



ESTIMACIÓN DE LA REGIÓN DE CRECIMIENTO ESTÁNDAR DE
GUAJOLOTES NATIVOS (*Meleagris gallopavo* L.) CALCULADA
MEDIANTE LA ECUACIÓN DE RICHARDS †

[ESTIMATION OF THE STANDARD GROWTH REGION OF NATIVE
TURKEYS (*Meleagris gallopavo* L.) CALCULATED USING THE RICHARDS
EQUATION]

Marco Antonio Camacho-Escobar¹, Sergio Machorro-Sámamo^{1*},
Serafín Jacobo López-Garrido², Narciso Ysac Ávila-Serrano³,
Mónica Marcela Galicia-Jiménez², Jorge Alberto Cruz-Torres¹
and Eliud Flores-Morales¹

¹Instituto de Industrias, Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Km 1.5 vía Sola de Vega, Puerto Escondido, Mixtepec, Oaxaca, México C.P.71984. Email: marcama@zicatela.umar.mx, machorro@zicatela.umar.mx, jorgecruz@zicatela.umar.mx, fmeliud@zicatela.umar.mx

²Instituto de Genética. Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Km 1.5 vía Sola de Vega, Puerto Escondido, Mixtepec, Oaxaca, México C.P.71984. Email: serafin@zicatela.umar.mx, mmgaliciaj@gmail.com

³Instituto de Recursos. Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Km 1.5 vía Sola de Vega, Puerto Escondido, Mixtepec, Oaxaca, México C.P.71984. Email: reval1997@hotmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background. A variety of mathematical models explain animal growth, showing a sigmoid curve. Richards' model includes four parameters, allowing a better fit to experimental data, as evidenced by a high coefficient of determination and a low standard error of estimation. However, it does not always converge and some of its parameters are difficult to interpret biologically. It is useful to model a standard growth zone to estimate, at a given age, the weight of native turkeys within confidence limits, to obtain useful management conclusions. **Objective.** To establish a standard average growth region for male native turkeys on the coast of Oaxaca, for productive purposes, using the Richards equation. **Methodology.** The weights of 23 male native turkeys were recorded weekly from hatching to 54 weeks of age. Non-linear regression to fit the data to Richards' equation was performed using the free software GeoGebra®. The standard growth zone consisted of a lower and upper limit, which were determined by adding and subtracting the standard error of the estimate from Richards' model. The growth rate equation and graph were developed, showing its asymmetry, maximum value and age at which said value is reached. **Results.** Determination coefficient of 0.993, standard error of the estimate of 190.5 g, and maximum growth rate of 322.11 g*week⁻¹ at 18.22 weeks of age were obtained. **Implications.** The use of the standard growth zone, under intensive production conditions, is valuable in the study and evaluation of the growth of male native turkeys. **Conclusions.** The standard growth zone is a very useful concept, allowing for the establishment of weight limits that animals should have at the optimal age, facilitating decision-making to optimize management and feeding practices, as well as maximizing efficiency and performance. **Key words:** Growth of native turkeys; animal growth curves; Richards equation; nonlinear regression.

RESUMEN

Antecedentes. Variedad de modelos matemáticos explican el crecimiento animal, muestran una curva sigmoidea. El modelo de Richards incluye cuatro parámetros, permite mejor ajuste a los datos experimentales, evidenciado por alto coeficiente de determinación y bajo error estándar de estimación. Empero, no siempre converge y algunos de sus parámetros son difíciles de interpretar biológicamente. Es útil modelar una zona estándar de crecimiento para estimar,

† Submitted July 19, 2024 – Accepted September 10, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5749>



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

ISSN: 1870-0462.

ORCID = M.A. Camacho-Escobar: <http://orcid.org/0000-0001-9693-1026>; S. Machorro-Sámamo: <http://orcid.org/0009-0006-4450-5782>; S.J. López-Garrido: <http://orcid.org/0000-0003-3499-4763>; N.Y. Ávila-Serrano: <http://orcid.org/0000-0003-4043-501X>; M.M. Galicia-Jiménez: <http://orcid.org/0000-0001-9361-5765>; J.A. Cruz-Torres: <https://orcid.org/0000-0001-7581-2554>; E. Flores-Morales: <https://orcid.org/0000-0003-0624-8675>

