

Aplicación de Redes Bayesianas para la Optimización del Control de Plagas y Enfermedades en la Agricultura

Application of Bayesian networks for the optimization of pest and disease control in agriculture

Ronaldo Quispe-Quispe, Erika Condori-Arapa
ronquispe@est.unap.edu.pe, mishellcondori03@gmail.com

Resumen

Objetivos: Analizar las aplicaciones de redes bayesianas en el control de plagas y enfermedades agrícolas, identificando los cultivos más investigados, las variables clave modeladas, y los enfoques utilizados en los estudios realizados entre los años 2009 y 2024.

Metodología: Se realizó un estudio bibliográfico de revisión sistemática sobre la aplicación de redes bayesianas en el control de plagas y enfermedades agrícolas en los últimos 15 años. Se consideró la búsqueda en bases de datos Scopus.

Resultados: Los estudios revisados destacan un incremento en el uso de redes bayesianas en la agricultura entre 2009 y 2024.

Conclusión: Las redes bayesianas representan una herramienta clave en el control de plagas y enfermedades agrícolas, permitiendo decisiones más informadas y sostenibles. Su implementación ha demostrado ser una herramienta eficaz para manejar la incertidumbre y optimizar el uso de pesticidas, reduciendo costos y el impacto ambiental.

Palabras claves: Redes bayesianas, control de plagas, optimización.

Abstract

Objectives: To analyze the applications of Bayesian networks in the control of agricultural pests and diseases, identifying the most investigated crops, the key variables modeled, and the approaches used in the studies carried out between 2009 and 2024.

Methodology: A systematic bibliographic review study was carried out on the application of Bayesian networks in the control of agricultural pests and diseases in the last 15 years. The search in Scopus databases was demonstrated.

Results: The reviewed studies highlight an increase in the use of Bayesian networks in agriculture between 2009 and 2024.

Conclusion: Bayesian networks represent a key tool in the control of agricultural pests and diseases, allowing for more informed and sustainable decisions. Their implementation has proven to be an effective tool for managing uncertainty and optimizing pesticide use, reducing costs and environmental impact.

Keywords: Bayesian networks, pest control, optimization.

Introducción

La agricultura moderna enfrenta desafíos crecientes debido al impacto de plagas y enfermedades en los cultivos, lo que comprometía tanto la productividad como la sostenibilidad. En este contexto, las herramientas como las redes bayesianas surgieron como un enfoque prometedor, además que la investigación científica ha evolucionado significativamente, y los estudios revisados reflejan diversos enfoques y metodologías en el ámbito de las técnicas de análisis. Según Figueiredo (2019), las redes bayesianas se han consolidado como una herramienta clave en estudios experimentales, permitiendo modelar la incertidumbre y las relaciones causales en diversos contextos [1].

Las redes bayesianas fueron propuestas como una herramienta clave en la “optimización de las redes de monitoreo de plagas, mejorando la detección temprana y reduciendo la dependencia de pesticidas” [2]. Este tipo de modelado probabilístico permitió detectar patrones de infestación de plagas de manera más temprana, facilitando intervenciones más oportunas y menos invasivas. Otros estudios “exploraron cómo estas redes permiten comparar diferentes estrategias de control en las cadenas de producción agrícola” [3], proporcionando un marco para evaluar intervenciones en tiempo real y en función de los riesgos emergentes. De igual forma, se destacó la aplicación en la modelación del conocimiento experto para optimizar la aplicación de insumos agrícolas, como fungicidas, donde la capacidad de integrar el conocimiento experto en un formato computacional permitió tomar decisiones más informadas y menos dependientes de la intuición humana.

