

Modelo poblacional del ácaro *Varroa destructor* en colonias de *Apis mellifera*

Population model of the mite *Varroa destructor* in *Apis mellifera* colonies

Miguel Benavente^{1*}, Judith Principal², Carlos Barrios², Brigitte Bianchi² y Martín Eguaras³

¹Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN) Departamento de Matemática. *Correo electrónico: benavent@mdp.edu.ar ²Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" (UCLA). Decanato de Ciencias Veterinarias. Estación de Apicultura. Lara, Venezuela. ³UNMdP- FCEyN, Laboratorio de Artrópodos. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

Varroa destructor es un ectoparásito que ataca a su huésped alternativo *Apis mellifera*, tanto en la fase adulta como en los estados inmaduros. Este ácaro se alimenta de la hemolinfa de la abeja adulta, se reproduce en las celdas de cría y es considerado un serio problema a nivel económico para la industria apícola a escala mundial. En esta investigación se propone un modelo basado en un sistema de ecuaciones diferenciales con retardos (DDE) para predecir la dinámica de crecimiento poblacional del ácaro. Este modelo es resuelto con la función interna de Matlab dde23 para describir la evolución del parásito tanto en su fase forética, donde se comporta como parásito de la abeja adulta, como en la fase reproductiva que ocurre en las celdas de cría, donde se reproduce. Algunas estrategias de control biotécnicas tales como controles químicos y cuadros trampa también son simuladas para determinar un uso óptimo de estos métodos en el modelo. Se concluye que esta nueva herramienta matemática puede contribuir con las investigaciones de la dinámica poblacional del ácaro dirigidas al diseño, implementación y obtención de diferentes estrategias de control, ya sea con procedimientos biotécnicos o químicos mediante ácidos orgánicos o acaricidas sintéticos.

Palabras claves: *Varroa*, modelos de simulación, dinámica poblacional, *Apis mellifera*.

ABSTRACT

Varroa destructor is an ectoparasite that attacks its alternative host *Apis mellifera* both in its adult bee stage and in its immature stage. This mite feeds on the haemolymph of adult bees, reproduces in brood cells and is considered a serious economical problem to the Beekeeping Industry worldwide. This research proposes a model based on a system of differential equations with delays (DDE) in order to predict the dynamics of the population growth of the mite. This model is resolved with the internal function of Matlab dde23 to describe the evolution of the parasite both in its phoretic phase, which behaves as a parasite of the adult bee, as in the brood cells where it reproduces. Some biotechnical strategies of control such as frame traps or chemical controls are also simulated to determine an optimal use of these methods in this model. We concluded that this new mathematical tool can contribute in researching about mite population dynamics, directed to design and implement different control strategies, either with biotechnical or chemical procedures through organic acids or synthetic acaricides.

Key words: *Varroa*, simulation models, population dynamics, *Apis mellifera*.

INTRODUCCIÓN

El ácaro *Varroa destructor* es considerado uno de los ectoparásitos más dañinos de las colonias de *Apis mellifera*, debido a su capacidad para incrementar rápidamente su nivel poblacional (Eguaras *et al.*, 1994a). Su ciclo de vida está dividido en dos estadios bien diferenciados, una fase forética como parásito de la abeja adulta y una fase reproductiva que ocurre dentro de las celdas de cría operculadas de las abejas. El éxito de la fase reproductiva del ácaro dentro de las celdas de cría depende de diversos factores, investigadores como Camazine, 1988; Fries *et al.*, 1994; Eguaras *et al.*, 1994a; Kraus and Page, 1995, han contribuido a explicar la dinámica poblacional del parásito. Algunos modelos matemáticos han sido reportado con ecuaciones que presentan diversas estrategias de control para tratar de reproducir la dinámica poblacional del ácaro *Varroa*, como los citados por Martin (1998) y Wilkinson and Smith (2002).

