

Infiriendo el efecto de factores abióticos sobre la temperatura corporal y pérdida de agua sobre modelos de agar de la rana sabanera (*Dendropsophus molitor*) en Cajicá–Cundinamarca

Inferring the effect of abiotic factors on body temperature and water loss on agar models of the Sabanera frog (*Dendropsophus molitor*) in Cajicá–Cundinamarca

Estefany Acosta–L¹, Diana Galindo–Uribe², Faidith Bracho–Altamiranda³, Nelsy Rocío Pinto–Sánchez^{1*}

Resumen

La alta permeabilidad de la piel representa una restricción fisiológica en anfibios, debido a un mayor riesgo de deshidratación por evapotranspiración en ambientes con menor disponibilidad de agua y mayor temperatura. *Dendropsophus molitor* es una especie semiacuática con comportamiento de tomar el sol, mecanismo termorregulatorio, necesario para llevar a cabo sus procesos vitales. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las variables ambientales, tipo de microhábitat y color, sobre la temperatura corporal y pérdida de agua en *D. molitor*. Para esto, se usaron modelos de agar de dos colores, ubicados en dos tipos de microhábitat (húmedo vs. seco), cada uno en dos condiciones de exposición (sol vs. sombra), midiendo el porcentaje de cambio de peso y temperatura corporal. Se realizaron análisis estadísticos como correlación, modelos de efectos lineales mixtos, y el método del factor de inflación de la varianza. Los resultados del estudio mostraron que el punto de rocío, la humedad relativa, la radiación solar, la temperatura del sustrato y el microhábitat, pero no el color de los modelos de agar, tuvieron un efecto significativo sobre el porcentaje de cambio de peso y la temperatura corporal. Ambas variables incrementaron en la condición microhábitat seco y sol, así como en seco y sombra, entre las 12:00 y 16:00 horas. La evapotranspiración está íntimamente relacionada con la radiación y el déficit de presión de vapor, siendo importante para la temperatura corporal del anfibio, debido a que éste se enfría mediante la evapotranspiración del agua a través de su piel. Por último, se sugiere que las variables a nivel del microhábitat son vitales para estas especies, y deberían ser incorporadas en este tipo de estudios.

Palabras clave: anfibios, Colombia, ecología térmica, punto de rocío, temperatura del sustrato

Abstract

Amphibians have physiological restrictions on the permeability of their skin due to a high probability of dehydration by evapotranspiration in environments with high temperatures and low water availability. *Dendropsophus molitor* is a semi-aquatic species with basking behavior that uses thermoregulatory mechanisms to carry out their vital processes. Therefore, our objective was to evaluate the effect of environmental variables, microhabitat type, and color on body temperature and water loss in *D. molitor*. We used agar models with two color patterns placed in two types of microhabitats (wet and dry), each with two conditions (sun and shade), and measured the percentage of weight change and body temperature. We used statistical analyzes such as correlation, linear mixed effects models, and the variance inflation factor method. In our

¹ Semillero de Evolución y Conservación, Grupo de Ecotoxicología, Evolución, Medio Ambiente Conservación, Programa de Biología Aplicada, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

² Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

³ Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

* Autor para correspondencia: <nelsy.pinto@unimilitar.edu.co>



study, the color of the agar models was not significant. However, the variables dew point, relative humidity, solar radiation, substrate temperature, and microhabitat each affected the percentage of weight change and body temperature. Both variables increased between the dry and sun microhabitat conditions and the dry and shaded conditions between 12:00 and 16:00 hours. Evapotranspiration is closely related to radiation, and the vapor pressure deficit is relevant to amphibian body temperature because they cool by the evapotranspiration of water through their skin. Finally, variables at the microhabitat level are vital for these species and should be incorporated into this kind of work.

Keywords: amphibians, Colombia, dew point, substrate temperature, thermal ecology

INTRODUCCIÓN

Los anfibios poseen caracteres fisiológicos y comportamentales en relación con el control de la temperatura interna y la permeabilidad de su piel que moldean sus procesos vitales y limitan su potencial de distribución (Lillywhite, 2006). Al ser organismos ectotermos, sus procesos vitales dependen en una mayor proporción de su temperatura corporal (TC), siendo esta afectada por la temperatura ambiente (Carey, 1978). La TC actúa como un factor de control para muchos procesos fisiológicos como el consumo de oxígeno, la frecuencia cardíaca, la locomoción, el balance de agua y la digestión (Köhler et al., 2011). También de procesos comportamentales como el desplazamiento en busca de condiciones ambientales favorables de temperatura y humedad (Kaufmann y Dohmen, 2016; Köhler et al., 2011).

La TC en anfibios está determinada por la pérdida y ganancia de energía por radiación, convección, conducción, así como la pérdida de calor por evaporación (Maldonado-Castro, 2017; Navas, 1996a; Wygoda y Williams, 1991). La radiación, convección y conducción dependen del gradiente térmico ambiental y la evaporación depende de la presión de vapor que existe entre la piel y el medio ambiente (Navas et al., 2008).

Muchas especies de anfibios no poseen ningún tipo de resistencia en su integumento a la pérdida de agua y por lo tanto pierden agua por evapotranspiración de manera similar a la de un cuerpo de agua (Spotila y Berman, 1976). La permeabilidad de la piel de las ranas les confiere la capacidad de llevar a cabo respiración cutánea (Alveal-Riquelme, 2015), pero

también les representa un riesgo de deshidratación en ambientes terrestres y en algunas horas del día, con condiciones de mayor radiación solar, temperatura y una menor humedad relativa (Carey, 1978). Por lo tanto, la pérdida de agua por evaporación cutánea en anfibios se asocia a su necesidad de enfriamiento, pero las estrategias de termorregulación también responden a los requerimientos del control de su contenido hídrico (Brattstrom 1979; Wygoda y Williams 1991; Navas et al., 2008). Sin embargo, algunas especies terrestre-arborícolas del género *Phyllomedusa* presentan bajas tasas de pérdida de agua por evaporación, que se ha considerado una señal de adaptación de este género (Shoemaker y McClanahan, 1975).

Entender los mecanismos de termorregulación de las especies es esencial para comprender las implicaciones de la selección de microhábitats, así como la respuesta de las especies a disturbios en su ambiente térmico. Sin embargo, estos estudios son difíciles de realizar en organismos vivos y requieren el uso de técnicas invasivas o, de técnica no invasivas, pero menos precisas (Navas y Araujo, 2000).

Una alternativa, es el uso de modelos de agar, a partir de los cuales es posible modelar la pérdida de agua y la temperatura corporal, tanto en condiciones de campo como de laboratorio (Romero-Barreto, 2013, Navas y Araujo, 2000), ya que en ellos, se evapora el agua al mismo ritmo que una superficie de agua libre y por lo tanto, representan un control en estudios de pérdida de agua por evapotranspiración al no poseer ninguna barrera a la pérdida de agua (Romero-Barreto, 2013). Estos modelos simulan aspectos como el tamaño y la masa de individuos vivos,

y por lo tanto pueden ser utilizados para simular el comportamiento de las especies de anfibios en diferentes ambientes (Spotila y Berman, 1976).

