

Predicción de Tormentas y Tornados Mediante Redes Neuronales

Padilla Pimentel Carlos Eduardo
Manjarrez Rodelo Omar
Acosta Chang Luis Xavier

Marzo 2025

Contents

1	Introducción	2
2	Planteamiento del Problema	2
3	Antecedentes	4
4	Marco Teórico	5
5	Referencias	7

1 Introducción

Las tormentas y tornados son fenómenos meteorológicos extremos que representan una amenaza significativa para la seguridad de las personas, la infraestructura y las economías locales. Su alta velocidad de formación y naturaleza impredecible dificultan la emisión de alertas tempranas precisas, lo que puede derivar en graves consecuencias cuando las comunidades no tienen el tiempo suficiente para prepararse y responder adecuadamente. Aunque en las últimas décadas los avances en meteorología han mejorado la capacidad de monitoreo y predicción, los métodos tradicionales basados en modelos estadísticos y físicos aún presentan limitaciones en cuanto a la precisión y el tiempo de anticipación de estos eventos. En este contexto, el uso de redes neuronales ha surgido como una alternativa innovadora para mejorar la predicción de tormentas y tornados. Estas tecnologías permiten analizar grandes volúmenes de datos meteorológicos en tiempo real, identificar patrones complejos y generar predicciones más precisas y adaptables a diferentes condiciones atmosféricas. Sin embargo, la implementación de estas soluciones enfrenta diversos desafíos, como la disponibilidad y calidad de los datos, la interpretabilidad de los modelos y la accesibilidad de la información para las comunidades más vulnerables. Estudios previos han demostrado que contar con sistemas de alerta eficientes puede reducir significativamente los impactos de estos fenómenos, permitiendo una mejor toma de decisiones en la gestión del riesgo. No obstante, la integración de tecnologías avanzadas en los sistemas meteorológicos actuales requiere un enfoque centrado en el usuario, asegurando que las alertas sean comprensibles y accesibles para todos los sectores de la población. Para ello, es fundamental el desarrollo de soluciones tecnológicas intuitivas, como aplicaciones móviles con notificaciones personalizadas, integración con sistemas de gestión de emergencias y herramientas de visualización de datos que faciliten la interpretación de la información climática. El presente estudio tiene como objetivo explorar el uso de redes neuronales en la predicción de tormentas y tornados, evaluando su potencial para mejorar la precisión de las alertas tempranas y reducir los impactos de estos eventos climáticos extremos. La metodología propuesta contempla la recopilación y análisis de datos meteorológicos históricos y en tiempo real, el desarrollo de modelos de aprendizaje automático y la validación de sus resultados a través de simulaciones y estudios de caso. Asimismo, se considera la importancia de la accesibilidad y la integración de estas herramientas en plataformas meteorológicas ya existentes, permitiendo la colaboración entre científicos, organismos gubernamentales y comunidades locales. Además de su impacto en la reducción del riesgo de desastres, la implementación de sistemas de predicción basados en redes neuronales puede generar beneficios a nivel social y económico. La optimización de los sistemas de alerta no solo contribuirá a la seguridad de la población, sino que también permitirá reducir costos asociados a la gestión de emergencias y daños materiales. Asimismo, el avance en la digitalización de la predicción meteorológica se alinea con las tendencias actuales de transformación digital y uso de inteligencia artificial en la gestión del clima. A través de este estudio, se busca contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras que fortalezcan la gestión del riesgo y la resiliencia de las comunidades expuestas a estos desastres naturales. La integración de redes neuronales en los sistemas meteorológicos actuales no solo mejorará la capacidad predictiva de tormentas y tornados, sino que también permitirá una mayor democratización de la información climática, asegurando que todas las personas puedan tomar decisiones informadas ante la amenaza de estos fenómenos.

2 Planteamiento del Problema

En la actualidad, las tormentas y tornados representan una amenaza significativa para muchas regiones del mundo, causando daños materiales, pérdidas humanas y afectaciones crítica a la infraestructura. Según el Servicio meteorológico Nacional (SMN) pronostico en el año de 2023 de 15 a 18 tormentas tropicales en el pacífico y de 20 a 23 en el Atlántico. En México, se reciben de 4 a 5 ciclones en promedio cada año. La capacidad de predecir estos fenómenos con precisión y anticipación es crucial para reducir su impacto, permitir la toma de decisiones oportunas en la gestión de riesgos y facilitar la evacuación rápida de las comunidades afectadas. A pesar de los avances en meteorología, la predicción de tormentas

