

Modelado de crecimiento del índice masa corporal – longitud total en machos de iguana negra *Ctenosaura pectinata* (Sauropsida: Squamata, Iguanidae)

Sergio Machorro-Sámano^{1*}, Saúl Gómez-Carreto¹, Roberto López-Pozos¹, Germán David Mendoza-Martínez² & José Luis Arcos-García¹

Resumen

La elaboración de modelos de crecimiento resulta relevante en los programas de producción animal, con la finalidad de desarrollar estrategias en el mejoramiento de la productividad de las especies. Ello permite identificar cuándo es más conveniente la comercialización o el sacrificio además de comprender la naturaleza del fenómeno en sí mismo. Para caracterizar el crecimiento de una especie, es conveniente utilizar un índice que relacione la masa corporal con la longitud total, en vez de tratar dichas variables por separado. Se desarrolló el presente trabajo con el objetivo de ajustar un modelo de crecimiento del índice masa corporal - longitud total en machos de iguana negra (*Ctenosaura pectinata*) utilizando una ecuación de cuatro parámetros (denominada ecuación MA) contrastando los resultados con la ecuación de Richards. Así mismo se establecieron en función de los parámetros para cada modelo las características relevantes como son: tasa de crecimiento, punto de inflexión y asíntota. Se definió el índice de masa corporal - longitud total de un ejemplar, como el cociente de su masa (g) y la longitud total (cm). Para determinar las ecuaciones de crecimiento se usó el método de regresión no lineal por Gauss - Newton. La tendencia de los resultados se observa por la comparación entre las curvas de crecimiento. El análisis de regresión refleja coeficientes de determinación que varían en 0.1% entre sí. Una marcada diferencia se aprecia en la curva correspondiente a la tasa de crecimiento, presentando el modelo de Richards mayores índices. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el modelo de crecimiento está mejor representado por la ecuación MA, por lo que se propone como alternativa de predicción.

Palabras clave: Curvas de crecimiento, modelo, ecuación de Richards, iguana negra, punto de inflexión.

Recibido: 28 de septiembre de 2021.

Abstract

The development of growth models is relevant in animal production programs, in order to develop strategies to improve the productivity of the species. Growth models make it possible to identify when commercialization or sacrifice is more convenient in addition to understanding the nature of the phenomenon itself. To characterize the growth of a species, it is convenient to use an index that relates body mass to total length, rather than treating these variables separately. The present study was developed to adjust a growth model of the body mass index - total length in male black iguana (*Ctenosaura pectinata*) using a four-parameter equation (called the MA equation) and contrasting the results with the Richards equation. Likewise, the relevant characteristics were established based on the parameters for each model, such as growth rate, inflection point and asymptote. The body mass index - total length of a specimen was defined as the ratio of its mass (g) to total length (cm). The non-linear regression method by Gauss-Newton were used to determine the growth equations. The trend of results is observed by a comparison between the growth curves. Regression analysis reflects coefficients of determination that vary 0.1% from each other. A marked difference can be seen in the curve corresponding to growth rate, with the Richards model presenting higher indices. Based upon the results, it is concluded that the growth model is better represented by the MA equation; therefore, it is proposed as a prediction alternative.

Key words: Growth curves, model, Richards equation, black iguana, inflection point.

Aceptado: 04 de marzo de 2022.

¹ Instituto de Industrias, Universidad del Mar campus Escondido. Km 3.5 carretera Puerto Escondido-Sola de Vega, Puerto Escondido 71980, Oaxaca, México.

² Departamento de Producción Agrícola y Animal, Medicina Veterinaria y Zootecnia; Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco.

* **Autor de correspondencia:** machorro@zicatela.umar.mx (SM-S)

Introducción

La importancia de las curvas de crecimiento animal, en el marco de la producción o conservación, se orienta a establecer un estándar que determine un manejo zootécnico adecuado. Además de identificar la edad al sacrificio o comercialización (Agudelo *et al.* 2007), su uso permite establecer acciones que influyen en la mejora genética (Domínguez *et al.* 2013).

En el crecimiento animal generalmente se establecen como indicadores el peso y la talla. Por tanto, el progreso que tienen dichos indicadores con el tiempo puede modelarse mediante una relación funcional en términos de diversos parámetros con un significado biológico.

La estimación de los parámetros en modelos no lineales es complicada y fácilmente se pueden cometer errores (Ulloa *et al.* 2017), por lo que se utilizan generalmente programas certificados como SAS, con el inconveniente, que requieren una licencia para su uso. En un ambiente de Matlab la evaluación de dichos parámetros presenta buen comportamiento respecto al uso de los recursos del CPU, número de iteraciones y exactitud (Cornejo *et al.* 2016). Algunos autores presentan como alternativa programas de código abierto para el cálculo de los parámetros. En estudios del modelado de crecimiento del marlín rayado (*Tetrapturus audax*), mediante la ecuación de Richards, se utilizó el programa GeoGebra, creando una serie de curvas donde puede observarse el impacto que genera la variación de los parámetros por separado en la tendencia de ajuste (Ulloa *et al.* 2017). El empleo de una hoja de cálculo en Excel es una herramienta más accesible para hallar los parámetros en regresiones no lineales mediante la programación del algoritmo de Gauss - Newton por lo que constituye una alternativa respecto al uso

