SSN: 2707-692X (Impresa)
ISSN: 2707-6938 (En línea)
Vol. 7, No. 2, enero/junio 2026

Modelo matemático empírico para el control poblacional de *Cavia porcellus*

Empirical mathematical model for population control of Cavia porcellus

ALEJANDRO EDBEL VILCA CABRERA[1]
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Correo: alejandroedelvilcacabrera@gmail.com
ORCID: 0009-0003-0815-7061

Recibido: 10/04/2026
Publicado: 30/06/2026

DOI: https://10.56736/2026/174

RESUMEN

El objetivo de la investigación es desarrollar un modelo matemático empírico de optimización que permita determinar el nivel de extracción óptimo de cuyes en cada temporada, garantizando la estabilidad poblacional y la sostenibilidad del sistema productivo a lo largo del tiempo. El modelo se construye a partir de la identificación de variables biológicas, parámetros de supervivencia y población y la determinación de un factor de control que mantiene el equilibrio poblacional. Se formula una expresión matemática general para calcular la evolución de la población total en función de las tasas de supervivencia de crías y adultos y del promedio de crías por camada, y se establece la cantidad de recrías que deben sacrificarse por ciclo para evitar la sobrepoblación. Los principales hallazgos muestran que existe un factor matemático de equilibrio que garantiza la reposición del plantel reproductor y que es posible predecir el número mínimo de crías necesario para sostener una demanda periódica sin comprometer la estabilidad del sistema productivo.

PALABRAS CLAVE: modelo matemático empírico, Cavia porcellus, control poblacional, optimización productiva.

ABSTRACT

The objective of this research is to develop an empirical mathematical optimization model to determine the optimal offtake level of guinea pigs (Cavia porcellus) for each season, ensuring population stability and the long-term sustainability of the production system. The model is constructed by identifying biological variables, survival and population parameters, and determining a control factor that maintains population equilibrium. A general mathematical expression is formulated to calculate the evolution of the total population based on the survival

[1] Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.

rates of offspring and adults, as well as the average litter size. Furthermore, the number of growers to be culled per cycle to prevent overpopulation is established. The main findings show the existence of a mathematical equilibrium factor that guarantees the replacement of the breeding stock and demonstrate that it is possible to predict the minimum number of offspring required to sustain periodic demand without compromising the stability of the production system.

KEYWORDS: empirical mathematical model, Cavia porcellus, population control, production optimization.

INTRODUCCIÓN

La cría de cuyes representa una actividad pecuaria de notable relevancia económica y alimentaria en los contextos rurales andinos, donde cumple un papel estratégico tanto en la seguridad alimentaria de las familias como en la generación de ingresos complementarios (Martínez-Polanco, 2016). No obstante, el manejo poblacional de estos animales suele basarse más en la experiencia empírica de los criadores que en herramientas técnicas de planificación, lo que limita la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas productivos (Croft et al., 2021).

En ausencia de un control técnico de la extracción estacional, las decisiones sobre cuántos animales sacrificar y en qué momento hacerlo se adoptan de forma intuitiva, sin apoyo en proyecciones poblacionales ni en un análisis del impacto sobre la estructura reproductiva del galpón. Esta situación puede derivar en desbalances significativos (Gallo Gallo et al., 2021) que van desde episodios de sobrepoblación hasta déficits de reproductores que comprometen la continuidad del ciclo y reducen la rentabilidad del sistema (Burgos-Paz et al., 2011).

Más allá de sus implicaciones productivas, la problemática también es metodológica. Actualmente no existen modelos matemáticos aplicados de manera específica a la dinámica poblacional de cuyes en sistemas locales, capaces de orientar decisiones óptimas de manejo (Momo, 2023). Los métodos tradicionales presentan limitaciones notorias: baja capacidad predictiva, uso ineficiente de recursos y dificultades para planificar el número adecuado de crías a extraer por temporada (Johnson et al., 2025). En este escenario, la variabilidad de los parámetros de supervivencia (α, β) y reproducción (C) cobra especial importancia, al incidir directamente en el equilibrio poblacional. Comprender y modelar estos parámetros resulta, por tanto, esencial para prevenir tanto el crecimiento descontrolado como la disminución crítica del plantel reproductor (Croft et al., 2021).