a determinada edad, el peso de los guajolotes nativos dentro de los límites de confianza, para obtener conclusiones útiles de manejo. **Objetivo.** Establecer una región estándar de crecimiento promedio para guajolotes nativos machos en la costa de Oaxaca, con fines productivos, utilizando la ecuación de Richards. **Metodología.** Se registraron semanalmente los pesos de 23 guajolotes nativos machos, desde su eclosión hasta la semana 54 de edad. La regresión no lineal para ajustar los datos a la ecuación de Richards se realizó utilizando el software libre GeoGebra®. La zona estándar de crecimiento se compuso de límite inferior y superior, los cuales se determinaron sumando y restando el error estándar de la estimación al modelo de Richards. Se desarrolló la ecuación y gráfica de la tasa de crecimiento, mostrando su asimetría, valor máximo y edad en que se alcanza dicho valor. **Resultados.** Se obtuvo coeficiente de determinación de 0.993, error estándar de la estimación de 190.5 g, y tasa máxima de crecimiento de 322.11 g*semana⁻¹ a 18.22 semanas de edad. **Implicaciones.** El uso de la zona estándar de crecimiento, en condiciones de producción intensiva, es valiosa en el estudio y evaluación del crecimiento de los guajolotes nativos machos. **Conclusiones.** La zona estándar de crecimiento es un concepto de gran utilidad, permite establecer los límites de peso que deben tener los animales a la edad óptima, facilitando la toma de decisiones para optimizar prácticas de manejo, alimentación; así como maximizar eficiencia y rendimiento.

Palabras clave: Crecimiento de guajolotes nativos; curvas de crecimiento animal; ecuación de Richards; regresión no lineal.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento animal puede ser explicado con el uso de modelos matemáticos que ayudan a predecir cómo cambia el peso con respecto a las diferentes etapas productivas, relacionadas con el paso del tiempo y el incremento de la edad del animal. Estos modelos matemáticos pueden ser herramientas útiles para evaluar el comportamiento productivo y la productividad en las empresas pecuarias. También son útiles para clasificar fácilmente la orientación productiva de una raza o línea genética, con respecto a una región determinada (Oludayo *et al.*, 2021). Los modelos matemáticos también son útiles para predecir el valor máximo de crecimiento al que puede llegar un animal, con la finalidad de decidir cuándo es el momento más conveniente para sacrificarlo y obtener el máximo beneficio económico (Agudelo-Gómez *et al.*, 2007). Otro aspecto importante de los modelos de regresión no lineal, en el estudio del crecimiento animal, es que pueden generar información que permite desarrollar parámetros o indicadores productivos relacionados con el crecimiento o desarrollo animal, bajo las condiciones específicas de producción (Domínguez *et al.*, 2013). Estos parámetros e indicadores matemáticos pueden ser herramientas muy útiles en programas de selección o mejoramiento genético (Zárate-Contreras *et al.*, 2022). Un modelo es aceptable en función de su capacidad para ajustarse a los datos, la interpretación biológica de los parámetros, la facilidad de uso computacional y la evaluación de los factores ambientales en la curva de crecimiento. La modelación matemática del crecimiento debe proporcionar información sobre parámetros que tenga significado biológico claro (Agudelo-Gomez *et al.*, 2007). La gráfica típica de crecimiento animal presenta forma sigmoidea, donde se puede apreciar una tasa de crecimiento lento en la etapa temprana y posteriormente se acelera en forma exponencial hasta alcanzar una edad que en la que se aproxima a cero (Parés y Kucherova, 2014; Plata *et al.*, 2015).

Con la finalidad de determinar cuál modelo matemático estima mejor el crecimiento de perdices machos, un estudio realizado por la Universidad de Seluk, en Turquía, analizó los modelos de Brody, Gompertz, Logístico y Von Bertalanffy; obteniendo coeficientes de determinación de 0.959, 0.99, 0.987 y 0.99 respectivamente (Sariyel *et al.*, 2017). Otro estudio que buscaba caracterizar el crecimiento en gallinas criollas comparó los modelos Logístico, Gompertz, Von Bertalanffy y Richards, obteniéndose el mejor ajuste con el de Von Bertalanffy presentando coeficiente de determinación de 0.9415 para machos (Mata-Estrada *et al.*, 2020). Sin embargo, en la actualidad los modelos de tres parámetros con interpretación biológica más usados, para describir el crecimiento animal, son el Logístico, Von Bertalanffy y Gompertz (Parés y Kucherova, 2014); empero, el modelo de Richards presenta mejor ajuste al contener cuatro parámetros, aunque es más complejo y conlleva mayor número de cálculos (Pereda *et al.*, 2004). Las ecuaciones de Richards y Gompertz ofrecen explicaciones detalladas sobre cómo crecen las especies como avestruces, pavos y emús (Ersoy *et al.*, 2006); sin embargo, la ecuación de Richards genera dificultades en su uso ya que en ocasiones no converge (Porter *et al.*, 2010; Segura-Correa *et al.*, 2017). A pesar de ello, el modelo de cuatro parámetros ya ha sido usado anteriormente para predecir el crecimiento del guajolote (Pérez-Lara *et al.*, 2013). Zárate-Contreras *et al.* (2022) mencionan que, en el caso de un estudio con pollos criollos mexicanos, el modelo que tuvo el mejor ajuste, basado en el coeficiente de determinación fue el de Gompertz-Larid. En otro estudio, se usaron las ecuaciones Logística, de Gompertz y de Richards para investigar el patrón de crecimiento de tres líneas comerciales de pollos de engorda (Ross 308, Cobb y Arbor Acres); observándose que la ecuación de Gompertz y la de Richards son las funciones que mejor describen el crecimiento debido a que presentan mayor coeficiente

de determinación y menor error estándar en la estimación (Safari *et al.*, 2020).

