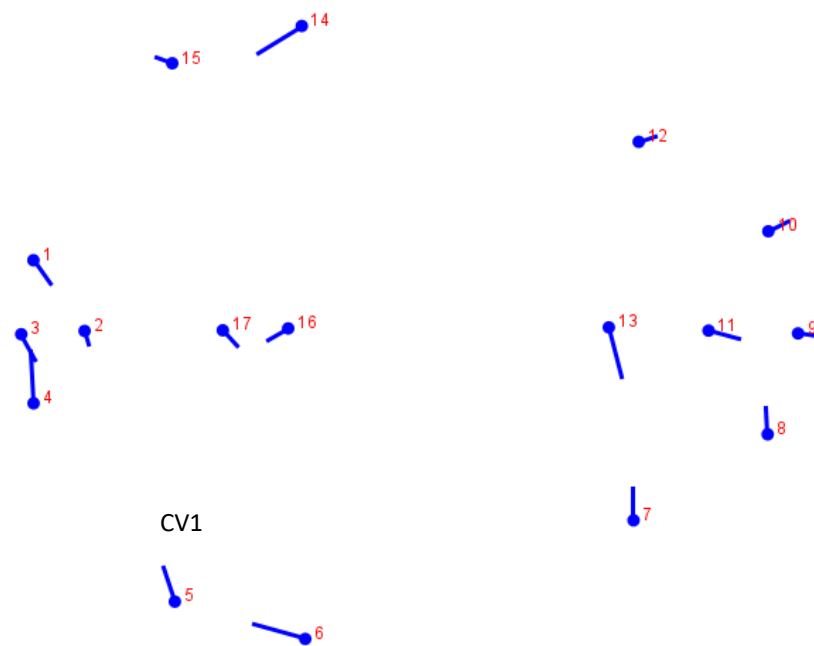
Figura 12. Distribución por sexo.



Nota. Histograma de CV scores del CVA por sexo. Hembras en rojo (n = 176) y machos en azul (n = 64). El amplio solapamiento entre distribuciones refleja la ausencia de dimorfismo sexual plastral en individuos juveniles.

Los vectores de cambio en la forma del Análisis Discriminante Canónico (CVA) en función del sexo (Figura 14) presentaron magnitudes considerablemente menores en comparación con los observados en el CVA por especie. Esto corrobora la escasa diferencia morfológica entre machos y hembras. Las variaciones más notables se localizaron en los puntos de referencia laterales izquierdos (3, 4, 5) y femoroanales (6, 7); sin embargo, estos cambios no exhibieron un patrón anatómico consistente con el dimorfismo sexual descrito para la especie en individuos adultos.

Figura 13. *Vectores por sexo.*



Nota. Vectores de cambio de forma del CV1 del CVA por sexo. Las magnitudes son notablemente menores que en el CVA por especie, confirmando la ausencia de diferenciación morfológica significativa entre machos y hembras.

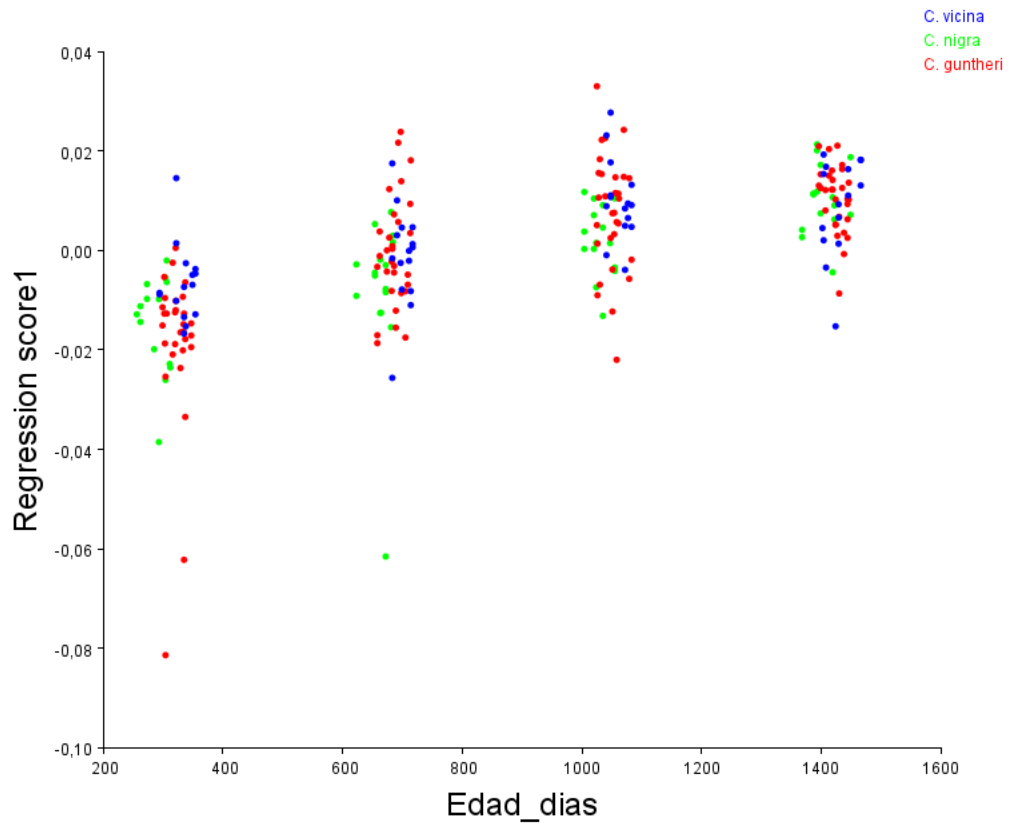
8.3. Variación ontogenética del Plastrón

8.3.1. Relación forma-edad

La regresión multivariada de la forma sobre la edad (en días, única variable con unidad física del estudio) reveló una relación estadísticamente significativa ($p < 0.0001$, 10 000 permutaciones), confirmando que la edad influye sobre la forma del plastrón. No obstante, la magnitud de este efecto fue modesta: la edad explicó únicamente el 3.58 % de la variación total de forma ($R^2 = 0.0358$). Este porcentaje relativamente bajo debe interpretarse considerando que los individuos se distribuyeron en cuatro cohortes de nacimiento discretas y no de manera continua a lo largo del tiempo, lo cual limitó la capacidad del modelo para captar cambios finos del desarrollo. Pese a ello, la robustez estadística observada indicó que el efecto de la edad sobre la forma es real y consistente, aun cuando represente una fracción reducida de la variación total.