Según Del Águila (2010) consideró fundamental el desarrollo de sistemas expertos que integran redes bayesianas con datos empíricos para gestionar plagas y enfermedades en cultivos específicos [4]. Esta in-

tegración ofreció un enfoque robusto para abordar desafíos locales específicos, como las condiciones climáticas y las particularidades de cada cultivo. Además, “las redes bayesianas son una herramienta eficaz en aplicaciones inteligentes, optimizando los procesos agrícolas de manera más precisa” [5]. El uso de esta tecnología permitió no solo el control de plagas, sino también la eficiencia en la asignación de recursos, lo que resultó en una mejora de la productividad. También se destacó que “el enfoque participativo permitió la inclusión de diversas perspectivas en la modelación del hábitat y el control biológico” [6], lo que agregó valor a los modelos al considerar el conocimiento y las prácticas tradicionales de los agricultores.

Estas herramientas “se utilizaron para modelar las interacciones en los ecosistemas agrícolas, maximizando los servicios ecosistémicos” [7], lo que dio como resultado un enfoque más holístico de la gestión agrícola que incluyó la mejora de la biodiversidad y la sostenibilidad del ecosistema en su conjunto. En escenarios afectados por “el cambio climático, se analizaron prácticas tradicionales que mitigan los impactos negativos en los cultivos andinos” [8]. Este análisis mostró cómo las soluciones basadas en la resiliencia ecológica eran complementarias a las técnicas de control convencionales, especialmente en regiones vulnerables a eventos climáticos extremos. Según la investigación Visscher (2024) abordó cómo superar las barreras relacionadas con el uso excesivo de pesticidas en la agricultura de pequeña escala [9], donde la adopción de alternativas de control biológico, como las redes bayesianas, contribuyó a la reducción de la dependencia de los productos químicos.

Hammond Wagner (2016) considero la perspectiva de los distribuidores agrícolas

además consideró en el diseño de certificaciones para reducir los riesgos asociados al uso de pesticidas [10], lo que subrayó la importancia de involucrar a todos los actores de la cadena de valor agrícola para implementar prácticas más sostenibles. Además, “un sistema experto diseñado específicamente para el cultivo de la uva optimizó el control de plagas y enfermedades, aumentando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental” [11]. Este enfoque destacó la relevancia de adaptar las herramientas tecnológicas a cultivos específicos, como la vid, para lograr resultados óptimos de protección vegetal. Finalmente, Emilio (2020) y Razafimandimby (2017) combinaron modelos matemáticos avanzados con redes bayesianas para mejorar la gestión de los sistemas agrícolas y optimizar la toma de decisiones [12, 13]. Estos enfoques matemáticos ofrecieron la capacidad de predecir escenarios complejos y ajustar las intervenciones en función de los datos y la incertidumbre actual.

También se observó que “la mayor concentración de recursos diluye los efectos de las plagas clave, lo que permite un manejo más eficiente de los insectos en los sistemas de cultivo de papa autóctonos” [14], lo que mostró cómo un enfoque ecológico puede reducir la presión sobre los sistemas de control de plagas. Asimismo, Parsa (2011) implementó un enfoque de comunicación bayesiana eficiente para promover aplicaciones de agricultura inteligente [15], lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas basadas en datos dinámicos y condiciones cambiantes.

En este trabajo, se analizó la aplicación de redes bayesianas para optimizar el control de plagas y enfermedades en la agricultura. Con base en la revisión de investigaciones recientes, se exploraron los avances tecnológicos, los desafíos y las oportunidades que ofrecen estas herramientas para mejorar la sostenibilidad agrícola, maximizar el rendimiento y reducir el impacto ambiental.

Metodo

Tipo de Estudio

Se realizó un estudio de revisión bibliográfica sistemática sobre la aplicación de redes bayesianas en el control de plagas y enfermedades agrícolas durante el periodo 2009-2024. La búsqueda se centró en investigaciones publicadas en inglés y español, realizadas a nivel mundial. Las palabras clave utilizadas incluyen: redes bayesianas, control de plagas agrícolas, manejo de enfermedades y agricultura inteligente. Se excluyeron estudios fuera del rango temporal establecido y que no utilizaran redes bayesianas como herramienta principal en su análisis.

Técnicas e Instrumentos

Se utilizó la técnica de observación para sistematizar la información extraída de los

artículos originales. Se diseñó un formulario de registro para clasificar los estudios con base en indicadores como tipo de estudio, variables analizadas, cultivos investigados, región geográfica y aplicaciones específicas de las redes bayesianas.