El guajolote nativo es un valioso recurso genético que necesita ser evaluado para determinar sus beneficios y ventajas con fines comerciales o de conservación (Camacho-Escobar *et al.*, 2016). Conocer el rendimiento productivo de los guajolotes nativos y su curva de crecimiento es crucial para tomar decisiones informadas sobre prácticas de manejo que puedan optimizar su capacidad de producción (Juárez-Caratachea *et al.*, 2017). Para realizar el ajuste de datos a un modelo general, se emplea algún método de regresión, que en el caso del estudio de crecimiento animal es no lineal. Existen paquetes informáticos comerciales como el SAS® (Statistical Analysis System) para hallar los parámetros del modelo; sin embargo, es un software de uso privativo y la compra de la licencia requiere de recursos económicos, y tiene ciertas restricciones como temporalidad en la licencia. Otra posibilidad es usar el método de Gauss-Newton; sin embargo, para su uso es necesario un mayor conocimiento de matemáticas; por ello, el uso de software de licencia libre y de fácil manejo, es una alternativa para la estimación de dichos parámetros (Ulloa *et al.*, 2017). Por ello, con el objetivo de obtener estimaciones de los parámetros de crecimiento del guajolote nativo mexicano usando el modelo de Richards, mediante un software de uso libre; y comprobar la utilidad de ajuste del modelo tomando como criterio el coeficiente de determinación y el error estándar; ello con la finalidad de generar la zona estándar de crecimiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las instalaciones para guajolotes nativos del campo experimental de la Universidad del Mar, Campus Puerto Escondido, Oaxaca; ubicado en el km 128.1 de la carretera federal número 200 Pinotepa Nacional a Puerto Escondido, a 15° 55' 23.1" latitud norte y 97° 09' 05.0" longitud oeste, con altitud promedio de 12 m. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1988), el clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano y precipitación pluvial promedio de 731.9 mm a 2054.0 mm. La temperatura mínima promedio durante el experimento fue de 18 °C ± 6 °C y la máxima fue 40 °C ± 3 °C; respecto a la humedad mínima se obtuvieron valores promedio de 28% (± 15% D.E.) y la humedad máxima de 92% (± 2% D.E.). La información de temperatura y humedad relativa se obtuvo con un termómetro/higrómetro marca Control Company®, modelo Teceable 4184.

El experimento se realizó en ocho jaulas de malla electrosoldada con área de 9 m², techo de lámina de metal con altura máxima de 3 m y mínima de 2.3 m. Cada jaula estaba equipada con dos comederos de tolva

y bebederos vitroleros de 3 L y percha. La parvada de guajolotes nativos, de la Universidad del Mar, proviene de aves colectadas en la región costa de Oaxaca. Dos parvadas incubadas de forma natural y eclosionadas en 28.2 d ± 1.5 d; se pesaron y marcaron con aro en la pata. Semanalmente se pesaron con una balanza de 15 kg y sensibilidad de 2 g (TorRey® mod. L-EQ) para determinar ganancia de peso (W) en gramos (g). Al cabo de 12 semanas, se seleccionaron 23 pavipollos machos que fueron considerados los animales experimentales, los cuales fueron criados hasta las 54 semanas de edad. Los guajolotes nativos tuvieron alimentación comercial para pavos con 28% de PC (Pavitina® Purina®) a libre acceso y agua. Fueron vacunados contra Newcastle (Newcastle B1®, Laboratorios Maver, Lampa, Chile®) vía ocular y contra Coriza infecciosa, Newcastle, Colera aviar crónica y Colera aviar septicémica (Advac Triple Aviar Plus® Advac, Adler Animal Health®, Zapopan, Jal. México) 1 mL vía intramuscular (Camacho-Escobar *et al.*, 2008); adicionalmente se desparasitaron vía oral con Ivermectina, Febendazol y Prazicuantel, (Kikiriki®, Dechra Pharmaceuticals, Northwich, Inglaterra Dechra®), a razón de media tableta por cada 2 Kg de PV cada 12 semanas (Camacho-Escobar *et al.*, 2009).

Los pesos promedios se registraron en una tabla y posteriormente se graficaron en un diagrama de dispersión, observándose tendencia de crecimiento sigmoideo. Se eligió la ecuación de Richards [1] porque al considerar la inclusión de cuatro parámetros, se logra un mejor ajuste a los datos, en comparación con las ecuaciones de tres parámetros (Pereda *et al.*, 2004).

$$W = a_0 (1 - a_1 e^{-a_2 t})^{a_3} \quad [1]$$

El valor de “W” indica el peso medido en gramos y “t” es el tiempo en semanas. Los valores de a_i constituyen los parámetros del modelo a₀ representa el peso maduro, a₁ y a₃ son valores que influyen en el tiempo que presenta el punto de inflexión de la curva (máxima tasa de crecimiento), a₂ determina la velocidad del modelo en alcanzar el peso maduro.