del programa SAS. Uno de los criterios más usados para seleccionar la curva que mejor ajusta a los datos es el coeficiente de determinación (Agudelo *et al.* 2007), que constituye la proporción del cuadrado de las desviaciones entre la línea de regresión y el promedio de valores en la variable dependiente. Los modelos más utilizados para describir el crecimiento animal son los de Gompertz, Logístico, Von Bertalanffy, Brody y Richards (Agudelo *et al.* 2007, Parés *et al.* 2015). Todos ellos tienen la característica de presentar una curva sigmoidea con baja tasa de crecimiento en la etapa temprana, que se acelera en la edad intermedia y finalmente decae en la madurez (Parés *et al.* 2014, Plata *et al.* 2015). Los modelos de Von Bertalanffy, Logístico y Gompertz, representan una sola curva, cuyos únicos cambios de forma son los que se pueden realizar modificando la escala de los ejes coordenados (Richards 1959). Existen muchos casos de crecimiento que no se ajustan satisfactoriamente a cualquiera de las curvas mencionadas anteriormente, por lo que Richards estableció una ecuación que en forma general las incluye. Dicho autor menciona, que si bien su modelo puede no tener toda la flexibilidad de la ecuación logística generalizada, la información se transmite mucho más convenientemente, ya que contiene cuatro parámetros.

Las ecuaciones de Richards y Gompertz proporcionan descripciones del crecimiento en especies como ganado bovino, alces, pollos, avestruces, pavos y emús (Ersoy *et al.* 2006). En un estudio donde se analiza el crecimiento para bovinos *Brahman* se menciona que el modelo de cuatro parámetros de Richards presenta un mejor coeficiente de determinación que los modelos de tres parámetros con el inconveniente que requiere más cálculos para su ajuste (Pereda *et al.* 2004). Se

ha caracterizado el crecimiento para bovinos (Domínguez *et al.* 2013), mediante modelos no lineales (Brody, Logístico, Bertalanffy y Gompertz) sin considerar una relación de peso-talla, con coeficientes de determinación que van de 0.8 a 0.82. En una investigación llevada a cabo en corderos machos *Norduz* se ajustaron diversos modelos a la relación peso-tiempo nacidos en 2004, obteniéndose los mejores coeficientes de determinación para el modelo Logístico con un valor de 0.998 (Karakus *et al.* 2008). El uso de los modelos sigmoidales también se ha aplicado en investigaciones pesqueras, lo que muestra su versatilidad (Parés *et al.* 2014). En el crecimiento del ser humano se considera el índice de masa corporal para caracterizar el estado de sobrepeso. Dicho índice resulta de dividir el peso (kg) entre el cuadrado de la talla (m²). Esto se justifica ya que el peso y la talla en humanos por sí solos, describen pobremente la situación de una persona, sin embargo al usarlos conjuntamente en un índice se tiene un mejor indicador de crecimiento. El uso de un índice con la talla elevada al cuadrado o expresada linealmente es equivalente, ya que las correlaciones entre ellos *vs* el contenido de grasa corporal producen coeficientes de correlación del mismo significado (Puche *et al.* 2005).

En una investigación realizada en cabras, se modeló el índice de masa corporal (IMC) utilizando la misma ecuación que en los humanos (Pala *et al.* 2005). En dicho estudio se consideran diferentes valores de IMC para establecer los límites de categoría alta y baja. En el caso de la iguana negra existe un estudio de crecimiento con funciones polinomiales (Machorro *et al.* 2009). El modelo describe la relación entre las variables hocico-cloaca y peso, mostrando un ajuste cuyo coeficiente de determinación resultó de

0.994. Sin embargo los modelos polinomiales no son bien aceptados para describir el crecimiento en especies, ya que sus parámetros carecen de interpretación biológica (Agudelo *et al.* 2007). En otra investigación realizada en iguana negra se analiza el índice corporal. Dicho índice relaciona la masa y el volumen, constituyéndose como un indicador que sirve para evaluar las reservas de energía en los tejidos grasos subcutáneos durante el estado reproductivo (Arcos *et al.* 2020). El estudio menciona también que el índice corporal es una herramienta útil para el apoyo de la reproducción de la especie y su seguimiento permite llevar a cabo ajustes en la nutrición. Sin embargo, no hay investigaciones que describan el crecimiento de la iguana negra relacionando peso y talla en un mismo factor, por lo que el objeto de esta investigación fue obtener un modelo que muestre la evolución del índice de masa corporal - longitud total (IMLT) en relación a la edad, para machos de iguana negra en cautiverio. Para ello se utilizaron las ecuaciones de Richards y MA con la finalidad de contrastar los resultados entre sí, debido a que algunos autores indican que el modelo de Richards es cuestionado ya que no todos sus parámetros tienen un significado biológico y en ocasiones es difícil el ajuste con los datos experimentales (Ulloa *et al.* 2017).

Material y métodos

El estudio se realizó en el Centro de Conservación y Reproducción de Iguanas-UMAR (CECOREI -UMAR) ubicado dentro del Campo Experimental de la Universidad del Mar, en la comunidad de Bajos de Chila, Municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca. El área cuenta con una elevación de 12 msnm (Machorro *et al.* 2009).

