

Plataforma Accesible para Alertas Tempranas Hidrometeorológicas Basada en Pronósticos Climáticos y Umbrales Locales de Precipitación

Camila Cardona

Ingeniería de datos e

Inteligencia artificial

Universidad Autónoma de Occidente

Cali, Colombia

Email: camila_and.cardona@uao.edu.co

David Cajiao

Ingeniería de datos e

Inteligencia artificial

Universidad Autónoma de Occidente

Cali, Colombia

Email: david.cajiao@uao.edu.co

Abstract—La información climática sigue siendo inaccesible para las comunidades vulnerables en Latinoamérica, a pesar de la existencia de sistemas abiertos de pronóstico. Este artículo presenta una plataforma que aprovecha los principios de la predicción basada en impactos al traducir los pronósticos de precipitación en alertas tempranas para desastres naturales inducidos por lluvias en zonas rurales de Colombia. El objetivo es aportar una plataforma colaborativa para usuarios con baja alfabetización. El proyecto busca alertar aprovechando los umbrales de precipitación en combinación con pronósticos climáticos para anticipar condiciones de lluvia riesgosas. Utilizando una metodología data thinking, se desarrolló un prototipo alpha. Aprovechando herramientas climáticas y la evaluación de riesgos, la plataforma muestra cómo las soluciones accesibles e inclusivas pueden cerrar la brecha entre los servicios climáticos globales y la preparación local para desastres, promoviendo los ODS 11 y 13.

Palabras clave: Resiliencia climática, IBF (Impact-Based Forecasting), comunidades vulnerables, Open-Meteo.

I. INTRODUCCIÓN

A. Contexto del Problema

Colombia enfrenta un incremento dramático en la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Según el Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA), que consolida datos de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), entre 2001 y 2021 se registraron 23.722 eventos de tipo hidrometeorológico, siendo el 58% asociado a inundaciones y el 34,3% a movimientos en masa [1]. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) reportó en su Boletín de Alerta No. 210 del 29 de julio de 2025 que 308 municipios se encuentran bajo alerta por deslizamientos, de los cuales 68 están clasificados en nivel de alerta roja [2].

Las comunidades más vulnerables ubicadas en la costa pacífica, áreas rurales montañosas y urbanas marginales carecen de acceso efectivo a información climática en tiempo real, enfrentan barreras de alfabetización digital y cuentan con conectividad limitada. Las comunidades más vulnerables ubicadas en la costa pacífica, áreas rurales montañosas y urbanas marginales carecen de acceso efectivo a información

climática en tiempo real, enfrentan barreras de alfabetización digital y cuentan con conectividad limitada. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha promovido un cambio de paradigma en servicios de predicción y alerta mediante los Servicios de Pronóstico y Alerta Basados en Impactos (IBFWS, por sus siglas en inglés), que transforman pronósticos meteorológicos en información accionable capaz de facilitar decisiones anticipatorias de riesgo [3]. Según las Directrices de la OMM (No. 1150), los servicios IBFWS añaden valor al ayudar a usuarios entender el impacto del peligro, permitiendo mejores decisiones y acciones preventivas antes de que ocurran condiciones peligrosas. Sin embargo, la operacionalización de este paradigma en contextos de bajos recursos, baja alfabetización digital y conectividad limitada permanece como un desafío no resuelto.

A pesar de la disponibilidad de sistemas abiertos de pronóstico climático como Open-Meteo, CHIRPS y NOAA, y avances en la ciencia de umbrales de precipitación para deslizamientos, existe una desconexión crítica entre servicios climáticos globales y comunidades locales vulnerables. Los sistemas existentes priorizan precisión técnica sobre accesibilidad, omiten diseño colaborativo y no integran conocimiento comunitario en evaluaciones de riesgo.

Las principales contribuciones de este artículo son: primero, el diseño conceptual de una arquitectura IBFWS accesible y de bajo costo basada en APIs abiertas que puede operacionalizarse en contextos de baja conectividad y alfabetización digital. Segundo, un prototipo de alta fidelidad que integra umbrales de precipitación calibrados localmente con pronósticos en tiempo real mediante interfaces inclusivas con íconos visuales y lenguaje simplificado, diseñadas anticipando las necesidades de comunidades vulnerables. Tercero, la articulación de una metodología de diseño basada en el data thinking que establece la ruta para evolucionar de este prototipo conceptual hacia una plataforma funcional que permita no solo alertas, sino también la capacidad de comunidades para generar sus propios reportes de riesgo observado en tiempo real, mejorando la retroalimentación del sistema. Cuarto,