y tornados sigue enfrentando desafíos debido a la complejidad de las condiciones atmosféricas, la alta variabilidad de estos eventos y la dificultad de modelar sus múltiples variables, como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad y la velocidad del viento. Los métodos tradicionales de predicción, como el modelo global del Sistema de Pronóstico Global (GFS) y el modelo del Centro Europeo para Pronósticos de Mediano Plazo (ECMWF), han logrado avances importantes, pero aún presentan limitaciones en cuanto a la precisión y el tiempo de anticipación con el que pueden predecirse estos fenómenos. Por ejemplo, estudios han demostrado que estos modelos pueden predecir la formación de tornados con una precisión del 70-85. Esto se debe a la naturaleza caótica del clima y a la dificultad de integrar grandes volúmenes de datos en tiempo real para mejorar la exactitud de las predicciones. En este sentido, la implementación de tecnologías avanzadas, como las redes neuronales y el aprendizaje automático, ofrece una oportunidad para mejorar significativamente la capacidad predictiva de estos eventos climáticos extremos y proporcionar información oportuna que permita una rápida evacuación y respuesta de emergencia. Investigaciones recientes han demostrado que los modelos basados en inteligencia artificial pueden mejorar la precisión de la predicción en un 10-15 respecto a los métodos tradicionales, lo que sugiere un gran potencial para su aplicación en sistemas de alerta temprana y protocolos de evacuación.

El uso de redes neuronales en la predicción de tormentas y tornados permite analizar patrones complejos en datos meteorológicos históricos y en tiempo real, mejorando la capacidad de identificar condiciones propicias para la formación de estos fenómenos. Sin embargo, la adopción de esta tecnología enfrenta varios desafíos. Uno de los principales es la disponibilidad y calidad de los datos, ya que la información proveniente de satélites, radares meteorológicos y sensores atmosféricos puede no ser suficiente o estar sesgada. Para abordar esta limitación, se están desarrollando enfoques que combinan datos obtenidos de diversas fuentes, incluyendo simulaciones avanzadas y la colaboración entre agencias meteorológicas para mejorar la cobertura y precisión de los modelos. Además, la creación de bases de datos meteorológicas más accesibles y estandarizadas es un paso clave para garantizar la eficacia de estos sistemas predictivos. Otro desafío importante es la interpretabilidad de los modelos de redes neuronales, ya que, si bien pueden generar predicciones precisas, la falta de explicaciones claras sobre cómo se llega a ciertos resultados puede generar desconfianza en su aplicación práctica. Para enfrentar este problema, el desarrollo de técnicas de "explicable AI" puede ayudar a proporcionar interpretaciones más transparentes de los modelos, facilitando su integración en los sistemas de alerta temprana y aumentando la confianza en su uso por parte de meteorólogos y tomadores de decisiones. Además, la accesibilidad a la información predicha es un factor crucial. Las comunidades más vulnerables a tormentas y tornados pueden enfrentar barreras tecnológicas y económicas que dificultan su capacidad de respuesta. Sin embargo, es importante considerar que la infraestructura de comunicación varía entre regiones. En áreas con conectividad estable, pueden desarrollarse aplicaciones móviles con notificaciones en tiempo real, mientras que en comunidades rurales o con acceso limitado a internet, se pueden implementar sistemas de alerta comunitarios mediante radiofrecuencia o SMS. Complementariamente, es esencial generar materiales educativos que ayuden a la población a interpretar correctamente la información proporcionada y actuar en consecuencia para facilitar evacuaciones rápidas y eficaces. En este contexto, el presente estudio busca mejorar la predicción de tormentas y tornados mediante el uso de redes neuronales, considerando los retos técnicos y sociales asociados con su implementación. La pregunta central de esta investigación es: "¿En qué medida el uso de redes neuronales mejora la precisión de la predicción de tormentas y tornados en comparación con modelos meteorológicos tradicionales y cómo puede esta información facilitar evacuaciones rápidas y seguras?". Al integrar estas tecnologías en los sistemas meteorológicos actuales y fomentar la colaboración entre organismos gubernamentales, científicos y comunidades locales, se pretende fortalecer la capacidad de anticipación ante estos eventos, reduciendo su impacto y mejorando la seguridad de la población a través de respuestas de emergencia más efectivas.

3 Antecedentes

La predicción de desastres naturales constituye un desafío crítico para la comunidad científica y tecnológica. Dentro de estos fenómenos, las tormentas severas representan uno de los eventos meteorológicos más complejos y destructivos. Tradicionalmente, se han empleado modelos estadísticos y físicos para anticipar estos eventos; sin embargo, dichas metodologías presentan limitaciones en precisión y en la capacidad de adaptarse a la naturaleza caótica y no lineal de las tormentas severas. En este contexto, el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) se ha posicionado como una herramienta prometedora, permitiendo modelar relaciones complejas a partir de grandes volúmenes de datos históricos. Las RNA, inspiradas en la estructura y funcionamiento del cerebro humano, han evolucionado considerablemente desde sus inicios, pasando de simples modelos de clasificación a sistemas complejos de aprendizaje profundo. Esta evolución ha permitido la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el pronóstico meteorológico, específicamente en la detección y predicción de tormentas severas. Estudios pioneros han demostrado la capacidad de las RNA para captar patrones precursores de convectividad intensa y mejorar la precisión de las predicciones en comparación con métodos tradicionales. Diferentes estudios han abordado el uso de RNA para el pronóstico de tormentas severas, proporcionando importantes contribuciones en cuanto a metodología, recopilación de datos y validación experimental. La aplicación de técnicas de aprendizaje profundo en el pronóstico de fenómenos meteorológicos severos ha ganado relevancia en los últimos años, permitiendo abordar la complejidad inherente a la dinámica de las tormentas convectivas y otros eventos extremos. Diversos estudios han demostrado que el uso de redes neuronales, en particular aquellas diseñadas para capturar la dependencia temporal y espacial de los datos, mejora significativamente la precisión en la predicción a muy corto plazo (nowcasting) y en la identificación temprana de condiciones críticas. En Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting, se propone el uso de redes neuronales convolucionales con memoria a largo plazo (ConvLSTM) para la predicción de precipitaciones a muy corto plazo, lo que resulta especialmente relevante para el nowcasting de tormentas convectivas. Los autores integran datos satelitales y de radar para capturar la evolución temporal y espacial de los sistemas convectivos, demostrando mejoras en la precisión predictiva en comparación con modelos tradicionales (Shi et al., 2016, pág. 6). Por otro lado, A Neural Network Short-Term Forecast of Significant Thunderstorms evalúa la aplicación de RNA para la predicción a corto plazo de tormentas severas. Utilizando registros históricos de datos meteorológicos y mediciones de radar, el artículo demuestra que las RNA pueden identificar de forma temprana patrones asociados a la formación de tormentas críticas, lo que permite emitir alertas con mayor antelación (10.1175/1520-0434(1992)007;0525:ANNSTF;2.0.CO;2).

Un estudio comparativo titulado A Comparative Study of Machine Learning Techniques for Nuanced Weather Prediction analiza diversas técnicas de aprendizaje automático, incluyendo modelos basados en redes neuronales, para el pronóstico de eventos meteorológicos severos. Los resultados evidencian que, al combinar diferentes enfoques (por ejemplo, modelos híbridos), es posible superar las limitaciones de los métodos tradicionales en términos de precisión y tiempo de respuesta. Además, se destacan las ventajas de integrar técnicas de machine learning en sistemas de alerta temprana para eventos convectivos (10.1109/CSCI62032.2023.00046). El uso de RNA en la predicción de tormentas severas tiene aplicaciones directas en la mejora de los sistemas de alerta temprana y la mitigación de riesgos. Entre las aplicaciones destacan:

- Sistemas de Alerta Temprana: Integración de modelos predictivos en redes de monitoreo meteorológico para emitir alertas anticipadas a comunidades vulnerables.
- Planificación de Respuestas en Emergencias: Uso de predicciones precisas para optimizar recursos y planificar evacuaciones o acciones de mitigación en tiempo real.
- Investigación y Desarrollo: Fomento de estudios interdisciplinarios que combinan meteorología, inteligencia artificial y ciencias de la computación, facilitando avances en el campo de la predicción de desastres naturales.

Como menciona Yang y Yamagata en *Urban Systems Design: Shaping Smart Cities by Integrating Urban Design and Systems Science*, Las tecnologías de la información y la comunicación también cambian la forma en que entendemos los sistemas climáticos... los modelos predictivos están evolucionando gracias a la digitalización y al uso de inteligencia artificial en la meteorología (Yang y Yamagata, 2020, pág. 2).

4 Marco Teórico

Los desastres naturales han representado siempre una amenaza para la seguridad y el bienestar de las comunidades a nivel global. Entre estos fenómenos, las tormentas se destacan por su capacidad de generar estragos en periodos muy cortos de tiempo, provocando daños materiales significativos, interrupciones en la infraestructura y, en los casos más extremos, la pérdida de vidas humanas. La ubicación geográfica de México lo convierte en un territorio particularmente vulnerable a estos eventos, ya que se encuentra expuesto a sistemas meteorológicos provenientes del Océano Pacífico, el Golfo de México y el Mar Caribe. El desarrollo de herramientas que permitan predecir estos fenómenos con mayor precisión se ha vuelto una necesidad imperante para mitigar sus efectos. Sin embargo, los métodos tradicionales de pronóstico meteorológico, basados en modelos estadísticos y físicos, han mostrado limitaciones debido a la complejidad y la naturaleza dinámica y no lineal de estos eventos. Es en este contexto donde las redes neuronales han surgido como una alternativa prometedora, ofreciendo una capacidad de procesamiento de datos avanzada que permite mejorar la precisión y rapidez en la detección de tormentas. Las redes neuronales artificiales (RNA) forman parte del vasto campo de la inteligencia artificial y han sido diseñadas inspirándose en la estructura y funcionamiento del cerebro humano. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de información y detectar patrones complejos las convierte en una herramienta invaluable para mejorar la predicción de tormentas. Para lograr una predicción más precisa, es necesario analizar diversos factores meteorológicos que influyen en la formación y evolución de estos fenómenos. Entre estos, la temperatura del aire juega un papel crucial, ya que determina la estabilidad de la atmósfera y contribuye al desarrollo de sistemas convectivos. La presión atmosférica, por su parte, puede experimentar variaciones abruptas que indican la posible aparición de sistemas de baja presión asociados con tormentas severas. De igual manera, la humedad relativa es un factor determinante, ya que un alto contenido de humedad en la atmósfera favorece la formación de nubes y precipitaciones intensas. A su vez, la velocidad y dirección del viento desempeñan un rol fundamental en la evolución y desplazamiento de las tormentas. Además, el uso de datos satelitales y de radar permite detectar la formación de estos sistemas y monitorear su comportamiento en tiempo real. Para analizar y procesar toda esta información, las redes neuronales han evolucionado en distintas arquitecturas especializadas. Las redes neuronales recurrentes (RNN) resultan particularmente útiles para el análisis de series temporales, ya que pueden identificar patrones secuenciales en los datos atmosféricos. Las redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado gran eficacia en el procesamiento de imágenes satelitales y de radar, facilitando la detección temprana de tormentas y su evolución. Por otro lado, las redes neuronales profundas (DNN) permiten procesar enormes volúmenes de datos meteorológicos heterogéneos, extrayendo relaciones complejas entre múltiples variables. Finalmente, las redes generativas antagónicas (GAN) han abierto nuevas posibilidades en la simulación de eventos meteorológicos extremos, permitiendo mejorar la interpretación y predicción de tormentas severas. México ha sido históricamente afectado por tormentas severas, especialmente en estados costeros como Veracruz, Tamaulipas, Quintana Roo y Guerrero. Estas regiones, debido a su ubicación geográfica y condiciones climáticas, son altamente vulnerables a fenómenos meteorológicos extremos que pueden derivar en inundaciones, deslaves y daños estructurales de gran magnitud. En los últimos años, diversas iniciativas han comenzado a explorar el uso de redes neuronales para mejorar la predicción de estos fenómenos, con el objetivo de reducir su impacto y optimizar los sistemas de alerta temprana. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha incorporado técnicas de inteligencia artificial en sus modelos de predicción de ciclones tropicales, permitiendo una mayor precisión en la estimación de la trayectoria y la intensidad de estos sistemas. Gracias al uso de redes neuronales

