



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Laboratorio de Ecofisiología Animal

**Actividad cardiaca durante la termorregulación del Alicante de Montaña,
Barisia imbricata (Squamata: Anguidae)**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

LAURA SONIA ARZATE GARAY

ASESORES:

JOSELE RICARDO FLORES SANTIN (Asesor)
OSWALDO HERNÁNDEZ GALLEGOS (Coasesor)



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

JUNIO 2022

Índice

Resumen.....	4
Introducción	5
Antecedentes	7
Objetivos	8
General	8
Particulares	8
Hipótesis	9
Materiales y Métodos	9
- Área de estudio.....	9
- Colecta de individuos.....	10
- Registro de actividad cardiaca y temperatura.....	11
- Cámara térmica	12
Análisis de datos	13
Resultados	14
Discusión	25
Conclusiones	27
Referencias bibliográficas	28

Resumen

En animales ectotermos la efectividad de la termorregulación puede incrementarse por cambios en la transferencia interna de calor provocados por modificaciones en la frecuencia cardíaca y el flujo sanguíneo. El corazón de algunos reptiles puede presentar incremento en la frecuencia cardíaca durante el aumento de temperatura que será más rápido que durante la disminución de temperatura. El Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*, es una especie de lagartija de la cual se tienen registros a elevaciones altas, temperaturas extremas (-3 a 35 °C) y ambientes de hipoxia relativa. Se plantea que *B. imbricata* tiene mecanismos fisiológicos adaptativos cardiovasculares para hacer frente a ambientes estocásticos. Este estudio plantea una respuesta de histéresis cardíaca en *B. imbricata* similar a la registrada en lacertilios grandes (*Pogona sp.* y *Varanus sp.*). Se instrumentaron individuos adultos de *B. imbricata* con sensores de ritmo cardíaco para luego someterlos a un régimen de cambios de temperatura (5°C hasta 35 °C). Los resultados muestran que el corazón de *B. imbricata* presenta diferencia en la frecuencia cardíaca ante cambios de temperatura. La temperatura corporal muestra diferencia significativa en el régimen de calentamiento, excepto de 20 a 25 °C temperaturas que coinciden con temperaturas operacionales y temperaturas preferenciales registradas para la especie. La frecuencia ventilatoria registrada presenta diferencias significativas antes cambios de temperatura. El Q10 de la frecuencia cardíaca aumenta con la temperatura ambiental (Q10= 1.36 - 19.6) mientras el de la frecuencia ventilatoria disminuye (Q10= 1.46 - 1.11) en rangos de temperatura de 10- 35 °C. La lagartija *B. imbricata* tiene la capacidad de amortiguar la pérdida de calor durante el enfriamiento y tiene la capacidad de realizar una termorregulación fisiológica como reptiles de gran tamaño.

Introducción

La temperatura es uno de los factores ambientales más importantes para los organismos ectotermos como los reptiles, anfibios, peces y la mayoría de los invertebrados, debido a su nula capacidad de producir calor metabólico. Estos dependen de fuentes externas de calor para mantener su temperatura corporal constante (Avery, 1979).

La termorregulación en reptiles y en otros ectotermos es un proceso regulatorio que implica aspectos conductuales, morfo-fisiológicos y características térmicas de su ambiente. Esto les permite alcanzar y mantener su temperatura operacional, la temperatura operacional es el estado térmico en el cual se optimizan los procesos enzimáticos de las células de los diferentes sistemas, lo que les permite realizar sus actividades biológicas cotidianas (Cowles & Bogert, 1944; Avery, 1979). El intercambio de calor entre el ambiente y el organismo se da mediante los siguientes procesos físicos: radiación, convección y conducción (Vitt & Caldwell, 2013).

El factor que influye de manera más prominente en el comportamiento de los reptiles es la temperatura. Un reptil por debajo de su temperatura operacional será menos activo que un reptil dentro de su temperatura operacional, por lo tanto, su capacidad de desempeño refleja la influencia de la temperatura en la optimización de los procesos fisiológicos y conductuales, tales como la alimentación, el crecimiento, la reproducción, el desempeño locomotor y el escape de depredadores, siendo estas características determinantes en la supervivencia del organismo (de la Vega-Pérez et al., 2014).

Los reptiles por su estrategia de calentamiento se pueden dividir en: heliotermos, que son animales que obtienen calor directamente de la exposición directa a la radiación solar y tigmotermos que son animales que obtienen calor por contacto con alguna superficie, ya sea sustrato o rocas (Vitt & Caldwell, 2013). Aunque estos términos son útiles, se debe tener cuidado al usarse, ya que algunos animales usan ambos modos para la obtención de calor (Hutchison & Drupe, 1992).

En los reptiles heliotérmicos se regula la temperatura corporal aprovechando el tiempo de exposición al sol, así como usando algunas superficies cálidas del ambiente para obtener calor, también usan refugios, y superficies frescas para perder exceso de calor (Vitt & Caldwell, 2014).

Entonces los reptiles heliotérmicos regulan su temperatura corporal por mecanismos mayormente conductuales, pero la efectividad de esta termorregulación conductual puede incrementarse por cambios en la transferencia interna de calor provocados por modificaciones en la frecuencia cardíaca y el flujo sanguíneo. El aumento de la frecuencia cardíaca aumenta el flujo sanguíneo optimizando la transferencia de calor cutáneo a los órganos y músculos, aumento en la eficiencia esta mediado por el corazón. (Seebacher, 2000).

El corazón en vertebrados ha tenido diversos cambios a lo largo de la evolución desde una sola aurícula y un solo ventrículo a un sistema circulatorio doble, con dos aurículas separadas y una división parcial o completa del ventrículo en vertebrados que respiran aire (Hicks & Wang, 2012). El corazón de los escamados y tortugas es tricameral, tiene dos aurículas y un ventrículo no dividido. El ventrículo se divide en cavum arterioso, cavum venoso y cavum pulmonar. La aurícula derecha recibe sangre venosa desoxigenada del seno venoso y desemboca en el cavum venoso del ventrículo. La aurícula izquierda recibe sangre oxigenada de los pulmones a través de las venas pulmonares y desemboca en el cavum arteriosum (Kardong, 2006).

En cuanto a la función el corazón de algunos reptiles puede presentar un patrón de aumento en la frecuencia cardíaca, durante el incremento de temperatura que será significativamente más rápido que durante la disminución de temperatura. A este patrón se le denomina histéresis de la frecuencia cardíaca y permite que un reptil se mantenga caliente durante más tiempo durante el día al aumentar la temperatura más rápido durante el calentamiento por la mañana y reducir la tasa de enfriamiento por la noche (Seebacher, 2000).

El Estado de México alberga 150 especies de anfibios y reptiles, 49 especies de anfibios y 101 especies de reptiles (Lemos-Espinal & Smith, 2020). Dentro de estas especies se encuentra el Alicante de Montaña, *Barisia imbricata* una lagartija endémica de México, perteneciente a la familia *Anguillidae*. Se distribuye en diferentes estados de la República Mexicana principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana. Se encuentra en un intervalo de altitud 2200 a 3800 msnm

(Guillete & Smith, 1982; Sunny et al., 2017). En el Estado de México *B. imbricata* comparte distribución con *Barisia rudicollis* que se encuentra en un intervalo de altitud de 2000 a 2550msnm (Zaldivar-Riveron & de Oca, 2001).

Barisia imbricata habita ambientes cálidos principalmente bosque de pino-encino, es de hábitos diurnos y terrestres. Se puede encontrar en zacatonales amacollados en agujeros o en zonas abiertas de la superficie terrestre (Ramírez- Bautista, 2009). El dimorfismo sexual en esta especie se ha determinado por patrón de coloración dorsal, los machos serán de color verde olivo a marrón, y las hembras tendrán franjas laterales de colores claros, crema y grises. Aunque algunos autores mencionan que el uso de patrón dorsal para determinar el sexo no es viable ya que algunas hembras pueden presentar hemipenes, por lo que sugieren el sexado por eversión de hemipenes (cuando se encuentren presentes) y determinar si es macho por la presencia de corona en los hemipenes y hembra por la ausencia de esta (Dashevsky et al., 2013; Martínez-Torres et al., 2015).

La temperatura corporal de actividad más baja reportada en la especie es de 9.1°C, esto es extremadamente bajo en comparación a otros lacertilios (Fierro-Estrada et al., 2019). Registrada como una especie Euritermica, *B. imbricata* con una alta tolerancia a un ambiente con cambios bruscos de temperatura, sugieren que algún mecanismo le permite optimizar la termorregulación de manera fisiológica aunado a la regulación conductual.