En este estudio se utilizó como modelo la rana Sabanera *Dendropsophus molitor*, especie endémica de Colombia, que habita la región andina en la Cordillera Oriental desde los 1.900 hasta los 3.600 metros de elevación. Esta especie se encuentra comúnmente en zonas intervenidas, como potreros, bordes de carreteras, centros poblados, principalmente de la sabana de Cundinamarca (Navas, 2006). Sin embargo, actualmente presenta retos como la presencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis*, la presión por parte de especies exóticas como *Lithobates catesbeianus* (Guarnizo et al., 2014) y el cambio climático (Kaufmann y Dohmen, 2016). Este último, es una de las causas del aumento de la temperatura ambiental y variabilidad climática, alterando la tolerancia térmica de los anfibios, modificando los patrones de actividad, dispersión y abundancia (Corn, 2005; Méndez-Narváez, 2014; Navas et al., 2013).

Dendropsophus molitor ha sido objeto de diferentes estudios, debido a su variación en tamaño, patrones de coloración y mecanismos fisiológicos y comportamentales que posee (Amézquita, 1999; Guarnizo et al., 2014 y Navas, 2006). También por los cambios drásticos en temperatura que experimentan entre el día y la noche en condiciones extremas, así como la no predictibilidad en los mismos (Navas, 1996b). Esta especie es euritérmica, ya que soporta amplia variación en la temperatura ambiental y presenta un comportamiento termorregulador heliotérmico que le permite alcanzar temperaturas corporales superiores a la ambiental a través de la toma del sol (basking) durante el día (Navas, 1996a; Navas et al., 2008; Valdivieso y Tamsitt, 1974). Además, a lo largo del día, posee también variación en los patrones de color corporal lo cual podría representar una potencial estrategia de termorregulación (Amézquita, 1999; Carey, 1978). En las coloraciones oscuras se ha sugerido que incrementan la absorción de radiación solar y la tasa de incremento en las temperaturas corporales, por lo cual ha sido asociado con especies de mayores elevaciones que experimentan una gran variación en la temperatura ambiental (Carey, 1978). También se ha sugerido que el efecto de la coloración esta

mediado por el tamaño corporal, el cual incrementa y disminuye las tasas de enfriamiento y calentamiento, respectivamente, con individuos de mayor tamaño presentando tasas menores (Carey, 1978).

El cambio de coloración está contemplado como estrategia de termorregulación diurna, así como el comportamiento heliotérmico que confiere a las especies la capacidad de poder llevar a cabo otros procesos vitales como la reproducción y alimentación a pesar de las bajas temperaturas (Navas, 2006). Sin embargo, también podrían incrementar su tasa de calentamiento y su riesgo de deshidratación al estar más expuestas a una mayor radiación ultravioleta, pero también a sustratos más calientes y secos (Withers, 1995; Carey, 1978; Navas, 2006). Adicionalmente, la degradación del hábitat representa cambios en las condiciones de temperatura y humedad relativa que pueden tener un efecto sinérgico con las condiciones ya extremas de estos hábitats.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo, fue determinar el efecto de seis variables climáticas y la temperatura del microhábitat sobre el porcentaje de cambio de peso y la temperatura corporal en modelos de agar de *D. molitor* con diferentes coloraciones, en dos microhábitats y dos condiciones microclimáticas diferentes. Esto, con el propósito de incrementar el conocimiento sobre la ecología térmica de *D. molitor* en los pastizales aledaños a construcciones y entender las potenciales consecuencias de la variación en las condiciones climáticas ambientales y del sustrato sobre la temperatura corporal y el porcentaje de cambio de peso de la rana sabanera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), localizado en el municipio de Cajicá a 4°56'70,5" N, 74°00'70,4" W, con una temperatura promedio de 12–18 °C, una humedad relativa promedio de 82% y una altitud de 2.550 m.s.n.m. (Angarita-Cañon, 2014; Trujillo-Pérez, 2017). Se muestrearon dos zonas diferentes dentro de la UMNG durante junio 17 hasta agosto 4 del 2017. El primer punto corresponde a los re-



Figura 1. Ubicación geográfica de las zonas muestreadas en la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. Zona 1: Reservorio; Zona 2: PTAR, y la ubicación de la estación metereológica.

servorios (lagos artificiales) ubicados a $4^{\circ}56'38,2''$ N, $74^{\circ}0'36''$ W y el segundo punto a un humedal natural, cerca de la planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR) ubicado a $4^{\circ}56'20,28''$ N, $74^{\circ}0'34,33''$ W, sitios con presencia de la especie (figura 1).

Se usaron seis variables climáticas derivadas de la estación meteorológica de la UMNG IMETOS IMT280 (No. de la estación 000008B8) (figura 1). Las variables de la estación meteorológica registradas fueron humedad relativa (%), radiación solar (W/m^2), precipitación (mm), temperatura ambiental ($^{\circ}C$), velocidad del viento (m/sec) y punto de rocío ($^{\circ}C$). La temperatura del sustrato ($^{\circ}C$), fue tomada en cada sitio de muestreo con un termómetro infrarrojo digital- Raytek DT-810 (Emisividad fija 0,95; Exactitud $\pm 0,4\%$).

Validación de los modelos de agar

Con el fin de evaluar el efecto de las variables ambientales sobre la temperatura corporal y el porcentaje de cambio de peso en la rana sabanera *D. molitor*, se usaron modelos de agar con el molde de la especie

(Navas y Araujo, 2000), siguiendo el protocolo propuesto por Sinervo et al., (2012) (anexo 1).

Evaluación de toma de temperatura y porcentaje de cambio de peso en los modelos

Cada modelo de agar se ubicó en dos microhábitats contrastantes y en cada sitio de muestreo, se usaron 2 moldes cafés y 2 moldes verdes (figura 2), los cuales fueron cambiados durante el día. Los microhábitats se categorizaron bajo dos condiciones, microhábitat seco, a 10 metros del cuerpo de agua y húmedo, a 50 cm del cuerpo de agua (lago artificial o humedal). En cada uno de los microhábitats se seleccionaron sitios con exposición directa al sol y sin exposición directa al sol (sombra). Estos ambientes fueron elegidos debido a que en el día se han observado individuos activos en estos sitios. Para registrar la temperatura de los modelos de agar y del microhábitat (temperatura del sustrato a 50 cm de donde estaba el modelo de agar), se tomaron datos cada cuatro horas, usando un termómetro infrarrojo-Raytek y una balanza analítica OHAUS. La toma cada cuatro horas, se realizó con base en una prueba piloto, que mostró



Figura 2. Ubicación de los hobos y moldes de agar en los cuatro microhábitats elegidos para la especie de *Dendropsophus monitor*. A y B: ambientes secos, C y D: ambientes cerca de un cuerpo de agua, A y C: sol, B y D: sombra.

que los modelos de agar no perdían sus propiedades en términos de la capacidad de pérdida de agua y comportamiento térmico.