El gráfico de regresión (Figura 15), referido a las especies como factor, mostró los 240 individuos agrupados en cuatro cohortes diferenciadas por las correspondientes a 2025 (~250–350 días), 2024 (~640–720 días), 2023 (~1000–1100 días) y 2022 (~1350–1450 días). Se observó una tendencia positiva en la que los individuos jóvenes asumieron valores negativos y los de edad avanzada alcanzaron valores positivos. La tendencia observada en las tres especies consideradas sugiere que la trayectoria de desarrollo del plastrón es semejante en las tres especies.

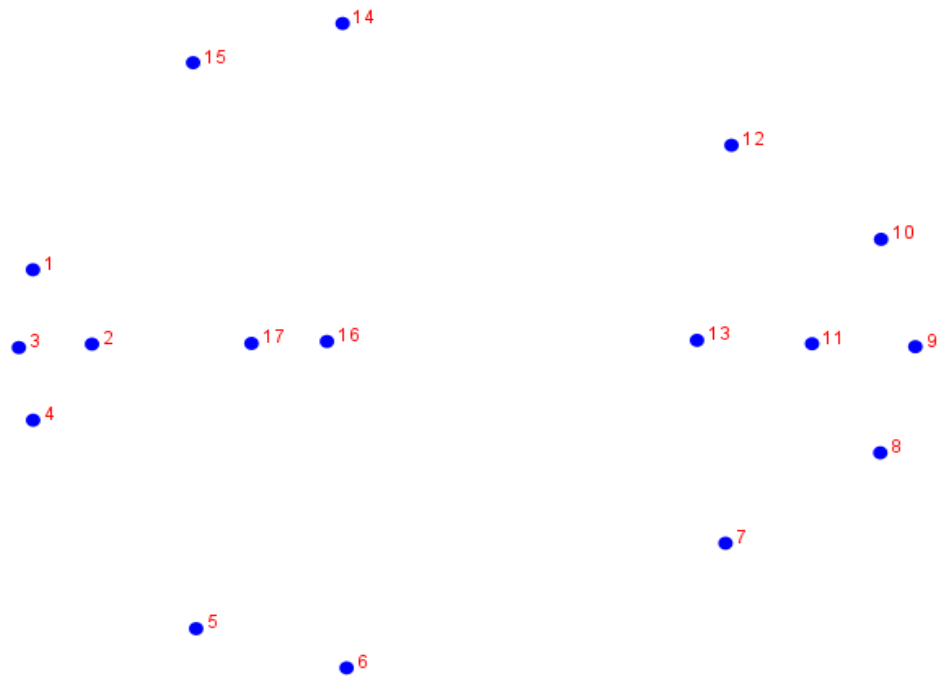
Figura 14. *Relación forma-edad.*



Nota. Se observa una tendencia positiva de los scores de regresión con el incremento de la edad, consistente en las tres especies.

Los vectores de cambio relacionados con la regresión (Figura 16) mostraron que el crecimiento generó principalmente cambios en los puntos de referencia laterales (1, 4, 10) y mediales (13, 17) del plastrón, con desplazamientos menores de los puntos de referencia anteriores (14, 15). Estos resultados apuntan a que las proporciones laterales y la configuración medial del plastrón son las que más se modulan durante el desarrollo temprano, posiblemente ligadas a un crecimiento distinto de los escudos abdominal y femoral.

Figura 15. *Vectores ontogenéticos.*



Edad_dias

Nota. Vectores de cambio de forma de la regresión forma-edad. Los desplazamientos más pronunciados en landmarks laterales y mediales indican los cambios morfológicos ontogenéticos principales.

9. DISCUSIÓN

La intención de este estudio fue determinar diferencias en la morfología de los plastrones entre especies del género *Chelonoidis* utilizando morfometría geométrica basada en puntos de referencia y observar el efecto del sexo y la edad en ellos. Los resultados indican que la forma del plastrón cambia mucho entre diferentes especies del género *Chelonoidis*. El sexo no tiene mucho efecto en los individuos jóvenes. La edad también tiene un efecto, aunque no es muy grande, en la forma del plastrón. Esto nos muestra que la forma del plastrón en las primeras etapas de crecimiento se debe sobre todo a la especie a la que pertenece y, en menor medida, a cómo crece el individuo.

9.1. Diferenciación morfológica entre especies

En relación con el objetivo general y el primer objetivo específico, los análisis de variables canónicas demostraron que la forma del plastrón permitió diferenciar significativamente a *Chelonoidis guntheri*, *Chelonoidis niger* y *Chelonoidis vicina*. La prueba de permutación mostró diferencias muy importantes entre especies ($p < 0.0001$). Las distancias de Mahalanobis mostraron que *C. niger* tuvo la mayor diferencia morfológica en comparación con las especies de Isabela. Estos resultados permitieron aceptar en parte la hipótesis planteada, en especial sobre la existencia de diferencias entre especies en la morfología del plastrón.

Los patrones que vimos coinciden con estudios recientes que muestran que las diferencias en la forma de las tortugas gigantes se deben a procesos evolutivos ligados al aislamiento geográfico y a la divergencia genética entre linajes. Gaughran et al. (2025) confirmaron, usando secuenciación genómica completa, que las tortugas gigantes de Galápagos son especies biológicas diferentes. También señalaron que varios rasgos morfológicos tienen una base genética heredable. Por otro lado, Jensen et al. (2022) encontraron que la forma del caparazón es un rasgo muy relacionado con la identidad genética de las poblaciones de *Chelonoidis*. Por eso, las diferencias que detectamos en este estudio pueden reflejar procesos históricos de diferenciación evolutiva.

Tales hallazgos, de igual modo, corroboran lo documentado por Chiari et al. (2009). Dichos investigadores, de hecho, establecieron que las disparidades morfológicas exhibidas por tortugas gigantes de Galápagos reflejan tendencias de diversificación vinculadas a su linaje evolutivo. De modo análogo, Jensen et al. (2022) apuntaron que la fluctuación en la morfología entre diferentes núcleos de población de *Chelonoidis* representa un recurso adicional para la clasificación taxonómica y la preservación de estos quelonios de isla.

Una clara escisión manifestada en *C. niger* se alinea con la lógica biológica, considerando que la especie emana de la isla Floreana, en contraste con *C. guntheri* y *C. vicina*, cuyos grupos se extienden por distintos ámbitos de la isla Isabela. Sostienen Caccone et al. (2002) y Poulakakis et al. (2020) que los obstáculos geográficos naturales entre las islas del archipiélago impulsaron el aislamiento reproductivo y la divergencia genética, lo que dio lugar a numerosas estirpes de tortugas gigantes. Por lo tanto, las disparidades observadas en el área delantera del plastrón, concretamente en puntos referenciales vinculados a las escamas gulares y humerales, pudiesen ser indicativas de características morfológicas que se han perpetuado a lo largo de la evolución y son valiosas para la distinción taxonómica.

