

PREDECIR EL FUTURO: EL PODER DE LA MODELIZACIÓN

COMO INDIVIDUOS, NOS RESULTA DIFÍCIL SENTIR QUE PODEMOS HACER ALGO CON RESPECTO A LOS RETOS GLOBALES, COMO EL CAMBIO CLIMÁTICO, LAS PANDEMIAS, LA RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS O LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ALIMENTOS. DICHS RETOS SON INCREÍBLEMENTE COMPLEJOS, YA QUE IMPLICAN A GOBIERNOS Y OTROS ORGANISMOS, Y ESTÁN INFLUIDOS POR LAS TENDENCIAS ECONÓMICAS Y LOS FACTORES MEDIOAMBIENTALES, LO QUE HACE QUE SEAN IMPREVISIBLES. AUNQUE ES DIFÍCIL PREDECIR EL FUTURO DE MANERA FIABLE, LA MODELIZACIÓN PROPORCIONA UNA HERRAMIENTA ÚTIL PARA HACER PREDICCIONES (POSIBLES RESULTADOS) BASADAS EN LO QUE SABEMOS O SUPONEMOS.

GLOSARIO

ALELO — dos o más formas de un gen que determinan ciertos rasgos observables, como la resistencia o vulnerabilidad a un insecticida, o el color del pelo

COEFICIENTE — valor que describe la importancia/peso relativo de los parámetros en un modelo

COSTE DE APTITUD — el «coste» de desarrollar una resistencia. Por ejemplo, los individuos resistentes pueden tener menos descendencia o vivir menos tiempo, lo que significa que los individuos no resistentes pueden tener una ventaja competitiva sobre los resistentes cuando no se utiliza el insecticida en cuestión

CROMOSOMA — parte de las células humanas, animales y vegetales que lleva la información hereditaria en forma de genes

CUANTIFICABLE — algo que se puede medir

DINÁMICA DE POBLACIONES — estudio de los cambios en las poblaciones a lo largo del tiempo o del espacio

ECOLOGÍA — estudio de las relaciones entre los organismos y su entorno físico

EMIGRACIÓN — acto de los individuos de abandonar una población determinada

ENTOMOLOGÍA — estudio de los insectos

FRECUENCIA DEL ALELO DE RESISTENCIA — la frecuencia del alelo que crea la resistencia genética contra un determinado insecticida

GEN — lugar de un cromosoma que se hereda de los padres. Cada gen puede tener dos o más formas, que se denominan alelos

GENOTIPO — disposición de los genes que determina los potenciales y las limitaciones hereditarias de un organismo

INMIGRACIÓN — acto de incorporación de individuos a una población determinada

INSECTICIDA — sustancia que mata a los insectos

MODELO — en ciencia, una representación matemática de cómo uno o varios parámetros provocan un cambio de criterio

PARÁMETRO — elemento medible de un modelo

RESISTENCIA — capacidad de un organismo de resistir a (no morir por) una determinada amenaza

TASA DE MORTALIDAD — proporción de defunciones registradas en una población (lo contrario de la tasa de supervivencia)

TASA DE REPRODUCCIÓN — el número de crías que produce cada hembra en cada generación

TASA DE SUPERVIVENCIA — proporción de individuos vivos en una población (lo contrario de la tasa de mortalidad)

UNIVOLTINO — se refiere a los organismos que sólo pueden tener una descendencia al año

VARIABLE — elemento que cambia y afecta a un resultado concreto



DR CHRISTIAN NANSEN

Profesor de Entomología y Nematología,
Colegio de Agricultura y Medio
Ambiente, Universidad de California,
Davis, EE. UU.