Desde esta perspectiva, se plantea la necesidad de formular un modelo determinístico que describa la evolución poblacional por temporadas e incorpore un factor de control óptimo (ω)capaz de mantener la estabilidad del sistema. El equilibrio poblacional se alcanza cuando el número de recrías sobrevivientes que pasan al siguiente ciclo compensa la mortalidad natural y reproduce la estructura inicial requerida para reiniciar el proceso. En consecuencia, el nivel sostenible de extracción será aquel que preserve el número mínimo de hembras y machos necesarios para mantener constante la capacidad reproductiva del plantel (Hauser et al., 2007).

De esta manera, el problema central que orienta este trabajo puede resumirse en la siguiente pregunta: ¿Cómo determinar, ante condiciones variables de supervivencia y reproducción, el nivel de extracción estacional que mantenga el equilibrio poblacional y asegure la sostenibilidad del sistema productivo de cuyes? A partir de este interrogante, se propone desarrollar y validar un modelo matemático que permita optimizar la extracción, evitar la sobrepoblación y garantizar la estabilidad productiva a lo largo de múltiples temporadas.

METODOLOGÍA

El desarrollo del modelo matemático de control poblacional de Cavia porcellus del presente artículo se fundamenta en la identificación y análisis de variables biológicas y un tratamiento empírico clave. Estas variables permiten simular la dinámica poblacional de los cuyes, con el objetivo de proponer un esquema sostenible de manejo basado en principios de optimización (Gómez, 2006). La construcción del presente modelo se simplifica ya que la hembra entra en celo pocas horas después del parto (Chauca, 2020), lo cual no deja margen de una variable extra de tiempo en las ecuaciones de modelo que se presenta.

Variables consideradas

Para la construcción del modelo, se seleccionaron las siguientes variables esenciales:

- **Promedio de crías por camada (C):** Número promedio de descendientes por cada ciclo reproductivo de cada Hembra (Chauca, 2020).
- **Hembras iniciales (H) y machos iniciales (M):** Cantidad de individuos en la población inicial de reproductores de primer empadre, diferenciados por sexo (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2019; Cruz et al., 2022).
- **Número de hembras por macho (k):** Proporción establecida entre hembras y machos en la población reproductora (Chauca, 2020).
- **Tasa de supervivencia de crías (α) y tasa de supervivencia de adultos (β):** Probabilidades asociadas a la supervivencia durante las etapas de crecimiento y adultez, respectivamente (Gómez, 2006).
- **Periodo de Gestación (PG):** Intervalo temporal comprendido entre la fecundación y el nacimiento de las crías (Chauca, 2020).
- **Tiempo en llegar a la Etapa Reproductiva (ER):** Tiempo necesario para que el cuy alcance la madurez sexual y esté fisiológicamente apto para reproducirse (Martínez-Polanco, 2016).

- **Tiempo de Vida Reproductiva (VR):** Duración de la fase en la que el cuy es permanece activo reproductivamente antes de ser sacrificado, puede variar según los objetivos del criador (Chauca, 2020).
- **Tiempo de Vida Total (VT):** Lapso total de la vida de cuy, representa la suma de ER + VR.

Escala temporal y definiciones

El periodo de gestación (PG) de los cuyes, establecido en 67 días según Chauca (2020), se utilizó como unidad base para definir los intervalos temporales del modelo. Las variables relacionadas con la madurez y la vida reproductiva (ER y VR) se expresaron en función de esta escala, asignando:

Tiempo para alcanzar la etapa reproductiva (ER): $1PG$.

Tiempo de vida reproductiva (VR): $3.5PG$.

Tiempo de Vida Total (VT): $4.5PG$

La vida reproductiva de los cuyes puede ser mayor, sin embargo, por motivos prácticos de la elaboración del modelo solo se presentará una cantidad de VR que permita a las hembras engendrar tres camadas. Al final de la metodología se presentará un modelo generalizado donde se pueda representar una VR más amplia.