Procedimiento de Búsqueda Bibliográfica

La búsqueda se realizó con las palabras clave “optimiz”, “Networks”, “Bayesian”, “Pest.” en la base de datos científica reconocida como Scopus (<https://www.scopus.com>), seleccionadas por su cobertura de disciplinas relevantes al tema. Este proceso se desarrolló durante un periodo de dos semanas, del 15 al 30 de noviembre de 2024.

Para asegurar la calidad de los resul-

tados, se aplicarán las fases del diagrama de flujo PRISMA. La figura 1 muestra todo el proceso desarrollado. En la fase de identificación, se recuperaron 46 artículos potenciales utilizando palabras clave relacionadas con redes bayesianas, control de plagas y enfermedades agrícolas. Durante la selección, se revisaron títulos, resúmenes y metodologías, seleccionando los estudios más relevantes para los objetivos de la investigación. En la fase de elegibilidad, se incluyeron estudios que abordaran específicamente el uso de redes bayesianas en aplicaciones agrícolas prácticas. Finalmente, se sistematizaron 15 artículos que cumplieron

con los criterios establecidos.

Se excluyeron las investigaciones que no mencionaron específicamente las redes bayesianas, los estudios exclusivamente teóricos, las revisiones sistemáticas, los metaanálisis y aquellos que no presentaron resultados concretos aplicables al control de plagas y enfermedades agrícolas. Este procedimiento permitió identificar y organizar las contribuciones clave, proporcionando una base sólida para analizar el uso de redes bayesianas en la gestión agrícola.

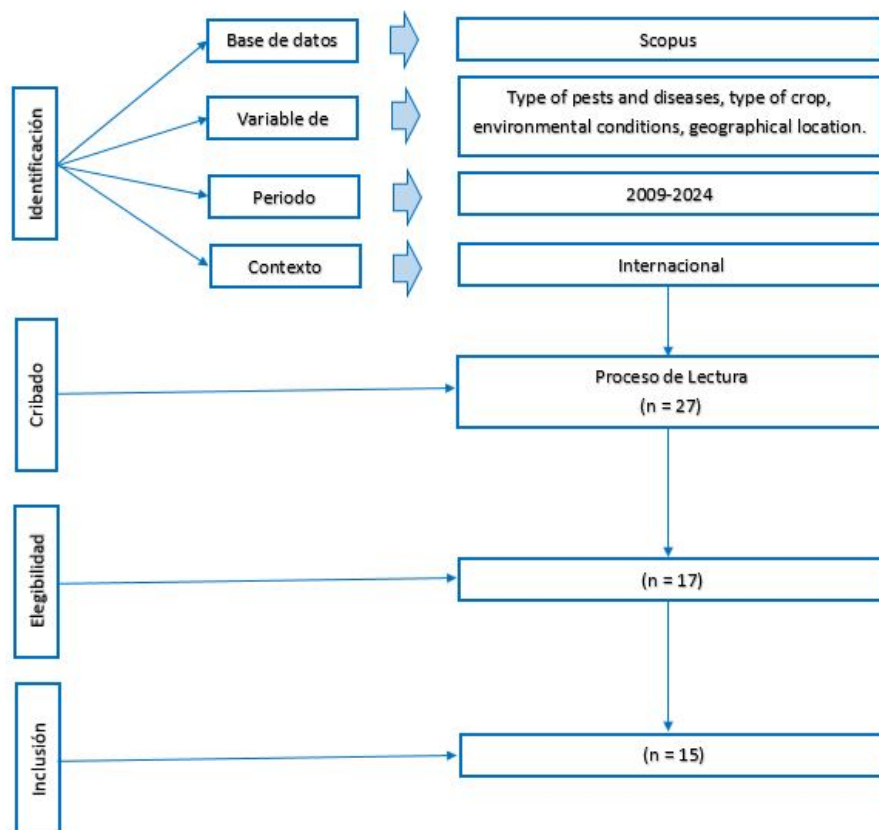


Figura 1: Diagrama de flujo PRISMA utilizado para la revisión sistemática.