Antecedentes

Muñoz-Brito (2013) evaluó los requerimientos térmicos de la lagartija *B. imbricata*, abarcando la temporada de lluvias y sequía. Para este estudio analizó machos, hembras gestantes y hembras no gestantes. Utilizó el protocolo propuesto por Hertz et al. (1993) para determinar los índices de precisión en la termorregulación (db), evaluar la calidad térmica del hábitat (de) y determinar la eficiencia en la termorregulación (E). Determinó que el índice de precisión en la termorregulación (db) fue de 3.91, la calidad térmica del hábitat (de) fue de 4.56 y la eficiencia en la termorregulación (E) fue 0.1419; esto indicó que *B. imbricata* es una especie termoconformista.

Fierro-Estrada *et al.* (2019) evaluaron dos poblaciones de *B. imbricata* de diferentes altitudes, una población de 2200 msnm y otra de 3700 msnm. Determinaron que la media de la temperatura corporal (T_b) de la población de mayor altitud varía entre 19.0°C y 25.5°C y la media de la temperatura corporal (T_b) de la población de menor altitud varía entre 17.6°C y 21.5°C. Observó que organismos activos de la población de menor altitud se encontraban a temperaturas entre 9.5 ° - 32.3 °C y los organismos de la población de mayor altitud entre 9.1 ° - 36.6 °C. Esto indicó que *B. imbricata* es una especie Euritérmica y puede termorregular activamente en cualquier momento. Sin embargo, cuando las temperaturas ambientales están dentro del intervalo de temperaturas preferidas, la especie no tiene un comportamiento de termorregulación.

En cuanto a la histéresis cardiaca en reptiles Seebacher y Franklin (2001) analizaron la actividad cardiaca durante el aumento y disminución de temperatura de lagartijas de la especie *Pogona barbata*, se observó que, durante el calentamiento, el ritmo cardiaco aumentaba rápidamente y durante el enfriamiento el ritmo cardiaco disminuía lentamente; también se analizó la importancia de los mecanismos colinérgicos y β -adrenérgicos. Se determinó que estos mecanismos no son los únicos medios de control que actúan sobre el corazón durante el aumento y disminución de temperatura, pero tienen un efecto significativo en la frecuencia cardiaca y en las tasas de calentamiento y enfriamiento.

Este trabajo explora la función cardiovascular por medio de la frecuencia cardiaca para determinar si *B. imbricata* presenta histéresis de la frecuencia cardiaca como mecanismo de optimización durante la termorregulación.

Objetivos

General

Determinar si el corazón de *Barisia imbricata* presenta diferencia en la frecuencia cardiaca ante cambios de temperatura.

Particulares

Determinar sí el corazón de *Barisia imbricata* presenta diferencia en la frecuencia cardiaca ante aumento de temperatura.

Determinar sí el corazón de *Barisia imbricata* presenta diferencia en la frecuencia cardiaca ante disminución de temperatura.

Hipótesis

La lagartija *Barisia imbricata* del Valle de Toluca presentan histéresis de la frecuencia cardiaca como mecanismo optimizador de la termorregulación.

Materiales y Métodos

- Área de estudio

La colecta de organismos de la especie *Barisia imbricata* se llevó a cabo en las inmediaciones del Campus Universitario “El Cerrillo Piedras Blancas” en el municipio de Toluca, Estado de México a 2632 msnm (19.409596339099718°N, -99.68902605767073°W) (Figura 1). Entre los meses de febrero y abril 2022.

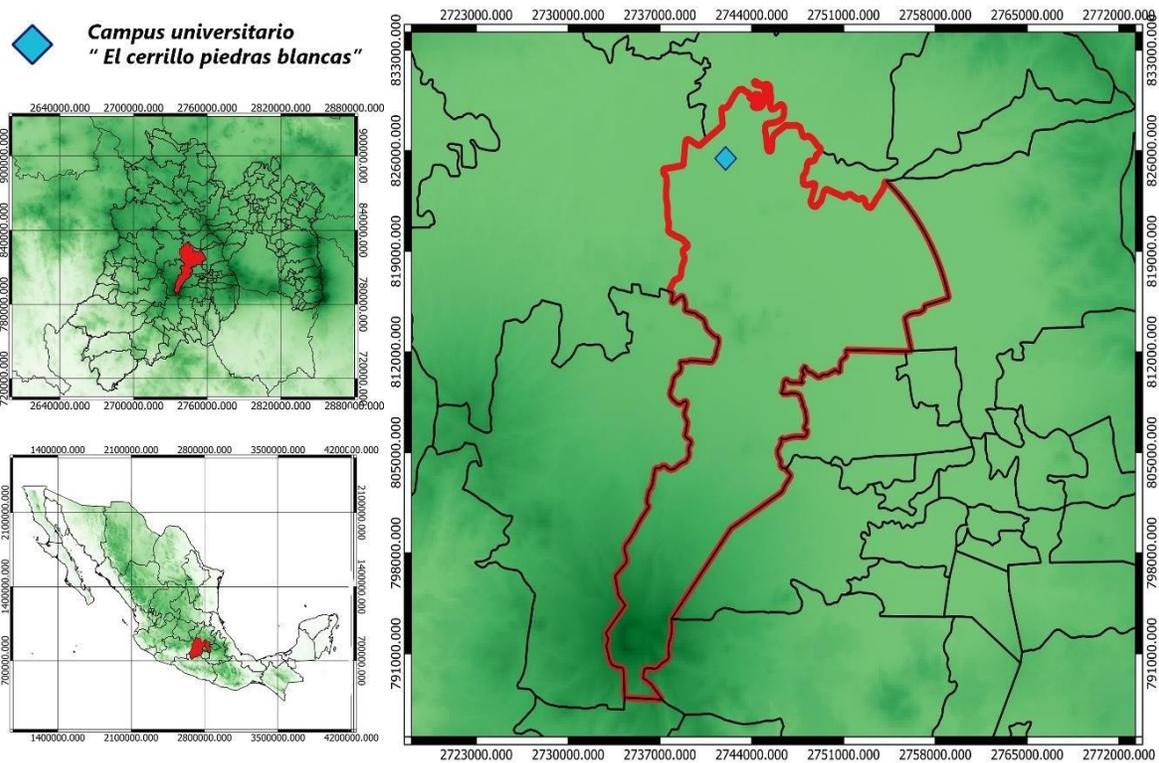


Fig 1. Mapa del sitio de estudio, el rombo azul representa las coordenadas del “El campus Universitario el Cerrillo Piedras Blancas” Toluca, Estado de México.

- Colecta de individuos

Se colectaron los organismos por la técnica de captura directa que consiste en capturar a los ejemplares con la mano usando guantes de carnaza o usando una lazada de cuerda delgada sujeta al extremo de una vara o de una caña de pescar, se tomó al individuo por el cuello cuando se encontraba posando sobre alguna superficie (Figura 2).

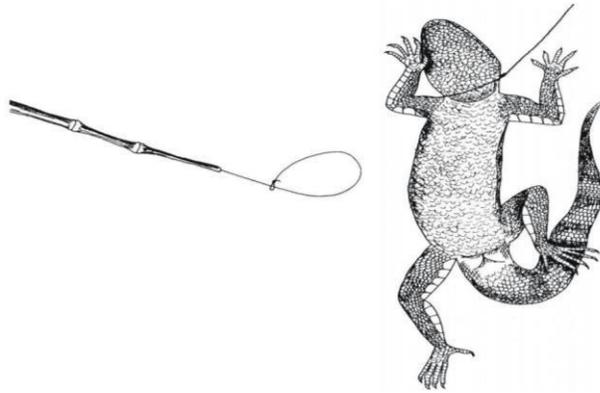


Fig. 2. Lazo montado en una vara o caña de pescar y lagartija lazada por el cuello (tomado de Vanzolini y Nelson 1990).

Se colectaron 10 individuos, el sexado se realizó mediante la presencia de corona en los hemipenes para machos y ausencia en hembras, ya que ambos sexos pueden presentar hemipenes y el dimorfismo sexual por características de coloración y tamaño no es una opción viable para el sexado de esta especie (Dashevsky et al., 2013; Martínez-Torres et al., 2015). Los individuos de *B. imbricata* colectados tuvieron un LHC mayor a 80 mm. Este LHC no determina madurez sexual, es la medida a partir de la cual se puede colocar el sensor cardiaco. Los individuos colectados se colocaron en costales de manta para ser transportados al Laboratorio de Ecofisiología Animal de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Autónoma del Estado de México. En el laboratorio se mantuvieron en terrarios a temperatura ambiente 25 °C con comida y agua *ad libitum* por un máximo de 5 días.

Tabla 1. Individuos analizados por sexo, edad, talla.

