



CURVA DE CRECIMIENTO DE CUYES MACHOS (*Cavia porcellus*) DE LA RAZA PERÚ MEDIANTE MODELOS NO LINEALES EN COLOMBIA †

[GROWTH CURVES OF MALE GUINEA PIGS (*Cavia porcellus*) OF THE PERUVIAN BREED THROUGH NON-LINEAR MODELS IN COLOMBIA]

W.A. Tapie^{1*}, L. Giraldo-Arcila², S.L. Posada-Ochoa¹ and R. Rosero-Noguera¹

¹Grupo de Investigación en Ciencias Agrarias-GRICA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, AA 1226, Medellín-Colombia.

²Grupo de Investigación GIAZ, Universidad Católica de Oriente, AA 008, Rionegro-Colombia. Emails: watapiec@unal.edu.co *;

luis.giraldo7141@uco.net.co; sandra.posada@udea.edu.co;

jaimerosero@udea.edu.co

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Animal growth modeling is a tool that enables the acquisition of parameters to evaluate animal performance and predict outcomes for decision-making. **Objective:** To describe the growth of male guinea pigs of the Peruvian breed using the non-linear Brody, Gompertz, Logistic, and Von Bertalanffy models. **Methodology:** Twelve male guinea pigs with an initial weight of 393 ± 55 g were housed in metabolic cages with *ad libitum* feeding of a complete pellet diet. They were weighed every seven days for 13 weeks until reaching 1197 ± 84 g. Criteria used to assess the model's fitting ability included the Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), coefficient of determination (R^2), concordance correlation coefficient (CCC), and mean squared prediction error (CMEP). **Results:** The Logistic model consistently predicted maturity weight (1421g), initial weight (187g), age (65 days), and weight (711g) at the growth curve inflection point. Gompertz and Von Bertalanffy's models tended to overestimate adult weight (A) and exhibited the lowest maturity index (k). Among Gompertz, Logistic, and Von Bertalanffy models, AIC, BIC, R^2 , CCC, and CMEP fitting criteria showed no significant differences ($p > 0.05$). **Implications:** The Brody model was the only one with biologically inconsistent parameters. **Conclusion:** Considering the biological significance of parameters and residual analysis, the Logistic model is more suitable for describing the growth curve of male guinea pigs of the Peruvian breed.

Key words: parameters; guinea pigs; growth; nonlinear models.

RESUMEN

Antecedentes: El modelado del crecimiento animal es una herramienta que permite obtener algunos parámetros para evaluar el comportamiento animal y predecir resultados para tomar decisiones. **Objetivo:** Describir el crecimiento de cuyes machos de la raza Perú mediante los modelos no lineales Brody, Gompertz, Logístico y Von Bertalanffy. **Metodología:** Se utilizaron doce cuyes machos con un peso inicial de 393 ± 55 g, se alojaron en jaulas metabólicas con alimentación *ad libitum* de una dieta completa en forma de pellet y se pesaron cada siete días durante 13 semanas hasta alcanzar los 1197 ± 84 g. Los criterios utilizados para evaluar la capacidad de ajuste fueron criterio de información de Akaike (AIC), criterio de información bayesiano (BIC), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de correlación de concordancia (CCC) y error cuadrático medio de predicción (CMEP). **Resultados:** El modelo Logístico predijo de manera más coherente el peso a la madurez (1421g), el peso inicial (187g) y la edad (65 días) y peso (711g) al punto de inflexión de la curva de crecimiento. Los modelos de Gompertz y Von Bertalanffy tendieron a sobrestimar el peso adulto (A) y presentaron el menor índice de madurez (k). Entre los modelos Gompertz, Logístico y Von Bertalanffy los criterios de ajuste AIC, BIC, R^2 , CCC y CMEP no presentaron diferencias ($p > 0.05$). **Implicaciones:** El modelo de Brody fue el único que los parámetros no tuvieron coherencia biológica. **Conclusión:** De acuerdo al significado biológico de los parámetros y el análisis de los residuales, el modelo Logístico es más apropiado para describir la curva del crecimiento de cuyes machos de la raza Perú.

Palabras claves: parámetros; cuy; crecimiento; modelos no lineales.

† Submitted September 23, 2023 – Accepted December 5, 2023. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5179>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = W.A. Tapie: <https://orcid.org/0000-0001-7064-6753>; S.L. Posada-Ochoa: <https://orcid.org/0000-0002-4615-0552>; R. Rosero-Noguera: <https://orcid.org/0000-0002-3238-8842>.

INTRODUCCIÓN

El cuy (*Cavia porcellus*) es considerada una especie productora de carne en Perú, Ecuador, Colombia y Bolivia, países donde tradicionalmente es utilizada como parte de la alimentación de la población (Ayagirwe *et al.*, 2018, Dalle-Zotte y Cullere, 2019). La crianza de esta especie ocupa un renglón importante en la economía rural de estos países y es una práctica cultural, que proporciona seguridad alimentaria y representa una fuente de ingresos para la población rural (Benavides-Benavides *et al.*, 2021). De manera similar, en Camerún, República Democrática del Congo, Tanzania y México, el cuy es utilizado como una especie de abasto de carne, forma parte de la alimentación y es fuente de sustento por su importancia social y económica (Ngoula *et al.*, 2017, Ayagirwe *et al.*, 2018, Vargas-Romero *et al.*, 2020). La forma de consumo de la carne del cuy obedece al lugar o país donde se produce (Sánchez-Macías *et al.*, 2018, Vargas-Romero *et al.*, 2020), en el mercado gastronómico se considera un plato típico exótico (Avilés *et al.*, 2014), aunque de manera general las distintas presentaciones son similares al consumo de carne de cerdo, pollos de engorde y bovinos (Lammers *et al.*, 2009, Vargas-Romero *et al.*, 2020).

