

ANÁLISIS DE LA INVASIÓN A UN AGROECOSISTEMA: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA

Diego Griffon^{1,2*} y Carlos Pino²

¹Laboratorio de Evolución y Ecología Teórica, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. ²Centro I+D Agroecología, Curicó, Chile. *griffondiego@gmail.com

El tiempo es aquello en lo que se producen acontecimientos.
Martin Heidegger (1924)

RESUMEN

Para realizar un manejo ecológico de plagas efectivo, es importante disponer de la mayor cantidad de información posible sobre las poblaciones objetivo. Dentro de esta información, es particularmente relevante identificar las fuentes a partir de las cuales inmigran estas poblaciones al agroecosistema. En este trabajo se presenta una nueva metodología, sencilla y económica que permite obtener esta información. Se muestra un ejemplo de su empleo en un caso que involucra a la Polilla de la Manzana (*Cydia pomonella*) en un huerto de manzanos bajo manejo orgánico en Chile. La metodología se basa en el uso de trampas ubicadas en el interior y el exterior de un agroecosistema, y en el cálculo de las correlaciones cruzadas entre las series de tiempo de las capturas obtenidas en las trampas. Los resultados del ejemplo presentado indican que la metodología es efectiva. En particular, mediante ésta se pudo identificar una dinámica tipo fuente-sumidero entre un cultivo de membrillo abandonado y el manzanal bajo manejo orgánico.

Palabras clave: Agroecología; correlación cruzada; fuente–sumidero; manejo ecológico de plagas; *Cydia pomonella*; agroecología a gran escala; transición hacia la agroecología.

Analysis of invasion into an agroecosystem: A methodological proposal

ABSTRACT

For effective ecological pest management, it is essential to have as much information as possible about target populations. Within this information, a particularly relevant aspect is identifying the sources from which these populations immigrate into the agroecosystem. This paper presents a new, simple, and low-cost methodology that allows such information to be obtained. An example of its application is provided for the Codling Moth (*Cydia pomonella*) in an organically managed apple orchard in Chile. The methodology is based on the use of traps placed both inside and outside the agroecosystem and on the calculation of cross-correlations between the time series of trap captures. The results of the case study indicate that the methodology is effective. In particular, it enabled the identification of a source–sink dynamic between an abandoned quince orchard and the organically managed apple orchard.

Keywords: Agroecology; cross-correlation analysis; source–sink dynamics; ecological pest management; *Cydia pomonella*; large-scale agroecology; agroecological transition.

INTRODUCCIÓN

El manejo ecológico de plagas es una de las áreas de la agricultura alternativa que más desarrollo ha experimentado (Pimentel, 1976; Levins y Wilson, 1980; Kumar y Pant, 1982; Altieri, 1984; Tshernyshev, 1995; Pérez y Vázquez, 2002; Vázquez y Álvarez, 2011; Altieri y Nicholls, 2018). Hoy en día se cosechan y comercializan millones de toneladas de alimentos libres de agroquímicos tóxicos, gracias a estos conocimientos (Reganold y Wachter, 2016; Durham y Mizik, 2021). Sin embargo, el cambio climático y otras amenazas hacen necesario que esta área se siga desarrollando (Scialabba y Müller-Lindenlauf, 2010; Meemken y Qaim, 2018).

En la evolución de cualquier rama de la ciencia, un paso crucial para su éxito e implementación masiva, es su matematización (May, 2004; Tomazella y Silva, 2020; Weyl, 2021). Los ejemplos de esto abundan, pero tal vez el más contundente sea la física y el desarrollo posterior de las diferentes ingenierías (Principe, 2011; Wootton, 2016; Shapin, 2018; Jacob, 2019). Este desarrollo fue posible, sin lugar a dudas, gracias al camino originalmente emprendido por Newton en la matematización de esta área ciencia (Massimi, 2010; Kvasz, 2016, van Hemmen, 2021). De igual forma, vale la pena considerar que, el sorprendente crecimiento que experimentó la agricultura de Revolución Verde en el siglo pasado, se debió en gran medida al desarrollo de la genética cuantitativa y del diseño de experimentos (Patel, 2012; Harwood, 2019; John y Babu, 2021). Estas dos, son áreas del conocimiento que hacen uso extensivo de las matemáticas (Steel y Torrey, 1988; Futuyma, 1986; Daniel, 1994; Falconer y Mackay, 1996; Hamilton, 2009; Hart, 2020). La matematización de una ciencia le brinda rigor y generalidad, lo que facilita su implementación (Massimi, 2010; Kvasz, 2016, van Hemmen, 2021).

Más allá de cualquier idealismo ingenuo, si se quiere que la agricultura ecológica experimente una expansión significativa (Jouzi *y col.*, 2017), es importante incluir en ella un cierto grado de formalismo matemático (Vandermeer y Perfecto, 2018). En este sentido, para trascender lo anecdótico y enfrentar el problema real: la gran escala, es evidentemente necesario disponer de herramientas de manejo ecológico que permitan tomar decisiones bien fundamentadas, sobre las gigantescas superficies asociadas a este tipo agricultura (Reganold y Wachter, 2016; Pino y Griffon, 2024). Herramientas de este tipo son indispensables para enfrentar la transición del sector que es realmente responsable de la huella ecológica de la agricultura (Pandey y Agrawal, 2014; Ozlu *y col.*, 2022). El desarrollo masivo de estos instrumentos pudiera permitir un crecimiento de la agricultura ecológica nunca antes visto y significar una reducción sustantiva del área dedicada a la agricultura de Revolución Verde y, por lo tanto, de sus impactos ambientales (Kremen *y col.*, 2012; Struik y Kuyper, 2017).

Para conseguir este objetivo, es necesario el desarrollo de una agricultura ecológica, con fundamentos bio-matemáticos (Vandermeer y Perfecto, 2018; Vandermeer, 2020; Benítez *y col.*, 2022). Esto involucra dos aspectos: (1) El desarrollo de una teoría agroecológica matematizada, que explique los procesos claves que ocurren en los agroecosistemas, y (2) La creación de herramientas cuantitativas propias, sobre las cuales basar las decisiones en campo. Respecto al primer punto, aunque falta mucho trabajo por realizar, la agroecología cuenta con importantes aportes, por ejemplo, los hechos por Richard Levins y John Vandermeer (ver: Levins, 1969, 2006; Levins y Wilson, 1980; Levins y Vandermeer, 1990; Vandermeer, 1992, Levins y Miranda, 2007; Vandermeer y Perfecto, 2018, Vandermeer, 2020).

El segundo punto necesita mayor atención y es necesario trabajar en su desarrollo (Griffon, 2008). En este sentido, el presente trabajo brinda un nuevo instrumento cuantitativo, sencillo y económico, que puede ser utilizado para orientar decisiones de manejo en campo. En específico, aquí se presenta una metodología para ser incorporada a la caja de herramientas del manejo ecológico de plagas. Esta está pensada para obtener información relevante, sobre insectos voladores, con potencial como controladores biológicos o que puedan generar daño como plagas. A continuación, primero se presenta de forma breve la metodología propuesta, para luego desarrollar en profundidad un ejemplo de su uso.

PROPUESTA METODOLÓGICA

El objetivo de esta metodología es identificar las rutas principales de ingreso, a un agroecosistema particular, utilizadas por una especie relevante. En este sentido, para emplear la metodología primero se debe establecer esta especie. Una vez identificada la especie objetivo (ya sea porque es un importante fitófago o porque presenta potencial para el control biológico), la implementación de la propuesta se fundamenta en la captura de datos en campo, y en el posterior análisis de estos. En específico, la metodología involucra los siguientes 5 elementos:

- (1) Colocar trampas específicas para la población objetivo dentro del agroecosistema.
- (2) Colocar trampas específicas para la población objetivo en el exterior del agroecosistema. Esto es, en los potenciales puntos de entrada al agroecosistema y en sectores más lejanos que se identifiquen como importantes.
- (3) Construir series de tiempo a partir de las capturas de las trampas.
- (4) Establecer asociaciones entre todos los pares de series de tiempo.
- (5) Analizar las asociaciones con la ayuda de grafos.

