

Metodología para el diseño de un Sistema de Alerta Temprana Multiamenaza. Caso: Armero – Río Lagunilla

Autores: *Diego Zafra Otero, Maria Camila Lima Amara, Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez, Raúl Andrés Benavides Puerto – Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD – Colombia.*

Resumen

La presente investigación aborda la necesidad de fortalecer los mecanismos de gestión del riesgo en la cuenca del río Lagunilla, una de las zonas más expuestas a eventos multiamenaza en Colombia debido a la influencia directa del volcán Nevado del Ruiz. La tragedia de Armero de 1985 evidenció la ausencia de sistemas eficaces de alerta y comunicación, lo cual motivó la formulación de una metodología integral para el diseño de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) multiamenaza en esta región. El estudio se desarrolla bajo un enfoque participativo y técnico-operativo, estructurado en cuatro fases: diagnóstico multiamenaza, diseño del sistema, comunicación y apropiación social, y validación, y mejora continua. La metodología integra información histórica, geoespacial y de monitoreo científico proveniente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y del Servicio Geológico Colombiano - SGC, junto con la participación de comunidades locales, autoridades territoriales e instituciones académicas. Los resultados propuestos incluyen el fortalecimiento de la capacidad de monitoreo, la consolidación de redes interinstitucionales y la apropiación comunitaria del conocimiento del riesgo. Se concluye que la implementación del SAT multiamenaza permitirá anticipar la ocurrencia de fenómenos volcánicos, hidrometeorológicos y de remoción en masa, contribuyendo a la reducción de la vulnerabilidad y a la construcción de territorios más resilientes en el corredor Armero – Río Lagunilla.

Palabras clave

Sistema de Alerta Temprana, multiamenaza, monitoreo, prevención, Armero.

1. Introducción

El Nevado del Ruiz, ubicado en la Cordillera Central de los Andes colombianos, a 5.390 m s. n. m., constituye uno de los volcanes compuestos más activos del país y está cubierto por un casquete glaciar que históricamente ha jugado un papel central en la generación de fenómenos secundarios como lahares (García, 1986/2025). Este macizo, junto con los volcanes vecinos del complejo Ruiz-Tolima, ha configurado un escenario de riesgo multiamenaza en el que interactúan factores geológicos, glaciológicos e hidrológicos. El glaciar, de aproximadamente 25 km² antes de la erupción de 1985, ha experimentado un retroceso significativo debido tanto a la actividad volcánica como al cambio climático (Pierson, Janda, Thouret & Borrero, 1990).

La historia eruptiva documenta al menos dos eventos catastróficos previos a 1985: el lahar de 1595 y el de 1845. El primero, asociado a una erupción magmática explosiva, produjo flujos de lodo de mayor magnitud que los de 1985, afectando los valles del Gualí, Azufrado y Lagunilla (Mojica et al., 1985, citado en Pierson et al., 1990). El segundo, ocurrido en 1845, se desencadenó tras un sismo y la probable ruptura de un lago represado, con un saldo aproximado de 1.000 víctimas en la zona donde más tarde se fundaría Armero (Acosta, 1846; Thouret et al., 1990). Estos antecedentes históricos evidenciaban la recurrencia del peligro, pero la memoria social se había debilitado, lo que generó una falsa percepción de seguridad en las generaciones posteriores (García, 2025).

El 13 de noviembre de 1985, una erupción explosiva de moderada magnitud desencadenó uno de los desastres volcánicos más letales del siglo XX. La interacción entre flujos piroclásticos y el casquete glaciar provocó el derretimiento de grandes volúmenes de nieve y hielo, generando lahares que descendieron por

las cuencas del Azufrado, Lagunilla, Gualí y Chinchiná. Se calcula que aproximadamente 20 millones de m³ de agua de fusión fueron liberados en pocos minutos, transformándose en flujos de lodo que alcanzaron velocidades de hasta 17 m/s y caudales de 48.000 m³/s en sus tramos medios (Pierson et al., 1990).

El valle del río Lagunilla fue el escenario del desastre más devastador: la ciudad de Armero, ubicada a 74 km del cráter, quedó sepultada bajo una masa de lodo y escombros. En menos de tres horas, tres cuartas partes de sus habitantes perecieron, alcanzando un saldo cercano a las 23.000 víctimas fatales (Pierson et al., 1990; García, 2025).

La tragedia de Armero no solo dejó una huella imborrable en la memoria colectiva del país, sino que también marcó un antes y un después en la gestión del riesgo volcánico a nivel internacional. Colombia fue confrontada con la realidad de que amplias áreas habitadas se encontraban bajo la influencia directa de volcanes activos, lo que demandaba una reestructuración institucional en torno a la prevención y preparación (García, 2025).

Las lecciones aprendidas subrayan que incluso erupciones moderadas pueden desencadenar catástrofes de gran escala cuando coinciden con glaciares y poblaciones vulnerables (Pierson et al., 1990). Asimismo, demuestran que la memoria histórica, la comunicación efectiva del riesgo y la educación comunitaria son componentes esenciales de cualquier sistema de alerta temprana (García, 2025).

En consecuencia, la experiencia del Nevado del Ruiz constituye un caso de estudio paradigmático para el diseño de sistemas de alerta temprana multiamenaza. El análisis histórico y científico de los eventos previos, junto con la consideración de factores sociales, permite avanzar hacia metodologías que integren monitoreo volcánico, hidrometeorológico y comunitario, garantizando así una respuesta más oportuna y efectiva ante futuros escenarios de riesgo.

1.1 MARCO CONCEPTUAL

Síntesis de implicaciones para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) en la cuenca del río Lagunilla:

- Evolución histórica del riesgo: El contraste entre 1969 y 1985 evidencia cómo la ocupación humana se mantuvo en áreas de amenaza alta, mientras que la erupción de 1985 reveló la vulnerabilidad no gestionada (tabla 1).
- Persistencia de la amenaza: Aunque el glaciar ha disminuido, la cuenca mantiene susceptibilidad a lahares secundarios, flujos hiperconcentrados y crecientes súbitas, lo que requiere monitoreo constante.
- Cambio en la exposición: Tras la tragedia, la reducción de asentamientos en la zona de Armero disminuyó la exposición poblacional directa, pero aún existen comunidades aguas abajo y actividades económicas que pueden verse afectadas.
- Soporte satelital: El análisis multitemporal muestra el valor de la observación de la Tierra para detectar cambios en la cobertura glaciar, uso del suelo y dinámica fluvial, elementos clave para alimentar modelos predictivos y sistemas de alerta.

1.2 Análisis multitemporal de la cuenca del río Lagunilla (1969 – 1985 –2024)

Las imágenes satelitales comparativas (Google Earth y Landsat) permiten observar la evolución de la cuenca del río Lagunilla (figura 1), directamente vinculada con la tragedia de Armero ocurrida el 13 de noviembre de 1985, tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz.

