

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Variabilidad espacio-temporal de tormentas en la ciudad
de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante
pluviómetros IoT**

**Para optar el título profesional de:
INGENIERA AGRÍCOLA**

PRESENTADO POR:

Bach. Elizabeth Ximena CHOCCÑA CHILLCCE

ASESOR:

Dr. Eleazar CHUCHÓN ANGULO

AYACUCHO - PERÚ

2026

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Humanga, por haber sido el espacio académico donde se formó y desarrolló esta investigación. Asimismo, expreso mi reconocimiento al proyecto FOCAM, por el financiamiento brindado, el cual permitió la implementación de los equipos y el desarrollo de las actividades necesarias para la ejecución de esta tesis.

A mi asesor, por su orientación, paciencia y acompañamiento durante este proceso. Su guía fue fundamental para encaminar la investigación, fortalecer el análisis y culminar este trabajo.

A mi familia, por haber creído en mí incluso en los momentos en los que yo misma dudé. Su apoyo económico, moral y emocional fue fundamental para culminar esta etapa. Gracias por sostenerme, impulsarme y recordarme que podía lograrlo.

A mi madre y a mi hermana, de manera especial, por acompañarme con paciencia durante este proceso, por soportar mis días de estrés, cansancio y preocupación, y por estar presentes incluso cuando esta tesis parecía ocuparlo todo.

A mis amigos, por su generosidad y apoyo sincero. Cada una de las estaciones utilizadas en esta investigación lleva el nombre de personas importantes para mí, quienes amablemente me brindaron las facilidades de sus viviendas para instalar los pluviómetros en distintos puntos de la ciudad. Gracias por confiar en mi trabajo y por ser parte de este proyecto.

A Omar, con especial gratitud, por su apoyo enorme en la etapa final de esta investigación, por su disposición, ayuda y presencia cuando más lo necesité.

Finalmente, agradezco también al camino recorrido, con sus exigencias, dudas y dificultades, porque me enseñó que los logros más valiosos no siempre nacen de elegir lo sencillo, sino de atravesar con firmeza aquello que exige más de uno mismo. Parafraseando a Bukowski, lo importante no fue evitar el fuego, sino aprender a caminar a través de él.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la variabilidad espacio-temporal y caracterizar los perfiles de los eventos de tormenta en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, mediante una red de diez pluviómetros IoT programados con Arduino. Para ello, se implementaron pluviómetros tipo balancín conectados a módulos NodeMCU ESP8266, los cuales registraron pulsos de precipitación y transmitieron la información en tiempo real hacia la plataforma Adafruit IO. Los datos fueron descargados, depurados y procesados en RStudio, aplicando criterios de limpieza, corrección temporal y delimitación de eventos mediante un umbral IETD de 30 minutos. La calibración del sistema se realizó mediante ensayos volumétricos controlados, determinándose un factor representativo de conversión de 2.31 mL por pulso, equivalente aproximadamente a 0.42 mm de precipitación por basculación. Los eventos identificados fueron caracterizados mediante parámetros de duración, precipitación acumulada, intensidad máxima, intensidad media y distribución temporal interna, clasificándolos según el cuartil de mayor concentración de lluvia. Los resultados evidenciaron que la precipitación en Ayacucho no presentó un comportamiento uniforme entre estaciones, observándose diferencias en frecuencia de eventos, acumulados, intensidades máximas, duración y forma temporal de la lluvia. Asimismo, se reconocieron eventos locales, compartidos y regionales, rutas recurrentes de propagación y agrupamientos espaciales mediante el método Ward, diferenciando zonas con comportamiento pluviométrico semejante. Se concluye que la red de pluviómetros IoT permitió obtener información de alta resolución temporal y espacial, útil para caracterizar la dinámica interna de las tormentas urbanas, mejorar la comprensión de eventos extremos y aportar información técnica para el diseño de infraestructura hidráulica más representativa de la variabilidad local de la precipitación.

Palabras clave: precipitación, tormentas, variabilidad espacio-temporal, pluviómetro IoT, Ayacucho.

ABSTRACT

This research aimed to analyze the spatial-temporal variability and characterize the profiles of storm events in the city of Ayacucho during the 2026 austral summer, using a network of ten IoT rain gauges programmed with Arduino. For this purpose, tipping-bucket rain gauges connected to NodeMCU ESP8266 modules were implemented to record rainfall pulses and transmit data in real time to the Adafruit IO platform. The data were downloaded, cleaned, and processed in RStudio, applying quality control, temporal correction, and event

delimitation criteria using a 30-minute Inter-Event Time Definition (IETD). The system calibration was performed through controlled volumetric tests, determining a representative conversion factor of 2.31 mL per pulse, equivalent to approximately 0.42 mm of rainfall per tipping event. The identified rainfall events were characterized using duration, accumulated precipitation, maximum intensity, mean intensity, and internal temporal distribution parameters, and were classified according to the quartile with the highest rainfall concentration. The results showed that precipitation in Ayacucho did not present a uniform behavior among stations, with differences in event frequency, accumulated rainfall, maximum intensities, duration, and temporal rainfall pattern. In addition, local, shared, and regional events were identified, along with recurrent propagation routes and spatial groupings using Ward's method, allowing the differentiation of zones with similar pluviometric behavior. It is concluded that the IoT rain gauge network provided high temporal and spatial resolution information, useful for characterizing the internal dynamics of urban storm events, improving the understanding of extreme rainfall behavior, and providing technical information for the design of hydraulic infrastructure that better represents the local variability of precipitation.

Keywords: precipitation, storm events, spatial-temporal variability, IoT rain gauge, Ayacucho.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE GENERAL	v
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Justificación.....	9
1.5 Objetivos.....	10
1.5.1. Objetivo general	10
1.5.2. Objetivo Especifico	10
1.6 Hipótesis	11
1.6.1. Hipótesis General	11
1.6.2. Hipótesis Específicas.....	11
1.7 Alcance y limitaciones.....	11
1.7.1. Alcances de la Investigación	11
1.7.2. Limitaciones de la Investigación	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Precipitación y variabilidad temporal.....	12
2.1.1. Precipitación	12
2.1.2. Formación y tipos de precipitación según su origen	13
2.1.3. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación	15

2.2 Bases Conceptuales – Variable X (Información de Precipitación IoT).....	16
2.2.1. Definición según la WMO.....	16
2.2.2. Diferencia entre sistemas manuales y automáticos	16
2.2.3. Funcionamiento del balancín (Tipping Bucket)	16
2.2.4. Volumen por basculación	17
2.2.5. Simulador de lluvia y calibración	17
2.2.6. Función del microcontrolador ESP8266.....	17
2.2.7. Transmisión mediante Adafruit IO	18
2.2.8. Ventajas y limitaciones.....	18
2.3 Bases Conceptuales – Variable Y (Variabilidad de Tormentas)	19
2.3.1. Definición de tormenta	19
2.3.2. Variabilidad temporal	19
2.3.3. Variabilidad espacial	19
2.3.4. Variabilidad espacio–temporal	19
2.3.5. Indicadores	19
2.3.6. Análisis SIG (isoyetas, interpolación)	20
2.3.7. Microrelieve urbano y lluvia	20
2.4 Marco conceptual	20
2.4.1. Precipitación	20
2.4.2. Evento de tormenta.....	20
2.4.3. Evento regional.....	20
2.4.4. Evento local	20
2.4.5. Intensidad	20
2.4.6. Basculación.....	20
2.4.7. Variabilidad	21
2.4.8. Δ mm (Diferencia de lámina)	21
2.4.9. Gradiente espacial.....	21

2.4.10. Isoyeta.....	21
2.4.11. Desfase	21
2.4.12. Persistencia	21
2.4.13. Hietograma	21
2.4.14. Interpolación.....	21
2.4.15. IETD (Inter-Event Time Definition)	21
2.4.16. Reed Switch.....	21
2.4.17. Timestamp	22
2.4.18. Microrelieve urbano	22
2.4.19. Calibración dinámica.....	22
2.4.20. IoT (Internet de las Cosas)	22
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO .	22
3.1 Descripción del área de estudio	22
3.2 Diseño del pluviómetro IoT.....	24
3.2.1 Módulo NodeMCU V3 (ESP8266 – ESP-12E).....	24
3.2.2 Sensor de precipitación tipo balancín (Tipping Bucket)	26
3.2.3 Fuente de alimentación del sistema (adaptador USB / cargador de celular)	29
3.2.3 Diseño y conexión del sistema de monitoreo	31
3.2.4 Funcionamiento del sistema de monitoreo	34
3.2.5 Programación y lógica de funcionamiento del sistema	36
3.2.6 Arduino y lenguaje de programación	45
3.3 Instalación de estaciones	46
3.4 Proceso de calibración	49
3.4.1 Fundamento de la calibración.....	49
3.4.2 Verificación del funcionamiento del mecanismo	49
3.4.3 Determinación de la constante de conversión	54
3.4.4 Repetibilidad de las mediciones	59

3.4.5 Observaciones operativas durante la calibración.....	60
3.4.6 Validación posterior en campo	62
3.5 Sistema de almacenamiento y gestión de datos.....	65
3.5.1 Plataforma de almacenamiento.....	65
3.5.2 Formato de almacenamiento.....	66
3.5.3 Frecuencia de descarga y gestión de datos	66
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS	67
4.1 Limpieza y depuración de datos	67
4.1.1 Eliminación de ruidos.....	67
4.1.2 Organización y estructuración de la base de datos	68
4.2 Definición de evento de lluvia.....	70
4.2.1 Determinación del Inter-Event Time Definition (IETD).....	70
4.2.2 Análisis gráfico para la selección del IETD	73
4.2.3 Definición de evento de lluvia.....	74
4.3 Parámetros analizados	75
4.3.1. Caracterización hidrológica y temporal de eventos de lluvia por estación	75
4.3.2. Análisis horario de ocurrencia de eventos de lluvia	78
4.3.3. Análisis de máximos pluviométricos por estación	80
4.3.4. Construcción de curvas envolventes por estación	85
4.4. Comparación entre estaciones	89
4.4.1. Identificación de coincidencias temporales entre estaciones	89
4.4.2. Parámetros resumen de los eventos regionales.....	91
4.4.3. Comparación de patrones horarios entre estaciones.....	92
4.4.4. Comparación de máximos y envolventes entre estaciones.....	97
4.5. Integración espacial-temporal.....	104
4.5.1. Articulación de los análisis previos	104
4.5.2. Matriz de integración espacial-temporal	106

4.5.3. Criterios de interpretación conjunta	109
4.5.4. Flujograma de integración metodológica	111
CAPÍTULO V: RESULTADOS	113
5.1 Eventos de lluvia identificados por estación	113
5.2 Caracterización temporal e hidrológica de los eventos por estación.....	116
5.3 Análisis horario de ocurrencia de la precipitación	119
5.4 Eventos máximos por estación	120
5.5. Curvas envolventes y eventos representativos por estación.....	127
5.6. Comparación espacial y regionalización de estaciones.....	131
5.6.1. Regionalización integral de estaciones.....	131
5.6.2. Agrupamiento según patrón horario	132
5.6.3. Agrupamiento según forma temporal de lluvia	136
5.7. Clasificación espacial de eventos de lluvia	137
5.8. Síntesis espacial-temporal de la precipitación.....	140
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN.....	xv
6.1. Variabilidad general de los eventos de lluvia entre estaciones	xv
6.2. Relación entre duración, acumulado e intensidad	xvi
6.3. Influencia del horario en la ocurrencia de lluvia	xvii
6.4. Discusión de eventos máximos y extremos.....	xix
6.5. Discusión de curvas y perfil temporal de eventos por estación.....	xxi
6.6. Discusión de análisis espacial mediante Ward	xxii
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	xxv
7.1. Conclusiones.....	xxv
7.2. Recomendaciones	xxvi
CAPITULO VIII. BIBLIOGRAFIA	xxvii
CAPITULO IX: ANEXOS	xxviii

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación política del proyecto.....	22
Tabla 2. Ubicación geográfica.....	23
Tabla 3. Ubicación de estaciones de monitoreo	23
Tabla 4. Conexiones principales de NodeMCU	31
Tabla 5. Resumen de la configuración del circuito	33
Tabla 6. Verificación de pulsos mediante control manual	50
Tabla 7. Análisis de correspondencia de pulsos	51
Tabla 8. Verificación temporal del registro de pulsos.....	52
Tabla 9. Resumen de la comparación	54
Tabla 10. Resultados de Prueba Volumen - pulso.....	55
Tabla 11. Resultados de prueba con pluviómetro casero e IoT.....	63
Tabla 12. Resultado en mm de los Resultados de prueba con pluviómetro casero e IoT ...	64
Tabla 13. Indicadores principales calculados.	84
Tabla 14. Identificación de variables temporales.	94
Tabla 15. Clasificación en 3 categorías.	100
Tabla 16. Interpretación de patrones	101
Tabla 17. Matriz de integración espacial-temporal de los eventos de lluvia.....	107
Tabla 18. Criterios de interpretación conjunta para el análisis espacial-temporal	109
Tabla 19. Resumen general de eventos de lluvia identificados por estación	113
Tabla 20. Parámetros principales de los eventos de lluvia por estación.....	116
Tabla 21. Eventos máximos principal por estación.	120
Tabla 22. Clasificación de eventos de lluvia según cobertura espacial.....	137
Tabla 24. Síntesis espacial-temporal de la precipitación por estación	142
Tabla 25. Eventos regionales identificados en la red pluviométrica	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento orográfico	15
Figura 2. Composición del módulo Node MCU V3 (ESP8266)	18
Figura 3. Mapa de Estaciones.....	24
Figura 4. Módulo NodeMCU V3 basado en el microcontrolador ESP8266	26
Figura 5. Microcontrolador NodeMCU ESP8266 ESP-12E	26
Figura 6. Mecanismo de balancín del pluviómetro tipo tipping bucket	29
Figura 7. Imagen de fuente de alimentación (cargador)	31
Figura 8. Diseño de conexión del equipo.	33
Figura 9. Flujograma del funcionamiento del sistema..	35
Figura 10. Librerías utilizadas para la conexión WiFi y comunicación MQTT del sistema IoT.	36
Figura 11. Configuración inicial de estación, red WiFi y credenciales de Adafruit IO.	37
Figura 12. Declaración del cliente MQTT, feed de publicación y variables de control de pulsos.	38
Figura 13. Función de conexión del módulo NodeMCU a la red WiFi.	39
Figura 14. Rutina de conexión del sistema con el servidor MQTT de Adafruit IO.	40
Figura 15. Rutina de interrupción para la detección de pulsos del pluviómetro.	40
Figura 16. Configuración inicial del pin de lectura y activación de interrupciones.	41
Figura 17. Procesamiento de pulsos detectados en el ciclo principal del programa.	42
Figura 18. Cálculo del intervalo de tiempo entre pulsos consecutivos.	43
Figura 19. Publicación del intervalo entre pulsos en Adafruit IO mediante protocolo MQTT.	44
Figura 20. Detección de finalización del evento de lluvia por inactividad.	44
Figura 21. Representación de la instalación del Equipo en cada vivienda.....	48
Figura 22. Código de programación en Arduino.....	54
Figura 23. Diseño de pluviómetro casero.....	62
Figura 24. Comparación gráfica de pluviómetro casero IoT.....	65
Figura 25. Pantalla de Adafruit con las 10 estaciones.....	66
Figura 26. Código de programación en Arduino.....	68
Figura 27. Comparación de registro de programación y el calculado.	69
Figura 28. Código de programación en Arduino.....	70
Figura 29. Histograma de umbrales de tiempo entre pulso	72
Figura 30- Comparación de umbrales de separación entre evento.	73

