**Modelación de curvas de crecimiento y estimación de parámetros genéticos de los parámetros de la curva de crecimiento en alpacas**

Mamani-Cato, R.H.1; Huanca, T.1; Gallegos, R.F.2; Condori-Rojas, N.1, Carrasco, W.1, Álvarez, Y.1, Frank, E.N.4, Hick, M.V.H.4

1 Instituto Nacional de Innovación Agraria, Estación Experimental Agraria Illpa, Puno, Perú

2 Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Puno, Perú.

3 Instituto Nacional de Innovación Agraria, Estación Experimental Agraria Baños del Inca, Cajamarca, Perú

4 IRNASUS – CONICET - Universidad Católica de Córdoba y Sede Chamical, UNLAR, Argentina

Autor para correspondencia: rmamani@inia.gob.pe

**RESUMEN**

El objetivo de este estudio fue modelar cuatro curvas de crecimiento y estimar los parámetros genéticos de los parámetros de la curva de crecimiento en alpacas de la raza Huacaya. El estudio se realizó en el Anexo Experimental Quimsachata del Instituto Nacional de Innovación Agraria, Puno, Perú. Se analizó 67372 datos de pesos corporales de 6691 alpacas jóvenes. Los pesos corporales individuales fueron obtenidos con intervalos de 30 días desde el nacimiento hasta los 360 días de edad, desde el año 1998 a 2014. Para modelar el crecimiento de las alpacas se utilizó cuatro modelos no lineales: Brody, Von Bertalanffy, Logístico y Gompertz; los parámetros de los modelos fueron estimados por el método iterativo de *Gauss Newton*. Para evaluar la influencia del color de vellón, sexo, año de nacimiento y mes de nacimiento sobre los parámetros de la curva de crecimiento del modelo Brody se analizaron en un diseño completamente al azar. Los componentes de (co)varianza y los parámetros genéticos del peso corporal asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*) fueron estimados por el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML). Los valores genéticos se estimaron por metodología del Mejor Predictor Lineal Insesgado (BLUP). Las tendencias genéticas de los parámetros *A* y *k* fueron estimados por regresión lineal. Los resultados muestran que el peso corporal asintótico (*A*) fue mayor en el modelo Brody (26,0980 kg) y menor para el modelo Logístico (24,7717 kg). La estimación del parámetro B fue menor para el modelo Von Bertalanffy (0,3643 kg), mientras que el modelo Logístico presentó el mayor valor (1,8415). La tasa de maduración (*k*) tuvo valores que fueron desde 0,00867 hasta 0,0159. El modelo de Brody mostró el mayor coeficiente de determinación ajustado (71,55%) y el menor cuadrado medio del error (14,2130). Los factores color de vellón y sexo de la alpaca tuvieron un efecto significativo sobre el peso corporal asintótico (*A*) (*P* < 0,01), el factor mes de nacimiento tuvo un efecto significativo sobre ambos parámetros (*A* y *k*) (*P* < 0,01). El mes de nacimiento, año de nacimiento y el sexo tuvieron un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento (*k*) (P < 0,05), pero no hubo efecto significativo del color de vellón de la alpaca sobre la tasa de crecimiento (*k*) (*P* ≥ 0,05). La heredabilidad del parámetro *A* de la curva de crecimiento de Brody fue de mediana magnitud (0,31745), para el parámetro *k* fue de baja magnitud (0,05139) y la correlación genética entre los parámetros *A* y *k* es relativamente alta y negativa (-0,37371). La tendencia genética fue positiva para el peso asintótico y negativa para la velocidad de crecimiento. Se concluye que el modelo de crecimiento de Brody es adecuado para describir la curva de crecimiento en alpacas Huacaya jóvenes. El peso asintótico (*A*) fue influenciado por los efectos fijos, pero la tasa de madurez sólo por el mes y año de nacimiento. Las heredabilidades para peso corporal asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*) fueron de mediana y baja magnitud.