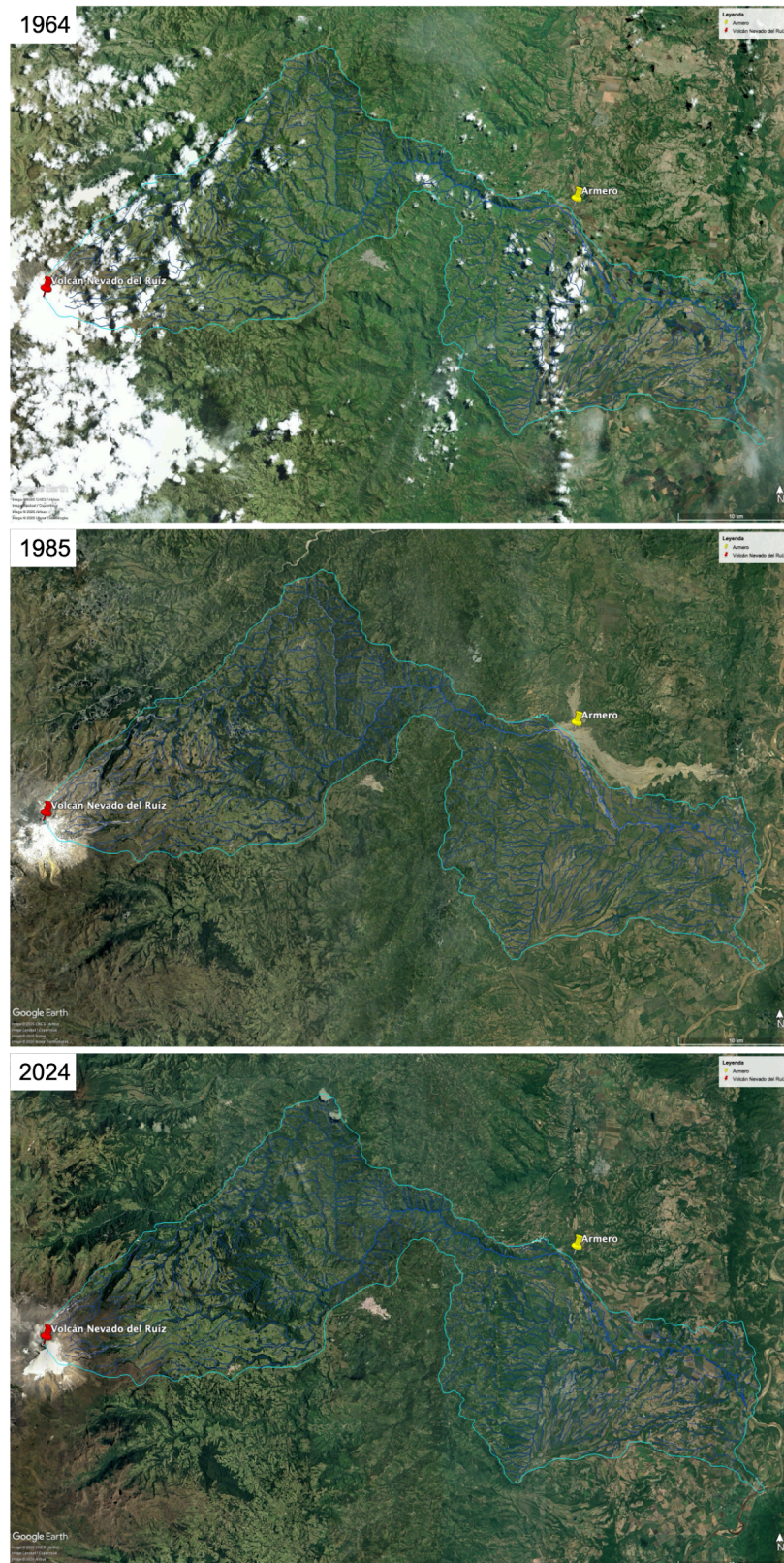


Figura 1. Imágenes satelitales de la cuenca del río Lagunilla (1964, 1985 y 2024). **Fuente:** Elaboración propia.

Las imágenes satelitales correspondientes a los años 1969, 1985 y 2024 permiten evidenciar la transformación del paisaje en el municipio de Armero y su entorno, asociado a la dinámica volcánica del Nevado del Ruiz y, en particular, al evento eruptivo de noviembre de 1985 que generó flujos de lodo (lahares) devastadores sobre la cuenca del río Lagunilla (tabla 1).

Análisis multitemporal del área de Armero en la cuenca del río Lagunilla	
	Armero 1969 - Previo al evento: El área presentaba un paisaje agrícola con extensas zonas cultivables sobre el valle aluvial del río Lagunilla. El relieve suave y la delimitación del cauce favorecían la ocupación humana, aunque la morfología indicaba antiguos flujos de lahares.
	Armero 1985 - Evento materializado: La erupción del Nevado del Ruiz generó un lahar que destruyó totalmente Armero. La imagen muestra un amplio depósito de lodo y escombros que cubrió el valle, eliminó la vegetación y modificó el cauce fluvial, evidenciando la magnitud del desastre.
	Armero 2024 - Posterior al evento: Se observa recuperación ambiental y reocupación agrícola sobre los depósitos del lahar. Persisten las huellas morfológicas del evento, sin reconstrucción urbana en el sitio original, hoy conservado como lugar de memoria.

Tabla 1. Análisis del evento ocurrido en Armero el 13 de noviembre de 1985 y evolución geomorfológica. Fuente: Elaboración propia.

1.3 Sistemas de Alertas Temprana

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) se definen como un conjunto de capacidades articuladas para generar mecanismos destinados a advertir oportunamente sobre la ocurrencia de fenómenos que puedan generar eventos adversos, articulando monitoreo técnico, protocolos institucionales y acciones comunitarias (UNGRD, 2016). De acuerdo con el marco internacional, un SAT debe integrar cuatro componentes: (i) conocimiento del riesgo, (ii) monitoreo y detección, (iii) difusión de alertas y (iv) capacidad de respuesta (UNDRR, 2022). El enfoque actual enfatiza que un SAT debe ser centrado en las personas, multiamenaza y multisectorial (Mirianna et al., 2025).

Actualmente los SAT se han consolidado como un instrumento estratégico en la reducción del riesgo de desastres, al facilitar la protección de vidas y la mitigación de impactos sociales y económicos. Su importancia radica en que no se limitan a detectar amenazas, sino que integran capacidades técnicas, institucionales y comunitarias para activar respuestas tempranas. En este sentido, la efectividad de un SAT depende de la calidad de los mecanismos de monitoreo y, de igual forma, de la pertinencia cultural y comunicacional de las alertas emitidas (UNDRR, 2023; Islam, 2025).

En Colombia, la cuenca del río Lagunilla (figura 2), localizada en el área de influencia del volcán Nevado del Ruiz, constituye una de las zonas más vulnerables del país frente a fenómenos multiamenaza. El antecedente histórico más crítico corresponde a la erupción de 1985, cuando un flujo de lodo (lahar) destruyó la ciudad de Armero, causando más de 20.000 muertes. Este hecho evidenció la falta de mecanismos de alerta temprana eficaces y la necesidad de fortalecer la preparación ante desastres. Actualmente, la población asentada en la cuenca continúa expuesta a amenazas combinadas: erupciones volcánicas, lahares, inundaciones, deslizamientos y precipitaciones extremas. Aunque se han implementado avances en monitoreo volcánico e hidrometeorológico, persisten limitaciones en la articulación institucional, la cobertura tecnológica y la apropiación comunitaria de los sistemas de prevención. En este contexto, surge la

necesidad de diseñar una propuesta metodológica para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) multiamenaza que integre conocimiento científico, herramientas tecnológicas y participación comunitaria (SGC, 2018).

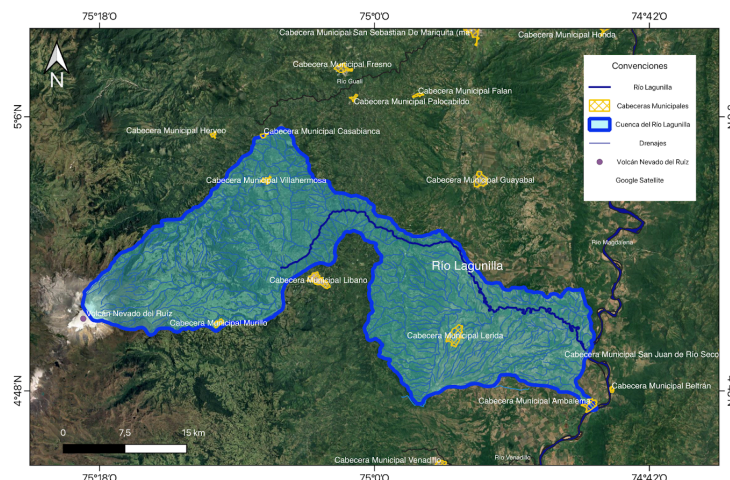


Figura 2. Cuenca del río Lagunilla. **Fuente:** Elaboración propia.

2. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Lagunilla, localizada en el flanco norte del volcán Nevado del Ruiz, dentro del sistema volcánico Ruiz–Tolima. Esta cuenca ha sido históricamente escenario de procesos volcánicos e hidrometeorológicos que configuran un contexto de riesgo multiamenaza (figura 3).

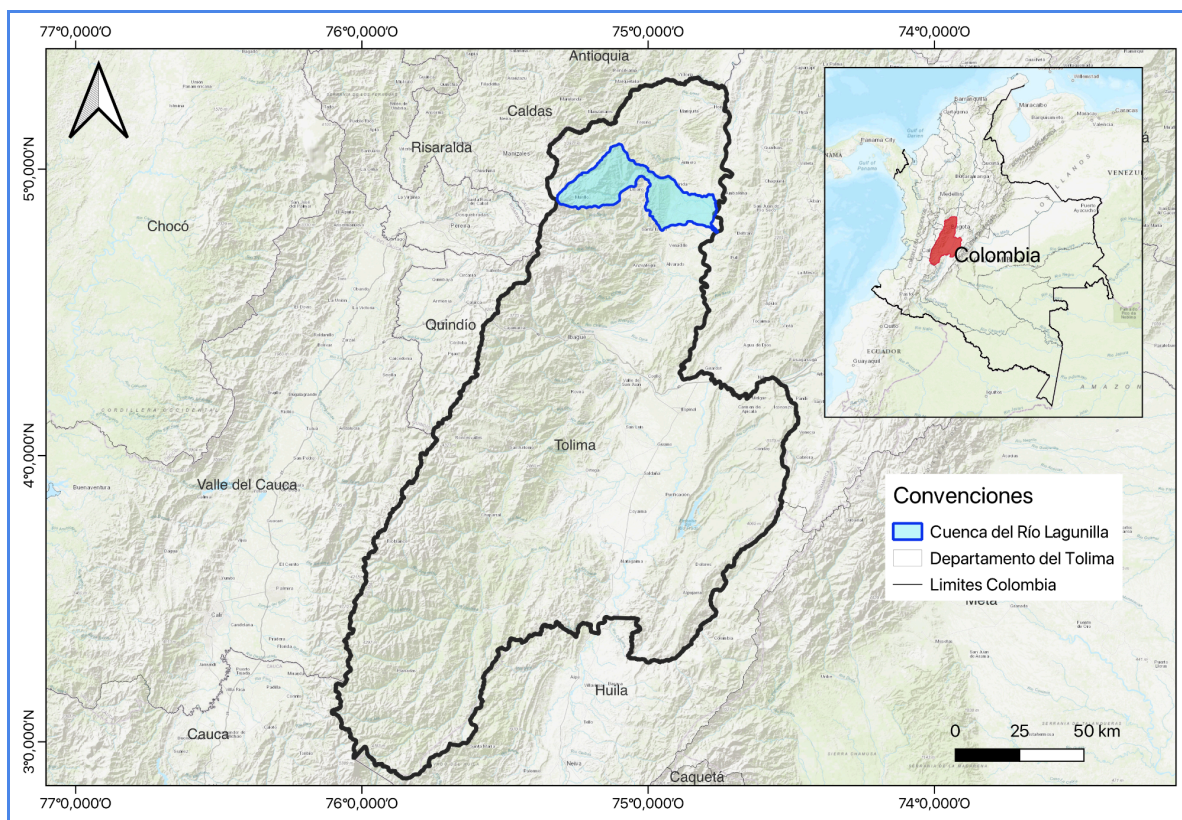


Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio. **Fuente:** Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

La metodología del proyecto se fundamenta en un enfoque mixto, que combina técnicas cuantitativas, cualitativas y participativas, orientadas al análisis integral del riesgo y al diseño de herramientas aplicadas a la reducción de desastres en territorios multiamenaza. Su estructura metodológica se organiza en tres etapas principales: planificación, diagnóstico y formulación metodológica, cada una articulada con los objetivos específicos del estudio.

- **Etapas de planificación**

En esta fase se definieron los objetivos generales y específicos, el alcance geográfico (cuenca del río Lagunilla, Tolima, Colombia) y los actores clave involucrados en el desarrollo del proyecto: entidades nacionales (IDEAM, SGC, UNGRD), autoridades locales, instituciones académicas y comunidades del corredor Armero – Líbano – Murillo.

Se estableció la estructura operativa, los cronogramas y los instrumentos de recolección de información, asegurando la coherencia con las políticas nacionales de gestión del riesgo y el Marco de Sendai 2015–2030.

- Etapa de diagnóstico y levantamiento de información

El diagnóstico integró el análisis documental, histórico y espacial de la zona de estudio. Se recopilaron fuentes primarias y secundarias: registros geológicos, hidrometeorológicos y socioeconómicos; imágenes satelitales; cartografía del IDEAM y SGC; y documentación histórica sobre la tragedia de Armero (1985).

Adicionalmente, se aplicaron técnicas cualitativas como entrevistas semiestructuradas, talleres de percepción del riesgo y visitas de campo, con el fin de comprender las dinámicas sociales y territoriales que configuran la vulnerabilidad.

Esta etapa permitió identificar las principales amenazas (volcánicas, hidrometeorológicas y de remoción en masa), así como las condiciones de exposición y capacidad de respuesta de las comunidades.

- Etapa de formulación metodológica

Con base en la información recopilada, se construyó la propuesta metodológica del SAT multiamenaza, estructurada en cuatro fases (diagnóstico, diseño técnico-operativo, comunicación/apropiación y validación).

Durante esta fase se desarrolló la articulación conceptual y técnica entre los componentes del proyecto y las redes de monitoreo existentes del IDEAM y el SGC. Se emplearon herramientas de análisis espacial (SIG), modelación de amenazas y evaluación multicriterio, integrando variables físicas, sociales e institucionales.

El proceso se sustentó en principios de participación, co-creación y gestión territorial del conocimiento, buscando asegurar la pertinencia social y técnica del modelo.

3.2 METODOLOGÍA DEL SAT

3.2.1. CATÁLOGO DE ESTACIONES IDEAM EN LA CUENCA

El diseño de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) eficaz para la cuenca del río Lagunilla requiere contar con información hidrometeorológica confiable, representativa y de alta resolución espacial y temporal. En este sentido, el catálogo de estaciones del IDEAM constituye un insumo fundamental, pues permite identificar la distribución, tipo y cobertura de las estaciones que integran la red de monitoreo en la cuenca y su área de influencia (figuras 4 y 5).

Conocer las categorías y características de las estaciones (pluviométricas, limnigráficas, climatológicas, entre otras) (tabla 2) facilita evaluar la densidad y representatividad de la red de observación existente, determinar vacíos de información y establecer las prioridades de fortalecimiento o instalación de nuevas estaciones. Además, este inventario es esencial para garantizar la interoperabilidad de datos con los sistemas nacionales del IDEAM y para el diseño de protocolos de transmisión y procesamiento de la información en tiempo real.

En consecuencia, disponer de un catálogo actualizado de estaciones permite sustentar técnicamente la estructura de monitoreo hidrometeorológico del SAT, optimizar los procesos de modelación, pronóstico y alerta, y contribuir a la toma de decisiones oportunas orientadas a la reducción del riesgo por eventos hidrometeorológicos en la cuenca del río Lagunilla.