Análisis de estudios

Los datos de los estudios seleccionados se organizaron en plantillas de Excel y se analizaron cualitativa y cuantitativamente. Se clasificaron según el año de publicación, los

cultivos investigados, las variables modeladas, las metodologías empleadas, y la duración de los estudios. Los estudios revisados abarcaron desde 2009 hasta 2024, destacando un aumento en la cantidad de investi-

gaciones desde 2013. Los cultivos más estudiados fueron la soja, la uva y la papa. En cuanto a las variables modeladas, las más frecuentes fueron los factores climáticos y el manejo integrado de plagas. Los enfoques predominantes fueron modelos probabilísti-

cos y sistemas expertos. La duración de los estudios varió de 2 a 12 meses, con la mayoría enfocándose en ciclos de simulación de 4 a 6 meses. Este análisis revela tendencias clave en el uso de redes bayesianas en el control de plagas y enfermedades agrícolas.

Resultados

Los estudios realizados entre 2009 y 2024 se encuentran descritos en la Tabla 1, que resume los 15 artículos seleccionados para esta revisión sistemática. De estos, 9 estudios se han centrado en la aplicación de redes bayesianas en cultivos específicos (soja, uva, papa) y el control de plagas, mientras que 6 estudios han utilizado modelos de redes bayesianas en sistemas expertos para la toma de decisiones en el control de enfermedades.

En cuanto a las variables clave modeladas Figura 2, se han identificado principalmente factores climáticos ($n=5$) y estrategias de manejo integrado de plagas ($n=5$). El estudio de Gregory (2009) y el de Tixier (2013) resaltan la importancia

de modelar variables climáticas para predecir la incidencia de plagas y enfermedades en condiciones cambiantes Figura 2. También, estudios como el de Holt (2018) han explorado el manejo integrado de plagas mediante redes bayesianas.

La mayoría de los estudios han utilizado modelos probabilísticos basados en simulación para el control de plagas ($n=8$), mientras que otros han implementado sistemas expertos ($n=7$). En cuanto al tiempo de uso de las redes bayesianas, la mayoría de los estudios ($n=9$) utilizaron enfoques de simulación con ciclos que van de 2 a 6 meses, como se muestra en la Figura 3.

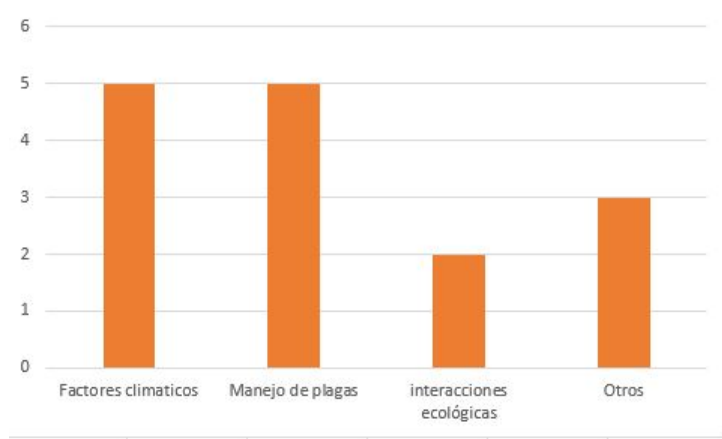


Figura 2: Gráfico para mostrar las variables clave modeladas en los estudios revisados.