integración de ciencia climática rigurosa con umbrales de precipitación derivados de datos históricos oficiales (IDEAM) y conocimiento geográfico local, aunque la validación comunitaria de estos umbrales está pendiente. Quinto, contribución conceptual a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 y 13 al demostrar cómo servicios IBFWS con principios de accesibilidad y diseño inclusivo podrían fortalecer capacidades comunitarias de anticipación ante desastres climáticos, con potencial medible una vez se complete pilotaje con usuarios reales.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta el estado del arte sobre sistemas IBFWS, ciencia de umbrales de precipitación, y diseño inclusivo para baja alfabetización, identificando específicamente qué han resuelto investigaciones previas y qué vacíos permanecen. La Sección 3 describe paso a paso la metodología de investigación utilizada, incluyendo justificación de cada procedimiento, análisis de literatura, calibración de umbrales, definición de OKRs, y diseño conceptual de arquitectura con diagramas técnicos. La Sección 4 es de resultados: describe herramientas utilizadas, experimentos realizados, y hallazgos obtenidos de forma clara, presentando algunas métricas. Finalmente, la Sección 5 ofrece conclusiones sobre viabilidad conceptual, limitaciones de esta fase, y direcciones futuras para prototipado funcional.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Servicios de Pronóstico y Alerta Basados en Impactos (IBFWS)

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha promovido globalmente el paradigma de Servicios de Pronóstico y Alerta Basados en Impactos (IBFWS), que combinan pronóstico de peligro, datos de vulnerabilidad y exposición, y evaluación de riesgo [3]. La OMM-Nº 1150 define que IBFWS añade valor al transformar pronósticos complejos en información accionable que permite acciones preventivas anticipatorias. La Red de la Cruz Roja y Media Luna Roja han demostrado en casos como en Bangladesh que IBFWS informados por anticipación pueden reducir pérdidas mediante distribución de ayuda pre-evento basada en disparadores de pronóstico [4].

El South Asia Hydromet Forum (SAHF), que agrupa nueve países incluyendo Bangladesh, India y Nepal, ha identificado la necesidad urgente de transicionar de servicios meteorológicos tradicionales hacia IBFWS en un continuo de tiempos de anticipación que van de horas a décadas [5]. Este documento de trabajo enfatiza que la transición es esencial para mantener la relevancia y utilidad de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (NMHS) en el contexto de cambio climático. El enfoque de SAHF prioriza capacitación regional, co-desarrollo de servicios con agencias sectoriales (agricultura, gestión de desastres, agua, salud), y acceso a pronósticos de conjunto para mejorar anticipación y preparación.

Kooshki Forooshani et al. [6] desarrollaron y validaron un modelo de machine learning (XGBoost) para predicción

de impactos basada en impactos para ciclones tropicales, específicamente para predecir porcentaje de viviendas completamente dañadas en el nivel de municipio y malla geográfica de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. El estudio, utilizando datos de 39 tifones que impactaron Filipinas entre 2006-2020, demostró que empleando únicamente características de fuentes de datos abiertos globales no se deterioraba significativamente el desempeño del modelo. Este hallazgo es crítico pues sugiere que modelos de impacto entrenados en un país pueden ser transferibles a otras regiones, aunque el estudio también subraya que la validación del enfoque en otros países es necesaria, evidenciando tanto el potencial como las limitaciones de la generalización de modelos de machine learning complejos para predicción de impactos.

B. Umbrales de Precipitación

La lluvia es el disparador crítico para múltiples desastres en regiones montañosas tropicales. Gonzalez et al. [7], en revisión sistemática, demostraron que umbrales de precipitación efectivos deben considerar dos períodos distintos de lluvia: la lluvia desencadenante (*triggering rain*, 1 a 6 horas de alta intensidad) que es la que provoca el evento, y segundo, lluvia preparatoria (*preparatory rain*, típicamente 24 a 72 horas) que incrementa progresivamente la humedad del suelo y reduce la resistencia al corte. Este hallazgo es crítico porque la lluvia más intensa inmediatamente previa al deslizamiento no es generalmente la única causa; la humedad precedente del suelo es fundamental. La revisión también identificó que existen metodologías tanto físicamente basadas (modelos hidrogeológicos determinísticos) como estadísticas (análisis histórico de series de tiempo), siendo lo ideal integrar ambas. Esta investigación de Gonzalez et al. establece el framework conceptual fundamental para identificación de umbrales críticos en sistemas de alerta temprana.