En este mismo contexto, Maidana *et al.* (1995) y Benavente *et al.* (2006) presentaron un modelo con un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que reproduce aceptablemente la dinámica poblacional de *V. destructor*, sin embargo, la naturaleza de los ciclos de vida y periodos reproductivos del mismo, se adecua más a un sistema del tipo DDE. En esta línea, Fries *et al.* (1994), reportaron un modelo matemático que utiliza una DDE simple, donde solo se considera de manera directa la población forética, y que por lo tanto no permite seguir simultáneamente la evolución de la población de ácaros en las celdas de cría, y por otra parte requiere de la estimación de parámetros biológicos muy complejos. En el presente trabajo se propone un Sistema de DDE para modelar asertivamente la dinámica poblacional del ácaro *V. destructor* en colonias de *Apis mellifera*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo consiste en un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales con dos retardos, cuya representación en forma compacta responde a la siguiente fórmula:

$$\frac{dY}{dt} = -\mu(t)Y(t) + (\rho + f_d)\Phi_d[y_1(t - \tau_d)] + (\rho + f_w)\Phi_w[y_1(t - \tau_w)] - \Phi_d[y_1(t)]$$

El tiempo está dado en días, el subíndice *d* representa a la población de los zánganos y el subíndice *w* a la población de las obreras. Los parámetros τ_d y τ_w representan los retardos, y Φ_d y Φ_w son las funciones de preferencia. Para mayores detalles de estos últimos ver el acápite de resultados y discusión. El parámetro μ representa la mortalidad en la fase forética, es una función estacional y varía entre 0,005 en los meses fríos y 0,007 en los más cálidos cuando se produce el pecoreo de las obreras. El parámetro ρ modela indirectamente la cantidad de ciclos reproductivos.

En este trabajo se tomó como referencia el criterio reportado en Fries *et al.* (1994), un promedio de 1,4 ciclos reproductivos por individuo. Por último $f_d = 1,9$ y $f_w = 0,9$ representan las tasas de fertilidad, un promedio de las reportadas en Eguaras *et al.* (1994b), para la región en consideración. Un mayor detalle del tratamiento de todos los parámetros puede verse en Benavente *et al.* (2006).

Ecuaciones del modelo

$$dy(1) = -\mu y(1) + (\rho + f_d)lag1(3) + (\rho + f_w)lag2(4) - I_T[y(1), t]$$

$$dy(2) = -\mu y(2) + \rho^e lag1(3) + \rho^e lag2(4)$$

$$dy(3) = I_d[y(1), t] - y(3)$$

$$dy(4) = I_w[y(1), t] - y(4)$$

Donde, *lag1* (i) es la τ_d -historia de *y*(i), *lag2*(i) es la τ_w -historia de *y*(i) y además:

$$I_d(y, t) = \min[0.33Iy, K_d(t)]$$

$$I_w(y, t) = \min[Iy - I_d(y, t), K_w(t)]$$

$$I_T(y, t) = I_d(y, t) + I_w(y, t)$$

La población forética total está compuesta por la suma de *y*(1) e *y*(2) que constituyen las madres reproductivas y las no reproductivas respectivamente. Las funciones *y*(3) e *y*(4) modelan la invasión diaria de las madres reproductivas en las celdas de zánganos y obreras respectivamente. El sistema fue resuelto con la función *dde23* en el entorno del código Matlab 7.3 que integra las ecuaciones con el método explícito Runge-Kutta de segundo y tercer orden.

El modelo es utilizado para implementar métodos de control, ya sea con cuadros trampa o químicos usando acaricidas sintéticos. El

primero, descrito por Fries *et al.* (1994), consistió en introducir cuadros zanganeros en el nido de cría en plena estación reproductiva durante el período de post-operculación (14 días) y luego removerlos cuando la mayoría de sus celdas ya habían sido selladas. Para simular esta situación en el modelo, se incrementó en las celdas respectivas la capacidad de carga en un 50%, la mortalidad emergente en más de un 60% y el coeficiente de invasión máxima, el cual fue llevado de un 33% a un 50%. Asimismo, se incrementó el coeficiente de mortalidad forética de 0,007 a 0,02. Esta simulación se realizó anualmente durante tres períodos consecutivos.