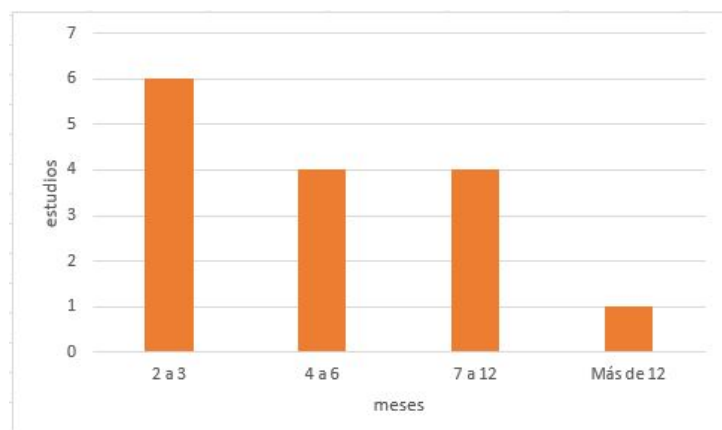


Figura 3: Gráfico de barras para mostrar el tiempo de uso de las redes bayesianas en los estudios.

Tabla 1. Resumen de estudios revisados según técnicas y contexto

Autor	Año	País	Tipo de Estudio	Técnica
Visscher	2024	Perú	Experimental	Análisis estadístico
Tambo	2024	Uganda	Preferencias	Experimento de elección discreta
Wang et al	2023	NE	Experimental	Algoritmo de aprendizaje profundo
Cros	2021	Francia	Modelado	Modelado matemático
Emilio	2020	Perú	Experimental	Sistema experto
Figueiredo	2019	Brasil	Experimental	Redes bayesianas
Salliou	2019	NE	De caso	Modelo de redes de interacción
Holt	2018	Vietnam	Metodológico	Redes bayesianas
Razafimandimby	2017	Argentina	Experimental	Inferencia activa
Hammond Wagner	2016	Perú	De caso	Regresión logística
Tixier	2013	Costa Rica	Revisión	Modelado de redes de interacción
Gou	2013	NE	Experimental	Redes bayesianas
Parsa	2011	NE	Observacional	Análisis estadístico
Del Águila	2010	NE	Metodológico	Redes bayesianas
Gregory	2009	NE	Revisión	Sistema experto

Discusión

El uso de redes bayesianas ha demostrado ser una herramienta clave para optimizar el control de plagas y enfermedades en la agricultura. Según Holt (2018), estas redes permiten comparar de manera eficiente las intervenciones de control a lo largo de las cadenas de producción agrícola, integrando datos de múltiples fuentes para una mejor toma de decisiones. Por ejemplo, el estudio de Figueiredo (2019) mostró cómo un modelo probabilístico basado en redes bayesianas puede simular el conocimiento de expertos en la roya de la soja, optimizando el uso de fungicidas y reduciendo costos.

Además, estas herramientas no solo son útiles en la gestión directa de plagas, sino que también abordan problemas más amplios relacionados con la sostenibilidad agrícola. Tixier (2013) destacaron el potencial de las redes para modelar interacciones en los agroecosistemas y mejorar los servicios ecosistémicos. Asimismo, Parsa (2011) observaron que la concentración de recursos en la agricultura indígena de papa puede diluir la incidencia de plagas clave, un

hallazgo que podría integrarse en modelos bayesianos participativos como los explorados por Salliou (2019).

Por otro lado, la integración de las redes bayesianas con otras tecnologías emergentes, como los sistemas expertos y la inteligencia artificial, refuerza su aplicabilidad. Guo (2013) desarrollaron un sistema experto basado en predicciones bayesianas que demostró ser efectivo para aplicaciones agrícolas, mientras que Razafimandimby (2017) propusieron un enfoque de comunicación eficiente basado en estas redes para la agricultura inteligente.

Finalmente, el contexto local también es crítico. Estudios como el de Hammond Wagner (2016) han resaltado las barreras estructurales, como el "bloqueo de pesticidas" en la agricultura peruana, que limitan la adopción de prácticas más sostenibles. En este sentido, iniciativas como las propuestas por Tambo et al. (2024) para certificar el uso de pesticidas pueden ser complementadas con herramientas bayesia-

nas para una gestión más responsable.

En general, la literatura revisada destaca cómo las redes bayesianas ofrecen un marco robusto y adaptable para enfrentar los desafíos actuales de la agricultura, desde la reducción del impacto ambiental hasta la mejora de la sostenibilidad económica de los

pequeños agricultores (Cros 2021; Visscher 2024). Su potencial para integrar datos, modelar incertidumbres y proponer intervenciones efectivas las posiciona como una tecnología clave en el futuro de la agricultura.