En Colombia, la producción de cuyes se realiza en dos sistemas de producción: familiar y comercial. Bajo el primer escenario, no se tienen programas de selección genética y los cuyes son alimentados con forraje en los hogares de los pequeños productores de las zonas rurales (Lammers *et al.*, 2009, Avilés *et al.*, 2014). Por otra parte, los sistemas productivos comerciales utilizan instalaciones tecnificadas, suministro de alimento balanceado y cuentan con líneas mejoradas genéticamente para la producción de carne (Sánchez-Macías *et al.*, 2018), pero no se conocen algunos aspectos relacionados con su crecimiento y nutrición. El crecimiento animal es uno de los aspectos más importantes al momento de evaluar la productividad en las unidades dedicadas a la producción de carne y, en algunos casos, es usado como criterio de selección (Agudelo *et al.*, 2009).

El conocimiento de las características asociadas al crecimiento, permitiría orientar los programas de selección genética, buscando mejorar los índices productivos y el uso eficiente de los recursos alimenticios (Camino *et al.*, 2014, Paredes y Goicochea, 2021), que resultaría en líneas genéticas mejoradas que ofrezcan mayor rentabilidad, competitividad y permanencia en el mercado (Posada *et al.*, 2015).

Por otro lado, la modelación matemática del crecimiento es la herramienta principal, que, junto con la información de consumo de alimento, se utilizan para desarrollar programas de nutrición de precisión (Hurtado *et al.*, 2021). El crecimiento corporal se ha representado mediante modelos no lineales, que describen el desarrollo a lo largo del

tiempo en función de un número reducido de parámetros (Martínez-Rocha *et al.*, 2020). Los modelos matemáticos no lineales, desarrollados empíricamente para relacionar peso y edad en diferentes especies animales, han sido muy útiles para predecir tasas de crecimiento y requerimientos nutricionales, identificar el potencial de los animales para ganar peso vivo y establecer programas de selección genética (Torres *et al.*, 2012, Maldonado-Jáquez *et al.*, 2021).

Los modelos no lineales más utilizados para describir el crecimiento son el modelo de Brody, Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico, que acorde con Noguera *et al.* (2008) pueden ser utilizados para describir el crecimiento en cuyes de las razas mejoradas (Apráez-Guerrero *et al.*, 2011, Lagos, 2013). Otros autores, han sido más específicos y recomiendan modelos como el de Von Bertalanffy (Burgos-Paz *et al.*, 2010) y el Logístico (Martínez-González *et al.*, 2015). Recientemente los modelos de Brody, Gompertz, Logístico y Von Bertalanffy se han evaluado en cuyes machos y hembras alimentados con forraje (Vega-Vilca *et al.*, 2023), lo que indica que probablemente estos modelos sean los más adecuados para describir el crecimiento en cuyes. Sin embargo, el uso del modelo matemático para representar el crecimiento en cuyes depende del tipo de animal y sistema de crianza (Burgos-Paz *et al.*, 2010, Vega-Vilca *et al.*, 2023).

En la literatura, los trabajos que modelan el crecimiento de los cuyes son limitados, han agrupado diferentes líneas genéticas y se circunscriben a programas de alimentación basados en forrajes o combinación de forraje y concentrado (Noguera *et al.*, 2008, Posada *et al.*, 2015, Quispe *et al.*, 2021).

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes modelos matemáticos en cuanto a su capacidad para describir la dinámica del crecimiento en cuyes de la raza Perú alimentados con una dieta comercial completa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo, se realizó en el Centro Santa María de la Universidad Católica de Oriente, localizado en el municipio de El Carmen de Viboral (Antioquia Colombia), a 2150 msnm, con temperatura promedio de 17°C, precipitación de 2304 mm, humedad relativa de 80% y topografía de plana a ondulada, correspondiente a una zona de vida bosque húmedo montano bajo (bh-MB), de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1967).

Se utilizaron 12 cuyes machos no castrados de la línea Perú. El número de animales requerido para describir la curva de crecimiento se realizó mediante la fórmula propuesta por Cochran (1977) (Ecuación 1). Se empleó un nivel de confianza del 95 % cuyo valor crítico de Z es aproximadamente 1.96 en una

distribución normal estándar. Se asumió que la variabilidad esperada para alcanzar el peso de 1200 g (peso al sacrificio) fue de 90 % (esto significa que se asume que, en una población de 100 cuyes, 90 animales alcanzan los 1200 g en el tiempo esperado). El error máximo permitido (E) fue de 0.17.

$$n = (Z^2 * P * (1 - P)) / E^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: Z es el valor crítico correspondiente al nivel de confianza deseado; P es la variabilidad esperada y E es la precisión deseada (error máximo permitido) (Cochran, 1977)

Los animales se adquirieron en la Unidad Productiva de Especies Menores del Centro Internacional de Producción Limpia Lope – SENA regional Nariño, Colombia. Durante todo el periodo experimental, los animales fueron alojados en jaulas metabólicas individuales de 0.3 m de largo x 0.3 m de ancho x 0.25 m de alto, las cuales estuvieron provistas de comedero y bebedero automático. Las jaulas se diseñaron en varilla de hierro corrugada 3/8 (estructura del marco), malla galvanizada calibre 14 (para el piso y los laterales), comedero y recolector de orina en lámina galvanizada calibre 22 y bandeja recolectora de heces en malla tipo angeo

Dieta y alimentación

Para la alimentación de los cuyes, fue formulado un alimento concentrado, balanceado acorde a los requerimientos reportados por el NRC (1995) (Tabla 1). El alimento fue ofrecido *ad libitum*, en la forma de ración peletizada, dos veces al día, a las 7 y 15 horas. El peso de los animales fue registrado semanalmente con el propósito de verificar la ganancia de peso y ajustar la cantidad de alimento ofrecido, garantizando siempre un rechazo del 20%. El consumo fue calculado por la diferencia entre la cantidad de alimento ofrecido y la cantidad de alimento rechazado.

Pesaje de los animales

El experimento inicio cuando los animales alcanzaron un peso promedio al destete de 393 ± 55 g a los 15 días de edad, estos animales descendieron de un tamaño de camada de tres gazapos por hembra. El estudio termino a las 13 semanas con 1197 ± 84 g de peso vivo. Los animales se pesaron cada siete días en una Balanza digital marca Electronic® modelo SF-400, con capacidad máxima de 10 kg y una precisión de 1 g. Antes de cada pesaje los animales fueron restringidos de agua y alimento por 12 horas.