Dou et al. [8] establece un framework claro para estudiar umbrales de alerta temprana en deslizamientos inducidos por lluvia, introduciendo modelos dinámicos regionales que integran índices de susceptibilidad espacial con índices de lluvia dinámicos monitoreados en tiempo real. El enfoque revolucionario de Dou utiliza el rainfall index dinámico (ej., I_3-R_{24} donde I es intensidad en 3 horas y R es lluvia acumulada en 24 horas) permitiendo que los umbrales se adapten a condiciones hidrometeorológicas variables. Al integrar mapas de susceptibilidad de deslizamientos con procesos de lluvia dinámicos, el modelo permite evaluación de peligro del que considera tanto dónde es probable que ocurran deslizamientos (dimensión espacial) como cuándo, dado cierto régimen de lluvia (dimensión temporal). Esto supera enfoques anteriores que consideraban susceptibilidad y umbrales de forma independiente.

En Colombia, Marín y Marín-Sánchez [9] desarrollaron LandScient_EWS, un sistema de monitoreo en tiempo real específicamente diseñado para regiones montañosas tropicales como los Andes colombianos. LandScient_EWS es un programa basado en PHP de código abierto que facilita la comparación de datos de lluvia medidos en tiempo real (desde

pluviómetros u otros sensores) con umbrales de precipitación predefinidos para deslizamientos. El sistema permite cálculos precisos y representación gráfica de niveles de alerta (advisory levels) en tiempo real a través de múltiples escalas espaciales, incluyendo nivel regional, de cuenca, y de ladera individual. El software emplea umbrales de intensidad-duración de precipitación tipo power-law y calcula automáticamente el *Intensity Ratio* (IR), que representa la razón entre la intensidad actual de lluvia y la intensidad crítica derivada del umbral, permitiendo identificación dinámica de condiciones críticas dentro de un mismo evento de lluvia que frecuentemente son pasadas por alto en sistemas tradicionales. Validado mediante caso de estudio en Medellín (Colombia) para el deslizamiento del 26 de agosto de 2008 en Villatina, LandScient_EWS demostró capacidad de generar niveles de alerta diferenciados (Low, Medium, Moderate High, High, Extreme) según criticidad en tiempo real, ofreciendo nuevo paradigma para evaluación y respuesta a amenazas de deslizamiento en sistemas de alerta temprana.

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque General

Se implementó un enfoque de investigación conceptual centrado en datos que integra análisis de requisitos, diseño basado en criterios de inclusión, y prototipado de mediana fidelidad. Este enfoque permite: (1) fundamentar decisiones de diseño en análisis riguroso de necesidades reales de usuarios, (2) validar viabilidad técnica mediante especificaciones explícitas, (3) establecer justificación objetiva de opciones de arquitectura, y (4) generar prototipo conceptual robusto que oriente futuras fases de implementación operacional.

B. Fase 1: Definición de Objetivos Estratégicos y Requisitos del Problema

Se definió el reto fundamental mediante análisis del contexto colombiano: comunidades vulnerables en territorios de alto riesgo climático enfrentan fenómenos extremos (lluvias torrenciales, deslizamientos, inundaciones) con limitado acceso a información en tiempo real, baja alfabetización digital, y deficiencias en conectividad. Esta combinación de factores amplifica vulnerabilidad social, económica y ambiental.

Se establecieron tres objetivos principales con resultados clave cuantificables (OKRs):

Objetivo 1: Anticipar efectivamente fenómenos climáticos extremos. KR1: Alcanzar precisión mínima 85% en modelos de predicción de lluvias torrenciales e inundaciones. KR2: Reducir 30% el tiempo de notificación de alertas climáticas frente a sistemas actuales.

Objetivo 2: Garantizar acceso y usabilidad para usuarios vulnerables. KR1: Lograr que al menos 70% de usuarios comprenda información según pruebas de usabilidad. KR2: Alcanzar 50.000 descargas activas en comunidades de baja adopción tecnológica durante los dos primeros años.

Objetivo 3: Promover preparación comunitaria y resiliencia frente al cambio climático. KR1: Aumentar 40% el número de comunidades que implementan planes

de preparación basados en alertas. KR2: Disminuir 25% incidentes reportados de pérdidas materiales por falta de preparación.

Se definió también la estrategia de largo plazo: *Misión:* Desarrollar plataforma accesible e inclusiva que integre datos climáticos en tiempo real y predicciones de fenómenos extremos, anticipando riesgos y fortaleciendo preparación comunitaria. *Visión:* Para 2030, ser solución líder en Latinoamérica para prevención y gestión comunitaria frente a fenómenos climáticos extremos, reconocida por innovación en uso de datos, accesibilidad universal, e impacto en protección de comunidades vulnerables.