Igualmente las investigaciones indican que la morfometría geométrica funciona como instrumento para la distinción de especies. Eravci Yalin et al. (2024), en sus estudios, pusieron en evidencia que la configuración del caparazón posibilita discernir entre especies de quelonios en cautiverio. Usaron análisis multivariados parecidos a los de este estudio. De igual manera, Oktay et al. (2025) indicaron que la combinación de la Superposición Generalizada de Procrustes y el Análisis de Componentes Principales es una forma sólida de detectar variaciones morfológicas, incluso en individuos juveniles. Entonces, lo que se encontró es que el plastrón tiene suficiente información para distinguir entre especies de *Chelonoidis*. Esto nos da

una forma adicional que complementa las estrategias genéticas que se utilizan en programas de conservación.

Lo más importante de esta investigación es que muestra que las diferencias en la forma de las especies se pueden ver incluso en las primeras etapas de su desarrollo, especialmente al mirar la configuración del plastrón. Tal descubrimiento enriquece la comprensión existente acerca de la morfología de las tortugas gigantes de Galápagos y aporta datos que complementan los análisis genéticos aplicados en las iniciativas de conservación. Asimismo, confirma que la morfometría geométrica constituye una herramienta confiable para apoyar procesos de identificación taxonómica y monitoreo poblacional en condiciones de manejo ex situ.

9.2. Ausencia de dimorfismo sexual en individuos juveniles

Respecto al segundo objetivo específico, los resultados mostraron que no existieron diferencias significativas en la forma del plastrón entre machos y hembras juveniles. Tanto las pruebas de permutación como las distancias de Mahalanobis y Procrustes mostraron una amplia superposición entre ambos grupos. Esto muestra que no hay dimorfismo sexual detectable en el rango de edad estudiado.

Este resultado difiere en parte de la hipótesis planteada. No se encontraron diferencias morfológicas relacionadas con el sexo. Esto no es una contradicción biológica. El hallazgo coincide con el desarrollo ontogenético conocido de las tortugas terrestres. Hermanson y Evers (2025) reportaron que el dimorfismo sexual en la forma del caparazón y del plastrón suele aparecer en etapas avanzadas del crecimiento. Es más común cuando los individuos llegan a la madurez sexual. Estos autores mostraron que el tamaño influye mucho más en la forma que el sexo. También señalaron que muchas especies no presentan diferencias importantes entre machos y hembras durante las etapas juveniles.

Los resultados obtenidos también son consistentes con lo descrito por Berry y Shine (1980) y Valenzuela (2001), quienes indicaron que la principal característica sexual secundaria del plastrón corresponde a la concavidad ventral de los machos adultos, adaptación que facilita la monta durante la reproducción. Debido a que los individuos analizados tuvieron entre 0 y 5 años de edad, es probable que estas estructuras aún no estuvieran completamente desarrolladas, impidiendo la diferenciación sexual a través de la forma del plastrón.

Por otra parte, Figgner et al. (2022) señalaron que en varias especies de tortugas las diferencias sexuales suelen estar relacionadas con el tamaño corporal más que con cambios notables en la forma. En consecuencia, la ausencia de dimorfismo

observada en el presente estudio puede considerarse un patrón esperado para individuos juveniles y confirma que el sexo no constituye un factor relevante para explicar la variación morfológica del plastrón durante las primeras etapas del desarrollo.

9.3. Influencia de la edad sobre la forma del plastrón

En relación con el tercer objetivo específico, la regresión multivariada mostró que la edad influyó significativamente sobre la morfología del plastrón ($p < 0.0001$), aunque explicó únicamente el 3.58 % de la variación total observada. Este resultado indica que existen cambios ontogenéticos en la forma del plastrón, pero que su magnitud es relativamente reducida dentro del rango etario evaluado.

La baja proporción de variación explicada puede atribuirse a que todos los individuos pertenecieron a etapas tempranas del desarrollo. Hermanson y Evers (2025) señalaron que las tortugas juveniles presentan formas más homogéneas que los adultos, y que la diferenciación morfológica asociada a la edad se incrementa progresivamente a medida que los individuos se aproximan a la madurez. Según estos autores, las características propias de la morfología adulta comienzan a

consolidarse cuando los organismos alcanzan aproximadamente el 65 % de su tamaño máximo.

De manera similar, Chatterji et al. (2022) demostraron que la alometría ontogenética constituye uno de los principales mecanismos responsables de los cambios morfológicos en tortugas, generando modificaciones graduales en la forma corporal durante el crecimiento. En el presente estudio, los desplazamientos observados en los landmarks laterales y mediales sugieren que el desarrollo temprano del plastrón involucra ajustes en las proporciones de los escudos abdominales y femorales, aunque estos cambios todavía no alcanzan la magnitud observada en individuos adultos.

Resultados similares han sido descritos para tortugas gigantes de Galápagos, donde los cambios morfológicos durante las primeras etapas de crecimiento ocurren de manera gradual y presentan menor magnitud que las diferencias asociadas a la identidad específica (Chiari et al., 2009; Jensen et al., 2022).

La tendencia positiva observada en las tres especies indica que existe una trayectoria ontogenética común dentro del género *Chelonoidis*. Sin embargo, dado que el efecto de la edad fue relativamente pequeño, es probable que la variación

asociada a la especie tenga un papel más importante que la edad en la determinación de la forma del plastrón durante los primeros años de vida.

9.4. Implicaciones para la conservación y el manejo

Desde una perspectiva aplicada, los resultados obtenidos poseen relevancia para los programas de conservación desarrollados en el Centro de Crianza Fausto Llerena. La morfometría geométrica demuestra su eficacia para discernir entre ejemplares jóvenes de *Chelonoidis*, actuando como un valioso añadido al estudio genético para la administración poblacional y la prevención de cruces indeseados. Particularmente significativo deviene esto en un contexto donde la coexistencia prolongada de variadas especies ha fomentado considerable mezcla genética (Miller et al., 2017). Por otra parte, en lo que concierne a la preservación del archipiélago, estos hallazgos se vuelven cruciales, dado que los esfuerzos de manejo y cría ex situ pretenden resguardar la unicidad genética de los quelonios de gran tamaño.

Tal como indica Galápagos Conservancy (2023), la correcta identificación de cada individuo es crucial para sustentar las estrategias de conservación, reproducción y recuperación que se llevan a cabo en las islas. Por otro lado, Poulakakis et al. (2020)

apuntaron que diferenciar entre linajes constituye un elemento fundamental para preservar la diversidad biológica de las tortugas gigantes de Galápagos.