En cuanto al control químico, este método consistió en analizar el efecto de un acaricida aplicado con una eficacia del 95%, durante dos períodos de 20 días, en los cuales la mortalidad forética fue llevada a $\mu = 0,1498$. Este análisis fue llevado a cabo durante un lapso de cinco años. Las aplicaciones del acaricida se realizaron a partir del segundo año, para permitir un incremento considerable de la población.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación la cantidad de celdas disponibles está dada por una función

estacional describiendo la tasa de ovoposición de la abeja reina expresada en proporción a una tasa máxima a través de un polinomio de exponenciales (Figura 1), dominado por una gaussiana (Benavente *et al.*, 2006); esta es la función regulatoria de las capacidades de carga K_d y K_w . Durante la fase reproductiva del parásito, las madres prefieren invadir las celdas de zánganos en una relación de 12 a 1 con respecto a las celdas de las obreras, Fries *et al.* (1994), pero las celdas de zánganos representan, usualmente, sólo alrededor de un 5% del total de celdas que constituyen un panal. Por la incidencia de estos dos factores se ha calculado que aproximadamente un 33% de la invasión procura ocupar las celdas de zánganos (Wilkinson y Smith, 2002), capacidad de carga mediante, y el sobrante, si lo hay, junto con el 67% restante, trata de ocupar la disponibilidad de las celdas de obreras. Un posible excedente de esta última etapa regresaría al estadio forético hasta el día siguiente, para comenzar un nuevo ciclo. Las hembras que están próximas a desovar invaden las celdas de cría de las abejas horas antes de que estas sean selladas y emergen de las mismas junto con su progenie adheridas a la abeja nodriza luego de los períodos post-operculación τ_d (14 días) y τ_w (12 días) que simbolizan justamente los retardos,

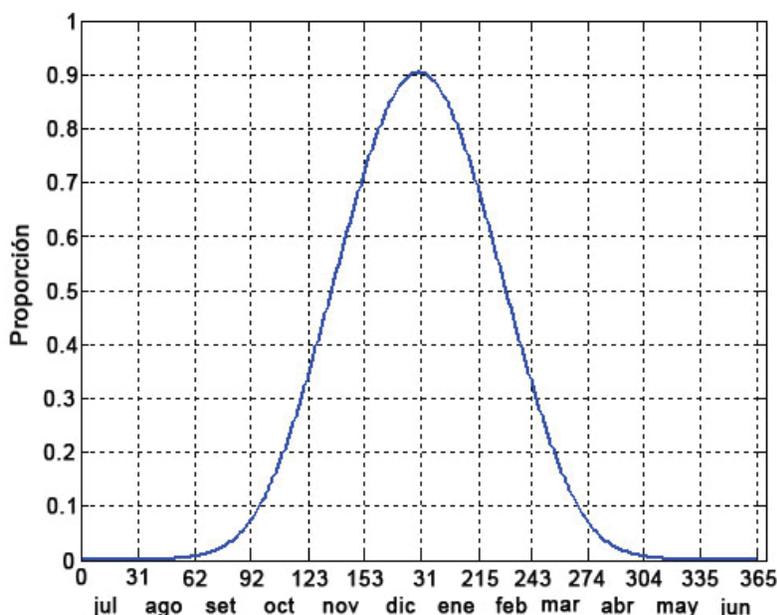


Figura 1. Ovoposición

de manera que el modelo representa bien el comportamiento biológico de la especie en estudio. Las funciones Φ_d y Φ_w dependen además de la tasa de invasión ($I=0,13$), que corresponde a un período forético de entre 7 y 8 días y expresan cuantitativamente la función de preferencia por un mecanismo estilizado (Figura 2).

En este estudio los resultados corresponderían a una zona del tipo frío-templada como el sudeste de la provincia de Buenos Aires, similar a la estudiada por Martín (1998) la cual se ha tomado como referencia para monitorear algunos resultados.

En la Figura 3, se representan las curvas solución para distintas condiciones iniciales y muestran el crecimiento global exponencial de la población si no se aplica ninguna intervención. Las restantes corridas se realizaron con una población inicial de 50 individuos.