Modelos matemáticos y análisis estadístico

Los modelos utilizados para describir el crecimiento de los animales fueron: Brody, Gompertz, Logístico

y Von Bertalanffy (Tabla 2). Estos modelos poseen tres parámetros, los cuales corresponden al peso a la madurez (A), un parámetro de integración (B) que no posee significado biológico y un índice de madurez (K) que puede ser interpretado como el cambio de peso en relación con el peso adulto. Estos parámetros fueron integrados para estimar el peso inicial de los animales (P_0), el peso y la edad al punto de inflexión de la curva (P_i y T_i , respectivamente) (Selvaggi *et al.*, 2017). El punto de inflexión de la curva representa el momento en el que el crecimiento deja de acelerarse y empieza a retardarse hasta llegar al peso adulto.

Tabla 1. Composición porcentual de la dieta experimental para cuyes.

Ingrediente	Cantidad (%)
Heno de alfalfa	35.0
Torta de soya	12.0
Maíz	44.3
Harina de arroz	3.0
Aceite de soya	3.0
Fosfato dicálcico	0.5
Carbonato de calcio	1.0
Sal	0.8
Premezcla minerales y vitaminas*	0.4
Materia seca	92.1
Proteína bruta	16.4
Extracto etéreo	4
Cenizas	5.5
Fibra detergente neutra	22
Fibra detergente ácida	16
Carbohidratos no fibrosos	50.5
Energía metabolizable (Kcal/kg MS)	3520

*Minerales (mg/kg): cobalto 1.5; cobre 6.6; manganeso 39.7; zinc 19.8; yodo 1.1; hierro 50; Selenio 0.3 y vitaminas (UI/kg): vitamina A 6614; vitamina D3 2200 y (mg/kg) vitamina E 22; vitamina K 5; tiamina 4.4; riboflavina 3.3; niacina 11; ácido pantoténico 11; colina 529; piridoxina 5; ácido fólico 4.8; biotina 2.2; ácido ascórbico 250; metionina hidroxil análogo 500; y vitamina B12 (dieta de 11 µg/kg). Antioxidante BHT (g/Kg) 0.1, Salinomicina (mg/Kg) 20. Fuente: NRC (1995)

El ajuste de los modelos no lineales a los valores de peso (g) a través del tiempo fue realizado empleando la librería *nls2* del paquete estadístico R (R Core Team, 2022). La capacidad de ajuste de los modelos fue evaluada empleando los siguientes criterios de comparación:

Coefficiente de determinación (R^2): criterio que establece la proporción de la varianza total que puede ser explicada por el modelo.

Tabla 2. Descripción matemática de los modelos de crecimiento.

Modelos	No. de parámetros	Expresión matemática	P ₀	P _i	T _i
Von Bertalanffy	3	$y_t = A (1 - B \exp (-K^* t))^3$	$A(1-B)^3$	$(A*8)/27$	$\ln(3*B)/k$
Brody	3	$y_t = A (1 - B \exp (-K^* t))$	$A(1-B)$	NA	NA
Gompertz	3	$y_t = A \exp (-B \exp (-K^* t))$	$A*(e^{-B})$	A/e	$\ln(B)/k$
Logístico	3	$y_t = A (1 + B \exp (-K^* t))^{-1}$	$A/(1+B)$	$A/2$	$\ln(B)/k$

Y_t = peso del animal en el tiempo t; A = peso a la madurez; B = parámetro de integración; K = índice de madurez; P₀ = peso inicial (g); P_i = peso en el punto de inflexión (g); T_i = edad en el punto de inflexión (días)

Criterio de información de Akaike (AIC): Proporciona una estimación de la distancia entre el modelo y el mecanismo que realmente genera los datos observados. Como la estimación se hace en función de los datos experimentales, esta distancia es siempre relativa y dependiente del conjunto de datos. El modelo con el más bajo valor de AIC es considerado el mejor en explicar los datos. La expresión matemática que define este criterio es:

$$AIC = -2 * \ln(L) + 2k \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, *L* es la verosimilitud del modelo (ajuste del modelo a los datos observados) y *k* corresponde al número de parámetros del modelo que está siendo evaluado. Modelos con el menor valor de AIC tendrán un mejor ajuste.

Criterio de información bayesiano (BIC): Criterio que emplea teoría bayesiana para encontrar el modelo estadístico que tiene mayor probabilidad de ser correcto dado un conjunto de datos observados. La expresión matemática de este modelo es:

$$BIC = -2 * \ln(L) + k * \ln(n) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde, *L* es la verosimilitud del modelo, *k* es el número de parámetros en el modelo y *n* es el número de datos observados. El BIC a diferencia del AIC aplica una penalización más fuerte a modelos con muchos parámetros evitando el sobreajuste.

Coefficiente de correlación de concordancia (CCC): El CCC puede variar entre -1 y 1. Valores superiores a 0.99 se interpretan como una concordancia perfecta; valores entre 0.95 a 0.99, concordancia sustancial; valores entre 0.90 a 0.94 se interpretan como una concordancia moderada y finalmente, valores menores a 0.90 corresponden a una pobre concordancia (Lin, 1989). Matemáticamente el CCC se expresa como:

$$CCC = \frac{2s_{xy}}{s_x^2 + s_y^2 + (x_o - y_o)^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde, *x_o* y *y_o* corresponden a la media de los valores observados y predichos, respectivamente. *S_x²* y *S_y²*

son las varianzas de los valores observados y predichos. *S_{xy}* es la covarianza entre los valores observados y predichos.

Cuadrado medio del error de predicción (CMEP): es un criterio que determina la distancia promedio entre los valores observados y los predichos por el modelo. Cuanto mayor el CMEP menor será la capacidad de predicción del modelo.

$$CMEP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_o)^2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde, *n* corresponde al número de observaciones, *x_i* y *y_o* son los valores observados y predichos por el modelo, respectivamente.

