

Estudio de Estrategias del Uso de Pesticidas y su Impacto en el Rendimiento Agrícola y la Sustentabilidad Apícola mediante Simulación Dinámica

Andersen, María Emilia - D'Antoni, Priscila Sharon - Podhainy Vignola Agustín

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires

Abstract

En este documento se estudia la relación entre la aplicación de pesticidas, la productividad agrícola y la salud de las colonias de abejas, polinizadores esenciales para numerosos cultivos de importancia económica y ecológica. Para analizar esta interacción compleja y su evolución en el tiempo, se desarrolla una metodología de simulación dinámica con avance del tiempo a intervalos constantes (Δt constante = 1 año). El objetivo es identificar estrategias de uso de agroquímicos que permitan mantener altos niveles de producción agrícola sin comprometer la sustentabilidad apícola ni la capacidad de polinización del sistema. Se evalúan distintos escenarios con variaciones en la intensidad de aplicación de pesticidas y extensión territorial cultivada, observando su efecto en la mortalidad de colonias y en la producción total anual. Se pretende así generar información que contribuya a decisiones agrícolas más sostenibles.

Palabras Clave

Simulación. Toma de decisiones. Modelo. Dinámica. Función de Densidad de Probabilidad. Sustentabilidad apícola. Polinización. Pesticidas. Sistema agrícola.

Introducción

La agricultura es uno de los pilares fundamentales para el abastecimiento alimentario de la población mundial. En las últimas décadas, debido al aumento de la demanda y a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria, los sistemas productivos han adoptado estrategias cada vez más intensivas orientadas a maximizar los rendimientos de los cultivos [1]. Entre dichas estrategias, el uso de pesticidas se ha convertido en una práctica común para combatir plagas y enfermedades que afectan directamente la productividad agrícola.

Sin embargo, este enfoque presenta un conflicto ambiental significativo. Los pesticidas, si bien son eficaces al reducir las pérdidas de producción en el corto plazo, generan impactos negativos en organismos no objetivo, especialmente en los polinizadores [1]. Dentro de este grupo, las abejas son consideradas actor esencial en los ecosistemas agrícolas: contribuyen a la reproducción de muchas especies vegetales mediante la polinización, proceso indispensable para la formación de frutos y semillas. Según estimaciones de la FAO, el 75% de los cultivos destinados a la alimentación humana depende total o parcialmente de polinizadores, y alrededor del 35% de la producción agrícola mundial se sostiene gracias a su actividad [2]. Por lo tanto, la disminución de estos insectos representa una amenaza directa a la producción de alimentos y, en consecuencia, a la economía global y la disponibilidad nutricional futura.

En los últimos años se ha observado un declive preocupante en la población de abejas a nivel internacional [1]. Múltiples factores han sido asociados a este fenómeno: degradación del hábitat, monocultivos, patógenos y parásitos como Varroa destructor, cambios climáticos y reducción de flores nativas. No obstante, las investigaciones actuales coinciden en que la exposición a agroquímicos, particularmente a insecticidas sistémicos como los neonicotinoides, constituye una de las variables más críticas en esta problemática [1][4]. Además de la mortalidad directa, se han documentado efectos subletales que alteran comportamientos clave para la

supervivencia de las colonias, entre ellos la capacidad de orientación, el forrajeo, la

comunicación, el desarrollo larval y la resistencia a enfermedades [1].

Este escenario evidencia una contradicción estructural: los pesticidas incrementan la productividad inicial al controlar plagas, pero al mismo tiempo comprometen el capital biológico que sostiene la producción en el largo plazo. En sistemas agrícolas dependientes de la polinización, un deterioro sostenido de las poblaciones de abejas provoca una reducción progresiva del rendimiento, que puede resultar aún más severa que el daño inicial causado por las plagas [3].

Dada esta complejidad, se vuelve imprescindible adoptar un enfoque integral que permita evaluar la interacción entre el uso de pesticidas, la productividad y la sustentabilidad ecológica. La simulación computacional se convierte en una herramienta adecuada para este tipo de análisis, ya que permite modelar la evolución temporal del sistema, contemplando procesos como la degradación del pesticida en el suelo, la recuperación anual de colonias, la variación del rendimiento por hectárea y el impacto acumulativo del manejo agrícola [3].