Figura 31. Resultados de clasificación en cuartiles.....	77
Figura 32. Hietogramas representativos de eventos de lluvia delimitados mediante IETD = 30 minutos	78
Figura 33. Distribución horaria acumulada de la precipitación registrada en la estación Ximena	80
Figura 34. Comparación de horas de inicio, pico y finalización de eventos de lluvia entre estaciones.....	96
Figura 35. Flujograma de integración espacial-temporal de los análisis de eventos de lluvia	111
Figura 36. Flujograma del análisis espacial de eventos regionales	112
Figura 37. Número de eventos de lluvia identificados por estación.....	114
Figura 38. Comparación entre número de eventos identificados y precipitación acumulada total por estación.....	114
Figura 39. Frecuencia de tipo temporales de lluvia por estación.	115
Figura 40. Distribución de la precipitación acumulada por evento en cada estación.....	117
Figura 41. Distribución de la intensidad máxima por evento en cada estación.....	118
Figura 42. Distribución de la duración de eventos de lluvia por estación.....	118
Figura 43. Mapa de calor de la frecuencia horaria de ocurrencia de eventos de lluvia por estación	119
Figura 44. Comparación de horas de inicio, pico y finalización de eventos por estación	120
Figura 45. Ranking de eventos máximos de intensidad	122
Figura 46. Distribución de intensidad máxima por evento regional extremo	123
Figura 47. Relación entre intensidad máxima y extensión espacial	124
Figura 48. Evolución del volumen acumulado en los eventos máximos de Mar	125
Figura 49. Volumen de lluvia por intervalos de 5 minutos en los eventos máximos de Mar	126
Figura 50. Curvas representativas del comportamiento de los eventos por estación.	127
Figura 51. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Mar.	128
Figura 52. Evento representativo real de lluvia en la estación Mar.	128
Figura 53. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Ximena	129
Figura 54. Evento representativo real de lluvia en la estación Ximena	129
Figura 55. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Sara	130
Figura 56. Evento representativo real de lluvia en la estación Sara	130

Figura 57. Regionalización espacial de estaciones pluviométricas según similitud integral de eventos de lluvia.	131
Figura 58. Ranking de tramos dominantes de propagación entre estaciones	132
Figura 59. Estaciones de origen y destino más frecuentes en eventos regionales.....	133
Figura 60. Principales rutas espaciales de propagación de lluvia en la red pluviométrica	134
Figura 61. Propagación temporal por oleadas del evento regional ER-29	135
Figura 62. Dendrograma de estaciones según forma temporal representativa de lluvia ..	136
Figura 63. Configuración bidimensional de similitud entre estaciones según curvas representativas de lluvia.	137
Figura 64. Distribución de eventos regionales según número de estaciones participantes	138
Figura 65. Línea temporal de eventos regionales identificados por mes.....	139
Figura 66. Isoyeta del evento regional extremo ERE-006.....	140
Figura 67. Mapa de regionalización espacial de estaciones pluviométricas según clúster Ward.	141

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción

La precipitación es una variable hidrológica fundamental para la planificación territorial, la gestión del riesgo y el diseño de infraestructura hidráulica, debido a su influencia en la escorrentía, infiltración, erosión, inundaciones y generación de caudales máximos. El incremento de eventos hidrometeorológicos extremos y la mayor exposición urbana a lluvias intensas evidencian la necesidad de contar con información pluviométrica precisa, continua y representativa.

En el Perú, la diversidad climática y topográfica genera una distribución irregular de la precipitación. En las regiones andinas, esta variabilidad se intensifica por el relieve, la altitud, la circulación atmosférica y las tormentas convectivas de la temporada húmeda. Sin embargo, la información disponible suele proceder de estaciones convencionales con registros diarios que resultan insuficientes para describir la dinámica interna de las tormentas. Esto dificulta determinar su duración, los intervalos de mayor intensidad, los desfases temporales y la distribución espacial de la lluvia en zonas urbanas.

En Huamanga, ciudad andina de relieve complejo y marcada estacionalidad, la precipitación no se distribuye uniformemente. Durante un mismo evento, distintos sectores pueden presentar diferencias en acumulación, intensidad, duración y momento del pico de lluvia. Esta condición genera incertidumbre en la interpretación de eventos extremos y limita la representatividad de los datos cuando se depende de una sola estación o de registros con baja resolución temporal. Por ello, el diseño de drenajes, canales y obras de protección puede basarse en información que no refleja adecuadamente el comportamiento de las tormentas locales.

Las redes de pluviómetros automáticos y los instrumentos de bajo costo basados en tecnología IoT permiten ampliar la cobertura espacial y mejorar la disponibilidad de datos en tiempo real. No obstante, los pluviómetros tipo balancín requieren procesos de calibración, validación y depuración, especialmente para estimar intensidades máximas en intervalos cortos. En consecuencia, la confiabilidad de la información depende de la instalación, calibración, control de calidad y procesamiento adecuado de los registros.

La investigación se enmarca en los recursos hídricos, la hidrología aplicada y la infraestructura hidráulica, en concordancia con el enfoque de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola y la Facultad de Ciencias Agrarias. Su propósito es analizar la

variabilidad espacio-temporal y caracterizar los perfiles de las tormentas ocurridas en Huamanga durante el verano austral 2026, mediante una red de diez pluviómetros IoT programados con Arduino. Se implementaron equipos tipo balancín conectados a módulos NodeMCU ESP8266, se calibró el sistema, se transmitieron los datos a la plataforma Adafruit IO y se procesaron mediante herramientas estadísticas y computacionales.

La variable de estudio es la variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormenta, entendida como los cambios de la precipitación según el lugar y el tiempo. Se analiza mediante la duración, precipitación acumulada, intensidades máxima y media, distribución temporal, simultaneidad, propagación espacial y clasificación de eventos locales, compartidos y regionales. Esto permite determinar cuánto llueve, cuándo se concentra la precipitación y qué diferencias existen entre sectores cercanos.

El problema surge de la limitada disponibilidad de información pluviométrica con alta resolución temporal y espacial en Huamanga, lo que restringe la caracterización de las tormentas urbanas y reduce la precisión de las evaluaciones hidrológicas. Sus principales causas son la baja densidad de estaciones, la dependencia de registros diarios, la ausencia de monitoreo distribuido en tiempo real y la falta de calibración adecuada de los sensores. Esta situación puede generar errores de subdimensionamiento o sobredimensionamiento de infraestructura, deficiencias en la gestión del riesgo y una limitada respuesta ante lluvias intensas.

La investigación se justifica por su aporte técnico, metodológico e institucional. Técnicamente, genera información pluviométrica subhoraria en diferentes puntos de la ciudad. Metodológicamente, integra instrumentación IoT, calibración, depuración de datos y análisis espacio-temporal. Institucionalmente, proporciona una base de datos local que complementa los registros convencionales y puede utilizarse en futuras investigaciones y proyectos hidráulicos.

El objetivo general es analizar la variabilidad espacio-temporal y caracterizar los perfiles de los eventos de tormenta en Huamanga durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IoT programados con Arduino. La hipótesis plantea que la información obtenida con esta red permite caracterizar adecuadamente dicha variabilidad y mejorar la interpretación hidrológica para el diseño de infraestructura hidráulica.

1.2 Antecedentes

(Salcedo, 2024b), en Bolivia, desarrolló un sistema de monitoreo y predicción regional de lluvias intensas basado en pluviómetros de bajo costo integrados en una arquitectura IoT, con el propósito de abordar la limitada cobertura espacial de estaciones meteorológicas convencionales en el país. El estudio parte del problema de baja densidad de monitoreo, señalando que una red escasa impide capturar adecuadamente la variabilidad espacial de eventos convectivos, los cuales pueden presentar comportamientos diferenciados en distancias cortas. En este contexto, el objetivo principal fue implementar una red distribuida de estaciones y analizar la dependencia espacial entre ellas mediante un modelo de Redes Neuronales de Grafos (GNN), capaz de representar las relaciones entre múltiples puntos de medición.

Metodológicamente, el autor diseñó pluviómetros tipo balancín de 0.2 mm de resolución conectados mediante módulos de comunicación GSM/GPRS, enviando datos a una plataforma centralizada. La información recopilada se estructuró como una red espacial en la que cada estación fue considerada un nodo y las conexiones se definieron en función de la proximidad geográfica, asignando mayor peso a estaciones cercanas. Este enfoque permitió modelar explícitamente la relación espacial entre estaciones, superando el análisis tradicional que considera cada punto de medición de manera independiente. El conjunto de datos utilizado incluyó registros históricos de múltiples estaciones distribuidas regionalmente, lo que permitió evaluar la capacidad del sistema para representar patrones espaciales de precipitación.

Los resultados demostraron que el modelo basado en estructura de red (Modelo A) presentó mejor desempeño predictivo en comparación con enfoques convencionales, evidenciado por menores valores de error (MSE y MAE). Más allá del resultado numérico, el hallazgo central del estudio radica en que la incorporación de relaciones espaciales entre estaciones mejora significativamente la representación de eventos de lluvia intensa. El autor concluye que, aunque los sensores utilizados sean de bajo costo, una red con suficiente densidad espacial puede capturar de manera efectiva la variabilidad regional de la precipitación y generar información útil para la gestión hidrometeorológica.

Este antecedente se relaciona directamente con el primer objetivo de la presente investigación, orientado a determinar la relación y variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormenta entre diez puntos de medición en la ciudad de Ayacucho. El estudio respalda el principio de que la caracterización espacial de tormentas no depende

exclusivamente de la precisión individual del sensor, sino de la integración coherente de múltiples estaciones distribuidas estratégicamente. En consecuencia, la existencia de una red local densa permite analizar simultaneidad, diferencias de intensidad, propagación temporal y coherencia espacial de los eventos, elementos fundamentales para comprender la dinámica de tormentas en escala urbana andina.

(Segovia-Cardozo et al., 2023), desarrollaron una revisión técnica exhaustiva sobre el desempeño de los pluviómetros tipo balancín (Tipping Bucket Rain Gauges, TBRG) en investigación hidrológica, publicada en la revista *Sensors*. El estudio se enmarca en el contexto internacional del uso extendido de estos instrumentos en redes hidrometeorológicas automáticas, tanto en aplicaciones climáticas como hidrológicas, debido a su bajo costo, simplicidad mecánica y facilidad de integración con sistemas de adquisición de datos.

El objetivo principal del estudio fue sintetizar y analizar las incertidumbres de medición asociadas a los pluviómetros tipo balancín, identificar las principales fuentes de error y evaluar las estrategias de calibración y corrección disponibles para mejorar la calidad de los datos de precipitación, especialmente cuando estos se emplean en estudios hidrológicos que requieren alta resolución temporal e intensidad precisa.

La metodología consistió en una revisión crítica de literatura científica y estudios experimentales previos, abordando el principio físico de funcionamiento del instrumento y clasificando las fuentes de error en diferentes categorías: (i) errores estáticos asociados al volumen real de vuelco respecto a la resolución nominal, (ii) errores dinámicos derivados del movimiento del balancín durante eventos de alta intensidad, (iii) errores por subcaptura asociados al viento y a la geometría del colector, y (iv) errores de muestreo temporal derivados del cálculo de intensidad a partir del intervalo entre volcadas. Asimismo, se analizaron distintos enfoques de calibración, incluyendo calibración estática mediante ajuste volumétrico, calibración dinámica con flujo controlado y métodos de corrección matemática basados en interpolación o ajuste por intensidad.

Los resultados del análisis evidencian que los pluviómetros tipo balancín presentan un desempeño confiable en la estimación de precipitación acumulada total, especialmente en escalas diarias o de evento completo. Sin embargo, cuando se emplean para estimar intensidades instantáneas o máximas en intervalos cortos, pueden producir errores significativos que dependen de la resolución del instrumento, la intensidad de la lluvia y el método de procesamiento aplicado. Se destaca que los errores dinámicos tienden a

subestimar la precipitación en eventos intensos debido al flujo continuo durante el vuelco del balancín, mientras que en eventos de baja intensidad el instrumento puede sobreestimar o distorsionar la intensidad debido a la discretización temporal de los pulsos. El estudio concluye que la correcta calibración y el tratamiento adecuado de los datos son determinantes para reducir la incertidumbre y garantizar la aplicabilidad hidrológica de los registros obtenidos.

Este antecedente aporta directamente a la presente investigación en tres aspectos fundamentales. Primero, respalda la validez del uso de pluviómetros tipo balancín programados con Arduino para el monitoreo de precipitación acumulada en redes distribuidas, siempre que se comprendan sus limitaciones instrumentales. Segundo, sustenta la necesidad de realizar procesos de validación y calibración, tanto estática como dinámica, para garantizar la confiabilidad de los datos recolectados, en concordancia con el objetivo de validación instrumental del estudio. Finalmente, proporciona fundamento técnico para el análisis de eventos de tormenta en términos de intensidad y acumulación, aspecto clave para evaluar la utilidad de los datos obtenidos en el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas en la ciudad de Ayacucho.