Para establecer las asociaciones entre las capturas de las trampas, se utilizan correlaciones cruzadas (Venables y Ripley, 2002; Shumway y Stoffer, 2017, 2019) entre las series de tiempo obtenidas de cada trampa.

Las correlaciones cruzadas permiten obtener una medida de la similitud entre las diferentes series de tiempo y de esta manera proponer relaciones espacio-temporales entre las distintas áreas del campo (Chatfield y Haipeng, 2019). Es decir, de esta forma se puede estudiar la influencia de las diferentes áreas evaluadas, en la dinámica poblacional de la especie objetivo.

Para conseguir la correlación cruzada entre dos series de tiempo discretas particulares (x y y), en primer lugar, se calcula la siguiente expresión (Chatfield y Haipeng, 2019):

$$C_{xy}(l) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i)y(i-l), \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Donde, $C_{xy}(l)$ representa el valor de la sumatoria de los productos escalares de las entradas (realizaciones) de las series de tiempo x e y , alineadas de acuerdo a un retardo igual a l . Mientras que N representa la longitud de las series de tiempo. Finalmente, la correlación cruzada se obtiene estandarizado el resultado de la operación anterior, para que tome valores entre: -1 y 1. Para esto último, se divide $C_{xy}(l)$ por el producto de las desviaciones estándar de las dos series de tiempo. De esta manera se asegura que el resultado tome valores entre los antes mencionados, gracias a la desigualdad de Cauchy-Schwarz (Shumway y Stoffer, 2019). Estas operaciones se repiten para los valores de retardo (l) que se consideren pertinentes (Brockwell y Davis, 1991; Venables y Ripley, 2002; Chatfield y Haipeng, 2019).

En este trabajo se utiliza un número de retardos igual al tamaño de las series de tiempo, menos tres. Se hace de esta forma, para que las correlaciones se calculen con no menos de 3 realizaciones de las series de tiempo. El empleo de retardos permite: (1) Establecer el mayor valor de correlación posible entre las dos series de tiempo evaluadas, (2) Obtener una medida del desfase temporal asociado al mayor valor de correlación obtenido.

En definitiva, para aplicar la metodología se debe, en primer lugar, determinar una especie de interés (fitófaga, depredadora, parasitoide, etc.); para luego identificar trampas adecuadas para la especie de interés (e.g., trampas de feromonas). Posteriormente, establecer las trampas al interior de agroecosistema de forma correcta (e.g., de acuerdo a las indicaciones del fabricante). Es importante que su disposición espacial incluya todos los sectores relevantes. También se debe ubicar puntos en la periferia del campo de cultivo por donde se considere posible que ingrese el organismo bajo estudio. No es necesario que se cubra totalmente el contorno del agroecosistema, los puntos solo deben permitir realizar un monitoreo de las posibles áreas de ingreso al agroecosistema. De existir, ubicar también otros puntos de interés (reservorios de vegetación no intervenida, campos de cultivo cercanos, etc.). Colocar trampas en los puntos anteriormente determinados.

Una vez hecho esto, es necesario realizar conteos periódicos del número de individuos encontrados en cada trampa, para establecer la cantidad de individuos nuevos hallados en cada conteo y posteriormente construir series de tiempo con los datos obtenidos de cada trampa. Luego de obtenidas las series de tiempo, se establece la captura total de cada una, es muy importante identificar las series de tiempo (trampas) asociadas a los primeros conteos de la especie objetivo y también aquellas con los mayores conteos totales. Posteriormente se procede a realizar correlaciones cruzadas entre los pares de series de tiempo que contengan señal (i.e., donde existan capturas). Para cada par de series de tiempo, guardar el valor de su correlación máxima, así como el valor absoluto del retardo asociado a esta. Finalmente, se construye una tabla con los resultados obtenidos y también se presentan los resultados en forma de grafos.

En los grafos, los nodos deben representar las trampas y sus capturas, mientras que los vínculos deben mostrar atributos de las correlaciones (su valor máximo y su retardo asociado). Para esto, se sugiere construir tres grafos: (i) Un primer grafo, donde el color de los nodos esté asociado a su ubicación (e.g., interior o exterior del agroecosistema) y donde el grosor de los vínculos esté asociado al valor de su correlación máxima. (ii) Un segundo grafo igual al anterior, pero que, además muestre con diferentes colores en los vínculos, la magnitud del retardo asociado a la correlación máxima. (iii) Un tercer grafo igual al anterior, pero que presente los nodos de diferentes tamaños, para reflejar las capturas totales obtenidas en cada trampa.

Finalmente se deben analizar los resultados en forma global. En primer lugar, se establecen las trampas asociadas a las primeras capturas, y en cuales trampas se obtuvieron las mayores capturas totales. Luego, se establece cuáles trampas externas presentan mayor correlación con las internas. Posteriormente, con los retardos, se determina la dinámica de estas últimas asociaciones (e.g., cuáles trampas externas presentan asociaciones más inmediatas con las internas). Por último, con base en los resultados obtenidos, se establece la importancia relativa de cada trampa para la dinámica del sistema.

Con todos estos elementos, se puede construir un relato relevante sobre la dinámica de la especie en estudio en el agroecosistema. Para mostrar esto, a continuación, se presenta de forma detallada un ejemplo del empleo de esta metodología en un caso real.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utiliza como ejemplo a la Polilla de la Manzana (*Cydia pomonella*). La larva de este insecto puede causar pérdidas económicas muy importantes en el cultivo del manzano (Pajač et al., 2011; Konopka et al., 2012; Walker et al., 2013). Esta situación se ve acentuada en campos orgánicos, debido a las severas restricciones que establecen las diferentes certificaciones al

uso de insumos en su manejo (Blackman y Rivera. 2011; Niggli, 2015; Fouilleux, 2017). Por estas razones, toda información relevante sobre esta especie en situación de campo, puede ser crucial para el éxito de las estrategias de control.

Una importante alternativa para el manejo de la Polilla del Manzano, es el uso de feromonas de confusión sexual. Estas sustancias son permitidas en la agricultura orgánica, para su uso en trampas y emisores. Por ejemplo, en la Unión Europea están permitidas de acuerdo al reglamento número 1165/2021 (UE, 2021). Esta técnica interfiere el apareamiento de las polillas, gracias a la confusión de los machos, logrando de esta manera inhibir su reproducción (Hussain *y col.*, 2014; Adams *y col.*, 2017; Curtiss *y col.*, 2023). La técnica consiste en utilizar la feromona sexual femenina (sintética), para evitar que los machos encuentren a las hembras (Hussain *y col.*, 2014; Adams *y col.*, 2017). La feromona utilizada es específica de la especie, por lo que no afecta el resto de la biodiversidad presente en el agroecosistema (Horner *y col.*, 2020). El componente principal de la feromona sintética es la codlemona ((E,E)-8,10-Dodecadien-1-ol), que es un alcohol que se degrada rápidamente en el ambiente (Roelofs *y col.*, 1971; Horner *y col.*, 2020).

El uso de esta técnica puede disminuir significativamente las densidades poblaciones del insecto (Hussain *y col.*, 2014; Adams *y col.*, 2017; Horner *y col.*, 2020; Curtiss *y col.*, 2023). Sin embargo, debido a la presencia de poblaciones en áreas no manejadas circundantes a los agroecosistemas, estos pueden recibir un flujo de polillas inmigrantes en etapas críticas de manejo. Por esta razón, es importante poder determinar las rutas principales y las fuentes de invasión del agroecosistema, para poder hacer un manejo realmente eficaz de este insecto. Con este objetivo, se aplicó la metodología aquí planteada a este caso real.