**Palabras clave:** Alpaca, curva de crecimiento, heredabilidad, modelo, peso corporal.

**ABSTRACT**

The objective of this study was to model four growth curves and estimate the genetic parameters of the growth curve parameters in alpacas of the Huacaya breed. The study was carried out in the Quimsachata Experimental Annex of the National Institute of Agrarian Innovation, Puno, Peru. 67372 body weight data of 6691 young alpacas were analyzed. Individual body weights were obtained at intervals of 30 days from birth to 360 days of age, from 1998 to 2014. To model the growth of alpacas, four non-linear models were used: Brody, Von Bertalanffy, Logística and Gompertz; The parameters of the models were estimated by the iterative method of Gauss Newton. To assess the influence of fleece color, sex, year of birth and month of birth on the parameters of the Brody model growth curve were analyzed in a completely randomized design. The components of (co) variance and the genetic parameters of asymptotic body weight (*A*) and maturation rate (*k*) were estimated by the Maximum Restricted Likelihood (REML) method. Genetic values ​​were estimated by the Best Linear Predictor (BLUP) methodology. The genetic trends of parameters *A* and *k* were estimated by linear regression. The results show that the asymptotic body weight (*A*) was higher in the Brody model (26.0980 kg) and lower for the Logistic model (24.7717 kg). The estimation of parameter *B* was lower for the Von Bertalanffy model (0.3643 kg), while the Logistic model presented the highest value (1.8415). The maturation rate (*k*) had values ​​ranging from 0.00867 to 0.0159. Brody's model showed the highest adjusted coefficient of determination (71.55%) and the lowest mean square of the error (14.2130). The fleece color and sex factors of the alpaca had a significant effect on asymptotic body weight (*A*) (P <0.01), the month of birth factor had a significant effect on both parameters (*A* and *k*) (P <0.01). The month of birth, year of birth and sex had a significant effect on the growth rate (*k*) (P <0.05), but there was no significant effect of the alpaca fleece color on the growth rate (*k*) (P ≥ 0.05). The heritability of parameter *A* of the Brody growth curve was of medium magnitude (0.31745), for parameter *k* it was of low magnitude (0.05139) and the genetic correlation between parameters *A* and *k* is relatively high and negative (-0.37371). The genetic trend was positive for asymptotic weight and negative for growth speed. It is concluded that Brody's growth model is suitable to describe the growth curve in young Huacaya alpacas. The asymptotic weight (*A*) was influenced by the fixed effects, but the maturity rate only by the month and year of birth. The heritability for asymptotic body weight (*A*) and maturation rate (k) were medium and low magnitude.

**Keywords:** Alpaca, growth curve, heritability, model, body weight.

**INTRODUCCIÓN**

La población de alpacas del Perú es de 3 685,500. La raza Huacaya representa el 80,4% de la distribución; la mayoría de las alpacas Huacaya se encuentran en Puno (41,58%), Cusco (13,74%) y Arequipa (12,16%) (INEI, 2012). La crianza de Camélidos Sudamericanos en el Perú está concentrada en el sur andino, en dos zonas agroecológicas debidamente definidas, puna húmeda y puna seca (Huanca *et al*., 2013). El mejoramiento genético es una buena alternativa para el incremento de producción de fibra y de carne de alpacas, que permitirían la mejora de ingresos de los alpaqueros (Quispe 2013). Por otro lado, la falta de objetivos de producción no permite la aplicación de programas de mejoramiento. Bajo estas condiciones de producción un importante indicador fenotípico de la capacidad de producción de carne es la descripción del peso corporal de los animales a través del tiempo. La característica más importante de un animal es el crecimiento, que se describe como un aumento en el peso y tamaño en un cierto período de tiempo (Thornley y Johnson 1990). En la producción animal, específicamente, la mayoría de los productos, especialmente la producción de carne se ven afectados por la tasa de crecimiento y el tamaño corporal de los animales. Los cambios en el peso vivo para un período de tiempo también pueden ser explicados en términos de tasa de crecimiento. Por esta razón, los estudios sobre el crecimiento animal se han convertido en un atractivo estudio en las últimas décadas para mejorar la productividad general. El análisis científico del crecimiento requiere modelos matemáticos que se calculan con los datos obtenidos a partir de los períodos de crecimiento, por lo tanto los eventos del crecimiento están más claramente explicadas e interpretadas (Efe, 1990). Las curvas de crecimiento son una forma de describir el crecimiento en un cierto período de tiempo, hay varias funciones matemáticas no lineales (por ejemplo, Gompertz, Richards, Von Bertalanffy y Logística) que se han utilizado extensamente en diversas especies de ganado para describir el desarrollo de peso corporal (por ejemplo, Kaps *et al*., 2000; Menchaca *et al*., 1996, en el ganado Bathaei y Leroy, 1998, en ovejas, Schinckel *et al*., 2004, en los cerdos y Mignon-Grastean *et al*., 2000 en el pollo) . Sin embargo, existe poca información en la literatura sobre modelación de curvas de crecimiento y parámetros genéticos para parámetros de la curva de crecimiento en alpacas jóvenes de la raza Huacaya. Las características de crecimiento de las alpacas desde el nacimiento hasta el primer año de edad no han sido estudiadas adecuadamente. La mayoría de las investigaciones se limitan a la predicción del peso vivo por medición del cuerpo (Wurzinger *et al*., 2005; Llacsa *et al*., 2007), Riek y Gerken (2007) estimaron curvas de crecimiento en llamas usando tanto la regresión lineal simple y la ecuación de Gompertz. Los autores reportaron coeficientes de determinación (R2) de 0,999 y 0,998 para la regresión lineal simple y la función de Gompertz respectivamente, lo que indica que una regresión lineal puede ser adecuada para describir el desarrollo del peso corporal desde el nacimiento hasta 27 semanas después del parto. Varios estudios han reportado estimaciones de heredabilidad significativas para los parámetros de la curva de crecimiento de diferentes especies de ganado (Mignon-Grastean *et al*., 2000; Koivula *et al*., 2008; Silva *et al*., 2012; Lopes *et al*., 2012), lo que demuestra que estos parámetros son heredables y por lo tanto podrán ser modificados por la selección a través de la implementación de un programa de mejora genética. En ese sentido, es importante conocer la relación entre estos parámetros de la curva de crecimiento para definir adecuadamente los objetivos de mejoramiento. Sin embargo, este conocimiento no existe para muchas poblaciones reproductoras incluyendo la población de Camélidos Sudamericanos. Con el objetivo de proporcionar más conocimientos sobre el desarrollo del peso corporal de alpacas se ha elaborado el presente estudio. Los objetivos del presente estudio son: a) describir el crecimiento de la alpaca joven de la raza Huacaya desde el nacimiento hasta los 12 meses de edad mediante la aplicación de cuatro funciones no lineales, b) evaluar los efectos ambientales sobre los parámetros de la curva de crecimiento y c) estimar los parámetros genéticos y la tendencia genética para parámetros de la curva de crecimiento en alpacas jóvenes.