(Muñoz et al., 2016a), en su estudio titulado *Effect of the Resolution of Tipping-Bucket Rain Gauge and Calculation Method on Rainfall Intensities in an Andean Mountain Gradient*, desarrollado en el ecosistema de páramo de la Cordillera de los Andes en Ecuador, evaluaron la influencia de la resolución de pluviómetros de balancín (Tipping Bucket, TB), el método de cálculo de intensidad y la variación altitudinal sobre la estimación de intensidades de precipitación. La investigación se llevó a cabo en dos observatorios ecohidrológicos representativos: Zhurucay (≈ 3900 m s.n.m.) y Quinuas (entre 3300 y 4000 m s.n.m.), zonas caracterizadas por alta variabilidad espacio-temporal de la precipitación y predominio de lluvias de baja intensidad. El objetivo principal fue cuantificar el error en la estimación de intensidades de lluvia al emplear pluviómetros TB de diferente resolución (0.254 mm, 0.2 mm y 0.1 mm), analizar el efecto del método de cálculo de intensidad —Tip Counting (TC) y Cubic Spline (CS)— y determinar si la altitud influye en la magnitud del sesgo instrumental.

Metodológicamente, en el observatorio Zhurucay se instalaron de manera colocalizada tres pluviómetros TB (Davis 0.254 mm, Onset 0.2 mm y Texas 0.1 mm) y un disdrómetro láser de alta resolución (0.01 mm), utilizado como sensor de referencia. Las intensidades fueron calculadas por clases (0–1, 1–2, 2–5 y 5–10 mm/h) y agregadas en

escalas temporales de 5, 10, 30 y 60 minutos. El error fue cuantificado mediante el Percent Absolute Bias (PAB), comparando las mediciones de los TB frente al disdrómetro. En el observatorio Quinuas se evaluó el efecto del gradiente altitudinal comparando el pluviómetro Davis con el Texas en tres elevaciones distintas, aplicando interpolación cúbica para el cálculo de intensidades.

Los resultados evidenciaron que en el ecosistema de páramo predominan intensidades bajas: 50% de las intensidades registradas no superaron 1 mm/h, 75% no excedieron 2 mm/h y 95% fueron iguales o menores a 5 mm/h, con una alta frecuencia de eventos de llovizna. Se determinó que el error instrumental es considerablemente mayor en intensidades menores a 2 mm/h y en escalas temporales cortas (5 y 10 minutos), alcanzando valores de sesgo absoluto de hasta 180% en la escala de 5 minutos. Asimismo, el método de cálculo influye significativamente en la estimación de intensidades, observándose que la interpolación Cubic Spline reduce el error entre 1.5 y 2 veces en comparación con el método tradicional Tip Counting, especialmente en eventos de baja intensidad. En cuanto a la resolución instrumental, los pluviómetros de 0.1 mm presentaron menor incertidumbre que los de 0.254 mm, demostrando que una mayor resolución mejora la confiabilidad en regiones donde predominan lluvias suaves. Finalmente, no se encontró relación significativa entre la altitud, el volumen acumulado de precipitación y la magnitud del error, concluyéndose que la incertidumbre depende principalmente del instrumento y del procesamiento de datos, y no del gradiente altitudinal.

Este estudio constituye un antecedente relevante para la presente investigación, ya que evidencia la necesidad de validar y calibrar instrumentalmente pluviómetros en regiones andinas con predominio de bajas intensidades, sustenta la importancia de analizar la variabilidad de la intensidad en función de la escala temporal y el método de cálculo, y respalda la consideración de métricas de sesgo en la evaluación de confiabilidad de dispositivos IoT programados con Arduino. Asimismo, aporta fundamento técnico para discutir la precisión de los datos empleados en el análisis espacio-temporal de eventos de tormenta y su implicancia en aplicaciones hidráulicas y de diseño.

(Saha et al., 2023), desarrollaron en Mumbai, India, un módulo de monitoreo de calidad en tiempo real para una red de pluviómetros automáticos (Automatic Rain Gauge – ARG), con el propósito de mejorar la confiabilidad de los registros de precipitación durante el período del monzón 2020–2022. El estudio se enmarca en un contexto urbano con lluvias monzónicas de alta intensidad y marcada variabilidad espacial, donde la existencia de

múltiples estaciones distribuidas en un área relativamente pequeña permite analizar diferencias significativas entre puntos cercanos.

El objetivo principal fue implementar y evaluar un sistema automatizado de control de calidad capaz de identificar, en tiempo real, inconsistencias en los datos registrados por una red densa de estaciones pluviométricas. La metodología consistió en el análisis comparativo entre estaciones vecinas, aplicando criterios de validación basados en rangos físicos admisibles, coherencia temporal, detección de valores atípicos y consistencia espacial entre registros simultáneos. Específicamente, los autores evaluaron la concordancia entre estaciones próximas para determinar si un valor extremo correspondía a un evento real o a una anomalía instrumental, utilizando la estructura espacial de la red como mecanismo de verificación.

Los resultados evidenciaron que la variabilidad espacial de las precipitaciones durante eventos intensos es considerable incluso dentro de la misma ciudad, registrándose diferencias significativas en acumulaciones y tasas de lluvia entre estaciones cercanas. Asimismo, se demostró que la validación cruzada entre múltiples estaciones mejora sustancialmente la confiabilidad de la red, permitiendo detectar fallas instrumentales o registros inconsistentes que no serían identificables si se analizara cada estación de manera aislada. El estudio concluye que una red pluviométrica densa, acompañada de mecanismos de control espacial y temporal, incrementa la calidad del monitoreo hidrometeorológico y permite una caracterización más precisa de eventos extremos.

Este antecedente se relaciona directamente con el objetivo de la presente investigación, en tanto respalda la importancia de analizar la variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormenta a partir de múltiples puntos de medición. El estudio demuestra que la densidad de estaciones no solo mejora la cobertura espacial, sino que constituye un elemento fundamental para validar datos y comprender la heterogeneidad de la precipitación en áreas urbanas. En ese sentido, proporciona sustento metodológico para evaluar la relación entre los diez puntos de medición propuestos en la ciudad de Ayacucho, así como para interpretar adecuadamente las diferencias observadas entre estaciones durante el verano austral 2026.

1.3 Planteamiento del problema

A pesar de que en la ciudad de Ayacucho la medición de precipitación se realiza principalmente mediante estaciones meteorológicas convencionales con registros diarios,

como la estación INIA-CANAÁN, existe una brecha importante en el conocimiento detallado de las tormentas locales, especialmente en lo que respecta a **la caracterización espacio-temporal de su ciclo de vida, intensidad, duración y desplazamiento**. Esta falta de información de alta resolución limita la comprensión de los eventos de lluvia intensa y su aplicabilidad para el diseño hidráulico y la gestión del riesgo de desastres.

El uso de datos satelitales ha sido una herramienta complementaria para describir fenómenos pluviométricos en regiones andinas; sin embargo, estas fuentes no proveen el monitoreo continuo necesario ni la precisión temporal y local requerida para conocer con exactitud la dinámica de tormentas que afectan zonas urbanas y rurales de la sierra. En consecuencia, las decisiones de diseño hidrológico y de infraestructura, como drenajes, canales y obras de protección, se han basado en modelos generalizados o en datos de baja resolución, lo que puede llevar a **cálculos inexactos y obras mal dimensionadas** frente a eventos extremos.

Este vacío en el conocimiento técnico es concordante con la evidencia nacional de que los riesgos asociados a lluvias intensas, inundaciones y eventos climáticos extremos han aumentado en el Perú en las últimas décadas, y que regiones de la sierra y la costa presentan altos niveles de exposición y vulnerabilidad ante dichos eventos, especialmente asociados a fenómenos climáticos como El Niño costero (que ha producido lluvias intensas, desbordes e impactos socioeconómicos significativos) y a la creciente frecuencia de precipitaciones extremas que ponen en riesgo infraestructuras, población y servicios básicos. La evidencia de riesgo de inundación en Perú clasificado como alto por modelos globales y regionales también subraya la necesidad de mejorar la calidad y resolución de los datos disponibles.

Por lo tanto, surge la pregunta central de investigación:

¿Cómo puede la implementación y calibración de una red de pluviómetros IoT, programados con Arduino, mejorar la caracterización espacio-temporal de los eventos de tormenta en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, y en qué medida estos datos pueden contribuir a una mejor evaluación hidrológica y al diseño más preciso de infraestructura hidráulica frente a eventos extremos?

Este planteamiento sirve de base para la formulación de las **preguntas específicas de investigación** alineadas con los objetivos de la tesis:

1. ¿Cuál es el perfil característico de los eventos de tormenta en un punto específico de Ayacucho durante el verano austral 2026 obtenido a partir de datos de pluviómetros IoT?
2. ¿Qué relación y variabilidad espacio-temporal existe entre los diez puntos de medición seleccionados en la ciudad de Ayacucho para los eventos de tormenta?
3. ¿Cuál es el grado de confiabilidad y precisión que se logra mediante la calibración de los pluviómetros IoT programados con Arduino?
4. ¿Qué utilidad tienen los datos de pluviómetros IoT para optimizar el diseño y dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas en función de las tormentas de diseño detectadas en la región?

1.4 Justificación

La investigación sobre la caracterización de eventos de tormenta en el territorio peruano resulta fundamental debido a la limitada disponibilidad de información pluviométrica de alta resolución temporal y espacial en regiones andinas como Ayacucho. Actualmente, la medición convencional se basa principalmente en registros diarios, lo que impide capturar adecuadamente la dinámica interna de los eventos de tormenta, tales como su intensidad pico, duración efectiva y patrón de distribución temporal.

Diversos estudios en la región andina han demostrado que la medición de intensidades de lluvia mediante pluviómetros de balancín (tipping bucket) puede presentar errores significativos, especialmente en eventos de baja intensidad y en escalas temporales cortas (≤ 10 minutos), donde el sesgo puede superar el 50% si no se aplican métodos adecuados de cálculo y calibración (Muñoz et al., 2016b). Esta evidencia resalta la importancia de emplear sensores de mayor resolución y metodologías de procesamiento adecuadas para obtener intensidades confiables, especialmente en ecosistemas montañosos caracterizados por alta variabilidad espacio-temporal.

Por otro lado, investigaciones recientes en América Latina han demostrado que la implementación de redes de pluviómetros IoT de bajo costo permite ampliar la cobertura espacial en regiones con limitada infraestructura meteorológica, mejorando la adquisición de datos en tiempo real y la capacidad de análisis regional (Salcedo, 2024b). Estos sistemas no solo automatizan la medición, sino que generan información útil para modelamiento espacial y predicción de eventos extremos.

Desde un enfoque técnico, la presente investigación permitirá:

- Obtener perfiles de tormenta con resolución subhoraria.
- Analizar la variabilidad espacio-temporal entre múltiples puntos de medición.
- Validar el desempeño de pluviómetros IoT frente a limitaciones conocidas de sensores tradicionales.
- Generar insumos más representativos para el cálculo de tormentas de diseño.

En términos económicos, contar con datos de mayor precisión reducirá el riesgo de sobredimensionamiento o subdimensionamiento de obras hidráulicas. La literatura ha demostrado que errores en la estimación de intensidades pueden traducirse en fallas estructurales o costos innecesarios (Muñoz et al., 2016b). En contextos andinos donde la infraestructura suele desarrollarse con presupuestos limitados, mejorar la calidad de la información representa una estrategia de optimización de recursos.

Asimismo, la investigación contribuye institucionalmente, al generar información que puede complementar los registros oficiales y apoyar procesos de planificación hidrológica y gestión del riesgo. La evidencia regional muestra que la baja densidad de estaciones limita la capacidad de monitoreo en países latinoamericanos (Salcedo, 2024b), situación que también se replica en diversas ciudades del Perú.

Finalmente, esta investigación aporta innovación metodológica al integrar instrumentación IoT, análisis de intensidades y evaluación espacio-temporal en un entorno urbano andino, generando conocimiento aplicable tanto a la ingeniería hidráulica como a la gestión territorial frente a eventos extremos.

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad espacio-temporal y caracterizar los perfiles de los eventos de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, utilizando datos de pluviómetros IoT programados con Arduino para la recolección de información en tiempo real.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Caracterizar el perfil de los eventos de tormentas en un punto específico de la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, utilizando datos de pluviómetros IoT programados con Arduino.

- Determinar la relación y variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormentas entre los diez puntos de medición seleccionados en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026.
- Validar y calibrar los pluviómetros IoT programados con Arduino para garantizar la confiabilidad y precisión de los datos recopilados.
- Evaluar la utilidad de los pluviómetros IoT programados con Arduino para generar información hidrológica que sirva como insumo para el diseño hidráulico en función de las tormentas detectadas en la región.

1.6 Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La información recolectada mediante pluviómetros IoT programados con Arduino permite caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, contribuyendo a optimizar el diseño hidráulico de infraestructuras.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- La información obtenida a través de pluviómetros IoT programados con Arduino permite caracterizar adecuadamente la variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026.
- Es posible caracterizar el perfil de tormenta en diferentes puntos de la ciudad de Ayacucho, analizando si los comportamientos de los eventos de tormentas son consistentes entre los diez puntos seleccionados.
- La validación y calibración de los pluviómetros IoT programados con Arduino garantizará la confiabilidad y precisión de los datos recopilados, permitiendo optimizar el diseño y dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas para hacer frente a las tormentas de diseño detectadas en la región.

1.7 Alcance y limitaciones

1.7.1. Alcances de la Investigación

La presente investigación se circunscribe al análisis de la variabilidad espacio-temporal de eventos de tormenta registrados en diez puntos estratégicos de la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026. El estudio contempla la instalación, calibración y

monitoreo de pluviómetros tipo balancín instrumentados con microcontroladores NodeMCU, permitiendo la recolección de datos en tiempo real con resolución subhoraria.

Se analizarán parámetros como intensidad, duración, frecuencia, lámina total y distribución espacial de las precipitaciones, así como la generación de curvas Intensidad-Duración para la caracterización de tormentas de diseño. Asimismo, se evaluará la precisión del sistema mediante pruebas de calibración con simulador de lluvia y comparación con registros históricos disponibles.

El estudio no contempla modelamiento hidrológico completo de cuencas ni simulaciones hidráulicas detalladas, sino que se enfoca en la caracterización pluviométrica como insumo técnico para futuras aplicaciones.

1.7.2. Limitaciones de la Investigación

La investigación presenta limitaciones inherentes a su diseño y condiciones operativas. En primer lugar, el monitoreo se restringe a una única temporada de lluvias, lo cual puede no capturar completamente la variabilidad interanual de las precipitaciones.