Justificación: El establecimiento explícito de OKRs, Misión y Visión proporciona dirección clara, métricas verificables, y facilita comunicación de criterios de éxito a stakeholders. Este enfoque es estándar en investigación orientada a soluciones (solution-focused research).

C. Fase 2: Análisis de Requisitos Funcionales y Especificaciones Técnicas

Se condujo análisis exhaustivo mediante revisión de literatura, contexto de vulnerabilidad en Colombia, y consulta interna de equipo interdisciplinario compuesto por investigadores en datos climáticos, diseño inclusivo, e ingeniería de software.

Requerimientos de usuario identificados: (1) Acceso sencillo a información mediante interfaz intuitiva, lenguaje claro, pictogramas y colores diferenciados, (2) Disponibilidad multicanal (aplicación móvil, SMS) dado al acceso variable a internet, (3) Confiabilidad mediante precisión, oportunidad de alertas y minimización de falsos positivos, (4) Multilingüismo y adaptación cultural con español simplificado y lenguas locales donde aplicable, (5) Acompañamiento educativo para capacitación en prevención y uso tecnológico, (6) Conexión con autoridades reconocidas (instituciones como UNGRD, Cruz Roja) para generar confianza institucional.

Funcionalidades clave definidas: (1) Alertas tempranas predictivas automáticas para lluvias torrenciales, inundaciones, deslizamientos, (2) Mapa interactivo georreferenciado mostrando áreas de riesgo actual y predicciones futuras, (3) Notificaciones multicanal optimizadas para diferentes contextos de conectividad, (4) Modo accesible con iconografía clara, lenguaje simplificado, y opciones de lectura en voz, (5) Kits de preparación comunitaria con recomendaciones prácticas y checklists adaptados a cada tipo de alerta, (6) Módulo de retroalimentación comunitaria permitiendo usuarios reportar eventos observados (lluvia, inundaciones) para enriquecimiento de datos, (7) Capacitación digital integrada mediante microcursos y tips sobre gestión de riesgo y uso tecnológico.

Especificaciones técnicas: (1) Integración de fuentes de datos climáticos en tiempo real (APIs IDEAM, Open-meteo), (2) Modelos predictivos basados en aprendizaje automático (IA/ML) para análisis de patrones de precipitación e inundaciones, (3) Arquitectura escalable en infraestructura de nube con redundancia para disponibilidad en situaciones críticas, (4)

Optimización para baja demanda de datos y almacenamiento local en dispositivo para funcionamiento en contextos de conectividad limitada, (5) Capacidad offline mínima permitiendo que usuario conserve última alerta descargada sin conexión activa, (6) Compatibilidad multiplataforma con prioridad en Android debido a su alcance en comunidades rurales, (7) Seguridad y privacidad de datos siguiendo normativas de datos sensibles, (8) Módulos de accesibilidad integrados (soporte de voz, íconos, multilingüismo).

D. Fase 3: Ideación y Generación de Propuestas Conceptuales

Basado en requisitos documentados en la Fase 2, se condujo proceso de ideación individual con participación de equipo de investigación, generando dos propuestas conceptuales diferenciadas de plataforma.

Propuesta A: Enfoque de integración multicanal. Énfasis en integración de múltiples fuentes de datos (pronósticos oficiales combinados con reportes comunitarios observados), arquitectura modular que prioriza precisión de predicción, módulo bidireccional que permite comunidades retroalimentar el sistema con eventos observados, e integración institucional con gobiernos locales y organizaciones humanitarias.

Propuesta B: Enfoque de acción rápida. Énfasis en simplicidad de interfaz y velocidad de acceso a información, acción inmediata mediante botones grandes y navegación directa a recursos críticos (radio, centros de refugio), optimización para conexiones lentas, y priorización de canales múltiples (SMS, WhatsApp, radio) en contextos de baja conectividad.

Para cada propuesta se desarrolló un prototipo de mediana fidelidad utilizando la herramienta LovableAI, permitiendo visualización de interfaces, flujos de navegación, y viabilidad conceptual de funcionalidades sin realizar inversión técnica completa de desarrollo. Los prototipos incluyeron: pantalla principal con indicadores de riesgo, pantalla de detalles de alerta, configuración de ubicaciones, historial de eventos, y acceso a recursos de preparación.

E. Fase 4: Análisis Multicriterio para Selección Fundamentada de Propuesta

Se aplicó Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) para selección sistemática y reproducible de propuesta a desarrollar, permitiendo evaluación estructurada mediante descomposición jerárquica de criterios.

Objetivo general de la evaluación: Efectividad y adopción de solución para anticipar eventos climáticos extremos y fortalecer resiliencia comunitaria.