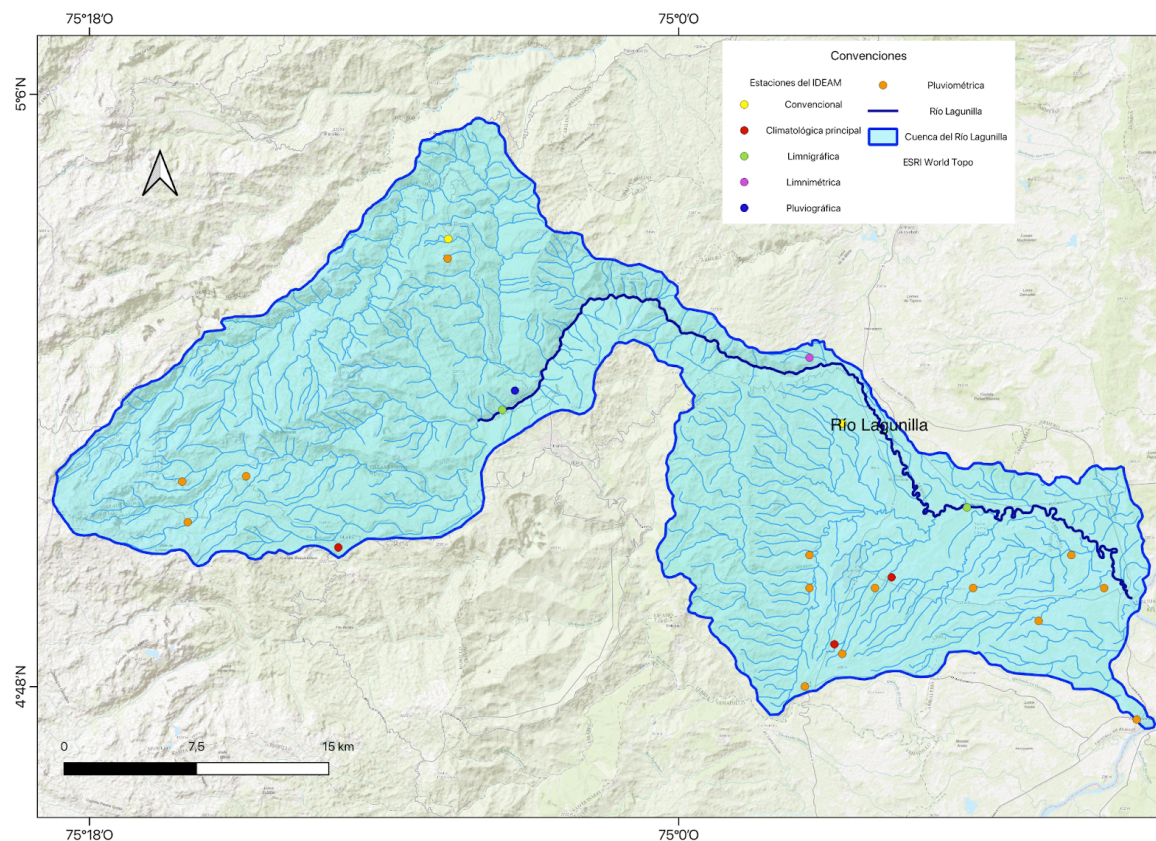


Figura 4. Catálogo de estaciones del IDEAM presentes en la Cuenca. **Fuente:** Elaboración propia.

Código	Significado	Tipo de estación / información que registra
CO	Convencional	Estación manual con observador; mide variables meteorológicas básicas (temperatura, precipitación, viento, humedad, etc.)
CP	Climatológica Principal	Mide todas las variables meteorológicas y climáticas; cuenta con observador permanente y cumple con estándares internacionales (OMM)
LG	Limnigráfica	Estación de medición del nivel del agua en ríos, lagos o embalses
LM	Limnimétrica	Similar a la limnigráfica, pero de lectura manual del nivel del agua
PG	Pluviográfica	Estación con pluviógrafo que registra de forma continua la precipitación (intensidad y duración)
PM	Pluviométrica	Estación manual que mide precipitación total diaria con un pluviómetro (lectura puntual, no continua)

Tabla 2. Tipos de estaciones. **Fuente:** Elaboración propia.

Estas categorías hacen parte de la Red de Estaciones Hidrometeorológicas del IDEAM, y cada una tiene un propósito específico dependiendo del tipo de variable ambiental que se desea monitorear (hidrológica, meteorológica o climática).

Número de estaciones IDEAM en la cuenca

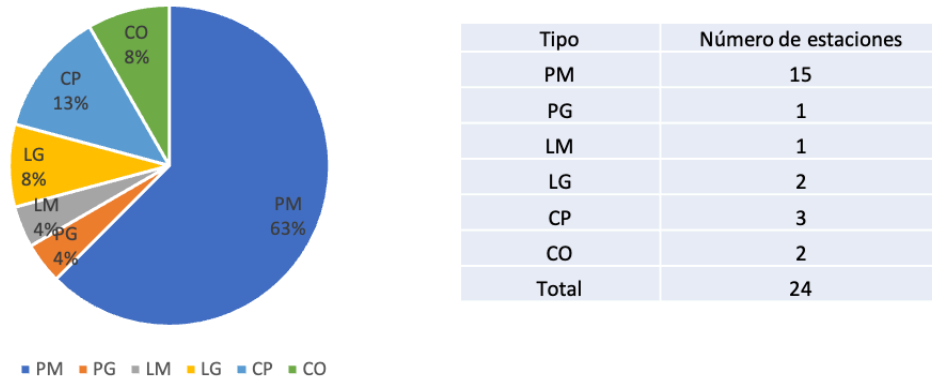


Figura 5. Número total de estaciones. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. ESTACIONES DEL SGC EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

Las redes de monitoreo del Volcán Nevado del Ruíz del Servicio Geológico Colombiano incluyen redes de vigilancia, deformación, sismología, geoquímica y geofísica (figura 6).

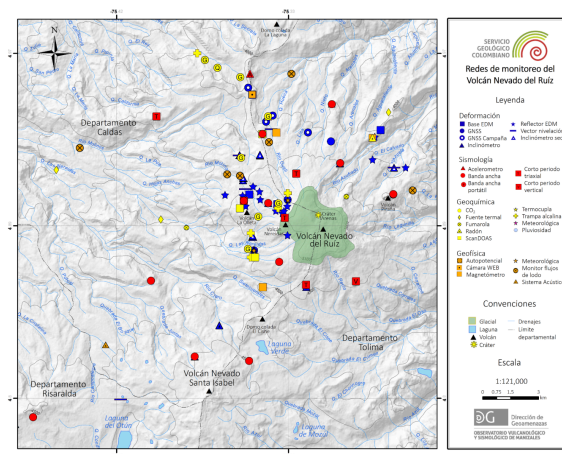


Figura 6. Redes de monitoreo del volcán nevado del Ruíz del SGC. **Fuente:** Servicio Geológico Colombiano, s.f.

3.2.3. CATÁLOGO DE ESTACIONES SGC EN LA CUENCA

Se puede apreciar que de todas las estaciones de monitoreo del SGC (figura 6) en el volcán la mayoría se encuentran en las zonas oeste y norte, identificándose una falencia hacia el área de estudio de la cuenca del río Lagunilla en donde las estaciones asociadas al monitoreo del volcán (figuras 7) las cuales se encuentran la parte alta de la cuenca en cercanías al volcán y en total solo se observan 14 (figura 8).

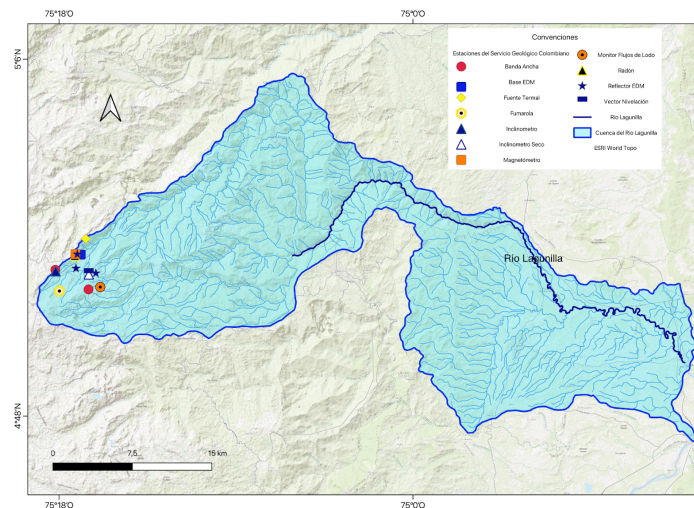
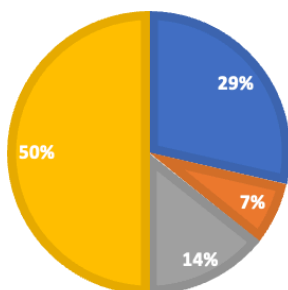


Figura 7. Catálogo de las estaciones de monitoreo del Servicio Geológico Colombiano en la cuenca del río Lagunilla. **Fuente:** Elaboración propia.