Con los registros obtenidos de peso de los guajolotes, para diferentes valores de tiempo, se ajustan a la ecuación de Richards mediante el programa GeoGebra®. El procedimiento detallado para obtener una función que, en forma visual, se adecua al conjunto de puntos del diagrama de dispersión, se presenta en el Apéndice. Dicha función se muestra como g(x). El coeficiente de regresión, para establecer la confiabilidad del modelo obtenido, se representa mediante la ecuación [2]:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (W_e - W_t)^2}{\sum (W_e - W_m)^2} \quad [2]$$

Donde r^2 es el coeficiente de determinación, W_e es el peso medido experimentalmente, W_t es el peso teórico obtenido mediante el modelo para cierto valor de tiempo y W_m es el promedio de los pesos experimentales. Todos los valores de W se consideraron en gramos.

Tabla 1. Ecuaciones para determinar la tasa de crecimiento, el tiempo en que ocurre el punto de inflexión y la máxima tasa de crecimiento.

Modelo de Richards [1]	Ecuación de la tasa de crecimiento [3]	Tiempo en que ocurre el punto de inflexión [4]	Máxima tasa de crecimiento [5]
$W = a_0(1 - a_1 e^{-a_2 t})^{a_3}$	$W' = \frac{a_0 a_1 a_2 a_3 (1 - a_1 e^{-a_2 t})^{a_3 - 1}}{e^{a_2 t}}$	$t_M = -\frac{1}{a_2} \ln \left[\frac{1}{a_1 a_3} \right]$	$W'_{MAX} = a_0 a_2 \left(\frac{a_3 - 1}{a_3} \right)^{a_3 - 1}$

Para generar la zona estándar de crecimiento, se empleó el error estándar de la estimación. Este valor mide la variabilidad, o dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión y se puede considerar como el promedio del cuadrado de las desviaciones respecto a la línea de regresión.

El resultado que se obtiene, del error estándar de la estimación, se expresa en las unidades de los valores de la variable dependiente, en este caso en gramos.

Para calcular el error estándar de la estimación se usó la ecuación [6] (Chapra y Canale 2015):

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (W_e - W_t)^2}{n - m}} \quad [6]$$

Donde: W_e corresponde con el peso experimental, W_t es el peso teórico obtenido del modelo para un valor específico de tiempo, n es el número de datos y m es el número de parámetros del modelo.

La zona estándar de crecimiento [7] se obtuvo al sumar y restar, a la línea de regresión, el error estándar de la estimación, con lo cual se generan dos curvas que delimitan a dicha región.

Posteriormente se obtuvo la ecuación de la tasa de crecimiento (W'), el valor de la tasa máxima de crecimiento (W'_{MAX}) y el tiempo en que ocurre la máxima tasa de crecimiento (t_M) que corresponde con el punto de inflexión de la curva. Para ello se usaron las ecuaciones mostradas en la Tabla 1. Dichas ecuaciones surgen de aplicar los conceptos del cálculo diferencial en función de los parámetros del modelo:

$$W = a_0(1 - a_1 e^{-a_2 t})^{a_3} \pm S_e \quad [7]$$

RESULTADOS

El programa GeoGerbra® arrojó los siguientes valores para los parámetros del modelo: $a_0 = 5730.52$, $a_1 = -228.23$, $a_2 = 0.27$ y $a_3 = -0.6$. Al sustituir dichos valores en la ecuación de Richards, el modelo de crecimiento [8] queda expresado de la siguiente forma:

$$M = \frac{5730.52}{(1 + 228.23 e^{-0.27t})^{0.6}} \quad [8]$$

El intervalo de confianza tuvo un valor de 0.993 y el error estándar de la estimación de 190.5 g. Al sumar y restar el error estándar de la estimación se obtienen los límites de confianza, que definen la zona estándar de crecimiento promedio [9]. La gráfica se muestra en la Figura 1.