Residuos estandarizados: obtenidos por la división de los residuales entre la raíz del CMEP. Los residuales estandarizados fueron graficados frente a la edad, buscando determinar la magnitud en que los modelos sobreestimaron o subestimaron ciertas secciones de la curva a través del tiempo, verificando con ello la constancia de la varianza del error y la normalidad.

Coherencia biológica de los parámetros estimados por los modelos: Este criterio busca evaluar si los parámetros estimados por los modelos guardan relación consistente y coherente con el crecimiento de los animales a través del tiempo.

Análisis de varianza: Los parámetros estimados por los modelos para cada animal fueron sometidos a un análisis de varianza considerando como efecto fijo los modelos en estudio. Las medias de parámetros fueron comparadas a través del test de Tukey (*p* < 0.05). Los análisis fueron realizados empleando las librerías *aov* y *lsmeans* de R (R Core Team, 2022).

RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan las curvas observadas y predichas con el ajuste de los modelos Brody, Logístico, Von Bertalanffy y Gompertz para los pesos de cuyes machos de la línea Perú tomados cada siete días durante 13 semanas.

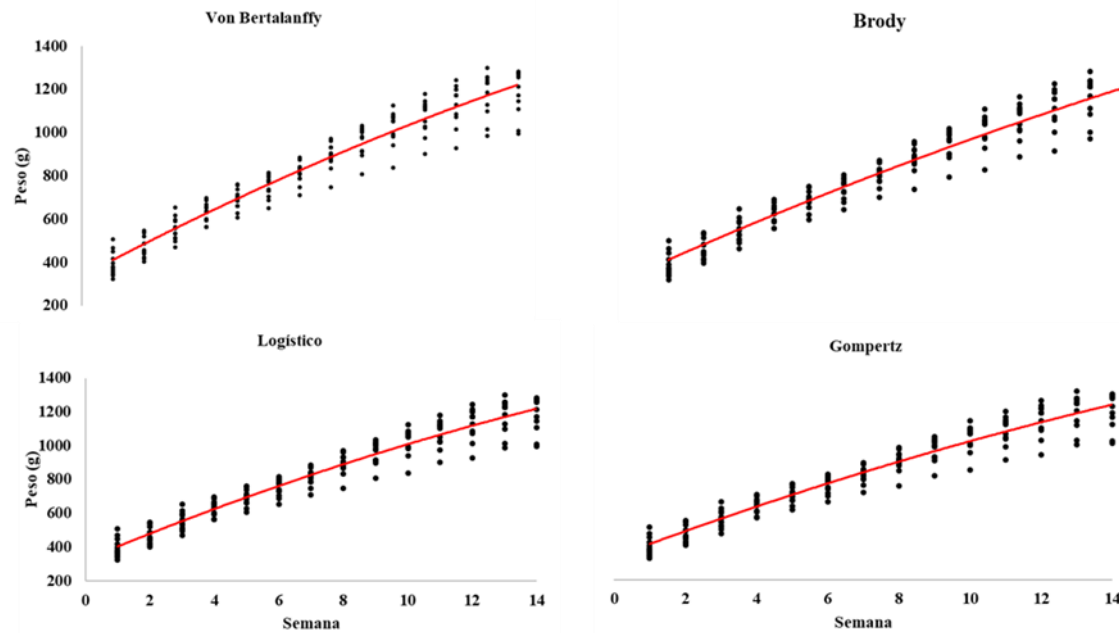


Figura 1. Curvas de crecimiento observadas y predichas para cuyes machos de la línea Perú.

En la Tabla 3, se presentan los parámetros estimados por los diferentes modelos no lineales. El modelo Brody estimó un menor peso inicial (P_0) y superior peso adulto (peso a la madurez o asintótico) (A) con respecto al modelo Logístico ($p < 0.05$). Cuando estos mismos parámetros se compararon entre los modelos Logístico, Von Bertalanffy y Gompertz, no se observaron diferencias estadísticas. El índice de madurez (k) fue superior para el modelo Brody respecto a los modelos Von Bertalanffy y Gompertz ($p < 0.05$). Este parámetro no presentó diferencia entre el modelo Logístico y los restantes modelos ($p > 0.05$). El peso y la edad al punto de inflexión fueron estadísticamente equivalentes entre los modelos Gompertz, Von Bertalanffy y Logístico ($p > 0.05$).

Criterios de selección de modelos

Teniendo en cuenta los criterios de comparación de modelos (Tabla 4), se encontró que el modelo de Brody presentó la menor capacidad de ajuste y predicción. En este modelo, el valor del CCC fue 0.76, estadísticamente diferente del CCC obtenido para los modelos Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy, que fue 0.99 ($p < 0.05$). De igual manera, los valores de BIC, AIC y CMEP en el modelo Brody fueron superiores ($p < 0.05$) a los registrados para los modelos Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico, respectivamente. Finalmente, el modelo Brody logró explicar el 66.9% de la variación en el crecimiento de los animales, en tanto que los restantes modelos evaluados lograron explicar el 99% de la variación observada ($p < 0.05$) (Tabla 4).

Tabla 3. Parámetros estadísticos asociados al crecimiento de cuyes machos de la línea Perú, estimados por los modelos de Brody, Gompertz, Logístico y de Von Bertalanffy.

Modelos	Parámetros estimados					
	A	B	K	P_0	P_i	T_i
Brody	2738 ^a (998)	1.0 ^c (0.02)	0.04 ^a (0.09)	32 ^b	NA	NA
Von Bertalanffy	2372 ^{ab} (163)	0.58 ^c (0.01)	0.01 ^b (0.01)	153 ^a	703 ^a	55 ^a
Gompertz	1842 ^{ab} (108)	2.4 ^b (0.04)	0.01 ^b (0.01)	162 ^a	678 ^a	88 ^a
Logístico	1421 ^b (51)	6.7 ^a (0.13)	0.02 ^{ab} (0.01)	187 ^a	711 ^a	95 ^a

A = peso a la madurez (g); B = parámetro de integración; K = índice de madurez; P_0 = peso inicial(g); P_i = peso en el punto de inflexión (g); T_i = edad en el punto de inflexión (días); NA= no permite estimar el valor; ^{a, b} Los promedios dentro de la misma columna con distintos superíndices son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar.