Al evaluar la pérdida de agua por evaporación cutánea y la temperatura corporal, mediante la toma de datos, los modelos de agar eran reemplazados por otros modelos con los mismos moldes empleados. Se tomaron cuatro registros durante el día, durante los primeros 15 días (6:00, 10:00, 14:00, 18:00) y luego tres registros (8:00, 12:00, 16:00) durante los siguientes nueve días, para un total de 24 días. Para el análisis del porcentaje de cambio de peso ($\% \text{ cambio de peso} = (\text{peso inicial} - \text{peso final} / \text{peso inicial}) * 100\%$) en los modelos, se registró el peso inicial a la hora cero, y el peso final tres o cuatro horas después, con una balanza OHAUS de 0,001 de precisión.

Análisis de datos

Para la validación del modelo de agar se midió la temperatura y el porcentaje de cambio de peso, de

manera simultánea, a tres especímenes de *D. molitor* y a los modelos de agar (anexos 2 y 3). Se realizó una prueba de correlación de Pearson entre los valores obtenidos de los individuos vivos y los modelos de agar, en la cual altos valores de asociación entre las variables indicaban un comportamiento térmico similar entre el modelo de agar y los individuos vivos. Con el fin de analizar el efecto del color del modelo de agar (verde vs. café) sobre la temperatura y el porcentaje de cambio de peso del modelo, se utilizó un ANOVA de una vía. Todos los análisis se realizaron en el programa R v 4.0.5 2020 (R Core Team, 2021).

Se realizó la prueba de normalidad multivariante sobre todas las variables y los residuales, y una prueba de Mauchly, con el fin de probar esfericidad, con los paquetes MVN (Korkmaz et al, 2014) y Stats (R Core Team, 2021), respectivamente. Para probar diferencias en la dispersión entre los microhábitats (seco y húmedo) se hizo una prueba para la homogeneidad de la dispersión multivariante a través de



permutaciones (PERMDISP) con una matriz de distancias euclídeas, usando el paquete vegan (Oksanen et al, 2013).

Dado que las variables ambientales pueden estar correlacionadas entre sí y con el fin de evitar la multicolinealidad en el modelo, se utilizó el método del factor de la inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés), que implica que los errores estándar de los parámetros son inflados con la raíz cuadrada de $1/(1-R_j^2)$, se estableció un umbral de 3 VIF (Zuur et al, 2010). La variable que generaba alta colinealidad en el conjunto de datos fue eliminada de éste (e.g. temperatura del aire) y con las restantes se hizo el análisis de los datos. Con el fin de identificar si existía relación entre las variables ambientales (anexo 4), el microhábitat (seco vs. húmedo) y su condición (sol vs. sombra) sobre la pérdida de agua por evapotranspiración y la temperatura del modelo de agar a lo largo del tiempo, se realizó un modelo lineal de efectos mixtos usando el paquete lme4 (Bates et al., 2019). Este modelo permite considerar las medidas repetidas en el tiempo, evitando la pseudoreplicación e inflar la tasa de error de tipo I (Whitlock y Schluter, 2015; Zuur et al., 2009). Además, es un modelo flexible frente a la violación de los supuestos de normalidad y esfericidad. Todos los análisis se realizaron en el software R v 4.0.5 (R Core Team, 2021).

RESULTADOS

Validación de los modelos de agar

En la validación de los modelos de agar, se observó que *D. molitor* y los modelos presentan una correlación significativa para la temperatura corporal ($p < 0,0001$; $C_{\text{Pearson}} = 0,931$). Con respecto a la variable porcentaje de cambio de peso, al estar en el límite de significancia se asumió que se presenta un comportamiento de evapotranspiración similar entre el modelo de agar y *D. molitor* ($p = 0,051$, $C_{\text{Pearson}} = 0,949$). Lo anterior corrobora que el modelo de agar tiene un comportamiento térmico y porcentaje de cambio de peso similar al espécimen de *D. molitor*.

Efecto de la coloración del modelo de agar

En cuanto al efecto del color de los modelos de agar (verde vs. café), no se registró un efecto significativo sobre la temperatura corporal (ANOVA, $F = 0,094$; $p = 0,761$) y el porcentaje de cambio de peso de los modelos ($F = 0,468$; $p = 0,506$). Por lo tanto, se consideró que el color no es una variable informativa para los análisis.

Efecto de variables climáticas en modelos de agar

Las variables punto de rocío, humedad relativa, radiación solar, temperatura del sustrato, condición (sombra vs. sol) e interacción (microhábitat * condición) tienen un efecto significativo (tabla 1) sobre la pérdida de peso y la temperatura del modelo de agar (húmedo-sol; húmedo-sombra; seco-sol; seco-sombra) en el tiempo (LMMs, $p = 1,30 \times 10^{-6}$; 0,001; 0,006; $4,25 \times 10^{-7}$; 0,022 y 0,001, respectivamente).

El aumento en la temperatura del agar es consistente con el aumento en la temperatura en el día para ambos microhábitats, alcanzando valores máximos al mediodía (figura 3). La pérdida de agua y temperatura corporal del modelo de agar es significativamente mayor en la condición sol en el microhábitat seco (figura 4A), aunque también se presenta una alta pérdida de agua en la condición sombra para el microhábitat seco (figura 4B). La pérdida de agua y el cambio en la temperatura es consistente entre los días a las horas muestreadas, observándose que la mayor pérdida de agua para ambos microhábitats (seco vs. húmedo) se da entre las 12:00 y las 16:00 horas, siendo las horas de mayor aumento de temperatura para la zona de estudio (figura 5).

DISCUSIÓN

Efecto de la coloración del modelo de agar

Los resultados muestran que las dos coloraciones usadas en los modelos de agar no afectan significativamente la temperatura y el porcentaje de cambio del peso. Este resultado podría deberse a que la concentración y la gama del colorante (payasito) que se utilizó en el modelo de agar no permitió simular adecuadamente los patrones de color de *D. molitor*,

Tabla 1. Resultados del modelo lineal de efectos mixtos

	Error estándar	DF	t value	Pr(> t)
Intercept	0,137	10,012	-0,120	0,907
Microhábitat seco, húmedo	0,118	260,169	-0,455	0,649
Condición sombra y sol	0,115	260,219	2,302	0,022*
Punto de rocío	0,064	78,046	5,245	1,30e-06**
Precipitación	0,043	262,921	1,049	0,295
Radiación solar	0,105	198,465	2,769	0,006**
Velocidad del viento	0,051	263,420	-1,239	0,217
Temperatura del sustrato	0,082	264,178	5,187	4,25e-07***
Humedad relativa	0,091	77,663	3,538	0,001***
Microhábitat * Condición	0,164	260,025	-3,433	0,001***

Asterisco* hace referencia a la significancia de la prueba

a que el número de modelos que se tenían por cada tipo de color en los microhábitats era bajo y finalmente, a las características físicas del colorante, como la emisividad que es diferente a la piel de las ranas, y no permitió la absorción de las longitudes de onda que pueden absorber los organismos de estudio.