Individuos	Sexo	Edad	LHC ¹
1	H	Adulto	12.8 cm
2	H	Adulto	10.2 cm
3	M	Adulto	10.5 cm
4	H	Adulto	11.3 cm
5	-	Juvenil	8.6 cm
6	H	Adulto	9.7 cm
7	-	Juvenil	8.7 cm
8	-	Juvenil	8.5 cm
9	-	Juvenil	8.7 cm
10	-	Juvenil	9.2 cm

¹ LHC = Longitud hocico- cloaca

- **Registro de actividad cardiaca y temperatura**

Los organismos fueron instrumentados con un sensor piezoeléctrico para detectar actividad cardiaca y un sensor de temperatura vía cloacal conectados al monitor PowerLab (Add Instruments®) (Figura 3).

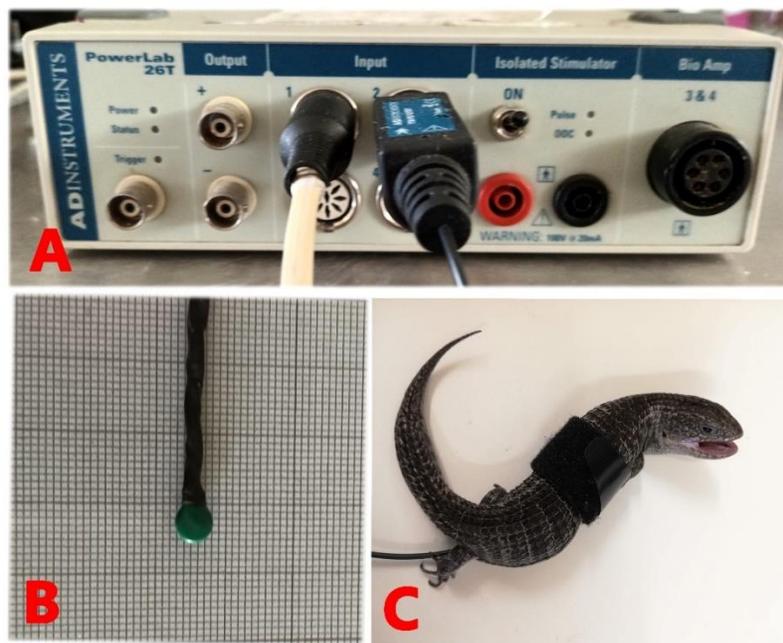


Fig 3. PowerLab (Add Instruments®) con los sensores conectados a los canales correspondientes, B) sensor de temperatura cloacal, C) sensor de actividad cardiaca en un individuo de *B. imbricata*.

La actividad cardiaca y la temperatura corporal del individuo se visualizó en tiempo real en el software Lab Chart 8 (Add Instruments®). El individuo se colocó en una cámara de temperatura. El organismo se estabilizó durante 30 minutos a temperatura ambiente (20°- 23°C) y se disminuyó 5°C cada 10 min hasta llegar a 5°C, posteriormente se aumentó la temperatura 5°C cada 10 min hasta llegar a 35°C (Figura 4).

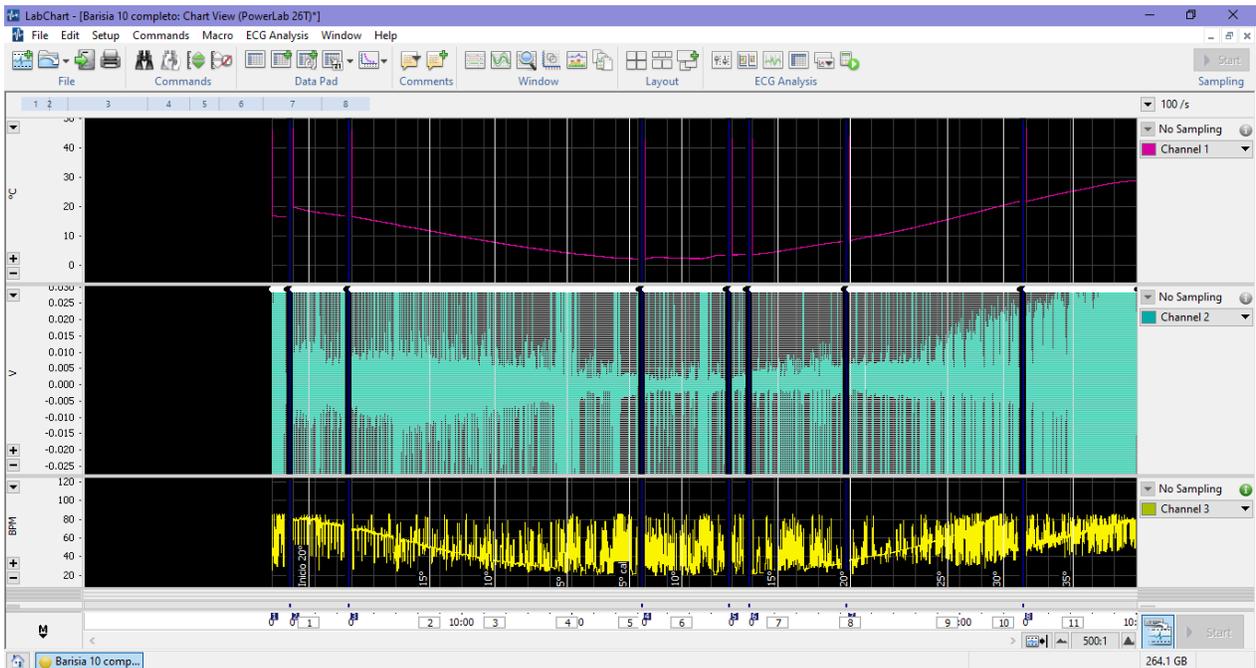


Fig. 4 Ventana del Software Lab Chart 8 (Add Instruments®). Channel 1 detección de temperatura corporal, Channel 2 señal cardiaca y respiración, Channel 3 BPM.

- Cámara térmica

Se construyó un cubo con tapa de acrílico de 4 mm con una dimensión de 20x20x30 cm. Se aisló térmicamente la cámara con capas de unisol de 3 cm de grosor. También se incluyó un ventilador que fuerza aire a la cámara para la homogenización del ambiente térmico. Se instaló un bucle de refrigeración de cobre conectado a un sistema de refrigeración por gas con un compresor silencioso. Este sistema está conectado a un termostato que mantiene el enfriamiento en niveles indicados. En cuanto al calentamiento se instaló un calentador cerámico conectado a un termostato programable. Las lagartijas se colocaban en la cámara dentro de una lata de acero con tapa suspendida en el medio del espacio para evitar contacto directo con los elementos de enfriamiento y calentamiento (Figura 5).

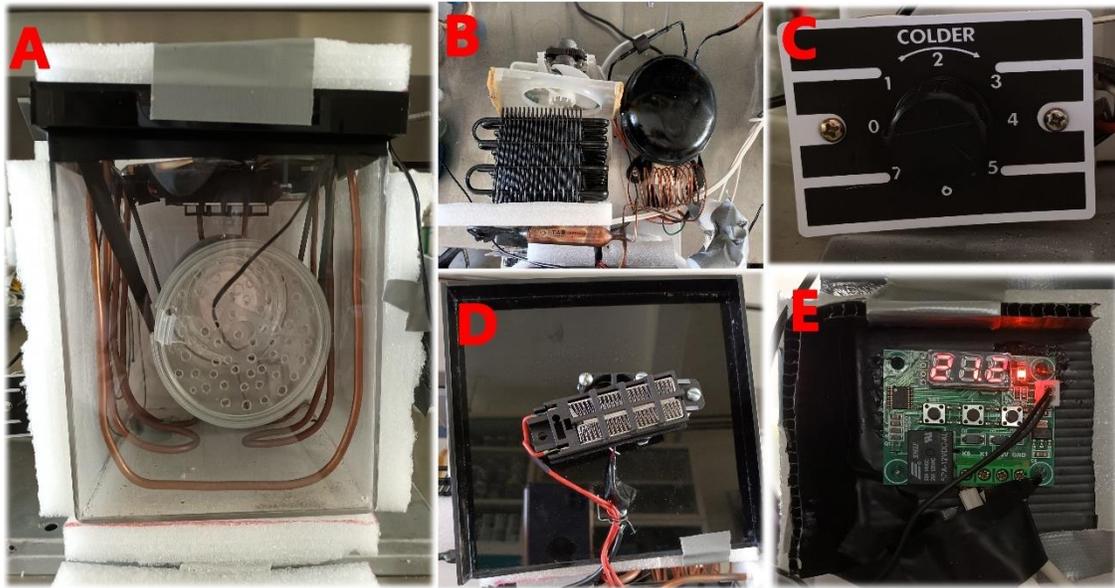


Fig 5. Camara termica. A) cubo de acrilico, B) sistema de refrigeracion por gas, compresor silenciosa, C) termostato para regular sistema de enfriamiento, D) calentador ceramico y ventilador, E) termostato para regular sistema de calentamiento.