Criterios de evaluación ponderados: (1) Precisión de información (peso 0.51) - reflejando importancia crítica de confiabilidad en contexto de alertas tempranas para decisiones de vida o muerte, (2) Rapidez de acceso a información (peso 0.17) - velocidad de notificación y acceso a alertas, (3) Usabilidad para usuarios vulnerables (peso 0.08) - accesibilidad para comunidades con baja alfabetización digital, (4) Promoción

de acciones comunitarias (peso 0.24) - capacidad inherente de generar respuestas coordinadas y organizadas.

Evaluación de propuestas por criterio:

Criterio 1 - Precisión de información: Propuesta A obtuvo puntuación 0.75 versus Propuesta B 0.25, reflejando su diseño de integración multicanal de datos que mejora confiabilidad.

Criterio 2 - Rapidez de acceso: Propuesta B obtuvo puntuación 0.75 versus Propuesta A 0.25, reflejando su optimización para acción inmediata y simplificación de interfaz.

Criterio 3 - Usabilidad para vulnerables: Propuesta B obtuvo puntuación 0.75 versus Propuesta A 0.25, reflejando énfasis en botones grandes, navegación simple, y acceso directo a funciones críticas.

Criterio 4 - Promoción de acciones comunitarias: Propuesta A obtuvo puntuación 0.75 versus Propuesta B 0.25, reflejando su capacidad de generar reportes comunitarios, conexión institucional, y retroalimentación bidireccional.

Cálculo de puntuación global:

$$\begin{aligned} \text{Propuesta A} &= (0.51 \times 0.75) + (0.17 \times 0.25) \\ &\quad + (0.08 \times 0.25) + (0.24 \times 0.75) = \mathbf{0.63} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Propuesta B} &= (0.51 \times 0.25) + (0.17 \times 0.75) \\ &\quad + (0.08 \times 0.75) + (0.24 \times 0.25) = \mathbf{0.37} \end{aligned} \quad (2)$$

Justificación de selección: La propuesta A fue seleccionada (puntuación 0.63) sobre Propuesta B (0.37) basado en el superior desempeño en los criterios ponderados más críticos para el contexto de la investigación. Propuesta A destaca en Precisión (0.75) y Promoción Comunitaria (0.75), criterios con pesos combinados de 0.75, capturando 75% de importancia total de evaluación. Aunque la Propuesta B presenta ventaja en Rapidez y Usabilidad, estos criterios tienen pesos menores debido a que, en contexto de alertas tempranas para desastres, la precisión y el empoderamiento comunitario fueron priorizados sobre inmediatez tecnológica.

Esta selección fundamentada se alinea con objetivos estratégicos de largo plazo (OKRs 1 y 3 que enfatizan precisión e impacto comunitario) y facilita argumentación académica de decisión de diseño.

F. Fase 5: Especificaciones de Arquitectura Técnica

Basado en la Propuesta A seleccionada, se definió arquitectura técnica de cuatro capas para operacionalizar la plataforma.

Capa de Datos: Fuente primaria Open-Meteo API para pronósticos meteorológicos en tiempo real, módulo futuro para retroalimentación comunitaria con geolocalización de reportes de eventos observados.

Capa de Procesamiento: Consulta automatizada cada 6 horas a Open-Meteo, cálculo de lluvia acumulada 72 horas (*triggering rain*) e intensidad máxima 6 horas (*preparatory rain*), comparación contra umbrales de precipitación calibrados localmente, generación automática de alertas (R1 a R5), integración de información geoespacial.

Capa de Aplicación: Aplicación móvil Android (prototipo de alta fidelidad en fase actual), interfaz web responsive, integración futura con Twilio para SMS, radiodifusión para zonas de muy baja conectividad.

Capa de Accesibilidad: Lenguaje simplificado para nivel educación primaria, íconos pictográficos diferenciados por tipo de amenaza y nivel de riesgo, narraciones de audio para alertas críticas, modo offline con última alerta disponible localmente, bajo consumo de datos (aproximadamente 2-5 MB por actualización), tipografía legible con contraste, roadmap futuro para multilingüismo en lenguas locales.

G. Fase 7: Herramientas y Procesamiento de Datos

APIs y fuentes de datos: Open-Meteo API para pronósticos meteorológicos horarios con resolución de hasta 7 días.

IV. RESULTADOS

A. Arquitectura de Datos y Pipeline de Procesamiento

El pipeline de datos comienza con consultas automáticas a la API Open-Meteo, que proporciona pronósticos meteorológicos horarios con resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ y cobertura temporal de hasta 7 días.