Se utilizaron 2030 iguanas de diferente edad, nacidas y mantenidas en condiciones de cautiverio. No se consideró el sexo en los primeros meses de edad porque no es posible reconocerlo en todos los ejemplares (Casas 1982, Suazo 1994, Alvarado 1996, Arcos *et al.* 2005b). Al nacimiento, las crías se ubicaron en grupos de 20 ejemplares en jaulas de 0.45 x 0.45 x 0.45 m de largo, alto y ancho. Después de un año, se distribuyeron en jaulas de 75 m³, con medidas de 5 x 6 x 2.5 m de ancho, largo y altura, respectivamente; agrupándolas en las siguientes categorías: 4, 12, 14, 16, 25, 37, 49, 60, 61, 64, 72, 85, 98, 109, 122, 126, 132 y 150 meses de edad. Cada jaula fue techada con láminas galvanizadas cercando el perímetro con malla de criba. Cerca de las jaulas había árboles de almendro que proporcionaron sombra, pero también permitieron que las iguanas se asolearan por periodos intermitentes. El piso y los bebederos de las jaulas fueron de cemento para evitar que los animales se escaparan. La nutrición de las iguanas tuvo como base tres alimentos comerciales, plantas e insectos: 1) alimento para pollos en crecimiento con 20.7% de proteína cruda (PC) y 58.3% de fibra detergente neutro (FDN en base seca), 2) alimento para conejo (18.5% de PC y 58.6% de FDN y 3) alimento para gallina de postura con 16.0% de PC y 56.8% de FDN. Los tres alimentos se mezclaron en proporción 1:1:1. Así mismo, se ofreció flor de tulipán (*Tulipa gesneriana*; 16.2% de PC y 54.1% FDN), plantas de frijolillo (*Desmodium infortunatum*; 19.7% de PC y 41.9% de FDN e insectos con 55% de PC (Machorro *et al.* 2009). La dieta ofrecida fue equivalente al contenido de proteína cruda (25.3%) de las plantas consumidas y analizadas del estómago de *C. pectinata* en vida libre (Zurita-Carmona *et al.* 2009). El suministro de agua se realizó por medio de estanques pequeños de 0.4 x 0.6 x 0.3 m de ancho, largo y de profundidad

respectivamente. Tanto el agua como los alimentos se ofrecieron todos los días por la mañana a las 10:00 h y estuvieron disponibles a libre acceso. Esto se llevó a cabo de la misma forma para todos los grupos de edad.

Las variables analizadas fueron la masa corporal, registrada por medio de una balanza analítica con capacidad de 2610 ± 0.1g, mientras que la longitud total de los ejemplares se midió utilizando una cinta métrica con sensibilidad de 0.1cm. Se usaron los promedios de masa corporal y longitud total por grupos de edad para determinar el IMLT. Dicho índice se obtuvo dividiendo la masa corporal (g) entre la longitud total (cm) como se indica en la ecuación 1 (E1).

$$IMLT = \frac{W}{LT} \left[\frac{g}{cm} \right] \dots E1$$

Donde W representa la masa corporal (g) y LT la longitud total (cm). Los resultados se agruparon en una tabla donde la variable independiente "x" está constituida por la edad (meses) y la variable dependiente "y" por el IMLT (g/cm). Con dichos valores se modeló el IMLT mediante regresión no lineal usando las ecuaciones de Richards (E2) y MA (E3):

$$y = a_0 (1 - a_1 e^{-a_2 x})^{a_3} \dots E2$$

$$y = \frac{a_0 - a_1 e^{-a_2 x}}{2 (1 - a_3 e^{-a_2 x})} \dots E3$$

Al evaluar el límite de la variable dependiente cuando el tiempo crece indefinidamente se obtuvo el valor asintótico, definido mediante la relación: Asíntota = 0.5a₀. Los parámetros a₁ y a₃ están asociados a los valores del IMLT al nacimiento (y₀), punto de inflexión (y_i) y edad madura (A), como se muestra en las siguientes expresiones:

$$a_1 = \frac{2A(A-2y_i - y_0) + 4y_0y_i}{A + y_0 - 2y_i} \quad \dots \text{E4}$$

$$a_3 = \frac{y_0 - A}{y_0 + A - 2y_i} \quad \dots \text{E5}$$

El parámetro a_2 influye en la magnitud que presenta la tasa de crecimiento en el tiempo (rapidez con que se alcanza la asíntota) y está dado por la ecuación E6, donde x_i es el tiempo correspondiente al punto de inflexión.

$$a_2 = -\frac{1}{x_i} \ln \left(\frac{y_0 + A - 2y_i}{A - y_0} \right) \quad \dots \text{E6}$$