Tabla 4. Comparación de los criterios de ajuste para los modelos Brody, Gompertz, Logístico y Von Bertalanffy en cuyes machos de la línea Perú.

Modelo	Criterios de selección del modelo				
	CCC	AIC	BIC	R ²	CMEP
Brody	0.764 ^b	201 ^a	204 ^a	66.9 ^b	39749 ^a
Von Bertalanffy	0.995 ^a	169 ^b	172 ^b	99.1 ^a	911 ^b
Gompertz	0.995 ^a	168 ^b	171 ^b	99.1 ^a	864 ^b
Logístico	0.992 ^a	168 ^b	171 ^b	99.2 ^a	841 ^b

CCC = Coeficiente de correlación de concordancia; AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio de información bayesiano; R² = Coeficiente de determinación; CMEP = Error cuadrático medio de predicción; ^{a, b} Los promedios dentro de la misma columna con distintos superíndices son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$).

En la Figura 2, se muestran los residuos estandarizados para los cuatro modelos en estudio. La dispersión temporal de los residuos en cada uno de los pesajes de los animales para los modelos Gompertz, Brody y Von Bertalanffy tienden a sobreestimar el peso cuando este es inferior a 1000 g. Por su parte, el modelo Logístico presentó una mejor distribución de los residuales, sin que pudiera

ser evidenciada alguna tendencia a sub o sobre estimar los pesos predichos a través del tiempo. Dado que los puntos en el modelo Logístico están distribuidos de manera equitativa y más cerca de la línea recta se puede decir que este modelo es el único que presenta mejor normalidad de los errores y cumple el supuesto de homocedasticidad de varianzas.

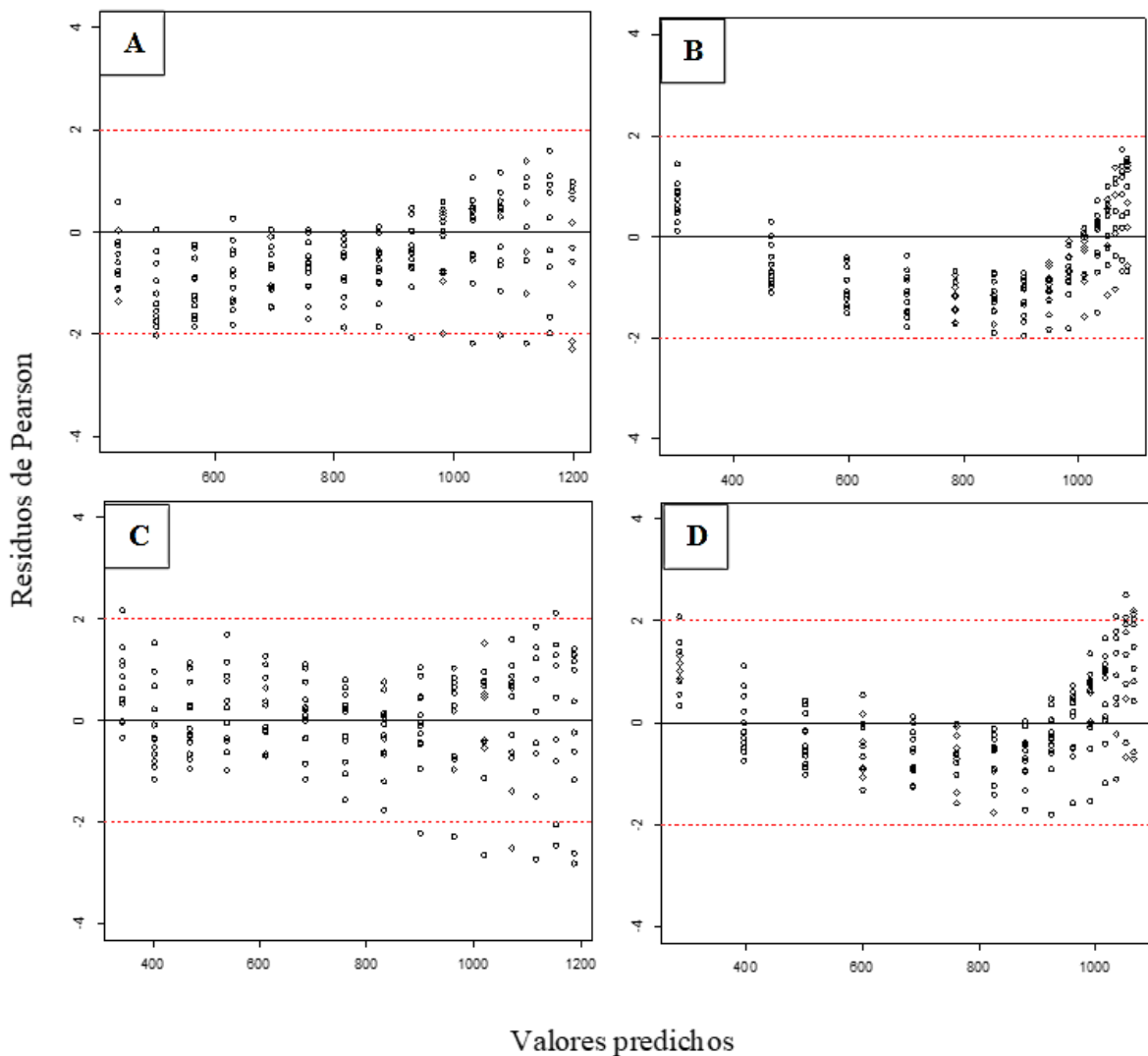


Figura 2. Residuos de Pearson y valores predichos por los modelos. A = Gompertz; B = Brody; C = Logístico; D = Von Bertalanffy.