La capa de adquisición de datos solicita información de coordenadas geográficas específicas (latitud, longitud) obtenidas desde el dispositivo del usuario mediante geolocalización. Los parámetros recuperados incluyen: precipitación acumulada (mm), velocidad del viento (km/h), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), y código WMO de condiciones meteorológicas actuales.

B. Implementación del Prototipo de Alta Fidelidad

1) *Integración con API Open-Meteo:* El sistema realiza solicitudes HTTP GET a la API Open-Meteo con parámetros específicos de ubicación. La respuesta JSON contiene datos estructurados que son parseados y normalizados para alimentar módulos subsecuentes. La frecuencia de actualización configurada es de 6 horas, balanceando actualidad de información con consumo eficiente de recursos.

2) *Sistema de Clasificación de Condiciones Meteorológicas:* Se implementó un módulo de traducción de códigos WMO estándar a descripciones comprensibles y categorizaciones de riesgo. El mapeo implementado es:

- Código 0: Cielo despejado
- Códigos 1-3: Parcialmente nublado
- Códigos 45-48: Niebla
- Códigos 51-67: Lluvia
- Códigos 95+: Tormenta

3) *Módulo de Generación de Alertas:* El sistema evalúa condiciones meteorológicas contra umbrales predefinidos para generar cuatro niveles de alerta diferenciados visualmente mediante código de colores:

- **Peligro (Danger):** Precipitación > 10 mm, viento > 50 km/h, o código WMO ≥ 95

- **Alerta (Alert):** Precipitación > 5 mm, viento > 30 km/h, o código WMO ≥ 80
- **Advertencia (Warning):** Precipitación > 0 mm, viento > 20 km/h, o código WMO ≥ 60
- **Seguro (Safe):** Condiciones dentro de parámetros normales

Estos umbrales fueron calibrados considerando literatura de [7] sobre lluvia desencadenante.

4) *Visualización Geoespacial:* Se integró módulo de mapeo interactivo utilizando Google Maps API, que despliega la ubicación actual del usuario y marcadores geolocalizados de alertas activas. Los marcadores emplean el mismo código de colores del sistema de alertas (rojo, naranja, amarillo, verde) permitiendo identificación visual inmediata de zonas de riesgo.

5) *Módulo de Preparación Comunitaria:* La sección "Preparar" implementa un centro de recursos accesibles que incluye: (a) guías de audio narradas para usuarios con baja alfabetización, y (b) checklist interactivo para kit de emergencia con elementos básicos (agua, alimentos no perecederos, linterna, radio, botiquín, documentos, dinero en efectivo).

6) *Módulo de Reporte Ciudadano:* Se desarrolló funcionalidad bidireccional que permite a usuarios generar reportes geolocalizados de eventos en curso. El formulario captura: ubicación automática (con opción de ajuste manual), tipo de evento (deslizamiento, inundación, tormenta, otro), descripción textual opcional, y carga de fotografía. Esta información alimentará futuras versiones con capacidad de validación comunitaria de alertas.

C. Stack Tecnológico y Librerías

El prototipo fue implementado como una aplicación web de página única (SPA) completamente del lado del cliente, sin backend dedicado. Esta arquitectura reduce complejidad de despliegue y costos de infraestructura, alineándose con los objetivos de accesibilidad para comunidades con recursos limitados.

1) *Framework Frontend:* La aplicación utiliza **React 18.3.1** como librería de UI, gestionada con **Vite 5.4.2** como herramienta de construcción y servidor de desarrollo. Vite proporciona HMR y optimización de bundle para producción, reduciendo tiempos de carga inicial.

2) *Librerías de Interfaz de Usuario:* Se implementó el sistema de diseño con las siguientes librerías de componentes:

- **shadcn/ui:** Colección de componentes React reutilizables construidos sobre Radix UI
- **Radix UI (v1.x):** Primitivas de UI accesibles (Dialog, Select, Checkbox, Progress, Tabs, Accordion)
- **Lucide React (v0.441.0):** Iconografía con 1000+ íconos vectoriales

- **Tailwind CSS** (v3.4.1): Framework CSS de utilidades para diseño responsive
- **class-variance-authority** (v0.7.0): Gestión de variantes de componentes
- **clsx** (v2.1.1) y **tailwind-merge** (v2.5.2): Composición condicional de clases CSS