Los parámetros de la ecuación de Richards se obtuvieron en el programa SAS (versión 9.2). En el caso del modelo alternativo se utilizó el algoritmo de Gauss-Newton que requiere considerar parámetros de inicio aproximados a los de mejor ajuste. Para obtener dichos parámetros se sustituyeron cuatro valores de IMLT en la ecuación E3, generando un sistema de ecuaciones no lineales, que fue resuelto por el método de sustitución, reduciendo el sistema a una ecuación equivalente cuya incógnita fue el parámetro a_2 . Para hallar este parámetro se usó el método numérico de bisección (Chapra 2007). Posteriormente y por simple sustitución se obtuvieron los demás parámetros. Considerando estos resultados como valores iniciales, se empleó el método de Gauss-Newton, utilizando una hoja de cálculo en Excel para realizar las iteraciones correspondientes. Se evaluó el coeficiente de determinación para considerar la curva que mejor ajusta a los datos. Así mismo se calculó el error estándar, que representa el promedio del cuadrado de las desviaciones respecto a la línea de regresión. Dicho valor se consideró para determinar la zona

estándar de crecimiento sumándolo y restándolo al modelo obtenido. Como se mencionó anteriormente, la asíntota se obtuvo al evaluar el límite del modelo cuando el tiempo crece indefinidamente. Otra curva de importancia fue la tasa de crecimiento del IMLT respecto al tiempo. La máxima tasa de crecimiento ocurre en el punto de inflexión y es un valor preponderante en el contexto de la producción animal. Se calculó derivando la tasa de crecimiento e igualando el resultado con cero. Los modelos usados se muestran en la tabla I, en la cual, la segunda columna corresponde con el de Richards y la tercera con la ecuación MA. En ambas ecuaciones se obtuvieron los valores correspondientes a la asíntota, tasa de crecimiento, punto de inflexión y la tasa máxima de crecimiento, de tal manera que es factible contrastar los indicadores preponderantes en ambos modelos.

Resultados

Los valores del IMLT que resultaron de dividir la masa corporal entre la longitud total se muestran en la tabla II.

Para hallar los parámetros de inicio que requiere el algoritmo de Gauss-Newton se seleccionaron cuatro parejas de datos de la tabla II ($x_0=0$ $y_0=0.25$, $x_1=25$ $y_1=5.34$, $x_2=85$ $y_2=16.34$, $x_3=150$ $y_3=18.74$) sustituyéndose en la ecuación E3. Posteriormente se despejó el parámetro a_0 con lo que se obtuvieron las ecuaciones mostradas a continuación:

$$a_0 = 0.5 - 0.5a_3 + a_1 \quad \dots \text{E7}$$

$$a_0 = 10.68 + (a_1 - 10.68a_3) e^{-25a_2} \quad \dots \text{E8}$$

$$a_0 = 32.68 + (a_1 - 32.68a_3) e^{-85a_2} \quad \dots \text{E9}$$

$$a_0 = 37.48 + (a_1 - 37.48a_3) e^{-150a_2} \quad \dots \text{E10}$$

Se establecieron las identidades: E7=E8, E7=E9 y E7=E10. Posteriormente se despejó

Tabla I. Indicadores relevantes del IMLT para la Ecuación de Richards y MA en términos de sus parámetros.

	Richards	MA
Ecuación	$y = a_0 (1 - a_1 e^{-a_2 x})^{a_3}$	$y = \frac{a_0 - a_1 e^{-a_2 x}}{2(1 - a_3 e^{-a_2 x})}$
Asíntota	a_0	$\frac{a_0}{2}$
Tasa de crecimiento	$y' = a_0 a_1 a_2 a_3 e^{-a_2 x} (1 - a_1 e^{-a_2 x})^{a_3 - 1}$	$y' = \frac{(a_1 - a_0 a_3) a_2 e^{-a_2 x}}{2(1 - a_3 e^{-a_2 x})^2}$
Punto de inflexión	$x_i = -\frac{1}{a_2} \ln\left(\frac{1}{a_1 a_3}\right)$	$x_i = -\frac{1}{a_2} \ln\left(-\frac{1}{a_3}\right)$
	$y_i = a_0 \left(\frac{a_3 - 1}{a_3}\right)^{a_3}$	$y_i = \frac{a_3 a_0 + a_1}{4a_3}$
Máxima tasa de crecimiento	$y'_{Max} = a_0 a_2 \left(\frac{a_3 - 1}{a_3}\right)^{a_3 - 1}$	$y'_{Max} = \frac{(a_0 a_3 - a_1) a_2}{8a_3}$

el parámetro a_1 dando lugar a las ecuaciones E11, E12 y E13 respectivamente:

$$a_1 = \frac{10.18 + (0.5 - 10.68e^{-25a_2})a_3}{1 - e^{-25a_2}} \dots \text{E11}$$

$$a_1 = \frac{32.18 + (0.5 - 32.68e^{-85a_2})a_3}{1 - e^{-85a_2}} \dots \text{E12}$$

$$a_1 = \frac{36.98 + (0.5 - 37.48e^{-150a_2})a_3}{1 - e^{-150a_2}} \dots \text{E13}$$

Se igualó E11 con E12 y E11 con E13. Posteriormente se despejó el parámetro a_3 dando como resultado las ecuaciones E14 y E15.

$$a_3 = \frac{32.18 [1 - e^{-25a}] - 10.18 [1 - e^{-85a_2}]}{(0.5 - 10.68 e^{-25a_2}) [1 - e^{-85a_2}] - (0.5 - 32.68 e^{-85a_2}) [1 - e^{-25a_2}]} \dots \text{E14}$$

$$a_3 = \frac{36.98 [1 - e^{-25a}] - 10.18 [1 - e^{-150a_2}]}{(0.5 - 10.68 e^{-25a_2}) [1 - e^{-150a_2}] - (0.5 - 37.48 e^{-150a_2}) [1 - e^{-85a_2}]} \dots \text{E15}$$

Se igualaron E14 y E15 y se procedió a resolver la ecuación resultante con el método numérico de bisección, arrojando el siguiente resultado: $a_2 = 0.039443$.