**MATERIAL Y MÉTODOS**

***Datos***

Se analizaron datos de pesos corporales individuales de alpacas de la raza Huacaya. Los datos fueron obtenidos del Anexo Experimental Quimsachata del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en el Distrito de Santa Lucía, Provincia de Lampa, Departamento de Puno, a 15º44’44,22” S; 70º40’39” Oeste. Este centro cuenta con una extensión de 6281,5 ha entre altitudes de 4100 a 4500 m s. n. m. en la zona agroecológica de puna seca; en esta zona existen dos épocas muy diferentes, la época de seca (mayo a octubre) con temperatura promedio diaria de 5,34ºC con máximo de 13,89ºC y mínimo de -1,68ºC, humedad relativa promedio 46,67% y con precipitación pluvial acumulada de 61,24 mm; la época de lluvia (noviembre a abril) con temperatura promedio diario de 7,57ºC con máximo de 14,36ºC y mínimo de 2,56ºC, humedad relativa 61,67% y precipitación pluvial acumulada de 486,82 mm ([SENAMHI, 2019](#_ENREF_15)). Los pastos más predominantes son las gramíneas: *Festuca dolichophylla*, *Calamagrostis vicunarum*, *Stipa ichu*, *Muhlenbergia fastigiata* y *Poa candamoana*; existen muy pocos bofedales, en las cuales predominan: Distichetum, Festuchetum IV, Eleocharetum y Wernerichetum ([CIRNMA, 2001](#_ENREF_3)). La base de datos consistió de 67372 registros de pesos corporales de 6691 alpacas jóvenes de la raza Huacaya (Tabla 1). Los pesos corporales individuales fueron obtenidos con intervalos de 30 días desde el nacimiento hasta los 360 días de edad, obtenidos desde el año 1998 a 2014.

***Tabla 1. Número de animales, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para peso corporal de alpacas de la raza Huacaya en diferentes edades***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Edad (meses) | N° de animales | Peso corporal promedio, kg | Desviación estándar, kg | Coeficiente de variación, % |
| Nacimiento | 6691 | 6,23 | 1,09 | 17,50 |
| 1 | 5061 | 10,81 | 1,93 | 17,85 |
| 2 | 5516 | 14,04 | 2,49 | 17,74 |
| 3 | 5524 | 16,84 | 2,95 | 17,52 |
| 4 | 5585 | 19,19 | 3,45 | 17,98 |
| 5 | 5421 | 20,92 | 3,87 | 18,50 |
| 6 | 5657 | 22,12 | 4,22 | 19,08 |
| 7 | 5633 | 23,00 | 4,42 | 19,22 |
| 8 | 5205 | 23,55 | 4,59 | 19,49 |
| 9 | 4633 | 23,67 | 4,63 | 19,56 |
| 10 | 4192 | 24,09 | 4,63 | 19,22 |
| 11 | 4147 | 24,74 | 4,73 | 19,12 |
| 12 | 4107 | 26,04 | 4,74 | 18,20 |

***Análisis estadístico***

***Parámetros de la curva de crecimiento***

Para describir la trayectoria del crecimiento de los animales fue aplicado cuatro modelos no lineales: Brody, Von Bertalanffy, Logístico y Gompertz (Tabla 2), donde *yij* es el peso corporal observado del *i*-ésimo individuo (*i* = 1,…, *n*) en el *j*-ésimo tiempo (*j* = 1,…, *n*) para el *i*-ésimo animal, *tij* es la edad del *i*-ésimo animal en días al *j*-ésimo tiempo y $ε$ij es el error residual aleatorio. Los parámetros de la curva de crecimiento para el *i*-ésimo animal son: *Ai*, es el peso corporal asintótico del *i*-ésimo animal, el cual es interpretado como peso a la madurez; *Bi*, es una constante de integración, relacionada a los pesos iniciales del *i*-ésimo animal y sin interpretación biológica bien definida; *ki*, es la tasa de maduración del *i*-ésimo animal, que es interpretado como el cambio del peso en relación al peso adulto o para indicar con qué rapidez el animal se acerca al peso adulto. Los parámetros de los modelos fueron estimados por el método iterativo de *Gauss Newton* por medio del procedimiento NLIN del programa estadístico SAS versión 9.4. Para saber si un modelo tiene un buen ajuste se usó el coeficiente de determinación ajustado (R2aj) y el cuadrado medio del error (CME). El coeficiente de determinación ajustado fue calculado de la siguiente manera: 1-(CME/$σ\_{y}^{2}$)\*100; donde $σ\_{y}^{2}$ es la varianza del peso vivo; el CME fue calculado dividiendo la suma de cuadrado del error (SCE) entre el número de grados de libertad del error, el cual representa el estimador de máxima verosimilitud de la varianza residual.