CAMPO DE INVESTIGACIÓN

Ecología y gestión de insectos



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo de una herramienta
didáctica interactiva que describa
la evolución de la resistencia y los
aspectos económicos básicos de la
gestión de plagas con insecticidas

El Dr. Christian Nansen es profesor del Departamento de Entomología y Nematología de la Universidad de California, Davis. Su enseñanza, tutoría e investigación se centran en la creación de capacidades y soluciones innovadoras en los ámbitos de la producción alimentaria sostenible y la gestión de plagas. En investigaciones anteriores, Christian había trabajado con drones, robótica, visión artificial, aplicaciones telefónicas y otras tecnologías. Recientemente, ha desarrollado un modelo de libre acceso para estudiar la evolución de la resistencia a los insecticidas y predecir los resultados basándose en información fácilmente disponible.

Piense en el béisbol, o en cualquier otro deporte de competición, e imagine que un equipo está ganando muchos partidos y es posible que incluso gane un campeonato al final de la temporada. Se trata de un reto muy complejo, que implica tener en cuenta el rendimiento de todos los diferentes jugadores del equipo, las estrategias defensivas y ofensivas durante un partido largo (nueve entradas) y las cualidades de otros equipos competidores.

Es posible que esté pensando que nadie puede predecir quién ganará. «Es cierto que nadie puede hacer una predicción fiable al 100%, pero resulta que un partido de béisbol puede ‘descomponerse’ en una compleja secuencia o red de acontecimientos individuales, y cada uno de ellos puede describirse matemáticamente», explica Christian.

«Hay una película muy popular y basada en hechos reales que se llama Moneyball. Trata sobre cómo un director general de un equipo de béisbol (los Oakland Athletics) contrató a un genio de la modelización que desarrolló un modelo matemático que podía predecir qué jugadores elegir en el equipo y cómo jugar para maximizar su probabilidad de ganar partidos», afirma. «Les recomiendo encarecidamente que vean esta película y que, mientras la ven, piensen en cómo y por qué es mucho más que una película sobre béisbol», concluye.

En este artículo, se utiliza como caso de estudio un modelo de libre acceso sobre la evolución de la resistencia a los insecticidas. Pero, al igual que Moneyball es una película que trata sobre mucho más que del hecho de cómo ganar partidos de béisbol, el modelo que describe la evolución de la resistencia a los insecticidas se utiliza para hablar sobre algo de una mayor relevancia. El objetivo es demostrar el propósito y la importancia de la modelización en el aula. Como marco básico, la modelización puede enseñarse para capacitar e inspirar a las futuras generaciones de científicos, profesores y responsables de la toma de decisiones.

LA MODELIZACIÓN EN LA VIDA DIARIA

Aunque no nos demos cuenta, cada vez que tomamos una decisión y/o realizamos una acción, estamos haciendo predicciones del modelo. «Por ejemplo, cuando vamos en bicicleta, elegimos ir por la carretera», dice Christian. «Nuestra experiencia nos dice que es mejor circular por una carretera que intentar atravesar una casa», concluye.

Nuestras experiencias también nos dan una serie de «reglas» que seguimos para actuar adecuadamente en diferentes situaciones. Circular en bicicleta por las calles del Reino Unido y de EE. UU. es bastante diferente, y uno se da cuenta rápidamente. En el Reino Unido, el tráfico está en el lado izquierdo, mientras que en EE. UU. está en el lado derecho. Por lo tanto, se utilizan diferentes modelos para maximizar nuestra seguridad al circular en bicicleta en los distintos países, y los modelos matemáticos funcionan de la misma manera.

«Los modelos se adaptan a las condiciones locales y eso conduce a resultados específicos. Cuanta más información introduzcamos en el modelo, más probable será que éste represente nuestro conjunto actual de conocimientos sobre el reto en cuestión», explica Christian. «Si un modelo es detallado, es decir, incluye muchos parámetros, también es más probable que produzca predicciones significativas y útiles», concluye.