Análisis de datos

Los datos grabados en el software Lab Chart 8 (Add Instruments®) fueron procesados en el mismo, posteriormente a los datos procesados se les aplicó estadística univariada (ANOVA por rangos) en el software Sigma Plot 12. Se analizó la frecuencia cardiaca (BPM) y la temperatura corporal (T_b) como variables dependientes y como variable independiente la temperatura de la cámara (T_a).

Resultados

Se realizó el análisis de 10 individuos de *B. imbricata* con LHC \geq 80 mm. Se obtuvieron las medias y desviación estándar de temperatura corporal (Tb) y frecuencia cardiaca (BPM) para cada intervalo de temperatura en enfriamiento y calentamiento (Ta) (Tabla 2).

Tabla 2. Medias y desviación estándar de la frecuencia cardiaca (BPM) y temperatura corporal (Tb) de cada intervalo de temperatura en calentamiento y enfriamiento (Ta).

Ta (°C)	Calentamiento						Enfriamiento			
	10 °C $\bar{x} \pm SD$	15 °C $\bar{x} \pm SD$	20 °C $\bar{x} \pm SD$	25 °C $\bar{x} \pm SD$	30 °C $\bar{x} \pm SD$	35 °C $\bar{x} \pm SD$	20 °C $\bar{x} \pm SD$	15 °C $\bar{x} \pm SD$	10 °C $\bar{x} \pm SD$	5 °C $\bar{x} \pm SD$
BPM	34.245	31.031	43.162	47.196	52.976	56.329	46.061	39.331	32.915	27.504
	\pm	\pm								
	19.672	17.746	16.760	17.590	18.407	16.046	18.177	16.002	15.160	13.368
Tb (°C)	6.198	7.125	13.715	16.128	21.877	26.134	19.011	14.968	9.550	5.777
	\pm	\pm								
	4.973	4.386	5.666	4.531	5.286	4.633	3.033	4.446	4.794	4.230

No se esperaba un análisis tan exhaustivo en enfriamiento, solo en calentamiento. Los datos registrados de histéresis del ritmo cardiaco en otras especies se enfocan en calentamiento (De Vera Porcell & Gonzalez, 1986; Seebacher, 2000; Seebacher y Franklin, 2001; Franklin and Seebacher, 2003; Seebacher y Franklin, 2004; Liu et al., 2006). Ya que esta especie habita en climas cambiantes que alcanzan temperaturas bajas a los cuales puede resistir, se decidió analizar solo de temperatura ambiente 20 a 5°C para observar cómo se comporta la frecuencia cardiaca (BPM) y la temperatura corporal (Tb) a bajas temperaturas en esta especie.

El análisis estadístico ANOVA de una vía por rangos ($H = 522.148$, $gl=5$, $P = <0.001$) con prueba post hoc de Dunn, muestra que durante el régimen de calentamiento la frecuencia cardiaca (BPM) presenta diferencias significativas de 15 a 20°C ($P<0.05$), de 20 a 25°C ($P<0.05$), 25 a 30°C ($P<0.05$), y no muestra diferencia significativa de 10 a 15 °C y de 30 a 35 °C (Figura 6). Durante el régimen de enfriamiento el análisis estadístico ANOVA de una vía por rangos ($H = 225.071$, $gl=3$, $P = <0.001$), con prueba post hoc de Dunn, muestra que hay diferencias significativas de 20 a 15 °C ($p<0.05$), de 15 a 10 °C ($p<0.05$) y 10 a 5°C ($p<0.05$) (Figura 7).

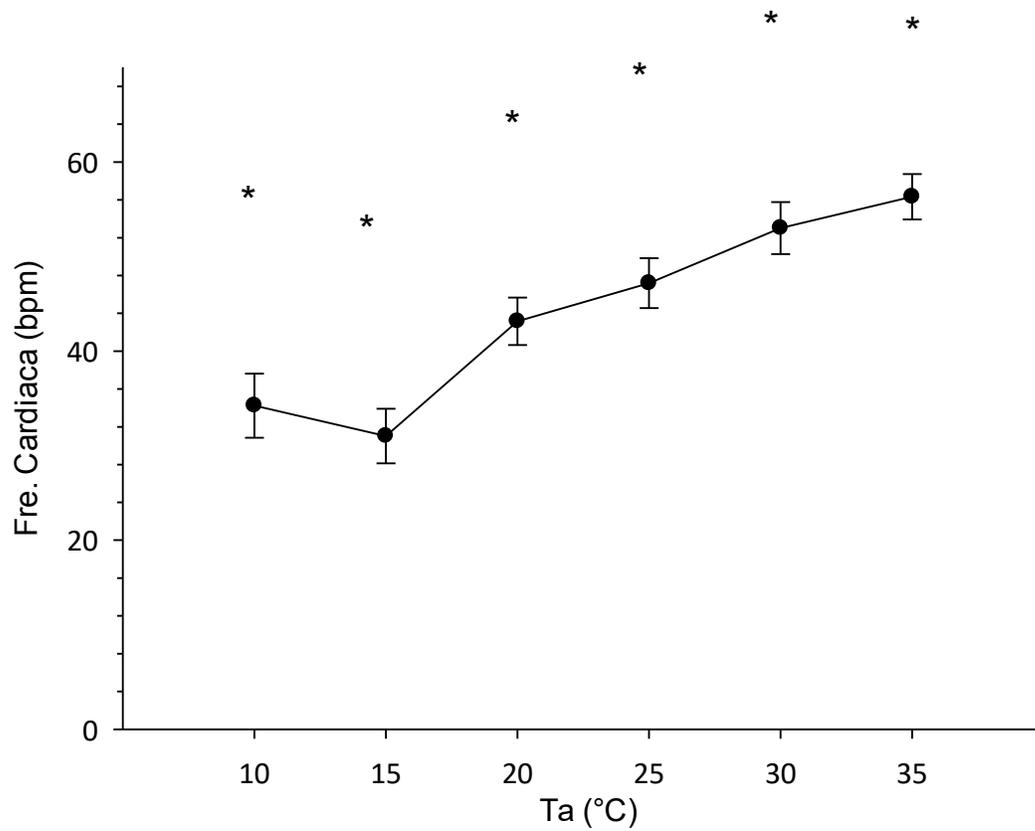


Fig. 6 Latidos por minuto durante calentamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