ESTACIONES DEL SGC EN LA CUENCA DEL RÍO LAGUNILLA

■ Geoquímica ■ Geofísica ■ Sísmica ■ Deformación



Tipo	Número
Geoquímica	4
Geofísica	1
Sísmica	2
Deformación	7
Total	14

Figura 8. Número total y tipo de estaciones de monitoreo en las Cuenca. **Fuente:** Elaboración propia.

Las redes de monitoreo del Volcán Nevado del Ruiz, operadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), constituyen un componente esencial para el diseño y la implementación del Sistema de Alerta Temprana (SAT) en la cuenca del río Lagunilla. Estas redes —que incluyen la vigilancia sísmica, la deformación del edificio volcánico, el monitoreo geoquímico y geofísico— permiten detectar con alta sensibilidad los cambios en la dinámica interna y superficial del volcán, los cuales pueden anteceder fenómenos eruptivos o procesos de remoción en masa asociados.

La integración de esta información con la red hidrometeorológica del IDEAM y los sistemas locales de observación en la cuenca fortalece la capacidad del SAT para anticipar escenarios de amenaza como lahares, avalanchas o flujos torrenciales de origen volcánico. Asimismo, la conexión directa con los flujos de datos del SGC asegura la continuidad, confiabilidad y trazabilidad de la información científica necesaria para emitir alertas tempranas precisas y oportunas.

Por tanto, las redes de vigilancia del SGC no solo complementan el componente hidrometeorológico del SAT, sino que también aportan el sustento técnico indispensable para comprender la dinámica volcánica del Nevado del Ruiz y su influencia directa sobre la cuenca del río Lagunilla.

3.3 Unificación de la información de sensores y alertas tempranas con el Centro Nacional de Radares (CNR) - Río Lagunilla

La gestión integral del riesgo de desastres en Colombia requiere la articulación técnica, institucional y operativa entre los sistemas de monitoreo meteorológico, hidrológico, geofísico y comunitario. En el contexto del volcán Nevado del Ruiz y la cuenca del río Lagunilla, esta necesidad se hace prioritaria dada la recurrencia de eventos eruptivos y fenómenos asociados como flujos de lodo (lahares) y avenidas torrenciales. El presente apartado tiene como objetivo analizar la cobertura radar del IDEAM sobre el área de influencia del volcán, proponer mecanismos de integración entre los sistemas de observación del IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), y realizar un diagnóstico histórico y actual sobre los sistemas de alerta temprana (SAT) existentes en el corredor Lagunilla – Armero.

3.3.1. Cobertura radar sobre el volcán Nevado del Ruiz y el río Lagunilla

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) cuenta con una red nacional de radares meteorológicos de alta resolución, distribuidos estratégicamente para cubrir las principales regiones del país. En el caso del volcán Nevado del Ruiz y el río Lagunilla, la cobertura principal proviene del Radar Meteorológico del Tablazo, ubicado en el municipio de Subachoque Cundinamarca. Este radar pertenece a la aeronáutica civil, con capacidad de detección de precipitación hasta un rango de 240 km.

De acuerdo con el análisis de cobertura, el área del volcán y la cuenca alta del río Lagunilla se encuentran dentro del radio efectivo del radar del tablazo, el cual capta información atmosférica en tiempo real sobre intensidad de lluvia, reflectividad, movimiento de nubes y estructuras convectivas asociadas a procesos eruptivos o lluvias intensas.

Esta cobertura es clave para la verificación cruzada de ecos radar, incrementando la confiabilidad en los pronósticos de lluvias intensas y detección de eventos

súbitos. La información generada por estos sistemas es transmitida al Centro Nacional de Radares (CNR) del IDEAM y AROCIVIL, donde se integra con los modelos numéricos de pronóstico y las redes de estaciones meteorológicas automáticas (EMA).

3.3.2. Cobertura radar sobre el volcán Nevado del Ruiz y el río Lagunilla

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) mantiene una red instrumental especializada en el monitoreo de actividad volcánica, sísmica, geodésica y geoquímica del volcán Nevado del Ruiz. Esta red incluye sensores sísmicos, inclinómetros, estaciones GNSS, cámaras térmicas, detectores de gases y estaciones meteorológicas de alta montaña. Por su parte, el IDEAM dispone de estaciones automáticas en las cuencas de los ríos Lagunilla, Recio, Sabandija y Guarinó, así como radares de vigilancia hidrometeorológica.

La propuesta de integración consiste en el desarrollo de un sistema interoperable de datos, en el cual la información proveniente del SGC (parámetros volcánicos y geofísicos) y del IDEAM (variables meteorológicas e hidrológicas) sea centralizada en un nodo técnico conjunto bajo el CNR. Dicho nodo permitiría realizar pronósticos predictivos basados en inteligencia artificial y modelos de correlación multivariable.

La arquitectura propuesta incluye:

- Interconexión de sensores mediante protocolos estándar (OPC-UA, MQTT o WMO-TDCF).
- Base de datos geoespacial compartida con acceso en tiempo real a ambos sistemas (IDEAM y SGC).
- Modelo de predicción multiamenaza, alimentado por datos combinados de radar, estaciones y sensores volcánicos.

- Canal de comunicación directa con la Oficina de Servicios de Pronóstico y Alerta (OSPA), que permita difundir alertas tempranas personalizadas hacia los coordinadores municipales de gestión del riesgo de Murillo y Líbano.

El flujo de información se estructuraría así:

- Sensores en campo (IDEAM–SGC) → Captura continua de variables.
- Centro Nacional de Radares (CNR) → Integración y modelación predictiva.
- OSPA–UNGRD–CREPAD Tolima → Validación y clasificación de alertas.
- CMGRD Murillo y Líbano → Activación de protocolos de respuesta comunitaria.

Este esquema no solo mejora la precisión en la predicción de fenómenos asociados al volcán, sino que fortalece la toma de decisiones locales basadas en evidencia técnica.

3.3.3. Antecedentes de sistemas de alerta temprana (SAT) en el corredor Lagunilla–Armero

Históricamente, el corredor comprendido entre el río Lagunilla y la población de Armero ha sido objeto de múltiples estudios y proyectos de alerta temprana. Tras la tragedia del 13 de noviembre de 1985, se desarrollaron diferentes iniciativas para la detección de lahares y la educación comunitaria en gestión del riesgo. Entre las más relevantes se destacan:

- Sistema Piloto de Alerta Temprana (SPAT) implementado por el SGC en la década de 1990, con sensores sísmicos y pluviómetros de respuesta rápida.
- Proyecto SAT Armero–Guayabal (2008–2012) liderado por la UNGRD y la Cruz Roja Colombiana, orientado al fortalecimiento de capacidades locales.
- Red de Observadores Comunitarios del Volcán Nevado del Ruiz (2015–presente), con apoyo de las alcaldías, el SGC y organizaciones sociales.

Actualmente, el SAT formal en la zona combina sensores electrónicos (acelerómetros, pluviómetros, estaciones telemétricas) con sistemas comunitarios de alerta (sirenas, radios VHF, mensajes SMS). Sin embargo, estos sistemas se encuentran fragmentados, sin un protocolo común de interoperabilidad ni conexión directa con el CNR o la OSPA.