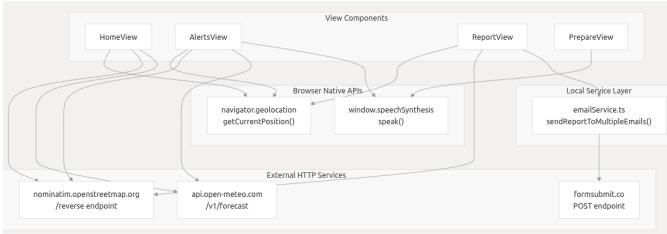


Fig. 1. Dependencias de los componentes en API externas

3) *Gestión de Estado:* Se adoptó un enfoque de estado distribuido donde cada vista (HomeView, AlertsView, MapView, PrepareView, ReportView) gestiona su propio estado mediante el hook `useState` de React. El estado de navegación global es controlado por el componente contenedor `Index`, que mantiene la variable `activeTab` para determinar la vista activa. Esta arquitectura evita dependencias de librerías de estado global (Redux, Zustand), reduciendo complejidad y tamaño del bundle.

4) *Integración de APIs Externas:* El sistema consume cuatro servicios externos mediante llamadas HTTP directas desde componentes del lado del cliente:

- **Open-Meteo API:** Pronósticos meteorológicos horarios con 168 horas de anticipación (7 días), resolución espacial $0.1^\circ \times 0.1^\circ$
- **Nominatim OSM API:** Geocodificación inversa para traducir coordenadas a direcciones legibles, configurado con `accept-language=es`
- **Geolocation API:** API nativa del navegador para obtención de coordenadas del dispositivo, con fallback a Cali, Colombia (3.4516°N , 76.5320°W)
- **Web Speech API:** Síntesis de voz para narración de guías en español (es-ES) con velocidad ajustada (rate: 0.9)
- **FormSubmit.co:** Servicio de envío de correos para reporte de incidentes a autoridades y coordinadores de emergencia

5) *Herramientas de Desarrollo:* El proyecto utiliza **TypeScript 5.5.3** para tipado estático, **ESLint 9.9.1** para análisis estático de código, y **Autoprefixer** para compatibilidad CSS cross-browser.

6) Utilidades Adicionales:

- **date-fns** (v3.6.0): Manipulación y formato de fechas
- **recharts** (v2.12.7): Visualización de datos meteorológicos
- **react-hook-form** (v7.53.0) y **zod** (v3.23.8): Validación de formularios en módulo de reporte

- **sonner** (v1.5.0): Sistema de notificaciones toast

D. Pipeline de Datos y Arquitectura de Despliegue

1) *Flujo de Adquisición de Datos:* El pipeline de datos opera enteramente en el navegador del usuario siguiendo esta secuencia:

- 1) **Geolocalización:** Al montar `HomeView` o `AlertsView`, se llama a la ubicación actual para obtener latitud y longitud del dispositivo.
- 2) **Geocodificación Inversa:** Las coordenadas se envían a Nominatim OSM API mediante petición GET. La respuesta JSON contiene el nombre legible de la ubicación.
- 3) **Consulta Meteorológica:** Se construye petición a Open-Meteo API con parámetros: `latitude`, `longitude`, `hourly` (temperatura, precipitación, viento, humedad, código WMO), `forecast_days=7`. La respuesta contiene arrays de 168 valores horarios.
- 4) **Procesamiento Local:** Los datos meteorológicos se procesan mediante funciones JavaScript que:
 - Traducen códigos WMO a descripciones en español
 - Calculan niveles de alerta aplicando umbrales predefinidos
 - Agregan datos horarios a promedios diarios para visualización
- 5) **Renderizado:** Los datos procesados alimentan componentes de UI (tarjetas de alerta, gráficos Recharts, marcadores de mapa).

2) *Arquitectura de Despliegue:* La aplicación utiliza contenedorización Docker con proceso de dos etapas:

- **Etapa de construcción:** Imagen Node.js compila el código TypeScript/React mediante Vite, generando bundle optimizado en directorio `dist/`
- **Etapa de producción:** Imagen Nginx Alpine (tamaño reducido 85-90%) sirve los assets estáticos compilados. La configuración Nginx incluye directiva `try_files $uri $uri/ /index.html` para soportar enruteamiento del lado del cliente

Este diseño sin backend permite despliegue en servicios de hosting estático (GitHub Pages, Netlify, Vercel) o contenedores Docker, facilitando escalabilidad horizontal sin gestión de estado del servidor.

E. Métricas de la Plataforma

Para evaluar el desempeño del prototipo se realizaron mediciones de rendimiento en las fases de construcción y operación, empleando herramientas estándar de la industria y métricas de experiencia de usuario reconocidas.