Adicionalmente, el sistema depende de conectividad Wi-Fi y suministro energético continuo, factores que podrían afectar la transmisión en tiempo real de los datos. El área de captación del pluviómetro utilizado es menor a la recomendada por la Organización Meteorológica Mundial, lo que podría influir en la precisión absoluta de la medición.

Asimismo, el mecanismo de balancín puede presentar errores asociados a rebotes eléctricos y alta frecuencia de pulsos durante eventos intensos, fenómeno documentado en literatura especializada. Aunque se implementan soluciones de hardware y calibración para mitigar estos efectos, no se elimina completamente la incertidumbre instrumental.

Finalmente, la red de diez estaciones proporciona una representación espacial urbana, pero no cubre la totalidad de variaciones microclimáticas posibles dentro del territorio provincial.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Precipitación y variabilidad temporal

2.1.1. Precipitación

La precipitación se define como cualquier forma de agua de origen atmosférico que alcanza y se deposita sobre la superficie terrestre, incluyendo principalmente lluvia, nieve y

granizo. En determinadas regiones, otras manifestaciones como el rocío y la escarcha pueden representar una fracción menor, pero significativa, del total precipitado.

Desde el punto de vista de su formación, las precipitaciones pueden clasificarse en tres tipos principales. Las precipitaciones ciclónicas están asociadas al desplazamiento de frentes vinculados a sistemas de baja presión o ciclones, siendo responsables de gran parte del volumen acumulado en una cuenca. Las precipitaciones convectivas se originan por el ascenso de masas de aire caliente, fenómeno típico de tormentas de corta duración e intensidades elevadas, frecuentes durante el verano. Finalmente, las precipitaciones orográficas ocurren cuando masas de aire húmedo son forzadas a ascender debido a la presencia de una barrera montañosa, generando condensación y lluvia en las zonas de elevación.

El análisis de la precipitación constituye un componente esencial en los estudios hidrológicos regionales, dado que representa la principal fuente de ingreso de agua a una cuenca hidrográfica. Su adecuada caracterización es indispensable para la estimación de recursos hídricos, la previsión de avenidas, el diseño de infraestructura hidráulica y la evaluación de procesos de erosión y escorrentía superficial. (Sánchez San Román, sf)

2.1.2. Formación y tipos de precipitación según su origen

La precipitación comprende todas las formas de agua que se originan en la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre, entre las que destacan principalmente la lluvia, la nieve, el granizo y la aguanieve. Su formación está asociada al ascenso de masas de aire húmedo en la atmósfera, proceso que provoca el enfriamiento del aire y la posterior condensación del vapor de agua contenido en él.

Desde el punto de vista del mecanismo que genera el ascenso del aire, la precipitación puede clasificarse en tres tipos principales. La **precipitación frontal o ciclónica** ocurre cuando una masa de aire cálido es forzada a elevarse al encontrarse con una masa de aire más fría durante el desplazamiento de frentes atmosféricos. Este tipo de precipitación suele generar lluvias extensas y de larga duración.

La **precipitación orográfica** se produce cuando una masa de aire húmedo asciende al encontrarse con una barrera topográfica, como una cordillera o elevación montañosa. Durante este ascenso el aire se enfría, lo que favorece la condensación del vapor de agua y la formación de nubes y precipitación en las zonas de barlovento.

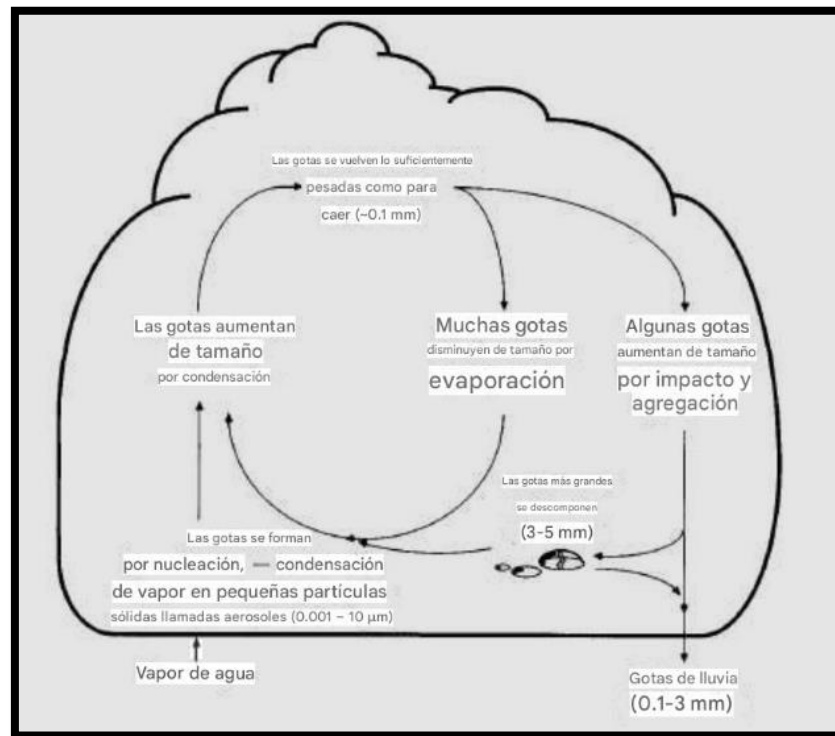
Por otro lado, la **precipitación convectiva** se origina por el calentamiento de la superficie terrestre, lo que provoca el ascenso rápido de masas de aire cálido y húmedo. Este proceso genera inestabilidad atmosférica y da lugar a tormentas de corta duración pero de alta intensidad, comúnmente asociadas a células convectivas o tormentas eléctricas.

El proceso de formación de las gotas de lluvia dentro de las nubes se inicia cuando el aire húmedo asciende y se enfría, permitiendo que el vapor de agua pase al estado líquido o sólido dependiendo de la temperatura. Este proceso requiere la presencia de pequeñas partículas suspendidas en la atmósfera conocidas como **núcleos de condensación**, alrededor de las cuales se adhieren las moléculas de agua.

Estos núcleos pueden estar formados por partículas de polvo, sales marinas o compuestos químicos presentes en la atmósfera, los cuales facilitan la condensación del vapor de agua. A medida que se forman las pequeñas gotas, estas aumentan su tamaño mediante procesos de condensación adicional y colisiones con otras gotas dentro de la nube, impulsadas por los movimientos turbulentos del aire.

Cuando las gotas alcanzan un tamaño suficiente para que la fuerza de gravedad supere la resistencia del aire, comienzan a descender hacia la superficie terrestre en forma de precipitación. Durante su caída, las gotas pueden seguir creciendo al fusionarse con otras gotas en su trayectoria o, por el contrario, reducir su tamaño debido a procesos de evaporación si atraviesan capas de aire más seco.(Chow et al., 1988a)

Figura 1. Comportamiento orográfico



NOTA.. Las gotas de agua en las nubes se forman por nucleación de vapor en aerosoles, luego pasan por muchos ciclos de condensación- evaporación a medida que circulan en la nube, hasta que se agregan en gotas lo suficientemente grandes como para caer a través de la base de la nube. (Chow et al., 1988a)

2.1.3. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación

La precipitación presenta una variabilidad significativa tanto en el **espacio como en el tiempo**, debido a la influencia de la circulación atmosférica global y a diversos factores locales como la topografía, la proximidad a cuerpos de agua y las condiciones climáticas regionales. Estas variaciones se manifiestan en cambios en la **distribución, intensidad y frecuencia de los eventos de lluvia**, los cuales pueden diferir considerablemente entre distintas regiones y periodos del año.

En términos espaciales, la precipitación suele presentar contrastes importantes entre áreas geográficas cercanas. Por ejemplo, las regiones montañosas tienden a experimentar mayores precipitaciones debido al efecto orográfico, en el cual las masas de aire húmedo ascienden al encontrar barreras topográficas, provocando enfriamiento, condensación y posterior precipitación. En contraste, las zonas ubicadas a sotavento de estas barreras pueden

recibir menores cantidades de lluvia debido a la pérdida de humedad del aire durante su ascenso previo.

Desde el punto de vista temporal, la precipitación también muestra una marcada variabilidad estacional asociada a cambios en la circulación atmosférica y en el transporte de humedad. Estos patrones pueden generar periodos de mayor concentración de lluvias, como ocurre durante estaciones húmedas o eventos convectivos intensos, los cuales suelen caracterizarse por **precipitaciones de corta duración pero alta intensidad**.

A escala global, la precipitación anual promedio sobre la superficie terrestre es cercana a **800 mm**, aunque existen diferencias extremas entre regiones. Algunas zonas áridas presentan valores prácticamente nulos, mientras que regiones tropicales o montañosas pueden registrar acumulaciones anuales muy elevadas.

El análisis de la variabilidad de la precipitación es fundamental en estudios hidrológicos, ya que permite comprender mejor el comportamiento de los eventos de lluvia y su distribución en el territorio. Esta información resulta esencial para el **diseño de infraestructuras hidráulicas, la gestión de recursos hídricos y la evaluación de riesgos asociados a eventos extremos**, como inundaciones o tormentas intensas.

2.2 Bases Conceptuales – Variable X (Información de Precipitación IoT)

2.2.1. Definición según la WMO

De acuerdo con los estándares internacionales de observación, la precipitación se define como el líquido o sólido que se separa de la atmósfera y alcanza la superficie terrestre. Según la World Meteorological Organization (2024), este fenómeno abarca la lluvia, el granizo y la nieve, constituyendo el parámetro fundamental para cuantificar el ingreso de agua a un sistema hidrológico o cuenca.

2.2.2. Diferencia entre sistemas manuales y automáticos

La medición tradicional con instrumentos manuales (como el pluviómetro tipo INIA-CANAÁN) suele limitarse a un dato diario acumulado. En contraste, los sistemas automáticos permiten registrar la lluvia segunda a segundo, lo que es vital para observar el comportamiento dinámico y real de las tormentas urbanas.

2.2.3. Funcionamiento del balancín (Tipping Bucket)

Este mecanismo opera bajo un principio de gravedad. El agua ingresa por un embudo hacia un balancín con dos compartimentos. Cuando uno se llena, el peso hace que el sistema

vuelque, activando un imán que cierra un interruptor **Reed Switch**, enviando un pulso eléctrico que el microcontrolador cuenta como una unidad de precipitación.

2.2.4. Volumen por basculación

Cada "clic" o vuelco del balancín representa una lámina de agua específica, generalmente definida por el fabricante como 0.3 mm. Sin embargo, mediante ensayos controlados se determina un factor de conversión real (ej. 2.31 mL/pulso), lo que permite transformar los pulsos eléctricos en milímetros de lluvia exactos.

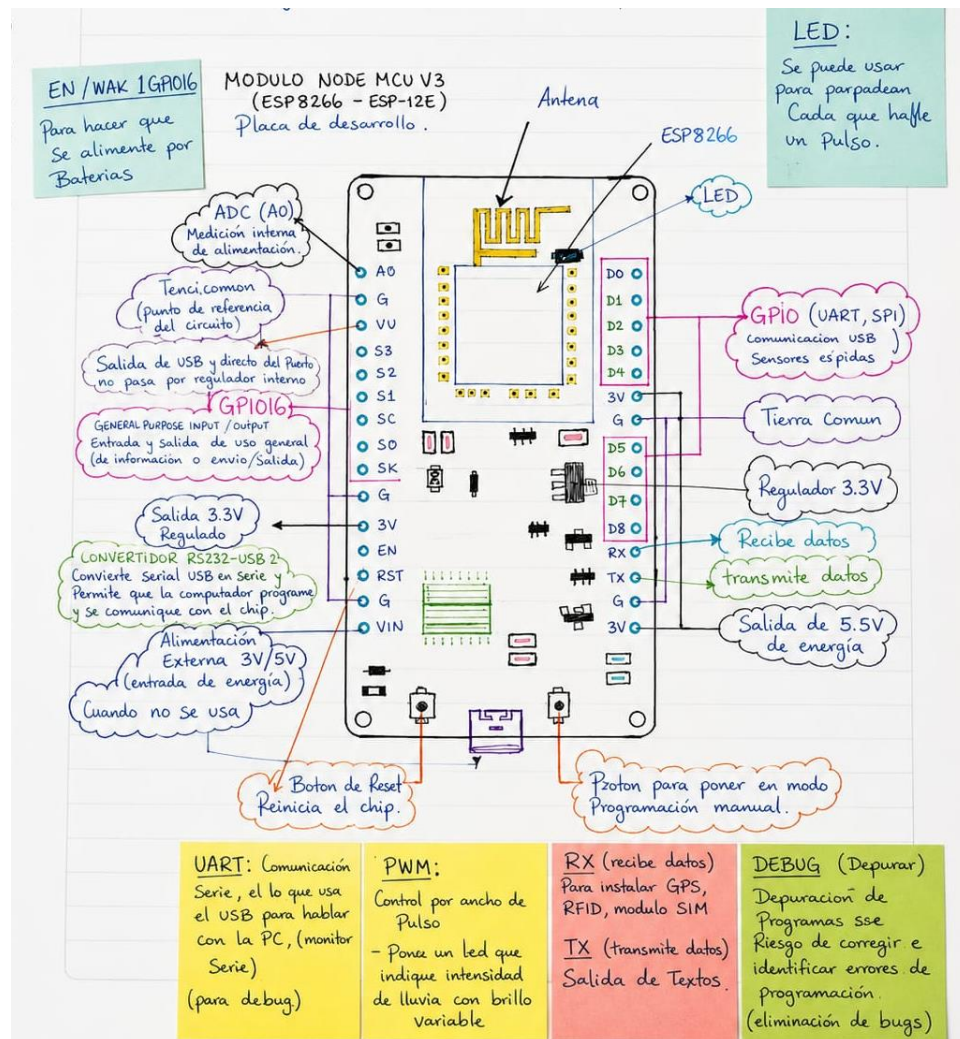
2.2.5. Simulador de lluvia y calibración

Para garantizar la precisión, se utiliza un proceso de calibración estática donde se aplica un volumen conocido de agua. Esto simula un evento de lluvia en condiciones de laboratorio, permitiendo verificar si el número de pulsos registrados coincide con la cantidad de agua aplicada, reduciendo el margen de error instrumental. (Segovia-Cardozo et al., 2023)

2.2.6. Función del microcontrolador ESP8266

El módulo NodeMCU, basado en el chip ESP8266, actúa como el "cerebro" del equipo. Su función es detectar cada interrupción eléctrica generada por el balancín, calcular el tiempo entre pulsos (Δt) y procesar la información para enviarla de forma inalámbrica mediante su antena WiFi integrada.