Con este valor y por simple sustitución en las ecuaciones anteriores se obtuvieron los demás parámetros: $a_0 = 37.92954$, $a_1 = 35.68016$, $a_3 = -3.4988$

Considerando estos resultados como valores iniciales, se empleó el método de Gauss-Newton, utilizando una hoja de cálculo en Excel. La convergencia ocurrió en la séptima iteración arrojando los siguientes valores:

$a_0 = 41.14$ $a_1 = 41.87$ $a_2 = 0.0316$ $a_3 = -3.1383$.

Los parámetros de mejor ajuste en la ecuación de Richards resultaron ser:

$a_0 = 20.64$ $a_1 = 0.294$ $a_2 = 0.0285$ $a_3 = 10.0$

Los indicadores de crecimiento (IMLT) para cada modelo se resumen en la tabla III.

Se definió la zona estándar de crecimiento para IMLT sumando y restando el error estándar a cada modelo (Machorro *et al.* 2009) como se muestra en las figuras 1 y 2.

La tasa de crecimiento se obtuvo al derivar las ecuaciones que describen a los respectivos modelos (Fig. 3 y 4).

Tabla II. Valores del índice masa corporal - longitud total (IMLT) (g/cm) vs edad (meses) en machos de iguana negra (*C. pectinata*).

x= Edad (meses)	y= IMLT (g/cm)
0	0.25
4	0.86
12	1.36
13	1.58
14	1.77
16	2.51
25	5.34
37	8.70
49	11.48
60	11.31
61	11.97
64	9.85
72	11.94
85	16.34
98	20.59
109	17.63
122	17.88
126	21.62
132	18.10
150	18.74

Tabla III. Indicadores relevantes del IMLT para la Ecuación de Richards y MA en términos de sus parámetros.

	Richards	MA
Ecuación	$y = 20.64 (1-0.294e^{-0.0285x})^{10}$	$y = \frac{41.14-41.87e^{-0.0316x}}{2(1+3.14e^{-0.0316x})}$
Coefficiente de determinación	0.958	0.959
Error Estándar	1.64	1.61
Asíntota	20.64	20.57
Tasa de crecimiento	$y' = 1.729e^{-0.0285x} (1-0.294e^{-0.0285x})^9$	$y' = \frac{5.40e^{-0.0316x}}{2(1+3.14e^{-0.0316x})^2}$
Punto de inflexión	$x_i = 37.84$ $y_i = 7.20$	$x_i = 36.19$ $y_i = 6.95$
Máxima tasa de crecimiento	$y'_{Max} = 0.228$	$y'_{Max} = 0.215$

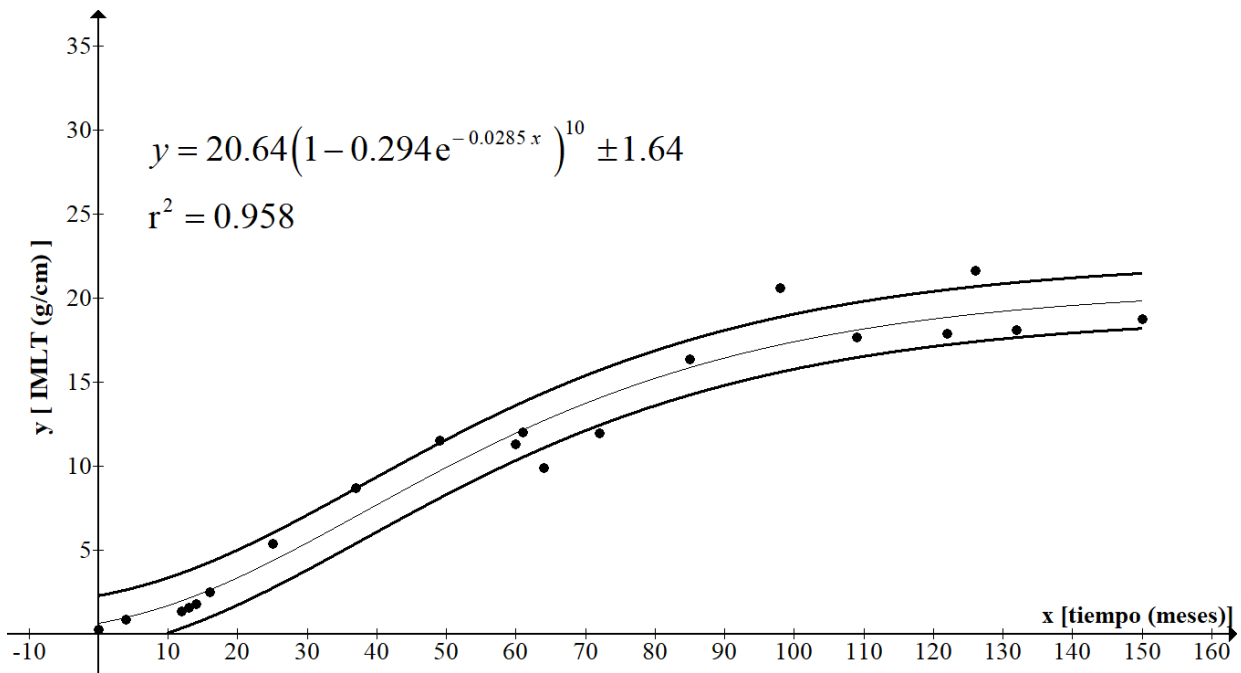


Figura 1. Zona estándar de crecimiento para el IMLT vs edad mediante la ecuación de Richards en machos de iguana negra.

