

TÍTULO DE LA TESIS DOCTORAL:

Spatial models for the analysis of plant disease epidemics and their control

DOCTORANDA: Martina Cendoya Martínez

PROGRAMA DE DOCTORADO: Estadística y Optimización (Universitat de València, UV).

DIRECTORES: Dr. David V. Conesa Guillén (UV) y Dr. Antonio Vicent Civera (IVIA)

FECHA Y LUGAR DE LECTURA: 8 de febrero de 2024. Facultad de Ciencias Matemáticas, Burjassot (Universitat de València, UV).

COMPOSICIÓN DEL TRIBUNAL: Dr. Virgilio Gómez Rubio (Presidente), Dra. Ana Corberán Vallet (Secretaria), Dr. Fernando García-Arenal Rodríguez (Vocal).

CALIFICACIÓN: Sobresaliente *cum laude*

RESUMEN

El crecimiento exponencial del comercio global y de los viajes internacionales, junto con el cambio climático, han tenido un impacto importante en la introducción y propagación de plagas y patógenos de plantas en todo el mundo. Esta situación representa una amenaza creciente para la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica a escala global. Por lo tanto, comprender los factores que intervienen en la entrada, establecimiento y dispersión de los patógenos vegetales, así como analizar la dinámica de las enfermedades que causan, es crucial para prevenir y gestionar eficazmente nuevos brotes y minimizar su impacto.

En la última década, la bacteria fitopatógena *Xylella fastidiosa* ha provocado una crisis fitosanitaria en la Unión Europea (UE). Este patógeno afecta a una amplia gama de especies vegetales, incluyendo, entre otros, a dos de los cultivos mediterráneos más importantes, olivo y almendro. Su forma natural de dispersión es mediante insectos vectores que se alimentan del xilema de las plantas, pero también puede propagarse mediante el movimiento de material vegetal infectado. En la UE, *X. fastidiosa* se notificó por primera vez en 2013 en Italia, y desde entonces se han detectado múltiples brotes en varios países. La regulación en vigor establece una vigilancia reforzada basada en el riesgo para la detección temprana de nuevas introducciones, así como planes de contingencia y acción para la gestión de brotes. Además, las estrategias de vigilancia deben seguir las directrices de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) para la realización de prospecciones estadísticamente sólidas y basadas en el riesgo.

El objetivo general de esta tesis ha sido proporcionar distintas herramientas de modelización espacial aplicables al estudio de epidemias de enfermedades de plantas, que permitan analizar su distribución geográfica y los factores relacionados, así como servir de referencia para su control. En concreto, se abordan diversos aspectos sobre *X. fastidiosa* mediante métodos estadísticos avanzados, novedosos en el ámbito de la fitopatología, con especial atención en el análisis de su distribución espacial. En este contexto, la tesis plantea los siguientes objetivos principales: i) el análisis de los efectos climáticos y espaciales sobre la distribución de *X. fastidiosa*; ii) analizar el efecto de la incorporación de barreras de dispersión sobre la distribución del patógeno; iii) el desarrollo de un modelo de dispersión espacialmente explícito basado en individuos; y iv) la evaluación de la eficacia y eficiencia de distintos planes de gestión de brotes incluyendo estrategias de vigilancia y control.

El estudio de los efectos climáticos y espaciales sobre la distribución de *X. fastidiosa* se centró en dos regiones de Europa: Alicante (España) y Lecce (Italia). Estos brotes difieren en cuanto a sus características específicas desde el punto de vista epidemiológico, así como en cuanto al tipo de