En contraste con los resultados obtenidos en este estudio en los modelos de agar, se ha observado el

cambio de color de la piel en algunas especies como una estrategia para la regulación térmica (Navas et al., 2008), especialmente para especies de tierras bajas. Un ejemplo de ello se registra en la rana arborícola gris (*Chiromantis xerampelina*), la cual cambia a colores más claros cuando la temperatura ambiental aumenta presentando una menor pérdida de agua, como un mecanismo para prevenir el sobrecalentamiento (Withers, 1995). En los anfibios, cuando la

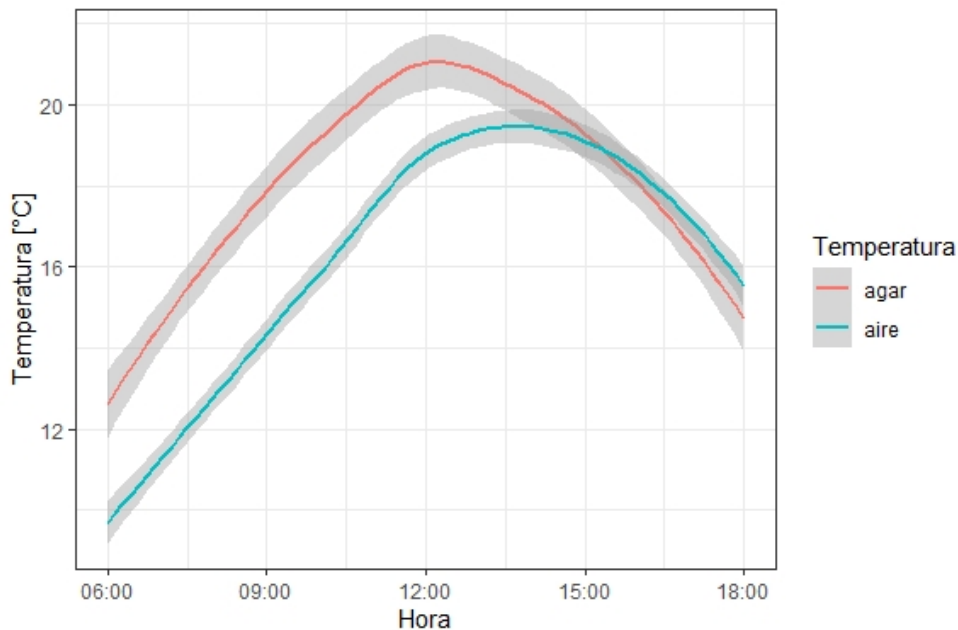


Figura 3. Temperatura del aire y temperatura de los modelos de agar de *Dendropsophus molitor*, en relación con la hora del día en las zonas muestreadas en la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

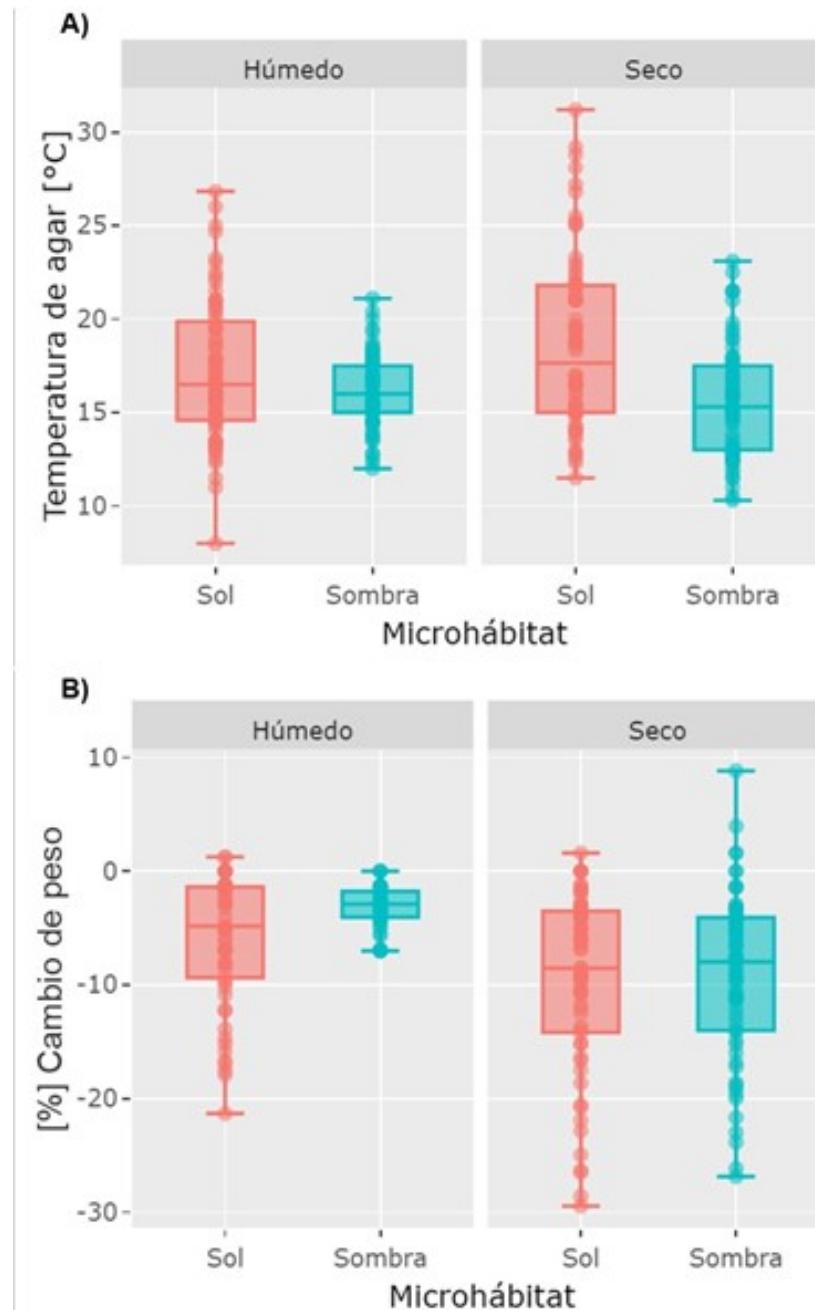


Figura 4. Diagrama de cajas mostrando el efecto del microhábitat sobre la temperatura del modelo de agar (A), y el porcentaje de cambio de peso de los modelos de agar (B) en la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

temperatura ambiental disminuye, cambian a una coloración oscura, obteniendo la temperatura corporal cercana a la temperatura ambiental (Withers, 1995). Lo anterior muestra que el color de la piel cambia dependiendo de la temperatura, para la absorción

solar a bajas temperaturas y reflexión solar a altas temperaturas (Navas et al., 2008; Withers, 1995). Por lo tanto, la TC y la pérdida de agua están influenciadas por los patrones de color anteriormente descritos. Además del color, es importante la altitud,

como lo muestra Percino-Daniel et al. (2021) en un enfoque multiespecie del género *Craugastor*, donde se compararon poblaciones de tierras bajas con poblaciones de tierras altas, encontrando que la elevación juega un papel fundamental en la regulación de la TC y la pérdida de agua, siendo las poblaciones de tierras bajas más susceptibles a fluctuaciones de temperatura en escenarios futuros. En el caso de *D. molitor*, una pregunta interesante para abordar sería, si para las especies de ranas de mediana y alta elevación, el color tiene un papel fundamental en la regulación de la temperatura corporal, para lo cual es necesario aumentar el número de modelos de agar, hacer pruebas de diferentes concentraciones y gamas de colores, para acercarse a los patrones de color de esta especie en los modelos de agar (Guarnizo et al., 2014; Tattersall et al., 2006).