$$M = \frac{5730.52}{(1 + 228.23 e^{-0.27t})^{0.6}} \pm 190.5 \quad [9]$$

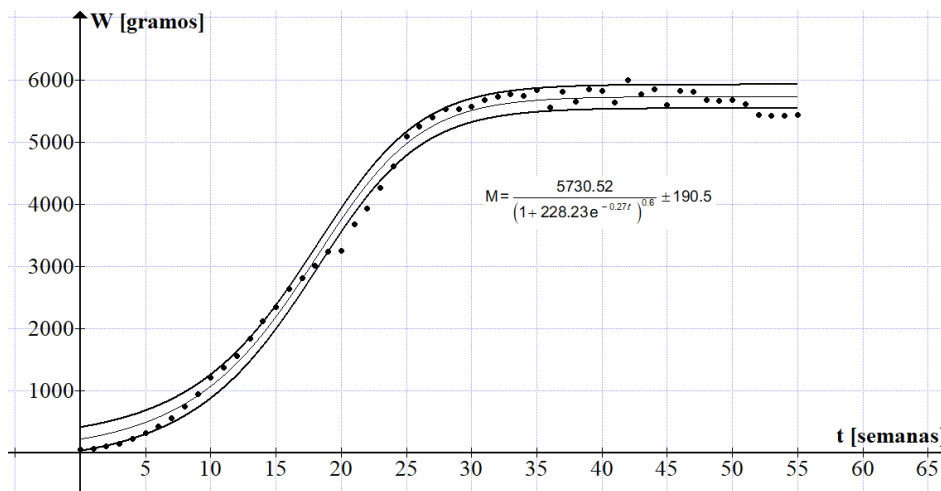


Figura 1. Zona estándar de crecimiento del guajolote nativo mexicano (macho).

La tasa de crecimiento [10] se expresa de la siguiente manera:

$$M' = \frac{211876}{e^{0.27t} (1 + 228.23 e^{-0.27t})^{1.6}} \quad [10]$$

La gráfica teórica de incremento de peso se muestra en la Figura 2; sin embargo, el comportamiento biológico del crecimiento que se presenta en el modelo matemático incluye otro evento fisiológico conocido como desarrollo. Ambos procesos están relacionados con el incremento de peso, pero se presentan a diferente tiempo y tienen objetivos diferentes. El crecimiento y el desarrollo son independientes, inician y terminan en diferentes etapas de la vida del animal. Desde el punto de vista fisiológico, el crecimiento es el período en el que se presenta incremento acelerado en el número de células que conforman un tejido, y es denominado como hiperplasia. Inicia al momento de la

gestación, con la división del óvulo fecundado, y termina al inicio de la edad adulta. El final de esta etapa fisiológica, que se da al término de la etapa de la infancia, coincide con el inicio de otro proceso fisiológico, desarrollo o hiperplasia. En este período las células incrementan su masa, esta etapa fisiológica finaliza al iniciar la senectud. A pesar de que, desde el punto de vista biológico, el mayor crecimiento se presenta al inicio de la vida del animal, desde el punto de vista productivo este período se presenta al final de la hipertrofia e inicio de la hiperplasia. Debido a que es el momento en que el animal obtiene la mayor ganancia de peso y se puede describir como la etapa final del crecimiento que coincide con el inicio del desarrollo.

La Figura 2 indica que la tasa de crecimiento máxima fue de 322.11 g*semana⁻¹ y ocurrió a las 18.22 semanas.

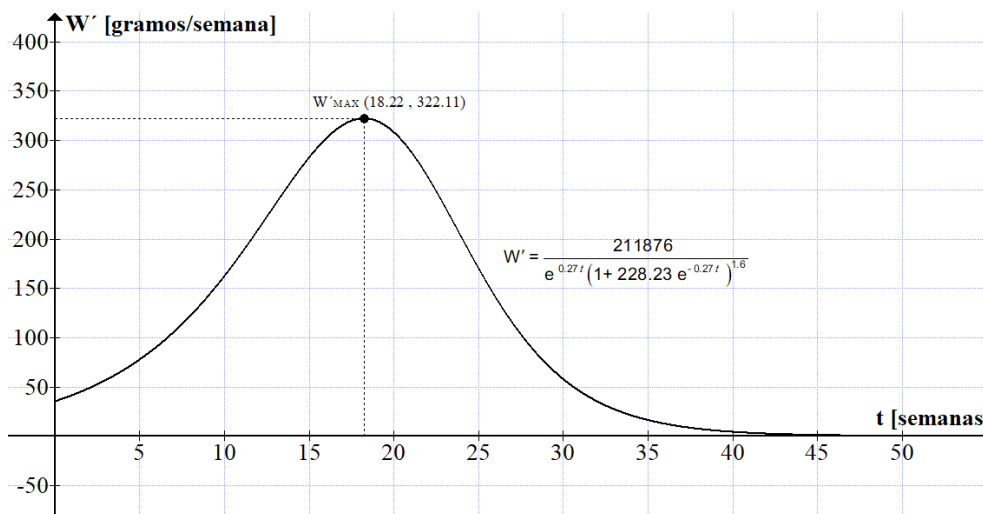


Figura 2. Tasa teórica de incremento de peso, con relación al tiempo de crianza, del guajolote nativo mexicano (macho).