Asimismo, Semaha et al. (2025) expusieron que la configuración del caparazón puede utilizarse como un criterio de identificación en los programas de conservación y reintroducción de tortugas terrestres. Asimismo, los datos de esta investigación servirán al monitoreo de jóvenes individuos, así como a la evaluación de la variedad de formas en los planes de cría y a la adopción de dictámenes dirigidos a la preservación de la composición genética de las criaturas insulares. Con esto en mente, los hallazgos corroboren la idoneidad de la morfometría geométrica como una táctica rápida, no dañina y costeable para fortalecer los esfuerzos de resguardo fuera del hábitat de las tortugas colosales de Galápagos.

10.CONCLUSIONES

La morfometría geométrica basada en landmarks permitió identificar diferencias significativas en la forma del plastrón entre *Chelonoidis guntheri*, *Chelonoidis niger* y *Chelonoidis vicina*, cumpliendo así el objetivo general y el primer objetivo específico de la investigación. El análisis discriminante (CVA) mostró que *C. niger* era la especie con mayor diferencia en su forma en comparación con las especies de Isabela. Las constataciones actuales respaldan firmemente la utilidad del contorno del caparazón, su morfología, en la diferenciación de las distintas especies adscritas al género *Chelonoidis*.

De forma asombrosa, no se observaron disparidades significativas en la forma del plastrón entre los ejemplares masculinos y femeninos de las especies en cuestión. Es muy probable, que esta constatación señale una fase incipiente del dimorfismo sexual en las juveniles estudiadas. Por lo tanto, esta deducción demuestra con certeza la poca importancia que el género tiene en la arquitectura del plastrón al principio de su formación.

La edad influyó en la forma geométrica del plastrón donde se observaron cambios ligados al desarrollo de los individuos. Aunque este efecto fue menor que el que se encontró entre especies, los resultados mostraron que tanto la especie como la edad afectan la variación de la forma. El sexo no tuvo una influencia detectable. Por lo tanto, los resultados apoyaron en parte la hipótesis alternativa propuesta.

11.RECOMENDACIONES

Incorporar la morfometría geométrica como herramienta complementaria a los análisis genéticos que se usan en el Centro de Crianza Fausto Llerena. Así se fortalece la identificación de especies, se contribuye al monitoreo de individuos juveniles y se apoya a los programas de conservación y manejo de tortugas gigantes de las Galápagos.

Realizar investigaciones futuras que incluyan individuos subadultos y adultos, con el propósito de evaluar el desarrollo progresivo del dimorfismo sexual y determinar a partir de qué etapa del crecimiento las diferencias morfológicas entre machos y hembras se vuelven evidentes en el plastrón.

Investigaciones subsecuentes tendrían que abarcar un abanico etario y una cantidad de táxones mucho más extensa. Igualmente, la incorporación de estudios que fusionen la morfometría geométrica con exploraciones genéticas moleculares se vuelven esenciales. Tal abordaje, innegablemente, posibilitará un entendimiento más profundo respecto a las fuerzas evolutivas, los modelos de cambio a lo largo del crecimiento, la separación de linajes y las tácticas más eficaces para

salvaguardar a las comunidades de *Chelonoidis* en el archipiélago insular de Galápagos.

BIBLIOGRAFIA

Arias, F. G. (2012). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (6.^a ed.). Episteme.

Arteaga, A., & Guayasamin, J. (2024). *Tortuga gigante de Cerro Azul (Chelonoidis vicina)*. En: Arteaga A, Bustamante L, Vieira J (Eds) *Reptiles de Ecuador: Vida en el centro del mundo*.
https://www.reptilesofecuador.com/chelonoidis_vicina.html

Barros, M. S., Silva, A. G., & Ferreira Junior, P. D. (2012). *Morphological variations and sexual dimorphism in Chelonoidis carbonaria (Spix, 1824) and Chelonoidis denticulata (Linnaeus, 1766)(Testudinidae)*. *Brazilian Journal of Biology*, 72, 153-161.
<https://www.scielo.br/j/bjb/a/PpqM86dq5FpJhcNXrkhRjCn/?lang=en&format=html>

Berry, J. F., & Shine, R. (1980). *Sexual size dimorphism and sexual selection in turtles (Order Testudines)*. *Oecologia*, 44(2), 185-191.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00572678>

Bookstein, F. L. (1997). *Morphometric tools for landmark data (p. 455)*.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997mtId.book.....B/abstract>

Caccone, A., Gentile, G., Gibbs, J. P., Fritts, T. H., Snell, H. L., Betts, J., & Powell, J.

R. (2002). *Phylogeography and history of giant Galápagos tortoises.*

Evolution, 56(10), 2052–2066. <https://pubs.usgs.gov/publication/1015235>

Cardini, A. (2010). *GEOMETRIC MORPHOMETRICS.*

<https://doi.org/https://www.eolss.net/sample-chapters/c03/E6-71->

37.pdf

Cardini, A. (2025). Measurement error and effect size in geometric

morphometrics: assessing the impact of 2D landmark digitization error in

interspecific comparisons of Procrustes shape data. *Zoomorphology*,

144(2), 32.

<https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/s00435-025->

00717-3

Chatterji, R. M., Hipsley, C. A., Sherratt, E., Hutchinson, M. N., & Jones, M. E.

(2022). Ontogenetic allometry underlies trophic diversity in sea turtles

(Chelonioidea). *Evolutionary Ecology*, 36(4), 511–540.

Chiari, Y., Hyseni, C., Fritts, T. H., Glaberman, S., Marquez, C., Gibbs, J. P., . . .

Caccone, A. (2009). *Morphometrics parallel genetics in a newly discovered*

and endangered taxon of Galápagos tortoise. PLOS ONE, 4(7), e6272.

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.00062>

Chiari, Y., van der Meijden, A., Caccone, A., Claude, J., & Gilles, B. (2017). *Self-righting potential and the evolution of shell shape in Galápagos tortoises. Sci Rep 7, 15828.* . <https://www.nature.com/articles/s41598-017-15787-7>

Claude, J., Paradis, E., Tong, H., & Auffray, J. C. (2003). A geometric morphometric assessment of the effects of environment and cladogenesis on the evolution of the turtle shell. *Biological Journal of the Linnean Society*, 79(3), 485-501. (<https://academic.oup.com/biolinnean/article-abstract/79/3/485/2639824>), 485.

Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Código Orgánico del Ambiente. Quito, Ecuador: Asamblea Nacional de la República de Ecuador, 92.*

Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador. Quito: Tribunal Constitucional del Ecuador. Registro oficial Nro, 449, 79-93.* <https://duran.gob.ec/wp-content/uploads/transparencia/biblioteca/2024/Normativa/CONSTITUCION%20DE%20LA%20REPUBLICA.pdf>

Eravci Yalin, E., Gündemir, O., Günay, E., Vatansever Çelik, E. C., Duro, S., Szara, T., . . . Spataru, M.-C. (2024). Carapace morphology variations in captive tortoises: Insights from three-dimensional analysis. *Animals*, 14(18), 2664.