Modelo inicial

Consideramos una población inicial X_0 en donde se tienen solo machos reproductores de primer empadre y hembras nulíparas de *Cavia porcellus* que han culminado la etapa de recría

$$X_0 = M + H \tag{1}$$

Para simplificar algunos cálculos, asignamos $H = kM$. Entonces, tenemos

$$X_0 = H + \frac{H}{k}$$

$$X_0 = rH \tag{2}$$

Donde es $r = \frac{k+1}{k}$

Al calcular la población que se tendrá en la siguiente temporada (X_1), obtenemos

$$X_1 = rH\beta \tag{3}$$

Observamos que X_0 fue afectado por una tasa de mortalidad β. Siguiendo el mismo proceso, para la segunda temporada, se tiene

$$X_2 = rH\beta^2 \tag{4}$$

De esta manera, podemos continuar calculando la cantidad de cuyes que se tendrán en las próximas temporadas. Cabe aclarar que, por el momento, el cálculo de estas poblaciones adultas se realiza sin considerar las crías que estas puedan tener.

En una población real de cuyes adulta, se tendrán subpoblaciones de diferentes edades. En la tabla, la columna verde representa a los cuyes recrías que entran en un primer empadre, las columnas azules a los cuyes adultos, y la columna gris a aquellos que ya han sido sacrificados. Cada subpoblación tiene la duración de la mitad de una temporada. Se utilizará esta tabla con fines metodológicos, pero el modelo puede ser ampliado para que las hembras tengan más periodos de gestación

s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
rH	$rH\beta^{\frac{1}{2}}$	$rH\beta$	$rH\beta^{\frac{3}{2}}$	$rH\beta^2$	$rH\beta^{\frac{5}{2}}$	$rH\beta^3$	$rH\beta^{\frac{7}{2}}$

Tabla 1. Subpoblación de cuyes en función de la tasa de supervivencia

Para que el modelo funcione, cada subpoblación se tendrá que derivar de dos subpoblaciones anteriores a ella, es decir s_7 fue la subpoblación s_5 en la temporada anterior. Es importante aclarar que un criador nunca sacrificara crías, por lo tanto, el sacrificio se enfoca en la subpoblación s_3 (reproductores de primer empadre). En este modelo, las crías nacidas siempre serán de las subpoblaciones s_5, s_7 y s_9, esto quiere decir que cada camada de cuyes cambiará de subpoblación en la tabla a medida que van creciendo, esto se debe de repetir permanentemente.

Para ahora analizar las crías nacidas durante el periodo de media temporada (33 días) según la tabla, consideramos qué $H_1 = H\beta$, tenemos entonces

- Crías nacidas de $s_5 = CH_1$
- Crías nacidas de $s_7 = CH_1\beta$
- Crías nacidas de $s_9 = CH_1\beta^2$

Sumando estos tres valores obtendremos la cantidad total de cuyes de $CH_1(1+\beta+\beta^2)$, ahora calculando su tasa de supervivencia de cría dentro de una temporada, obtendremos $CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha$, esta es la cantidad total de recrías que se tendrán, para que el ciclo no se altere, es crucial que la cantidad de recrías calculadas sean iguales a la cantidad de reproductores de primer empadre iniciales rH.

La expresión $CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha$, ciertamente contiene tanto machos como hembras, sabemos que proporción de sexos en cuyes nacidos típicamente tiende hacia un equilibrio cercano a 50:50 (Chauca de Zaldívar, 1997), por ello, se dividirá a la mitad la expresión anterior.

$$H_{recría} = \left(\frac{1}{2}\right) CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha \tag{5}$$

$$M_{recría} = \left(\frac{1}{2}\right) CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha \tag{6}$$

El objetivo es entonces calcular ω_H y ω_M, que serán el factor a multiplicar para que la expresión de la izquierda sea nuevamente igual a la cantidad de cuyes iniciales.

$$H_{recría} = \left(\frac{1}{2}\right) \omega_H CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha = H \tag{7}$$

$$M_{recría} = \left(\frac{1}{2}\right) \omega_M CH_1(1+\beta+\beta^2)\alpha = M \tag{8}$$

De las ecuaciones anteriores, se percibe que la cantidad de machos recrías serán sacrificados k veces mas que la cantidad de hembras recrías.