Ubicación. El trabajo de campo se realizó en una plantación de manzanos ubicada en Camino a Abranchil, comuna de Yerbas Buenas, Región del Maule (Chile). En esta plantación existen dos cuarteles de manzanos bajo manejo orgánico. En Chile, un cuartel consiste en un lote de terreno con condiciones homogéneas, en el cual se realiza un manejo uniforme. En un cuartel de manzanos, típicamente se planta una única variedad/portainjerto comercial (con su polinizante) y se lleva a cabo un manejo fitosanitario, de suelo y de riego presurizado uniforme en toda su extensión. Los cuarteles orgánicos antes mencionados, están plantados con la variedad Gala Buckeye, sobre el portainjerto M9-33, a una distancia de plantación 3,5m x 0,8m y ambos fueron plantados el año 2013. Uno de los cuarteles, llamado 6, tiene una superficie total de 3,86 ha, mientras que el otro, llamado 7, tiene una superficie de 3,75 ha.

Como se puede apreciar, ambos cuarteles presentan condiciones similares. Sin embargo, para establecer si estos efectivamente presentan características equivalentes, en términos de la especie objetivo (C.

pomonella), se realizó un experimento. Para esto se utilizó un diseño completamente aleatorizado (Montgomery, 2004) para evaluar si existen diferencias, en términos de frutos dañados por la Polilla de la Manzana, entre los dos cuarteles. Se realizaron evaluaciones de 90 plantas escogidas al azar por cuartel. A cada planta escogida se le evaluaron todos los frutos en busca de daños, de esta manera, la variable respuesta estudiada fue el número de frutos dañados por planta.

Los datos obtenidos no se ajustaron a una distribución normal (con valores de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov iguales a $D = 0,53$ y $p\text{-valor} < 2,2e^{-16}$). Se intentó aplicar a los datos una transformación de Box-Cox (Dag y Ilk, 2017), pero no se encontró un exponente adecuado. Por esta razón, se evaluaron mediante la prueba no paramétrica por rangos de Mann-Whitney (Montgomery, 2004). También se analizaron utilizando un modelo lineal generalizado (Bolker *y col.*, 2009, Bates *y col.*, 2015). Dado que la variable respuesta es un conteo (número de frutos dañados) y que ésta presenta sobre-dispersión (razón de sobre-dispersión = 1,222; χ^2 de Pearson = 217,429; $p\text{-valor} = 0,023$), se utilizó una distribución de errores tipo cuasi-poisson (empleando la función de vínculo canónica de esta distribución). Además, los datos también se evaluaron mediante un análisis de varianza por permutación (Permanova) (Anderson, 2001).

Todos los análisis se realizaron en el ambiente de programación R (R Core Team, 2021), de acuerdo con los protocolos planteados en Lawson (2015), Bates y colaboradores (2015) y Oksanen y colaboradores (2020) para los análisis indicados.

Trampas, series de tiempo y correlaciones cruzadas. Se colocaron trampas de feromona en el interior y exterior de los cuarteles con el objetivo de establecer las relaciones espacio - temporales entre las capturas de polillas. Se utilizaron trampas con una concentración de feromona 10 veces mayor a la producida por una polilla hembra. Se emplearon trampas tipo delta y cebos comerciales (emisores de feromona femenina) ampliamente utilizados, marca Suterra®. En específico, se colocaron trampas tipo 14943 Large Plastic Delta (LPD) y en el interior de estas, se utilizó el cebo comercial CM 10x BioLure (BioLure®).

El monitoreo de las trampas se realizó 2 veces a la semana, desde el 28 septiembre del 2023 hasta el 15 de febrero del 2024, para un total de 41 registros. Con la información obtenida de estas trampas se elaboraron las series de tiempo. Se instalaron trampas en los Cuarteles 6 y 7 de acuerdo a la distribución que se presenta en la Figura 1. Es decir, se instalaron tres trampas por cuartel, las cuales fueron llamadas: Norte, Medio y Sur, de acuerdo a su ubicación en cada cuartel (ver Figura 1).

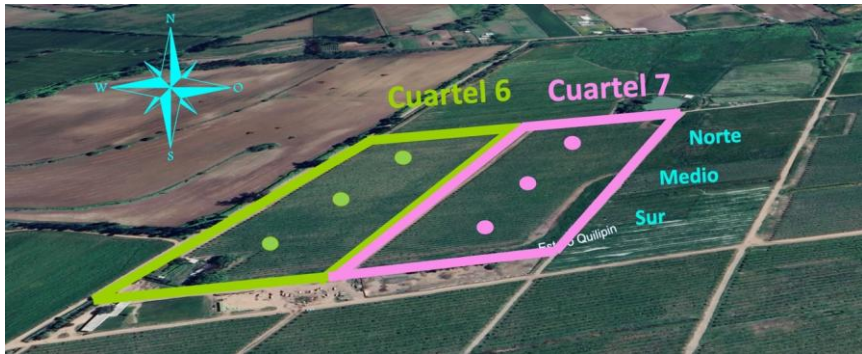


Figura 1. Distribución de trampas de feromona en los cuarteles 6 y 7. Perímetros de colores: Cuarteles. Círculos: Trampas de feromona (Imagen: modificada de Google Earth 35°43'59"S 71°34'01"W).

Las trampas en la periferia se ubicaron según la distribución que se presenta en la Figura 2. Para determinar la ubicación de estas, se tomaron en cuenta las siguientes características del campo: (1) Los Cuarteles 6 y 7 forman una sola estructura (bajo manejo orgánico), que es el agroecosistema de foco de este trabajo. (2) El agroecosistema de foco presenta una geometría aproximadamente rectangular (resaltada de color azul en la Figura 2). Por esta razón, se colocó una trampa en la parte exterior media de cada uno de sus 4 lados, para de esta forma monitorear el ingreso de polillas al agroecosistema.



Figura 2. Distribución de trampas de feromona externas al agroecosistema de foco. Perímetro azul: Agroecosistema de foco. Círculos azules: Trampas de feromona (Imagen: modificada de Google Earth 35°43'59"S 71°34'01"W).

De esta manera, encontramos que la trampa con la ubicación más al Sur, está asociada a una bodega en la cual se encuentra un farol que se enciende de noche (por esta razón se denomina a esta trampa Bodega, ver Figura 2). Es importante mencionar que la luz genera atracción sobre las polillas adultas (estas son de hábitos típicamente crepusculares). Por su parte, la trampa que se encuentra en el lado Oeste del agroecosistema, se denomina Centro Poniente (dado que se encuentra en el lado poniente del agroecosistema). Esta delimita con un campo de cultivos anuales. Es importante acotar, que la larva de la Polilla de la Manzana no se alimenta de cultivos anuales, sino de fruta de plantaciones de Manzanos, Perales, Membrilleros y Nogales. A continuación, se encuentra la trampa ubicada en el lado Este de la periferia. Es importante señalar que esta se ubica en un manzanal bajo manejo convencional (i.e., donde se aplican insecticidas sintéticos), plantado con la variedad Pink Lady (por esto se llama a esta trampa Pink Lady). Finalmente tenemos la trampa ubicada en el extremo Norte del agroecosistema, la cual se encuentra en un campo de Cerezos (por esto se la denomina Cerezos) bajo manejo convencional. Es importante acotar que la Polilla de la Manzana no se alimenta de este cultivo.

También se colocaron dos trampas en el exterior del agroecosistema, más allá de su periferia. Estas se ubicaron en sitios considerados importantes desde un punto de vista agroecológico. Se ubicó una trampa en un reservorio de vegetación no intervenida, denominado Isla Cerezos (ya que se encuentra en gran parte rodeado por este cultivo). Por esta razón se llamó a esta trampa Isla Cerezos. Es relevante señalar que este reservorio de vegetación presenta la mayor complejidad estructural vegetal (mayor riqueza de especies) de todo el predio. También es importante acotar que la Polilla de la Manzana no se alimenta de las especies presentes en este reservorio de vegetación. Finalmente, se ubicó una trampa en una plantación de membrilleros abandonada (por esa razón, esta trampa se denomina Membrillero). Se debe señalar que la Polilla de la Manzana se alimenta de este cultivo.