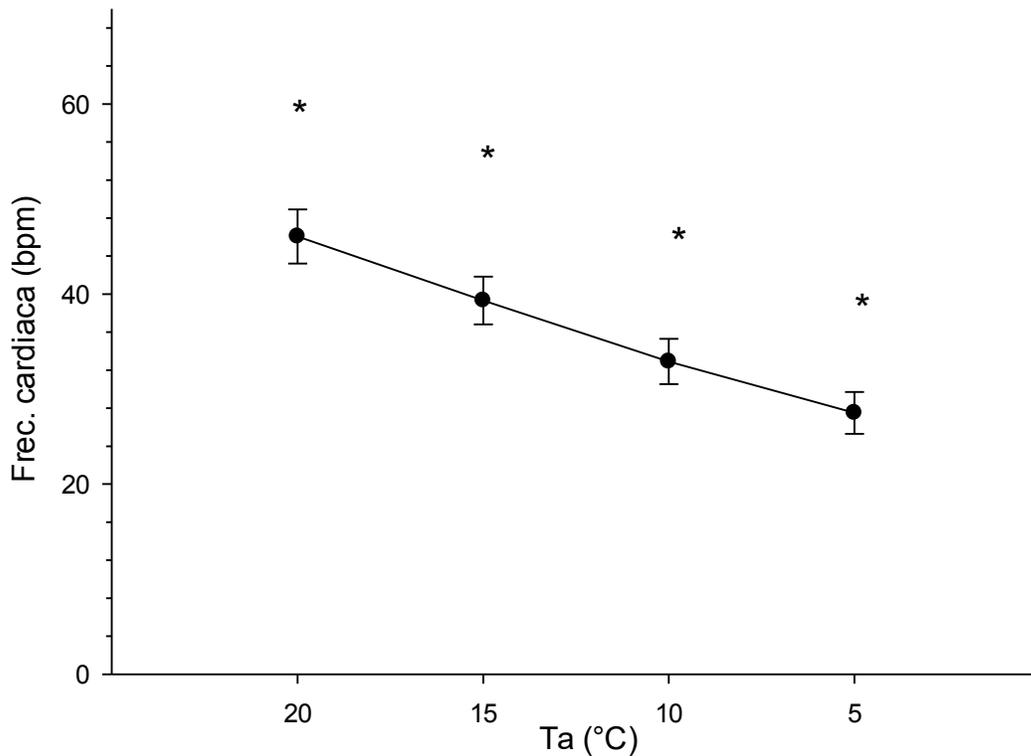


Fig. 7 Latidos por minuto durante enfriamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan desviación estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Se analizó la temperatura corporal (T_b °C) en cada punto de temperatura ambiental mediante el análisis estadístico ANOVA de una vía por rangos, ($H = 2213.564$, $gl = 6$, $P = < 0.001$) con prueba post hoc de Dunn, durante el régimen de calentamiento, presenta diferencias significativas de 10 a 15 °C ($p < 0.05$), 15 a 20 °C ($P < 0.05$), 25 a 30 °C ($P < 0.05$), 30 a 35 ($P < 0.05$) y no presenta diferencia significativa de 20 a 25 °C (Figura 8). Durante el régimen de enfriamiento el análisis estadístico ANOVA de una vía por rangos ($H = 1539.53$, $gl = 5$, $P = < 0.001$) con prueba post hoc de Dunn, muestra que hay diferencias significativas de 20 a 15 °C ($p < 0.05$), de 15 a 10 °C ($p < 0.05$) y 10 a 5 °C ($p < 0.05$) (Figura 9).

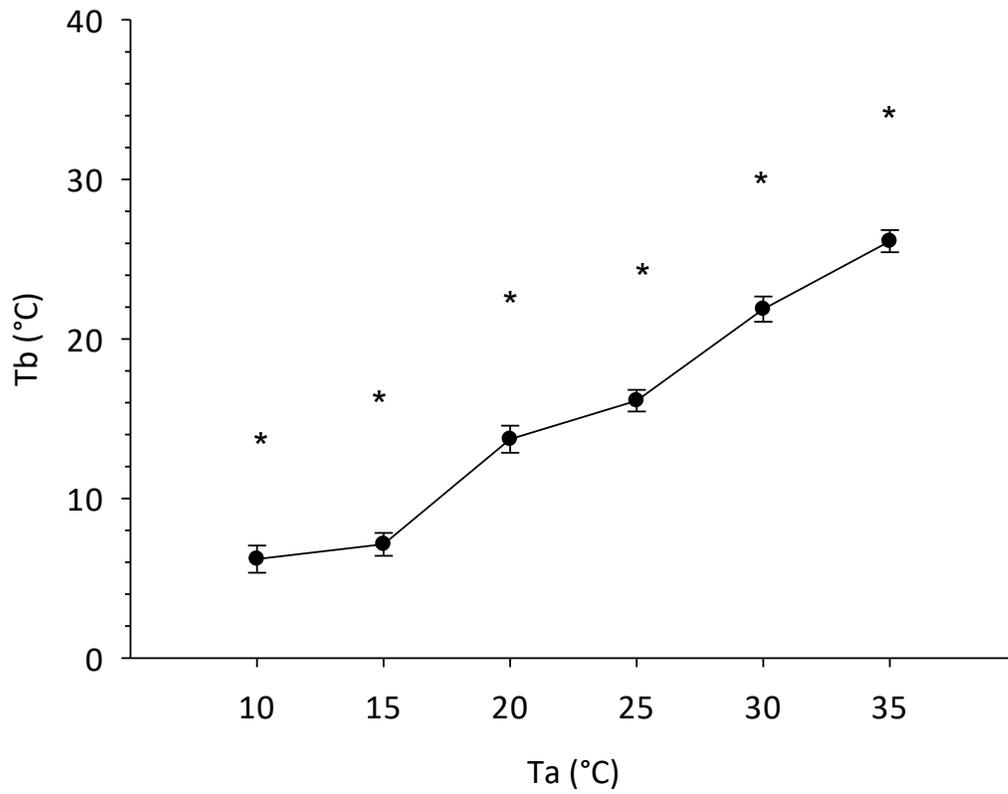


Fig. 8 Temperatura corporal durante el calentamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

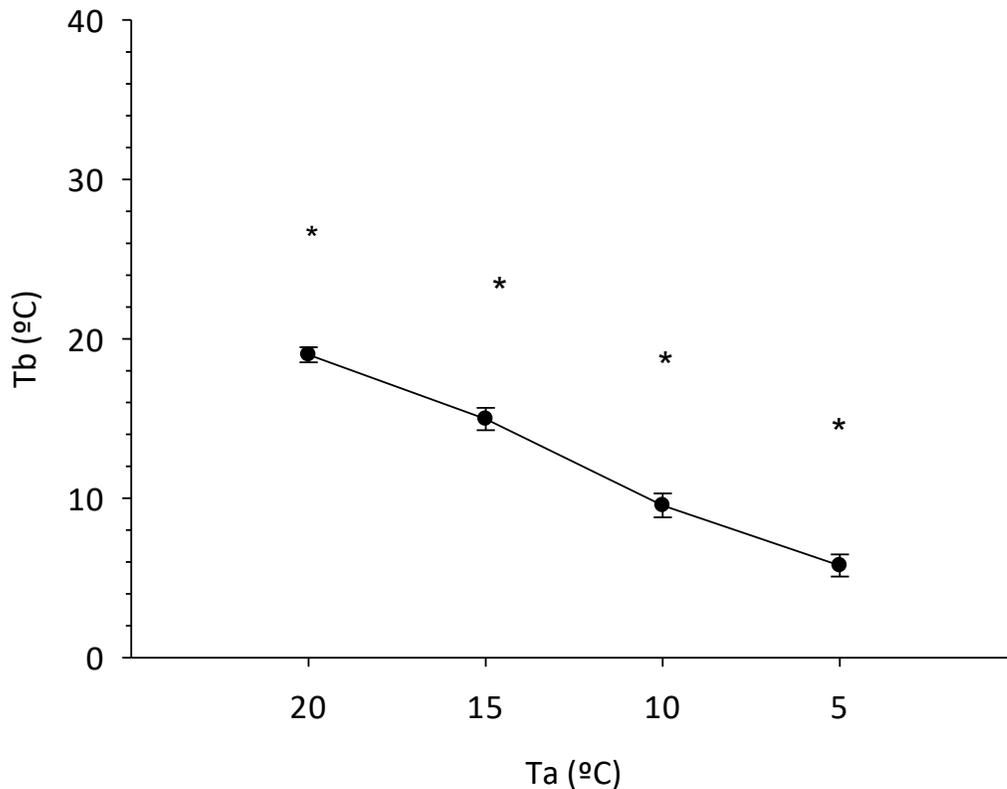


Fig. 9 Temperatura corporal durante el enfriamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Se realizó una comparación entre el régimen de calentamiento y enfriamiento en las temperaturas ambientales (T_a) 10, 15 y 20 °C, ya que estas son las temperaturas que coinciden en los dos regímenes. Para frecuencia cardiaca (BPM) presenta diferencia significativa en 15 y 20 °C ($p < 0.05$) y no presenta diferencia significativa en 10°C entre calentamiento y enfriamiento (Figura 10). Para temperatura corporal (T_b) presenta diferencia significativa en 10, 15 y 20 °C entre calentamiento y enfriamiento (Figura 11).