datos espaciales provenientes de los muestreos oficiales. En Lecce, *X. fastidiosa* subsp. *pauca* es la causante de la enfermedad conocida como el síndrome del decaimiento súbito del olivo. Los datos proporcionados de esta región contienen las coordenadas geográficas de las muestras recogidas para la detección del patógeno, considerándose como datos geoestadísticos. En Alicante, la enfermedad del chamuscado de la hoja del almendro es causada por *X. fastidiosa* subsp. *multiplex*. En este caso, los datos de los muestreos se presentan agregados en una cuadrícula, representando datos en una red fija de localizaciones. Los datos de presencia/ausencia de *X. fastidiosa* se analizaron utilizando modelos espaciales jerárquicos bayesianos mediante la aproximación de Laplace anidada integrada (INLA) para realizar inferencia y predicción. Debido a los distintos tipos de datos espaciales en cada región, la modelización se adaptó a cada uno de ellos. En ambos casos la estructura espacial tuvo una fuerte influencia en los modelos, pero no las covariables climáticas, lo que sugiere que la distribución del patógeno se define principalmente por las relaciones espaciales entre las localizaciones geográficas. Este efecto espacial estaría determinado por los mecanismos de dispersión propios de *X. fastidiosa*, principalmente a través de los insectos vectores, pero también el movimiento de material propagativo infectado.

Como extensión a los modelos espaciales jerárquicos bayesianos anteriores, se abordó la incorporación de diversas barreras de dispersión sobre la distribución de *X. fastidiosa* en el área demarcada de Alicante mediante modelos espaciales no estacionarios. Se planteó un modelo estacionario y tres modelos que consideraron la no estacionariedad mediante la inclusión de distintas barreras, físicas y de control de la enfermedad. El modelo estacionario representaba un escenario en el que no se habían aplicado intervenciones de control ni se consideraban accidentes geográficos. Los modelos no estacionarios incluían un modelo con las montañas como barreras físicas, y dos modelos con una barrera perimetral continua y discontinua representando medidas de control hipotéticas. Los resultados del modelo estacionario se compararon con los modelos que incorporaron las distintas barreras, destacando la reducción de la probabilidad de presencia del patógeno en el área externa de las barreras perimetrales. Las diferencias entre los modelos de barrera continua y discontinua mostraron que, en las zonas de baja intensidad de muestreo, la falta de medidas de control incrementó la probabilidad de presencia del patógeno. La metodología implementada asume que las barreras son impermeables, por lo que se interpretaron como áreas sin plantas hospedantes y a través de las cuales los vectores o el material propagativo no podían pasar. Asumir estas propiedades supone un escenario poco realista en el ámbito de la sanidad vegetal, destacando la necesidad de desarrollar nuevas metodologías estadísticas que permitan incorporar barreras con distinto grado de permeabilidad.

En el ámbito de la epidemiología de enfermedades en plantas, conocer la extensión de la enfermedad en el área de estudio, los posibles estados de la enfermedad, los mecanismos de dispersión y alcance de los mismos son algunos de los aspectos fundamentales a la hora de estudiar la dispersión de la enfermedad y diseñar planes de gestión efectivos. Teniendo esto en cuenta, se desarrolló un modelo espacialmente explícito basado en individuos para la dispersión de enfermedades en plantas, considerando la distribución espacial heterogénea de los individuos. Como caso de estudio se simuló la dispersión de la enfermedad del chamuscado de la hoja del almendro en el área afectada de Alicante, causada por *X. fastidiosa* subsp. *multiplex*. En este enfoque, el proceso de infección de un individuo susceptible (no infectado) está determinado por la fuerza de infección, la cual depende de la tasa de transmisión de la enfermedad y de la correlación espacial existente entre el individuo susceptible y los individuos infecciosos. Se evaluó el efecto de los distintos parámetros del modelo, así como de las características del brote inicial en cuanto a agregación y localización. La variabilidad resultante en las distintas simulaciones determinó la gran influencia del rango espacial, de las características del brote inicial, así como de la propia distribución espacial, sobre la propagación de la enfermedad.