A la hora de hacer predicciones sobre cuestiones complejas, es importante recordar que los modelos nunca son 100% precisos, sino que llevan asociado cierto grado de «error» (inexactitud). «Tome como ejemplo su salud», dice Christian. Sabemos por experiencia y educación que el ejercicio es bueno para nuestra salud, y que fumar y tomar alcohol son malos para nuestra salud, así que podemos ‘predecir’ que adoptar el hábito de fumar, por ejemplo, afectará negativamente a nuestra salud», concluye.

Gracias a décadas de estudios científicos, sabemos que es probable que el tabaquismo tenga un impacto más significativo en nuestra salud que otros hábitos poco saludables, como el consumo de café o de refrescos azucarados. No obstante, no es 100% seguro que los fumadores enfermen o mueran más jóvenes que los no fumadores, porque hay muchas variables que determinan nuestra salud.

Por ejemplo, el café o los refrescos azucarados pueden ser especialmente perjudiciales para ciertas personas con otras condiciones de salud. «Sin embargo, podemos hacer recomendaciones generales basadas en lo que sabemos y en lo que es más probable que ocurra», explica Christian. «Y luego podemos

«EL MISMO DESAFÍO ESTÁ EVOLUCIONANDO EN LA AGRICULTURA; LAS PLAGAS DE INSECTOS QUE CAUSAN DAÑOS AL GANADO O A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CULTIVOS EVOLUCIONAN CON RESISTENCIA A LOS INSECTICIDAS UTILIZADOS PARA CONTROLARLOS».



desarrollar modelos específicos para niños, hombres, mujeres u otros grupos demográficos concretos; así es precisamente como los relojes de fitness modelan nuestra salud y nos dan sugerencias de cómo mantenernos sanos», concluye.

MODELIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A LOS INSECTICIDAS

«La ciencia que sustenta este modelo implica una comprensión general de la genética, los procesos evolutivos, la dinámica de las poblaciones de insectos y la economía de la producción de cultivos y la gestión de plagas», explica Christian. Esto significa que se sabe que una amplia gama de variables diferentes, biológicas y económicas, interactúan de forma compleja e influyen en la probabilidad de que

una población de plagas de insectos concreta desarrolle resistencia a un insecticida a lo largo de generaciones.

«Mucha gente entiende las preocupaciones y los riesgos asociados a la resistencia a los antibióticos; ciertos medicamentos ya no son capaces de protegernos contra las infecciones bacterianas porque las bacterias han desarrollado resistencia», dice Christian. «El mismo desafío está evolucionando en la agricultura; las plagas de insectos que causan daños al ganado o a los sistemas de producción de cultivos evolucionan hacia la resistencia a los insecticidas utilizados para controlarlos», explica. Se supone que este gen tiene dos alelos, que son dos formas del gen. Estas formas son 'R' (resistente) o 'S' (susceptible).

Como casi todos los insectos son diploides (tienen dos juegos completos de cromosomas), significa que, para este gen, todos los insectos tienen uno de estos tres genotipos: SS, SR o RR. Aunque los genotipos pueden entrecruzarse, se supone que tienen diferentes parámetros de crecimiento (por ejemplo, cuánto tiempo viven, cuántos huevos ponen o las tasas de supervivencia de las diferentes etapas de la vida). Otro aspecto de vital importancia para predecir la evolución de la resistencia es obtener información sobre las frecuencias alélicas: ¿cómo de raro es el alelo de resistencia?

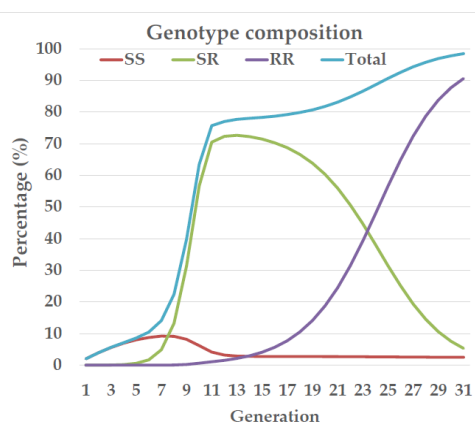
«Cuando se aplica un insecticida a un cultivo, éste actúa como una presión de selección sobre la población de la plaga: matará a los individuos que son susceptibles, pero no a los