Figura 2. Composición del módulo Node MCU V3 (ESP8266)



2.2.7. Transmisión mediante Adafruit IO

El sistema utiliza el protocolo MQTT para enviar los datos a la plataforma Adafruit IO. Esta herramienta en la nube recibe los pulsos, los organiza en "feeds" y les asigna una marca de tiempo exacta (*timestamp*), permitiendo que cualquier persona pueda ver los gráficos de la lluvia en tiempo real desde un navegador.

2.2.8. Ventajas y limitaciones

El uso de tecnología IoT de bajo costo permite crear redes densas de monitoreo que las estaciones oficiales no pueden cubrir. No obstante, el sistema depende de una conexión WiFi estable y puede presentar errores si el balancín no está perfectamente nivelado o si la intensidad de la lluvia supera la capacidad mecánica del sensor. (Muñoz et al., 2016b)

2.3 Bases Conceptuales – Variable Y (Variabilidad de Tormentas)

2.3.1. Definición de tormenta

Desde una perspectiva hidrológica, se considera tormenta a un evento de lluvia con una intensidad considerable y una duración finita, delimitada por periodos de tiempo seco. Según la literatura técnica, estos sucesos suelen estar ligados a nubes de gran desarrollo vertical y liberan una gran cantidad de agua en intervalos reducidos de tiempo. (Chow et al., 1988b)

2.3.2. Variabilidad temporal

Este concepto describe cómo fluctúa la fuerza de la lluvia a medida que transcurre el tiempo dentro de un mismo evento. Para analizarla, se emplean hietogramas que permiten visualizar los picos de máxima intensidad, facilitando la comprensión de la evolución del fenómeno desde que inicia hasta que se disipa. (Chow et al., 1988b)

2.3.3. Variabilidad espacial

Debido a la influencia del relieve y factores meteorológicos locales, la lluvia no se distribuye de manera uniforme. La World Meteorological Organization (2024) destaca que esta variabilidad implica que puntos geográficos cercanos pueden registrar acumulados significativamente diferentes durante un mismo evento, lo que justifica el uso de redes de monitoreo densas en áreas urbanas.

2.3.4. Variabilidad espacio-temporal

Esta variable combina el análisis del tiempo y el espacio para entender la dinámica integral de la lluvia. Permite rastrear la trayectoria de una tormenta sobre la ciudad, identificando cómo el núcleo de mayor intensidad se desplaza y cambia su potencia conforme avanza sobre el área urbana. (Salcedo, 2024a)

2.3.5. Indicadores

Para cuantificar las características de una tormenta se utilizan métricas clave:

- **Intensidad:** La relación entre la lámina de agua y el tiempo (\$mm/h\$).
- **Δ mm (Diferencia de lámina):** La variación en milímetros acumulados entre distintos sensores.
- **Desfase:** El tiempo de retraso en el inicio de la lluvia registrado entre dos o más estaciones. (Salcedo, 2024a)

2.3.6. Análisis SIG (isoyetas, interpolación)

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es fundamental para pasar de datos puntuales a una visión general. Mediante métodos de interpolación matemática, se generan **isoyetas**, que son líneas que conectan puntos con igual volumen de lluvia, permitiendo crear mapas de distribución pluvial precisos. (Salcedo, 2024a)

2.3.7. Microrelieve urbano y lluvia

La topografía local y la configuración de las edificaciones en una ciudad influyen directamente en la captación de la lluvia. El microrelieve puede generar microclimas o efectos de barrera que intensifican la precipitación en zonas específicas, afectando la respuesta de las cuencas urbanas y los sistemas de drenaje. (Muñoz et al., 2016b).

2.4 Marco conceptual

2.4.1. Precipitación

Es cualquier forma de humedad acuosa que, tras condensarse en la atmósfera, cae por efecto de la gravedad hasta la superficie de la tierra, siendo la variable de entrada del ciclo hidrológico (World Meteorological Organization, 2024)

2.4.2. Evento de tormenta

Se define como un suceso de lluvia continua delimitado por un periodo de tiempo seco o de independencia, conocido como IETD (Chow et al., 1988b)

2.4.3. Evento regional

Es una tormenta de gran escala que es registrada de manera simultánea por la mayoría o la totalidad de las estaciones de la red de monitoreo urbano.

2.4.4. Evento local

Se refiere a una precipitación de corta extensión geográfica que solo llega a ser detectada por un número reducido de sensores en la zona de estudio.

2.4.5. Intensidad

Representa la rapidez con la que cae la lluvia en un tiempo determinado, expresándose habitualmente en milímetros por hora (mm/h) (Chow et al., 1988b)

2.4.6. Basculación

Es el movimiento mecánico de vuelco que realiza el balancín del pluviómetro cada vez que se llena con una cantidad de agua predefinida.

2.4.7. Variabilidad

Es la propiedad de la lluvia de cambiar su comportamiento, volumen y frecuencia tanto en el espacio como en el tiempo.

2.4.8. Δ mm (Diferencia de lámina)

Es el indicador que mide la variación numérica del total de agua acumulada entre dos puntos distintos de medición.

2.4.9. Gradiente espacial

Métrica que indica cuánto varía la cantidad de lluvia por cada unidad de distancia recorrida en el terreno (Muñoz et al., 2016b).

2.4.10. Isoyeta

Línea técnica utilizada en cartografía para unir puntos geográficos que han registrado la misma cantidad de precipitación (Salcedo, 2024a).

2.4.11. Desfase

Diferencia de tiempo detectada entre el inicio de la precipitación en una estación respecto a otra durante el mismo evento.

2.4.12. Persistencia

Es la duración total de un episodio de lluvia sin que ocurran interrupciones mayores al umbral de tiempo de independencia definido.

2.4.13. Hietograma

Representación gráfica que muestra cómo se distribuye la intensidad de la lluvia a lo largo del tiempo de duración de la tormenta (Chow et al., 1988b).

2.4.14. Interpolación

Técnica matemática empleada en los SIG para estimar valores de precipitación en áreas donde no existen estaciones de medición (Salcedo, 2024a).

2.4.15. IETD (Inter-Event Time Definition)

Criterio técnico que define el tiempo mínimo de ausencia de lluvia para separar estadísticamente dos eventos diferentes.

2.4.16. Reed Switch

Componente electrónico que actúa como interruptor magnético, transformando el movimiento físico del balancín en una señal digital (Segovia-Cardozo et al., 2023)

2.4.17. Timestamp

Registro electrónico de la fecha y hora exacta en que se recibe cada pulso de lluvia en el servidor de datos.

2.4.18. Microrelieve urbano

Conjunto de irregularidades del terreno y presencia de infraestructura que modifican la captación y flujo local del agua de lluvia (Muñoz et al., 2016b).

2.4.19. Calibración dinámica

Proceso de ajuste del sensor para minimizar los errores de medición provocados por la inercia del balancín durante tormentas muy fuertes (Segovia-Cardozo et al., 2023).

2.4.20. IoT (Internet de las Cosas)

Sistema tecnológico que permite conectar los pluviómetros a la red para la transmisión y visualización de datos en tiempo real (Salcedo, 2024a)

CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la **ciudad de Ayacucho**, ubicada en la provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, en la región centro-sur del Perú. Esta zona se caracteriza por presentar un clima de tipo **templado subhúmedo**, con una marcada estacionalidad en las precipitaciones, concentrándose principalmente durante el **verano austral (diciembre a marzo)**.

La ciudad se encuentra dentro de la **cuenca del río Cachi**, en un entorno geográfico caracterizado por la presencia de relieves montañosos propios de la región andina, lo cual influye en la dinámica atmosférica local y en la generación de eventos de precipitación de tipo convectivo durante la temporada de lluvias.

Desde el punto de vista político-administrativo, el área de estudio se localiza en el territorio descrito en la **Tabla 1**, mientras que su ubicación geográfica aproximada se presenta en la **Tabla 2**, utilizando el sistema de referencia geodésico **WGS84, Zona 18 Sur**, comúnmente empleado en estudios geoespaciales en el Perú.

Tabla 1. Ubicación política del proyecto

Descripción	Lugar
-------------	-------

País	Perú
Departamento	Ayacucho
Provincia	Huamanga

Fuente: Sistema WGS1984 (Zona 18). Elaboración propia.

Tabla 2. Ubicación geográfica

Descripción	Valor
Latitud	13°9'47" S
Longitud	74°13'28" W

Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de analizar la **variabilidad espacio-temporal de los eventos de tormenta**, se implementó una red de monitoreo compuesta por **diez pluviómetros automáticos basados en tecnología IoT**, instalados en distintos puntos de la ciudad de Ayacucho. La ubicación de cada estación de monitoreo fue seleccionada considerando criterios de **representatividad espacial, accesibilidad y seguridad del equipo**, permitiendo así registrar de manera simultánea la ocurrencia de eventos de precipitación en diferentes sectores urbanos.

Las coordenadas geográficas de los puntos de instalación de los pluviómetros se presentan en la **Tabla 3**, donde se detallan las ubicaciones específicas de cada estación de medición.

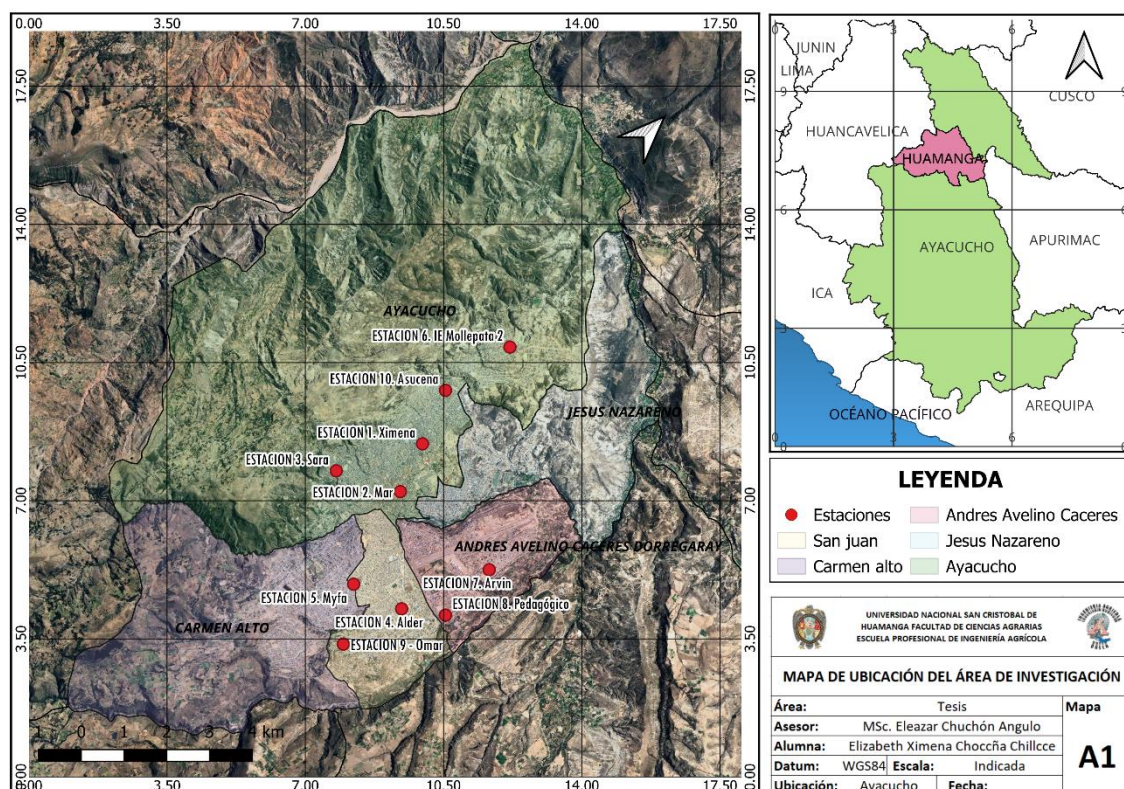
Tabla 3. Ubicación de estaciones de monitoreo

N°	Estación	Zona UTM	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)
1	Estación 1 – Ximena	18L	583753	8546413
2	Estación 2 – Mar	18L	584172	8545230
3	Estación 3 – Sara	18L	582766	8544504
4	Estación 4 – Alder	18L	586127	8543267
5	Estación 5 – Myfa	18L	584925	8542877
6	Estación 6 – IE Molepata 2	18L	583606	8549523

7	Estación 7 – Arvin	18L	586935	8545404
8	Estación 8 – Pedagógico	18L	586959	8543898
9	Estación 9 – Omar	18L	585742	8541689
10	Estación 10 – Asucena	18L	583252	8547706

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Mapa de Estaciones



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Diseño del pluviómetro IoT

3.2.1 Módulo NodeMCU V3 (ESP8266 – ESP-12E)

El sistema de monitoreo desarrollado en la presente investigación utiliza como unidad principal de procesamiento el **módulo NodeMCU V3 basado en el microcontrolador ESP8266**, específicamente el modelo **ESP-12E**, el cual integra capacidades de procesamiento y conectividad inalámbrica Wi-Fi en una sola placa de desarrollo.

El **ESP8266** es un microcontrolador de bajo costo diseñado para aplicaciones de **Internet de las Cosas (IoT)**, ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo remoto debido a su capacidad para conectarse directamente a redes inalámbricas y transmitir datos en tiempo real hacia servidores o plataformas en línea.

El módulo NodeMCU incorpora un **microprocesador Tensilica Xtensa LX106 de 32 bits**, capaz de operar a frecuencias de reloj entre **80 y 160 MHz**, además de contar con **128 kB de memoria RAM interna y 4 MB de memoria Flash**, lo cual permite el almacenamiento del firmware y el procesamiento de datos provenientes de sensores externos.

Una de las principales ventajas del módulo ESP8266 es la integración de un **transceptor Wi-Fi compatible con los estándares IEEE 802.11 b/g/n**, lo que permite establecer comunicación inalámbrica directa con redes locales o con servicios en la nube, facilitando la implementación de sistemas de monitoreo remoto.