***Tabla 2. Ecuaciones de los modelos no lineales utilizados para describir la curva de crecimiento en alpacas***

|  |  |
| --- | --- |
| Modelo | Forma funcional |
| Brody | $$y=A\left(1-Be^{-kt}\right)+ ε$$ |
| Von Bertalanfly | $$y=A\left(1-Be^{-kt}\right)^{3}+ ε$$ |
| Logístico | $$y=A\left(1+e^{-kt}\right)^{-m}+ ε$$ |
| Gompertz | $$y=Ae^{Be(-kt)}+ ε$$ |

*y* = representa el peso corporal a la edad *t* (días); *A* = representa al peso corporal asintótico, esto es interpretado como el peso maduro; y *B* = es la constante de integración que relaciona al peso inicial del animal; *k* = es la tasa de maduración, el cual es interpretado como el cambio del peso en relación con el peso maduro; *m* = indica el punto de inflexión de la curva y $ε $= es el error residual aleatorio.

***Efectos ambientales sobre los parámetros de la curva de crecimiento***

Para evaluar la influencia de efectos fijos, como el color del vellón de la alpaca (*i* = blanco, color y tonalidades), sexo (*j* = macho y hembra), año de nacimiento (*k* = 1998 a 2014) y mes de nacimiento (*l* = enero, febrero, marzo, abril y diciembre) sobre los parámetros de la curva de crecimiento se ha analizado en un diseño completamente al azar (DCA) usando el programa estadístico SAS versión 9.4. Solamente los parámetros *A* y *k* fueron evaluados, debido a que tienen interpretación biológica. El modelo estadístico fue: $y\_{ijklm}= μ + α\_{i}+ β\_{j}+ δ\_{k}+ γ\_{l}+ ε\_{ijklm}$, donde $y\_{ijklm}$ = es el peso corporal al *m*-ésimo día del *i*-ésimo color, *j*-ésimo sexo, *k*-ésimo año de nacimiento , y *l*-ésimo mes de nacimiento; $μ$ = media poblacional; $α\_{i}$ = efecto del *i*-ésimo color del vellón; $β\_{j}$ = efecto del *j*-ésimo sexo; $δ\_{k}$ = efecto del *k*-ésimo año de nacimiento; $γ\_{l}$ = efecto del *l*-ésimo mes de nacimiento y $ε\_{ijklm}$ = error residual aleatorio atribuido a cada observación.

***Parámetros genéticos y tendencias genéticas de los parámetros de la curva de crecimiento***

Para estimar los componentes de (co)varianza, la heredabilidad del peso corporal asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*), y la correlación genética entre ambos parámetros de crecimiento. Se utilizó el modelo animal de dos caracteres el cual fue:

$\left[\begin{array}{c}y\_{1}\\y\_{2}\end{array}\right]= \left[\begin{matrix}X\_{1}&0\\0&X\_{2}\end{matrix}\right]\left[\begin{array}{c}β\_{1}\\β\_{2}\end{array}\right]+ \left[\begin{matrix}Z\_{1}&0\\0&Z\_{2}\end{matrix}\right]\left[\begin{array}{c}μ\_{1}\\μ\_{2}\end{array}\right]+ \left[\begin{array}{c}e\_{1}\\e\_{2}\end{array}\right] $(Gutiérrez, 2010)

*y1*y *y2* son los vectores de observaciones de los caracteres 1 (parámetro *A*) y 2 (parámetro *k*), respectivamente; *β1* y *β2* son los vectores de efectos fijos (color de vellón, sexo, año de nacimiento y mes de nacimiento) para los caracteres 1 y 2 respectivamente; $u\_{1}\~N(0,Aσ\_{u}^{2})$ y $u\_{2}\~N(0,Aσ\_{u}^{2})$ son vectores de efectos aleatorios genéticos aditivos y ; $e\_{1}\~N(0,Iσ\_{e}^{2})$ y $e\_{2}\~N(0,Iσ\_{e}^{2})$ son los efectos residuales para los caracteres 1 y 2 respectivamente; *X1* y *X2* y *Z1* y *Z2* son las matrices de incidencia que relacionan los elementos de *β1* y *u1* y *β2* y *u2* respectivamente.

Los componentes de (co)varianza y los parámetros genéticos fueron estimados por el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML) utilizando el programa VCE versión 5.0 (Neumaier y Groeneveld, 1998). Los valores genéticos se estimaron utilizando el programa PEST versión 4.1. El progreso genético se ha estimado utilizando la siguiente fórmula:

$R= \frac{ih^{2}σ\_{p}}{T}$ (Falconer y Mackay, 1996)

Donde *R* es la respuesta a la selección; *i* es la intensidad de selección; *h2* es la heredabilidad, $σ\_{p}$ es la desviación estándar fenotípica y *T* es el intervalo generacional.

El intervalo generacional se ha calculado utilizando el programa ENDOG versión 4.8 (Gutiérrez y Goyache, 2005) cuyos resultados se muestran en la Tabla 6.