3.3.4. INVENTARIO DE SENSORES Y SAT COMUNITARIOS EXISTENTES

A continuación, se presenta un inventario referencial de los sensores electrónicos y mecanismos comunitarios de alerta identificados en la cuenca del río Lagunilla (tabla 3):

Tipo de dispositivo	Entidad responsable	Ubicación aproximada	Función principal
Sensor sísmico	SGC	Flanco norte del Nevado del Ruiz	Detección de microtemblores y señales preeruptivas
Estación meteorológica automática	IDEAM	Vereda El Bosque (Murillo)	Medición de lluvia, temperatura y viento
Sensor de nivel hidrométrico	IDEAM	Puente Río Lagunilla (Líbano)	Monitoreo de caudal y crecidas
Cámara térmica	SGC	Observatorio de Villamaría	Seguimiento de emisiones y puntos calientes
Sirenas comunitarias	CMGRD y Defensa Civil	Murillo, Casabianca y Líbano	Alerta a población por lahares o lluvias intensas
Radios VHF	OGR Tolima	Corredor rural Lagunilla	Comunicación de emergencia interinstitucional

Tabla 3. Inventario sensores electrónicos. **Fuente:** Elaboración propia.

Esta red mixta constituye la base técnica para consolidar un Sistema de Alerta Temprana Integrado (SATI), que integre sensores electrónicos, modelación numérica y participación comunitaria.

4. RESULTADOS

Como resultado del presente artículo se presenta la formulación de una propuesta metodológica integral para el diseño e implementación futura de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) multiamenaza en la cuenca del río Lagunilla, área de influencia del complejo volcánico Nevado del Ruiz. Esta propuesta se concibe como un instrumento estratégico para la gestión del riesgo en territorios históricamente expuestos a amenazas múltiples, especialmente en el contexto de la tragedia de Armero ocurrida en 1985. El desastre, que cobró la vida de más de 23.000 personas, evidenció la ausencia de mecanismos eficaces de comunicación y monitoreo que permitieran anticipar la magnitud del evento (Voight, 1990; Pierson et al., 1990). En este sentido, el desarrollo de un SAT multiamenaza en la cuenca del río Lagunilla constituye no solo un avance técnico y científico, sino también un compromiso ético con la memoria colectiva y la reducción del riesgo de desastres a futuro (UNGRD, 2021; WMO, 2021).

La propuesta metodológica presentada se sustenta en las directrices de la Guía Nacional para el Desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana (UNGRD, 2021), las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021), y las orientaciones del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030 (UNDRR, 2024). Asimismo, retoma las experiencias de sistemas multiamenaza implementados en regiones volcánicas como los Andes Centrales, así como metodologías participativas documentadas por Šakić Trogrlić et al. (2022) y Podestá y Olson (2019), que destacan la relevancia de integrar conocimiento científico con saberes locales.

4.1 Fase 1: diagnóstico multiamenaza

La fase de diagnóstico constituye el punto de partida para la construcción del SAT. Esta fase integra el conocimiento técnico-científico con los saberes locales mediante un proceso participativo y multisectorial. Se busca identificar los escenarios de amenaza, vulnerabilidad y exposición, y comprender las dinámicas socioambientales que configuran el riesgo (Cardona, 2004; UNISDR, 2015).

En el contexto del Nevado del Ruiz, las amenazas consideradas incluyen erupciones explosivas, lahares, avalanchas de escombros, deslizamientos, sismos y crecientes súbitas (Thouret et al., 1990; SGC, 2022). Para ello se plantea la integración de información histórica —como los eventos de 1595, 1845 y 1985— con escenarios de modelación numérica y cartografía actualizada de amenazas (García, 2025). La recopilación de datos incluye observaciones in situ, series históricas, imágenes satelitales, información pluviométrica e inventarios geotécnicos (IDEAM, 2022; WMO, 2021).

Asimismo, el diagnóstico incorpora un análisis de vulnerabilidad física, social e institucional, considerando factores como la densidad poblacional, el uso del suelo, la localización de infraestructura crítica y la capacidad de respuesta (Mojica et al., 1985; Cutter et al., 2003). Este enfoque permite construir una visión integral del riesgo en la cuenca del río Lagunilla.

El desarrollo de esta fase permite el conocimiento del riesgo en el territorio a partir de la integración de información histórica, registros de eventos previos y percepciones comunitarias del riesgo. De este modo, el diagnóstico no se limita a la descripción técnica de las amenazas, sino que integra una lectura social y territorial del riesgo, elemento clave para la formulación de medidas preventivas más pertinentes y sostenibles (IDEAM, 2022; UNDRR, 2024) (figura 9).

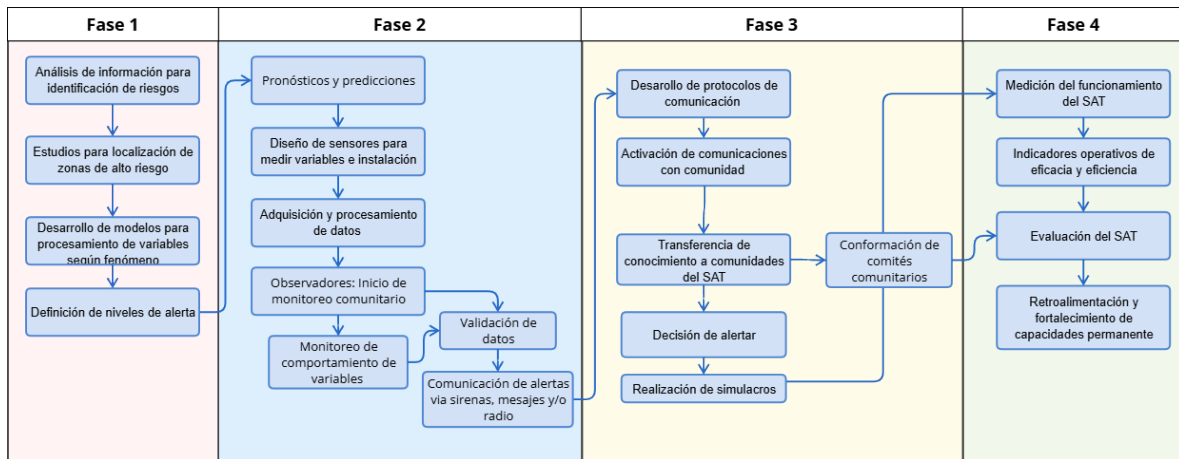


Figura 9. Propuesta de metodología para diseño de SAT. **Fuente:** Elaboración propia.

4.2 Fase 2: de diseño técnico-operativo

Esta fase comprende la definición de los componentes técnicos, instrumentales y procedimentales del SAT. El diseño propuesto contempla una red de monitoreo integrada por estaciones hidrometeorológicas, sismológicas y geotécnicas, complementada con observaciones satelitales y modelación en tiempo real (Pierson et al., 1990; Šakić Trogrlić et al., 2022), complementada con canales de comunicación, difusión de alertas y respuesta ante la emisión de las mismas.

Como paso inicial se establecen criterios técnicos de selección y calibración de sensores conforme a estándares del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2022) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021), incluyendo sismómetros, inclinómetros, sensores de nivel y pluviómetros automáticos. Una vez seleccionados los sensores, se procede a la integración de los datos generados en modelos hidrológicos y de flujos de detritos que permiten proyectar escenarios de lahares, inundaciones y deslizamientos, estimando tiempos de arribo y volúmenes potenciales (Harlow et al., 1986; Voight, 1988), dicha información es fundamental para determinar niveles de alerta para cada amenaza.

Posteriormente el diseño contempla la interoperabilidad entre diferentes plataformas existentes como método de validación de los sensores, adicional a lo

anterior se garantiza la integración de información en tiempo real con sistemas nacionales como pronósticos y alertas del IDEAM y monitoreo de actividad sísmica del Servicio Geológico Colombiano - SGC.

Una vez definido el diseño para el monitoreo y definición de niveles de alerta se estructuran protocolos de activación, niveles de alerta (verde, amarillo, naranja, rojo) y mecanismos de comunicación redundantes (radio VHF, telefonía, sirenas, aplicaciones móviles) (Podestá & Olson, 1988), de acuerdo a las condiciones de telemetría se define el método de activación así como los mecanismos de difusión los cuales pueden ir desde la instalación de sirenas hasta la creación de grupos de WhatsApp, radio ó incluso el voz a voz.