En este mismo contexto, en la Figura 4 se ilustra la evolución diaria acumulativa de la población de madres reproductivas en las celdas de cría, esto es la explicación completa de los retardos. Este parámetro es más útil que la invasión diaria específica. Para relevar estas curvas hay que implementar una ligera modificación de las ecuaciones para $y(3)$ e $y(4)$. Al comienzo de cada período la incidencia de las celdas de zánganos es alta, pero éstas, constituyendo sólo un 5% del total, rápidamente se saturan y pasan a prevalecer las celdas de obreras. Este es el motivo del quiebre que se produce en las curvas mostrando una discontinuidad en la derivada de las funciones de preferencia, que globalmente no producen un efecto considerable, siendo

los resultados similares a los reportados por Maidana *et al.* (2005) y Benavente *et al.* (2006) en los cuales estas mismas funciones fueron menos pronunciadas.

Cuadros trampa

La alta preferencia de las hembras reproductivas por las celdas zanganeras provocó que una gran cantidad de ellas sean capturadas junto a su descendencia. Los resultados para dos y tres cuadros trampas se muestran abajo y son consistentes con los reportados en trabajos anteriores (Figura 5).

Acaricidas sintéticos

El tratamiento general de los parámetros también fueron reportadas por Benavente *et al.* (2006), quienes presentaron un modelo basado en un sistema de ecuaciones diferenciales pero sin retardos. Asimismo, con la adaptación de los parámetros y en especial de la función de ovoposición, el modelo es aplicable a las diferentes regiones. De igual manera, los parámetros empleados en los métodos de control, en especial en la técnica de los cuadros trampa, deben ser discutidos y sólo en forma tentativa fueron presentados en el presente manuscrito.

A diferencia del modelo de Fries *et al.* (1994) donde una sola DDE modela la población forética, los hallazgos encontrados en esta investigación muestran que las tres subpoblaciones están bien diferenciadas, y esto permite simular distintas estrategias de control, ya sea considerando la fase forética o la fase reproductiva en las celdas de cría, tanto de zánganos como de obreras.

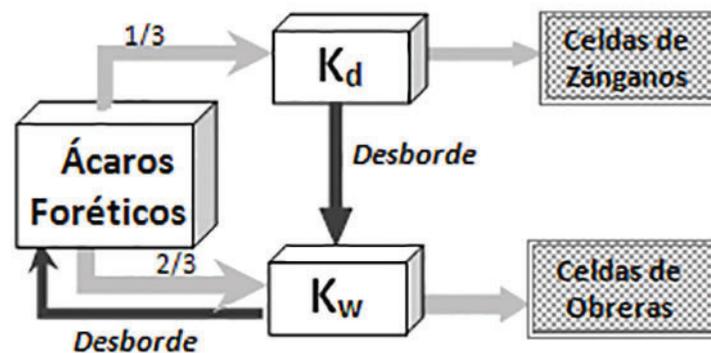


Figura 2. Esquema de la invasión.