DISCUSIÓN

Los modelos sigmoidales son adecuados para describir el crecimiento en peso respecto al tiempo en el contexto animal y particularmente en el estudio del guajolote nativo (Pérez-Lara *et al.*, 2013). En algunos casos el modelo de Gompertz es el que mejor se ajusta al conjunto de datos como mencionan Arando *et al.* (2021) con resultados de R^2 de 0.97, Anthony *et al.* (1991) R^2 de 0.992; Şengül y Kiraz (2005) R^2 de 0.999. El modelo de Von Bertalanffy resultó con mayores valores de R^2 en otras investigaciones como lo demuestran Sogut *et al.* (2016) R^2 de 0.997 y Juárez-Caratachea *et al.* (2019) R^2 de 0.988. Debido a que el modelo de Richards introduce un parámetro adicional, respecto a otros modelos de crecimiento, permite ajustar el punto de inflexión de la curva, ofreciendo una descripción más precisa en una variedad de contextos como pueden ser las diferencias en sistemas de manejo o aptitudes productivas de las diferentes razas. Sin embargo, la interpretación de los parámetros a_1 y a_3 puede ser menos intuitiva en comparación con modelos más simples, además que no siempre converge, tal como lo describen Porter *et al.* (2010), en un estudio realizado en pavos de Reino Unido, así como Arando *et al.* (2021) en el modelado del crecimiento en el pavo andaluz, quienes mencionan que las muestras limitadas pueden causar la no convergencia en el modelo de Richards.

En una investigación realizada en pavos manejados en condiciones tropicales del Sur de México, también se reporta la no convergencia del modelo de Richards (Segura-Correa *et al.*, 2017). Un estudio similar, estima los parámetros y características de crecimiento de pavos machos usando el modelo de Richards, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.989, peso maduro de 9720.4 ± 971.3 g, tiempo en el que se presenta el punto de inflexión de 16.3 semanas, tasa de crecimiento de $599.13 \text{ g} \cdot \text{semana}^{-1}$ (Ersoy *et al.*, 2006). En el caso de la presente investigación el punto de inflexión ocurre a las 18.22 semanas, tiempo en que se da la máxima tasa de crecimiento ($322.11 \text{ g} \cdot \text{semana}^{-1}$). A esta edad el guajolote deberá tener un peso entre 2990.7 y 3371.7 g, de acuerdo con la zona estándar de crecimiento obtenida. Considerando que 80% del peso maduro se alcanza a las 23 semanas de edad, Ersoy *et al.* (2006), estudiando Pavo Bronceado Americano, obtuvieron resultados similares al obtenido por en el presente estudio (24 semanas de edad). La gráfica de la tasa de crecimiento muestra un comportamiento asimétrico respecto al máximo valor. Así mismo, pueden apreciarse los intervalos donde su magnitud aumenta y disminuye, además de mostrar un valor casi nulo a partir de las 40 semanas de edad. La máxima tasa de crecimiento ocurre cuando el animal ha alcanzado 55.5% de su peso maduro. También se aprecia en la gráfica que, la velocidad con que aumenta la tasa de crecimiento es menor que la velocidad con

que disminuye antes y después del punto de inflexión. Estudios muestran valores de tiempo al punto de inflexión similares estando en un intervalo de 11.6 a 20.0 semanas de edad (Juárez-Caratachea *et al.*, 2017 Arando *et al.*, 2021).

Los modelos sigmoidales, como el modelo de Richards, son esenciales en el estudio del crecimiento animal, porque describen con precisión la curva de ganancia de peso, permiten interpretaciones biológicas claras, predicen el crecimiento futuro, facilitan la comparación entre individuos y grupos, optimizan el manejo y la producción. La zona estándar de crecimiento es un concepto de gran utilidad, entendiendo que para producción animal crecimiento incluye procesos de hiperplasia e hipertrofia; debido a que permite establecer los límites de peso que deben tener los animales a la edad óptima. Esta información facilita a los productores la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

La tasa de crecimiento máxima fue de $322.11 \text{ g} \cdot \text{semana}^{-1}$ y ocurrió a las 18.22 semanas; por ello, la estimación de la zona estándar de crecimiento mediante el modelo de Richards resulta una herramienta esencial en el estudio del crecimiento animal, porque describe con precisión la curva de ganancia de peso, permite interpretaciones biológicas claras, predice el crecimiento futuro, facilita la comparación entre individuos y grupos, optimiza el manejo y la producción.

La zona estándar de crecimiento es un concepto de gran utilidad, debido a que permite establecer los límites de confianza respecto al peso que deben tener los animales a la edad óptima al sacrificio, lo que facilita a los productores la toma de decisiones encaminadas a optimizar las prácticas de manejo y alimentación; así como maximizar la eficiencia y el rendimiento.

Agradecimientos

A la Universidad del Mar por las facilidades para la realización de esta investigación.

Funding. The research was carried out with partial funding from the Universidad del Mar, used for the feeding and health of the experimental turkeys.

Conflict of interest. The authors declare that they have no interest in the scope of the paper to declare.