Variables climáticas y modelos de agar

Los resultados obtenidos, mostraron que la temperatura de los modelos de agar fue superior a la temperatura del aire (figura 3), por lo tanto, se

puede corroborar que *D. molitor* tiene un comportamiento heliotérmico, previamente descrito por Navas (1996a), dado que toma el sol para elevar su temperatura corporal. Los anfibios que presentan este comportamiento se deshidratan rápidamente y deben adoptar una postura para conservar el agua cuando están expuestos al sol (Mitchell y Bergmann, 2016), postura, donde la piel ventral entra en contacto con el sustrato, las extremidades se mantienen debajo del cuerpo y la cabeza en posición baja (Withers, 1995), comportamiento que se ha observado en los individuos de *D. molitor* de campus de la UMNG en Cajicá.

Por otra parte, la exposición a la radiación solar, temperatura del sustrato, punto de rocío, humedad relativa (anexos 4 y 5) y tipo de microhábitat afectan el porcentaje de cambio de peso relacionado con la temperatura corporal, sobre todo en la condición sol de los microhábitats expuestos a la radiación solar (figura 4) (Maldonado-Castro, 2017; Navas, 1996a). La radiación solar está relacionada con la temperatura del sustrato (anexo 6) y estas variables a su

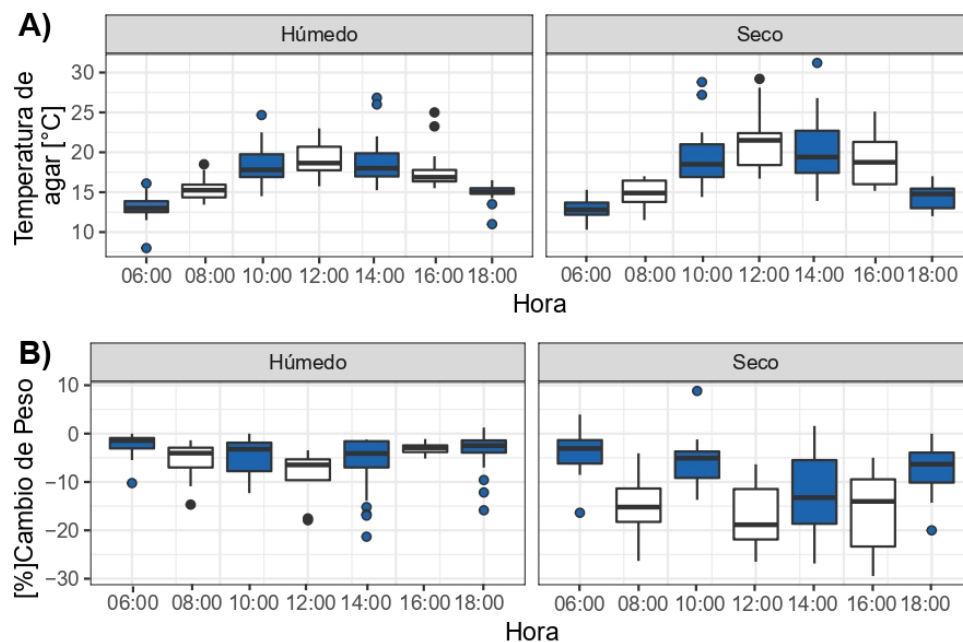


Figura 5. Variación de la temperatura (A) y porcentaje de cambio de peso (B) de los modelos de agar con respecto a la hora del día, discriminado entre los microhábitats húmedo y seco en los lugares de muestreo en la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. En color azul y blanco se resalta el primer y segundo muestreo, respectivamente.



vez tendrán un efecto directo o indirecto sobre la temperatura corporal y la pérdida del agua por evapotranspiración en una escala temporal (Angilletta et al., 2010).

En este estudio, la temperatura del sustrato del microhábitat afecta la TC del modelo de agar (anexo 4), lo cual es concordante con lo encontrado en las especies de la familia bufonidae *Anaxyrus compactilis*, *Incilius occidentalis*, en las especies de la familia Hylidae *Dryophytes eximius*, *D. arenicolor* y en la especie de la familia Ranidae *Lithobates neovolcanicus* (Leyte–Manrique et al., 2018). Lo anterior muestra que tanto en la experimentación de modelos de agar y la realizada con los especímenes directamente, estos modelos se comportan como termoconformistas, dado que dependen de las condiciones ofrecidas por el ambiente.

En cuanto al horario de muestreo, las horas donde predominan los valores más altos de temperatura corporal y mayor deshidratación de los moldes de agar de *D. molitor* son las 12:00 y 16:00 horas (figuras 3 y 5). Esta pérdida de agua, posiblemente se deba a una estrategia de enfriamiento por evapotranspiración en las horas de mayor radiación solar y por lo tanto con las temperaturas ambientales más altas (Sanabria et al., 2003). Sin embargo, este enfriamiento evaporativo de agua que presenta el anfibio hace que haya un costo metabólico alto a cambio de mantener una temperatura óptima (Alveal–Riquelme, 2015; Maldonado-Castro, 2017; Sanabria et al., 2003), siendo importante la capacidad que presenta la especie para el tiempo dedicado a la termorregulación, para tolerar la pérdida de agua (Alveal-Riquelme, 2015; Sanabria et al., 2003).

Los resultados muestran que hay un efecto de varias variables, como la temperatura del microhábitat o temperatura ambiental, radiación solar y la humedad relativa, sobre la pérdida de agua y temperatura corporal de los modelos. Estos resultados, son similares a los observados en el trabajo de Sanabria et al. (2003), donde las variables temperatura ambiental, radiación solar y la velocidad del viento, mostraron un efecto significativo sobre la temperatura corporal. En contraste, los trabajos de Navas et al. (2013) y Rueda-Solano et al. (2016) encontraron una asocia-

ción entre la temperatura corporal y el gradiente de altura.

Por otra parte, al analizar la variable punto de rocío, se encontró que está relacionada con la temperatura corporal y el porcentaje de cambio de peso de *D. molitor* (anexos 4 y 5), lo que puede deberse a que en estas ranas andinas, el rocío es una variable muy importante para compensar las elevadas temperaturas, ya que es una de las formas disponibles de agua en el ambiente (Martines y Lira, 2008).