***Tabla 6. Intervalos generacionales (en años) en alpacas de la raza Huacaya, para las cuatro vías***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Vía | N | Intervalo Generacional | Desviación Estándar | Error Estándar de la Media |
| Padre - Hijo | 83 | 5,6251 | 1,7484 | ± 0,1919 |
| Padre - Hija | 684 | 5,5123 | 1,7311 | ± 0,1900 |
| Madre - Hijo | 170 | 5,0470 | 2,0278 | ± 0,2226 |
| Madre - Hija | 1239 | 5,1069 | 1,9733 | ± 0,2166 |
| Total | 2176 | 5,2494 | 1,9063 | ± 0,0409 |

***Tendencias genéticas***

Las tendencias genéticas de los parámetros *A* y *k* fue estimado regresionando los valores genéticos sobre el año de nacimiento. El modelo de regresión utilizado fue:

$y\_{d}=b\_{0}+b\_{1}X\_{d}$ (Kaps y Lamberson, 2004)

Donde *yd*es el valor genético del *d*-ésimo año de nacimiento; *Xd* es el *d*-ésimo año de nacimiento; *b0* y *b1* son la pendiente y el coeficiente de regresión respectivamente (tendencia genética). Los parámetros *b0* y *b1* se han obtenido mediante el procedimiento REG usando el programa estadístico SAS versión 9.4.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

***Parámetros del modelo y bondad de ajuste***

Los parámetros de la curva de crecimiento de los cuatro modelos y los resultados de los diferentes criterios utilizados para evaluar el mejor ajuste de los modelos se presentan en la Tabla 3. El peso corporal asintótico (*A*) fue mayor en el modelo Brody (26,0980 kg) y menor para el modelo Logístico (24,7717 kg). La estimación del parámetro *B* fue menor para el modelo Von Bertalanffy (0,3643 kg), mientras que el modelo Logístico presentó el mayor valor (1,8415). La tasa de maduración (*k*) tuvo valores que fueron desde 0,00867 hasta 0,0159, mostrando que la tasa de maduración es más precoz en el Modelo Logístico a diferencia de los otros modelos. No hay reportes de modelación de curvas de crecimiento en alpacas en las fuentes bibliográficas, sin embargo Wurzinger *et al*., (2005), aplicando el modelo de crecimiento de Brody para llamas adultas Bolivianas, reportó valores de 74,3 a 101,1, 0,851 a 0,934 y 0,258 a 0,614 para los parámetros *A* , *B* y *k*, respectivamente. Las diferencias entre estas estimaciones y los resultados encontrados en el presente estudio puede atribuirse a varios factores como la edad y raza de los animales, la medida utilizada (peso ajustado o sin ajustar), efectos ambientales, entre otros, que afectan a las estimaciones de la curva de crecimiento. De hecho, en el estudio de Wurzinger *et al*., (2005), las llamas K'ara fueron excluidos del análisis y sólo analizó para llamas adultas de la variedad Th'ampulli. En general, todos los modelos de crecimiento de nuestro estudio se observan en la (Figura 2). Los cuatro modelos subestiman el peso al primer mes y a los 12 meses de edad, y sobrestimaron en etapas medias de 8 a 10 meses de edad. Con respecto a la bondad de ajuste, todos los modelos tenían alto R2 ajustado (71,23 a 71,55%), lo que sugiere en general un buen ajuste a los datos. Como se observa en la Tabla 3 en este estudio, para estimar los pesos vivos desde el nacimiento hasta los 12 meses de edad en alpacas Huacaya jóvenes, el R2 ajustado del modelo Brody fue ligeramente mayor a los modelos de Von Bertalanffy, Gompertz y Logístico. De acuerdo con los valores de CME, el ranking de los modelos da el siguiente orden: Logístico > Gompertz > Von Bertalanffy > Brody, lo que indica que el modelo de Brody tuvo el valor más bajo de CME y por lo tanto el mejor ajuste. En el presente estudio el modelo de Brody mostró el mayor R2 ajustado y las estimaciones más bajas de CME, y parece ser la mejor opción que los otros modelos (Tabla 3) por lo tanto, fue elegido para modelar la curva de crecimiento de alpacas de la raza Huacaya. Muchas funciones no lineales se han utilizado con frecuencia en el modelado del crecimiento de diferentes especies de ganado.

***Tabla 3. Parámetros de la curva de crecimiento (± error estándar), coeficiente de determinación ajustado (***R2aj***) , cuadrado medio del error (CME) de cuatro funciones de crecimiento, para describir la curva de crecimiento en alpacas jóvenes de la raza Huacaya***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Modelo | Parámetros |  | R2aj | CME |
| *A* | *B* | *k* | *m* |
| Brodya | 26,0980 ± 0,0488 | 0,7626 ± 0,00149 | 0,00867 ± 0,000063 | --- | 71,55 | 14,2130 |
| Von Bertalanfly | 25,3327 ± 0,0379 | 0,3643 ± 0,00118 | 0,0117 ± 0,000075 | --- | 71,49 | 14,2441 |
| Logístico | 24,7717 ± 0,0310 | --- | 0,0159 ± 0,000087 | 1,8415 ± 0,00731 | 71,23 | 14,3742 |
| Gompertz | 25,0796 ± 0,0347 | 1,3232 ± 0,00529 | 0,0133 ± 0,000081 | --- | 71,41 | 14,2850 |

*A* = representa al peso corporal asintótico, esto es interpretado como el peso maduro; y *B* = es la constante de integración que relaciona al peso inicial del animal; *k* = es la tasa de maduración, el cual es interpretado como el cambio del peso en relación con el peso maduro; *m* = indica el punto de inflexión de la curva.