Compliance with ethical standards. This study was conducted in accordance with the Mexican Official Standard NOM-062-ZOO-1999, Technical specifications for the production, care and use of laboratory animals.

Data availability. The authors declare that the data are available from the corresponding author <Sergio Machorro-Sámamo, machorro@zicatelama.umar.mx> upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **MA Camacho-Escobar-** Conceptualization, Investigation, Writing – original draft; **S Machorro-Sámamo-** Formal analysis, Methodology, Software, Writing – original draft; **SJ López-Garrido-** Conceptualization, Writing – review & editing; **NY Ávila-Serrano-** Data curation, Formal analysis; **MM Galicia-Jiménez-** Investigation, Writing – review & editing; **JA Cruz-Torres-** Formal analysis, Investigation; **E. Flores-Morales-** Data curation, Writing – review & editing.

REFERENCES

- Agudelo-Gómez, D.A., Cerón-Muñoz, M.F. and Restrepo, L.F., 2007. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, pp. 157-173.
- Anthony, N.B., Emmerson, D.A. and Nestor, K.E., 1991. Research Note: Influence of body weight selection on the growth curve of turkeys. *Poultry Science*, 70, pp. 192-194. <https://doi.org/10.3382/ps.0700192>
- Arando, A., González-Ariza, A., Lupi, T.M., Nogales, S., León, J.M., Navas-González, F.J., Delgado, J.V. and Camacho, M.E., 2021. Comparison of non-linear models to describe the growth in the Andalusian turkey breed. *Italian Journal of Animal Science*, 20, pp. 1156-1167. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1950054>
- Camacho-Escobar, M.A., Jerez-Salas, M.P., Romo-Díaz, C., Vázquez-Dávila, M.A. and García-Bautista, Y., 2016. La conservación in situ de aves en el traspatio oaxaqueño. *Quehacer científico en Chiapas*, 11, pp. 60-69.
- Camacho-Escobar, M.A., Arroyo-Ledezma, J., Pérez-Lara, E., Sánchez-Bernal, E.I. and García-López, J.C., 2009-2010. Enfermedades y parasitosis asociadas a una explotación intensiva de guajolotes nativos. *Ciencias Agrícolas Informa* 19, pp. 56-61.
- Camacho-Escobar, M.A., Arroyo-Ledezma, J. and Ramirez-Cancino, L., 2008. Diseases of backyard turkeys in the Mexican tropics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1149, pp. 368-370. <https://doi.org/10.1196/annals.1428.004>
- Domínguez, J., Rodríguez, F., Núñez, R., Ramírez, R., Ortega, J. and Ruiz, A., 2013. Ajuste de modelos no lineales y estimación de parámetros de crecimiento en bovinos tropicarnes. *Revista Agrociencia*, 47, pp. 25-34.
- Ersoy, I.E., Mendés, M. and Aktan, S., 2006. Growth curve establishment for American Bronze turkeys. *Archives of Animal Breeding*, 49, pp. 293-299. <https://doi.org/10.5194/aab-49-293-2006>
- García, E., 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. 4ta. ed., UNAM, México, 220 pp.
- Juárez-Caratachea, A., Gutiérrez-Vázquez, E., Ortiz-Rodríguez, R. and Segura-Correa, J.C., 2017. Descripción de la curva de crecimiento de guajolotes nativos locales en Michoacán. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(Suplemento 3), pp. 95-98.
- Juárez-Caratachea, A., Delgado-Hurtado, I., Gutiérrez-Vázquez, E., Salas-Razo, G., Ortiz-Rodríguez, R. and Segura-Correa, J.C., 2019. Descripción de la curva de crecimiento de pavos locales usando modelos no lineales. *Revista MVZ Córdoba*, 24, pp. 7104-7107. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1149>
- Mata-Estrada, A., Gonzalez-Cerón, F., Pro-Martínez, A., Torres-Hernández, G., Bautista-Ortega, J., Becerril-Perez, C.M., Vargas-Galicia, A.J. and Sosa-Montes, E., 2020. Comparison of four nonlinear growth models in Creole chickens of Mexico. *Poultry Science*, 99, pp. 1995–2000. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.031>
- Oludayo, M.A., Sonaiya, B.E., Bamidele, O., Hassan, W.A., Yakubu, A., Ajayi, F.O., Ogundu, U., Alabi, O.O. and Adebambo, O.A., 2021. Comparison of five mathematical models that describe growth in tropically adapted dual-purpose breeds of chicken. *Journal of Applied Animal Research*, 49, pp. 158–166. <https://doi.org/10.1080/09712119.2021.1915792>
- Parés, P. and Kucherova, I., 2014. Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en la cabra catalana. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 25, pp. 390-398.