Producto del monitoreo de cada una de las trampas (internas y externas) antes mencionadas, se construyeron series de tiempo de las capturas obtenidas en ellas. A partir de estas series de tiempo se realizaron correlaciones cruzadas, entre aquellas que presentaron señal. Es decir, entre las series de tiempo asociadas a las trampas en las cuales se obtuvieron capturas.

Las correlaciones cruzadas que se presentan en este trabajo, se consiguieron utilizando la librería ASTSA (Stoffer y Poison, 2023) del ambiente de programación R (R Core Team, 2021), de acuerdo al protocolo planteado en Shumway y Stoffer (2019). Las series de tiempo que se utilizan en este artículo, así como el código empleado para su análisis, se encuentran disponibles en GitHub (<https://n9.cl/zb82y>).

RESULTADOS

Comparación entre cuarteles. El resultado de la comparación entre los cuarteles se resume con gráficos de violín, en estos se muestran los valores de las observaciones particulares como puntos. Se ha incluido una cruz para representar los valores de los promedios por cuartel. También incluye en los gráficos los resultados de las comparaciones en esquema de letras. En todos los casos las pruebas se efectuaron con un valor de alfa igual al 0,05. Además, se presenta con números el valor del promedio y entre paréntesis la desviación estándar. Como se puede apreciar en la Figura 3 (iguales letras sobre los cuarteles) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los cuarteles (ver resultados de las pruebas en la Tabla 1). Por lo tanto, se concluye que ambos cuarteles (en términos de Polilla de la Manzana) están asociados a una sola población del insecto (Montgomery, 2004).

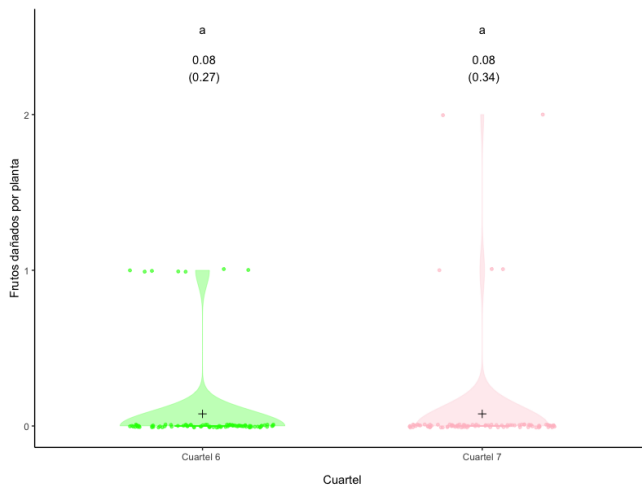


Figura 3. Número de frutos dañados por Polilla de la Manzana por árbol. Se presentan los datos con gráficos de violín. En cada caso los círculos representan las observaciones y el ancho de las curvas que forman los violines corresponde a la frecuencia aproximada de los datos en cada región.

Tabla 1. Resultados de las pruebas.

Prueba	Estadístico	P-valor
Suma de rangos de Mann-Whitney	W = 4133	0,59
Bondad de ajuste del Modelo Lineal Generalizado	$\chi^2 \approx 0$	0,85
Permanova	Pseudo-F = 0,038	0,86

Trampas y series de tiempo. En la Figura 4 se muestran las series de tiempo asociadas a las trampas internas a los cuarteles. En ambos cuarteles hubo trampas en las cuales no se realizaron capturas (i.e., Trampa Norte en el Cuartel 6 y Trampa Sur en el Cuartel 7). Las primeras capturas en los cuarteles ocurrieron en el Cuartel 6 a finales de octubre, siendo todas las demás posteriores a este mes.

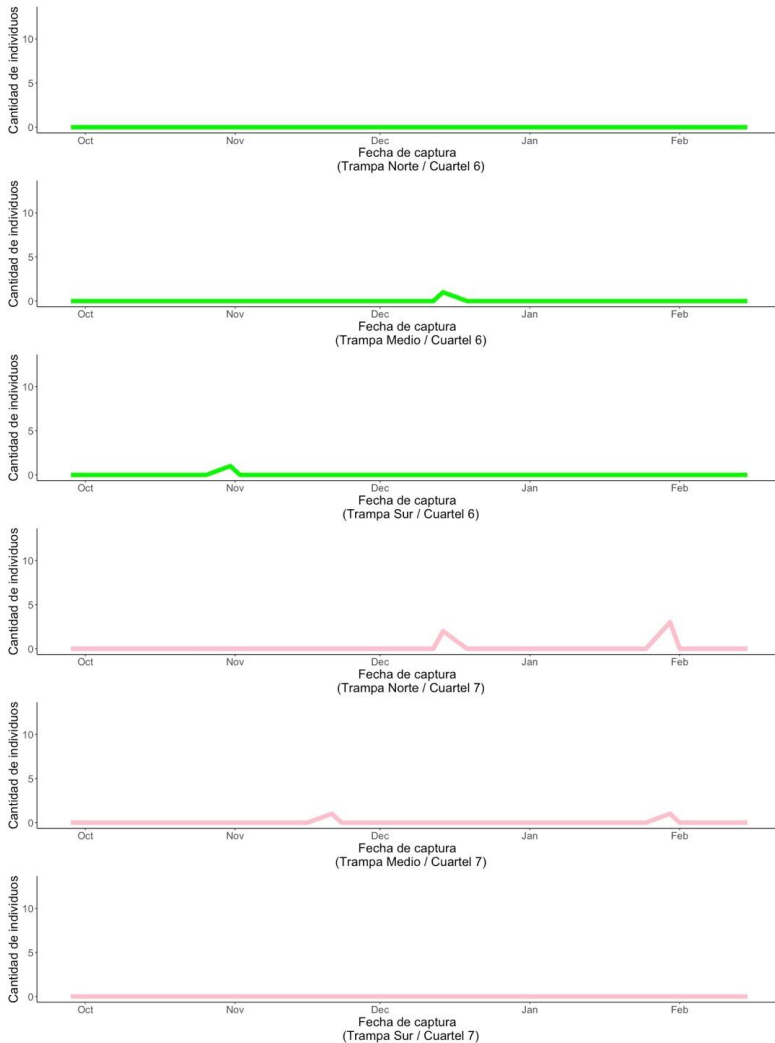


Figura 4. Series de tiempo de las capturas realizadas en las trampas de los cuarteles 6 y 7.

En la Figura 5 se presentan las series de tiempo asociadas a las trampas colocadas en el exterior de los cuarteles. En la figura se aprecia que no se obtuvieron capturas en las trampas ubicadas en la Bodega y en el cuartel de manzanas de la variedad Pink Lady bajo manejo convencional. Esta última observación es importante, porque sugiere que ese cuartel no actuó como fuente de polillas de la manzana durante el periodo muestreado. En la figura también se aprecia que las primeras capturas se realizaron a inicios de octubre en las trampas ubicadas en el Membrillero y en la plantación de Cerezos. Es importante destacar, que las mayores capturas están asociadas al Membrillero (ver Tabla 2). Estos dos, son los datos más importantes en este paso: (1) Ubicación de las primeras capturas. (2) Ubicación de las mayores capturas.