***Figura 2. Peso vivo observado y estimado de las funciones Brody, Von Bertalanffy, Logístico y Gompertz en alpacas jóvenes de la raza Huacaya.***

***Efectos ambientales sobre los parámetros de la curva de crecimiento***

Los promedios para los parámetros *A* y *k* se presentan en la Tabla 4. El factor color de vellón de la alpaca tuvo un efecto significativo sobre el peso corporal asintótico (*A*), siendo de mayor valor para las alpacas de tonalidad Gris y Roano y menor para las alpacas de color Blanco (*P* < 0.01). El factor sexo tuvo un efecto significativo sobre la variación de *A*, que se estimó en 0,76 kg más en hembras que en machos (*P* < 0.05). Era de esperarse un mayor valor de este parámetro para las hembras, ya que probablemente es debido a las diferencias hormonales y fisiológicas que estimulan el inicio temprano de la actividad sexual, lo que resulta en el aumento del desarrollo corporal de las hembras que en machos. Efectos significativos del sexo sobre el peso maduro se han reportado en llamas en algunos estudios (Wurzinger *et al*, 2005; Zea 2006; García y Leyva, 2007; Cortez y Copa, 2008). Wurzinger y compañeros de trabajo reportaron pesos adultos altos en llamas bolivianas Th'ampulli siendo para los machos de 101 kg y las hembras 75 kg. No obstante, Riek y Gerken *et al*., (2007), observaron que el sexo no influye significativamente (*P* ≥ 0,05) sobre el peso corporal en las llamas criadas en Alemania. El factor mes de nacimiento tuvo un efecto significativo sobre ambos parámetros (*A* y *k*) (*P* < 0.01). Las alpacas que nacieron durante el mes de diciembre alcanzaron el máximo peso adulto, disminuyendo gradualmente durante los siguientes meses. Este efecto puede ser atribuido por los cambios en el entorno físico en el altiplano Peruano que afectan la disponibilidad de forraje dado que la temporada de lluvias (noviembre a abril) es por lo general un período asociado con el mayor crecimiento de los forrajes; esto podría haber contribuido a la producción de animales más pesados ​​durante esta temporada. De hecho, la mayor frecuencia de nacimientos (93.54%) se observó durante los primeros tres meses del año (Tabla 4). Estos resultados están de acuerdo con lo señalado por Agramonte y Leyva (1991), que también encuentran efectos significativos de la época de nacimiento en el peso adulto en alpacas. El peso adulto también fue influenciado por el efecto del año de nacimiento. En el año 1997 se alcanzó el valor más alto de *A*, y luego hubo una tendencia negativa en los últimos años. Este efecto podría ser atribuido por los cambios en las condiciones de manejo y los factores ambientales definidos como las diferencias en el suministro de alimentación, composición de proteínas, y la calidad nutricional de los forrajes en los últimos años. La tasa de maduración (*k*) indica la velocidad de crecimiento para alcanzar el peso adulto. En este estudio, tanto el mes y año de nacimiento, así como el sexo tuvieron un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento, pero no hubo efecto significativo del color del vellón de la alpaca sobre este parámetro (*P* ≥ 0.05). Estos resultados podrían indicar que los animales nacidos durante el mes de abril serían los más precoces (*k* = 0,01183) que los nacidos durante el mes de diciembre (*k* = 0,0875). Asimismo las alpacas machos muestran mayores valores de *k* que las hembras (*P* < 0.05), por el contrario las alpacas de los diferentes colores mostraron valores similares de *k* (P ≥ 0.05) el factor año de nacimiento también influye de manera significativa sobre el valor de *k* (P < 0.05). Wurzinger *et al*., (2005) también reporta que el sexo tiene un efecto significativo sobre este parámetro.

***Tabla 4. Número de observaciones (N), promedio ± desviación estándar del peso corporal asintótico y razón de maduración del modelo Brody, de acuerdo a los efectos ambientales fijos en alpacas jóvenes.***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Efectos fijos** | **N** | **Peso corporal asintótico** | **Tasa de maduración** |
| **Color** |
| Blanco | 782 | 25,78 ± 5,22b | 0,00992 ± 0,00429ª |
| Color | 2454 | 26,75 ± 5,06ª | 0,01008 ± 0,00382ª |
| Tonalidad | 153 | 26,45 ± 4,90ab | 0,00983 ± 0,00345ª |
| **Sexo** |  |  |  |
| Macho | 1690 | 26,13 ± 4,98b | 0,01026 ± 0,00420ª |
| Hembra | 1699 | 26,89 ± 5,19a | 0,00981 ± 0,00360b |
| **Año de nacimiento** |
| 1997 | 31 | 28,92 ± 6,07ª | 0,00919 ± 0,00263cd |
| 1998 | 287 | 27,85 ± 5,01ª | 0,00966 ± 0,00350bcd |
| 1999 | 303 | 28,81 ± 5,60ª | 0,00834 ± 0,00264d |
| 2000 | 276 | 25,97 ± 4,38b | 0,01100 ± 0,00313b |
| 2002 | 8 | 27,77 ± 4,95ª | 0,01022 ± 0,00357bc |
| 2003 | 341 | 25,65 ± 4,89b | 0,01071 ± 0,00450b |
| 2004 | 300 | 28,08 ± 5,13ª | 0,00923 ± 0,00276cd |
| 2005 | 300 | 28,27 ± 4,68ª | 0,00926 ± 0,00316cd |
| 2006 | 321 | 27,79 ± 4,98ª | 0,00878 ± 0,00362d |
| 2007 | 382 | 22,98 ± 4,34c | 0,01283 ± 0,00509ª |
| 2008 | 305 | 25,26 ± 4,40b | 0,01077 ± 0,00361b |
| 2009 | 385 | 25,75 ± 4,57b | 0,00893 ± 0,00388cd |
| 2011 | 150 | 25,78 ± 4,53b | 0,01104 ± 0,00323b |
| **Mes de nacimiento** |
| Enero | 1116 | 27,47 ± 4,89b | 0,00981 ± 0,00322b |
| Febrero | 1647 | 26,08 ± 4,89c | 0,01020 ± 0,00379b |
| Marzo | 407 | 25,02 ± 4,96d | 0,01017 ± 0,00491b |
| Abril | 65 | 24,02 ± 6,23e | 0,01183 ± 0,00808ª |
| Diciembre | 154 | 29,18 ± 6,26ª | 0,00875 ± 0,00393c |

a,b,c,d,e Letras diferentes en la misma columna dentro de un factor indican diferencia estadística significativa (*P* < 0,01).

***Parámetros genéticos de los parámetros de la curva de crecimiento***

Las estimaciones de los parámetros genéticos y fenotípicos para parámetros de la curva de crecimiento de Brody se muestran en la Tabla 5. Los resultados obtenidos en este estudio muestran estimaciones de heredabilidad media para el parámetro *A* y baja para *k*. La estimación de heredabilidad bajo para *k* indicarían que no hay ninguna o hay muy poca variación genética o que ciertos factores ambientales hacen que la variación fenotípica se incremente. Algunos factores probablemente hayan contribuido a la estimación baja de *k*. Por ejemplo, el conjunto de datos sólo lo constituían alpacas jóvenes (1 año de edad), ya que no había ningún registro de los animales de más edad. Por lo tanto, la variación genética podría haber sido subestimado. Otra causa pudo haber sido la calidad de la estructura de pedigrí de las alpacas Huacaya en la cual solamente el 44,2% de las crías conocen a sus padres y el 77,87% conocen a sus madres lo cual conlleva a subestimar la varianza genética aditiva y así las estimaciones de heredabilidad obtenidos.

No hay estimaciones de heredabilidad de parámetros de la curva de crecimiento de alpacas Huacaya jóvenes disponibles en la literatura y la heredabilidad del peso corporal de esta especie también son escasos y la mayoría fueron estimados con metodología de mínimos cuadrados ordinarios. Sin embargo Wurzinger *et al*., (2005), reporta una heredabilidad de 0,36 para el peso corporal en llamas de Bolivia. Mamani-Cato *et al*., (2013) reporta heredabilidades directas y maternas de 0,086 y 0,019; 0,28 y 0,245 para peso al nacimiento y peso al destete en alpacas Huacaya, asimismo reporta que la heredabilidad para peso al año de edad es baja (0.12) utilizando metodología REML; asimismo Mamani-Cato *et al*., (2012) reporta heredabilidades directas en llamas jóvenes de las variedades Q'ara y Chak'u de 0,33 y 0,394; 0,328 y 0,46; 0,406 y 0,483 para peso al nacimiento, destete y al año de edad utilizando metodología REML. Las diferencias entre nuestros resultados y los de otros autores pueden ser explicado por diferencias en los métodos de estimación, tamaño de la muestra utilizada, condiciones ambientales, diferencias biológicas o genéticas entre llamas.

La correlación genética entre los parámetros *A* y *k* es relativamente alta y negativa (Tabla 5). La correlación negativa entre estos dos parámetros de crecimiento se ha observado con frecuencia a partir del análisis de los datos de otras especies de ganado (por ejemplo, en el pollo: Mignon-Grasteau, 2000; cerdos: Koivula *et al.*, 2008; ovejas: Silva *et al*., 2012; ganado vacuno: Lopes *et al*, 2012). A pesar de las medias y bajas estimaciones de heredabilidad para los parámetros A y k respectivamente reportados en este estudio, alguna ganancia genética a través de la selección se podría lograr para el peso maduro (Tabla 5). Estos parámetros mostraron una alta ganancia genética (0,28 kg / año) que el valor k (0,00026 kg.día-1), lo que sugiere que un programa de selección para cambiar la pendiente de la curva de crecimiento de alpacas sería factible.

***Tabla 5. Parámetros genéticos y fenotípicos estimados y ganancia genética de los parámetros de la curva de crecimiento del modelo Brody en alpacas jóvenes de la raza Huacaya.***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Componentes de varianza | *A* | *K* |
| $$σ\_{P}^{2}$$ | 22,1147 | 0,0000 |
| $$σ\_{a}^{2}$$ | 7,20399 ± 1,031029 | 0,000001 ± 0,000000 |
| $$σ\_{e}^{2}$$ | 15,0943 ± 0,952602 | 0,0000 ± 0,000001 |
| $$h^{2}$$ | 0,31745 ± 0,04412 | 0,05139 ± 0,03353 |
| $$σ\_{P\_{AK}}$$ | -0,0085 |
| $$r\_{g\_{AK}}$$ | -0,37371 ± 0,19855 |
| $$r\_{p\_{AK}}$$ | -0,49114 |
| $$∆g$$ | 0,499 | 0,000000 |

$σ\_{P}^{2}$ = varianza fenotípica, $σ\_{a}^{2}$ = varianza genética aditiva, $σ\_{e}^{2}$ = varianza ambiental, $h^{2}$ = heredabilidad, $σ\_{P\_{AK}}$ = covarianza fenotípica, $r\_{g\_{AK}}$ = correlación genética entre peso asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*), $r\_{p\_{AK}}$ = correlación fenotípica entre peso asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*), $∆g$ = progreso genético calculado asumiendo una intensidad de selección de 1,755.

***Tendencias genéticas de los parámetros de la curva de crecimiento***

Los promedios de los valores genéticos estimados (EBVs) por año de nacimiento para los parámetros *A* y *k* de las alpacas jóvenes de la raza Huacaya se muestran en la Figura 3. Los EBVs para el parámetro *A* han tenido variaciones a lo largo del tiempo, los picos principales se observaron en los años 1998, 2005 y 2009. De igual manera se observó variaciones en el promedio de los EBVs del parámetro k cuyos picos se observaron en los años 1997, 2002, 2007 y 2011. De modo general la tendencia genética fue positiva para el peso asintótico y negativa para la velocidad de crecimiento.

***Figura 3. Valores genéticos estimados (EVBs) del modelo Brody para peso asintótico (A) y tasa de maduración (A) por año de nacimiento en alpacas jóvenes de la raza Huacaya.***

**CONCLUSIONES**

Se concluye que el modelo de crecimiento de Brody es adecuado para describir la curva de crecimiento en alpacas Huacaya jóvenes. El peso asintótico (*A*) fue influenciado por los efectos fijos, pero la tasa de madurez sólo por el mes y año de nacimiento. Las heredabilidades para peso corporal asintótico (*A*) y tasa de maduración (*k*) fueron de mediana y baja magnitud. Sin embargo, a pesar de esto, el peso asintótico mostró una buena ganancia genética lo cual no sucede para la tasa de madurez siendo nula, lo que sugiere que sería factible aplicar un programa de selección para cambiar la pendiente de la curva de crecimiento de alpacas de la raza Huacaya.

**Agradecimientos:** Los autores agradecemos al proyecto 133\_PI del Programa Nacional de Innovación Agraria - Instituto Nacional de Innovación Agraria.

**Conflicto de intereses.**

Ninguno.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Efe, E. 1990. Büyüme Egrileri. Cukuroya University Natural Science Institute. Animal Science Department. PhD. Thesis, Adana-Turkey.
2. Falconer D.S. y T.F.C. Mackay. 1996. Introducción a la genética cuantitativa. Cuarta edición. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España.
3. Gutiérrez, J.P. y F. Goyache. 2005. A note on ENDOG: a Computer program for analysing pedigree information. Journal of Animal Breeding and Genetics, 122: 172-176.
4. Gutiérrez, J.P. 2010. Iniciación a la valoración genética animal. Metodología adaptada al EEES. Editorial Complutense S.A., Madrid, España.
5. Huanca, T., Mamani, R.H., Gonzáles, M., Cárdenas, O., Naveros, M.L. 2013. Situación actual de la crianza de camélidos en el Perú. Journal of Basic and Applied Genetics. 2013: Volumen 24 Issue 1Supp. Pág. 56.
6. INEI, 2012. Resultados definitivos del IV Censo Nacional Agropecuario 2012, Perú.
7. Kaps, M. and Lamberson, W.R. 2004. Biostatistics for animal science. CABI Publishing UK.
8. Neumaier, A. y E. Groeneveld. Restricted Maximum Likelihood Estimation of Covariances in Sparce Linear Models. Genet. Sel. Evol., 1(30): 3-26, 1998.
9. Quispe E.C. 2013. Mejoramiento genético en alpacas: Caso de pequeños rebaños de Huancavelica, Perú. Journal of Basic & Applied Genetics. 2013: Volumen 24 Issue 1Supp. Pág. 58.
10. SAS Institute Inc. 2012. SAS version 9.4. Cary, NC: SAS Institute Inc.
11. Thornley, J.H.M. and I.R. Johnson. 1990. Plant and Crop Modelling. A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology. Clarenrand Press. Oxford. U.S.A.