- Pereda, M., González, S., Arjona, E., Bueno, G. and Mendoza, G., 2004. Ajuste de modelos de crecimiento y cálculo de requerimientos nutricionales para bovinos Brahman en Tamaulipas, México. *Agrociencia*, 39, pp. 19-27.
- Pérez-Lara, E., Camacho-Escobar M.A., García-López J.C., Machorro-Samano S., Ávila-Serrano N.Y. and Arroyo-Ledezma J., 2013. Mathematical modeling of the native Mexican turkey's growth. *Open Journal of Animal Science*. 3, pp. 305-310. <https://doi.org/10.4236/ojas.2013.34045>
- Plata, L., González, P. and Calderón, E., 2015. La función de crecimiento de Richard y los modelos de crecimiento neoclásicos. *EconoQuantum*, 14, pp. 99-118.
- Porter, T., Kebreab, E., Darmani Kuhl, H., Lopez, S., Strathe, A.B. and France, J., 2010. Flexible alternatives to the Gompertz equation for describing growth with age in turkey hens. *Poultry Science*, 89, pp. 371-378. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00141>
- Safari, A., Ahmadpanah, J., Jafaroghli, M. and Karimi, H., 2020. Comparative study of growth patterns for three strains of broiler chickens using mathematical models. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 86, pp. 75-82.
- Sariyel, V., Aygun, A. and Keskin, I., 2017. Comparison of growth curve models in partridge. *Poultry Science*, 96, pp. 1635-1640. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew472>
- Segura-Correa, J.C., Santos-Ricalde, R.H. and Palma-Ávila, I., 2017. Non-linear model to describe growth curves of commercial turkey in the tropics of Mexico. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 19, pp. 27-32. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0246>
- Şengül, T. and Kiraz, S., 2005. Non-linear models for growth curves in large white turkeys. *Turkish Journal of Veterinary y Animal Sciences*, 29, Article 22. <https://journals.tubitak.gov.tr/veterinary/vol29/iss2/22> Consultado el 6 de junio de 2024.
- Sogut, B., Celik, S., Ayasan, T. and Inci, H., 2016. Analyzing growth curves of turkeys reared in different breeding systems (intensive and free-range) with some nonlinear models. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 18, pp. 619-628. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0263>
- Ulloa, J., Grijalva, F., Arrieta, J. and Ortega, M., 2017. Tratamiento del modelo de Richards. *Acta Pesquera*, 3, pp. 51-59.
- Zárate-Contreras, D., González-Cerón, F., Cuca-García, J.M., Pro-Martínez, A., Ramírez-Valverde, G., Aggrey, S.E., Hernández-Mendo, O., Gallegos-Sánchez, J. and Sosa-Montes, E., 2022. Mexican Creole chickens: effect of data collection periods on goodness-of-fit and parameter precision of growth models. *Poultry Science*, 101, 101903. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101903>

Apéndice

Procedimiento para generar la función para obtener el diagrama de dispersión

Con los registros obtenidos de peso de los guajolotes, para diferentes valores de tiempo, se ajustan a la ecuación de Richards mediante el programa GeoGebra®. En dicho software se capturan los datos en una hoja de cálculo utilizando el comando “Vista-hoja de cálculo”. Posteriormente, se genera una lista de puntos seleccionando los datos en la hoja de cálculo y dando “click” derecho del mouse para crear “lista de puntos”. Con la finalidad de apreciar el diagrama de dispersión, es necesario alejar la vista gráfica utilizando la rueda de desplazamiento del mouse y después, ajustar el área visible con los comandos de visualización, situados en el menú de construcción (ubicado en la parte superior de la pantalla). Posteriormente, se generan cuatro deslizadores, seleccionar el ícono “Deslizador” y dar “click” en el área de vista gráfica. Es necesario nombrar a los deslizadores igual que a los parámetros del modelo de Richards. Establecidos los deslizadores, se registra la ecuación de Richards comenzando la escritura como $f(x)$ en la ventana “Entrada” (ubicada en la parte inferior de la pantalla). La variable tiempo de la ecuación se registra como “ x ”, debido a que el programa solo acepta esa variable independiente. Posteriormente, se ajusta la función con el comando “ajusta” en la ventana entrada. Seleccionar del menú la opción “ajusta”. En el espacio correspondiente a la lista de puntos se escribe el nombre de la lista generada con anterioridad, y el de función “ $f(x)$ ”. Después de presionar la tecla “enter” se deslizan los valores de los parámetros a_1 , a_2 y a_3 hacia atrás y hacia adelante con el mouse, para aproximar la curva a los datos. También se cambian aleatoriamente los límites superior e inferior de dichos parámetros hasta que se obtiene una función que, en forma visual, se adecua al conjunto de puntos del diagrama de dispersión. Dicha función se muestra en la tabla de dialogo como $g(x)$ donde pueden apreciarse los valores de los respectivos parámetros. Se calcula el coeficiente de regresión para establecer la confiabilidad del modelo obtenido mediante la ecuación [2]: