

**Aplicación de modelos de aprendizaje supervisado para el estudio del impacto de las  
heladas en los cultivos de Boyacá**

Naren Dioberty Alvarez Figueroa

Asesor

Julio Eduardo Mejía Manzano

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Sociales Artes y Humanidades ECSAH

Especialización en Ciencias de Datos y Analítica

2025

### **Agradecimientos**

Con todo mi cariño para mi familia, y de manera muy especial a mi adorada madre. Tu apoyo incondicional ha sido un pilar fundamental en cada paso de mi camino profesional. Tus palabras de aliento siempre me impulsan a seguir adelante con renovada energía.

También quiero expresar mi profunda gratitud a la profesora Nidia Danigza Lugo López y al profesor Julio Eduardo Mejía Manzano. Su guía experta y dedicación fueron esenciales para la realización de este trabajo. ¡Muchas gracias por todo!

## Resumen

Las heladas representan una amenaza significativa para la agricultura a nivel global, causando pérdidas económicas sustanciales. En este contexto, la aplicación de técnicas avanzadas de detección temprana, predicción precisa y evaluación integral del riesgo se vuelve crucial para la protección de cultivos vulnerables. Esta monografía presenta una revisión exhaustiva de investigaciones recientes que exploran el uso innovador de imágenes termográficas infrarrojas (IRT), datos multiespectrales y meteorológicos, combinados con modelos de aprendizaje automático (Machine Learning), para abordar el problema de las heladas en la agricultura.

Se analizan diversos estudios que demuestran la eficacia de algoritmos como Random Forest, XGBoost, Redes Neuronales Convolucionales (CNN), Redes Recurrentes (GRU) y Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) en la clasificación de eventos de heladas, la predicción de temperaturas críticas, la estimación del daño foliar y la evaluación del riesgo a nivel regional y de cultivo. Se destaca la importancia de la integración de datos multimodales provenientes de sensores terrestres y aéreos (UAV) para obtener una comprensión más completa de las condiciones que preceden y acompañan a las heladas.

La monografía también explora el potencial de estas tecnologías para la agricultura en Boyacá, Colombia, una región con alta vulnerabilidad a eventos de heladas que afectan cultivos clave como la papa, la fresa y diversas hortalizas. Se discuten los beneficios de implementar sistemas de alerta temprana, mapas de riesgo y herramientas de monitoreo basadas en aprendizaje automático para optimizar la toma de decisiones agronómicas y mitigar las pérdidas económicas.

Finalmente, se identifican los desafíos clave para la adopción de estas tecnologías en el contexto de Boyacá, incluyendo los costos de inversión en infraestructura y tecnología, la necesidad de generar datos locales específicos y la formación de capacidades técnicas. Se proponen recomendaciones estratégicas para una implementación gradual y colaborativa, que involucre a instituciones de investigación, entidades gubernamentales y la comunidad agrícola, con el objetivo de fortalecer la agricultura de precisión y la resiliencia climática en el departamento.

***Palabras clave:*** Aprendizaje automático, Heladas, Variables meteorológicas, Variables ambientales, Variables climáticas, Variables de suelo.

## Abstract

Frost represents a significant threat to agriculture globally, causing substantial economic losses. In this context, the application of advanced techniques for early detection, accurate prediction, and comprehensive risk assessment becomes crucial for the protection of vulnerable crops. This monograph presents a comprehensive review of recent research exploring the innovative use of infrared thermographic (IRT) imaging, multispectral and meteorological data, combined with machine learning models, to address the problem of frost in agriculture.

Various studies are analyzed that demonstrate the effectiveness of algorithms such as Random Forest, XGBoost, Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Networks (GRU), and Support Vector Machines (SVM) in classifying frost events, predicting critical temperatures, estimating leaf damage, and assessing risk at the regional and crop levels. The importance of integrating multimodal data from ground-based and aerial (UAV) sensors to gain a more complete understanding of the conditions preceding and accompanying frost is highlighted.

The monograph also explores the potential of these technologies for agriculture in Boyacá, Colombia, a region highly vulnerable to frost events affecting key crops such as potatoes, strawberries, and various vegetables. The benefits of implementing early warning systems, risk maps, and machine learning-based monitoring tools to optimize agronomic decision-making and mitigate economic losses are discussed.

Finally, key challenges to the adoption of these technologies in the Boyacá context are identified, including investment costs in infrastructure and technology, the need to generate locally specific data, and technical capacity building. Strategic recommendations are proposed for a gradual and collaborative implementation, involving research institutions, government

entities, and the agricultural community, with the goal of strengthening precision agriculture and climate resilience in the department.

***Keywords:*** Machine Learning, Frost, Meteorological Variables, Environmental Variables, Climate variables, Soil variables.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	10
Justificación .....	13
Objetivos.....	16
Objetivo General .....	16
Objetivos Específicos.....	16
Marco Conceptual.....	17
Variables Meteorológicas.....	19
Variables Ambientales .....	19
Variables Climáticas .....	19
Variables de Suelo.....	20
Metodología .....	21
Resultados.....	24
Conclusiones.....	50
Recomendaciones .....	53
Referencias Bibliográficas .....	54

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Síntesis de Revisiones Sistemáticas</i> .....	40
---	----

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> <i>Ecuación Booleana</i> .....	23
--	----

## Introducción

El fenómeno de las heladas se caracteriza por un descenso de la temperatura, generalmente durante las horas de la madrugada. Este descenso puede ocasionar la formación de cristales de hielo sobre la superficie terrestre. Cuando estos cristales se exponen a la luz solar, se produce un efecto conocido como quema por helada, que puede dañar considerablemente los cultivos presentes en la zona (Gómez, 2010).

Las heladas, definidas por temperaturas del aire bajo cero (Rivera Ricaurte, 2023), son cruciales para investigar debido a su impacto significativo. Su formación depende de la compleja interacción de factores físicos. La temperatura del aire es fundamental, pero la probabilidad e intensidad se modulan por la temperatura del punto de rocío (Méndez & Castro, 2025), indicando la condensación y posible escarcha. La temperatura del suelo, al perder calor nocturno, favorece las heladas radiactivas (Rivera Ricaurte, 2023), intensificadas por la ausencia o debilidad del viento, que permite la acumulación de aire frío superficial (Rivera Ricaurte, 2023). Finalmente, la falta de cobertura nubosa facilita la pérdida de calor terrestre y el enfriamiento (Rivera Ricaurte, 2023).

La investigación detallada de los factores físicos de las heladas es fundamental a nivel científico, económico y social para mejorar la predicción, al permitir desarrollar modelos de pronóstico más precisos, cruciales para la agricultura y la prevención de pérdidas económicas; adaptarse al cambio climático, al estudiar cómo las condiciones atmosféricas y de superficie influyen en las heladas, lo cual es esencial para desarrollar estrategias de adaptación ante posibles cambios en su frecuencia e intensidad; y desarrollar tecnologías de protección, impulsando la creación de métodos innovadores (riego, cubiertas, manejo del suelo) para mitigar los efectos de las heladas. (Rivera Ricaurte, 2023).

El estudio del fenómeno de las heladas en Colombia es de vital importancia debido a su impacto negativo en la agricultura nacional. Este fenómeno climático puede ocasionar la pérdida de cultivos como el maíz, la papa, el trigo y el frijol, afectando la economía y la seguridad alimentaria de los campesinos colombianos (Jacobsen, Mujica, & Ortiz, 2003).

Para abordar la problemática de las heladas y su impacto en la agricultura, se ha avanzado en el desarrollo de soluciones tecnológicas como la generación de alertas tempranas. Estas alertas permiten a los agricultores tomar medidas oportunas para proteger sus cultivos del daño por heladas (Domínguez, N. J. 2022).

Según una investigación, un sistema de inteligencia artificial basado en la Máquina de Aprendizaje Extremo (ELM) demostró ser efectivo para predecir tempranamente la ocurrencia de heladas meteorológicas, obteniendo resultados con altos márgenes de confianza en la región del Valle Alto de Cochabamba (Riabani Mercado et al., 2016, p. 483).

Méndez y Castro (2025) publicaron en *Ingeniería y Desarrollo* (pp. 122-139) una investigación que exploró la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (machine learning) para predecir heladas y otras variables meteorológicas importantes para las prácticas agrícolas en la Sabana de Bogotá. El estudio se centró en el desarrollo y evaluación de un modelo predictivo basado en datos históricos, diseñado específicamente para determinar y comprender el comportamiento de las heladas en esta zona agrícola, resaltando el uso del machine learning como herramienta clave para analizar los factores que influyen en su ocurrencia (Méndez & Camacho, 2024).

La tecnología y la agricultura pueden ser un gran factor determinante e innovador para prevenir daños por heladas. La inversión en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías es

fundamental para mejorar la capacidad de los agricultores para predecir y prevenir las heladas, así como para desarrollar cultivos más resistentes al frío (Fernández Hidalgo et al., 2016)

La ciencia de datos nos ofrece como una solución a esta problemática ya que afecta a muchos campesinos e inversores del campo colombiano como es a la hora de sembrar ya que Colombia se caracteriza por tener grandes áreas para realizar esta actividad, prevenir y concientizar esta problemática es muy importante ya que se ve muy afectada en la seguridad alimentaria donde hay productos que se exportan como son las flores y otros productos (Vargas, Coy, & Rodríguez, 2021).

La ciencia de datos emerge como una solución prometedora ante la problemática que enfrentan numerosos campesinos e inversores del campo colombiano al planificar sus siembras. Dada la vasta extensión de tierras aptas para la agricultura en Colombia, la capacidad de predecir y mitigar riesgos como las heladas, las sequías o las variaciones extremas de temperatura, mediante el análisis avanzado de datos, resulta crucial. Esta anticipación no solo protege las inversiones y la productividad agrícola, sino que también tiene un impacto significativo en la seguridad alimentaria del país, incluyendo la producción de bienes de exportación tan importantes como las flores y otros productos (Vargas, Coy, & Rodríguez, 2021). Al mejorar la toma de decisiones en la siembra y la gestión de cultivos a través de la ciencia de datos, se fortalece la resiliencia del sector agrícola colombiano ante los desafíos climáticos y se contribuye a una producción más eficiente y sostenible.

## Justificación

En los departamentos colombianos de Boyacá, Santander y Cundinamarca, se presenta una problemática recurrente: las heladas. Este fenómeno meteorológico, caracterizado por temperaturas bajo cero, genera daños considerables en cultivos como la papa, la cebolla, la arveja, el frijol y pastos para ganadería, impactando negativamente la economía de la región (Gómez Latorre, 2014).

Según informa Caracol Radio, el departamento de Boyacá ha sido severamente afectado por recientes heladas. El medio de comunicación detalla que aproximadamente 43,000 hectáreas de pastos y cultivos han sido azotadas, impactando directamente a unos 12,000 agricultores. La situación es especialmente crítica en el municipio de Cerinza, donde los floricultores han sufrido una segunda pérdida importante, con un 40% de su producción dañada (Caracol Radio, 12 de abril de 2024). Adicionalmente, Caracol Radio reporta que más de 6,700 productores en 24 municipios de Boyacá han visto afectadas alrededor de 19,000 hectáreas. La producción lechera en Firavitoba también se ha visto comprometida por este fenómeno climático (Caracol Radio, 12 de abril de 2024).

Las heladas son producto del descenso de las temperaturas nocturnas, afectando principalmente zonas por encima de los 2.500 metros sobre el nivel del mar. Su impacto se traduce en la pérdida de cosechas y pastos, lo que genera un perjuicio económico significativo para agricultores y ganaderos (Barragán Cárdenas, 2019).

El estudio de las heladas se ve limitado por la falta de estaciones meteorológicas en las zonas afectadas. El IDEAM, como entidad responsable, no cuenta con una cobertura suficiente para la recolección de datos históricos precisos, dificultando la realización de estudios más

detallados y la identificación de variables relevantes para la prevención y control de las heladas (Barragán Cárdenas, 2019).

Las heladas constituyen uno de los principales riesgos hidrometeorológicos para el sector agropecuario colombiano. (Arteaga & Burbano, 2018).

La falta de planificación e inversión en investigación y tecnología limita la capacidad de respuesta ante este fenómeno, afectando principalmente a los campesinos, quienes experimentan la pérdida de sus cosechas y animales, con el consecuente impacto económico y social (Bravo Reyes & Camargo González, 2013).

La ciencia de datos se presenta como una herramienta valiosa para el análisis y la toma de decisiones. A través de la recopilación y análisis de datos históricos y en tiempo real, se pueden identificar patrones climáticos y desarrollar modelos predictivos que permitan prevenir y mitigar el impacto de las heladas (Cortez Robles, 2023).

La aplicación de la ciencia de datos en el sector agropecuario colombiano ofrece una serie de beneficios, entre los que se destacan como la prevención de daños en cultivos y pastos, optimización de la producción, fortalecimiento del sector agropecuario.

El estudio de Beltramini et al. (2023) en Catamarca muestra cómo la ciencia de datos está revolucionando la ganadería. Al implementar tecnologías de precisión que generan grandes cantidades de información (sensores, GPS, registros), los productores pueden analizar estos datos con herramientas avanzadas como la estadística y la inteligencia artificial. Esto transforma la información bruta en conocimiento valioso, permitiendo detectar enfermedades temprano, optimizar la alimentación para un mejor rendimiento y bienestar animal, y gestionar el pastoreo de forma más eficiente. Podemos concluir que, la ciencia de datos emerge como una herramienta clave para una ganadería más productiva, sostenible y resiliente en el siglo XXI.

¿Qué metodologías de aprendizaje automático se distinguen por su eficacia en la predicción temprana y precisa de heladas, contribuyendo significativamente a la protección y sostenibilidad de las prácticas agrícolas?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar el impacto de las heladas en los cultivos del departamento de Boyacá mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje supervisado, con el fin de proponer estrategias predictivas que contribuyan a su mitigación.

### **Objetivos Específicos**

Revisar literatura científica relacionada con modelos de predicción de heladas basados en técnicas de aprendizaje automático aplicados al sector agrícola.

Evaluar modelos de predicción climática que empleen aprendizaje supervisado, identificando su precisión, variables involucradas y aplicabilidad en el contexto agrícola de Boyacá.

Analizar estrategias predictivas basadas en aprendizaje supervisado que permitan anticipar la ocurrencia de heladas y reducir su impacto en los cultivos del departamento.

## Marco Conceptual

La investigación de Cadena Lema (2020) evalúa diferentes modelos aprendizaje automático como es el uso de las redes neuronales artificiales, usando arboles de decisión, máquinas de soporte vectorial para el uso e implementación de la manera más predictiva en para el uso en el sistema de riego en la granja La Pradera.

Según Soria et al. (2022), define la inteligencia artificial como la ciencia y la ingeniería de hace maquinas inteligentes, especialmente a programas de cómputo inteligentes. Y está relacionada con la tarea similar de usar computadoras para entender la inteligencia humana.

Sorbara (2023) define la inteligencia artificial (IA) como la simulación de procesos de inteligencia humana por parte de sistemas informáticos, resaltando que dentro de estos procesos se encuentra el aprendizaje, entendido como la adquisición de información y reglas para el uso de la información, así como el razonamiento y la autocorrección.

Según Zhuang et al. (2025), el machine learning es un subcampo de la inteligencia artificial (IA) que busca permitir que las computadoras aprendan de los datos sin ser programadas explícitamente. Los algoritmos de Machine Learning (ML), permiten a los sistemas identificar patrones, hacer predicciones y mejorar su rendimiento con el tiempo a través de la experiencia.

Guzmán Albores et al. (2024) describen la agricultura de precisión como un enfoque que integra tecnologías avanzadas para la recopilación, análisis y aplicación de datos, lo que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Este enfoque busca optimizar la gestión de los recursos naturales y aumentar la productividad agrícola.

En el artículo de, Ding et al. (2021) realiza un enfoque con el uso del aprendizaje automático realizando la predicción de las heladas mediante el uso de redes neuronales artificiales, además apoyando con el uso de árboles de decisión analizando sobre la efectividad de uso de estas técnicas en la predicción de las heladas en el impacto de las decisiones agrícolas y la eficiencia en la protección de los cultivos.

La investigación de Ahumada-García et al. (2016) desarrolla un sistema para inferir el perfil de temperatura foliar en el viñedo, usando la metodología como es el uso de adquisición de datos llevándolos a la recopilación para un preprocesamiento de datos usando un modelo estadístico para un desarrollo en campo agrícola para la mejora y precisión de la efectividad en la implementación del viñedo optimizando el uso del riego, prevención de enfermedades la toma de decisiones en el campo agrícola.

En la tesis de grado, Panata Buñay (2020), presenta el uso de un software de control meteorológico para uso e implementación para la detección de heladas emitiendo alertas tempranas en la provincia de Tungurahua, Ecuador. Además, en la investigación se observa el uso de la ciencia de datos, utilizando técnicas de análisis de datos y la visualización para procesar información meteorológica, identificando patrones y generar alertas tempranas para la protección de cultivos y la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores.

La investigación de Calderón Caro (2021) se observa el uso de modelos de aprendizaje automático, destacando las redes neuronales artificiales, árboles de decisión, máquinas de soporte vectorial y vecinos más cercanos KNN destacando en el uso en la predicción de heladas en los cultivos de altura, lo que se puede ser significativo en la protección de cultivos para la toma de decisiones en las decisiones agrícolas y reducción de pérdidas económicas. Además,

este tipo de sistemas puede ser muy provechoso a la hora de contribuir en la sostenibilidad de la agricultura en zonas montañosas brindando un apoyo en la seguridad alimentaria.

### **Variables Meteorológicas**

La variable meteorológica nos permite un análisis más profundo ya que esta, nos permite medir comprender y medir las condiciones de cómo se afecta a la producir el fenómeno de las heladas lo cual es muy provechoso prediciendo y tratando de manera preventiva y acertada para realizar planes contra este fenómeno. Analizando este tipo de variable nos puede estimar de manera más probabilística en qué lugar se pueda producir en un lugar determinado. Los datos que podemos describir a la hora de medir esta variable son: Temperatura del aire, Humedad relativa, velocidad del viento (Hernández, 2017).

### **Variables Ambientales**

Las variables ambientales son cruciales para el análisis y la comprensión de las heladas, ya que permiten entender los mecanismos involucrados y cómo la temperatura desciende. Su estudio detallado mejora la evaluación del impacto en la agricultura y la profundización en el conocimiento de estos eventos. Las variables clave a considerar son: temperatura, humedad, viento, topografía, nubosidad y precipitación (Hudson de Jaramillo et al., 2017).

### **Variables Climáticas**

Las variables climáticas en el estudio nos ayudan a predecir con mejor comprensión, evaluando el impacto y desarrollando estrategias para interpretar los resultados obtenidos y adaptándose a estos fenómenos. Adicionalmente, se facilita la implementación de un sistema de alerta temprana y se proporciona información clave para la toma de decisiones en prácticas agrícolas y políticas públicas. Profundizar en este estudio implica conocer los mecanismos de

formación, tales como la inversión térmica, la advección de frío y la radiación nocturna (Tiscornia et al., 2016).

### **Variables de Suelo**

Las variables del suelo en el estudio del suelo la podemos ver como el estudio principalmente en la transferencia del calor, retención de humedad y la formación de hielo en forma de escarcha que es la principal característica de las heladas además con esta variable nos permite tratar medidas más acertadas en la prevención de las heladas. Para el estudio del suelo se usaron características como el tipo de suelo, humedad del suelo, cobertura del suelo, topografías (González Botero, 2018).

## Metodología

La presente monografía aborda una investigación detallada con el fin de analizar el impacto y la predicción de las heladas en los cultivos de la región de Boyacá.

Con el objetivo de asegurar la robustez, transparencia y el rigor metodológico del presente estudio, hemos definido los siguientes lineamientos para nuestra metodología siguiendo meticulosamente las etapas y principios establecidos por la declaración PRISMA 2020 (Grupo de trabajo de la declaración PRISMA, 2021).

Inicialmente, se diseñó e implementó una estrategia de búsqueda. Esta estrategia detallo la identificación de términos cruciales tanto en español como en inglés, que incluyen: heladas, predicciones heladas, impacto heladas agricultura, machine learning predicción meteorológica, aprendizaje automático clima, frost prediction, crop damage frost, artificial intelligence agriculture.

Posteriormente, el proceso de selección de estudios se describirá detalladamente, indicando los métodos utilizados para evaluar si cada estudio cumple con los criterios de inclusión predefinidos. (Grupo de trabajo de la declaración PRISMA, 2021).

La exploración del universo de la literatura académica se inicia con la identificación de términos clave. Estos actúan como directrices para la navegación a través de bases de datos y repositorios, facilitando la recuperación de información relevante. Para optimizar la recuperación de investigaciones pertinentes, los términos clave se combinarán mediante operadores lógicos para generar ecuaciones de búsqueda específicas. Este proceso afinará la búsqueda hacia estudios relevantes.

La ecuación de búsqueda utilizada en las bases de datos fue la siguiente: ((frost OR frosts OR "frost events" OR "frost occurrence") AND (predict\* OR forecast\* OR estimation OR

detection) AND ("machine learning" OR "artificial intelligence" OR "deep learning" OR "data mining").

En esta ecuación, los operadores OR agrupan términos relacionados dentro de cada concepto (frost, predict\*, machine learning). Crucialmente, los operadores AND interconectan estos tres grupos temáticos, exigiendo que los resultados contengan al menos un término de cada uno para garantizar su pertinencia. La Figura 1 ilustra cómo estos AND combinan las distintas facetas de la búsqueda en una única estructura lógica, asegurando la recuperación específica de trabajos sobre detección o predicción de heladas que utilizan técnicas de ciencia de datos.

La ecuación de búsqueda, que se construyó con operadores lógicos, para optimizar la recuperación de artículos relevante y fue aplicada de manera coherente en las bases de datos consultadas aprovechando el ajuste de su sintaxis.

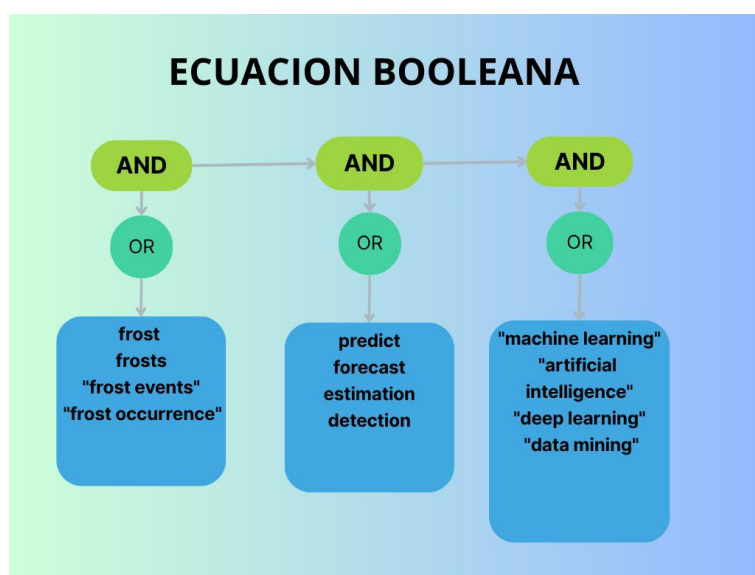
A continuación, en la etapa de extracción y gestión de datos, se especificó la información esencial que se extrajo de cada estudio seleccionado. Esto incluyó las características del estudio, los cultivos afectados, las variables meteorológicas analizadas y los algoritmos de machine learning utilizados. Las bases de datos consultadas fueron: Web of Science, Google Scholar, Dialnet. También se recopilaron las métricas de rendimiento de los modelos predictivos y los principales hallazgos relevantes.

Para facilitar la comprensión y el análisis de la información recopilada, se identificaron los temas centrales y se extrajeron los aspectos más relevantes tenidos en cuenta fueron: técnicas de Machine Learning, agricultura de precisión, inteligencia artificial. La información resultante se organizó lógicamente mediante clasificación y agrupamiento, y todos los datos extraídos se almacenaron de forma estructurada.

En la fase final de síntesis y análisis de la información, se priorizará el análisis de los datos disponibles. El informe final detallo la metodología usada, se presentó el resultado de forma organizada, analizando su implicación para el departamento de Boyacá y ofreció conclusiones sobre el estado actual del conocimiento en la predicción de heladas y su impacto en la región.

### Figura 1

#### *Ecuación Booleana*



## Resultados

Las heladas representan una amenaza recurrente y significativa para la producción agrícola en el departamento de Boyacá. Ante la creciente variabilidad climática, la necesidad de predicciones precisas y oportunas de estos eventos es fundamental para mitigar pérdidas. En respuesta a este desafío, las técnicas de Machine Learning han emergido como herramientas prometedoras. La presente revisión bibliográfica tiene como objetivo sistematizar la investigación existente sobre la aplicación de métodos de Machine Learning para la predicción de heladas, analizando las principales técnicas utilizadas, los resultados alcanzados y discutiendo su relevancia y potencial aplicación en contextos agrícolas específicos como el de Boyacá.

Según de Shammi et al. (2023) presenta un enfoque innovador para la detección de eventos de heladas en cultivos de trigo mediante el uso de imágenes termográficas infrarrojas (IRT) y modelos de aprendizaje automático. El estudio se llevó a cabo en el sitio experimental del Departamento de Industrias Primarias y Desarrollo Regional (DPIRD) en West Dale, en la región del Wheatbelt de Australia Occidental. En este entorno de campo real, se capturaron imágenes térmicas durante noches con condiciones de helada y no helada, lo que permitió generar un conjunto de datos robusto que abarca diversos rangos de temperatura.

Los autores desarrollaron tres experimentos clave. El primero se centró en clasificar imágenes térmicas asociadas a intervalos de temperatura adyacentes, evidenciando la capacidad de los modelos de machine learning para distinguir entre diferentes fases de congelación. El segundo experimento evaluó por separado las noches con y sin heladas, permitiendo observar patrones térmicos diferenciados. El tercero implementó una técnica de ventana deslizante con incrementos de 0.1 °C para identificar con precisión los puntos de nucleación del hielo y congelación.

Se emplearon cuatro modelos de aprendizaje automático: Random Forest (RF), XGBoost, Convolutional Neural Networks (CNN) y ResNet-50. Los resultados mostraron que los modelos basados en árboles de decisión (RF y XGBoost) superaron significativamente a los modelos de redes neuronales profundas (CNN y ResNet-50) en términos de precisión, especialmente considerando el tamaño limitado del conjunto de datos. XGBoost logró una precisión promedio del 80 % y RF del 76 %, mientras que CNN y ResNet-50 presentaron un rendimiento menor, afectado posiblemente por sobreajuste.

La aplicación de técnicas de detección de heladas mediante termografía infrarroja y aprendizaje automático en Cundinamarca podría ser altamente beneficiosa para cultivos vulnerables como papa, fresa y hortalizas. Este enfoque permitiría generar alertas tempranas, optimizar decisiones agronómicas y reducir pérdidas por eventos climáticos. Sin embargo, su implementación enfrenta retos como el costo de sensores térmicos, la necesidad de datos locales y capacidades técnicas especializadas. A pesar de estas limitaciones, su adopción progresiva, en articulación con universidades y políticas regionales, podría fortalecer la agricultura de precisión y la resiliencia climática en zonas rurales del departamento.

De acuerdo con Shammi et al. (2024) se presenta una metodología innovadora para la detección temprana de heladas en cultivos de trigo mediante el análisis de distribuciones verticales de temperatura y modelos de aprendizaje automático. Mediante imágenes térmicas infrarrojas (IRT), se recolectaron datos de temperatura del dosel, las hojas y el suelo en cultivos de trigo de campo. Este conjunto de datos permitió analizar la dinámica térmica en noches con y sin heladas. El estudio postuló que la relación entre las temperaturas de estas tres capas puede servir como un indicador precoz de la ocurrencia de heladas.

Los autores desarrollaron un análisis exhaustivo de las temperaturas recolectadas y aplicaron cuatro modelos de aprendizaje automático Machine Learning para clasificar escalas de enfriamiento que conducen a noches de heladas de diferente severidad. Se implementaron una unidad recurrente con puerta (GRU), una red neuronal convolucional (CNN), un bosque aleatorio (RF) y máquinas de soporte vectorial (SVM) para evaluar la precisión de la clasificación. Los hallazgos revelaron que las temperaturas de las tres capas analizadas presentan una interrelación que puede utilizarse para la detección temprana de heladas. Se observaron patrones térmicos distintos entre noches con y sin heladas. En noches sin heladas, el dosel resultó ser la capa más fría, la planta más cálida y el suelo la más caliente, sin una convergencia de temperaturas. En contraste, en noches de heladas, se observó una convergencia de las temperaturas del dosel y la planta antes del evento de helada, a medida que el aire frío penetraba a través del dosel. Estos patrones en la distribución de temperatura se tradujeron en un problema de aprendizaje automático para la detección temprana de heladas, clasificando escalas de enfriamiento basadas en las temperaturas propicias para la formación de heladas de diferente intensidad. Los resultados demostraron que los modelos de Machine Learning se lograron determinar las escalas de enfriamiento automáticamente con una precisión que osciló entre el 93% y el 98% en los cuatro modelos evaluados. Esta metodología de detección temprana de heladas, basada en el análisis de distribuciones verticales de temperatura y aprendizaje automático en regiones de Boyacá, podría ofrecer beneficios significativos para la protección de cultivos sensibles a las bajas temperaturas, como papa, fresa y diversas hortalizas. La implementación de este enfoque permitiría la emisión de alertas tempranas, facilitando la optimización de prácticas agronómicas preventivas y la mitigación de pérdidas económicas ocasionadas por eventos de heladas. No obstante, su adopción enfrenta desafíos como la inversión inicial en sensores térmicos de alta

precisión, la necesidad de generar conjuntos de datos locales representativos de las condiciones agroclimáticas específicas de la región y la disponibilidad de personal con conocimientos técnicos especializados en termografía infrarroja y aprendizaje automático. A pesar de estas limitaciones, una implementación gradual y estratégica, en colaboración con instituciones universitarias y el desarrollo de políticas regionales de apoyo, podría impulsar la agricultura de precisión y fortalecer la resiliencia de las comunidades rurales del departamento ante los efectos del cambio climático.

De manera similar, Xu et al. (2021), desarrollaron una metodología para estimar riesgo de heladas en árboles de té en la provincia de Zhejiang, mediante el uso de modelos de aprendizaje automático. La investigación se llevó a cabo considerando datos topográficos y meteorológicos, así como la longitud y latitud de la región. Se utilizaron casos de heladas en árboles de té desde 2017 para proponer un modelo de clasificación multiclase basado en máquinas de vectores de soporte (SVM) y redes neuronales artificiales (ANN) con el fin de estimar la ocurrencia de desastres por heladas a nivel regional. Se compararon los resultados de ambos modelos, ajustando los parámetros óptimos a través de múltiples iteraciones. El modelo SVM alcanzó la mayor precisión con un 83.8%, mientras que el modelo ANN logró un 75%. Las precisiones promedio fueron de 79.3% y 71.3%, y los coeficientes Kappa fueron de 79.1% y 67.37% para SVM y ANN, respectivamente. El modelo SVM fue seleccionado para establecer la distribución espacial del daño por heladas primaverales en árboles de té en la provincia de Zhejiang en 2016. El coeficiente de correlación de Pearson entre los resultados de la predicción y el rendimiento meteorológico fue de 0.79 ( $p < 0.01$ ), lo que indica una consistencia significativa. Finalmente, se evaluó la importancia de los factores del modelo mediante un análisis de sensibilidad, revelando

que la humedad relativa y la velocidad del viento son factores clave que influyen en la precisión de las predicciones.

La aplicación de técnicas de estimación de riesgo de heladas mediante aprendizaje automático en Boyacá podría ser altamente beneficiosa para cultivos vulnerables como papa, fresa y hortalizas. Este enfoque podría permitir generar mapas de riesgo, optimizar la planificación de siembras y la implementación de medidas preventivas en áreas con mayor probabilidad de heladas. Sin embargo, su implementación enfrenta retos como la necesidad de datos históricos de heladas y variables geos climáticas específicas para la región, así como la adaptación y validación de modelos de aprendizaje automático a las condiciones locales. A pesar de estas limitaciones, su adopción progresiva, en colaboración con centros de investigación y entidades gubernamentales, podría sentar bases importantes para una gestión del riesgo climático más informada y contribuir a la búsqueda de una agricultura más sostenible y resiliente en las zonas rurales del departamento, mediante la exploración de la calibración de modelos a las condiciones agroclimáticas locales.

Paralelamente, Noh et al. (2021) elaboran un sistema innovador para la predicción horaria de heladas en huertos mediante el uso de datos de estaciones meteorológicas automáticas y de imágenes de cámaras digitales, aplicando modelos de aprendizaje automático. Este estudio se centró en optimizar modelos de clasificación de heladas para entornos de cultivos de frutales, reconociendo el daño que las heladas primaverales pueden causar a los cultivos tras la germinación. Para esto, se entrenaron modelos de regresión logística, árbol de decisión, bosque aleatorio y máquinas de soporte vectorial (SVM) utilizando datos balanceados de observación de heladas de marzo de los últimos 10 años (2008-2017) proporcionados por el Sistema de Observación Sinóptica Automatizada (ASOS) de la Administración Meteorológica de Corea

(KMA). Los modelos de bosque aleatorio y SVM mostraron un rendimiento de clasificación destacado y fueron seleccionados como las técnicas principales, optimizándose para las condiciones específicas de los huertos basándose en los tiempos de ocurrencia inicial de heladas. Posteriormente, el período de entrenamiento se extendió a marzo-abril durante 20 años (2000-2019). Finalmente, el modelo desarrollado se aplicó a datos de observación de heladas de la KMA ASOS de marzo a abril de 2020, que no se habían utilizado en las etapas previas, y se extrajeron datos RGB de imágenes capturadas por cámaras digitales instaladas en un huerto en Gyeonggi-do. El modelo logró clasificar correctamente 117 de 139 casos de observación de heladas de los datos ASOS nacionales y 35 de 37 observaciones de las cámaras del huerto. La consideración del tiempo de ocurrencia inicial de heladas durante el entrenamiento demostró ser un factor clave en la mejora del modelo de clasificación. Los resultados obtenidos indican claramente que el modelo de clasificación de heladas basado en aprendizaje automático posee una precisión aplicable en el contexto de la agricultura de frutales. Aprovechando el análisis de datos climáticos y el aprendizaje automático, se propone en Boyacá una solución práctica y prometedora para la predicción de heladas mediante modelos que incorporan información de estaciones automáticas e imágenes digitales, buscando proteger cultivos esenciales (papa, fresa, hortalizas) y trasladar la teoría a la práctica agrícola local.

Este enfoque permitiría pronósticos de heladas anticipados y específicos para Boyacá, facilitando medidas preventivas y optimizando decisiones agronómicas para minimizar pérdidas. No obstante, su implementación enfrenta desafíos claves como establecer redes densas de estaciones meteorológicas y cámaras en cultivos, recopilar y procesar grandes volúmenes de datos locales para entrenar modelos adaptados, y contar con personal técnico especializado. A pesar de estos retos, la integración gradual de la predicción basada en aprendizaje automático,

junto con investigación y políticas regionales, podría fortalecer significativamente la agricultura de precisión y la adaptación al clima en el departamento, mediante la calibración de modelos a las condiciones agroclimáticas locales.

Así mismo, Liu et al. (2024) proponen en su publicación un método de alto rendimiento para estimar el índice de daño por heladas (FDI) en cultivos de lechuga mediante el uso de imágenes RGB y multiespectrales capturadas con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y modelos de aprendizaje automático. La investigación se llevó a cabo en condiciones de campo abierto, donde plantas de lechuga sufrieron daños por heladas, permitiendo la adquisición de un conjunto de datos que relaciona las características espectrales con el nivel de daño. A través del análisis de correlación de Pearson, se identificaron características sensibles al FDI a partir de las imágenes RGB (número digital de las bandas azul y roja) y multiespectrales (reflectancia en las bandas azul, roja e infrarroja cercana), así como seis índices de vegetación (VI). Posteriormente, se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple, máquinas de vectores de soporte y redes neuronales para estimar el FDI, considerando diferentes tipos de sensores y agrupaciones de lechuga según su color. Los resultados mostraron una correlación significativa entre las características identificadas y el FDI. Se confirmó la alta sensibilidad de cuatro (VI) modificados a los daños por heladas en todos los grupos de lechuga. La combinación de características de ambas fuentes de datos (RGB y multiespectral) mejoró la precisión promedio de los modelos entre un 3% y un 14%. Se observó que el color de la lechuga influyó en la precisión de los modelos de predicción, siendo generalmente más altos los valores de precisión para el grupo de lechugas verdes. El modelo MULTISURCE-GREEN-NN, que combinó características de ambas fuentes de datos y empleó una red neuronal para el grupo de lechugas verdes, demostró el mejor rendimiento con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.715 y un error cuadrático medio

(RMSE) de 0.014. La aplicación de técnicas de detección de daños por heladas mediante imágenes aéreas y aprendizaje automático en Boyacá podría ser altamente beneficiosa para cultivos vulnerables como papa, fresa y hortalizas. Este enfoque permitiría una evaluación de alto rendimiento y eficiente del daño, facilitando la identificación de germoplasma resistente al frío y apoyando programas de mejoramiento genético en la región. Si bien su implementación enfrenta retos como el costo de la tecnología UAV y el procesamiento especializado de imágenes, su adopción progresiva, en colaboración con centros de investigación y políticas de desarrollo agrícola, podría fortalecer la agricultura de precisión y la capacidad de respuesta ante eventos climáticos adversos en las zonas rurales del departamento.

Como resultado del estudio de Wu et al. (2022), en este trabajo se expone un método para la alerta temprana de daños por heladas en plantaciones de té mediante un enfoque doble para la predicción de temperatura. La investigación se llevó a cabo utilizando datos meteorológicos de campo y tendencias de temperatura de una pequeña estación meteorológica local cercano en China, un importante productor de té a nivel mundial. A través de la aplicación de un modelo de ajuste de Fourier de segundo orden y un modelo de K-Vecinos Más Cercanos (K=3) utilizando datos históricos de temperatura de tres días, se logró una predicción precisa tanto de la temperatura como de la ocurrencia de heladas en jardines de té específicos. La validación del modelo demostró una alta precisión en la predicción de la duración 98.46% y la temperatura al inicio 95.38% de los eventos de helada, superando a modelos tradicionales como ARIMA y regresión lineal múltiple.

La adaptación de esta metodología de detección de heladas tiene gran potencial en Boyacá. Para cultivos como la papa, requeriría combinar predicciones de temperatura del aire con la monitorización o inferencia de la temperatura del suelo (mediante sensores enterrados o

IRT), crucial por su desarrollo inicial subterráneo. En hortalizas de hoja, la termografía infrarroja (IRT) sería clave al reflejar directamente la susceptibilidad en la temperatura superficial de sus hojas.

Implementar un sistema de alerta temprana basado en datos meteorológicos locales y modelos predictivos permitiría a los agricultores tomar medidas preventivas, optimizar recursos y mitigar pérdidas económicas.

Sin embargo, su adopción en Boyacá presenta retos, como la instalación y mantenimiento de estaciones meteorológicas locales, la recopilación de datos históricos específicos por zona de cultivo y el desarrollo de experticia técnica. Pese a esto, la adopción progresiva, con apoyo de universidades, centros de investigación y políticas regionales (acceso a tecnología/capacitación), fortalecería la agricultura de precisión y aumentaría la resiliencia de los agricultores ante eventos climáticos adversos.

Se puede señalar que, Han et al. (2023), se detalla la aplicación de un método novedoso que utiliza el algoritmo de Random Forest para evaluar el riesgo de heladas en cultivos de té en Hangzhou. El estudio empleó datos históricos de evaluaciones tradicionales de riesgo de heladas, seleccionando cuatro indicadores clave: temperatura mínima, altitud, área de siembra de té y rendimiento del té. Estos indicadores se utilizaron para considerar el riesgo de los factores causantes de peligros, la exposición de los elementos vulnerables y la vulnerabilidad de estos elementos.

Se construyó un modelo de evaluación de riesgo de heladas para el té de Hangzhou mediante el algoritmo de Random Forest, y se llevó a cabo una evaluación del riesgo para variedades de té con diferente resistencia al frío. El modelo alcanzó una precisión del 93% después del entrenamiento, y la interpretabilidad superó el 0.937. Los resultados de la evaluación

de riesgos para el té con baja resistencia al frío mostraron las áreas de alto riesgo más extensas, seguidas por las de resistencia media, siendo las de alta resistencia las menos propensas. En comparación con los métodos tradicionales, el modelo de Random Forest presentó una desviación de solo el 1.57%.

La aplicación del modelo de Random Forest, en lugar del ajuste manual de los factores de ponderación en los métodos tradicionales, ofrece ventajas como una operación sencilla, alta eficiencia temporal y alta precisión en los resultados.

La adaptación de técnicas de evaluación de riesgo de heladas basadas en aprendizaje automático en Boyacá podría ser de gran utilidad para cultivos como es en la papa teniendo en cuenta la temperatura y altitud, considerando etapa fenológica, humedad del suelo, topografía y temperatura satelital. SVM o redes neuronales para identificar riesgos complejos. Este enfoque permitiría identificar zonas vulnerables, optimizar estrategias de mitigación y reducir las pérdidas económicas por heladas.

No obstante, su implementación en la región enfrenta desafíos como la disponibilidad de datos históricos detallados y la necesidad de desarrollar capacidades técnicas locales en manejo de algoritmos de aprendizaje automático y SIG.

A pesar de estos retos, una adopción gradual y estratégica, mediante colaboración académica y apoyo regional, podría fortalecer la gestión del riesgo climático y la sostenibilidad de la agricultura rural en el departamento.

A partir de la investigación de Roshan et al. (2022), este trabajo describe un enfoque novedoso para la protección de cultivos contra heladas mediante el uso de sensores agrícolas impulsados por inteligencia artificial para la predicción de la temperatura del suelo. La investigación se centró en la predicción de la temperatura del suelo en días fríos, un factor crítico

que influye directamente en la profundidad de la congelación y, por lo tanto, en el riesgo de daño por heladas en las plantas. Para lograr esto, se utilizaron datos horarios registrados por dispositivos de registro HOBO U30, y se emplearon modelos de redes neuronales para predecir la temperatura del suelo a partir de la temperatura del aire, el contenido de agua del suelo y la humedad relativa. El conjunto de datos se dividió en un 80% para entrenamiento y un 20% para pruebas, y el rendimiento del modelo se evaluó utilizando el error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los resultados del estudio revelan que la red neuronal Perceptrón Multicapa superó a los modelos ANN-GA y ANN-PSO en la predicción de la temperatura del suelo, evidenciado por sus bajos valores de RMSE (0.082 en entrenamiento y 0.085 en prueba) y MSE (0.0068 en entrenamiento y 0.0073 en prueba). Esta precisión predictiva ofrece información valiosa para agricultores, investigadores botánicos y formuladores de políticas de seguridad alimentaria en la implementación de estrategias de protección contra heladas. La aplicación de un enfoque basado en la predicción de la temperatura del suelo mediante inteligencia artificial, en Boyacá podría ser de gran utilidad para cultivos vulnerables a las heladas de suelo como la papa, la fresa y diversas hortalizas. Este método permitiría generar alertas tempranas sobre condiciones propicias para la congelación del suelo, facilitando la toma de decisiones agronómicas preventivas a nivel de suelo (como la aplicación de riego, acolchados u otras prácticas) y contribuyendo a la reducción de pérdidas económicas significativas asociadas a este tipo de daños. Sin embargo, su implementación en la región enfrenta desafíos. Estos incluyen el costo inicial de los sensores necesarios para recopilar datos locales precisos de temperatura del aire, humedad y contenido de agua en el suelo, la necesidad de generar conjuntos de datos históricos robustos y representativos de las condiciones agroclimáticas específicas de Boyacá, y la capacitación técnica requerida para la gestión de los datos y el manejo e

interpretación de los modelos de inteligencia artificial. A pesar de estas limitaciones, una estrategia de adopción progresiva, fomentando la colaboración entre instituciones de investigación agrícola, universidades locales y entidades gubernamentales regionales, podría impulsar la integración de estas tecnologías. Esto fortalecería las capacidades locales en agricultura de precisión y mejoraría la resiliencia de los sistemas productivos agrícolas de Boyacá frente a eventos de frío intenso y heladas del suelo.

En el trabajo de Yin et al. (2023), describe una metodología avanzada para estimar los valores SPAD (contenido de clorofila) en el dosel de trigo antes de la espigazón. Utilizando imágenes multiespectrales de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en China, extrajeron Índices de Vegetación (VI) y de Textura (TI). Aplicaron Eliminación Recursiva de Características (RFE) y evaluaron seis modelos de aprendizaje automático.

La aplicación de este enfoque en Boyacá, utilizando teledetección con UAV y aprendizaje automático, podría ser muy beneficiosa para cultivos como trigo, cebada, otros cereales y pastos. Permitiría un monitoreo nutricional no destructivo, optimizaría la fertilización nitrogenada, mejoraría la toma de decisiones agronómicas y potencialmente aumentaría los rendimientos al asegurar una fotosíntesis eficiente.

De los seis modelos evaluados por Yin et al. (2023), el modelo fusionado de VI y TI basado en Long Short-Term Memory (LSTM) demostró ser el más preciso. Sus métricas ( $R^2=0.8576$ ,  $RMSE=2.9352$ ,  $RRMSE=0.0644$ ,  $RPD=2.6677$ ) destacan su robustez y capacidad de generalización. Aunque no se detallan los resultados de los otros modelos, el éxito del LSTM con fusión subraya la importancia de combinar información espectral y de textura con algoritmos avanzados.

No obstante, la implementación en Boyacá enfrenta desafíos similares a los de la detección de heladas: alto costo de equipos UAV con sensores multiespectrales, necesidad de generar conjuntos de datos locales específicos y la falta de capacidades técnicas especializadas en operación de UAV, procesamiento de imágenes y desarrollo/adaptación de modelos de aprendizaje automático.

A pesar de estas limitaciones, la adopción progresiva de esta tecnología mediante proyectos piloto, en colaboración con universidades, centros de investigación y apoyo regional, podría fortalecer significativamente las prácticas de manejo de cultivos en Boyacá, optimizando el uso de insumos y promoviendo una agricultura más sostenible y resiliente.

El estudio de Mao et al. (2023), este estudio se fundamenta en una estrategia metodológica diseñada para el monitoreo eficiente y rápido del estrés por frío en plantas de té. Su enfoque combina datos multimodales recopilados por vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores multiespectrales (MS), termográficos infrarrojos (TIR) y RGB, con modelos avanzados de aprendizaje profundo. La investigación, llevada a cabo en plantaciones de té durante la hibernación natural, recolectó datos de sensores remotos y fisiológicos de las hojas para construir un índice de daño por frío del té (TCIS).

Para la estimación del TCIS, se desarrolló y optimizó un modelo híbrido de redes neuronales convolucionales y unidades recurrentes cerradas (CNN-GRU). Su rendimiento se comparó con modelos GRU individuales y otros algoritmos clásicos de aprendizaje automático, demostrando una superioridad significativa. Notablemente, la fusión de datos multimodales superó consistentemente el análisis unimodal en la predicción del daño por frío. La combinación bimodal de datos multiespectrales (MS) y RGB resultó ser la más efectiva, alcanzando métricas de rendimiento destacadas: un coeficiente de determinación de predicción ( $R_p^2$ ) de 0.862, un

error cuadrático medio de predicción (RMSEP) de 0.138 y una desviación relativa del error de predicción (RPD) de 2.220. El modelo híbrido CNN-GRU mejorado obtuvo sus mejores resultados con entradas multivariadas que combinaban datos MS y RGB ( $Rp2 = 0.862$ ) o MS, RGB e infrarrojo térmico (TIR) ( $Rp2 = 0.850$ ). Un hallazgo crucial fue que la exclusión de las características del suelo del análisis disminuyó la precisión del modelo, resaltando la importancia de considerar esta información.

La aplicación de estas técnicas de monitoreo de estrés por frío basadas en datos multimodales de UAV y aprendizaje automático en Boyacá presenta un potencial significativo para la agricultura de precisión. En cultivos sensibles a bajas temperaturas como la papa, la integración de datos térmicos para identificar las zonas más frías, junto con información multiespectral para detectar cambios sutiles en la salud de la planta antes de que los daños por heladas sean visibles, podría ser invaluable. En el sector hortícola, dada la diversidad de especies cultivadas en Boyacá, un enfoque multimodal permitiría una evaluación más detallada de la respuesta específica de cada tipo de hortaliza al estrés por frío.

Este enfoque permitiría una evaluación objetiva y precisa de la severidad del daño, facilitando la toma de decisiones oportunas para mitigar pérdidas. Sin embargo, su implementación en la región enfrenta desafíos importantes, incluyendo la inversión inicial en tecnología UAV y sensores multimodales y térmicos, la necesidad de desarrollar modelos específicos adaptados a las condiciones locales y la formación de personal capacitado en el manejo de estas tecnologías y el análisis de datos complejos. A pesar de estos retos, la adopción gradual de estas técnicas, en colaboración con instituciones académicas y con el apoyo de políticas regionales, podría mejorar significativamente la gestión de riesgos climáticos y fortalecer la agricultura de precisión en las zonas rurales del departamento de Boyacá.

Finalmente, Tsenova et al. (2024) presenta un esquema para el pronóstico de la ocurrencia de heladas dañinas en Bulgaria mediante el uso de la técnica de Random Forest y salidas del modelo regional de predicción numérica del tiempo (NWP) ALADIN como predictor. Inicialmente, el modelo estadístico se entrenó con datos medidos con una frecuencia de tres horas en 5 estaciones meteorológicas representativas en Bulgaria durante abril y mayo para el período 1991-2020. El uso de parámetros del modelo de producción regional NWP como predictores permite pronosticar la probabilidad de heladas con 72 horas de anticipación. El rendimiento del esquema se evaluó con resultados para 27 estaciones sinópticas durante abril (2021-2023) que muestran una probabilidad de detección superior a 0.85 y una tasa de falsas alarmas inferior a 0.1, independientemente de la lejanía del pronóstico. La mayoría de los casos considerados fueron correctamente discriminados por el esquema como casos de heladas y no heladas, lo que no ocurriría si solo se considerara la temperatura mínima pronosticada. Los resultados muestran que las heladas podrían pronosticarse con el esquema presentado 3 días antes de su ocurrencia, lo que debería ser suficiente para reaccionar y minimizar los daños causados en el sector agrícola. La aplicación de técnicas de pronóstico de heladas mediante aprendizaje automático en Boyacá podría ser altamente beneficiosa para la planificación agrícola y la protección de cultivos vulnerables como papa, fresa y hortalizas. Este enfoque permitiría anticipar eventos de heladas, optimizar la implementación de medidas preventivas y reducir pérdidas económicas. Sin embargo, su implementación enfrenta retos como la necesidad de datos meteorológicos históricos locales de alta calidad para el entrenamiento de modelos, la disponibilidad de recursos computacionales para el procesamiento y la experiencia técnica para el desarrollo e interpretación de los pronósticos. A pesar de estas limitaciones, su adopción gradual, en colaboración con instituciones de investigación y entidades gubernamentales, podría

fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos en la agricultura del departamento.

**Tabla 1***Síntesis de Revisiones Sistemáticas*

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
Shammi et al. (2023)	Las técnicas actuales de evaluación de daños por heladas son laboriosas, dependen de los datos de los registradores de temperatura y pueden retrasar la toma de decisiones.	Desarrollar una nueva técnica para detectar automáticamente los eventos de heladas (cristalización y subenfriamiento) en plantas de trigo utilizando aprendizaje automático e imágenes térmicas infrarrojas.	Imágenes térmicas infrarrojas (IRT) de plantas de trigo en campo.	Imágenes IRT de plantas de trigo en campo recolectadas durante la temporada de crecimiento de invierno.	Modelos de aprendizaje automático (XGBoost, Bosque Aleatorio, CNN, ResNet-50) entrenados con imágenes IRT para clasificar las etapas de las heladas.	Curvas de precisión de clasificación.	Los modelos de aprendizaje automático pueden detectar eficazmente la nucleación de hielo y las temperaturas del punto de congelación a partir de imágenes IRT. El Bosque Aleatorio (RF) mostró el tiempo de clasificación más rápido.	RF logró la detección de eventos de heladas con aproximadamente 17 ms por imagen.

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
Shammi et al. (2024)	Reducción significativa de la producción global de trigo debido al daño por heladas, y la complejidad del monitoreo de la temperatura vertical	Desarrollar un método de detección temprana de heladas en cultivos de trigo utilizando el análisis de la distribución vertical de la temperatura y modelos de aprendizaje automático.	La relación y los patrones de convergencia de las temperaturas en la planta y el suelo de los cultivos de trigo durante los eventos de heladas.	Imágenes térmicas infrarrojas (IRT) recolectadas de cultivos de trigo en campo, de las cuales se extrajeron las temperaturas de las capas de la canopia, la planta y el suelo.	Se investigó la temperatura y la planta y el suelo para clasificar la severidad de las heladas nocturnas utilizando cuatro modelos de aprendizaje automático.	Precisión (Accuracy) de la clasificación de los modelos de aprendizaje automático.	La detección temprana de heladas se basa en el monitoreo de la temperatura de la planta y el suelo.	Los modelos de aprendizaje automático lograron una precisión del 93% al 98% en la determinación automática de las escalas de frialdad.
Xu et al. (2021)	Las frecuentes heladas en Zhejiang causan daños	Estimar el área de daño por heladas y establecer un modelo de clasificación	La topografía, la meteorología (humedad relativa y velocidad del	Casos de heladas en el té de 2017, datos topográficos y meteorológico	Uso de Support Vector Machine (SVM) y Artificial	Precisión (Accuracy) y coeficiente Kappa. Se utilizó el coeficiente	El modelo SVM superó a otros con una precisión del 83.8%, una precisión	SVM: Precisión más alta: 83.8%, Precisión promedio: 79.3%,

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
	significativos a los brotes de té, un cultivo económico clave. Se necesita un sistema de alerta temprana regional para mitigar estas pérdidas.	multiclase para predecir la ocurrencia de desastres regionales por heladas en árboles de té en la provincia de Zhejiang, utilizando machine learning.	viento son factores clave), la longitud y la latitud influyen en la ocurrencia y el daño de las heladas.	s, y datos de longitud y latitud	Neural Networks (ANN) para desarrollar un modelo de clasificación multiclase. Ajuste de parámetros mediante iteraciones y comparación de resultados entre ambos modelos.	de correlación de Pearson para evaluar la consistencia entre los resultados de la predicción y el rendimiento meteorológico.	promedio del 79.3% y un coeficiente Kappa del 79.1%. Sus predicciones se correlacionaron significativamente (0.79, $p < 0.01$ ) con el rendimiento meteorológico.	Coeficiente Kappa: 79.1%. ANN: Precisión más alta: 75%, Precisión promedio: 71.3%, Coeficiente Kappa: 67.37%. Correlación de Pearson: 0.79 ( $p < 0.01$ ).
Noh et al. (2021)	Este estudio desarrolló un modelo de clasificación	Estimar la ocurrencia de desastres regionales por heladas para el árbol del té en	La topografía, la meteorología (humedad relativa y velocidad del	Casos de heladas en el té de 2017, datos topográficos y meteorológico	Se entrenaron y optimizaron modelos de clasificación (random forest y	Rendimiento de clasificación.	Clasificación exitosa de 117 de 139 casos de heladas en datos ASOS y 35 de 37	Precisión de ASOS: 84.17% (117/139). Precisión de cámara en

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
Liu et al. (2024)	<p>n de heladas basado en machine learning optimizado para entornos de huertos.</p> <p>Evaluación efectiva del daño por heladas en la lechuga para determinar su tolerancia al frío.</p>	<p>la provincia de Zhejiang, utilizando modelos de aprendizaje automático.</p> <p>Proponer un método de alto rendimiento para estimar el Índice de Daño por Heladas (FDI) en lechuga utilizando teledetección.</p>	<p>viento son factores clave), la longitud y la latitud influyen en la ocurrencia y el daño de las heladas.</p> <p>Uso de imágenes RGB y multiespectral es capturadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la detección de alto rendimiento.</p>	<p>s, y datos de longitud y latitud.</p> <p>Imágenes RGB y multiespectral es de lechuga de campo abierto dañada por heladas, capturadas por UAV.</p>	<p>SVM) con datos de KMA ASOS, para luego aplicarlos a nuevos datos de ASOS y cámaras.</p> <p>Se investigó la relación entre imágenes y FDI. Se identificaron las características de imágenes RGB y multiespectral es más sensibles al</p>	<p>Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y Error Cuadrático Medio (RMSE).</p>	<p>observaciones de cámaras en huertos.</p> <p>Bandas azul, roja, NIR e IV se correlacionaron con el FDI. Cuatro modificados fueron muy sensibles. La combinación multiespectral mejoró la precisión del</p>	<p>huerto: 94.59% (35/37).</p> <p>El modelo MULTISURC E-GREEN-NN tuvo el mejor rendimiento con un R<sup>2</sup> de 0.715 y un RMSE de 0.014.</p>

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
Wu et al. (2022)	Las heladas tardías amenazan la calidad y el rendimiento de los árboles de té.	Determinar con precisión el nivel de ocurrencia de daños por heladas y lograr una predicción localizada en plantaciones de té.	Predicción de la temperatura a corto plazo y en tiempo real para determinar el nivel de daño por heladas, considerando la precisión del modelo y la capacidad de cómputo.	Datos meteorológicos de series de tiempo recopilados de una pequeña estación meteorológica para pruebas y parametrización. La Base Experimental de Té de la Universidad de Zhejiang.	FDI mediante correlación de Pearson.	Precisión de la duración pronosticada del daño por heladas y precisión de la temperatura pronosticada en el momento del inicio del daño. Comparación con ARIMA y MLR.	modelo (3-14%), siendo los de lechuga verde los más exactos.	98.46% para la duración pronosticada de daños por heladas y 95.38% para la temperatura pronosticada en el momento del inicio.
					Método de dos fases que combina un modelo de ajuste de Fourier de segundo orden y un modelo K-Nearest Neighbor (K=3) utilizando datos históricos de temperatura de tres días.		El método propuesto de doble pliegue mostró una excelente precisión para la predicción de la ocurrencia de daños por heladas en comparación con ARIMA y MLR. Predijo tres ocurrencias de daños por heladas en una	

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
Han et al. (2023)	Evaluación y advertencia del riesgo de heladas en el cultivo de té en la ciudad de Hangzhou.	Desarrollar un modelo de evaluación del riesgo de heladas en el té de Hangzhou utilizando el algoritmo Random Forest, mejorando la precisión.	La utilización del algoritmo Random Forest para la evaluación del riesgo, integrando indicadores de factores causantes, exposición y vulnerabilidad.	Resultados de la evaluación tradicional del riesgo de heladas en el té, junto con datos de: temperatura mínima, altitud, área de plantación.	El estudio aplica el algoritmo Random Forest para construir un modelo de evaluación del riesgo de heladas en el té.	El modelo alcanzó una precisión del 93% después del entrenamiento, con una interpretación (R-cuadrado) superior a 0.937.	prueba de campo. El modelo alcanzó una precisión del 93% y una interpretación superior a 0.937. Las áreas de alto riesgo para té de baja resistencia al frío fueron las más extensas, seguidas por la resistencia media y alta.	La desviación del modelo Random Forest con respecto a los métodos tradicionales es solo del 1.57%. Ventajas: operación simple, alta eficiencia de tiempo y alta precisión.
Roshan et al. (2022)	Las heladas y la escarcha que ponen	El objetivo principal de este estudio es predecir la	La temperatura del suelo, como el	Los datos utilizados en el estudio fueron	Se emplearon redes neuronales multicapa	Las métricas de evaluación utilizadas	La red neuronal Multi-layer perceptron (MLP) tuvo un	Resultados del Modelo MLP: Entrenamiento: RMSE =

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
	en peligro la salud de los cultivos y pueden arruinar plantas y frutos.	temperatura del suelo en días fríos para prevenir daños por congelación en los cultivos.	factor más significativo que influye en la profundidad de congelación.	registrados y registrados por hora por el dispositivo de registro de datos HOBO U30.	(MLP). Para su ajuste, se utilizaron algoritmos evolutivos como el Algoritmo Genético (GA) y la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), en lugar de los métodos tradicionales basados en gradientes.	para la red neuronal fueron el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Cuadrático Medio (MSE). También se calcularon el valor P y el valor T para pruebas de hipótesis estadísticas.	mejor rendimiento en la predicción de la temperatura del suelo en comparación con los modelos ANN-GA y ANN-PSO.	0.082, MSE = 0.0068. Prueba: RMSE = 0.085, MSE = 0.0073
Yin et al. (2023)	El estrés por frío afecta la producción	Monitorear los valores SPAD del dosel de trigo durante	La capacidad de invertir con mayor precisión los	Imágenes multispectral es obtenidas	Este estudio estimó los valores SPAD a partir	R <sup>2</sup> (Coeficiente de determinación)	El modelo basado en la fusión de VI y TI con LSTM	R <sup>2</sup> =0.8576, RMSE = 2.9352, RRMSE =

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
	de trigo de invierno en la región del Yangtze medio-bajo antes de la espigación.	la etapa previa al espigado utilizando imágenes multiespectral es de UAV para evaluar la resiliencia al estrés del cultivo.	valores SPAD antes de la etapa de encañado, utilizando índices espectrales y de textura obtenidos de imágenes multiespectrales de UAV.	mediante un UAV.	de imágenes de UAV. Para ello, se extrajeron índices de vegetación (VI) y de textura (TI), y la estimación final se realizó con seis algoritmos de aprendizaje automático.	n), RMSE (Raíz del error cuadrático medio), RRMSE (Error cuadrático medio relativo), RPD (Relación de rendimiento de predicción).	logró la mayor precisión para la estimación de valores SPAD	0.0644, RPD = 2.6677.
Mao et al. (2023)	La evaluación tradicional de la injuria por frío en plantas de té es	Desarrollar un método objetivo y preciso para monitorear rápidamente el daño por frío	Estrés por frío en plantas de té, monitoreado de forma rápida y objetiva a	Datos multimodales de teledetección (multiespectral, termal infrarrojo,	Mejora de un modelo híbrido de redes neuronales convolucionales y unidades	Coefficiente de determinación, Error cuadrático medio de predicción,	La fusión de datos multimodales superó a los datos unimodales. El modelo híbrido	MS + RGB: Rp2=0.862, RMSEP = 0.138, RPD = 2.220. MS + RGB + TIR: Rp2=0.850.

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
	laboriosa y subjetiva, causando grandes pérdidas a la industria.	en plantas de té, utilizando datos multisensores de UAV y aprendizaje profundo.	través de UAV con datos multisensores y aprendizaje profundo.	RGB) recolectados por UAVs, y datos fisiológicos de hojas de té.	recurrentes con compuerta (CNN-GRU) para estimar la puntuación de injuria por frío del té (TCIS).	RPD (Ratio de Desviación de Predicción).	CNN-GRU fue superior a otros modelos de referencia, mientras que la eliminación de características del suelo redujo la precisión.	
Tsenova et al. (2024)	Daños en el sector agrícola debido a heladas no pronosticadas o mal pronosticadas en Bulgaria.	Desarrollar e implementar un esquema de pronóstico de heladas dañinas en Bulgaria utilizando técnicas de Machine Learning (Random Forest) y datos	Uso del modelo numérico regional de predicción del tiempo (NWP) ALADIN como predictor y la técnica de Random	Datos medidos con frecuencia de tres horas en 5 estaciones meteorológicas representativas en Bulgaria (abril y mayo, 1991-2020) para el entrenamiento	Entrenamiento de un modelo estadístico (Random Forest) con datos históricos y evaluación de su rendimiento usando parámetros	Probabilidad de Detección (POD) y Tasa de Falsas Alarmas (FAR).	La mayoría de los casos fueron correctamente discriminados como heladas o no heladas. El esquema permite pronosticar heladas con 3 días de antelación.	Probabilidad de detección (POD) superior a 0.85 y tasa de falsas alarmas (FAR) inferior a 0.1 (para 27 estaciones sinópticas durante abril de 2021-2023).

Referencia	Problema Central	Objetivo Principal	Factor Clave	Fuente de Datos	Metodología Principal	Métricas de Evaluación	Resultados Clave	Valores de Rendimiento
		del modelo NWP regional ALADIN.	Forest para el pronóstico.	. La salida del modelo ALADIN para la predicción.	del modelo ALADIN para el pronóstico a 72 horas.			

*Nota.* En la presente tabla se observa los resultados a lo largo de la investigación más relevantes para la toma y clasificación de la información.

## Conclusiones

La integración de diversas fuentes de datos (multimodales) como imágenes térmicas infrarrojas (IRT), imágenes RGB y multiespectrales, datos meteorológicos tradicionales (temperatura, humedad, viento) y datos topográficos mejora significativamente la precisión de los modelos de Machine Learning en la detección temprana, predicción del riesgo y estimación del daño por heladas.

La termografía infrarroja (IRT) se revela como una herramienta valiosa para la detección temprana de heladas al permitir el análisis de patrones térmicos en diferentes partes de la planta y el suelo, identificando puntos de nucleación del hielo y fases de congelación con alta precisión. Los modelos de aprendizaje automático entrenados con datos de IRT (RF y XGBoost) alcanzaron precisiones promedio del 76% y 80% respectivamente en la detección de heladas, lo que subraya la riqueza de la información térmica capturada por la IRT en comparación con la información visual. Las imágenes normales no se utilizaron como entrada directa para la clasificación de heladas en este estudio, lo que implícitamente sugiere su menor utilidad para la detección temprana en comparación con la IRT.

El análisis de la distribución vertical de la temperatura dentro del cultivo (dosel, hojas, suelo) proporciona información crucial para la detección temprana de heladas, ya que la relación térmica entre estas capas exhibe patrones distintivos en noches con y sin heladas. Los modelos basados en árboles de decisión mostraron una precisión notable en la clasificación de imágenes térmicas, con XGBoost alcanzando un 80% y Random Forest un 76% de precisión (Shammi et al., 2023). En contraste, los modelos de aprendizaje profundo como CNN y ResNet-50 tuvieron un rendimiento inferior. Sin embargo, al analizar las distribuciones verticales de temperatura, los modelos de Machine Learning lograron una precisión significativamente mayor, oscilando entre

el 93% y el 98% en la detección temprana de heladas (Shammi et al., 2024). Para la estimación del riesgo de heladas en árboles de té, SVM superó a ANN con una precisión del 83.8% frente al 75% (Xu et al., 2021). En la predicción horaria de heladas en huertos, Random Forest y SVM destacaron, logrando clasificar correctamente un alto porcentaje de casos (Noh et al., 2021). Finalmente, en la estimación del índice de daño por heladas en lechuga, un modelo de red neuronal que combinó datos RGB y multiespectrales para lechugas verdes alcanzó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.715 (Liu et al., 2024).

La estimación del riesgo de heladas a nivel regional, utilizando modelos de clasificación como Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y Random Forest, basados en datos topográficos, meteorológicos e incluso datos históricos de rendimiento de cultivos, permite identificar áreas más vulnerables y optimizar la planificación agrícola.

La teledetección con vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores RGB y multiespectrales, combinada con modelos de regresión basados en Machine Learning, facilita la estimación eficiente y de alto rendimiento del índice de daño por heladas en cultivos, permitiendo la evaluación objetiva de la severidad del daño.

La predicción de la temperatura del suelo mediante redes neuronales, utilizando datos de temperatura del aire, humedad y contenido de agua del suelo, emerge como un enfoque relevante para anticipar las heladas de suelo, un factor crítico para ciertos cultivos con desarrollo subterráneo. La investigación de Shammi et al. (2023) demostró una precisión de clasificación de heladas del 80% con XGBoost y del 76% con Random Forest usando imágenes térmicas, mientras que modelos de redes neuronales tuvieron un rendimiento inferior. Por otro lado, Shammi et al. (2024) lograron una precisión significativamente mayor, entre el 93% y el 98% con GRU, CNN, RF y SVM, al analizar distribuciones verticales de temperatura. Xu et al. (2021)

obtuvieron una precisión del 83.8% con SVM y 75% con ANN para la estimación de riesgo de heladas en árboles de té. Noh et al. (2021) lograron clasificar correctamente el 84.17% de los casos de heladas con un modelo basado en aprendizaje automático que combinaba datos de estaciones meteorológicas e imágenes de cámaras. Finalmente, Tsenova et al. (2024) reportaron una probabilidad de detección de heladas superior al 0.85 y una tasa de falsas alarmas inferior a 0.1 utilizando Random Forest y datos de modelos numéricos del tiempo.

Si bien los modelos de Machine Learning muestran un gran potencial, su implementación efectiva en contextos específicos como Boyacá requiere la disponibilidad de datos históricos y locales de alta calidad, la inversión en infraestructura tecnológica (sensores, UAVs, estaciones meteorológicas), el desarrollo de capacidades técnicas especializadas y la adaptación y validación de los modelos a las condiciones agroclimáticas particulares de la región.

## Recomendaciones

Establecer estaciones meteorológicas automáticas, cámaras digitales y sensores de temperatura de suelo en zonas agrícolas clave para recopilar datos locales precisos.

Facilitar el acceso a vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras multiespectrales, térmicas e RGB para el monitoreo de cultivos.

Recopilar y organizar datos de temperatura, humedad, precipitación, eventos de heladas y variables topográficas específicas de Boyacá.

Desarrollar plataformas que integren pronósticos meteorológicos regionales con modelos locales de predicción de heladas y riesgo, difundiendo alertas oportunas a los agricultores.

Promover el uso de la información generada por estas tecnologías para optimizar la siembra, la fertilización, el riego y las medidas de protección contra heladas.

Apoyar financieramente a los agricultores en la adquisición de sensores, drones y software de análisis de datos.

Fomentar proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico en colaboración con universidades y centros de investigación locales para adaptar y validar modelos de detección, predicción y evaluación de riesgo de heladas utilizando los datos recopilados.

Promover la integración de los sistemas de alerta temprana y la información de riesgo de heladas generada por estas tecnologías en la planificación agrícola, la toma de decisiones de manejo de cultivos y las estrategias de mitigación de riesgos a nivel regional y de finca.

### Referencias Bibliográficas

- Ahumada-García, R., Poblete-Echeverría, C., Besoain, F., & Reyes-Suarez, J. (2016). Inference of foliar temperature profile of a vineyard using integrated sensors into a motorized vehicle. En *IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)* (pp. 1–6). IEEE.
- Arteaga, L. E., & Burbano, J. E. (2018). Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 79-91.
- Barragán Cárdenas, N. (2019). *Heladas, precios de alimentos e inercia térmica*. Uniandes.
- Bravo, J. H., & Camargo González, R. A. (2013). El seguro agropecuario, estado actual en Colombia. *Gestión y Sociedad*, 6(1), 163-178.
- Cadena Lema, H. D. (2020). *Diseño de un sistema para el control de riego mediante técnicas de aprendizaje automático aplicada a la agricultura de precisión en la granja la pradera de la universidad Técnica del Norte* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica del Norte.
- Calderón Caro, E. (2022). *Predicción temprana de heladas en cultivos de altura, empleando métodos de aprendizaje de máquinas* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Caracol Radio. (2024, 12 de abril). Heladas atípicas de Cerinza afectaron 40% de la producción de flores. <https://caracol.com.co/2024/04/12/heladas-atipicas-de-cerinza-afectaron-40-de-la-produccion-de-flores/>
- Cortez Robles, J. J. (2023). *Ciencia de datos en la predicción del fenómeno climático de la helada, centrado en su intensidad, duración y alternativas de mitigación* [Tesis de pregrado]. Universidad de la Sabana.

- Ding, L., Tamura, Y., Noborio, K., & Shibuya, K. (2021). Frost forecast-a practice of machine learning from data. *International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems*, 13(4), 191-203.
- Dominguez, N. J. (2022). *Caracterización agroclimática de heladas en La Abrita (Santiago del Estero). Período 1988-2020* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Soria, E., Rodríguez, P., García, Q., Vaquer, F., Vicent, J., & Vila, J. (2022). *Inteligencia Artificial*. RA-MA.
- Fernández Hidalgo, K., Becci, G., & Morandi, M. (2016). Alertas tempranas por heladas en redes de comunicación seguras. En *VIII Congreso Argentino de AgroInformática (CAI-2016)*. JAIIO.
- Gómez, G. M. C. (2010). Las heladas en el Perú y en el mundo. *Univ. Cont.*, 42.
- Gómez Latorre, D. A. (2014). *Caracterización, pronóstico y alternativas de manejo de las heladas en el sistema de producción lechero del Valle de Ubaté y Chiquinquirá (Colombia)* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- González Botero, D. F. (2018). *Planteamiento de un modelo de predicción de heladas en cultivos de Rosa en la Sabana de Bogotá* [Tesis de pregrado]. Universidad de La Salle.
- Grupo de trabajo de la declaración PRISMA. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 821-829.
- Guzmán Albores, J. M., Matuz Cruz, M. de J., Arana Llanes, J. Y., López Carrasco, E., Gómez Vázquez, V., & González Cárdenas, N. (2024). Avances y perspectivas de la agricultura

- de precisión para la sostenibilidad agrícola. *XIKUA Boletín Científico de La Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 12(24), 1-6.
- Han, Y., He, Y., Liang, Z., Shi, G., Zhu, X., & Qiu, X. (2023). Risk Assessment and Application of Tea Frost Hazard in Hangzhou City Based on the Random Forest Algorithm. *Agriculture*, 13(2), 327.
- Hernández Romero, G. M. (2017). *La clase de ciencias naturales como escenario para propiciar el diálogo de saberes a propósito de las heladas como situación de estudio* [Tesis de maestría]. Universidad Pedagógica Nacional.
- Jacobsen, S. E., Mujica, A., & Ortiz, R. (2003). La importancia de los cultivos andinos. *Fermentum. Revista Venezolana de Sociología y Antropología*, 13(36), 14-24.
- Liu, J., Ban, S. T., Wei, S. W., Li, L. Y., Tian, M. L., Hu, D., Liu, W. Z., & Yuan, T. (2024). Estimating the frost damage index in lettuce using UAV-based RGB and multispectral images. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1242948.
- Mao, Y. L., Li, H., Wang, Y., Wang, H., Shen, J. Z., Xu, Y., Ding, S. B., Wang, H., Ding, Z. T., & Fan, K. (2023). Rapid monitoring of tea plants under cold stress based on UAV multi-sensor data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108176.
- Méndez, R. C., & Camacho, J. A. (2024). Desarrollo de un modelo de machine learning para determinar el comportamiento de heladas en la Sabana de Bogotá. *Vía Innova*, 11(1), 150-164.
- Noh, I., Doh, H.-W., Kim, S.-O., Kim, S.-H., Shin, S., & Lee, S.-J. (2021). Machine Learning-Based Hourly Frost-Prediction System Optimized for Orchards Using Automatic Weather Station and Digital Camera Image Data. *Atmosphere*, 12(7), 846.  
<https://doi.org/10.3390/atmos1207046>

- Panata Buñay, P. A. (2020). *Software de control meteorológico para la detección de heladas y emisión de alertas tempranas en el Geoportal del Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Riabani Mercado, F., García Fernández, W., & Herrera Acebey, J. A. (2016). Sistema de inteligencia artificial para la predicción temprana de heladas meteorológicas. *Acta Nova*, 7(2), 483-496.
- Rivera Ricaurte, O. D. *Análisis y caracterización del ambiente atmosférico durante heladas radiativas en Colombia* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Colombia.
- Sorbara, A. (2023). La inteligencia artificial y el aprendizaje. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 11(1), 1–15.
- Roshan, S. H., Kazemitabar, J., & Kheradmandian, G. (2022). Artificial Intelligence Aided Agricultural Sensors for Plant Frostbite Protection. *Applied Artificial Intelligence*, 36(1), 1–16.
- Shammi, S., Diepeveen, D., Zander, S., Jones, M. G. K., & Sohel, F. (2024). Early frost detection in wheat using machine learning from vertical temperature distributions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 221, 108950.
- Shammi, S., Sohel, F., Diepeveen, D., Zander, S., & Jones, M. G. K. (2023). Machine learning-based detection of frost events in wheat plants from infrared thermography. *European Journal of Agronomy*, 149, 126900.
- Tiscornia, G., Cal, A., & Giménez, A. (2016). Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(1), 66-71.

- Tsenova, B., Georgieva, V., & Dinev, M. (2024). Frost Events Forecast Using Machine Learning in Bulgaria. *Scientific Papers-Series B-Horticulture*, 68(1), 222-226.
- Vargas, H. S. M., Coy, C. A. C., & Rodríguez, L. A. C. (2021). Análisis bibliométrico sobre heladas en cultivos y su relación con las soluciones generadas de diferentes investigaciones: Bibliometric analysis of frost in crops and its relationship with the solutions generated from different investigations. *South Florida Journal of Health*, 2(3), 376-394.
- Wu, Z., Li, K., Yuan, L., Zhang, J., Zhou, X., Yuan, Q., . . . Han, S. (2022). Tea Plantation Frost Damage Early Warning Using a Two-Fold Method for Temperature Prediction. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 91(10), 2269–2282.
- Xu, J., Guga, S., Rong, G., Riao, D., Liu, X., Li, K., & Zhang, J. (2021). Estimation of Frost Hazard for Tea Tree in Zhejiang Province Based on Machine Learning. *Agriculture*, 11(7), 607.
- Yin, Q., Zhang, Y., Li, W., Wang, J., Wang, W., Ahmad, I., Zhou, G., & Huo, Z. (2023). Mejor Inversión de Valores SPAD de Canopy de Trigo antes de la Etapa de Encabezamiento Usando Índices Espectrales y de Textura Basados en Imágenes Multispectrales de UAV. *Teledetección*, 15(20), 4935.
- Zhuang, X., Zhu, P., Yang, A., & Caldas, L. (2025). Aprendizaje automático para el diseño arquitectónico generativo: Avances, oportunidades y desafíos. *Automatización en Construcción*, 174, 106129.