

Optimización de Sistemas de Alerta temprana en cuencas torrenciales mediante Modelización Híbrida y Funciones de Pérdida Asimétricas

Optimization of Early Warning Systems in torrential catchments through Hybrid Modeling and Asymmetric Loss Functions

J. Molina (1), A. Elordi Zamora (2), J.A. Sillero (1), J.D. Ruiz Sinoga (1)

(1) Universidad de Málaga. (2) Universidad de Málaga - Programa de Doctorado de Economía y Empresa

RESUMEN

La creciente frecuencia de eventos meteorológicos extremos exige una evolución en los sistemas de predicción hidrológica hacia modelos que prioricen la utilidad operativa en la gestión de emergencias. En cuencas de respuesta rápida, la marcada no-linealidad de la relación lluvia-escorrentía y la variabilidad en la saturación del suelo representan desafíos críticos para los sistemas de vigilancia tradicionales. Este trabajo presenta un modelo hidrológico híbrido diseñado específicamente para la alerta temprana. La arquitectura integra principios físicos de escorrentía con técnicas de optimización no lineal. La innovación reside en el uso de funciones de activación tipo "softplus" para modelizar la ganancia dinámica de la cuenca. Esta aproximación permite representar de manera continua el comportamiento de "umbral" de las cuencas torrenciales, donde la respuesta hidrológica se activa de forma explosiva solo tras alcanzar un estado crítico de saturación, estimado mediante el Índice de Precipitación Antecedente (API). Para garantizar la robustez del ajuste en un espacio de soluciones altamente no lineal, se implementó un algoritmo de búsqueda heurística calibrado por fases. En una etapa inicial, el procedimiento optimiza el Error Absoluto Medio (MAE) para converger hacia una solución base que capture con fidelidad la dinámica general de la cuenca. Una vez obtenida esta solución robusta, se introduce una Función de Pérdida Asimétrica que evalúa el rendimiento del modelo respecto a un umbral crítico de alarma predefinido. En esta fase se aplica una penalización reforzada sobre los Falsos Negativos, definidos como aquellos episodios donde el nivel real supera dicho umbral pero la predicción del modelo permanece por debajo del mismo. Los resultados obtenidos en cuencas de la vertiente mediterránea demuestran que, mediante este compromiso (trade-off), es posible sesgar el modelo hacia el lado de la seguridad sin degradar significativamente la precisión general. A modo de prueba, este modelo ha sido aplicado a los ríos Hozgarganta, Almanzora, Trevélez y Guadalhorce, utilizando datos de la Red SAIH Hidrosur entre 2011 y 2025. En las fases de validación, la metodología logró eliminar el error absoluto en escenarios de riesgo de falso negativo, asegurando que las predicciones no subestimen el nivel real cuando se aproxima al umbral de peligro. Este enfoque ofrece a los responsables de gestión de riesgos una herramienta operativamente fiable que prioriza la robustez de la alerta frente a la incertidumbre de los eventos extremos.