DISCUSIÓN

Parámetros estimados

Con excepción del modelo de Brody, los valores de los parámetros estimados por las restantes funciones de crecimiento mostraron adecuada coherencia biológica. A pesar de no encontrar diferencias estadísticas entre los modelos Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico, este último modelo logró describir de mejor manera el crecimiento de los cuyes. El modelo Logístico proporcionó valores predichos más cercanos a los observados y valores con significado biológico más acertado para el peso adulto (1421 g), peso inicial (187 g), peso al punto de inflexión (711 g) y edad al punto de inflexión (95 días). Resultados similares fueron reportados por Vega-Vilca et al. (2023), quienes evaluaron los modelos de Brody, Gompertz, Logístico, Richard y Von Bertalanffy para el crecimiento de cuyes machos y hembras de la raza Perú alimentados con forraje, estos autores encontraron que el mejor modelo que se ajustó fue el modelo logístico, el cual predijo un peso de 655.65 g en los cuyes machos a los 69 días.

En cuyes de la raza Perú se ha reportado pesos al sacrificio que varían entre 1056 (Dalle-Zotte y Cullere, 2019) y 1358 g (Chauca et al., 2004). El valor de peso adulto de 1421 g estimado por el modelo Logístico se aproxima a estos valores de referencia. Martínez-González (2015) reportó que el modelo Logístico proporciona un buen ajuste de la curva de crecimiento en cuyes de la raza andina, con un coeficiente de determinación 0.994 y un error estándar de 36.85.

El modelo Brody presentó la menor bondad de ajuste (Tabla 4). Simultáneamente, las predicciones del peso adulto (2738 g) y peso inicial (32 g) realizadas por este modelo se alejan de los valores biológicos medios reportados para esta especie. Resultados similares en cuyes machos de la línea Perú reporta Vega-Vilca et al. (2023) con el modelo de Brody, con el cual todos los parámetros estimados para este modelo carecieron de coherencia biológica ($A = 18.49$; $B = -10.90$ y $K = -0.02$). Chauca (2020) reporta para la línea de cuyes Perú, pesos medios al nacimiento de 131 g y pesos adultos medios de 1300 g. En el presente trabajo el peso adulto medio observado fue de 1197 g, siendo un valor cercano al reportado por Chauca (2020) para esta misma línea genética. Noguera et al. (2008) evaluando diferentes modelos para describir el crecimiento de cuyes hembras y machos, reportó que el modelo Brody sobreestima el peso adulto reportando un valor predicho de 2124.3 g para machos a las 12 semanas de edad.

Los modelos de Von Bertalanffy y Gompertz aunque presentaron un buen ajuste y superaron al modelo Brody en todos los criterios de evaluación (Tabla 4), sobreestimaron el peso adulto con valores de 2372 y

1842 g, respectivamente. No obstante, el peso y la edad hasta el punto de inflexión fue coherente con los datos observados en el presente estudio (Tabla 3), es decir, estos modelos sobreestimaron el peso adulto solo después del punto de inflexión. Este hallazgo no concuerda con los reportes de Burgos-Paz et al. (2010) quienes reportaron un peso adulto de 1042 g con el modelo de Von Bertalanffy ($R^2 = 0.969$). La diferencia puede ser atribuida a que los autores trabajaron con cuyes hembras, cuyo peso adulto se espera sea inferior al de los machos (Chauca et al., 2004). Por otra parte, Noguera et al. (2008) encontraron para cuyes machos valores estimados del peso adulto de 1435, 1331 y 1198 g por los modelos Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico, respectivamente. Si bien en este mismo estudio, los modelos presentaron un buen ajuste, los valores estimados de peso adulto que estos autores reportan son biológicamente más consistentes.

Las estimaciones de peso y edad en el punto de inflexión (Tabla 3) corresponde al punto en el que la tasa de crecimiento instantánea cambia de creciente a decreciente, dicho de otra forma, la edad en el punto de inflexión (P_i) es el marco de tiempo longitudinal de la tasa máxima de crecimiento del peso vivo. A diferencia del modelo de Brody quien no permite estimar el P_i y T_i , los datos calculados con los modelos Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy no presentaron diferencias entre sí ($p > 0.05$), aunque los valores encontrados con el modelo Logístico para P_i y T_i de 711g y 95 días respectivamente, son más coherentes con los valores observados para esta especie animal.

En cuanto al índice de madurez K , el cual expresa la relación de la tasa máxima de crecimiento en relación con el peso adulto (g/g/día), los modelos de Von Bertalanffy y Gompertz presentaron un valor de 0.01, es decir una madurez retrasada con respecto al modelo Logístico que estimó una madurez más acelerada de 0.02 ($p < 0.05$). Este índice puede representar la tasa de maduración posnatal y se puede interpretar como una medida de la tasa de crecimiento (Marinho et al., 2013). En la producción de cuyes el peso a la edad adulta se aproxima a los 1325g entre los 90 a 120 días de edad y se relaciona directamente con el peso de comercialización y la edad al primer servicio (Apráez-Guerrero et al., 2011) lo cual concuerda con lo encontrado para el peso adulto por el modelo Logístico en este estudio (1421g). De este modo, la modelación de la curva de crecimiento permite determinar la edad óptima para el sacrificio en procura del máximo beneficio económico y/o estimar la edad en que los animales alcanzan la madurez como factor determinante en la reproducción de las camadas.

Ajuste de los modelos

Los criterios de comparación de modelos indican que la menor capacidad de ajuste la presentó el modelo Brody (Tabla 4). El CCC y el CMEP son

estadígrafos que nos permiten evaluar la precisión y la exactitud de las predicciones realizadas por los modelos. El bajo CCC (0.76) y el mayor valor del CMEP (39749) encontrados para el modelo Brody son indicativo de una alta variabilidad y discrepancia entre los valores observados y predichos.