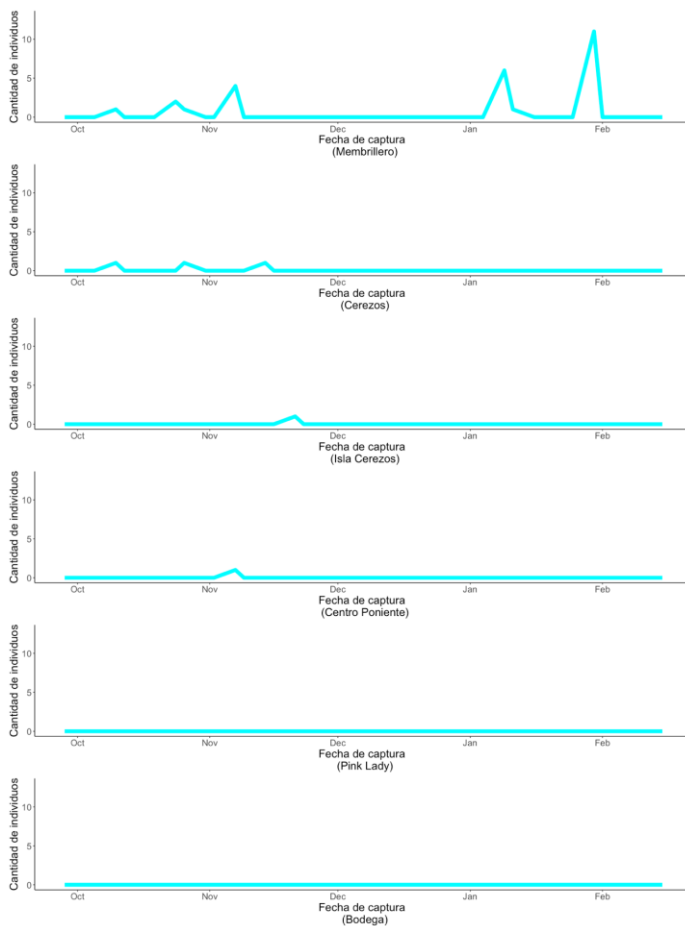


Figura 5. Series de tiempo de las capturas realizadas en las trampas exteriores.

Tabla 2. Captura total de Polilla de la Manzana por trampa.

Cuartel 6 Norte	Cuartel 6 Medio	Cuartel 6 Sur	Cuartel 7 Norte	Cuartel 7 Medio	Cuartel 7 Sur
0	1	1	5	2	0
Bodega	Centro Poniente	Pink Lady	Cerezos	Isla Cerezos	Membrillero
0	1	0	3	1	26

Resultados de las correlaciones cruzadas tabulados. En la Tabla 3 se muestran los valores de las correlaciones cruzadas. Se presentan los valores de las correlaciones cruzadas máximas entre las series de tiempo y los valores de retardo a los cuales estas ocurrieron. Solo se presentan correlaciones entre series de tiempo en las cuales ocurrieron capturas (i.e., series de tiempo que presentan señal). Se muestra el valor absoluto de los retardos. Se resaltan en negritas las combinaciones de valores altos de correlación (mayores a 0,9) y bajos de retardo (menores a 10). Esto quiere decir, que son trampas que están muy asociadas y que la relación entre ambas ocurre en poco tiempo (rápidamente). También se resalta en cursivas, la asociación existente entre el Membrillero y la Isla Cerezos, la cual presenta un valor de correlación importante, pero un retardo grande.

Tabla 3. Correlaciones cruzadas y retardos.

Trampas		Correlación	Retardo
Cuartel 6 (Medio)	Cuartel 6 (Sur)	0,991	13
Cuartel 6 (Medio)	Cuartel 7 (Norte)	0,815	13
Cuartel 6 (Medio)	Cuartel 7 (Medio)	0,71	7
Cuartel 6 (Medio)	Centro Poniente	0,993	11
Cuartel 6 (Medio)	Cerezos	0,551	9
Cuartel 6 (Medio)	Isla Cerezos	0,995	7
Cuartel 6 (Medio)	Membrillero	0,819	13
Cuartel 6 (Sur)	Cuartel 7 (Norte)	0,818	26
Cuartel 6 (Sur)	Cuartel 7 (medio)	0,692	6
Cuartel 6 (Sur)	Centro Poniente	0,999	2
Cuartel 6 (Sur)	Cerezos	0,573	4
Cuartel 6 (Sur)	Isla Cerezos	0,996	6
Cuartel 6 (Sur)	Membrillero	0,802	26
Cuartel 7 (Norte)	Cuartel 7 (Medio)	0,567	0
Cuartel 7 (Norte)	Centro Poniente	0,82	24
Cuartel 7 (Norte)	Cerezos	0,463	32
Cuartel 7 (Norte)	Isla Cerezos	0,809	20
Cuartel 7 (Norte)	Membrillero	0,662	0
Cuartel 7 (Medio)	Centro Poniente	0,573	20
Cuartel 7 (Medio)	Cerezos	0,392	32
Cuartel 7 (Medio)	Isla Cerezos	0,698	0
Cuartel 7 (Medio)	Membrillero	0,573	20
Centro Poniente	Cerezos	0,56	2
Centro Poniente	Isla Cerezos	0,997	4
Centro Poniente	Membrillero	0,804	24
Cerezos	Isla Cerezos	0,56	2
Cerezos	Membrillero	0,466	27
<i>Isla Cerezos</i>	<i>Membrillero</i>	<i>0,81</i>	<i>20</i>

Grafo de correlaciones. En la Figura 6 se presenta de forma gráfica las correlaciones entre las trampas. En la figura, los nodos de la red representan las trampas y el grosor de los vínculos entre estas, el grado de correlación. De esta manera se puede apreciar, por ejemplo, una alta correlación (vínculos gruesos) entre la trampa llamada Isla Cerezos con la trampa denominada Centro Poniente y con las trampas del Cuartel 6. En la figura también se aprecia una gran correlación (aunque menor a las anteriores) entre las trampas denominadas Isla Cerezos y Membrillero.

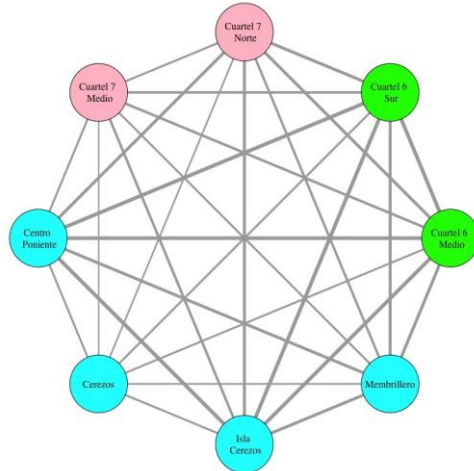


Figura 6. Correlaciones máximas entre las trampas. En esta figura los nodos representan las distintas trampas y el grosor de los vínculos entre los nodos, la magnitud de la correlación entre las trampas (vínculos más gruesos representan correlaciones mayores). Los colores de los nodos representan: Azul = Trampas externas, Verde = Trampas en el Cuartel 6 y Rosado = Trampas en el Cuartel 7.

Grafo de correlaciones y retardos. En la Figura 7 se incorporan los retardos, estos aparecen representados en la intensidad del tono de los vínculos. Los valores se representan en una escala de negro a gris. Retardos menores aparecen en negro intenso, mayores retardos se presentan en grises tenues. En esta figura se aprecia, por ejemplo, que hay poco retardo entre las trampas denominadas Cerezos e Isla Cerezos (el vínculo entre estas es de color negro intenso). En la Figura 2 (mapa del predio con la ubicación de las trampas externas), se puede constatar que estas trampas se encuentran muy cercanas. Además, en la Figura 2 también se aprecia que estas trampas se encuentran entre El Membrillero y los cuarteles 6 y 7. Es de hacer notar, que estas trampas (Cerezos e Isla Cerezos) están muy cercanas a los cuarteles, pero se encuentran distantes del Membrillero. Posiblemente por esta última razón, existe un retardo importante entre el Membrillero y la trampa presente en los Cerezos y también, aunque menor, con la trampa llamada Isla Cerezos.