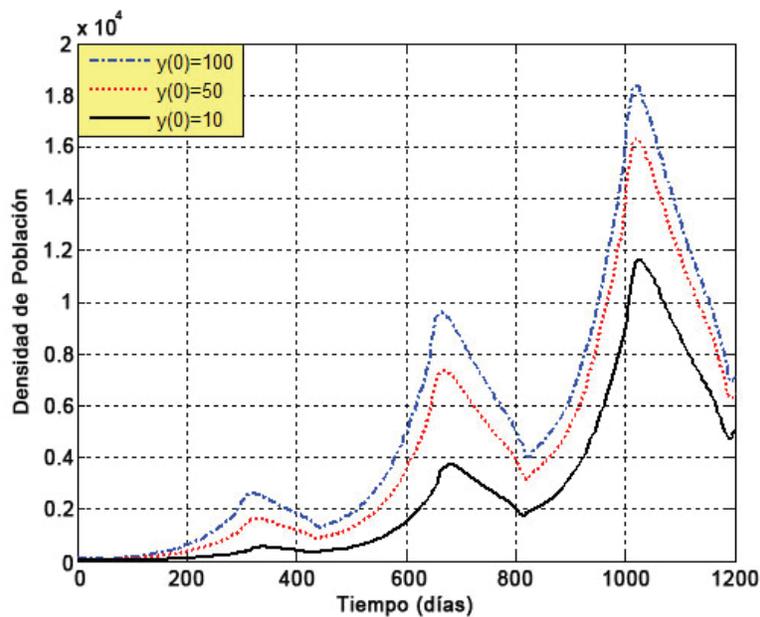


Figura 3. Ácaros foréticos sin control.

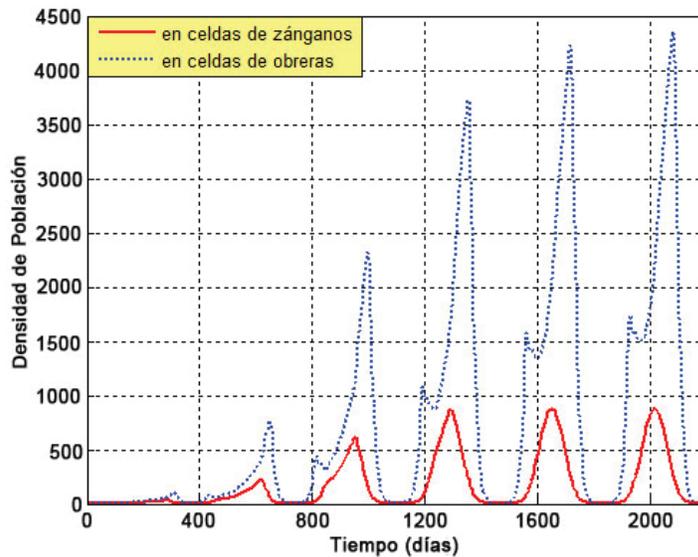


Figura 4. Ácaros acumulados en celdas de cría.

Un modelo continuo puede ser más adecuado que los modelos discretos, cuando las poblaciones crecen, pero quizás estos últimos sean más realistas en un escenario inicial con escasos individuos. Esta última reflexión sugiere que un modelo mixto podría reunir las ventajas de ambos.

Es importante señalar que el modelo presentado en este trabajo, como la mayoría de los artículos referenciados, no considera los efectos que el ácaro *V. destructor* produce sobre la población de abejas, factor que debe ser investigado en futuros trabajos.

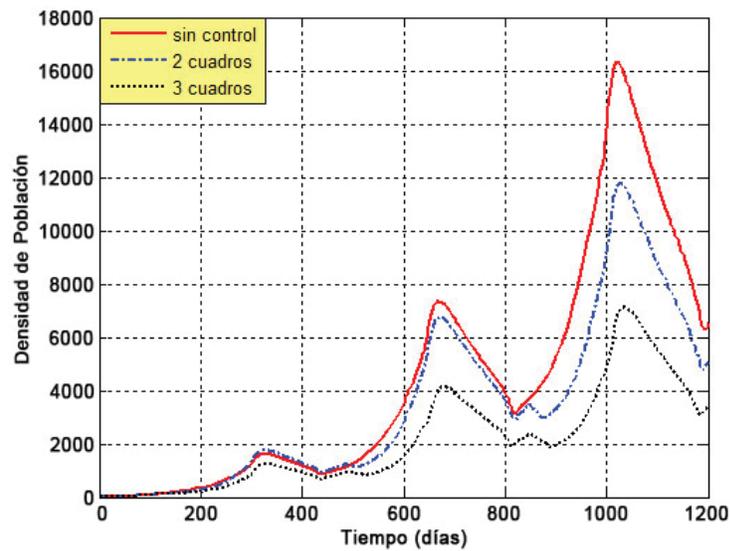


Figura 5: Control biotécnico.