a

Carrying capacity (K)	1000			
R allele frequency	0.001			
		SS	SR	RR
Survival (W) (<=1)	0.20	0.70	1.00	
Fitness cost (F) (<=1)	0.00	0.00	0.00	
Reproductive rate (R)	5.00	5.00	5.00	
Emigration (0<= & <100)	2.00	2.00	2.00	
Immigration (0<= & <100)	2.00	2.00	2.00	
EIL	0			
Damage rate (>0)	0.00			
Treatment cost (\$)	0.00			
Yield potential (\$)	0.00			

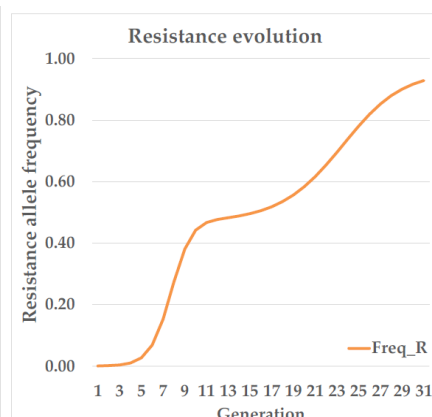
La tabla (a) muestra la genética (verde) y la economía básica de la gestión de plagas (azul)

b



El gráfico (b) muestra la composición de los genotipos

c



El gráfico (c) muestra la frecuencia de los alelos de resistencia a lo largo de 30 generaciones discretas y univoltinas

que (en función de su comportamiento único o de su composición genética) son resistentes», explica Christian. Si uno de cada cinco (20%) de los individuos de la plaga es resistente, entonces, en unas pocas generaciones, la población total será completamente resistente, ya que se trata de un nivel de resistencia muy alto. En la mayoría de los casos estudiados, las frecuencias de los alelos de resistencia son de 1 en 1 000 (0,001 - 99,9% son susceptibles), por lo que se necesitan 10 o más generaciones antes de que los alelos de resistencia sean abundantes en las poblaciones de insectos. No obstante, no es sólo la frecuencia de los alelos de resistencia lo que determina la rapidez con la que se desarrolla la resistencia.

Cuando compra desinfectantes para limpiar superficies en baños o cocinas, a menudo verá en la etiqueta que se supone que estos productos matan el 99,99% de los gérmenes, bacterias o patógenos (sea cual sea el término que utilicen para describir a «los malos»), por lo que sólo sobrevive 1 de cada 10 000. Esto suena excelente, pero si hay 1 millón de bacterias malas en una superficie de la cocina (lo cual es posible), ¡100 bacterias ($0,0001 \times 1\,000\,000$) sobrevivirán a la limpieza!

La primera vez que se utilice el agente de limpieza, la población bacteriana se reducirá considerablemente, pero podrá recuperarse gradualmente si se permite que los individuos resistentes prosperen y se multipliquen, y si tienen una alta tasa de crecimiento. Christian explica que, si lo hacen, es probable que se haya producido un cambio en la composición genética de la población: antes de la limpieza, la gran mayoría eran SS, mientras que después de varias generaciones y de la presión de selección por parte del agente limpiador, la población bacteriana se vuelve predominantemente muy resistente (RR).

«Por lo tanto, cuando los antibióticos 1) se recetan con demasiada frecuencia a los pacientes y 2) se administran en exceso al ganado para estimular el crecimiento y protegerlo contra las

infecciones, la resistencia a los antibióticos se convierte en un problema», afirma Christian. «Y del mismo modo, si los productos de limpieza bacterianos se utilizan ampliamente y en exceso, pueden perder su efecto con el tiempo por la misma razón», concluye.