recurrentes (RNN) y modelos híbridos que combinan datos históricos con información en tiempo real, el SMN ha logrado mejorar la anticipación de tormentas severas y sus posibles efectos en el territorio nacional. Por otro lado, instituciones académicas como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) han desarrollado investigaciones centradas en la aplicación de machine learning y deep learning para la detección temprana de tormentas en el Golfo de México. Investigadores han trabajado en la implementación de modelos de redes neuronales convolucionales (CNN) para el análisis de imágenes satelitales y de radar, lo que permite identificar patrones atmosféricos asociados con la formación y evolución de tormentas con mayor precisión que los modelos tradicionales. Además, han experimentado con redes generativas antagónicas (GAN) para mejorar la simulación y predicción de sistemas meteorológicos complejos, facilitando así la toma de decisiones en tiempo real. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) también ha mostrado interés en la aplicación de redes neuronales para la predicción de lluvias torrenciales y su impacto en zonas urbanas como la Ciudad de México. A través de la recopilación y análisis de datos meteorológicos, CENAPRED ha explorado el uso de modelos de inteligencia artificial explicable (XAI) para comprender mejor los factores que contribuyen a la intensificación de las lluvias y su relación con fenómenos como el efecto isla de calor, el crecimiento urbano desordenado y la saturación de los sistemas de drenaje. A pesar de estos avances, la implementación de redes neuronales en la meteorología mexicana enfrenta varios desafíos. La disponibilidad y calidad de los datos son factores críticos, ya que la infraestructura de monitoreo en algunas regiones del país sigue siendo limitada, dificultando la recopilación de información en tiempo real. Además, la falta de inversión en supercomputación y en la capacitación de especialistas en inteligencia artificial aplicada a la meteorología representa un obstáculo para el desarrollo de modelos más sofisticados. La colaboración entre el sector académico, el gobierno y la iniciativa privada será clave para superar estas barreras y avanzar en la implementación de sistemas de predicción basados en inteligencia artificial, contribuyendo así a la resiliencia climática del país. A pesar del gran potencial que ofrecen estas tecnologías, su implementación no está exenta de desafíos. Uno de los principales obstáculos es la calidad y disponibilidad de los datos meteorológicos, ya que la precisión de las predicciones depende en gran medida de contar con información en tiempo real y de alta fidelidad. Además, la interpretabilidad de los modelos basados en redes neuronales es otro reto importante, pues muchas veces estos sistemas funcionan como “cajas negras”, dificultando la comprensión de los criterios que emplean para llegar a sus conclusiones. Para abordar esta problemática, se han desarrollado técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (XAI), que buscan mejorar la transparencia y confiabilidad de estos modelos. Otro aspecto crucial es la capacidad de los modelos para adaptarse y generalizar su conocimiento a distintos escenarios meteorológicos, evitando la sobre-especialización en eventos específicos. Para lograrlo, es fundamental entrenar los modelos con datos representativos de diversas regiones y condiciones climáticas. Asimismo, el procesamiento de grandes volúmenes de información requiere una infraestructura computacional robusta, lo que representa un desafío en términos de inversión tecnológica. El uso de redes neuronales en la predicción de tormentas en México tiene el potencial de transformar los sistemas de alerta temprana, permitiendo reducir significativamente los efectos de estos fenómenos en la población y en la infraestructura del país. A medida que se integren modelos de aprendizaje profundo con información en tiempo real, la precisión de las predicciones meteorológicas podría alcanzar niveles sin precedentes, brindando a las autoridades y comunidades la capacidad de responder de manera más efectiva ante estos eventos. Para materializar estos avances, es esencial fomentar la colaboración entre instituciones gubernamentales, centros de investigación y la industria tecnológica. La combinación de inteligencia artificial con sensores remotos y modelos meteorológicos podría marcar un punto de inflexión en la mitigación de desastres climáticos en México. Con una estrategia bien estructurada y el apoyo de la comunidad científica, el país tiene la oportunidad de posicionarse como líder en la aplicación de inteligencia artificial para la predicción de tormentas y otros eventos meteorológicos extremos, beneficiando así a millones de personas y fortaleciendo su resiliencia ante los cambios climáticos del futuro.

5 Referencias

1. Shi X, Chen Z, Wang H, Yeung DY, Wong WK, Woo WC, et al. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. Disponible en: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/07563a3fe3bbe7e3ba84431ad9d055af-Paper.pdf.
2. McCann DW. A Neural Network Short-Term Forecast of Significant Thunderstorms. *Weather and Forecasting* 1992;7(3):525–34. DOI: 10.1175/1520-0434(1992)007<0525:ANNSTF>2.0.CO;2.
3. Gangula PR, Yeboah J, Nti IK. A Comparative Study of Machine Learning Techniques for Nuanced Weather Prediction. *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* 2023;260–5. DOI: 10.1109/csci62032.2023.00046.
4. Yang PPJ, Yamagata Y. Urban systems design. *Elsevier EBooks* 2020;1–22. DOI: 10.1016/b978-0-12-816055-8.00001-4.