Con esta información, podemos reconstruir la totalidad del ciclo, con $N = CH_1\,(1+\beta+\beta^2)$, las columnas amarillas representan a las crías y la columna gris la Periodo terminal de vida productiva de dicho grupo

s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
N	$N\alpha^{\frac{1}{2}}$	rH	$rH\beta^{\frac{1}{2}}$	$rH\beta$	$rH\beta^{\frac{3}{2}}$	$rH\beta^2$	$rH\beta^{\frac{5}{2}}$	$rH\beta^3$	$rH\beta^{\frac{7}{2}}$

Tabla 1. Ciclo total de las subpoblaciones de cuyes

En este caso ideal, la suma de todas estas subpoblaciones da como resultado la población total

$$X_{total} = \sum_{i=1}^{10} s_i \tag{9}$$

Que se representa de igual forma como

$$X_{total} = rH\left(1 + \beta^{\frac{1}{2}} + \beta + \beta^{\frac{3}{2}} + \beta^2 + \beta^{\frac{5}{2}} + \beta^3\right) + N(1 + \alpha^{\frac{1}{2}})$$

$$X_{total} = rH\sum_{j=0}^{6}\beta^{\frac{j}{2}} + N(1 + \alpha^{\frac{1}{2}}) \tag{10}$$

Generalizando la ecuación para poblaciones de cuyes con vidas reproductivas mayores, se tiene

$$X_{total} = rH\left(\sum_{j=0}^{m}\beta^{\frac{j}{2}}\right) + CH\beta\left(\sum_{j=0}^{\frac{m}{2}}\beta^{j}\right)(1 + \alpha^{\frac{1}{2}}) \tag{11}$$

Donde $2m$ representa la cantidad de temporadas de vida reproductiva que se le dará a la población de cuyes a estudiar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo del Factor de Ajuste $\boldsymbol{\omega_H}$

Para alcanzar este balance, se introdujo el factor ω como un regulador de la expresión de natalidad. Considerando que la proporción de sexos al nacimiento es de 50:50 (Chauca de Zaldívar, 1997), la cantidad de hembras de reemplazo ($H_{recría}$) generadas por el sistema debe satisfacer la igualdad $H_{recría} = H$.

Utilizando la ecuación (7) del modelo, al despejar ω_H, obtenemos la constante de equilibrio que determinará si el sistema es autosustentable:

$$\omega_H = \frac{2}{C\beta(1 + \beta + \beta^2)\alpha} \tag{12}$$

Interpretación del Punto de Equilibrio

El valor de ω actúa como un indicador de eficiencia biológica:

- Si $\omega_H = 1$: El sistema está en equilibrio perfecto; la mortalidad y el descarte son compensados exactamente por los nuevos nacimientos.
- Si $\omega_H < 1$: Existe un excedente de recrías, lo que permite el crecimiento de la granja o caso contrario, permite el sacrificio para obtener un control poblacional optimo.
- Si $\omega_H > 1$: La tasa de supervivencia (α, β) o de natalidad (C) es insuficiente para mantener la población constante, indicando un riesgo de colapso poblacional.

Este mismo análisis puede realizarse al calcular ω_M, aunque terminará representando una trivialidad mas obvia.

Aplicación en Machos Recría

Debido a que la población se maneja en una proporción de k hembras por cada macho, el modelo arroja que la cantidad de machos nacidos excederá sistemáticamente la necesidad de reemplazo en la misma proporción k. Esto confirma que el excedente de machos $(M_{recría})$ es el principal componente destinado al sacrificio o comercialización dentro del ciclo total.

Aplicaciones Estratégicas del Modelo en la Gestión Productiva

La implementación de este modelo matemático trasciende el cálculo teórico, ofreciendo al productor dos rutas críticas para la toma de decisiones estratégicas basadas en la disponibilidad de recursos y los objetivos comerciales.

Escenario I: Optimización bajo Restricciones de Capacidad (Población Invariante)

En contextos donde el espacio físico o los recursos alimenticios son limitados, la prioridad es mantener una población estable que no exceda la capacidad de carga del sistema. El modelo permite identificar con precisión el sacrificio necesario para que la población total (X_{total}) permanezca constante a lo largo del tiempo.

Bajo este enfoque, el productor utiliza el modelo para calcular el excedente exacto de la subpoblación de machos y hembras que no se requieren para el reemplazo de los reproductores iniciales (rH). Al estabilizar la población, se logra una eficiencia máxima de recursos, evitando el hacinamiento y garantizando que cada gramo de alimento se convierta en biomasa aprovechable, manteniendo la salud del plantel y la rentabilidad por metro cuadrado.

Escenario II: Planificación Basada en la Demanda (Producción por Objetivos)

La segunda aplicación invierte la lógica del modelo: parte de una meta de mercado para determinar la infraestructura necesaria. Si un productor identifica una demanda específica de N unidades de sacrificio por periodo, el modelo permite calcular de forma inversa la cantidad de hembras nulíparas H y machos reproductores M que deben conformar la población inicial X_0.