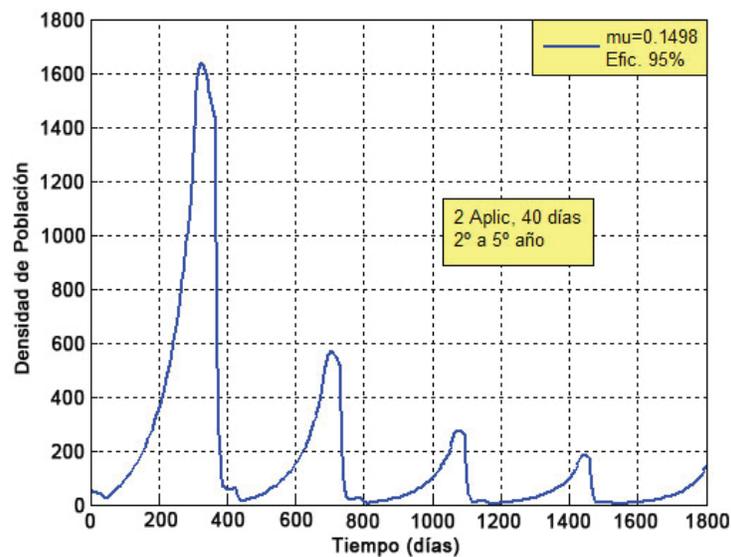


Figura 6. Control químico

CONCLUSIONES

Este estudio presenta un sistema de ecuaciones diferenciales con retardos para modelar la dinámica poblacional del ácaro *V. destructor* en colonias de *A. mellifera*, el cual representa bien sus periodos reproductivos y sus ciclos de vida. En este modelo las tres subpoblaciones están bien determinadas lo cual permite simular diferentes estrategias de control, tanto en la

fase forética como en la fase reproductiva que ocurre en las celdas de cría de zánganos y de obreras. Es importante mencionar, que con este trabajo se ha incorporado una nueva herramienta matemática, que puede contribuir a profundizar las numerosas investigaciones que se están realizando para dilucidar la dinámica poblacional de Varroa, a fin de diseñar y aplicar nuevas estrategias alternativas de control del mencionado parásito.

LITERATURA CITADA

- Benavente M., N. Maidana and M. Eguaras. 2006. A Population Model with Variable Carrying Capacity for the mite *Varroa destructor* in *Apis mellifera* Colony. *Ecological Modeling*, 148:263-275.
- Camazine S. 1988. Factors affecting the severity of *Varroa jacobsoni* infestations on European and African honey bees. In: *Africanized Honey bees and Mites*. Needham GR Page, RE jr.(ed) Ellis Horwood Ltd, Chichester; 444-451.
- Eguaras M., J. Marcángeli y N. A. Fernández. 1994a. Influence of parasitic intensity on *Varroa jacobsoni* Oud. reproduction. *Journal of Apicultural Research* 33(3):155-159.
- Eguaras M., J. Marcángeli, M. Oppedisano y N. A. Fernández. 1994b. Seasonal changes in *Varroa jacobsoni* Oud. reproduction in temperate climates of Argentina. *Bee Science*, 3:120-123.
- Fries I., S. Camazine and J. Sneyd. 1994. Population dynamics of *Varroa jacobsoni*: a model and a review. *Bee World*, 75:5-28.
- Kraus B. and R. E. Page jr. 1995. Population growth of *Varroa jacobsoni* Oud in Mediterranean climates of California. *Apidologie* 26(2):149-157.
- Maidana N., M. Benavente and M. Eguaras. (2005). A model in differential equations to describe the mite *Varroa destructor* population dynamics in *Apis mellifera* colonies. *Foro Red-Mat* ISSN: 1405-1745. Available online: <http://bit.ly/2Rd5WYe> [Feb. 12, 2016]
- Martin S. A. 1998. A Population model for the ectoparasitic mite *Varroa jacobsoni* in honey bee (*Apis mellifera*) colonies. *Ecological Modeling*, 109:267-281.
- Wilkinson D. and G. Smith. 2002. A model of the mite parasite, *Varroa destructor*, on honeybees (*Apis mellifera*) to investigate parameters important to mite population growth. *Ecological Modeling*, 148(3):263-275.