A partir de este estudio se plantea la necesidad de incorporar más variables adicionales a la temperatura ambiental en los estudios ecofisiológicos, como lo son: la radiación solar, la temperatura del sustrato, punto de rocío, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y microhábitat, debido a que pueden tener un efecto fuerte sobre el comportamiento térmico de las especies a trabajar (Alveal-Riquelme, 2015; Maldonado-Castro, 2017).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque *D. molitor* presenta diferentes patrones de coloración los cuales pueden ser afectados por la temperatura ambiental, donde la variación en la coloración de las ranas varía dependiendo de la temperatura ambiental (Guarnizo et al., 2014; Tattersall et al., 2006), en nuestros modelos de agar la variación de coloración no fue significativa para la TC, ni la pérdida de agua.

Dendropsophus molitor presenta un comportamiento heliotérmico, por lo tanto, es susceptible a la deshidratación. Se evidencia la importancia de abarcar variables adicionales a la temperatura ambiental, debido a que pueden ser mejores descriptores del comportamiento térmico y porcentaje de cambio de peso de las especies.

Este trabajo resalta la necesidad de realizar seguimiento a estas poblaciones a través del tiempo con el fin de poder evaluar el comportamiento de las variables abióticas en el campus, y su efecto sobre la temperatura corporal y el porcentaje de cambio de peso de la rana sabanera. Este conocimiento permite a largo plazo pensar en estrategias de conservación



para la especie dentro del campus, tales como la siembra de arbustos y árboles que favorezca los nichos que las especies usan.

AGRADECIMIENTOS

En la fase de colecta de datos se agradece a Camila Jiménez Loaiza. En la realización y ejecución de este proyecto agradezco al semillero de evolución y conservación por la retroalimentación dada al proyecto. Se agradece a la Universidad Militar Nueva Granada por facilitar los datos de la estación meteorológica. El proyecto fue financiado por Nelsy Rocio Pinto Sánchez y Estefany Acosta Lugo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no presentan conflictos de intereses.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

El material suplementario se encuentra disponible en la sección final del artículo.

Anexo 1. Preparación de los moldes de alginato y modelos de agar, modificado del protocolo de Sinervo et al. (2012).

Anexo 2. A. Molde de alginato de *Dendropsophus molitor* para ser usado en la validación de los modelos de agar. **B.** Modelos de agar verde y café de *Dendropsophus molitor* usados para la evaluación del efecto de factores abióticos sobre la temperatura corporal y porcentaje de cambio de peso en la rana sabanera en Cajicá-Cundinamarca.

Anexo 3. Análisis de multicolinealidad con todas las variables usando el método del factor de la inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés). En negrita se resaltan las dos variables que son más afectadas al eliminar la variable temperatura del aire.

Anexo 4. Regresión lineal de las variables ambientales significativas *versus* la temperatura del modelo de agar en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

Anexo 5. Regresión lineal de las variables ambientales significativas *versus* el porcentaje de cambio de peso en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

Anexo 6. Correlación de la radiación solar *versus* la temperatura del sustrato en microhábitats monitoreados en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

REFERENCIAS

- Alveal-Riquelme, N. F. (2015). *Relaciones entre la fisiología térmica y las características bioclimáticas de Rhinella spinulosa (Anura: Bufonidae) en Chile a través del enlace mecanicista de nicho térmico* [Tesis de Maestría]. Universidad Concepción, Concepción. Repositorio UDEC. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1797>
- Amézquita, A. (1999). Color pattern, elevation and body size in the high andean frog *Hyla labialis*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23, 231–238. https://www.accefyn.com/revista/Vol_23/supl/231-238.pdf
- Angarita-Cañón, F.A. (2014). *Efecto del ambiente de cultivo y la densidad de siembra sobre la productividad de dos materiales de romero (Rosmarinus officinalis L) israelí y cespó, en Cajicá Colombia* [Tesis de pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Repositorio UMNG. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/13934>
- Angilletta, M. J., Cooper, B. S., Schuler, M. S., & Boyles, J. G. (2010). The evolution of thermal physiology in endotherms. *Frontiers in bioscience*, 2, 861–881. DOI:10.2741/e148
- Bates, D., Martin, M., Bolker, B., & Walker, S. (2019). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Statistical software magazine*, 67(1), 1–48. <https://www.jstatsoft.org/article/view/v067i01>
- Brattstrom, B. H. (1979). Amphibian temperature regulation studies in the field and laboratory. *American Zoologist*, 19(1), 345–356. DOI:10.1093/icb/19.1.345
- Carey, C. (1978). Factors affecting body temperatures of toads. *Oecologia*, 35(2), 197–219. DOI: 10.1007/BF00344732
- Corn, P. S. (2005). Climate change and amphibians. *Animal Biodiversity and Conservation*, 28, 59–67. <https://www.raco.cat/index.php/ABC/article/view/56740/66502>
- Guarnizo, C. E., Armesto, O., & Acevedo, A. (2014). *Dendropsophus labialis*. *Catálogo de Anfibios y Reptiles de Colombia* (pp. 56–61). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia. https://www.researchgate.net/publication/265014754_Dendropsophus_labialis_Catalogo_de_Anfibios_y_Reptiles_de_Colombia
- Kaufmann, K., & Dohmen, P. (2016). Adaption of a dermal *in vitro* method to investigate the uptake of chemicals across amphibian skin. *Environmental Sciences Europe*, 28(10), 1–13. DOI:10.1186/s12302-016-0080-y
- Köhler, A., Sadowska, J., Olszewska, J., Trzeciak, P., Berger,