El presente trabajo propone el desarrollo de un modelo de simulación dinámica con avance del tiempo a intervalos constantes ($\Delta t = 1$ año) para estudiar el equilibrio entre la aplicación de pesticidas y la conservación de la población de abejas. Se plantean distintos escenarios de uso de agroquímicos y superficies de cultivo, con el fin de evaluar cuál de ellos permite mantener una producción eficiente sin comprometer la salud de los polinizadores en el largo plazo. Con este enfoque, se busca aportar insumos que faciliten la toma de decisiones informada, considerando no solo los beneficios económicos inmediatos, sino también la viabilidad futura del sistema agrícola y el

rol ecológico irremplazable que cumplen las abejas.

Proceso de simulación

Se llevará a cabo el proceso de simulación considerando las etapas que lo conforman, aclarando que las mismas no tienen que ejecutarse en el orden adoptado:

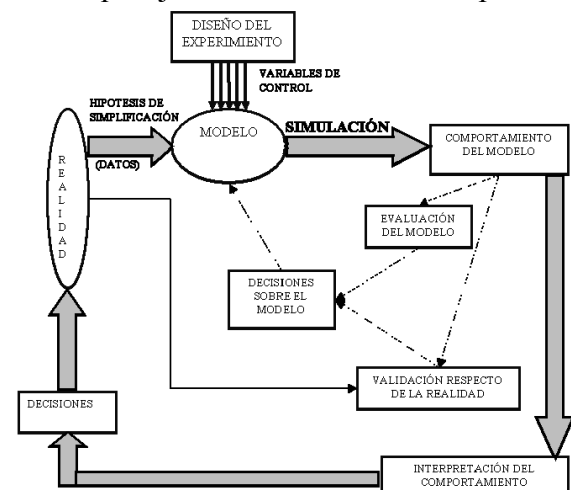


Figura 1. Proceso de Simulación

Formulación del problema

Para la formulación del problema se van a definir preguntas que deben contestarse, hipótesis que deben probarse o efectos que deben estimarse [5]. Previamente a ello, es necesario definir de forma clara y precisa el objetivo de nuestra investigación: determinar la intensidad de uso de pesticidas y la superficie cultivada que permitan maximizar el rendimiento agrícola sin comprometer la sustentabilidad de la población de abejas, mediante un modelo de simulación con avance del tiempo a intervalos constantes ($\Delta t = 1$ año), evaluando cómo dichas decisiones impactan sobre la salud de las colonias y la capacidad de polinización del sistema a lo largo de múltiples períodos.

Recolección y procesamiento de información tomada de la realidad

La formulación del problema y el desarrollo de un modelo adecuadamente representativo de la realidad, el cual se

pretende simular, requieren de información (datos) que debe ser recolectada, almacenada y procesada para adecuar su nivel de definición a las necesidades del problema. Como los resultados que se obtengan al efectuar la simulación sólo serán válidos como información decisoria ante el sistema real en la medida que lo sean los datos a partir de los cuales se desarrolló el modelo, se le debe de dar gran importancia a la recolección y procesamiento de información tomada de la realidad [5].

Adicionalmente, para el desarrollo del modelo se utilizó un conjunto de datos empíricos proveniente de un repositorio científico abierto [6]. El dataset empleado contiene 8764 registros y 15 variables relacionadas con la actividad agrícola, el uso de pesticidas y la dinámica poblacional de colonias de abejas en Estados Unidos. La información incluye, entre otras variables, la superficie cultivada, las toneladas de pesticidas aplicados, el rendimiento por hectárea, el número de colonias de abejas, las pérdidas totales de colonias y las pérdidas atribuibles específicamente al uso de pesticidas.

El uso de este dataset permite sustentar el modelo no sólo en supuestos teóricos, sino también en datos observados de la realidad, fortaleciendo la validez de los resultados obtenidos y su potencial aplicación en el análisis de estrategias de manejo agrícola sostenibles.

Formulación del modelo

A partir de los datos tomados de la realidad y aplicando las hipótesis de simplificación adecuadas al objetivo planteado, se procederá a la formulación del modelo.