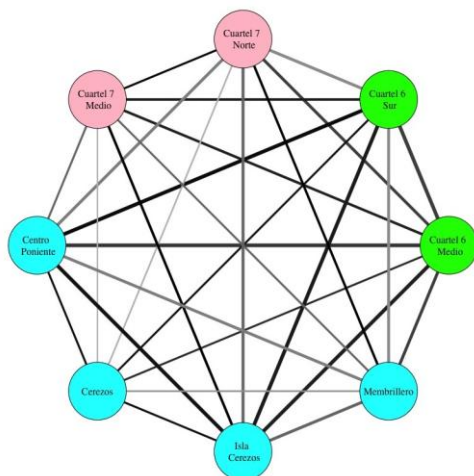


Figura 7. Correlaciones máximas y retardos entre las trampas. En esta figura los nodos representan las distintas trampas y el grosor de los vínculos entre los nodos, la magnitud de la correlación entre las trampas (vínculos más gruesos representan correlaciones mayores). El tono de los vínculos representa el valor del retardo asociado a la correlación. Retardos menores aparecen en tonos negros, retardos mayores en tonos grises. Los colores de los nodos representan: Azul = Trampas externas, Verde = Trampas en el Cuartel 6 y Rosado = Trampas en el Cuartel 7.

Grafo de correlaciones, retardos y capturas. En la Figura 8 se incluyen las capturas totales por trampa. Las capturas totales son representadas por el tamaño de los nodos (a mayor captura, mayor tamaño del nodo). Se aprecia que, con mucho, las mayores capturas se encuentran asociadas al Membrillero, seguido por las trampas del Cuartel 7 Norte y en los Cerezos.

En este último grafo se aprecia que las mayores capturas están asociadas al Membrillero (donde además ocurren las primeras capturas, ver Figuras 4 y 5). En este sentido, queda claro que es un nodo importante en este sistema. Es relevante acotar, que los mayores valores de correlación del Membrillero se establecen con la Trampa Media del Cuartel 6 (0,819) y con la trampa denominada Isla Cerezos (0,81).

La correlación del Membrillero con la Trampa Media del Cuartel 6, presenta un retardo de 13. Mientras que la correlación del Membrillero con respecto a la trampa llamada Isla Cerezos, presenta un retardo de 20. De esta manera, se aprecia que la asociación del Membrillero es más importante y rápida con el Cuartel 6, que con la trampa denominada Isla Cerezos. Esto posiblemente se debe a que en el reservorio de vegetación denominado Isla Cerezos no existen fuentes de alimento para las polillas (aunque este espacio pudiera funcionar como un refugio contra depredadores).

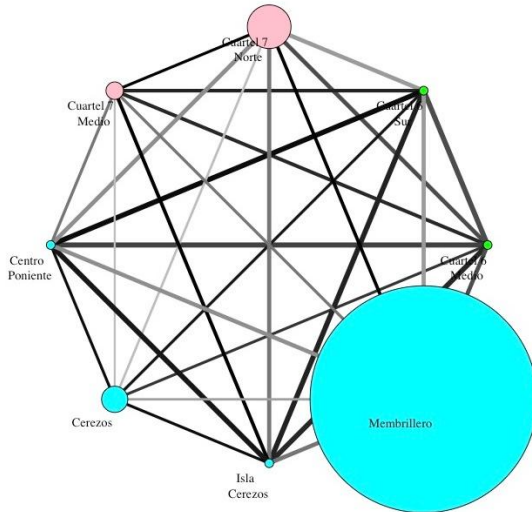


Figura 8. Capturas totales por trampas, correlaciones máximas y retardos entre las trampas. En esta figura los nodos representan las distintas trampas y el grosor de los vínculos entre los nodos, la magnitud de la correlación entre las trampas (vínculos más gruesos representan correlaciones mayores). El tono de los vínculos representa el valor del retardo asociado a la correlación. Retardos menores aparecen en tonos negros, retardos mayores en tonos grises. El tamaño de los nodos indica la cantidad de individuos capturados en cada trampa. Nodos grandes indican mayores capturas, nodos pequeños representan menores capturas. Los valores de las capturas totales por trampa son: Cuartel 6 Medio = 1, Cuartel 6 Sur = 1, Cuartel 7 Norte = 5, Cuartel 7 Medio = 2, Centro Poniente = 1, Cerezos = 3, Isla Cerezos = 1, Membrillero = 26. Los colores de los nodos representan: Azul = Trampas externas, Verde = Trampas en el Cuartel 6 y Rosado = Trampas en el Cuartel 7.

Es interesante mencionar, que existe una correlación bastante menor a las discutidas anteriormente, entre la trampa denominada Isla Cerezos y la trampa presente en el cultivo de cerezos (0,56). Lo mismo ocurre con la correlación entre el Membrillero y la trampa presente en el cultivo de cerezos (0,466). Este conjunto de resultados, sugiere que las polillas evitan detenerse en los espacios en los cuales no encuentran fuertes de alimento, aunque si éstos presentan complejidad estructural (como en el caso del reservorio de vegetación llamado Isla Cerezos) lo pueden hacer. Finalmente, es importante destacar que existe una altísima correlación entre la Trampa Sur del Cuartel 6 y a la trampa denominada Isla Cerezos (0,995). De esta forma, tomando en cuenta la información presentada, pareciera que este reservorio de vegetación juega un papel relevante en la dinámica del sistema.

DISCUSIÓN

Sobre el caso estudiado. Con base en los resultados presentados anteriormente, se puede construir una explicación posible de las dinámicas observadas en el conjunto de trampas evaluadas. En este

sentido, como se mostró en la comparación de los cuarteles, no existen diferencias entre estos en términos de frutos afectados. Por lo tanto, las polillas del manzano encontradas en estos cuarteles, pueden considerarse una sola población (Montgomery, 2004), que habita en lo que hemos denominado el agroecosistema de foco.

En las Figuras 4 y 5 se evidencia que las primeras capturas ocurrieron en las trampas del Membrillero y los Cerezos. Esta información, en conjunto con la magnitud de las capturas en el Membrillero (las mayores observadas), permiten postular que este sector (Membrillero) funciona como una fuente de polillas de la manzana en el sistema.

Tomando en cuenta los valores de las correlaciones y sus retardos (Tabla 3 y Figura 7) se puede proponer que este sistema funciona como una metapoblación. Es decir, como un conjunto de subpoblaciones locales, conectadas por eventos de migración (Hastings, 1998; Case, 1999; Vandermeer y Goldberg, 2003). En este caso, el sistema metapoblacional está compuesto por dos subpoblaciones, una en el Membrillero y otra en el agroecosistema de foco. Estas subpoblaciones están separadas por una matriz hostil (campo de cerezos, donde no hay fuentes de alimento y se aplican agrotóxicos), a través de la cual migran las polillas, desde Membrillero hacia el agroecosistema de foco (los cuales están separados por 322 metros entre sus bordes más cercanos). En este sentido, las capturas en las trampas en el campo Cerezos y en la Isla Cerezos, son evidencias de la migración antes mencionada.

Entonces, se propone que en este sistema existe una relación tipo fuente-sumidero de polillas de la manzana, entre Membrillero y el agroecosistema de foco, que es mediada por la matriz conformada por el campo de cerezos. De esta manera, queda claro que un objetivo de manejo es impedir la reproducción de las polillas en el Membrillero (Hussain *y col.*, 2014; Adams *y col.*, 2017; Curtiss *y col.*, 2023). Por lo tanto, para manejar adecuadamente la metapoblación de este insecto, es indispensable incluir en el esquema de manejo al Membrillero.

Sobre la metodología. Como se puede constatar en el ejemplo presentado, la aplicación de la metodología permite construir un relato útil sobre la invasión de la especie objetivo al agroecosistema. Es importante resaltar que para lograr esto es indispensable ubicar de forma acertada las trampas en campo (Vázquez y Álvarez, 2011; Altieri y Nicholls, 2018). Para lo cual es necesario hacer una lectura agroecológica del paisaje (León-Sicard, 2021.), que tome en cuenta: (1) Las características internas del agroecosistema, para de esta manera determinar la especie objetivo y los lugares en donde ubicar las trampas; (2) La relación del agroecosistema con su entorno, para determinar los puntos en los cuales ubicar las trampas de la periferia y (3) Conocimiento del entorno, para poder identificar los potenciales puntos externos que pueden jugar un rol relevante en la

dinámica de la especie objetivo. En este sentido, se recomienda asignar nombres a las trampas que hagan referencia a aspectos ecológicos y/o espaciales del lugar en el cual se encuentran, porque de esta manera se facilita mucho la interpretación de los resultados.