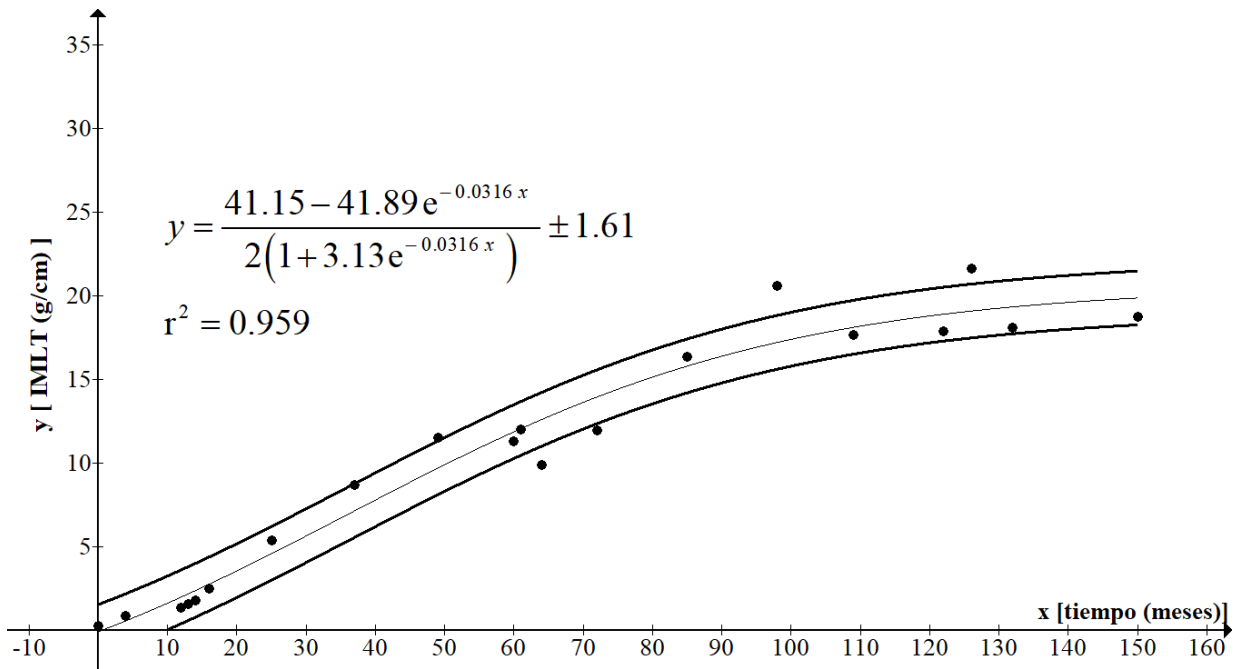


Figura 2. Zona estándar de crecimiento para el IMLT vs edad mediante la ecuación de MA en machos de iguana negra.

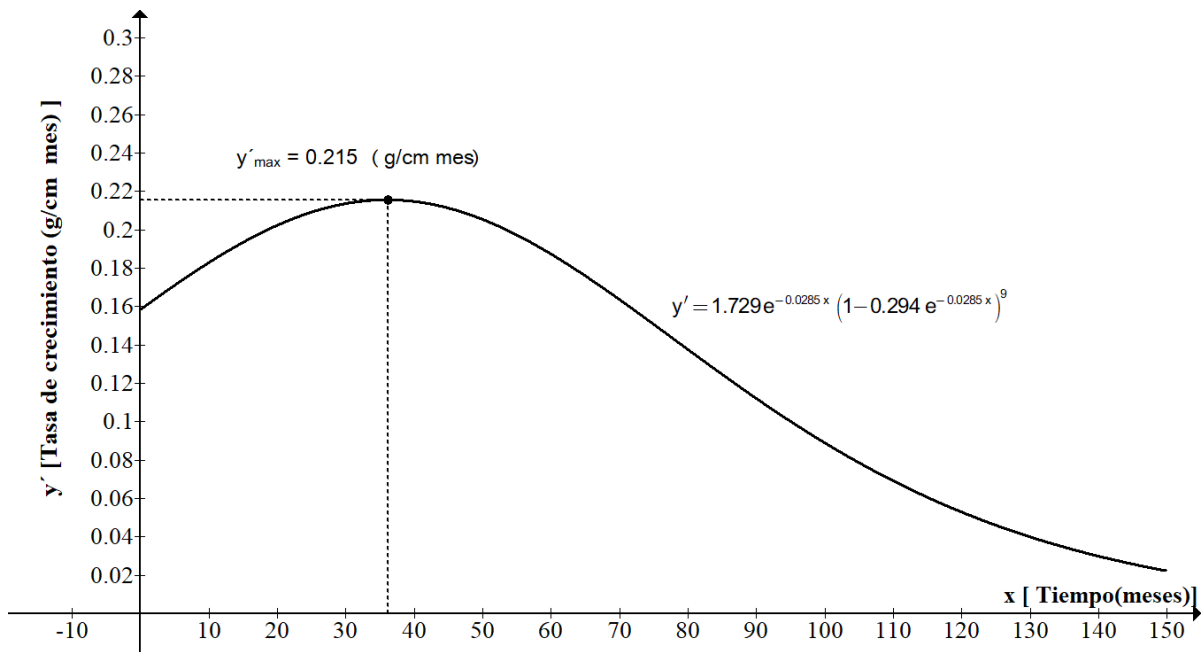


Figura 3. Tasa de crecimiento del IMLT VS edad en machos de iguana negra para el modelo de Richards.