- O., & Tracy, C. (2011). Staying warm or moist? Operative temperature and thermal preferences of common frogs (*Rana temporaria*), and effects on locomotion. *The Herpetological Journal*, 21, 17–26. <http://hdl.handle.net/2263/19493>
- Korkmaz, S., Goksuluk, D., & Zararsiz, G. (2014). MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. *The R Journal*, 6(2), 151–162. <https://journal.r-project.org/archive/2014-2/korkmaz-goksuluk-zararsiz.pdf>
- Leyte-Manrique, A., González-García, R. L. E., Quintero-Díaz, G. E., Alejo-Iturvide, F., & Berriozabal-Islas, C. (2018). Aspectos ecológicos de una comunidad de anuros en un ambiente tropical estacional en Guanajuato, México. *Acta zoológica mexicana*, 34, 1–14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57560238046>
- Lillywhite, H. B. (2006). Water relations of tetrapod integument. *Journal of Experimental Biology*, 209(2), 202–226. DOI:10.1242/jeb.02007
- Maldonado-Castro, G. A. (2017). *Tasas de pérdida de agua por evapotranspiración en dos especies de anfibios ecuatorianos con hábitos ecológicos diferentes: Hypsiboas cinerascens (Anura: Hylidae) y Pristimantis unistrigatus (Anura: Craugastoridae)* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. Repositorio PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13209>
- Martines, E., & Lira, L. (2008). Cálculo de la Temperatura de Punto de Rocío a Diferentes Valores de Presión. Santiago de Querétaro: Centro Nacional de Metrología. Simposio de Metrología, 22, 1–5. ps://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/M1/SM2008-M117-1098.pdf
- Méndez-Narváez, J. (2014). Diversidad de anfibios y reptiles en hábitats altoandinos y paramunos de la cuenca del río Fúquene. *Biota Colombiana*, 15, 94–103. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/310/308>
- Mitchell, A., & Bergmann, P. J. (2016). Thermal and moisture habitat preferences do not maximize jumping performance in frogs. *Functional Ecology*, 30, 733–742. [tps://doi.org/10.1111/1365-2435.12535](https://doi.org/10.1111/1365-2435.12535)
- Navas, C. A. (1996a). Implications of microhabitat selection and patterns of activity on the thermal ecology of high elevation neotropical anurans. *Oecologia*, 108, 617–626. DOI:10.1007/BF00329034
- Navas, C. A. (1996b). Metabolic physiology, locomotor performance, and thermal niche breadth in neotropical anurans. *Physiological Zoology*, 69(6), 1481–1501. <http://www.jstor.org/stable/30164271>
- Navas, C. A. (2006). Patterns of distribution of anurans in high Andean tropical elevations: insights from integrating biogeography and evolutionary physiology. *Integrative and comparative Biology*, 46(1), 82–91. DOI:10.1093/icb/ijc001
- Navas, C. A., & Araujo, C. (2000). The Use of Agar Models to Study Amphibian Thermal Ecology. *Journal of Herpetology*, 34(2), 330–334. DOI:10.2307/1565438
- Navas, C. A., Carvajalino-Fernández, J. M., Saboyá-Acosta, L. P., Rueda-solano, L. A., & Carvajalino-Fernández, M. A. (2013). The body temperature of active amphibians along a tropical elevation gradient: patterns of mean and variance and inference from environmental data. *Functional Ecology*, 27, 1145–1154. DOI:10.1111/1365-2435.12106
- Navas, C. A., Gomes, F. R., & Carvalho, J. E. (2008). Thermal relationships and exercise physiology in anuran amphibians: Integration and evolutionary implications. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology*, 151(3), 344–362. DOI:10.1016/j.cbpa.2007.07.003
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., Ohara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Wagner, H., & Oksanen, M. J. (2013). Package vegan. *Community ecology package, version*, 2(9), 1–295. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>
- Percino-Daniel, R., Contreras López, J. M., Téllez-Valdés, O., Méndez de la Cruz, F. R., Gonzalez-Voyer, A., & Piñero, D. (2021). Environmental heterogeneity shapes physiological traits in tropical directdeveloping frogs. *Ecology and evolution*, 11(11), 6688–6702. DOI:10.1002/ece3.7521
- R Core Team. (2021). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Romero-Barreto, P. G. (2013). *Requerimientos fisiológicos y microambientales de dos especies de anfibios (Scinax ruber e Hyloxalus yasuni) del bosque tropical de Yasuní y sus implicaciones ante el cambio climático* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. Repositorio PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/5726>
- Rueda-Solano, L. A., Navas, C., Carvajalino-Fernández, J., & Amézquita, A. (2016). Thermal ecology of montane *Atelopus* (anura: bufonidae): a study of intrageneric diversity. *Journal of Thermal Biology*, 58, 91–98. DOI:10.1016/j.jtherbio.2016.04.007
- Sanabria, E. A., Quiroga, L. B., & Acosta, J. C. (2003). Relación entre la temperatura corporal de adultos de *Bufo arenarum* (Anura: Bufonidae) y variables ambientales en un humedal de San Juan, Argentina. *Multequina*, 12, 4953 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42801205>
- Shoemaker, V. H., & McClanahan, L. L. (1975). Evaporative water loss, nitrogen excretion and osmoregulation in phyllomedusine frogs. *Journal of comparative physiology*, 100(4), 331–345. DOI:10.1007/BF00691053
- Sinervo, B., Jiménez, O., & Luja, V.H. (2012). Protocol for the construction of agar models for amphibian ecophysiology experiments. Santa Cruz. University of California, Santa Cruz.
- Spotila, J. R., & Berman, E. N. (1976). Determination of skin resistance and the role of the skin in controlling water loss in amphibians and reptiles. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 55(4), 407–411. DOI:10.1016/0300-9629(76)90069-4
- Tattersall, G. J., Eterovick, P. C., & Andrade, D. V. D. (2006). Tribute to R. G. Boutilier: skin colour and body temperature changes in basking *Bokermannohyla alvarengai* (Bokermann 1956). *The Journal of experimental biology*, 209, 1185–1196. DOI:10.1242/jeb.02038
- Trujillo-Pérez, M. M. (2017, Julio 10). *Estación Meteorológica*. Aula virtual de la Universidad Militar Nueva Granada. <http://virtual2.umng.edu.co/moodle/course/view.php?id=3217>



- Valdivieso, D. & Tamsitt, J. R. (1974). Thermal Relations of the Neotropical Frog *D. labialis* (Anura: Hylidae). *Royal Ontario Museum*, 26, 1–15. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/123483#page/5/mode/1up>
- Whitlock, M. C., & Schluter, D. (2015). *The analysis of biological data* (2 ed.). Roberts Publishers. https://www.academia.edu/43317940/The_Analysis_of_Biological_Data_Second_Edition
- Withers, P. C. (1995). Evaporative water loss and colour change in the Australian desert tree frog *Litoria rubella* (Amphibia: Hylidae). *Records of the Western Australian Museum*, 17, 277–281. <https://biostor.org/reference/239479>
- Wygoda, M. L., & Williams, A. A. (1991). Body temperature in free-ranging green tree frogs (*Hyla cinerea*): A comparison with “typical” frogs. *Herpetologica*, 47(3), 328–335. <http://www.jstor.org/stable/3892625>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in ecology and evolution*, 1(1), 3–14. DOI:10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. *Journal of Statistical Software, Book Reviews*, 32(1), 1–3. DOI:10.18637/jss.v032.b0