También es importante resaltar, que se obtuvieron pocas capturas en las trampas, pero que a pesar de esto la metodología permitió identificar la dinámica general del sistema. Esto habla bien de la sensibilidad de la metodología, con la cual, a partir de una baja señal (Venables y Ripley, 2002; Shumway y Stoffer, 2017, 2019; Stoffer y Poison, 2023) se puede construir un relato agroecológico que permite informar el manejo de una especie relevante.

Estos resultados nos reiteran, “*la irracional efectividad de las matemáticas*” para ayudarnos a comprender la naturaleza (Wigner, 1960). Esta indiscutible efectividad es la razón fundamental por la cual es necesario construir herramientas matemáticas, como la presentada aquí, para de esta manera impulsar la adopción de la agroecología a gran escala (Levins y Miranda, 2007; Vandermeer y Perfecto, 2018, Vandermeer, 2020). El uso de este tipo de herramientas facilita mucho la implementación del manejo ecológico a una escala, donde ha tenido bajo impacto hasta ahora (Reganold y Wachter, 2016; Pino y Griffon, 2024). Es importante tomar en cuenta que, a gran escala, existen decisiones de carácter logístico, que involucran grandes costos de producción, pero también la posibilidad de beneficiarse de economías de escala (Crowder y Reganold, 2015). Por lo que, a ese nivel, la optimización del uso de los recursos es importante, para lo cual es indispensable disponer de información adecuada. Esta información puede obtenerse mediante el desarrollo de eco-tecnologías específicas.

Finalmente, es importante destacar que los grafos que se obtienen mediante esta metodología, no son redes causales (Pearl, 2010; McElreath, 2016; Hernán y Robins, 2024) y se debe tener la cautela de no interpretarlos de esta manera. Las interpretaciones válidas de estos grafos, pasan en primer lugar por vincular los nodos a su ubicación espacial real, y luego, por unir esta información con los valores fundamentales que la metodología genera: (1) Lugares donde se realizan las primeras capturas, (2) Lugares donde se obtienen las mayores capturas y (3) Magnitudes y retardos obtenidos en las correlaciones cruzadas. Como se ha mostrado en el ejemplo presentado, una lectura ecológica adecuada de esta información, permite establecer aspectos fundamentales de la dinámica espacio-temporal de una especie en estudio.

CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología propuesta, permitió determinar la presencia de una estructura poblacional relevante para el manejo de una especie de importancia económica. En específico, en el sistema estudiado

se pudo establecer que la especie *Cydia pomonella* presenta una dinámica tipo fuente-sumidero, en la cual el agroecosistema de interés es invadido por individuos que migran a partir de un campo aledaño no manejado. Es importante destacar que, para obtener este tipo de resultados, la metodología presentada solo necesita datos fáciles de conseguir de forma económica. Gracias a la metodología propuesta se pueden tomar decisiones de manejo bien informadas sobre superficies de terreno de cualquier escala. Esto muestra su potencial para el manejo ecológico de plagas a gran escala. También señala los beneficios del desarrollo de eco-tecnologías, con basamento matemático, para impulsar la transición a gran escala hacia la agricultura ecológica.

AGRADECIMIENTOS

A Pilar Browne, Raúl Cordero y al equipo técnico de Agrícola Yerbas Buenas por permitirnos y ayudarnos realizar esta investigación. A Natalie Moreno y Maximiliano Muñoz por su ayuda en el trabajo de campo. A Suterra® por donar las trampas utilizadas en este trabajo y por orientarnos en su correcto empleo.

LITERATURA CITADA

- Adams, C.G., J.H. Schenker, P.S. McGhee, L.J. Gut, J.F. Brunner y J.R. Miller. 2017. Maximizing Information Yield From Pheromone-Baited Monitoring Traps: Estimating Plume Reach, Trapping Radius, and Absolute Density of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in Michigan Apple. *Journal of Economic Entomology* 110(2):305-318.
- Altieri, M.A. 1984. The ecology of insect pest control in organic farming systems: Toward a general theory. *Proc. 5th IFOAM International Conference*.
- Altieri, MA. y C.I. Nicholls. 2018. *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. Taylor Francis.
- Anderson, M.J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26(1):32-46.
- Bates, D., M. Mächler, B. Bolker y S. Walker. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*. 67(1):1-48.
- Benítez, M., J.A. Rosell e I. Perfecto. 2022. Editorial: Mathematical Modeling and Complex Systems in Agroecology. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:829551. doi: 10.3389/fsufs.2022.829551.
- Blackman, A. y J. Rivera. 2011. Producer-level benefits of sustainability certification. *Conservation biology* 25(6):1176-1185.
- Bolker, B.M., M.E. Brooks, C.J. Clark, S.W. Geange, J.R. Poulsen, H.H. Stevens y J.S. White. 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution* 24(3):127-135.
- Brockwell, P.J. y R.A. Davis. 1991. *Time Series: Theory and Methods*. Springer.
- Case, T.J. 1999. *An illustrated guide to theoretical ecology*. Oxford University Press.
- Chatfield, C. y X. Haipeng. 2019. *The Analysis of Time Series An Introduction with R*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Crowder, D.W. y J.P. Reganold. 2015. Financial competitiveness of organic agriculture on a global scale. *PNAS* 112 (24):7611-7616.

- Curtiss, R.T., I. Nottingham, C.G. Adams y L.J. Gut. 2023. Estimating plume reach and trapping radii for male and female *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) captured in pheromone-kairomone baited traps in Washington State apple orchards under mating disruption. *Journal of Economic Entomology* 116(5):1592–1603.
- Dag, O. y O. Ilk, 2017. An Algorithm for Estimating Box-Cox Transformation Parameter in ANOVA. *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 46(8):6424–6435.
- Daniel, W. 1994. *Bioestadística: base para el análisis de las ciencias de la salud*. Uteha.
- Durham, T.C. y T. Mizik. 2021. Comparative Economics of Conventional, Organic, and Alternative Agricultural Production Systems. *Economies*. 9, 64. <https://doi.org/10.3390/economies9020064>.
- Falconer, D.S. Mackay, T.F.C. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics*. Longmans Green, Harlow, Essex, UK.
- Fouilleux, E., A. 2017. Loconto, Voluntary standards, certification, and accreditation in the global organic agriculture field: a tripartite model of technopolitics. *Agric Hum Values*. 34:1–14.
- Futuyma, D.J. 1986. *Evolutionary Biology*. Sinauer Associates.
- Griffon, D. 2008. Estimación de la biodiversidad en la Agroecología. *Agroecología* 3: 25–31.
- Hamilton. M.B. 2009. *Population Genetics*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hart, D.L. 2020. *A Primer of Population Genetics and Genomics*. Oxford University Press.
- Harwood, J. 2019. Was the Green Revolution intended to maximise food production? *International Journal of Agricultural Sustainability*. 17(4):312–325.
- Hastings, A. 1998. *Population biology concepts and models*. Springer.
- Heidegger, M. (originalmente publicado en 1924) 2008. *El concepto de tiempo*. Barcelona: Herder.
- Hernán, M.A. y J.M. Robins. 2024. Causal inference. CRC Press /Taylor & Francis Group.
- Horner, R.M., P.L., Lo, D.J., Rogers, J.T.S. Walker y D.M. Suckling. 2020. Combined Effects of Mating Disruption, Insecticides, and the Sterile Insect Technique on *Cydia pomonella* in New Zealand. *Insects* 11:837.
- Hussain, B., B. Ahmad y S. Bilal. 2014. Monitoring and Mass Trapping of the Codling Moth, *Cydia pomonella*, by the Use of Pheromone Baited Traps in Kargil, Ladakh, India. *International Journal of Fruit Science*. 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15538362.2013.819207>.
- Jacob, M.C. 2019. *The Newtonians and the English revolution, 1689-1720*. Branch Line.
- John, D.A. y G.R. Babu. 2021. Lessons From the Aftermaths of Green Revolution on Food System and Health. *Front. Sustain. Food Syst*. 5:644559. doi: 10.3389/fsufs.2021.644559.
- Jouzi, Z., H. Azadi, F. Taheri, K. Zarafshani, K. Gebrehiwot, S. Van Passel y P. Lebailly. 2017. Organic Farming and Small-Scale Farmers: Main Opportunities and Challenges, *Ecological Economics* 132: 144–154.
- Konopka, J.K., I.M. Scott y J.N. McNeil. 2012. Costs of Insecticide Resistance in *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae), *Journal of Economic Entomology* 105(3):872–877.
- Kremen, C., A. Iles y C. Bacon. 2012. Diversified Farming Systems: An Agroecological, Systems-based Alternative to Modern Industrial Agriculture. *Ecology and Society* 17(4).
- Kumar, S. y N.C. Pant. 1982. Ecological approach to pest problems. *Agricultural entomology* 1: 18–43.