Referencias

- [1] G. V. C. Figueiredo, L. H. Fantin, M. G. Canteri, J. C. F. Da Rocha, and D. De Souza Jaccoud Filho. A bayesian probability model can simulate the knowledge of soybean rust researchers to optimize the application of fungicides. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 10(4):37–51, 2019.
- [2] M. J. Cros, J. N. Aubertot, S. Gaba, X. Reboud, R. Sabbadin, and N. Peyrard. Improving pest monitoring networks using a simulation-based approach to contribute to pesticide reduction. *Theoretical Population Biology*, 141:24–33, 2021.
- [3] J. Holt, A. W. Leach, S. Johnson, D. M. Tu, D. T. Nhu, N. T. Anh, M. M. Quinlan, P. J. L. Whittle, K. Mengersen, and J. D. Mumford. Bayesian networks to compare pest control interventions on commodities along agricultural production chains. *Risk Analysis*, 38(2):297–310, 2018.
- [4] I. M. Del Águila, J. Del Sagrado, S. Túnez, and F. J. Orellana. Seamless software development for systems based on bayesian networks: An agricultural pest control system example. In *ICSOF 2010 - Proceedings of the 5th International Conference on Software and Data Technologies*, volume 2, pages 456–461, 2010.
- [5] W. Guo, Q. Xiao, Y. Hou, E. Wang, and X. Zhang. Bayesian network learning based on relationship prediction pso and its application in agricultural expert system. In *2013 25th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2013*, volume 1, pages 1818–1822, 2013.
- [6] N. Salliou, A. Vialatte, C. Monteil, and C. Barnaud. First use of participatory bayesian modeling to study habitat management at multiple scales for biological pest control. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 2019.
- [7] P. Tixier, N. Peyrard, J. N. Aubertot, S. Gaba, J. Radoszycki, G. Caron-Lormier, F. Vinatier, G. Mollot, and R. Sabbadin. Modelling interaction networks for enhanced ecosystem services in agroecosystems. In *Advances in Ecological Research*, volume 49. 2013.
- [8] P. J. Gregory, S. N. Johnson, A. C. Newton, and J. S. I. Ingram. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60(10):2827–2838, 2009.
- [9] A. M. Visscher, S. Vanek, J. Huarcaca, J. Mendoza, R. Ccanto, K. Meza, E. Olivera, M. Scurrah, C. Wellstein, G. Bonari, S. Zerbe, and S. J. Fonte. Traditional soil fertility management ameliorates climate change impacts on traditional andean crops within smallholder farming systems. *Science of the Total Environment*, 912:168725, 2024.

- [10] C. Hammond Wagner, M. Cox, and J. L. Bazo Robles. Pesticide lock-in in small scale peruvian agriculture. *Ecological Economics*, 129:72–81, 2016.
- [11] J. A. Tambo, K. Holmes, C. Aliamo, F. Mbugua, C. Aloit, F. Muzira, A. Byamugisha, and P. Mwambu. Agro-input dealers’ perspectives on the design of a certification scheme for pesticide risk reduction. *Pest Management Science*, January 2024.
- [12] J. Emilio, R. Yaya, and L. E. Dami. Diseño e implementación de un sistema experto para optimizar el control de plagas y enfermedades en el cultivo de la uva. *Ñawparisun - Revista de Investigación Científica*, 3(1):83–96, 2020.
- [13] C. Razafimandimby, V. Loscrí, A. M. Vegni, and A. Neri. Efficient bayesian communication approach for smart agriculture applications. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 1–5, 2017.
- [14] C. Wang, Y. Zhang, and Z. Ding, H. Applied mathematics and nonlinear sciences. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 8(2):3383–3392, 2023.
- [15] S. Parsa, R. Ccanto, and J. A. Rosenheim. Resource concentration dilutes a key pest in indigenous potato agriculture. *Ecological Applications*, 21(2):539–546, 2011.