En esta fase se enfatiza la incorporación de tecnologías apropiadas al contexto territorial, combinando sensores automáticos, estaciones hidrometeorológicas, observadores comunitarios y sistemas de mensajería múltiple (radio VHF, telefonía celular y redes locales). Este enfoque híbrido fortalece la capacidad de respuesta y facilita la sostenibilidad operativa mediante alianzas interinstitucionales y comunitarias (UNGRD, 2021; SGC, 2023).

4.3 Fase 3: Comunicación y apropiación social

El fortalecimiento de la comunicación y la apropiación social constituye el eje articulador del SAT. Esta fase se basa en metodologías participativas y de co-creación que promueven la confianza y la corresponsabilidad comunitaria (Chambers, 1994; Pretty, 1995).

Se plantea el desarrollo de talleres de educación y capacitación sobre señales de alerta y protocolos de evacuación, así como la consolidación de comités locales de monitoreo. Estas acciones fomentan el empoderamiento social y la transferencia de conocimiento técnico a las comunidades (Mercer et al., 2010). La experiencia de Armero (1985) demuestra que la ausencia de comunicación efectiva y de apropiación social de la alerta puede tener consecuencias catastróficas (Voight, 1988; UNGRD, 2021).

Asimismo, la fase incluye el diseño de campañas comunicativas adaptadas culturalmente, uso de medios locales (radio comunitaria, redes sociales, asambleas barriales) y la implementación de simulacros periódicos, los cuales son esenciales para la consolidación del sistema y la validación social de los mecanismos de alerta (WMO, 2021; UNDRR, 2024).

Cabe destacar que de esta fase es fundamental ya que el componente de comunicación constituye el eje transversal del SAT, orientado a garantizar que la información llegue a las comunidades de manera clara, oportuna y culturalmente adecuada.

Adicional a lo anterior, de esta fase depende la apropiación y sostenibilidad del SAT por lo que es indispensable el desarrollo de estrategias de apropiación social del conocimiento, donde las comunidades no sean receptoras pasivas de información, sino actores activos en la gestión del riesgo. Este proceso de co-construcción contribuye a restaurar la confianza institucional y a fortalecer la memoria social en un territorio como Armero, cuya historia lo hace un ser considerado como un símbolo de aprendizaje colectivo ante la adversidad (Podestá & Olson, 2019).

4.4 Fase 4: monitoreo, sostenibilidad y retroalimentación

El monitoreo y la evaluación son procesos continuos destinados a garantizar la sostenibilidad y la mejora del SAT. Se propone la creación de indicadores técnicos, operativos y sociales para medir su eficacia, eficiencia y pertinencia territorial (UNDRR, 2024; UNGRD, 2021).

El sistema debe incorporar mecanismos de retroalimentación permanente mediante simulaciones de escritorio, ejercicios de campo y auditorías técnicas. Estos espacios permiten ajustar protocolos, evaluar tiempos de respuesta y actualizar los modelos de amenaza con base en nueva evidencia científica (WMO, 2021; SGC, 2022).

La sostenibilidad a largo plazo del SAT dependerá de su institucionalización en las agendas territoriales de gestión del riesgo, su vinculación con los planes de ordenamiento territorial y su articulación con redes regionales de monitoreo (IDEAM, 2022; UNGRD, 2021).

Como resultado de esta fase se debe realizar la creación de centros de información regional, planes de capacitación continua y protocolos para el intercambio de datos entre actores locales y nacionales. De esta manera, el SAT se convierte en un sistema vivo, capaz de evolucionar y adaptarse frente a los nuevos escenarios de riesgo derivados del cambio climático y la dinámica volcánica (WMO, 2021; IDEAM, 2022).

La metodología propuesta constituye un marco operativo y participativo que integra la ciencia, la tecnología y el conocimiento local para la construcción de resiliencia en territorios de alta amenaza (ver imagen). Su implementación de la metodología permitirá transformar la vulnerabilidad en capacidad adaptativa, fortaleciendo la articulación entre comunidad, instituciones y academia (Pierson et al., 1990; UNDRR, 2024).

Finalmente, el diseño del SAT Multiamenaza en el contexto territorial de la Cuenca del Río Lagunilla se constituye como un resultado de relevancia estratégica para la gestión del riesgo y especialmente para salvar vidas ante la posible ocurrencia de desastres, ya que su implementación permitiría fortalecer las capacidades técnicas e institucionales para anticipar y reducir el impacto de eventos multiamenaza, al tiempo que reafirma el compromiso del Estado colombiano con la memoria histórica del desastre de Armero.

4.5 PROPUESTA DE INTEGRACIÓN CON EL CENTRO NACIONAL DE RADARES (CNR)

La consolidación de un SAT multiamenaza requiere que el CNR asuma el rol de centro integrador de datos en tiempo real. Para ello, se propone:

- Ampliar la interoperabilidad de los sistemas de datos del IDEAM y el SGC mediante APIs seguras y protocolos WIS (WMO Information System).
- Integrar la información de los radares Doppler de Letras y Carimagua con las estaciones hidrometeorológicas y sísmicas.
- Desarrollar un tablero dinámico (dashboard) en el CNR para visualizar alertas combinadas por nivel de riesgo.
- Establecer un canal OSPA–CMGRD, que permita la distribución inmediata de boletines de alerta a las autoridades locales.
- Fortalecer la participación comunitaria, asegurando que los SAT locales estén conectados a la red nacional a través de plataformas de comunicación redundantes.

5. DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología propuesta para el diseño de un Sistema de Alerta Temprana Multiamenaza en el caso del Nevado del Ruiz y el valle del río Lagunilla permitiría avanzar hacia un modelo integral de gestión del riesgo que supere las limitaciones evidenciadas en 1985. Entre los resultados esperados se destacan avances tanto en el ámbito técnico como en el social.

En primer lugar, se prevé una mejora sustancial en la capacidad de detección y pronóstico de eventos peligrosos. La integración de monitoreo volcánico, hidrometeorológico y glaciológico en tiempo real, junto con modelaciones predictivas de lahares e inundaciones, permitiría contar con estimaciones más precisas de tiempos de arribo, volúmenes y áreas de afectación (Pierson et al., 1990). De este modo, las comunidades aguas abajo tendrían una ventana de tiempo suficiente para ejecutar evacuaciones preventivas, lo cual fue crítico en la tragedia de Armero, donde los lahares alcanzaron la ciudad en menos de tres horas.

En segundo lugar, el sistema fortalecería los procesos de comunicación y activación de alertas. El diseño de protocolos claros, niveles de alerta

diferenciados y redundancia en los canales de transmisión reducirían el riesgo de fallas como las ocurridas en 1985, cuando las advertencias científicas no lograron ser asimiladas ni por autoridades ni por la población (Podestá & Olson, 1988; Voight, 1988). La incorporación de tecnologías contemporáneas —desde sistemas satelitales hasta aplicaciones móviles— combinada con medios comunitarios tradicionales garantizaría que la información llegue de manera rápida y comprensible.

Otro resultado esperado es el fortalecimiento de la memoria histórica y de la cultura del riesgo. La inclusión de testimonios, mapas históricos y procesos educativos permitirá que las nuevas generaciones comprendan la magnitud de eventos pasados y actúen con mayor conciencia ante futuras amenazas (García, 2025). Este componente social se traduce en comunidades más resilientes, capaces de reconocer señales tempranas y activar protocolos de autoprotección.

Desde la perspectiva institucional, la implementación del SAT promoverá la articulación interinstitucional entre entidades científicas, organismos de gestión del riesgo, autoridades locales y comunidades. Esto facilitará la toma de decisiones basadas en evidencia y la asignación eficiente de recursos, garantizando la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

En el plano científico, el caso Armero – Río Lagunilla constituye un laboratorio natural para validar y perfeccionar modelos predictivos de flujos de lodo y sistemas de alerta temprana multiamenaza. La disponibilidad de datos históricos, registros de campo y estudios posteriores a la erupción de 1985 (Pierson et al., 1990; García, 1986/2025) brinda la oportunidad de contrastar simulaciones con evidencias empíricas, fortaleciendo la confiabilidad de las herramientas de predicción.