- Kvasz, L. 2016. Revisiting the Mathematisation Thesis: Galileo, Descartes, Newton, and the Language of Nature. *International Studies in the Philosophy of Science*. 30(4):399–406.
- Lawson, J. 2015. *Design and Analysis of Experiments with R*. Chapman & Hall/CRC.
- León-Sicard, T. 2021. *La Estructura Agroecológica Principal de los agroecosistemas, Perspectivas teórico-prácticas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Levins, R. 1969. Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *Bulletin of the Entomological Society of America* 15:237–240.
- Levins, R. 2006. A whole-system view of agriculture, people, and the rest of nature. En: *Agroecology and the struggle for food sovereignty in the Americas* (A. Cohn, J. Cook, M. Fernández, R. Reider y C. Steward, Eds.). Nottingham, Russell Press, pp. 34-49.
- Levins, R. y J. Vandermeer. 1990. The agroecosystem embedded in a complex ecological community. En: Carroll R.C., Vandermeer J. and Rosset P., eds., *Agroecology*, New York: Wiley and Sons.
- Levins, R. y M. Wilson. 1980. Ecological theory and pest management. *Annual Review of Entomology*. 25: 287-308.
- Levins, R. e I. Miranda. 2007. Mathematical models in crop protection. *Rev. Protección Veg.* 22:1-17.
- Massimi, M. 2010. Galileo's Mathematization of Nature at the Crossroad between the Empiricist and the Kantian Tradition. *Perspectives on Science*18(2):152–188.
- May, R.M. 2004. Uses and abuses of mathematics in biology. *Science*. 303(5659):790-3.
- McElreath, R. 2016. *Statistical Rethinking A Bayesian Course with Examples in R and Stan*. Chapman and Hall/CRC.
- Meemken, E. y M.M. Qaim. 2018. Organic Agriculture, Food Security, and the Environment. *Annual Review of Resource Economics* 10:39-63.
- Montgomery, D.C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley.
- Niggli, U. 2015. Sustainability of organic food production: challenges and innovations. *Proceedings of the Nutrition Society* 74(1):83-88.
- Oksanen, F.J. y col. 2020. *Vegan: Community Ecology Package*. R package Version 2.4-3. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Ozlu, E., F.J. Arriaga, S. Bilen, G. Gozukara y E. Babur. 2022. Carbon Footprint Management by Agricultural Practices. *Biology* 11:1453.
- Pajač, I., I. Pejić y B. Barić. 2011. Codling Moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) – Major Pest in Apple Production: An Overview of its Biology, Resistance, Genetic Structure and Control Strategies. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 76(2):87-92.
- Pandey, D. y M. Agrawal. 2014. Carbon Footprint Estimation in the Agriculture Sector. En: Muthu, S. *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*. Volume 1. EcoProduction. Springer, Singapore.
- Patel, R. 2012. The Long Green Revolution. *The Journal of Peasant Studies* 40(1): 1–63.
- Pearl, J. 2010. An Introduction to Causal Inference. *The International Journal of Biostatistics* 6(2).
- Perez, N. y L.L. Vazquez. 2002. Ecological pest management. *Sustainable agriculture and resistance: transforming food production in Cuba* 109-143.
- Pimentel, D. 1976. The ecological basis of insect pest, pathogen and weed problems Origins of pest, parasite, disease and weed problems. *18th Symposium of the British Ecological Society*. 3-31.
- Pino, C. y D. Griffon. 2024. Scaling up: microbiome manipulation for climate change adaptation in large organic vineyards. *Front. Sustain. Food Syst.* 8:1285981.

- Principe, L. 2011. *The scientific revolution: A very short introduction*. Oxford University Press.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.
- Reganold, J. y J. Wachter. 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants* 2:15221.
- Roelofs, W., A. Comeau y A. Hill. 1971. Sex Attractant of the Codling Moth: Characterization with Electroantennogram Technique. *Science*. doi:10.1126/science.174.4006.297.
- Scialabba, N.E.-H. y M. Müller-Lindenlauf. 2010. Organic agriculture and climate change. *Renewable Agriculture and Food Systems* 25(2):158-169.
- Shapin, S. 2018. *The scientific revolution*. University of Chicago Press.
- Shumway, R.H. y D.S. Stoffer. 2019. *Time Series: A Data Analysis Approach Using R*. Chapman-Hall.
- Steel, R. y J. Torrey. 1988. *Bioestadística: principios y procedimientos*. McGraw-Hill.
- Stoffer, D. y N. Poison, 2023. *Applied Statistical Time Series Analysis*. <https://github.com/nickpoison/astsa>.
- Struik, P.C. y T.W. Kuyper. 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37:39.
- Tomazella, C.T. y C.C. Silva. 2020. The Roles of Mathematics in the History of Science: The Mathematization Thesis. *Transversal: International Journal for the Historiography of Science* (8):6-25.
- Tshernyshev, W.B. 1995. Ecological pest management General approaches. *Journal of Applied Entomology*. 119(5):379-381.
- UE. 2021. Reglamento de ejecución (UE) 2021/1165 de la comisión de 15 de julio de 2021 por el que se autorizan determinados productos y sustancias para su uso en la producción ecológica y se establecen sus listas (Texto pertinente a efectos del EEE). Diario Oficial de la Unión Europea. Document 32021R1165. <https://eur-lex.europa.eu/legal>.
- van Hemmen, J.L. 2021. Mathematization of nature: how it is done. *Biol Cybern* 115:655-664.
- Vandermeer, J. 1992. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press.
- Vandermeer, J. 2020. Confronting Complexity in Agroecology: Simple Models From Turing to Simon. *Front. Sustain. Food Syst.* 4:95.
- Vandermeer, J. e I. Perfecto. 2018. *Ecological Complexity and Agroecology*. Routledge.
- Vandermeer, J.H. y D.E. Goldberg. 2003. *Population Ecology: First Principles*. Princeton University Press.
- Vázquez, L. y J.M. Álvarez. 2011. *Control ecológico de poblaciones de plagas*. CIDISAV.
- Venables, W.N. y B.D. Ripley. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Springer-Verlag.
- Walker, J., P. Lo. R. Horner, N. Park, J. Hughes y T. Fraser. 2013. Codling moth (*Cydia pomonella*) mating disruption outcomes in apple orchards. *New Zealand Plant Protection*. 66:259-263.
- Weyl, H. 2021. *Philosophy of mathematics and natural science*. Princeton University Press.
- Wigner, E.P. 1960. The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 13(1):1-14.
- Wootton, D. 2016. *The invention of science: A new history of the scientific revolution*. Harper Perennial.