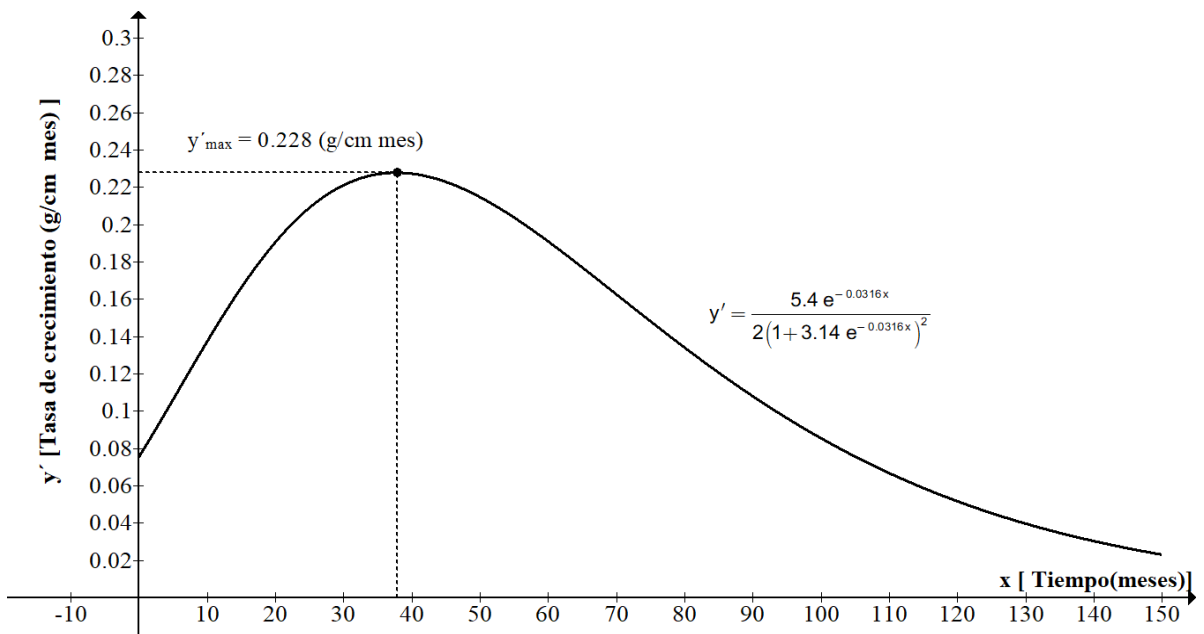


Figura 4. Tasa de crecimiento del IMLT vs edad en machos de iguana negra para el modelo MA.

Discusión

La evolución del crecimiento del IMLT en machos de iguana negra se ajusta a las ecuaciones de Richards y MA, con coeficientes de determinación aceptables (0.958 a 0.959), observándose que las curvas generadas por ambos modelos se superponen hasta después de los 10 meses. Antes

de esta edad las variaciones no son significativas. De acuerdo al modelo de Richards en el tiempo que se tiene el último registro las iguanas se encuentran al 90.8 % de su crecimiento asintótico. En el caso del modelo de MA están en el 91.1 %. Dichos resultados muestran una diferencia del orden de 0.3% por lo que se puede establecer que son equivalentes. La diferencia

más clara entre ambos modelos se aprecia en las gráficas correspondientes a la tasa de crecimiento. La tasa de crecimiento al nacimiento generada con la ecuación de MA es del doble respecto a la ecuación de Richards; sin embargo, la velocidad con que varía es menor hasta alcanzar el punto de inflexión. Este aspecto no resulta determinante en el manejo zootécnico ya que la edad en que ocurre la máxima tasa de crecimiento constituye el inicio de velocidades de crecimiento negativas, que en última instancia generan pérdidas de carácter económico al estar manteniendo y alimentando un ejemplar con beneficios de crecimiento marginales cada vez más pobres. Las curvas correspondientes a las tasas de crecimiento se emparejan aproximadamente a los 70 meses (38.9 % de la vida promedio de la iguana). La máxima tasa de crecimiento en la ecuación de MA es menor respecto a la de Richards y presenta una diferencia de 0.013 (g/cm mes). Ambos modelos muestran que el punto de inflexión ocurre entre el 20 y 21% del promedio de vida de la iguana. El punto de inflexión muestra un desfase de 1.65 meses entre ambos modelos, presentándose después en el Richards, por lo que si esta última ecuación se considera como estándar de crecimiento se pueden generar costos extras en el mantenimiento de los ejemplares. En base a esta consideración y a reserva de cuantificar la magnitud en pérdidas por el manejo extemporáneo se plantea que el modelo de crecimiento de cuatro parámetros generado por la ecuación MA es una mejor alternativa para describir el crecimiento de la iguana negra (*C. pectinata*).