La regulación de brotes de patógenos y plagas de cuarentena en la UE se rige por la legislación, sin embargo, los planes de gestión de brotes han sido cuantificados de manera muy limitada en términos de su efectividad y eficiencia. Continuando con el caso de estudio del área afectada de Alicante por la enfermedad del chamuscado de la hoja del almendro, se planteó evaluar la eficacia y eficiencia de diferentes planes de gestión de brotes para enfermedades emergentes de plantas a través de un enfoque epidemiológico. El inicio del brote se dató en función de estudios filogenéticos, los cuales sugieren la primera aparición de este brote décadas atrás. Por tanto, esto ofrece un escenario poco habitual donde la enfermedad se ha dispersado durante un largo periodo de tiempo sin ningún tipo de intervención. Haciendo uso del modelo de dispersión basado en individuos, se planteó un escenario de base sin intervenciones. Los planes de gestión de brotes evaluados contemplaron distintas estrategias de vigilancia y medidas de control, incluyendo las establecidos por la legislación. Se consideraron dos enfoques para la vigilancia, el enfoque en un paso y el enfoque secuencial en dos pasos. Las medidas de control incluyeron distintos tamaños para la zona tampón y radios de erradicación, así como el efecto de las medidas de control de los vectores y la reducción del inoculo en la reducción de la tasa de transmisión de la enfermedad dentro de la zona tampón. Todos los planes de gestión de brotes evaluados presentaron una gran efectividad y fueron capaces de reducir considerablemente el porcentaje de infectados, pero solo con el enfoque de vigilancia en dos pasos estos fueron eliminados por completo. Por otra parte, se observaron grandes diferencias en cuanto a la eficiencia, en términos de árboles susceptibles no erradicados. Se evidencia que el aumento del nivel de confianza para el cálculo del tamaño de muestra, el enfoque de vigilancia en dos pasos y la reducción de la tasa de transmisión de la enfermedad resultan en una mayor eficiencia en los planes de gestión de brotes. Aunque el enfoque de vigilancia en dos pasos destaca por su eficacia y eficiencia, va asociado a un elevado esfuerzo de muestreo.

En cuanto a los resultados y conclusiones más relevantes de la tesis, los modelos espaciales jerárquicos bayesianos fueron eficaces para abordar los diferentes tipos de datos espaciales de los brotes *X. fastidiosa*. Destacó el fuerte efecto de la componente espacial sobre la distribución del patógeno en los brotes analizados, a diferencia de la escasa relevancia de las variables climáticas, poniendo en evidencia la importancia de considerar la dependencia espacial. La inclusión de barreras de dispersión mediante un modelo no estacionario reflejó la gran influencia que estas estructuras presentan sobre la probabilidad de presencia del patógeno. La dispersión de la enfermedad a escala individual permitió obtener una perspectiva detallada sobre su propagación, y el algoritmo propuesto permitió manejar de forma eficiente un gran tamaño poblacional. La evaluación de los distintos planes de gestión de brotes mostró la importancia de la vigilancia temprana, así como la necesidad de adaptar las medidas de control a la situación epidemiológica específica de cada brote. Las metodologías propuestas y aplicadas a *X. fastidiosa* son flexibles y pueden ser extrapolables a otras enfermedades de plantas.



De izquierda a derecha: Dr. Virgilio Gómez Rubio (Presidente), Dr. Fernando García-Arenal Rodríguez (Vocal), Martina Cendoya (Doctoranda), Dr. David Conesa (Director), Dr. Antonio Vicent (Director).

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

- Cendoya, M., Martínez-Minaya, J., Dalmau, V., Ferrer, A., Saponari, M., Conesa, D., López-Quílez, A., and Vicent, A. (2020). Spatial Bayesian modeling applied to the surveys of *Xylella fastidiosa* in Alicante (Spain) and Apulia (Italy). *Frontiers in Plant Science*, 11:1204. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01204>
- Cendoya, M., Hubel, A., Conesa, D., and Vicent, A. (2022). Modeling the spatial distribution of *Xylella fastidiosa*: A nonstationary approach with dispersal barriers. *Phytopathology*, 112(5):1036-1045. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-21-0218-R>
- Cendoya, M., Navarro-Quiles, A., López-Quílez, A., Vicent, A., and Conesa, D. (2024). An individual-based spatial epidemiological model for the spread of plant diseases. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. <https://doi.org/10.1007/s13253-024-00604-2>
- Cendoya, M., Lázaro, E., Navarro-Quiles, A., López-Quílez, A., Conesa, D., and Vicent, A. (2024). Performance of outbreak management plans for emerging plant diseases: the case of almond leaf scorch caused by *Xylella fastidiosa* in mainland Spain. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-23-0465-R>