Para ello se van a clasificar las variables, se identificarán los eventos independientes y se analizarán las funciones de densidad de probabilidad.

Clasificación de variables

Las variables pueden ser exógenas o endógenas. Las variables exógenas son aquellas cuyo valor está determinado por factores externos y no es modificado por el sistema. Por otro lado, las variables endógenas, que son dependientes del sistema, sí sufren modificaciones dentro del modelo. Dentro del grupo de las variables exógenas están los datos que son variables no controlables (valores de la realidad) y las variables de control cuya alteración se desea poner a prueba para obtener diferentes resultados y así concretar la toma de decisiones. Las variables endógenas se dividen en variables de estado que son las que representan el estado del sistema y las variables de resultado que representan el producto de la simulación dado un cierto valor de las variables endógenas de control.

Variables exógenas

- Datos
 - TM: Tasa de Mortalidad Natural anual de las colonias.
 - TR: Tasa de Recuperación anual de las colonias.
 - FT: Factor de Toxicidad (impacto por tonelada de pesticida aplicada).
 - RE: Rendimiento anual base del suelo por hectárea (sin pesticidas).
 - IRP: Incremento de Rendimiento por Tonelada de Pesticida.
 - IRA: Incremento anual del Rendimiento por Colonia de Abejas.
 - TD: Tasa de Degradación anual del pesticida residual en el suelo.
- Control
 - TPH: Toneladas de Pesticidas aplicados por Hectárea.
 - HC: Cantidad de Hectáreas cultivadas.

Variables endógenas

- Estado
 - CV: Cantidad de Colonias Vivas.
 - IR: Impacto Residual de pesticidas en el suelo.

- Resultado
 - PAP: Producción Agrícola Promedio anual.
 - PAV: Porcentaje de Abejas Vivas respecto a la población inicial.
 - PPA: Porcentaje de Producción atribuible a las Abejas.
 - NPSQ: Nivel Promedio de Saturación Química del suelo.

Determinadas estas variables, procedemos a identificar los eventos.

Tabla 1. Tabla de Eventos

Eventos propios	Eventos comprometidos para ΔT futuros	Eventos que se comprometen para ΔT futuros
Muerte de colonias de abejas por causas naturales	-	-
Muerte de colonias de abejas por exposición a pesticidas	-	-
Recuperación de colonias	-	-
Aplicación de pesticidas	-	-
Degradación de pesticidas	-	-

Tabla 2. Tabla de Eventos Futuros

Evento
-

Mecanismo de flujo de tiempo

A lo largo del tiempo en el modelo se producen eventos e_i en intervalos fijos de tiempo:

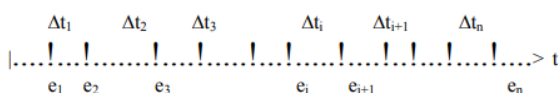


Figura 2. Eventos en el tiempo

Al tratarse de un sistema agrícola-apícola cuyas principales variables (producción anual, mortalidad y

recuperación de colonias) se miden generalmente en períodos estacionales o anuales, se adopta la metodología de simulación dinámica con avance del tiempo en intervalos constantes. La unidad de tiempo en la simulación será el año, ya que permite representar tanto la evolución de la producción como la dinámica poblacional de las abejas de forma coherente con los datos obtenidos de la realidad.

Análisis de las funciones de densidad de probabilidad

Para poder realizar simulaciones lo más acordes posible a la realidad, se utilizaron valores aleatorios para representar aquellos datos provenientes de observaciones empíricas. A partir del dataset analizado, se identificaron las funciones que mejor se ajustan al comportamiento de dichas variables. De este proceso se obtuvieron las correspondientes funciones de densidad de probabilidad (f.d.p.), las cuales, mediante la generación de números aleatorios, permiten simular valores representativos de la realidad.

La tasa de mortalidad natural anual de las colonias (TM) fue modelada mediante una distribución Gamma, con parámetros $k=28.2783$, $\theta=0.00811$ y $\text{loc}=-0.06408$.