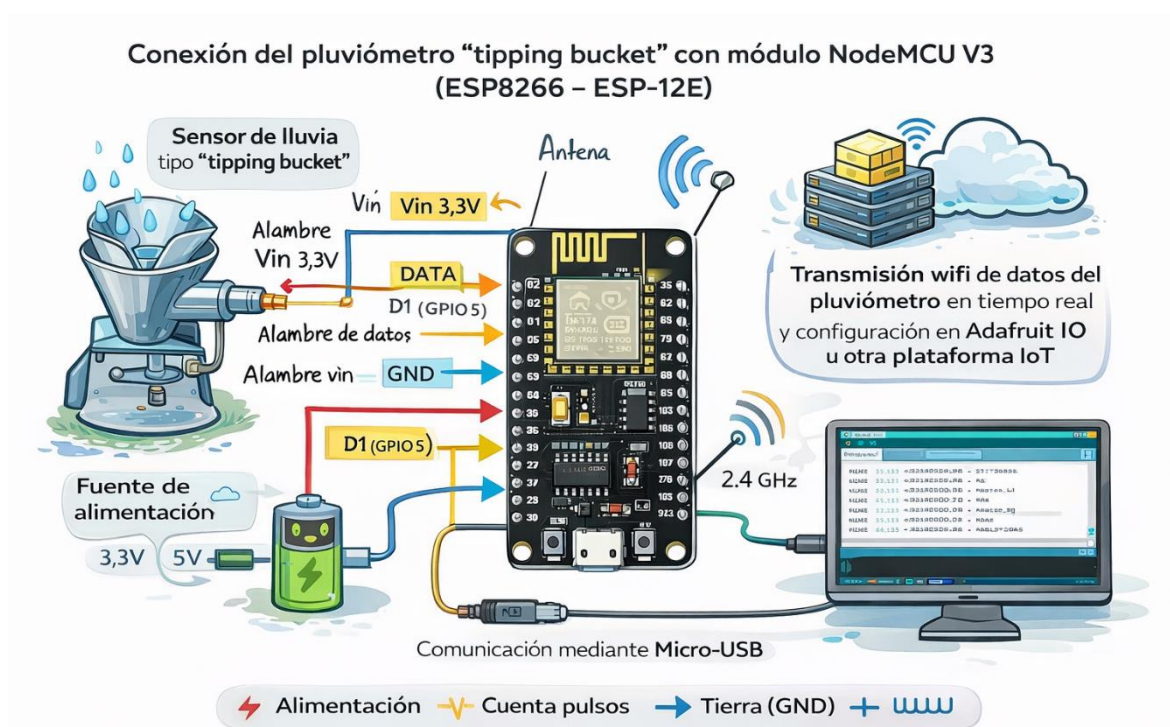
En términos de alimentación, el módulo opera con un rango de voltaje entre **3.0 y 3.6 V**, incorporando un regulador de voltaje interno que permite su alimentación a través del puerto **Micro-USB** o mediante el pin **VIN** con una fuente externa regulada de **5 V**. El consumo típico durante la transmisión de datos es aproximadamente **80 mA**, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo continuo.

Adicionalmente, el NodeMCU dispone de **17 pines de entrada y salida de propósito general (GPIO)**, los cuales pueden configurarse mediante programación para diversas funciones como lectura de sensores, comunicación serial, modulación PWM y protocolos de comunicación como **I2C, SPI y UART**.

La programación del módulo se realiza mediante el **Arduino IDE**, utilizando un convertidor **USB-UART (CH340G)** integrado en la placa, lo cual permite cargar el firmware y establecer comunicación serial con el dispositivo para la transmisión y depuración de datos.

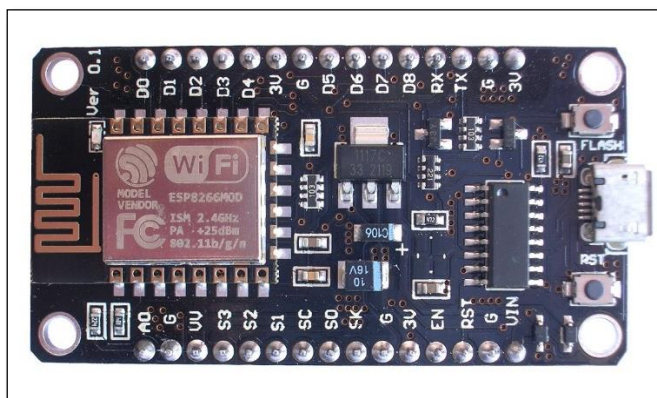
Debido a sus características de **bajo costo, conectividad inalámbrica integrada, facilidad de programación y compatibilidad con plataformas IoT**, el módulo NodeMCU ESP8266 constituye una solución adecuada para la implementación de sistemas de monitoreo de variables ambientales, como el registro de datos pluviométricos.

Figura 4. Módulo NodeMCU V3 basado en el microcontrolador ESP8266



Fuente: Elaboración propia asistida por herramienta de inteligencia artificial generativa, revisada y adaptada por la autora, 2026.

Figura 5. Microcontrolador NodeMCU ESP8266 ESP-12E



Fuente: Punto Flotante S.A.

3.2.2 Sensor de precipitación tipo balancín (Tipping Bucket)

El sensor de precipitación utilizado en el sistema corresponde a un **pluviómetro automático de tipo balancín (tipping bucket)**, empleado comúnmente en estaciones meteorológicas para la medición continua de la lluvia. Este tipo de instrumento permite

registrar la precipitación mediante la detección de pulsos eléctricos generados por el movimiento mecánico de un sistema basculante.

El dispositivo utilizado en la presente investigación corresponde a una **pieza de repuesto para estación meteorológica automática**, diseñada para medir el volumen de precipitación y transmitir señales eléctricas hacia un sistema de adquisición de datos. El sensor presenta un peso aproximado de **0.35 kg**, incluye un sistema de captación de lluvia, un mecanismo basculante interno y un sistema electrónico de detección de pulsos.

El funcionamiento del pluviómetro se basa en la conversión del volumen de agua de lluvia en **eventos de basculación mecánica**, los cuales son interpretados como pulsos eléctricos por el microcontrolador del sistema de monitoreo.

Para comprender su funcionamiento, el sensor puede dividirse en los siguientes componentes principales.

a) Recolector de lluvia

El recolector constituye la parte superior del pluviómetro y tiene la función de **captar el agua de precipitación proveniente de la atmósfera**. Este elemento actúa como un embudo o colector que dirige el agua hacia el sistema interno de medición.

El diseño del recolector permite concentrar el flujo de agua hacia un **punto de descarga o sumidero**, el cual regula la salida del agua acumulada. Este sumidero cumple la función de **homogeneizar la caída de las gotas**, evitando que el agua ingrese de manera directa o irregular al mecanismo basculante. De esta forma, el flujo se distribuye de manera más uniforme hacia las cazoletas del balancín, permitiendo que el sistema registre las basculaciones de manera más estable y representativa del volumen real de precipitación.

Este componente resulta fundamental para asegurar que el volumen de agua captado corresponda adecuadamente al área de captación del instrumento y que el proceso de medición se realice de forma controlada.

b) Mecanismo basculante (balancín)

El componente principal del sistema de medición es el **balancín**, el cual consiste en una estructura basculante formada por dos pequeñas cazoletas montadas sobre un eje central que funciona como punto de pivote.

Cuando el agua proveniente del recolector se acumula en una de las cazoletas, el incremento de peso provoca que el mecanismo pierda el equilibrio y bascule hacia el lado

opuesto. Durante este movimiento, la cazoleta llena se vacía y el sistema queda preparado para comenzar nuevamente el proceso en el lado contrario.

Cada movimiento completo del balancín representa una **cantidad fija de agua acumulada**, determinada durante el proceso de calibración del instrumento. Por esta razón, cada basculación puede ser interpretada como una unidad de precipitación.

c) Sistema de detección magnética (Reed Switch)

El pluviómetro incorpora un **interruptor magnético tipo Reed Switch**, el cual permite convertir el movimiento mecánico del balancín en una señal eléctrica.

Este dispositivo consiste en un pequeño tubo de vidrio sellado que contiene **dos contactos metálicos ferromagnéticos**. Cuando un campo magnético externo se aproxima al interruptor, los contactos se atraen y se cierran, permitiendo el paso de corriente eléctrica.

En el mecanismo del pluviómetro, un **imán permanente** se encuentra acoplado al sistema basculante. Cada vez que el balancín se mueve, el imán pasa cerca del interruptor Reed, provocando el cierre momentáneo del circuito.

De esta manera, el sistema genera un **pulso eléctrico** cada vez que ocurre una basculación.

d) Placa electrónica de detección

El Reed Switch se encuentra montado sobre una **pequeña placa electrónica de protección**, la cual cumple funciones de soporte y aislamiento del sensor frente a condiciones ambientales externas.

Esta placa permite asegurar la estabilidad del interruptor y facilita la transmisión de la señal generada hacia el sistema de adquisición de datos.

e) Sistema de conexión eléctrica

El sensor cuenta con un **cable de salida compuesto por dos conductores**, los cuales permiten transmitir la señal eléctrica generada por el Reed Switch hacia el microcontrolador del sistema de monitoreo.

Este tipo de conexión funciona como un **interruptor simple**, por lo que no presenta polaridad definida. En consecuencia, cualquiera de los dos cables puede ser conectado indistintamente a los terminales de entrada del microcontrolador.

En el sistema desarrollado en esta investigación, uno de los conductores se conecta al **pin de entrada digital (GPIO) del módulo NodeMCU**, mientras que el otro se conecta a **tierra (GND)**.

f) Generación de pulsos de precipitación

Cuando ocurre un evento de lluvia, el agua captada por el recolector se acumula progresivamente en una de las cazoletas del balancín. Una vez alcanzado el volumen correspondiente a la capacidad de la cazoleta, el mecanismo bascula y el imán acoplado al sistema activa el Reed Switch.

Este proceso genera un **pulso eléctrico que es detectado por el microcontrolador**, el cual registra el evento y lo almacena como una unidad de precipitación.

El conteo acumulado de pulsos permite calcular la **precipitación total registrada durante un intervalo de tiempo**, información que posteriormente puede ser transmitida a través del sistema de monitoreo IoT.

Figura 6. Mecanismo de balancín del pluviómetro tipo tipping bucket



Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Fuente de alimentación del sistema (adaptador USB / cargador de celular)

En el sistema de monitoreo de precipitación, la **fuentes de alimentación** es el componente encargado de suministrar energía eléctrica al módulo **NodeMCU ESP8266**, permitiendo el funcionamiento del microcontrolador, el procesamiento de los pulsos del pluviómetro y la transmisión de datos vía WiFi.

Para este proyecto se emplea un **adaptador de corriente tipo cargador de teléfono celular**, el cual convierte la corriente alterna de la red eléctrica doméstica en **corriente continua estabilizada**, generalmente de 5 V DC.

Componentes eléctricos de la alimentación

El cable de salida del cargador presenta dos conductores eléctricos, los cuales cumplen funciones específicas dentro del circuito:

1. Conductor de alimentación (VCC / VIN)

Este conductor transporta el voltaje positivo proveniente de la fuente de alimentación. En el sistema implementado, este cable se conecta al pin VIN del módulo NodeMCU, el cual permite alimentar directamente el regulador interno del microcontrolador.

El pin VIN acepta tensiones cercanas a 5 V, las cuales posteriormente son reguladas internamente a 3.3 V, tensión de operación del chip ESP8266.

2. Conductor de referencia o tierra (GND)

El segundo conductor corresponde a la tierra del circuito (GND). Este cable establece la referencia de potencial eléctrico para todo el sistema y permite cerrar el circuito eléctrico necesario para el flujo de corriente.

El conductor GND se conecta directamente al pin GND del módulo NodeMCU.

Función dentro del sistema de medición

La fuente de alimentación permite:

- energizar el **microcontrolador ESP8266**
- alimentar los **pines de entrada digital (GPIO)** que reciben los pulsos del pluviómetro
- mantener activo el **módulo WiFi integrado**
- permitir la **transmisión de datos en tiempo real hacia la plataforma IoT (Adafruit IO)**

Sin una alimentación estable, el microcontrolador no podría registrar los pulsos generados por el **reed switch del pluviómetro**, ni procesar ni transmitir los datos de precipitación.

Conexión eléctrica en el sistema

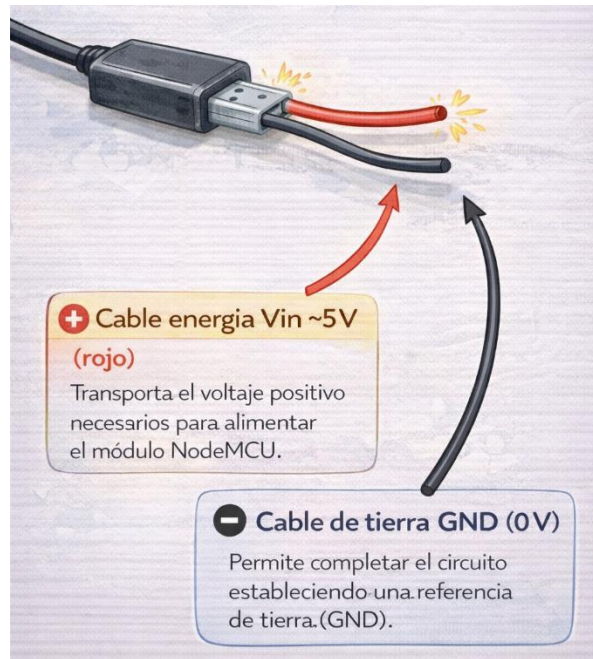
Las conexiones principales son:

Tabla 4. Conexiones principales de **NodeMCU**

Cable	Conexión en NodeMCU	Función
VCC / positivo	VIN	Alimentación del módulo
GND	GND	Referencia eléctrica del circuito

Esta configuración permite suministrar energía de manera continua al sistema de monitoreo meteorológico, asegurando el funcionamiento del pluviómetro y la transmisión de los datos registrados.

Figura 7. Imagen de fuente de alimentación (cargador)



Fuente: Elaboración propia asistida por herramienta de inteligencia artificial generativa, revisada y adaptada por la autora, 2026.



3.2.3 Diseño y conexión del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo fue diseñado para integrar el sensor de precipitación tipo balancín con el módulo **NodeMCU V3 (ESP8266)** y una fuente de alimentación externa de

5 V, permitiendo el registro de pulsos generados por el pluviómetro y su posterior transmisión mediante conectividad Wi-Fi.

La configuración eléctrica del sistema considera dos subsistemas principales:

- i) la conexión del **sensor de precipitación**, y
- ii) la conexión de la **fuentes de alimentación** del microcontrolador.

a) Conexión del sensor de precipitación

El pluviómetro empleado cuenta con un cable de salida de **dos conductores**, correspondiente al sistema de detección de pulsos mediante **reed switch**. Dado que el sensor funciona como un interruptor simple, los conductores no presentan polaridad fija.