Este uso es vital para la escalabilidad del negocio. Al ajustar variables como el promedio de crías por camada C y las tasas de supervivencia (α, β), el modelo proyecta cuántas unidades de cría deben mantenerse en la subpoblación s_3 para asegurar una cantidad constante hacia la etapa de recría y etapa terminal de vida productiva. Así, la producción deja de ser azarosa y se convierte en un proceso optimizado diseñado para satisfacer compromisos comerciales con precisión matemática.

CONCLUSIONES

El modelo matemático desarrollado permite describir con precisión la dinámica poblacional de *Cavia porcellus* a partir de variables biológicas clave como la tasa de natalidad, supervivencia y estructura sexual. El factor de ajuste (ω) se consolida como un indicador fundamental del equilibrio poblacional al ser aplicado como supresor de la población (Croft et al., 2021), posibilitando estimar condiciones de sostenibilidad o riesgo de colapso según la relación entre nacimientos y mortalidad (Hauser et al., 2007).

A partir de la estabilidad de la proporción sexual 1:1 observada en esta especie, el modelo demuestra que el excedente reproductivo de machos constituye el principal componente para la comercialización. Asimismo, su aplicación en escenarios de "población invariante" o "producción por objetivos" ofrece al productor una herramienta cuantitativa para planificar y optimizar los recursos del sistema (Burgos-Paz et al., 2011).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gallo Gallo, B. M., Gallo Gallo, M. del S., Salinas Vásquez, N. R., & Gallo Gallo, T. M. (2021). Impacto ambiental y su vinculación a factores sociales, biológicos y físicos en Perú. *Revista de Ciencias Sociales* (Ve), 27(Núm. Esp. 3). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28068276023

Burgos-Paz, W., Cerón-Muñoz, M., & Solarte-Portilla, C. (2011). Genetic diversity and population structure of the guinea pig (Cavia porcellus, Rodentia, Caviidae) in Colombia. *Genetics and Molecular Biology*, 34(4), 711–718. https://doi.org/10.1590/S1415-47572011005000062

María Fernanda Martínez-Polanco. (2016). El cuy (Cavia sp.), un recurso alimenticio clave en Aguazuque, un sitio arqueológico de la Sabana de Bogotá, Colombia. *Latin American Antiquity*, 27(4), 512–526. https://doi.org/10.7183/1045-6635.27.4.512

Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2020). *Manual de crianza de cuyes*. Ministerio de Agricultura y Riego. https://www.inia.gob.pe

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture* (J. Bélanger & D. Pilling, Eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. https://www.fao.org/3/CA3129EN/ca3129en.pdf

Croft, S., Aegerter, J. N., Beatham, S., Coats, J., & Massei, G. (2021). *A spatially explicit population model to compare management using culling and fertility control to reduce numbers of grey squirrels. Ecological Modelling*, 440, Article 109386. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109386

Johnson, B. J., Gomez, M. M., y Munch, S. B. (2025). Empirical dynamic modeling for prediction and control of pest populations. *Ecological Modelling*, 504, Artículo 111081 . https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111081

Hauser, C. E., Runge, M. C., Cooch, E. G., Johnson, F. A., & Harvey IV, W. F. (2007). *Optimal control of Atlantic population Canada geese*. Ecological Modelling, 201(1), 27–36. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.07.019

Gómez, E. (2006). Producción industrial de gazapos: Algunos puntos críticos. *XXXI Symposium de Cunicultura de ASESCU*, Lorca, España, 25-26 de mayo de 2006. Cunicultura, (145), 12-23.

Cruz, D. J., Passuni Huayta, J., Corredor, F.-A., & Pascual, M. (2022). Parámetros genéticos de rasgos productivos de cuyes (Cavia porcellus) de las líneas Saños y Mantaro. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 33(3), e22902. https://doi.org/10.15381/rivep.v33i3.22902

Chauca de Zaldívar, L. (1997). Producción de cuyes (Cavia porcellus). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). https://www.fao.org/4/W6562S/W6562S00.htm

Momo, F. (2023). ¿Modelos matemáticos?, ¿para qué? Revista de Modelamiento Matemático de Sistemas Biológicos, 3(2), 1–19. https://doi.org/10.58560/rmmsb.v03.n02.023.08