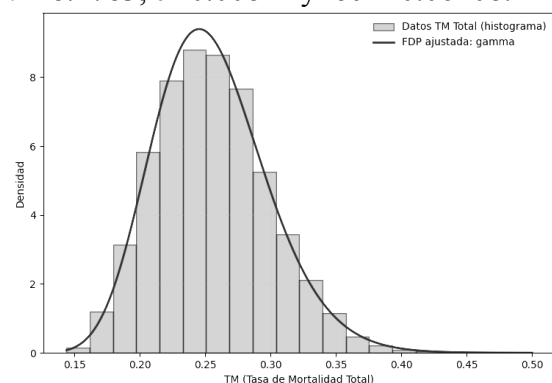


Figura 3. Ajuste de Gamma para TM.

En cuanto a la tasa de recuperación anual de las colonias (TR) fue representada mediante una distribución Weibull, con parámetro $k=2.20397$, $\lambda=0.31587$ y $\text{loc}=-0.01311$.

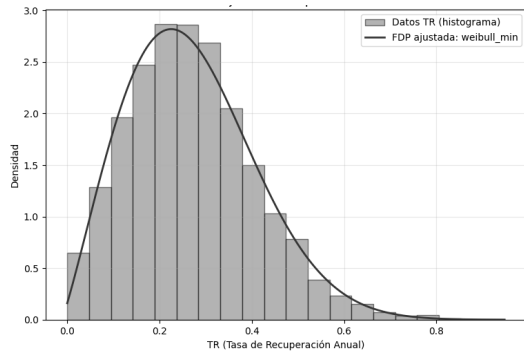


Figura 4. Ajuste de Weibull para TR.

El factor de toxicidad por tonelada de pesticida aplicada (FT) fue modelado mediante una distribución Beta, con parámetros $a=5.57751$, $b=4.82535$, $\text{loc}=0.000087855$ y $\text{scale}=0.00030122$.

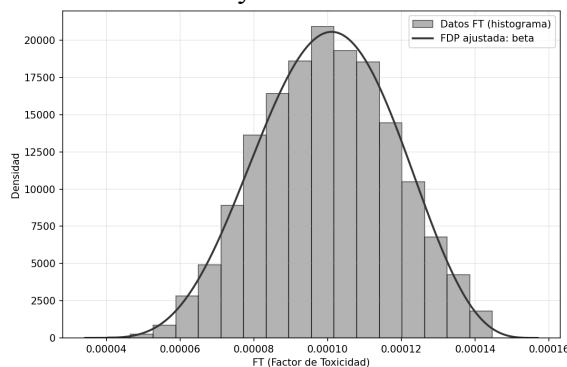


Figura 5. Ajuste de la Beta para FT.

El rendimiento anual base del suelo por hectárea sin aplicación de pesticidas (RE) fue representado mediante una distribución Normal, con media $\mu=22643.287$ y $\sigma=811.609$.

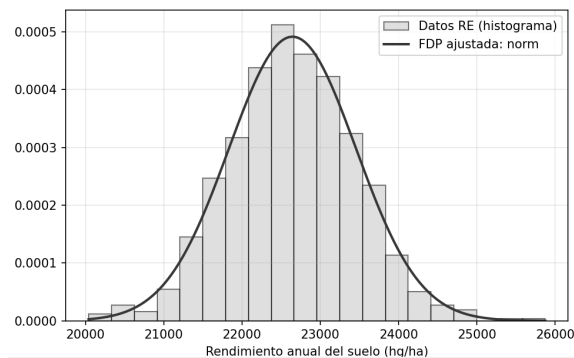


Figura 6. Ajuste de Normal RE.

Para el incremento de rendimiento por tonelada de pesticida aplicada (IRP) se utilizó una distribución Gamma, con parámetro $k=13.97$, $\theta=24351.69$ y $\text{loc}=54220.34$.

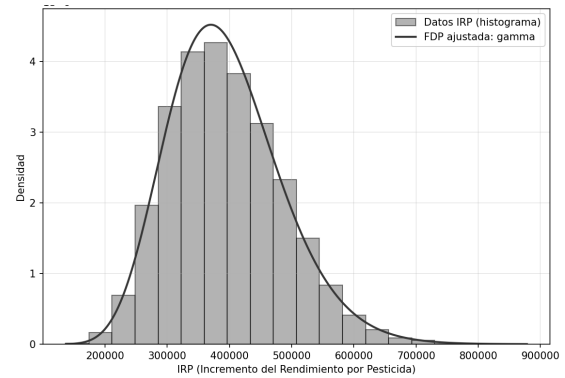


Figura 7. Ajuste de Gamma para IRP.

El incremento anual del rendimiento asociado a la presencia de colonias de abejas (IRA) fue representado mediante una distribución Burr, con parámetros $c=5.4441$ y $d=0.2158$, $\text{loc}=2.21 \times 10^{-6}$ y $\text{scale}=0.02821$.

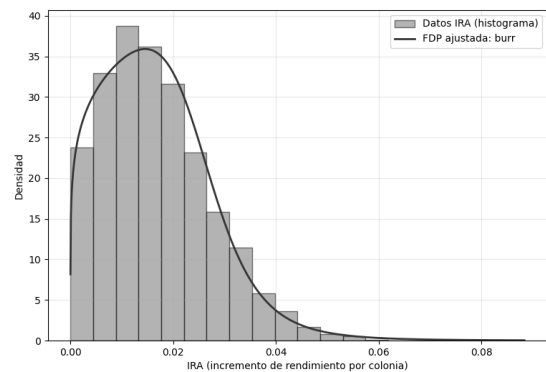


Figura 8. Ajuste de Burr para IRA.

La tasa de degradación anual del pesticida residual en el suelo (TD) fue modelada mediante una distribución Beta, con parámetros $a=6.0690$, $b=3.1094$, $\text{loc}=0.00634$ y $\text{scale}=0.99909$.

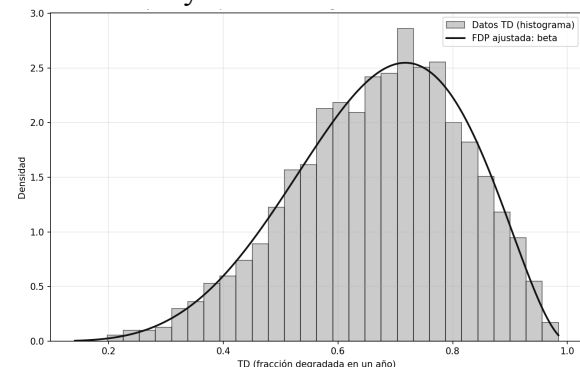


Figura 9. Ajuste de Beta para TD.

Resultados

Para el desarrollo del trabajo se realizaron múltiples simulaciones del modelo implementado en Stella, evaluando distintas estrategias. A partir de este conjunto de simulaciones se seleccionaron tres escenarios representativos: Intensivo, Ecológico y de Transición. Cada uno fue evaluado considerando dos horizontes temporales: 5 años, representativo del corto plazo productivo, y 20 años, orientado a analizar la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

Cada escenario es evaluado en función de los resultados obtenidos para las variables de desempeño, permitiendo comparar los impactos de las distintas estrategias y fundamentar las conclusiones del estudio.

Tabla 3. Variables de control asignadas en los distintos escenarios.

Escenario	HC	TPH
Intensivo	20000	0,008
Ecológico	18000	0,0005
De transición	18000	0,003

El escenario Intensivo representa una política de máxima intensificación productiva, con el objetivo de establecer una línea base de producción bruta, asumiendo el mayor nivel posible de insumos químicos y una gran superficie cultivada.

El escenario Ecológico se plantea con el objetivo de aislar el impacto positivo de la biología, reduciendo al mínimo el uso de pesticidas y los costos variables asociados a insumos químicos.

El escenario de Transición busca explícitamente un punto de equilibrio entre producción y sustentabilidad. Para ello, se reduce de forma significativa el uso de pesticidas (aproximadamente un 60% menos que el escenario intensivo) y se mantiene una superficie cultivada intermedia, sin eliminar completamente el control de plagas.

A continuación se presentan las tablas de resultados de la simulación para cada escenario, donde se resumen los valores obtenidos para las principales variables endógenas.

Tabla 4. Resultados obtenidos.