En el sistema implementado, uno de los conductores del pluviómetro se conecta al pin de **tierra (GND)** del módulo NodeMCU, mientras que el segundo conductor se conecta al pin de entrada digital **D1 (GPIO5)**, el cual se encarga de registrar cada pulso generado por el basculamiento del mecanismo.

De esta manera, cada basculación del pluviómetro produce una variación de estado lógico en el pin D1, permitiendo al microcontrolador contabilizar los pulsos y transformarlos posteriormente en valores de precipitación.

b) Conexión de la fuente de alimentación

Para energizar el sistema se emplea una fuente de alimentación externa derivada de un **cargador de celular**, que suministra corriente continua de aproximadamente 5 V.

El cable de salida de la fuente presenta **dos conductores**:

- un conductor de **alimentación positiva**, conectado al pin **VIN** del NodeMCU,
- y un conductor de **tierra**, conectado al pin **GND**.

Esta conexión permite suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del módulo ESP8266, incluyendo el procesamiento de datos y la transmisión inalámbrica hacia la plataforma IoT.

c) Configuración general del circuito

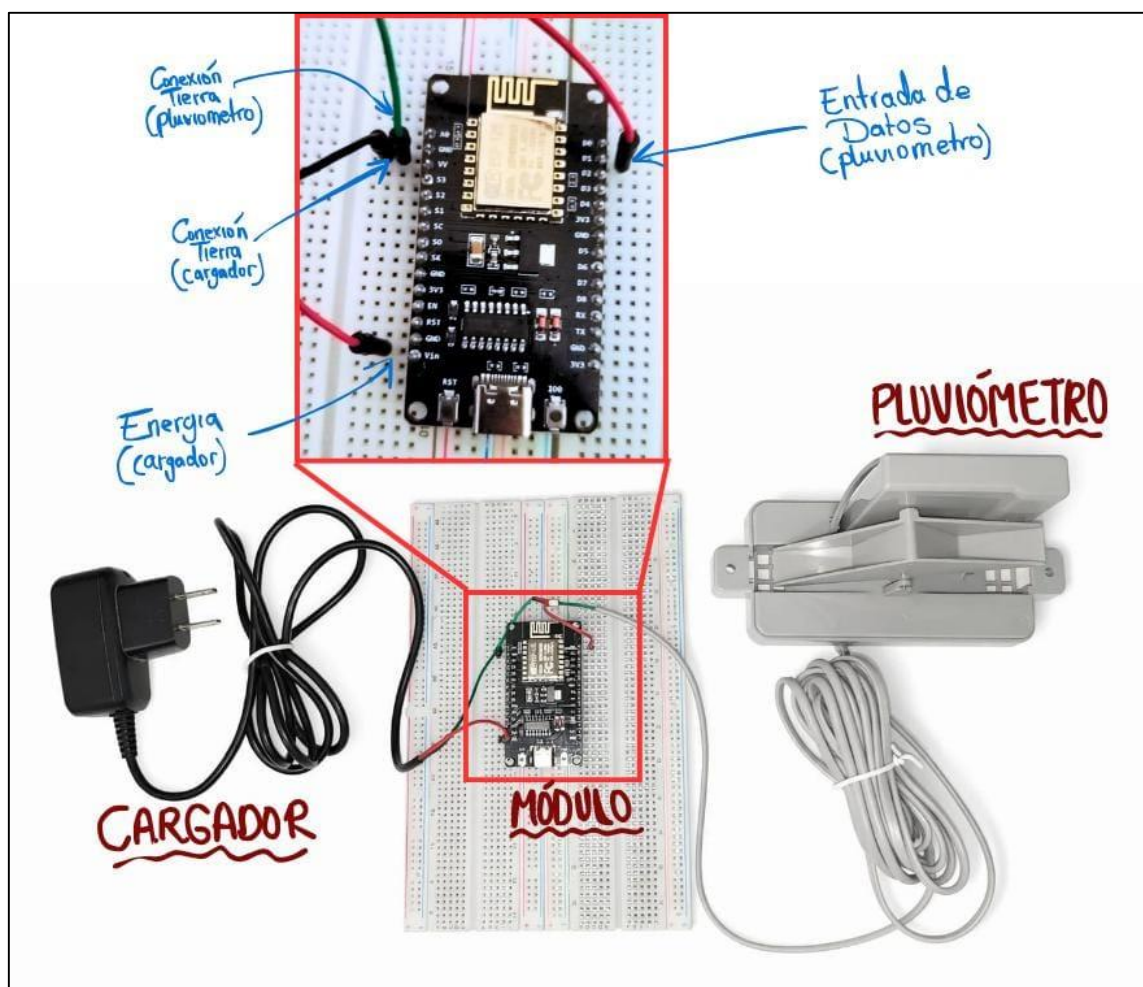
En resumen, la conexión del sistema queda definida de la siguiente manera:

Tabla 5. Resumen de la configuración del circuito

Componente	Conductor	Conexión en NodeMCU	Función
Pluviómetro	Conductor 1	GND	Referencia de tierra
Pluviómetro	Conductor 2	D1 (GPIO5)	Señal de pulsos
Fuente de alimentación	Conductor 1	VIN	Alimentación del módulo
Fuente de alimentación	Conductor 2	GND	Tierra del sistema

Esta configuración constituye el circuito básico de adquisición de datos del sistema de monitoreo pluviométrico, sobre el cual se desarrolla posteriormente la programación del microcontrolador y la transmisión de información en tiempo real.

Figura 8. Diseño de conexión del equipo.



3.2.4 Funcionamiento del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo de precipitación se basa en la detección de eventos de lluvia mediante un sensor tipo balancín (tipping bucket), el cual convierte el volumen de agua recolectado en señales eléctricas discretas.

En una primera etapa, el **pluviómetro capta la precipitación** a través de su superficie colectora. El agua acumulada se dirige hacia un mecanismo interno de balancín, el cual, al alcanzar un volumen determinado, se inclina generando un pulso eléctrico mediante un interruptor tipo reed switch.

Cada basculación del sistema representa un volumen conocido de precipitación, por lo que la **frecuencia de pulsos generados es proporcional a la intensidad de lluvia**.

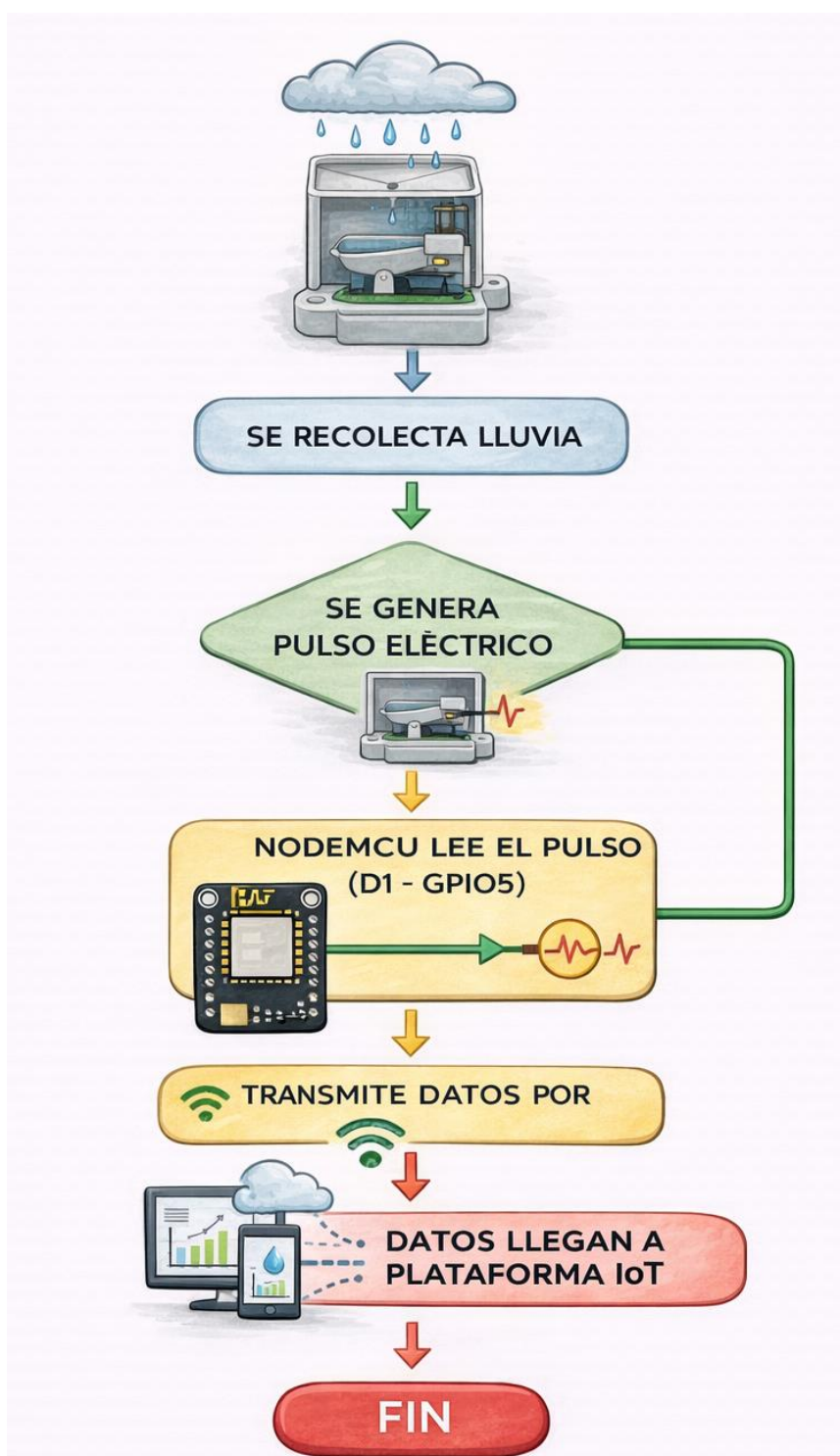
Estos pulsos son transmitidos al módulo **NodeMCU (ESP8266)** a través del pin digital **D1 (GPIO5)**, donde son registrados y contabilizados por el microcontrolador.

El NodeMCU, previamente energizado mediante una fuente de alimentación de 5 V conectada al pin VIN, procesa la información recibida y permite su gestión en tiempo real.

Gracias a su capacidad de conectividad inalámbrica, el módulo establece comunicación mediante **red Wi-Fi**, permitiendo la transmisión de los datos hacia una plataforma IoT para su visualización, almacenamiento y análisis.

De esta manera, el sistema convierte un fenómeno físico continuo, como la precipitación, en datos digitales discretos que pueden ser monitoreados en tiempo real.

Figura 9. Flujograma del funcionamiento del sistema..



Fuente: Elaboración propia asistida por herramienta de inteligencia artificial generativa, revisada y adaptada por la autora, 2026.

3.2.5 Programación y lógica de funcionamiento del sistema

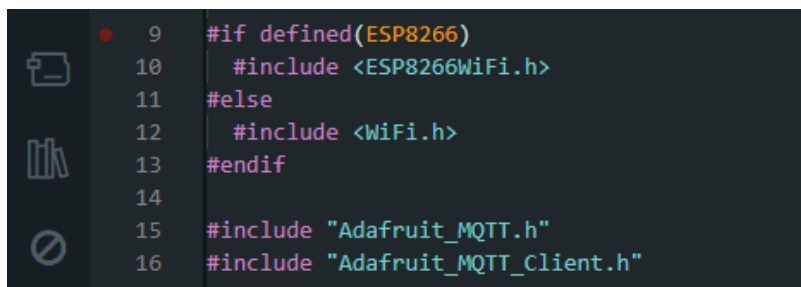
El sistema de monitoreo implementado se basa en la integración de un microcontrolador **NodeMCU (ESP8266)** con un sensor de precipitación tipo balancín, utilizando un programa desarrollado en lenguaje Arduino/C++.

Al inicio del código se incorporan las librerías necesarias para permitir la conectividad del módulo con la red inalámbrica y la plataforma de almacenamiento de datos. En el programa se utilizan librerías de comunicación WiFi y librerías del protocolo MQTT, que hacen posible la transmisión de información hacia Adafruit IO.

En primer lugar, se emplea la librería ESP8266WiFi.h, correspondiente al módulo NodeMCU basado en ESP8266, la cual permite establecer la conexión del dispositivo a una red WiFi. De manera complementaria, se incluyen las librerías Adafruit_MQTT.h y Adafruit_MQTT_Client.h, encargadas de gestionar la comunicación con el servidor de Adafruit IO mediante el protocolo MQTT.

Estas librerías constituyen la base del sistema de transmisión, ya que permiten enlazar la lectura física del pluviómetro con el entorno digital de almacenamiento y visualización de datos.

Figura 10. Librerías utilizadas para la conexión WiFi y comunicación MQTT del sistema IoT.



```
9  #if defined(ESP8266)
10  #include <ESP8266WiFi.h>
11  #else
12  #include <WiFi.h>
13  #endif
14
15  #include "Adafruit_MQTT.h"
16  #include "Adafruit_MQTT_Client.h"
```

Fuente: elaboración propia

El funcionamiento del sistema sigue una secuencia lógica que puede representarse mediante un flujograma, la cual se resume en las siguientes etapas:

Luego de la declaración de librerías, el código presenta un bloque de configuración fija, en el cual se definen los parámetros necesarios para identificar y operar cada estación de monitoreo.

Dentro de este bloque se asigna, en primer lugar, un **identificador de estación** (ESTACION_ID), cuyo propósito es diferenciar cada pluviómetro instalado en campo y facilitar la identificación de los registros en la plataforma.

Seguidamente, se incorporan las credenciales de la red inalámbrica, mediante los parámetros WIFI_SSID y WIFI_PASS, que contienen el nombre y la contraseña del WiFi al cual se conectará el módulo. Esta etapa es fundamental, ya que cada equipo debe configurarse de acuerdo con la red disponible en la vivienda o punto de instalación.

Asimismo, se definen las credenciales de acceso a Adafruit IO, específicamente el nombre de usuario (AIO_USERNAME) y la clave privada (AIO_KEY), necesarias para autenticar el dispositivo en la plataforma. Finalmente, se establece el nombre del canal o **feed** (FEED_KEY) donde se almacenarán los datos registrados por cada estación.