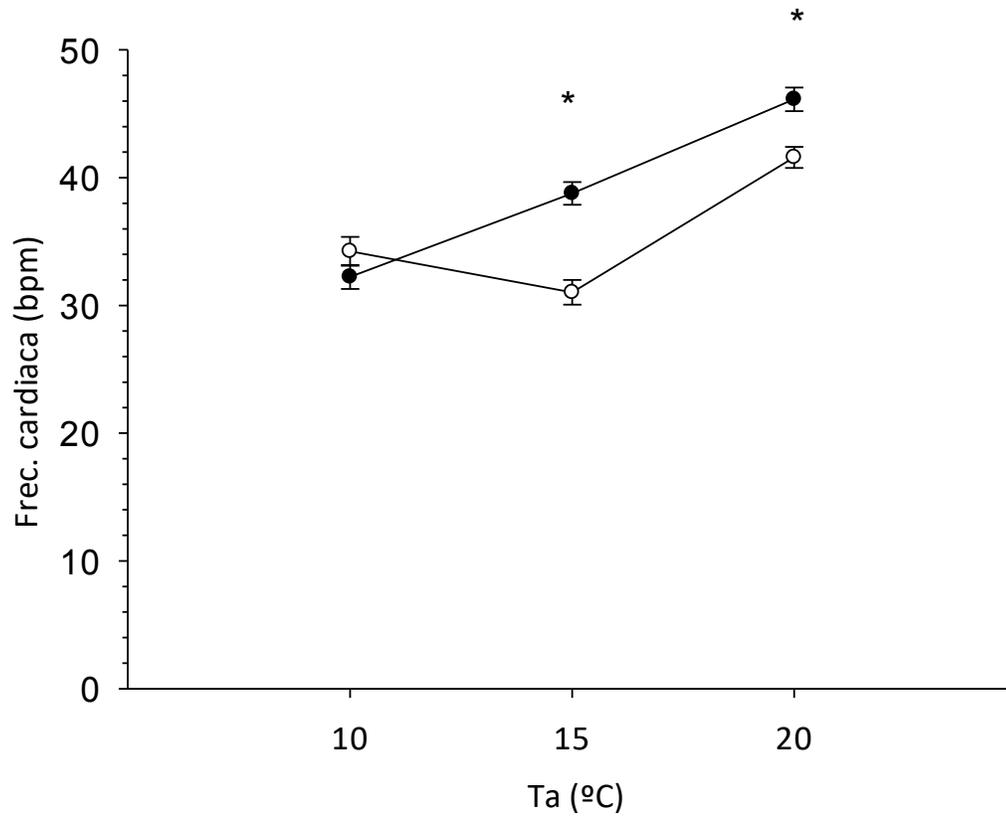


Fig. 10 Frecuencia cardiaca por rango de temperaturas del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media puntos abiertos calentamiento y cerrados enfriamiento, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

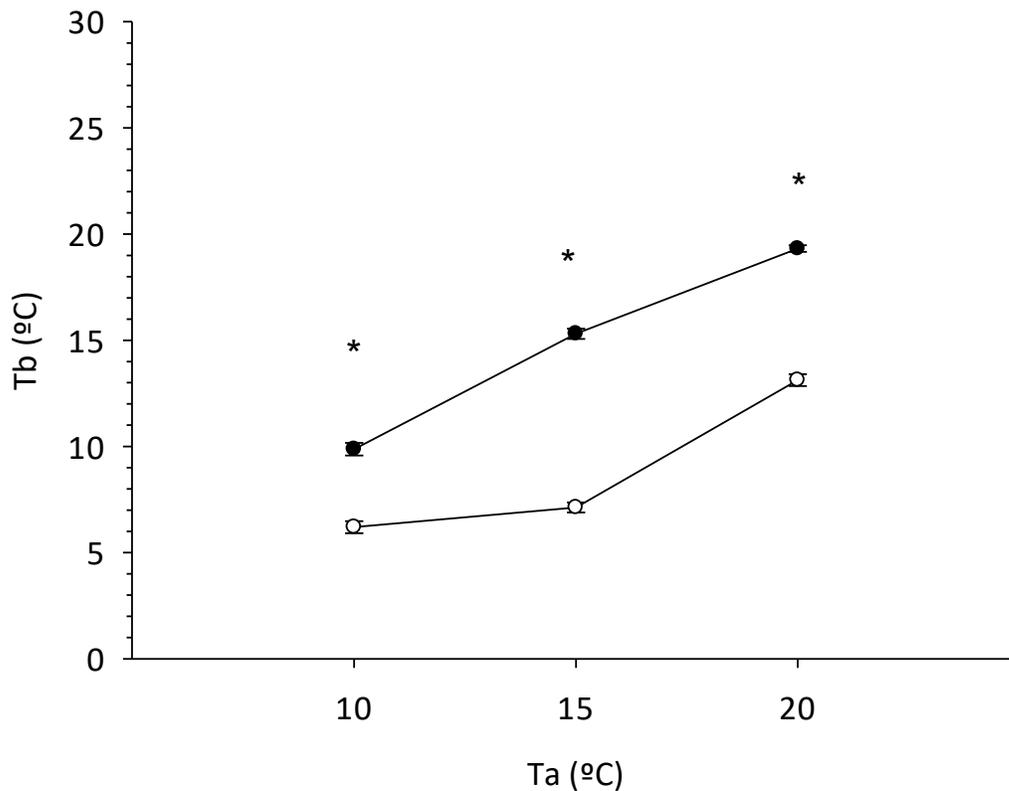


Fig. 11 Temperatura corporal por rango de temperaturas del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media puntos abiertos calentamiento y cerrados enfriamiento, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Se realizó una regresión lineal para predecir el efecto que tiene la temperatura ambiental (T_a °C) sobre la temperatura corporal (T_b °C). La ecuación de regresión fue $y = -4.28 + (0.88x)$, con un valor de $R^2 = 0.60$, $P < 0.001$ lo que indica el 60% del cambio de temperatura corporal puede ser explicada por el modelo (Figura 12).

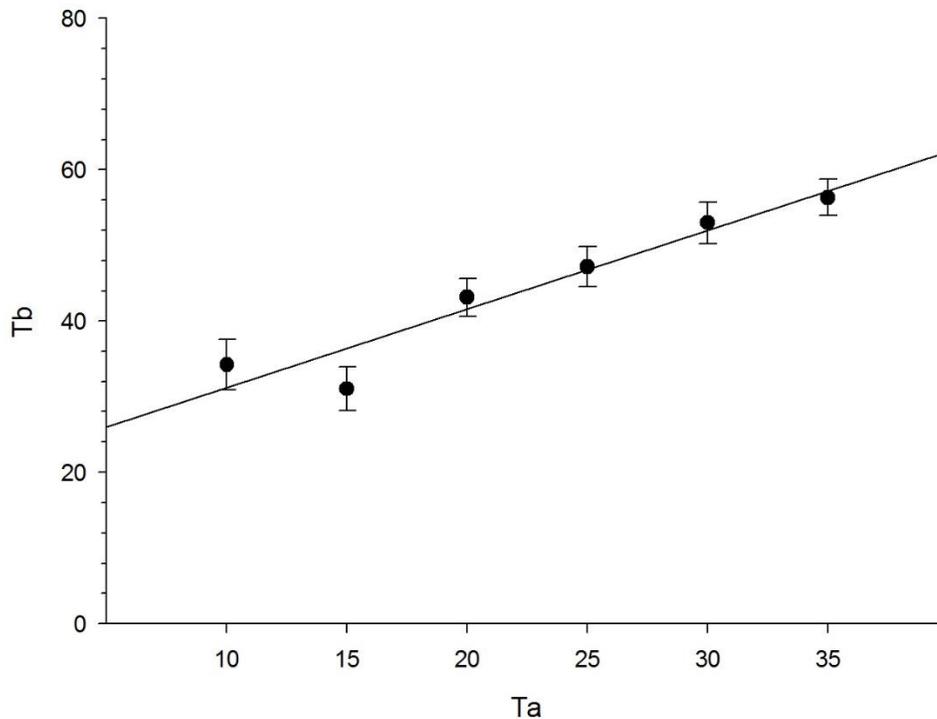


Fig. 12 Regresión lineal entre temperatura corporal (Tb) y temperatura ambiental (Ta). La línea de correlación indica la ecuación y la r^2 .

Adicionalmente a los datos obtenidos de frecuencia cardiaca (BPM) y temperatura corporal (Tb), se obtuvo la frecuencia respiratoria (RPM) de cada individuo durante los experimentos de regímenes de temperatura (calentamiento y enfriamiento), ya que el sensor también detecta este parámetro por lo que se registra a continuación.

Se analizó la frecuencia respiratoria (RPM) mediante ANOVA de una vía por rangos con prueba post hoc de Dunn. Durante el régimen de calentamiento ($H = 367.914$, $gl = 5$, $P = <0.001$), se presentan diferencias significativas de 10 a 15 °C ($p < 0.05$), 15 a 20°C ($P < 0.05$), de 20 a 25°C ($P < 0.05$), 30 a 35 °C ($P < 0.05$) y no muestra diferencia significativa de 25°C a 30°C (Figura 13). Durante el régimen de enfriamiento ($H = 501.702$, $gl = 3$, $P = < 0.001$), se presentan diferencias significativas de 20 a 15 °C ($p < 0.05$), de 15 a 10 °C ($p < 0.05$) y 10 a 5°C ($p < 0.05$) (Figura 14).