Finalmente, la discusión de esta metodología resalta la necesidad de un cambio de paradigma en la gestión del riesgo: pasar de una visión reactiva y centrada en la respuesta, a una proactiva y preventiva. Los resultados esperados no solo buscan mitigar pérdidas humanas y materiales, sino también generar confianza

social, mejorar la gobernanza del riesgo y consolidar una estrategia replicable en otros escenarios de amenaza volcánica y multiamenaza en el país.

En síntesis, el SAT propuesto representa un avance significativo en la construcción de resiliencia frente a desastres, con el potencial de transformar la experiencia trágica de Armero en una lección aplicada que guíe el futuro de la gestión del riesgo en Colombia.

6. Conclusiones

- El diseño de un Sistema de Alerta Temprana Multiamenaza (SAT-M) para la cuenca del río Lagunilla constituye una herramienta estratégica para la gestión del riesgo en Colombia. Su formulación integra dimensiones científicas, tecnológicas, institucionales y sociales que permiten anticipar, comunicar y responder oportunamente ante la ocurrencia de fenómenos volcánicos, hidrometeorológicos y de remoción en masa.
- La tragedia de Armero de 1985 continúa siendo un referente histórico y técnico para el aprendizaje colectivo en materia de gestión del riesgo. Este proyecto reinterpreta aquel evento desde una perspectiva de resiliencia y memoria, proponiendo una metodología que transforma la experiencia del desastre en un modelo preventivo, centrado en las personas y en la gobernanza del territorio.
- La metodología del proyecto demostró la importancia de la articulación interinstitucional entre el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). La interoperabilidad de datos, el fortalecimiento de las redes de monitoreo y la integración de la información científica son condiciones indispensables para garantizar la efectividad del SAT-M a nivel nacional y regional.
- La inclusión de las comunidades en el proceso metodológico constituye un pilar esencial para la sostenibilidad del sistema. La apropiación social del conocimiento, los talleres participativos y la comunicación intercultural fortalecen las capacidades locales y garantizan la pertinencia cultural de las

alertas, evitando la desconfianza institucional que incidió en los errores de 1985.

- El enfoque multiescalar y multiamenaza permite superar las limitaciones de los sistemas unitemáticos, promoviendo una visión integral del riesgo. La integración de herramientas de modelación, observación satelital y análisis geoespacial, combinadas con la percepción social del riesgo, ofrecen un marco de comprensión amplio para la toma de decisiones informadas.
- El SAT propuesto es replicable en otras cuencas volcánicas e hidrometeorológicamente vulnerables de Colombia y América Latina. Su estructura modular y flexible permite adaptarlo a diferentes contextos territoriales, fortaleciendo las capacidades institucionales y comunitarias frente a amenazas múltiples.
- El proyecto reafirma el papel de la ciencia y la tecnología como medios al servicio de la vida y la memoria. La articulación entre conocimiento técnico y experiencia social constituye el fundamento de una gestión del riesgo centrada en las personas, que contribuye a construir territorios más seguros, sostenibles y resilientes.

7. Referencias bibliográficas

- Acosta, J. (1846–1850). *Relaciones históricas sobre el lahar de 1845*. [Manuscrito histórico].
- Cardona, O. D. (2004). The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective. En G. Bankoff, G. Frerks, & D. Hilhorst (Eds.), *Mapping vulnerability: Disasters, development and people* (pp. 37–51). London: Earthscan. ISBN 1-85383-964-7.
- Chambers, R. (1994). The origins and practice of participatory rural appraisal. *World Development*, 22(7), 953–969. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(94\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0305-750X(94)90141-4)

- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>

- García, M. (1986/2025). *Armero y Chinchiná: Aprendizajes y retos a 40 años de la tragedia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- García, M., & Rodríguez, J. A. (1986). *Informe preliminar sobre la erupción del Nevado del Ruiz*. Comité de Estudios Vulcanológicos, Colombia.

- García, C. (2025). Modelación de amenazas volcánicas en el complejo Nevado del Ruiz. *Revista Colombiana de Geociencias*, 34(2), 45–67.

- Harlow, D. H., et al. (1986). Seismic activity preceding the November 13, 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33(1–3), 235–251. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90042-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90042-0)

- IDEAM & UNGRD. (2019). *Manual para el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana comunitarios en Colombia*. Bogotá: IDEAM. 97 p.

- IDEAM. (2022). *Informe técnico sobre amenazas hidrometeorológicas en la región andina*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/about_data

- Islam, M. M. (2025). Early warning systems in climate risk management. *Science of The Total Environment*, 925, 170054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170054>

- Mercer, J., Kelman, I., Taranis, L., & Suchet-Pearson, S. (2010). Framework for integrating indigenous and scientific knowledge for disaster risk reduction. *Disasters*, 34(1), 214–239. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01126.x>

- Mirianna, B., Johnson, L., & Pérez, R. (2025). Opportunities and challenges for people-centered multi-hazard early warning systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 103, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.103456>

- Mojica, J., et al. (1985). *Geología y consecuencias del lahar del Nevado del Ruiz*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Mojica, J., et al. (1985). *Historia y comentarios de los flujos de 1595 y 1845 en el valle de Armero*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Podestá, G., & Olson, R. (1988). The Armero tragedy: Lessons for volcanic risk management. *Natural Hazards*, 1(1), 29–43. <https://doi.org/10.1007/BF00168246>

- Podestá, B., & Olson, R. (1988). Disaster communication and the Armero tragedy. *Natural Hazards*, 1(2), 59–78. <https://doi.org/10.1007/BF00168247>

- Pretty, J. (1995). Participatory learning for sustainable agriculture. *World Development*, 23(8), 1247–1263. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(95\)00046-7](https://doi.org/10.1016/0305-750X(95)00046-7)

- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17–66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90082-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90082-Q)

- Pierson, T. C., et al. (1990). Flow behavior of sediment-laden floods and hyperconcentrated streamflows, and the rheology of debris flows. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 1–16. <https://doi.org/10.1130/REG7-p1>

- Šakić Trogrlić, R., et al. (2022). Towards people-centred early warning systems. *Progress in Disaster Science*, 13, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100226>

- Šakić Trogrlić, R., van den Homberg, M., Budimir, M., et al. (2022). Early warning systems and their role in disaster risk reduction. En B. Golding (Ed.), *Hazards and Disaster Risk Reduction* (pp. 155–178). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83730-5_8

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2022). *Manual técnico de monitoreo volcánico*. Bogotá, Colombia. <https://datos.sgc.gov.co/search?tags=geociencias%2520b%25C3%25A1sic%2520as>

- Servicio Geológico Colombiano (SGC), s.f. *Redes de monitoreo del volcán Nevado del Ruíz*.

- Thouret, J.-C., et al. (1990). Origin, characteristics, and behavior of lahars following the 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 177–201. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90083-R](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90083-R)

- Thouret, J.-C., et al. (1990). *Geología del complejo volcánico Ruiz–Tolima*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2016). *Guía para el desarrollo de sistemas de alerta temprana (SAT)*. Bogotá: UNGRD. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/25040>

- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2021). *Guía metodológica para el desarrollo de sistemas de alerta temprana*. Bogotá: UNGRD.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Geneva: UNDRR.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2022). *Early warning systems: Definition and operational guidelines*. Geneva: UNDRR. <https://doi.org/10.18356/9789210054520>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2023). *Early Warnings for All Initiative*. Geneva: UNDRR. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/sendai-framework-action/early-warnings-for-all>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2024). *Guidelines for Multi-Hazard Early Warning Systems*. Geneva: UNDRR.
- Villegas, J. (2005). *Memorias de la creciente del río Lagunilla de 1950*. [Crónica inédita].
- Voight, B. (1988). A method for prediction of volcanic eruptions. *Nature*, 332(6160), 125–130. <https://doi.org/10.1038/332125a0>
- Voight, B. (1988). Warning and response in the Armero tragedy. *Nature*, 333(6170), 19–23. <https://doi.org/10.1038/333019a0>
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *Multi-hazard Early Warning Systems: A Checklist*. Geneva: WMO. ISBN 978-92-63-11231-0.