Material Suplementario

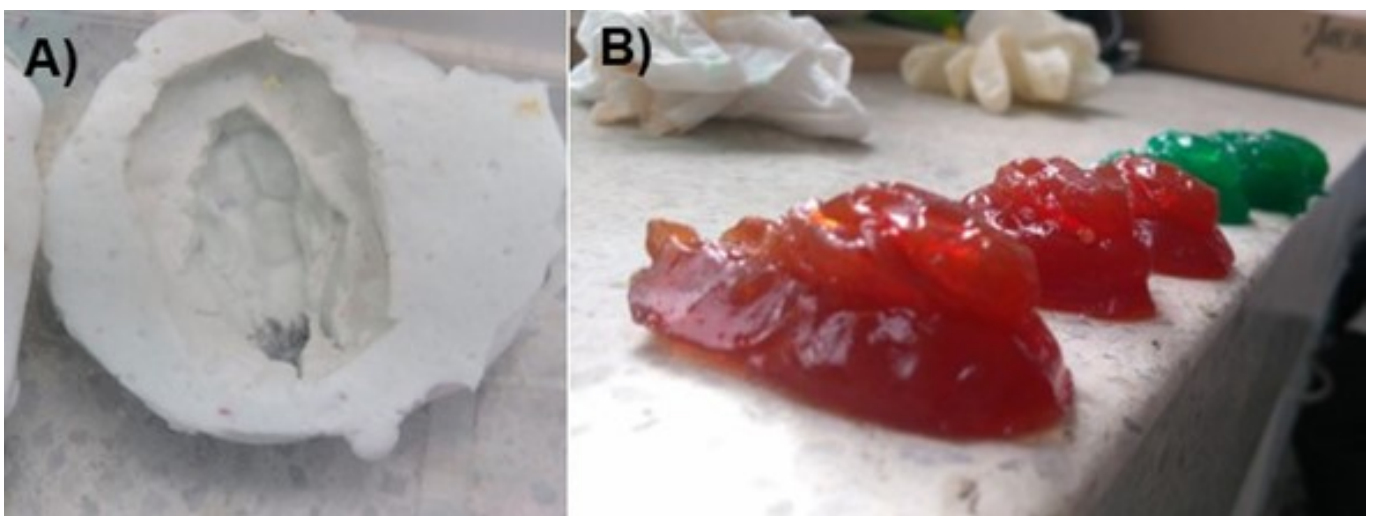
ANEXOS

Anexo 1. Preparación de los moldes de alginato y modelos de agar, modificado del protocolo de Sinervo et al. (2012).

Para la preparación del molde de alginato se utilizó un espécimen de *Dendropsophus molitor* de la colección de zoología José Ricardo Cure Hakim de la Universidad Militar Nueva Granada (CZCH-UMNG). El espécimen se ubicó en una superficie plana no adherente y se rodeó con plastilina como barrera para poder servir la mezcla del alginato (Chroma print premium), preparada con 37,5 ml de agua y 10,5 g de alginato para la realización de dos moldes de 60 mm. Primero, se depositó el agua y luego el alginato se batió y vertió rápidamente sobre el molde debido a que se solidifica muy rápidamente. Luego, se dejó secar por 2 minutos, se quitó la barrera de plastilina y con ayuda de una espátula se despegó el molde de alginato de la superficie (anexo 2). En la parte ventral del molde, se quitó con cuidado el exceso de alginato y se sacó el espécimen de CZCH-UMNG.

Finalmente, se preparó el agar para depositarlo sobre el molde de alginato. Para esto, se pesaron 4,4 gramos de agar granulado y 200 ml de agua, para 28 modelos de agar de 7 gramos. Se homogenizó la solución en el microondas y por último, se adicionaron 2 gotas de colorante para alimentos payasito para 200 ml (anexo 3). Los colores que se usaron fueron verde y café debido a que son las coloraciones más abundantes de la especie *D. molitor* en campus.

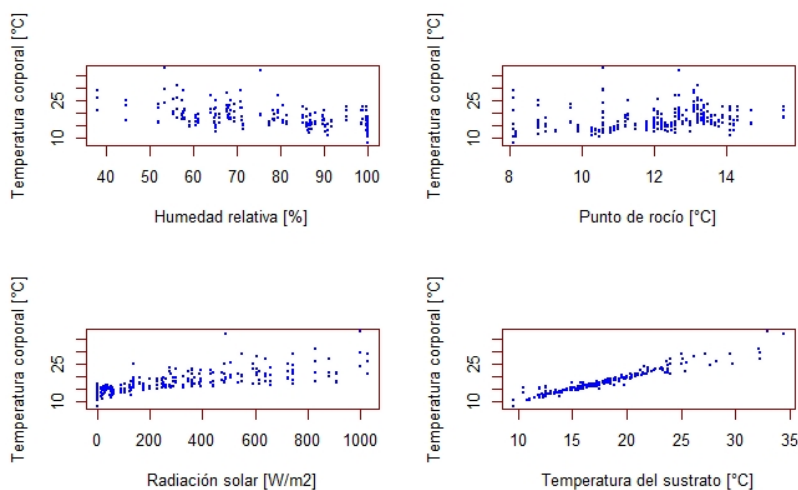
Anexo 2. A. Molde de alginato de *Dendropsophus molitor* para ser usado en la validación de los modelos de agar. **B.** Modelos de agar verde y café de *Dendropsophus molitor* usados para la evaluación del efecto de factores abióticos sobre la temperatura corporal y porcentaje de cambio de peso en la rana sabanera en Cajicá-Cundinamarca.



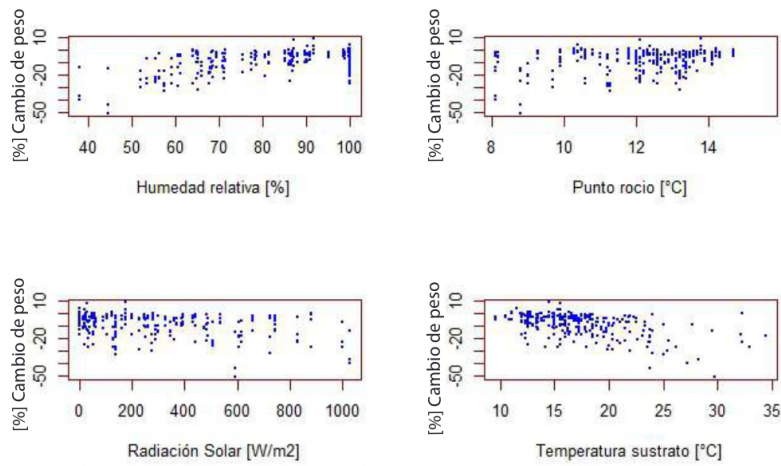
Anexo 3. Análisis de multicolinealidad con todas las variables usando el método del factor de la inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés). En negrita se resaltan las dos variables que son más afectadas al eliminar la variable temperatura del aire.

Variables	VIF	VIF sin TA
Microhábitat	2,196	2,194
Punto de rocío	11,153	1,319
Humedad relativa (-TA)	60,913	2,313
Temperatura del aire (TA)	52,113	-
Temperatura del sustrato	2,389	2,342
Sol-sombra	2,109	2,109
Precipitación	1,239	1,167
Radiación solar	3,060	2,871
Velocidad del viento	1,457	1,443
Microhábitat	3,174	3,173

Anexo 4. Regresión lineal de las variables ambientales significativas versus la temperatura del modelo de agar en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.



Anexo 5. Regresión lineal de las variables ambientales significativas versus el porcentaje de cambio de peso en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.



Anexo 6. Correlación de la radiación solar versus la temperatura del sustrato en microhábitats monitoreados en campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia