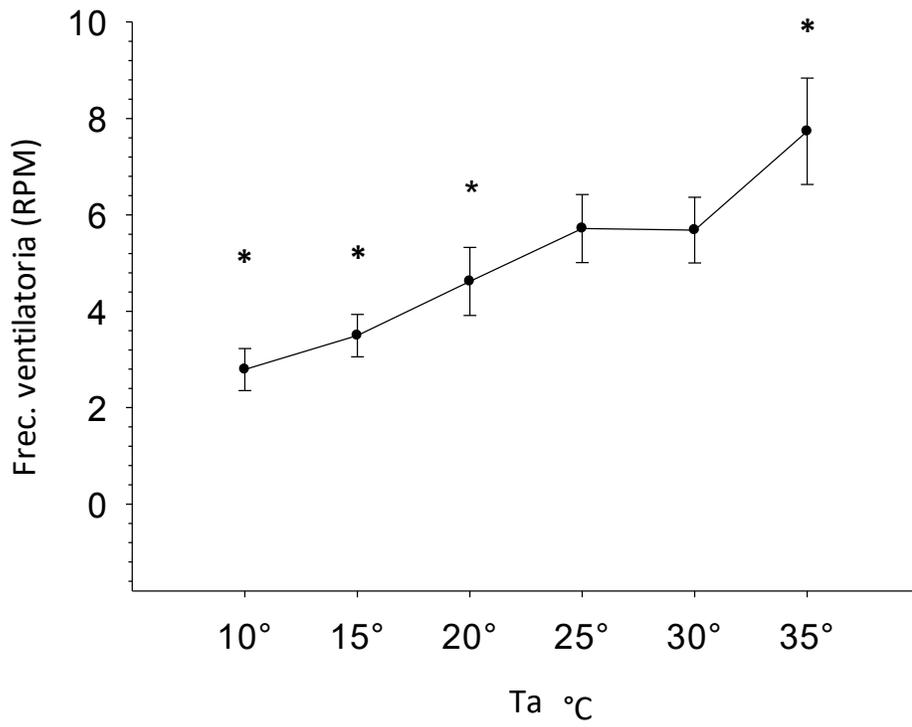


Fig. 13 Frecuencia ventilatoria durante el calentamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

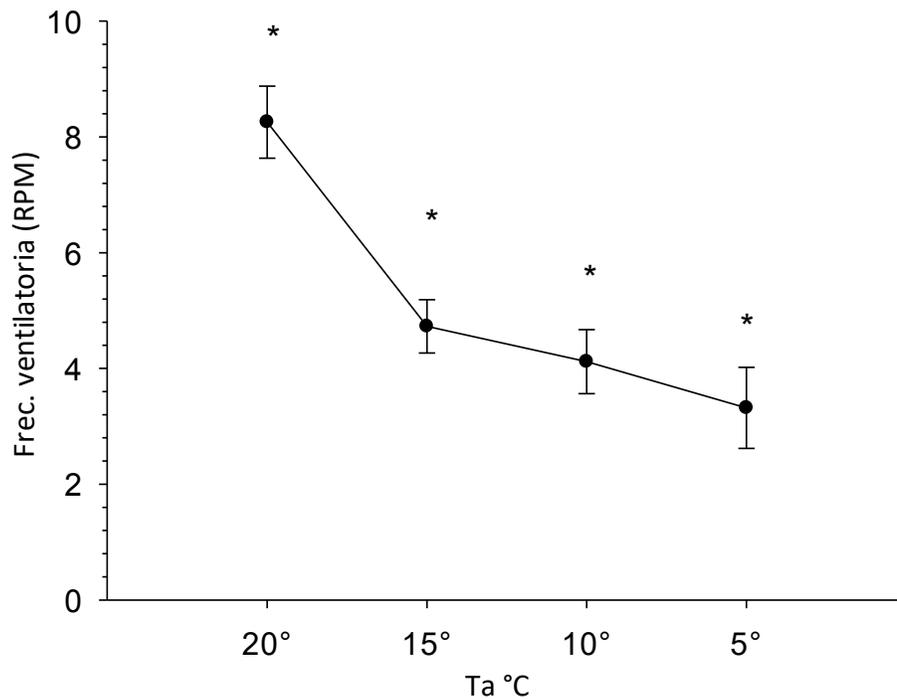


Fig. 14 Frecuencia ventilatoria durante el enfriamiento del Alicante de Montaña, *Barisia imbricata*. Los puntos representan la media, barras representan error estándar, los asteriscos representan diferencias significativas (P<0.05).

Se determinó el coeficiente de temperatura Q10 que representa el factor por el cual la tasa de una reacción metabólica cambia por cada 10 grados de incremento en temperatura. El Q10 se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$Q10 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{\left(\frac{10}{T_2-T_1}\right)}$$

Donde R₁ es la frecuencia inicial, R₂ es la frecuencia final, T₁ es la temperatura inicial y T₂ es la temperatura final. En este caso se observó que la tasa de la frecuencia cardiaca aumenta con la temperatura ambiental mientras la de la frecuencia ventilatoria disminuye (Tabla 1).

Tabla 3. Valor de Coeficiente térmico (Q10) para frecuencia ventilatoria y cardiaca de *B. imbricata* durante el calentamiento.

Intervalo de temperatura (°C)	Q10 Frec. Vent	Q10 Frec cardiaca
10-20	1.46	1.36
15-25	1.40	1.75
25-35	1.11	1.96

Discusión

La frecuencia cardiaca de *B. imbricata* durante los regímenes de calentamiento y enfriamiento muestra un aumento correspondiente con histéresis. En comparación con *Pogona barbata* este incremento es similar aún cuando los ambientes de estos lacertilios son diferentes en extremo (Seebacher & Franklin, 2001). La frecuencia cardiaca aumenta más rápido durante el régimen de calentamiento que durante enfriamiento para distribuir el calor más rápido a los órganos y tejidos. Durante el enfriamiento la frecuencia disminuye para evitar la pérdida de calor y mantener una temperatura óptima por más tiempo (Seebacher and Franklin, 2001; Seebacher and Franklin, 2004). Este patrón de actividad cardiaca ayuda a *B. imbricata* a aumentar la efectividad de la termorregulación y posiblemente aumentar el tiempo de actividad y así proliferar en climas estocásticos (Figura 6 y 7).

La temperatura corporal de *B. imbricata* no mostró diferencias significativas entre los intervalos de temperatura ambiental 20 °C y 25 °C. Esto coincide con algunas temperaturas preferidas (T_{pref}) registradas para la especie (Muñoz-Brito, 2013; Fierro-Estrada et al., 2019). Durante el régimen de enfriamiento se observa una pérdida de temperatura lineal pero no de una manera drástica, lo que indica que *B. imbricata* podría mantener cierta temperatura para no congelarse por completo (Figura 8 y 9) (Fierro-Estrada et al., 2019).

En la comparación entre el régimen de calentamiento y enfriamiento a 10, 15 y 20 °C se observa el patrón de histéresis en la frecuencia cardiaca y la pérdida y ganancia de la temperatura corporal. Se observa una diferencia significativa durante el enfriamiento y calentamiento en la temperatura corporal lo que indica que la ganancia de temperatura de *B. imbricata* será más rápida para llegar a su temperatura operacional más rápido y poder realizar sus actividades biológicas cotidianas (Franklin and Seebacher, 2003; Seebacher and Franklin, 2001; Seebacher and Franklin, 2004). Durante el enfriamiento la temperatura corporal se perderá lentamente para mantener la temperatura corporal por más tiempo (Figura 10 y 11).

La regresión lineal para determinar el efecto que tiene la temperatura ambiental (T_a °C) sobre la temperatura corporal (T_b °C) muestra una capacidad de amortiguamiento térmico entre temperatura corporal (T_b °C) y temperatura ambiental (T_a °C) (Figura 12). Es altamente probable que esto se deba de manera total o parcial a la respuesta de histéresis cardiaca (De Vera Porcell and Gonzalez, 1986; Hertz et al., 1993). Este amortiguamiento permitirá una retención de calor que, como ya se mencionó, prolongará la actividad de la lagartija. Es posible que la capacidad de “retener” calor le permita a este organismo operar como termoconformista como el resto de los anguidos (Lazcano et al., 2022).

Ya que la frecuencia ventilatoria aumenta en proporción con la temperatura durante el régimen de calentamiento, es posible que esto esté relacionado con la frecuencia cardiaca. Se observó que no hay diferencias significativas en los intervalos de temperatura 25 a 30 °C, en esos intervalos la frecuencia ventilatoria se mantiene constante lo que coincide con las temperaturas operacionales y temperaturas preferenciales registradas para la especie (Figura 13 y 14) (Muñoz-Brito, 2013; Fierro-Estrada et al., 2019). Este fenómeno se ha observado en tortugas durante la termorregulación ligándolo de manera directa al aumento de la frecuencia cardiaca (Johansen et al., 1977).

El Q10 de la frecuencia cardiaca con la temperatura ambiental (T_a) y de la frecuencia ventilatoria disminuye mostrando una respuesta metabólica rápida ante aumento de temperatura pero propio de reptiles (Al-Sadoon et al., 2018; Franklin and Seebacher, 2003). Se han registrado valores de Q10 para *Gerrhonotus multicarinatus* en un rango de Q10= 1.8-2.4 entre temperaturas 15-35 °C para frecuencia cardiaca, al igual que este anguido *B. imbricata* muestra una respuesta rápida metabólica ante el aumento de temperatura (Dawson & Templeton, 1966). Es probable que como se menciona anteriormente, que la frecuencia ventilatoria tenga una influencia importante en el control del ritmo cardiaco a través de los receptores de estiramiento (Johansen et al., 1977; Taylor et al., 2010).

En general *B. imbricata* presenta una respuesta fisiológica cardiorrespiratoria durante el calentamiento y el enfriamiento. De acuerdo a los modelos de termorregulación se considera como una lagartija con una nula capacidad fisiológica termoregulatoria por su tamaño, ya que no alcanza la talla ideal de termorregulación fisiológica (5kg) (Fraser and Grigg, 1984). Pero esta aproximación por modelos falla en tomar en cuenta características particulares del ambiente así como la morfología particular de las especies (Turner, 1987). Además, la presencia de histéresis de la frecuencia cardiaca en organismos como las lagartijas *Gallotia gallotia*, *Salvator sp.*, *Phrynocephalus przewalskii* y los embriones de *Alligator mississippiensis*, nos permite no descartar este fenómeno en reptiles de talla pequeña (Liu et al., 2006) respaldando los datos aquí presentados.

Conclusiones

- La lagartija *B. imbricata* presenta histéresis en la frecuencia cardiaca durante el calentamiento y el enfriamiento.
- *B. imbricata* tiene la capacidad de amortiguar la perdida de calor durante el enfriamiento.
- Existe histéresis en la frecuencia ventilatoria en *B. imbricata* durante el enfriamiento y el calentamiento.

Referencias bibliográficas

- Al-Sadoon, M. K., Paray, B. A., & Rudayni, H. A. (2018). Metabolism of the spade-headed Amphisbaenian worm lizard, *Diplometopon zarudnyi* (Nikolsky, 1907), in Saudi Arabia (Reptilia: Trogonophidae). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(1), 178–181.
- Avery, R. A. (1979) Lizards - a study in thermoregulation. Institute of Biology's Studies in Biology 109. University Park Press, Baltimore.
- Cowles, R. B., & Bogert, C. M. (1944). A preliminary study of the thermal requirements of desert reptiles. *Iguana*, 83, 53.
- Dashevsky, D., Meik, J. M., Mociño-Deloya, E., Setser, K., & Schaack, S. (2013). Patterns of sexual dimorphism in Mexican alligator lizards, *Barisia imbricata*. *Ecology and Evolution*, 3(2), 255–261.
- Dawson, W. R., & Templeton, J. R. (1966). Physiological responses to temperature in the alligator lizard, *Gerrhonotus multicarinatus*. *Ecology*, 47(5), 759-765.
- de la Vega-Pérez, A. D., Resendiz, R. A. L., & Méndez-de-la-Cruz, F. R. (2014). COMPORTAMIENTO DE LAGARTIJAS: TERMORREGULACIÓN Y ANTIDEPREDACIÓN, EN: BIOLOGÍA DEL COMPORTAMIENTO. En *BIOLOGÍA DEL COMPORTAMIENTO* (pp. 239–250).
- De Vera Porcell, L., & Gonzalez, J. G. (1986). Cardiac responses to temperature in the lizard *Gallotia galloti*. *Comparative Biochemistry and Physiology. A, Comparative Physiology*, 85(2), 389–394.
- Fierro-Estrada, N., González, Y. G. G., Miles, D. B., Gómez, M. M., García, A., Salgado-Ugarte, I. H., & de la Cruz, F. R. M. (2019). Thermoregulation of the lizard *Barisia imbricata* at altitudinal extremes. *Amphibia-Reptilia*, 40(3), 349-360.
- Franklin, C. E., & Seebacher, F. (2003). The effect of heat transfer mode on heart rate responses and hysteresis during heating and cooling in the estuarine crocodile *Crocodylus porosus*. *The Journal of Experimental Biology*, 206(Pt 7), 1143–1151.
- Fraser, S., & Grigg, G. C. (1984). Control of thermal conductance is insignificant to thermoregulation in small reptiles. *Physiological zoology*, 57(4), 392–400.
- Guillette, L. J., & Smith, H. M. (1982). A review of the Mexican lizard *Barisia imbricata*, and the

- description of a new subspecies. Transactions of the Kansas Academy of Science. Kansas Academy of Science, 85(1), 13.
- Hertz, P. E., Huey, R. B., & Stevenson, R. D. (1993). Evaluating temperature regulation by field-active ectotherms: the fallacy of the inappropriate question. *The American Naturalist*, 142(5), 796–818.
- Hicks, J.W. & Wang T. (2012) The Functional Significance of the Reptilian Heart: New Insights into an Old Question. Pp. 207-224. In *Ontogeny and Phylogeny of the Vertebrate Heart*. D. Sedmera and T. Wang (Eds.) Springer Science & Business Media.
- Hutchison, V. H., & Dupré, R. K. (1992). Thermoregulation. Pp. 206–249. In *Environmental Physiology of the Amphibians*. M. E. Feder and W. W. Burggren (Eds.). University of Chicago Press, Chicago.
- Johansen, K., Burggren, W., & Glass, M. (1977). Pulmonary stretch receptors regulate heart rate and pulmonary blood flow in the turtle, *Pseudemys scripta*. *Comparative Biochemistry and Physiology. A, Comparative Physiology*, 58(2), 185–191.
- Kardong, K. V. (2006). *Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution*. (4th ed.) McGraw Hill, Boston, MA.
- Lazcano, D., Banda-Leal, J., Gadsden-Esparza, H., Castañeda-Gaytán, G., Hernández-Bocardo, SC. (2022). Thermal ecology of the Pygmy Alligator Lizard, *Gerrhonotus parvus* Knight and Scudday, 1985 (Squamata: Anguinae), in Nuevo León, Mexico. *Amphibian & Reptile Conservation* 16(1), 14–24 (e299).
- Lemos-Espinal, J. A., & Smith, G. R. (2020). A conservation checklist of the amphibians and reptiles of the State of Mexico, Mexico with comparisons with adjoining states. *ZooKeys*, 953, 137-159.
- Liu, C., Li, R., Liu, Z., Yin, S., & Wang, Z. (2006). The role of prostaglandins and the hypothalamus in thermoregulation in the lizard, *Phrynocephalus przewalskii* (Agamidae). *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 176(4), 321–328.
- Martínez-Torres, M., Rubio-Morales, B., Piña-Amado, J. J., & Luis, J. (2015). Hemipenes in females of the Mexican viviparous lizard *Barisia imbricata* (Squamata: Anguinae): an

- example of heterochrony in sexual development: Hemipenes in female lizards. *Evolution & Development*, 17(5), 270–277.
- Muñoz-Brito, A. (2013). Termorregulación en *Barisia imbricata* (Sauria: Anguidae). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramírez-Bautista, A., Hernández-Salinas, U., García-Vázquez, U. O., Leyte-Manrique, A., & Canseco-Márquez, L. (2009). Herpetofauna del Valle de México: diversidad y conservación. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 213.
- Seebacher, F. (2000). Heat transfer in a microvascular network: the effect of heart rate on heating and cooling in reptiles (*Pogona barbata* and *Varanus varius*). *Journal of Theoretical Biology*, 203(2), 97-109.
- Seebacher, F., & Franklin, C. E. (2001). Control of heart rate during thermoregulation in the heliothermic lizard *Pogona barbata*: importance of cholinergic and adrenergic mechanisms. *Journal of experimental biology*, 204(24), 4361-4366.
- Seebacher, F., & Franklin, C. E. (2004). Integration of autonomic and local mechanisms in regulating cardiovascular responses to heating and cooling in a reptile (*Crocodylus porosus*). *Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 174(7), 577–585.
- Sunny, A., González-Fernández, A., & D'Addario, M. (2017). Potential distribution of the endemic imbricate alligator lizard (*Barisia imbricata imbricata*) in highlands of central Mexico. *Amphibia-reptilia: publication of the Societas Europaea Herpetologica*, 38(2), 225–231.
- Turner, J. S. (1987). The cardiovascular control of heat exchange: Consequences of body size. *American zoologist*, 27(1), 69–79.
- Vanzolini, P.E. & P. Nelson. (1990). Manual de recolección y preparación de animales (2da. ed.). Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Vitt, L. J., & Caldwell, J. P. (2014). *Herpetology: An introductory biology of amphibians and reptiles* (4a ed.). Academic Press.
- Zaldivar-Riveron, A., & de Oca, A. N.-M. (2001). Natural History and Distribution of the Lizard *Barisia rudicollis* (Anguidae). *The Southwestern naturalist*, 46(3), 391.