Conclusión

El modelado del índice masa corporal - longitud total en machos de *C. pectinata* constituye una herramienta de utilidad en

su manejo zootécnico ya que permite establecer una zona de crecimiento estándar de la especie en condiciones de cautiverio.

El uso de la ecuación de Richards o la ecuación alternativa MA generan curvas que describen adecuadamente el crecimiento de la iguana negra (machos), sin embargo se recomienda el modelo MA para caracterizar su crecimiento.

El empleo de la metodología utilizada para obtener los parámetros de la ecuación MA mediante el algoritmo de Gauss-Newton y con apoyo de una hoja de cálculo en Excel constituye una alternativa con mayor disponibilidad para el usuario respecto a los paquetes con licencia como el SAS, obteniendo resultados muy similares.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad del Mar el apoyo brindado para la realización del presente artículo a través del proyecto con clave de unidad programática: 2IE0805. Así mismo se agradecen los comentarios valiosos de los revisores anónimos y a Charles Eliot Litwin de la Universidad del Mar por su apoyo en la traducción del resumen al inglés.

Referencias

- Agudelo, D., M. Cerón & L. Restrepo. 2007. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 20:157-173.
- Arcos-García J.L., V.H. Reynoso, G.D. Mendoza & D. Hernández. 2005. Identificación del sexo y medición del crecimiento en iguana negra (*Ctenosaura pectinata*) en las etapas de cría y juvenil. *Revista Veterinaria México OA*. 36:53-62.
- Arcos-García, J.L., J. Núñez, J. García, R. Rueda del P., S. Romero, & R. López. 2020. Body condition index in breeding black iguana females (*Ctenosaura pectinata*) in captivity. *Revista de la*

- Facultad de Ciencias Agrarias. 52(2): 349-359.
- Casas A. 1982.** Anfibios y reptiles de la costa suroeste del Estado de Jalisco con aspectos sobre su ecología y biogeografía. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias. UNAM, CD. de México.
- Chapra, S. & Canale, R. 2007.** Métodos numéricos para ingenieros. 5a. Mcgraw-Hill, México, 977 pp.
- Cornejo, O. & R. Rebolledo. 2016.** Estimación de parámetros en modelos no lineales: algoritmos y aplicaciones. Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia. 13(25): 81-98.
- Domínguez, J., F. Rodríguez, R. Núñez, R. Ramírez, J. Ortega & A. Ruiz. 2013.** Ajuste de modelos no lineales y estimación de parámetros de crecimiento en bovinos tropicarnes. Revista Agrociencia. 47: 25-34.
- Ersoy, E., M. Mendes, & S. Aktan. 2006.** Growth curve establishment for American Bronze turkeys. Arch. Tierz. 49(3): 293-299.
- Karakus, K., E. Eyduran, D. Kum, T. Ozdemir & F. Cengiz. 2008.** Determination of the Best Growth Curve and Measurement Interval in Norduz Male Lambs. Journal of Animal and Veterinary Advances. 7(11):1464-1466.
- Machorro, S., M. Herrera, J.L. Arcos, R. López, G. Mendoza & G. Leyte. 2009.** Aplicación de la regresión polinomial en el modelado de crecimiento hocico-cloaca en relación con el peso en iguana negra *Ctenosaura pectinata* (Reptilia: Squamata: Iguanidae). Ciencia y Mar. 13(37): 21-28.
- Pala, A., T. Savas, F. Ugur & G. Das. 2005.** Growth Curves of Turkish Saanen Goats' kids Grouped for Weight and Body Mass Index. Arch Tierz. 48:185-93.
- Parés, P. & Kucherova, I. 2014.** Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en la cabra catalana. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. 25(3): 390-398.
- Parés, P., M. Caballero & R. Perezgrovas. 2015.** Comparación de Modelos No Lineales para Describir Curvas de Crecimiento según Sexo en el Borrego Chiapas. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. 26(3): 389-394.
- Pereda, M., S. González, E. Arjona, G. Bueno & G. Mendoza. 2004.** Ajuste de modelos de crecimiento y cálculo de requerimientos nutricionales para bovinos Brahman en Tamaulipas, México. Agrociencia. 39: 19-27.
- Plata, L., P. González & E. Calderón. 2015.** La función de crecimiento de Richard y los modelos de crecimiento neoclásicos. EconoQuantum. 14(1): 99-118.
- Puche, R. 2005.** El índice de masa corporal y los razonamientos de un astrónomo. MEDICINA. 65(4): 361-365.
- Richards, F. 1959.** A Flexible Growth Function for Empirical Use. The Journal of Experimental Botany. 10(39): 290-300.
- Suazo, I. & J. Alvarado, 1994.** Iguana negra: notas sobre su historia natural. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en colaboración con Fish and Wildlife Service, Ecotonia A. C. Morelia. 40 pp.
- Ulloa, J., F. Grijalva, J. Arrieta & M. Ortega. 2017.** Tratamiento del modelo de Richards. Acta Pesquera. 3(6): 51-59.
- Zurita-Carmona M.E., B. Aguilar, A. González, D. Mendoza, J.L. Arcos. 2009.** Composición de la dieta, consumo de proteína y energía en iguana negra, *Ctenosaura pectinata* Wiegmann, 1834, y densidad poblacional en Santos Reyes Nopala, Oaxaca. Universidad y Ciencia, trópico húmedo; 25:103-109.