Falcón, W., & Hansen, D. M. (2018). *Island rewilding with giant tortoises in an era of climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 373(1761).*

<https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/373/1761/20170442/2359>

2

Figgener, C., Bernardo, J., & Plotkin, P. T. (2022). Marine turtles are only minimally sexually size dimorphic, a pattern that is distinct from most nonmarine aquatic turtles. *Ecology and Evolution*, 12(6), e8963.

Galápagos Conservancy. (2023). *Giant tortoise restoration in the Galápagos Islands*. <https://www.galapagos.org/conservation/giant-tortoise-restoration/>

Galápagos Conservancy. (2024). *Isabela's Giant Tortoise Breeding Center Gets Upgraded*. <https://www.galapagos.org/newsroom/isabela-giant-tortoise-breeding-center-gets-upgraded/>

Gaughran, S. J., Gray, R., Ochoa, A., Jones, M., Fusco, N., Miller, J. M., . . . Jensen, E. L. (2025). Whole-genome sequencing confirms multiple species of Galapagos giant tortoises. *Evolution*, 79(2), 296–308.

Gilbert, S. F., Loredó, G. A., Brukman, A., & Burke, A. C. (2001). *Morphogenesis of the turtle shell: the development of a novel structure in tetrapod evolution*. *Evolution & development*, 3(2), 47-58.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1525-142x.2001.003002047.x>

Hermanson, G., & Evers, S. W. (2025). Turtles reach adult shell shapes at about 65% maximum carapace length. *Swiss Journal of Palaeontology*, 144, 47.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education.

Jensen, E. L., Gaughran, S. J., Fusco, N. A., Poulakakis, N., Tapia, W., Sevilla, C., & Caccone, A. (2022). The Galápagos giant tortoise *Chelonoidis phantasticus* is not extinct. *Communications Biology*, 5, 546.

Jensen, E. L., Quinzin, M. C., Miller, J. M., Russello, M. A., Garrick, R. C., Edwards, D. L., . . . Caccone, A. (2022). *A new lineage of Galapagos giant tortoises identified from museum samples. Heredity, 128(4), 261-270.*
<https://www.nature.com/articles/s41437-022-00510-8>

Klingenberg, C. P. (2011). MorphoJ: An integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*, 11(2), 353–357.

Miller, J. M., Quinzin, M. C., Poulakakis, N., Gibbs, J. P., Beheregaray, L. B., Garrick, R. C., . . . Caccone, A. (2017). *Identification of genetically important individuals of the rediscovered Floreana Galápagos Giant Tortoise (Chelonoidis elephantopus) provides founders for species restoration program. Scientific reports, 7(1), 11471.*
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-11516-2>

Ministerio del Ambiente y Energía. . (2025). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2025–2030*.

Myers, E. M., Janzen, F. J., Adams, D. C., & Tucker, J. K. (2006). QUANTITATIVE GENETICS OF PLASTRON SHAPE IN SLIDER TURTLES (TRACHEMYS SCRIPTA). *Department of Ecology, Evolution, and Organismal Biology, Iowa State University, Ames, Iowa* 500(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.0014-3820.2006.tb01137.x>), 563–572.

Naciones Unidas. (2020). *Objetivos de desarrollo sostenible: Objetivo 15 – Vida de ecosistemas terrestres*.

Oktay, E., Boz Doğan, İ., Duro, S., Pazvant, G., Yiğit, F., & Szara, T. (2025). Geometric morphometric analysis of adult and juvenile turtle shells: Directional asymmetry and fluctuating asymmetry. *Diversity*, 17(4), 241.

Parés-Casanova, P. M., Soler, J., Buisán, T., & Martínez-Silvestre, A. (2022). Symmetry-breaking stabilities in carapace curvature on Testudo (Reptilia, Testudinidae). *Symmetry*, 14(3), 471.

Poulakakis, N., Miller, J. M., Jensen, E. L., Beheregaray, L. B., Russello, M. A., Glaberman, S., . . . Caccone, A. (2020). *Colonization history of Galapagos giant tortoises: Insights from mitogenomes support the progression rule. Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 58(4), 1262-1275. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jzs.12387>

Pritchard, P. C. (1996). *The Galápagos tortoises: nomenclatura and survival status.*

Lunenburg, Mass. Chelonian Research Foundation.

República del Ecuador. (1998). *Ley de Regimen Especial para la conservacion y*

desarrollo sustentable de la provincia de Galapagos. Ministerio de Medio

Ambiente: Programa de Manejo Ambiental para las Islas Galapagos.

Rice, R., Kallonen, A., Cebra-Thomas, J., & Gilbert, S. F. (2016). Development of the

turtle plastron, the order-defining skeletal structure. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, 113(19), 5317-5322.

(<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1600958113>).

Rubin, A. M., Blob, R. W., & Mayerl, C. J. (2018). *Biomechanical factors influencing*

successful self-righting in the pleurodire turtle Emydura subglobosa.

Journal of Experimental Biology, 221(14), jeb182642.

[https://journals.biologists.com/jeb/article-](https://journals.biologists.com/jeb/article-abstract/221/14/jeb182642/19677)

[abstract/221/14/jeb182642/19677](https://journals.biologists.com/jeb/article-abstract/221/14/jeb182642/19677)

Sander, P. M., & Scheyer, T. M. (2007). *Shell bone histology indicates terrestrial*

palaeoecology of basal turtles. Proceedings of the Royal Society B:

Biological Sciences, 274(1620), 1885-1893.

<https://royalsocietypublishing.org/rspb/article/274/1620/1885/76597>

Scheyer, T. M., & Sánchez-Villagra, M. R. (2007). *Carapace bone histology in the*

giant pleurodiran turtle Stupendemys geographicus: phylogeny and

function. Acta Palaeontologica Polonica, 52(1).

<https://yadda.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-article-39679469-ef8f-415b-bd93-e1c47cd246c6>

Semaha, M. J., Rodríguez-Caro, R. C., Graciá, E., Giménez, A., & Botella, F. (2025).

Captive-introduced tortoises in wild populations: Can we identify them by shell morphology? *European Journal of Wildlife Research*, 71, 8.

Sterling, E. J., Gibbs, J. P., & Zabala, F. J. (2010). *Giant tortoises as ecological*

engineers: a long-term quasi-experiment in the Galápagos Islands.

Biotropica, 42(2), 208-214.

[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7429.2009.00552.x)

[7429.2009.00552.x](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7429.2009.00552.x)

Tamayo, & Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica* (4.^a ed.).

Limusa.

Valenzuela, N. (2001). *Maternal effects on life-history traits in the Amazonian giant*

river turtle Podocnemis expansa. Journal of Herpetology, 368-378.

<https://www.jstor.org/stable/1565954>

von May, R. (2021). *Reptiles of the Galápagos: Life on the Enchanted Islands.*

Ichthyology & Herpetology, 109(1), 327-332.

[https://bioone.org/journals/ichthyology-and-herpetology/volume-](https://bioone.org/journals/ichthyology-and-herpetology/volume-109/issue-1/t2020116/BOOK-REVIEWS/10.1643/t2020116.short)

[109/issue-1/t2020116/BOOK-REVIEWS/10.1643/t2020116.short](https://bioone.org/journals/ichthyology-and-herpetology/volume-109/issue-1/t2020116/BOOK-REVIEWS/10.1643/t2020116.short)

Yale University. (2019). *Evolutionary genetics and conservation of Galapagos Tortoises* | Center for Genetic Analyses of Biodiversity. Yale University:
<https://cgab.yale.edu/projects/conservation-genetics/evolutionary-genetics-and-conservation-galapagos-tortoises>

Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: A primer* (2nd ed.). Academic Press.

Zelditch, M., Swiderski, D., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer. academic press.*
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5DLZ4IALRTEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Zelditch,+M.+L.,+Swiderski,+D.+L.,+Sheets,+H.+D.,+%26+Fink,+W.+L.+\(2012\).+Geometric+morphometrics+for+biologists:+A+primer+\(2nd+ed.\).+Academic+Press.&ots=rWijPd60qY&sig=FykofphpXpGzQ](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5DLZ4IALRTEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Zelditch,+M.+L.,+Swiderski,+D.+L.,+Sheets,+H.+D.,+%26+Fink,+W.+L.+(2012).+Geometric+morphometrics+for+biologists:+A+primer+(2nd+ed.).+Academic+Press.&ots=rWijPd60qY&sig=FykofphpXpGzQ)

ANEXOS

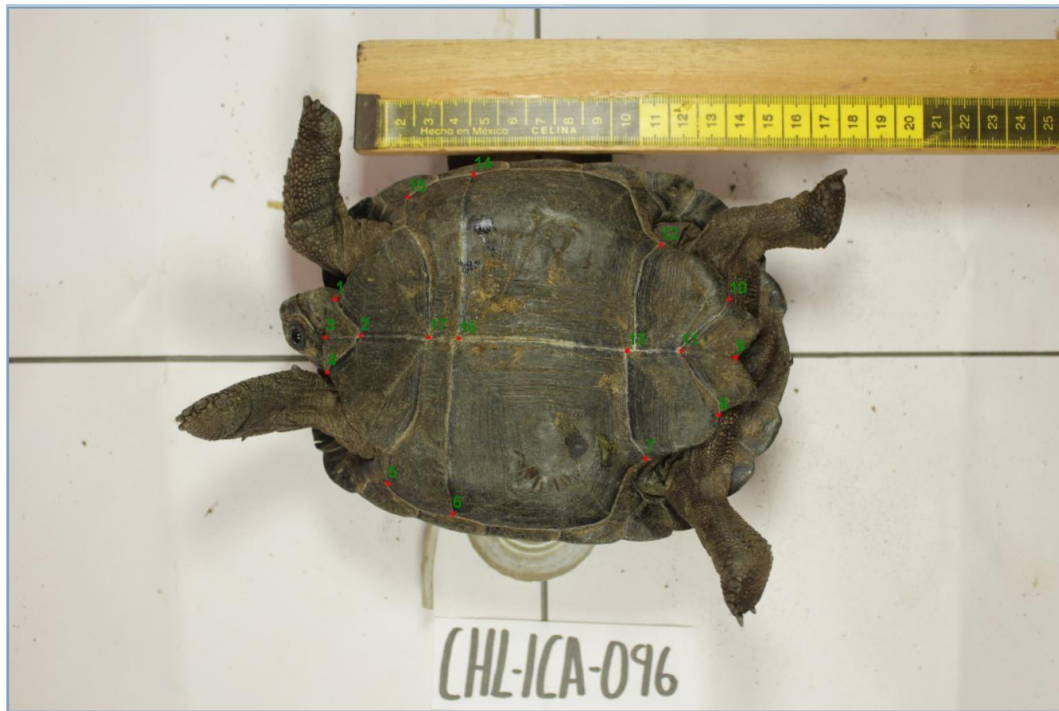
Anexo A. Evidencia fotográfica del proceso experimental durante la toma de datos



Anexo B. *Registro fotográfico de las actividades de muestreo y monitoreo*



Anexo C. Registro fotográfico de la morfología geométrica del plastrón



Isabela Cerro Cazuela (*C. guntheri*)



Floreana (*C. niger*)



Isabela Cerro Paloma (*C. guntheri*)



Isabela Cinco Cerros (*C. vicina*)

DIRECCIÓN DEL PARQUE NACIONAL GALÁPAGOS (DPNG)
DIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL
PERMISO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA: N° PC-78-25

Título del Proyecto: Conservando Galápagos: investigación integral de especies clave y sus ecosistemas – Componente Tortugas gigantes.	
Nombre del Investigador principal: Jorge Enrique Carrión Tacuri email: jorge@galapagos.org	Contraparte DPNG: Christian Sevilla Paredes
Participantes: James P. Gibbs, Daniel Sherman, Amy Doherty, Jessica Proctor, Charles Lehnen, Adalgisa Caccone, Joseph Flanagan, Gregory Lewbarth, Evelyn Jensen, Rachel Gray, Erika Kubisch, Diego Páez, Janai Yépez, Adrián Cueva, Roberto Jiménez, Walter Chimborazo, Cristian Gil, Carolina Loyola, Sebastián Ballesteros, Luis Sánchez, Williams Castro, Xavier Castro, David Liberio, Alan López	
Institución: Fundación Conservando Galápagos	
Se requiere coleccionar muestras: SI.	
Vigencia del Permiso de Investigación: 08 de octubre de 2025 al 08 de octubre de 2027.	
Condiciones de cumplimiento: - Cumplir estrictamente con todas las regulaciones establecidas en el Manual de Procedimientos para Científicos Visitantes y Protocolos para viajes de Campo y Campamentos en las Islas Galápagos. - Los investigadores principales o participantes que registren incumplimientos a las obligaciones contenidas en los permisos de investigación, no podrán participar en ninguna de las fases de los proyectos de investigación aprobadas por esta Dirección. - La participación y coordinación con la contraparte institucional es obligatoria y vinculante en el desarrollo y administración de los proyectos de investigación científica, la contraparte asignada precautelar el uso de metodologías de mínimo impacto (no invasiva) sobre las especies objeto de estudio o ecosistemas. - El permiso de investigación no faculta la ejecución de actividades de interpretación o educación ambiental en las áreas de estudio autorizadas. Para ello, es necesario gestionar oportunamente con la Dirección de Educación y Participación Social de la DPNG la autorización respectiva. - La colección de muestras autorizadas en el marco del presente permiso de investigación, no podrán ser utilizadas en actividades de BIOPROSPECCIÓN, NI ACCESO AL RECURSO GENÉTICO. - El material audiovisual que se genere al amparo del permiso de investigación, tiene como finalidad únicamente alcanzar los objetivos científicos del proyecto propuesto. En el caso de requerir material audiovisual para comercializar, difundir por redes u otros medios, deberá oportunamente gestionar con la Dirección de Educación Ambiental y Participación Social de la DPNG la autorización correspondiente. - Los datos, muestras o elementos constitutivos son propiedad del Estado ecuatoriano. En consecuencia, el investigador principal deberá entregar referida información, mediante un oficio, a la máxima autoridad de la Dirección del Parque Nacional Galápagos. - El almacenamiento de la información científica estará a cargo del Departamento de Gestión Tecnológica; la administración de esta información será asumida por el Departamento de Investigación Aplicada en coordinación con las contrapartes institucionales, y su uso será exclusivamente para definir acciones de manejo. - Para la renovación de permisos de investigación, se requiere presentar lo siguiente: - Una copia digital (Tabla de Excel 97-2003) de los datos obtenidos durante la ejecución del proyecto. - INFORME EJECUTIVO del proyecto con todos los detalles de la investigación, y sus recomendaciones técnicas aplicables al manejo de las Áreas Protegidas. Incluyendo un capítulo que detalle específicamente el uso actual de muestras colectadas y la justificación técnica para nuevas colecciones, así como la difusión de resultados del proyecto a un grupo meta (estudiante, guías, etc.) - Artículos y publicaciones en caso de haberse generado (versión digital/idioma español). - La ejecución de actividades (metodología, muestras, etc.) no autorizadas, o el uso indebido del permiso de investigación, motivarán la suspensión inmediata del mismo.	
Condiciones de Control y Seguimiento: - Únicamente el equipo de investigación autorizado en el presente documento, se encuentra habilitado a participar en cada una de las fases que comprende el desarrollo de la propuesta de investigación aprobada. - El investigador principal deberá presentar un CRONOGRAMA DE SALIDAS DE CAMPO a su contraparte institucional asignada, a fin de acordar la presencia o no de un guardaparque (dependiendo disponibilidad o sensibilidad ecológica del sitio). - Prevía a la salida de campo (con 72 horas de anticipación), el investigador principal deberá presentar el AVISO DE VIAJE DE CAMPO de acuerdo con el formato establecido, y coordinar sus actividades de cuarentena (48 horas de anticipación) con los responsables del Proceso de Conservación y Restauración de Ecosistemas Insulares de la DPNG o Unidades Técnicas. - Durante las salidas de campo, el investigador principal deberá portar una copia legible del Permiso de Investigación aprobado y Aviso de Viaje de Campo, y brindar todas las facilidades a efectos de ejecutar las acciones de control por parte del personal Guardaparque. - Posterior a la salida de campo, el investigador principal deberá remitir un INFORME TÉCNICO DE CAMPO por cada aviso de viaje autorizado, en un máximo de 5 días laborables. - Durante el trabajo de campo en sitios con acceso de turistas, deberá evitarse el contacto con estos, y no manipular fauna y flora mientras haya visitantes en el sitio. De no ser posible, el investigador principal deberá brindar una breve explicación de las actividades de investigación a los visitantes y posteriormente retomar el desarrollo de sus actividades. - El investigador deberá remitir de forma obligatoria, la versión final aceptada de toda publicación científica antes de su difusión pública, en calidad de embargo, con el fin de que esta Dirección conozca anticipadamente los resultados y prepare las medidas de manejo correspondientes. Esta revisión no implica censura, sino una coordinación formal entre la comunidad científica y la autoridad ambiental. - Para inclusión de nueva metodología, sitios de estudio, muestras, etc., el investigador principal deberá coordinar con la contraparte institucional asignada (pronunciamiento de viabilidad), y presentar su petición de acuerdo al formato de SOLICITUD DE INCLUSIÓN.	

**DIRECCIÓN DEL PARQUE NACIONAL GALÁPAGOS (DPNG)
DIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL
PERMISO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA: N° PC-78-25**

19. **Los sitios autorizados son:** Floreana, Fernandina, Pinta, Isabela (sur, norte, volcán Wolf, Cazuela, Cerro Paloma, Roca Unión, San Pedro y Cinco Cerros), Santa Fe, Española, Santa Cruz, Isabela y San Cristóbal.
20. **Se autoriza** instalar dispositivos Geoforce GT0 y GT1s con transmisores VHF (hembra: placa costal izquierda anterior, posterior al escudo nuchal/macho: placa vertebral posterior, próxima al escudo supracaudal), para registrar posición diaria por individuo, trayectorias mediante SIG y análisis de selección de hábitat; así como, desarrollo y prueba de nuevos dispositivos para registro de ubicación y variables ambientales.
21. **Se autoriza** realizar recorridos de transectos sistemáticos, registrando individuos observados (GPS), sexo, estadio etario, medidas morfométricas (largo y ancho curvo del caparazón, largo del plastrón, apertura del caparazón, peso), fotografías y condición corporal.
22. **Se autoriza** realizar marcaje individual (microchips subcutáneos y marcas temporales en el caparazón) para aplicar modelos de marcaje-recaptura, e integración de datos, análisis con modelos de abundancia – densidad y estructura poblacional; y realizar contraste de nuevos censos con registros históricos.
23. **Se autoriza** realizar registro fotográfico estandarizado del plastrón en individuos de los centros de crianza de Santa Cruz e Isabela, para evaluar variaciones asociadas a especie, sexo y edad (landmarks anatómicos, análisis mediante Procrustes y métodos multivariados).
24. **Se autoriza** identificar semillas (heces) y restos vegetales (guía de semillas y propágulos de Galápagos), clasificar morfotipo y abundancia para estimar dispersión de especies vegetales clave, y realizar análisis de dieta mediante isótopos estables ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) en tejidos queratinicos y/o fecales.
25. **Se autoriza** liberar tortugas en la isla Floreana, en coordinación con la DPNG, e implementar un protocolo de monitoreo post-liberación, incluyendo rastreo satelital, observaciones directas y medición periódica de indicadores de crecimiento, dispersión, supervivencia y condición corporal; además de una evaluación de indicadores de restauración ecológica, vinculados al rol funcional de las tortugas, en particular herbivoría y dispersión de semillas.
26. **Se autoriza** revisar registros históricos de presencia y abundancia de tortugas gigantes, integrando datos de expediciones pasadas y DPNG, y organización de talleres científicos-técnicos con especialistas nacionales e internacionales para discutir escenarios de restauración y alternativas de manejo.
27. **Se autoriza** realizar modelos de viabilidad poblacional y estudios de hábitat para evaluar la capacidad de las islas de sostener poblaciones de tortugas a largo plazo (Fernandina: análisis del uso potencial de la tortuga "Fernanda" y de híbridos con ascendencia de *Chelonoidis phantasticus* provenientes del volcán Wolf / Pinta: evaluación de la extracción de reproductores del volcán Wolf con ascendencia parcial de *C. abingdonii* o, en su defecto, la repoblación de la isla con una especie análoga siguiendo el modelo aplicado en Santa Fe).
28. **Se autoriza** realizar expediciones anuales (rutas de muestreo estandarizadas), búsqueda sistemática de nidos (recorridos planificados - observación directa) y registro poblacional de tortugas (abundancia, estructura etaria, condición corporal y dispersión espacial).
29. **Se autoriza** realizar monitoreo de regeneración y reclutamiento de cactus (*Opuntia* spp. / y otras especies de flora nativa), seguimiento de dinámica poblacional de iguanas terrestres pálidas (*Conolophus pallidus*) y evaluación de interacciones tortuga-iguana.
30. **Se autoriza** registrar cambios en la estructura del hábitat como indicadores de restauración ecológica, e integración de información en bases de datos de la DPNG para gestión y toma de decisiones.
31. **Se autoriza** fortalecer parámetros de incubación (temperatura, humedad y tasas de eclosión) para maximizar supervivencia y calidad de neonatos, optimizar condiciones de crianza en corrales, y vigilar salud de neonatos y reproductores.
32. **Se autoriza** implementar programas de capacitación continua para el personal técnico y operativo (bioseguridad, manejo reproductivo, bienestar animal - técnicas de crianza), y establecer estándares unificados entre centros - sistema de monitoreo basado en indicadores biológicos y de bienestar animal.
33. **Se autoriza** recolectar huevos y neonatos en el sur de Isabela (incluye prospección y marcaje de nidos, extracción y traslado bajo cadena de custodia, cuarentena y evaluación sanitaria, incubación controlada y crianza temprana, identificación/trazabilidad, y repatriación con monitoreo posterior).
34. **Se autoriza** realizar censo y georreferenciación de cactus (*Opuntia* spp.), registrando estadio (juvenil, subadulto, adulto) y altura.
35. **Se autoriza** realizar monitoreo de parcelas circulares de 25 m. de radio, registro de cobertura vegetal, número y altura de cactus, así como abundancia de tortugas e iguanas.
36. **Se autoriza** realizar conteo de heces de tortugas e iguanas como indicadores indirectos de herbivoría y dispersión de semillas, comparación de parcelas históricas y nuevas (tendencias de regeneración y cambios en la composición vegetal), e integración de información en bases centralizadas (análisis de relación entre densidad de tortugas y procesos de regeneración).
37. **Se autoriza** instalar cámaras trampa Reconyx HyperFire 4K Ultra HD para registrar frecuencia, duración y tipo de interacciones, entre tortugas gigantes y otras especies de flora y fauna, incluyendo especies introducidas (observaciones directas estandarizadas en campo, variables ambientales, identificación de especies de flora - fauna asociadas a las interacciones, y generar bases de datos georreferenciadas).
38. **Se autoriza** instalar estaciones meteorológicas automáticas para registrar temperatura, humedad y precipitación de forma continua; y uso de sensores de campo para medir parámetros edáficos como pH, textura y humedad del suelo.
39. **Se autoriza** integrar datos ambientales locales con información proveniente de dispositivos de rastreo de tortugas gigantes, completar registros con plataformas satelitales (precipitación, NDVI, temperatura de superficie terrestre), y construir series temporales para evaluar la relación entre disponibilidad de recursos, condiciones climáticas y comportamiento migratorio.
40. **Se autoriza** coleccionar y movilizar únicamente las muestras que se detallan a continuación:

Tipo de muestra	Cantidad (unidades)	Especie o Nombre común	Tipo de análisis	Laboratorio
Huevos	Variable por temporada – definida por contraparte institucional en campo. Traslado en contenedor con sustrato inerte (vermiculita), orientación conservada; ingreso a incubadora; sin fijación química.	<i>Chelonoidis</i> sp.	Crianza ex situ (incubación).	Centro de Reproducción y Crianza Arnaldo Tupiza Chamaidán

DIRECCIÓN DEL PARQUE NACIONAL GALÁPAGOS (DPNG)
DIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL
PERMISO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA: N° PC-78-25

Neonatos	Variable por temporada – definida por contraparte institucional en campo. Cuarentena; evaluación clínica; registro morfométrico; crianza en corrales.	Chelonoidis sp.	Crianza ex situ.	Centro de Reproducción y Crianza Arnaldo Tupiza Chamaidán
Heces	50 funda Ziploc estéril rotulada. Traslado en frío. Submuestra A (dieta/semillas): lavado con agua a través de tamiz, secado (sombra o estufa ≤60 °C) y almacenamiento de la fracción sólida/semillas en sobre de papel o vial seco. Submuestra B (salud, opcional): 2–5 g en etanol 96 %, congelada.	Aegialomys galapagoensis	Dieta (identificación de semillas; isótopos estables); Salud.	Galápagos (ABG) Universidad de las Américas Yale University University of Newcastle
Pelos	50 lote. Mechón de 10–30 pelos con bulbo en sobre de papel o vial seco; sin preservante, seco a temperatura ambiente.	Aegialomys galapagoensis	Dieta (isótopos estables)	Galápagos (ABG) Universidad de las Américas Yale University University of Newcastle

Referencia legal: Mediante Resolución N° 71 del 14 de diciembre de 2012, se delega al Director de Gestión Ambiental suscribir permisos de investigación científica en las áreas protegidas de Galápagos.

Fecha de emisión:
08 de octubre de 2025.



Firmado electrónicamente por:
**EDWIN RODRIGO
ROBALINO GARCÉS**
Validar únicamente con FirmaEC

Director de Gestión Ambiental
DIRECCIÓN DEL PARQUE NACIONAL
GALÁPAGOS



Parque Nacional
GALÁPAGOS
Ecuador

Sello PNG