UN DESAFÍO DEL MUNDO REAL

Existe un dilema fundamental en la atención sanitaria y la gestión de plagas en la agricultura: queremos utilizar los medicamentos, los productos de limpieza y los pesticidas más eficaces. Sin embargo, los productos más eficaces sólo deben utilizarse como último recurso, ya que, si se emplean con demasiada frecuencia y amplitud, las enfermedades humanas, los patógenos de superficie o las plagas de los cultivos pueden desarrollar resistencia.

Debido a este dilema básico, se puede utilizar la modelización para optimizar el uso de un insecticida con el fin de lograr el mayor nivel de control de plagas a lo largo del tiempo y, al mismo tiempo, minimizar el riesgo de que las poblaciones de plagas desarrollen resistencia. Ese es el desafío biológico básico, al que luego podemos añadir una dimensión económica para optimizar la sostenibilidad económica de la gestión de plagas.

«A estas alturas, espero que puedan apreciar que, aunque la modelización de los efectos del cambio climático y la minimización de los riesgos de la evolución de la resistencia a los insecticidas son diferentes de la modelización de los resultados de los partidos de béisbol, ¡hay sorprendentes similitudes!», afirma dice Christian. «Tenemos un gran interés en predecir los resultados, estos retos son muy complejos, y cada uno de ellos se puede desglosar en una serie de parámetros en un modelo».

Christian explica que, en el modelo de evolución de la resistencia a los insecticidas, décadas de investigación han proporcionado una amplia visión de las variables críticas; éstas incluyen la tasa de reproducción, la

tasa de inmigración, la tasa de emigración, la frecuencia de alelos resistentes y el coste de la aptitud. Estas y otras variables se han incluido como parámetros en el modelo, y pueden examinarse en diferentes combinaciones. El modelo está disponible gratuitamente como hoja de cálculo interactiva de Excel. «A través de la experiencia práctica con ésta y otras herramientas didácticas interactivas similares, los estudiantes adquirirán conocimientos fundamentales sobre los modelos básicos de población y ganarán experiencia con la interpretación de datos cuantitativos», explica Christian. El modelo puede descargarse gratuitamente desde la página web de Christian (chrnansen.wixsite.com/nansen2/teachingtool), que también ofrece un vídeo tutorial sobre el uso del modelo.

MODELIZACIÓN Y ENSEÑANZA

Christian cree que los profesores y los alumnos se beneficiarán de la herramienta de enseñanza interactiva. «Los profesores pueden utilizar la herramienta interactiva para demostrar cómo los modelos pueden ayudar a visualizar interacciones complejas», afirma Christian. «Los alumnos pueden utilizar la herramienta para probar diferentes escenarios y observar los efectos de los cambios de parámetros», explica.

En lugar de un proceso de aprendizaje centrado en la memorización, la herramienta didáctica anima a los alumnos a pensar por qué los distintos escenarios conducen a resultados diferentes y cómo se puede influir en ellos. Muchos jóvenes expresan una profunda ansiedad sobre el futuro del mundo y, a menudo, con razón.

Christian cree que los modelos pueden ayudar a abordar estas preocupaciones. «Los modelos ayudan a mostrar que el futuro es en cierto modo 'predecible', lo que significa que ciertos resultados pueden evitarse», afirma Christian. «Esto muestra a los estudiantes que, siempre que ajustemos las variables subyacentes, tenemos el poder de cambiar el futuro», concluye.

«A TRAVÉS DE LA EXPERIENCIA PRÁCTICA CON ÉSTA Y OTRAS HERRAMIENTAS DIDÁCTICAS INTERACTIVAS SIMILARES, LOS ESTUDIANTES ADQUIRIRÁN CONOCIMIENTOS FUNDAMENTALES SOBRE LOS MODELOS BÁSICOS DE POBLACIÓN Y GANARÁN EXPERIENCIA CON LA INTERPRETACIÓN DE DATOS CUANTITATIVOS».