- 1) *Tiempo de Construcción (Build Time):* El proceso de construcción de la imagen Docker desde código fuente hasta despliegue completo registró un tiempo promedio de **1 minuto y 20 segundos** (80 segundos). Este tiempo de construcción es aceptable para ciclos de desarrollo ágil y permite despliegue rápido de nuevas características (features)

en producción. La arquitectura de dos etapas del Dockerfile contribuye a este rendimiento al paralelizar operaciones cuando es posible.

2) *Tiempo de Respuesta Inicial (Initial Response Time):* El tiempo de respuesta desde que un usuario accede a la aplicación hasta que recibe el primer byte (TTFB - Time To First Byte) fue de **618 milisegundos** en promedio.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra viabilidad conceptual de un servicio de alerta temprana basado en IBFWS accesible para contextos vulnerables de Latinoamérica, integrando pronósticos climáticos abiertos, umbrales de precipitación calibrados localmente, y principios de diseño inclusivo.

Limitaciones actuales incluyen: no ha habido interacción con usuarios finales por tanto las interfaces no están validadas en contexto real, los umbrales están calibrados solo para análisis general de zonas rurales vulnerables a inundaciones-deslizamientos requiriendo validación regional específica, el desempeño de Open-Meteo es variable según ubicación requiriendo compensaciones regionales, las proyecciones de impacto (OKRs) son teóricas y sin validación de comportamiento real.

Próximas fases incluyen: Despliegue piloto en 3 municipios rurales con 50-100 usuarios para pruebas de usabilidad iterativas. Expansión a otras regiones colombianas (1-2 años) con calibración específica de umbrales por región e implementación de módulo bidireccional para reportes comunitarios; evaluación de impacto rigurosa (3-5 años) comparando comunidades con y sin cobertura para cuantificar reducción real de pérdidas, escalamiento a otros países latinoamericanos, e integración con mecanismos de financiamiento anticipatorio.

REFERENCES

- [1] Fondo de Población de las Naciones Unidas – Colombia, “Riesgo de Desastres y Cambio Climático,” in *ASP Colombia 2023*, ch. 3.9, 2023. [Online]. Available: https://colombia.unfpa.org/sites/default/files/public/pdf/3.9_riesgo_de_desastres.pdf
- [2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Pronóstico de la Amenaza por Deslizamientos de Tierra,” Boletín de Alerta por Pronóstico de la Amenaza, no. 210, p. 4, Jul. 2025. [Online]. Available: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2025-07-29/210_badt_julio_29_2025.pdf
- [3] World Meteorological Organization, “Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services. Part II: Putting Multi-hazard IBFWS into Practice,” WMO-No. 1150, 2021. [Online]. Available: https://library.wmo.int/viewer/57739/download?file=1150_en.pdf
- [4] Red Cross Red Crescent Climate Centre and UK Met Office, “The Future of Forecasts: Impact-Based Forecasting for Early Action,” 3rd ed., p. 5, 2021. [Online]. Available: https://www.anticipation-hub.org/Documents/Manuals_and_Guidelines/RCCC_Impact_based_forecasting_Guide_2021-3.pdf
- [5] Regional Integrated Multi-hazard Early Warning System (RIMES), “Impact Based Forecasting,” South Asia Hydromet Forum, SAHF Working Paper 3, pp. 5, 7, Mar. 2023. [Online]. Available: https://www.sahf.info/wp-content/uploads/2023/03/SAHF_Working_Paper_3_Impact-based-Forecasting.pdf
- [6] M. Kooshki Forooshani, M. J. C. van den Homberg, K. Kalimeri, A. Kaltenbrunner, Y. Mejova, L. Milano, P. Ndirangu, D. Paolotti, A. Teklesadik, and M. L. Turner, “Towards a global impact-based forecasting model for tropical cyclones,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 309–329, Feb. 2024, doi: 10.5194/nhess-24-309-2024.
- [7] F. C. Gonçalves Gonzalez, M. do C. Reis Cavacanti, W. Nahas Ribeiro, M. Barreto de Mendonça, and A. Naked Haddad, “A systematic review on rainfall thresholds for landslides occurrence,” *Helijon*, vol. 10, no. 1, p. e23247, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.helijon.2023.e23247.
- [8] H. Dou *et al.*, “Rainfall early warning threshold and its spatial distribution under dynamic rainfall index,” *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 116, p. 103195, 2023, doi: 10.1016/j.jag.2023.103195.
- [9] R. J. Marin and J. C. Marín-Sánchez, “LandScient_EWS: Real-Time Monitoring of Rainfall Thresholds for Landslide Early Warning - A Case Study in the Colombian Andes,” *J. Eng. Geol.*, vol. 34, no. 2, pp. 173–191, Jun. 2024, doi: 10.9720/kseg.2024.2.173.