Variable de resultado	Escenario			Horizonte temporal
	1	2	3	
PAP	66,6k	38k	52,8k	5
PAV	78,1	125	81,6	
PPA	17,5	14,7	12,8	
NPSQ	90,6	5,25	32,4	
PAP	50,3k	38,4k	50,9k	20
PAV	1,37	188	49,7	
PPA	10,4	16	12,7	
NPSQ	94,8	5,67	33,4	

Discusión

Luego de correr la simulación bajo los escenarios previamente descritos, obtuvimos ciertos resultados de incumbencia para la futura toma de decisiones. Estos evidencian una relación directa entre el nivel de insumos químicos utilizados, la evolución de la población de abejas y el desempeño productivo del sistema agrícola. En particular, se observa que el aumento de la aplicación de pesticidas genera incrementos en la producción únicamente en el corto plazo, mientras que sus efectos acumulativos afectan negativamente la dinámica del sistema en horizontes temporales más extensos.

El comportamiento del escenario intensivo muestra que la maximización de insumos químicos conduce a una saturación progresiva del suelo y a una fuerte reducción de la población de abejas, lo que limita el aporte de la polinización y afecta la producción en el largo plazo. En contraste, el escenario ecológico pone de manifiesto que la conservación de las colonias, si bien favorece la estabilidad biológica del sistema, no resulta suficiente para alcanzar niveles elevados de producción sin algún grado de control químico de plagas.

El escenario de transición permite observar que un manejo intermedio logra combinar ambos efectos, manteniendo niveles de producción competitivos y reduciendo el impacto ambiental. Este resultado confirma que la interacción entre insumos químicos y servicios ecosistémicos desempeña un rol central en la sostenibilidad del sistema productivo.

Conclusión

El presente trabajo permitió analizar, mediante un modelo de simulación con avance del tiempo a intervalos constantes, el impacto de distintas estrategias de manejo agrícola sobre la producción y la sustentabilidad del sistema. A partir de la comparación de los escenarios evaluados, se concluye que la maximización del uso de pesticidas no garantiza una mayor producción sostenida en el tiempo.

Los resultados muestran que el deterioro ambiental asociado al uso intensivo de insumos químicos compromete la viabilidad futura del sistema productivo, mientras que la eliminación casi total de dichos insumos limita el rendimiento agrícola. En este contexto, el escenario de transición se presenta como la alternativa más eficiente, al optimizar el uso de recursos, reducir la dependencia de insumos costosos y aprovechar el servicio ecosistémico de la polinización.

En definitiva, el modelo evidencia que la estrategia óptima no consiste en maximizar un único factor productivo, sino en alcanzar un equilibrio dinámico entre productividad agrícola, conservación ecológica y eficiencia en el uso de insumos, condición fundamental para la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Tecnológica Nacional y al equipo docente de la cátedra de Simulación, en especial a la Ing. Gladys Alfiero, la Ing. Erica Milin, la Ing. Silvia Quiroga y el Ing.

Rubén Flecha, por el apoyo y la orientación brindados durante la realización de este trabajo, así como a los ayudantes de la cátedra.

Referencias

[1] P. Basu et al. Pesticide impacts on insect pollinators: Current knowledge. 2024. Disponible en: <https://www.ri.conicet.gov.ar/handle/11336/251568> (Consultado en diciembre de 2025).

[2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Acción mundial sobre los servicios de polinización. Disponible en: <https://www.fao.org/pollination/es> (Consultado en diciembre de 2025).

[3] A. Kleczkowski, C. Ellis & D. Goulson. Ecological-economic modelling of interactions between wild and commercial bees and pesticide use. 2015. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1509.03734> (Consultado en diciembre de 2025).

[4] M. Das et al. Pollinator visitation decline due to pesticide application. 2025. Disponible en: <https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/een.13375> (Consultado en diciembre de 2025).

[5] Jorge E. Schmitt. "Simulación", Apunte de Cátedra. (Consultado en diciembre de 2025).

[6] Zenodo. Save the Bees: Long-Term Agricultural & Pollinator Dynamics Dataset. Disponible en: <https://zenodo.org/records/17784533> (Consultado en diciembre de 2025).

Datos de Contacto

María Emilia Andersen. UTN-FRBA.
mandersen@frba.utn.edu.ar

Priscila Sharon D'Antoni. UTN-FRBA.
pdantoni@frba.utn.edu.ar

Agustín Podhainy Vignola. UTN-FRBA.
apodhainyvignola@frba.utn.edu.ar