Los valores de los criterios CMEP, CCC, AIC, BIC y R^2 fueron estadísticamente iguales ($p < 0.05$) entre los modelos Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy. Sin embargo, cuando se analizan los residuales (valores observados – valores predichos) de los modelos Gompertz y Von Bertalanffy (Figura 2), puede verificarse que en ciertas secciones de la curva las predicciones de estos modelos son tendenciosas, esto es, tienden a sobreestimar sistemáticamente el peso de los animales, indicando una clara violación al supuesto de homocedasticidad (varianza residual constante). La violación de este supuesto indica que los residuales varían en función del tiempo, lo que interfiere con la validez de las predicciones realizadas por el modelo. Por su parte, el modelo Logístico muestra una mejor distribución de los residuales, garantizando una predicción insesgada a través del tiempo (Ritz y Streibig, 2008).

Resultados similares en los criterios de ajuste AIC, BIC y CME se ha reportado con el modelo Logístico, Vega-Vilca *et al.* (2023) encontraron valores inferiores para estos criterios comparado con los modelos de Brody, Richard, Gompertz y Von Bertalanffy, lo que supone un mejor ajuste para el modelo Logístico en curvas de crecimiento para cuyes de la línea Perú. De manera similar Martínez-González *et al.* (2015) afirman que el modelo Logístico presenta un buen ajuste y puede predecir la ganancia de peso en forma confiable a lo largo de la vida del cuy.

CONCLUSIÓN

La comparación de modelos permitió establecer que el modelo Logístico describe de manera más acertada la dinámica de crecimiento de cuyes machos de la raza Perú.

Los criterios matemáticos tradicionales para la comparación de modelos mostraron ser eficientes. Sin embargo, criterios como el análisis de residuales y la coherencia biológica de las predicciones fueron determinantes en la escogencia del modelo.

Agradecimientos

A la Fundación CEIBA por el apoyo financiero, al Centro Santa María de la Universidad Católica de Oriente, al Decano de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Católica de Oriente, Carlos Leonardo Guerra.

Funding: Fundación CEIBA.

Conflict of interests: Nothing to declare.

Compliance with ethical standards: This work was approved by an ethical committee (Comité de Ética para la Experimentación con Animales de la Universidad de Antioquia), Acta N.º138 del 09 de febrero de 2021.

Data availability: Data is available with William Armando Tapie, watapiec@unal.edu.co, upon request.

Author contribution statement (CRedIt): W.A. Tapie - Conceptualization, Project administration, Investigation, Writing – review & editing., L. Giraldo-Arcila - Data curation., S.L. Posada-Ochoa - Supervision, Writing – original draft, Formal Analysis., R. Rosero-Noguera - Supervision, Writing – original draft, Formal Analysis.

REFERENCIAS

- Agudelo Gómez, D.A., Cerón Muñoz, M.F. and Restrepo, L.F., 2009. Modelación de las funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 21, pp. 39-58, <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324255>
- Apráz Guerrero, J.E., Fernández Pármio, L., y Hernández González, A., 2011. Efecto del sexo y de la castración en el comportamiento productivo y la calidad de la canal de cuyes (*Cavia porcellus*). *Revista Veterinaria y Zootecnia* (On Line), 5, pp. 20–25. <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/4476>
- Archontoulis, S.V. and Miguez, F.E., 2015. Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, pp. 786-798. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0506>
- Avilés, D.F., Martínez, A.M., Landi, V. and Delgado, J.V., 2014. The guinea pig (*Cavia porcellus*): an Andean resource of interest as an agricultural food source. *Animal Genetic Resources*, 55, pp. 87-9. <https://doi.org/10.1017/S2078633614000368>
- Ayagirwe, R.B., Meutchieye, F., Manjeli, Y. and Maass, B.L., 2018. Production systems, phenotypic and genetic diversity, and performance of cavy reared in sub-Saharan Africa: a review. *Livestock Research for Rural Development*, 30, pp. 1-12. <http://www.lrrd.org/lrrd30/6/ayagi30105.html>
- Benavides- Benavides, B., Cisneros-López, H.D. and Peláez-Sánchez, R.G., 2021. Evidencia

- molecular de *Leptospira interrogans sensu stricto* en *Cavia porcellus* (cuyes) destinados para el consumo humano en el municipio de Pasto, Nariño. *Universidad y Salud*, 24, pp. 55-64. <https://doi.org/10.22267/rus.222401.258>
- Burgos-Paz, W., Solarte-Portilla, C., and Cerón-Muñoz, M., 2010. Efeito do tamanho de ninhada e número de parto no crescimento de preá (*Cavia porcellus* Rodentia: caviidae). *Revista Lasallista de Investigación*, 7, pp. 47-55. <http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v7n2/v7n2a06.pdf>
- Camino, J. and Hidalgo, V., 2014. Evaluación de dos genotipos de cuyes (*Cavia porcellus*) alimentados con concentrado y exclusión de forraje verde. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 25, pp. 190-197. <https://doi.org/10.15381/rivep.v25i2.8490>
- Chauca, L., 2020. Logros obtenidos en la mejora genética de las experiencias INIA de cobayas (*Cavia porcellus*). *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 15, pp. 218-222. <http://www.bioline.org.br/pdf/la07057>
- Chauca, L., Muscari, J., Vega, L. and Higaonna, R., 2004. Formación de una línea sintética de cuyes. INIA. Trabajo presentado en la XXVII Reunión de la Asociación Peruana de Producción Animal – 2004. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/398>.
- Cochran, W.G., 1977. Sampling Techniques, 3rd Edition. <https://www.wiley.com/en-us/Sampling+Techniques%2C+3rd+Edition-p-9780471162407>
- Dalle Zotte, A. and Cullere, M., 2019. Carcass traits and meat quality of rabbit, hare, guinea pig and capybara. More than Beef, Pork and Chicken—The Production, Processing, and Quality Traits of Other Sources of Meat for Human Diet, pp. 167-210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05484-7_7
- Domínguez-Viveros, J., Rodríguez-Almeida, F.A., Núñez-Domínguez, R., Ramírez-Valverde, R., Ortega-Gutiérrez, J.Á. and Ruiz-Flores, A., 2013. Ajuste de modelos no lineales y estimación de parámetros de crecimiento en bovinos Tropicarne. *Agrociencia*, 47, pp. 25-34.
- Flores, L.M., Moscoso, J.E., Camero, J., Angulo-Tisoc, J., Jeri, J.C. and Del Solar, J.M., 2018. Optimal slaughter moment for guinea pig (*Cavia porcellus*) reared under different feed systems. *Compendio de Ciencias Veterinarias*, 8, pp. 7-15. <https://doi.org/10.18004/compend.cienc.vet.2018.08.01.07-15>
- Holdridge, L.R., 1967. Life zone ecology. rev. ed. San José, CR:Tropical Science Center.
- Hurtado, E.A., Cueva-Navia, T. and Barba-Capote, C., 2021. La modelización del crecimiento de los cerdos bajo un sistema de cama profunda. *CIENCIA UNEMI*, 14, pp. 1-11 <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss36.2021pp1-11p>
- Quispe, D., Sarmiento, R., Huamán, D., Huayhua, J. and Tapasco, J., 2021. Determinación del momento óptimo de saca de reproductores en cuyes criollos (*Cavia porcellus*). *Revista De Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 32, p. e21348. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i5.21348>
- Lagos, E., 2013. Productividad de los cuyes (*Cavia porcellus*) alimentados con la mezcla maralfalfa (*Pennisetum* sp.)-ramio (*Boehmeria nívica*) bajo fertilización mineral y orgánica, en clima medio. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Pasto: Universidad de Nariño. 112 p.
- Lammers, P.J., Carlson, S.L., Zdorkowski, G.A. and Honeyman, M.S., 2009. Reducing food insecurity in developing countries through meat production: the potential of the guinea pig (*Cavia porcellus*). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24, pp. 155-162. <http://doi:10.1017/S1742170509002543>
- Lin, L.I., 1989. A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45, pp. 255–268 <https://doi.org/10.2307/2532051>
- Maldonado-Jáquez, J.A., Castañeda-Bustos, V.J., Granados-Rivera, L.D., Salinas-González, H., Pastor-López, F.J. and Hernández, G.T., 2021. Growth curve and rates of absolute and relative growth of local kid goats in northern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24, p. #75 <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3515>
- Marinho, K.N., Freitas, A., Falcão, A.J. and Dias, F.E., 2013. Nonlinear models for fitting growth curves of Nellore cows reared in the Amazon Biome. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 42, pp. 645-650. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000900006>

- Martínez-González, S., Peña-Parra, B., Moreno-Flores, L.A. and Macías-Coronel, H., 2015. Método de tipificación de la curva de crecimiento del cuye raza andina con el modelo Logístico. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 2, pp. 647-653. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/372>
- Martínez-Rocha, R.E., Ramírez-Valverde, R., Núñez-Domínguez, R., García-Muñiz, J.G. and Parra-Bracamonte, G.M., 2020. Comportamiento de crecimiento y reproductivo en hembras bovinas Romosinuano. *Revista MVZ Córdoba*, 26, pp. e2033-e2033. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2033>
- National Research Council., 1995. Nutrient Requirements of Laboratory Animals, Fourth Revised Edition, 1995. Washington, DC: *The National Academies Press* <https://doi.org/10.17226/4758>
- Ngoula, F., Tekam, M.G., Kenfack, A., Tchingo, C.D., Nouboudem, S., Ngoumtsop, H. and Tchoumboue, J., 2017. Effects of heat stress on some reproductive parameters of male cavie (*Cavia porcellus*) and mitigation strategies using guava (*Psidium guajava*) leaves essential oil. *Journal of Thermal Biology*, 64, pp. 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.01.01>
- Noguera, R.R., Pereira, R.L. and Solarte, C.E., 2008. Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*) desde el nacimiento hasta la edad de sacrificio. *Livestock Research for Rural Development*, 20, pp. 1-9. <http://www.lrrd.org/lrrd20/5/nogu20079.htm>
- Paredes, M. and Goicochea, E., 2021. Efecto de cinco dietas con diferentes proporciones de fibra detergente neutro y almidón en el rendimiento productivo, comportamiento ingestivo y peso de órganos digestivos del cuy (*Cavia porcellus*). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32, pp. e19495. <https://dx.doi.org/10.15381/rivep.v32i1.19495>
- Posada Ochoa, S.L., Rosero Noguera, J.R. and Solarte Portilla, C.E., 2015. Efecto de la línea genética y el sexo sobre el crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*). *Livestock Research for Rural Development*, 27. <http://www.lrrd.org/lrrd27/1/posa27001.htm>
- Ritz, C., and Streibig, J.C., 2008. Nonlinear regression with R. New York, NY: Springer New York https://doi.org/10.1007/978-0-387-09616-2_8.
- R Core Team., 2022. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Selvaggi, M., Laudadio, V., D'Alessandro, A.G., Dario, C. and Tufarelli, V., 2017. Comparison on accuracy of different nonlinear models in predicting growth of Podolica bulls. *Animal Science Journal*, 88, pp. 1128-1133. <https://doi.org/10.1111/asj.12726>
- Sánchez-Macías, D., Barba-Maggi, L., Morales-delaNuez, A. and Palmay-Paredes, J., 2018. Guinea pig for meat production: A systematic review of factors affecting the production, carcass and meat quality. *Meat science*, 143, pp. 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.004>.
- Torres, V., Barbosa, I., Meyer, R., Noda, A. and Sarduy, L., 2012. Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 46, pp. 345-350.
- Vargas-Romero, J., Losada-Custardoy, H., Cortés-Zorrilla, J., Alemán-López, V., Vieyra-Durán, J. and Luna-Rodríguez, L., 2020. Propuesta gastronómica con *Cavia porcellus*. *Abanico veterinario*, 10, pp. 1-12. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2020.31>
- Vega-Vilca, J.F., Maguiña-Maza, R.M., Cipriano Bautista, J.G. and Vega-Cadillo, C.A., 2023. Modelos no lineales para la descripción del crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) de saca temprana. *Revista De Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 34, p. e24409. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i4.24409>