En conjunto, este bloque permite personalizar el funcionamiento del equipo según la estación instalada, la red de conexión disponible y el espacio digital de almacenamiento asignado.

Figura 11. Configuración inicial de estación, red WiFi y credenciales de Adafruit IO.

```
18 // Identificador de estación (útil para logs)
19 #define ESTACION_ID "XIMENA_1"
20
21 // WiFi (edítalo aquí Wifi)
22 #define WIFI_SSID "TP-Link_1DEA"
23 #define WIFI_PASS "56778144"
24
25 // Adafruit IO
26 #define AIO_USERNAME "Xime028"
27 #define AIO_KEY      "aio_TVZD52Zr-fy0qZBdkITxpJKMJa7zw"
28
29 #define AIO_SERVER    "io.adafruit.com"
30 #define AIO_SERVERPORT 1883
31
```

Posteriormente, el código define los objetos de comunicación y las variables necesarias para el funcionamiento del sistema. En esta parte se configura el cliente MQTT y el canal de publicación de datos en Adafruit IO.

También se establece el pin de lectura del pluviómetro, identificado como PIN_PULSOS, el cual corresponde al pin **D1 del NodeMCU**, equivalente al **GPIO5**. Este pin recibe los cambios de estado producidos por el reed switch del pluviómetro cada vez que ocurre una basculación.

Adicionalmente, se declaran variables de control para registrar el tiempo del último pulso, detectar si existe un pulso pendiente de procesamiento y almacenar el tiempo entre pulsos consecutivos. Estas variables permiten que el microcontrolador lleve el control del evento de lluvia y calcule adecuadamente la separación temporal entre basculaciones.

También se incorpora un tiempo de protección contra rebotes (DEBOUNCE_MS), con el fin de evitar lecturas falsas originadas por vibraciones o cierres rápidos del interruptor magnético.

Figura 12. Declaración del cliente MQTT, feed de publicación y variables de control de pulsos.

```
37 WiFiClient client;
38 Adafruit_MQTT_Client mqtt(&client, AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT,
39 | | | | | | | | | | AIO_USERNAME, AIO_KEY);
40
41 Adafruit_MQTT_Publish feedDT =
42   Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/" FEED_KEY);
43
44 // ===== Pluviómetro (reed) =====
45 #if defined(ESP8266)
46   const byte PIN_PULSOS = D1;      // NodeMCU: D1 = GPIO5
47 #else
48   const byte PIN_PULSOS = 22;      // ESP32: ajusta si tu cable va a otro GPIO
49 #endif
50
51 const unsigned long DEBOUNCE_MS = 50;
52 const unsigned long INACTIVIDAD_MS = 30UL * 60UL * 1000UL; // 30 min
53
54 volatile unsigned long ultimoPulsoMS = 0;
55 volatile bool pulsoPendiente = false;
56
57 unsigned long ultimoPulsoVistoMS = 0;
58 unsigned long pulsoPrevioMS = 0;
59 bool hayPrevio = false;
60
61 bool eventoActivo = false;
```

La conexión del módulo a la red inalámbrica se realiza mediante la función `conectarWiFi()`, mostrada en el Código X. Esta rutina permite que el NodeMCU establezca enlace con la red WiFi previamente configurada en los parámetros del programa.

configura al módulo en **modo estación**, lo que significa que el dispositivo se comporta como un cliente que busca conectarse a una red WiFi existente.

se inicia el proceso de conexión utilizando el nombre de la red (WIFI_SSID) y su contraseña (WIFI_PASS), definidos previamente en el bloque de configuración del sistema.

Posteriormente, el programa imprime en el monitor serial información de diagnóstico, incluyendo el identificador de la estación y el nombre de la red a la que se intenta conectar, lo cual facilita la verificación del proceso durante la instalación y pruebas en campo.

mantiene al módulo en espera hasta que la conexión sea exitosa. Mientras no se establezca el enlace, el sistema continúa verificando el estado de la red y mostrando puntos en el monitor serial como indicador de progreso.

Finalmente, una vez lograda la conexión, el código confirma el estado mediante el mensaje "WiFi OK" y muestra la dirección IP asignada al dispositivo dentro de la red local:

Esto permite comprobar que el módulo quedó correctamente conectado y listo para iniciar la comunicación con la plataforma Adafruit IO.

Figura 13. Función de conexión del módulo NodeMCU a la red WiFi.

```
63 // ===== WIFI =====
64 void conectarWiFi() {
65     WiFi.mode(WIFI_STA);
66     WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
67
68     Serial.print("["); Serial.print(ESTACION_ID); Serial.print("] ");
69     Serial.print("Conectando WiFi: ");
70     Serial.println(WIFI_SSID);
71
72     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
73         delay(400);
74         Serial.print(".");
75     }
76     Serial.println("\nWiFi OK");
77     Serial.print("IP: ");
78     Serial.println(WiFi.localIP());
79 }
80
```

Conexión mediante protocolo MQTT

La comunicación entre el módulo NodeMCU y la plataforma Adafruit IO se realiza mediante el protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), el cual es ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) debido a su eficiencia en la transmisión de datos.

La función `MQTT_connect()` tiene como objetivo establecer y mantener la conexión con el servidor de Adafruit IO.

Inicialmente, se verifica si el dispositivo ya se encuentra conectado:

```
if (mqtt.connected()) return;
```

Si la conexión ya está activa, la función finaliza sin realizar ninguna acción adicional.

En caso contrario, el sistema inicia el proceso de conexión:

```
Serial.print("Conectando a Adafruit IO...");
```

Posteriormente, se ejecuta un ciclo repetitivo:

```
while ((ret = mqtt.connect()) != 0)
```

en el cual el módulo intenta conectarse al servidor MQTT. Si la conexión falla, se obtiene el código de error correspondiente y se muestra en el monitor serial mediante:

```
Serial.println(mqtt.connectErrorString(ret));
```

Luego, se realiza una desconexión preventiva y se espera un intervalo de 2 segundos antes de reintentar la conexión:


```
mqtt.disconnect();  
delay(2000);
```

Este proceso continúa hasta que la conexión se establece correctamente.

Finalmente, al lograr la conexión exitosa, se muestra el mensaje:

Figura 14. Rutina de conexión del sistema con el servidor MQTT de Adafruit IO.

```
81 // ===== MQTT =====  
82 void MQTT_connect() {  
83     if (mqtt.connected()) return;  
84  
85     Serial.print("Conectando a Adafruit IO...");  
86     int8_t ret;  
87     while ((ret = mqtt.connect()) != 0) {  
88         Serial.println(mqtt.connectErrorString(ret));  
89         mqtt.disconnect();  
90         delay(2000);  
91     }  
92     Serial.println(" OK");  
93 }  
94
```

Detección de pulsos mediante interrupciones (ISR)

La detección de los pulsos generados por el pluviómetro se realiza mediante una rutina de interrupción, conocida como ISR (*Interrupt Service Routine*), implementada en la función `isrPulso()`.

Una interrupción permite que el microcontrolador responda de forma inmediata ante un evento externo, sin necesidad de esperar el ciclo normal de ejecución del programa (loop). En este caso, el evento corresponde al cambio de estado generado por el sensor tipo reed switch del pluviómetro.

La función de interrupción se define de la siguiente manera:

Figura 15. Rutina de interrupción para la detección de pulsos del pluviómetro.

```
95 // ===== ISR =====  
96 #if defined(ESP8266)  
97     ICACHE_RAM_ATTR  
98 #endif  
99 void isrPulso() {  
100     unsigned long ahora = millis();  
101     if (ahora - ultimoPulsoMS > DEBOUNCE_MS) {  
102         ultimoPulsoMS = ahora;  
103         pulsoPendiente = true;  
104     }  
105 }  
106
```

Cada vez que el balancín del pluviómetro bascula, se produce un pulso eléctrico que activa esta rutina. Dentro de la ISR, se registra el instante de tiempo del pulso mediante la función `millis()`.

Además, se implementa un control de rebote (*debounce*), que evita la detección de múltiples pulsos falsos generados por vibraciones mecánicas o contactos imperfectos. Este control se realiza verificando que haya transcurrido un tiempo mínimo (`DEBOUNCE_MS`) desde el último pulso registrado.

Cuando el pulso es válido, se actualiza la variable `ultimoPulsoMS` y se activa la bandera `pulsoPendiente`, la cual será posteriormente procesada en el ciclo principal del programa.

Configuración de la interrupción

La activación de la ISR se realiza en la función `setup()` mediante la instrucción:

Figura 16. Configuración inicial del pin de lectura y activación de interrupciones.

```
107 void setup() {
108     Serial.begin(115200);
109     delay(600);
110
111     pinMode(PIN_PULSOS, INPUT_PULLUP);
112     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_PULSOS), isrPulso, FALLING);
113
114     conectarWifi();
115     ultimoPulsoVistoMS = millis();
116
117     Serial.print("Feed: "); Serial.println(FEED_KEY);
118     Serial.print("Usuario AIO: "); Serial.println(AIO_USERNAME);
119 }
120
121 void loop() {
122     MQTT_connect();
123     ..mqtt.processPackets(10);
124     ..mqtt.ping();
125 }
```

Esta configuración indica que:

- Se utilizará el pin conectado al pluviómetro (`PIN_PULSOS`)
- Se ejecutará la función `isrPulso`
- La interrupción se activará en el flanco descendente (*FALLING*), es decir, cuando la señal cambia de alto a bajo

Esto corresponde al momento en que el reed switch se cierra, generando el pulso eléctrico.

Procesamiento de pulsos detectados

Una vez que la rutina de interrupción (ISR) detecta un pulso y activa la bandera `pulsoPendiente`, el procesamiento de dicho evento se realiza dentro del ciclo principal del programa (`loop`), tal como se muestra en el Código X.

Figura 17. Procesamiento de pulsos detectados en el ciclo principal del programa.

```
// Procesar pulso
if (pulsoPendiente) {
    noInterrupts();
    pulsoPendiente = false;
    unsigned long tPulsoMS = ultimoPulsoMS;
    interrupts();

    if (!eventoActivo) {
        eventoActivo = true;
        Serial.println("Evento de lluvia INICIADO");
    }
}
```

En primer lugar, se verifica si existe un pulso pendiente mediante la condición `if (pulsoPendiente)`. Esto indica que la ISR ha detectado un nuevo evento generado por el pluviómetro.

Para garantizar la integridad de los datos compartidos entre la ISR y el programa principal, se deshabilitan temporalmente las interrupciones mediante la función `noInterrupts()`. Esto evita que la ISR modifique las variables mientras están siendo leídas.

Dentro de este bloque:

- Se reinicia la bandera `pulsoPendiente` a `false`, indicando que el pulso ya está siendo procesado.
- Se almacena el instante del pulso en la variable local `tPulsoMS`, tomando el valor de `ultimoPulsoMS`, que fue actualizado previamente por la ISR.

Posteriormente, se reactivan las interrupciones con `interrupts()`, permitiendo que el sistema continúe detectando nuevos pulsos en tiempo real.

A continuación, se evalúa si el sistema se encuentra dentro de un evento de lluvia mediante la condición `if (!eventoActivo)`. En caso de que no exista un evento activo, se inicializa uno nuevo asignando `true` a la variable `eventoActivo` y se genera un mensaje en el monitor serial indicando el inicio del evento.

Este mecanismo permite identificar el comienzo de un evento de precipitación a partir del primer pulso detectado, diferenciándolo de periodos sin actividad.

Cálculo del intervalo de tiempo entre pulsos (Δt)

El sistema no solo registra la ocurrencia de pulsos, sino que calcula el intervalo de tiempo entre ellos, representado como Δt , el cual permite analizar la intensidad de la precipitación.

El cálculo se realiza mediante el siguiente bloque de código:

Figura 18. Cálculo del intervalo de tiempo entre pulsos consecutivos.

```
138 // Δt en segundos
139 float dt_s = 1.0f; // primera lectura = 1
140 if (hayPrevio) {
141     dt_s = (tPulsoMS - pulsoPrevioMS) / 1000.0f;
142     if (dt_s < 0) dt_s = 1.0f;
143 } else {
144     hayPrevio = true;
145 }
146
147 pulsoPrevioMS = tPulsoMS;
148 ultimoPulsoVistoMS = tPulsoMS;
149
150 Serial.print("Pulso (millis): ");
151 Serial.print(tPulsoMS);
152 Serial.print(" | Δt(s) publicado: ");
153 Serial.println(dt_s, 3);
154
```

Inicialmente, se define la variable `dt_s`, que representa el tiempo entre pulsos en segundos. Para la primera lectura, se asigna el valor de 1.0, ya que no existe un pulso previo con el cual comparar.

Posteriormente, si ya se ha registrado al menos un pulso anterior (`hayPrevio = true`), se calcula Δt como la diferencia entre el tiempo actual (`tPulsoMS`) y el tiempo del pulso previo (`pulsoPrevioMS`), dividiendo entre 1000 para convertir de milisegundos a segundos.

Adicionalmente, se incluye una validación para evitar valores negativos, los cuales podrían generarse por errores de sincronización o desbordamiento de variables, asignando nuevamente un valor mínimo de 1.0 en dichos casos.

En caso de tratarse del primer pulso detectado, se activa la variable `hayPrevio`, indicando que a partir del siguiente pulso ya será posible realizar el cálculo del intervalo.

Finalmente, se actualizan las variables `pulsoPrevioMS` y `ultimoPulsoVistoMS`, las cuales almacenan el tiempo del último pulso procesado, permitiendo mantener la continuidad del cálculo en eventos posteriores.

Como parte del monitoreo, el sistema imprime en el monitor serial tanto el tiempo del pulso como el valor de Δt calculado, facilitando la verificación del funcionamiento durante pruebas.

Envío de datos y finalización del evento de lluvia

Una vez calculado el intervalo de tiempo entre pulsos (Δt), el sistema procede a enviar esta información a la plataforma Adafruit IO mediante el protocolo MQTT, tal como se muestra en el Código X.

Figura 19. Publicación del intervalo entre pulsos en Adafruit IO mediante protocolo MQTT.

```
155 // Publicar  $\Delta t$ (s)
156 if (!feedDT.publish(dt_s)) {
157     Serial.println("Error publicando  $\Delta t$ ");
158 } else {
159     Serial.println("Publicado OK");
160 }
161 }
```

En este bloque, la función `feedDT.publish(dt_s)` permite transmitir el valor de Δt en segundos hacia el feed configurado en Adafruit IO. Este proceso se realiza en tiempo real cada vez que se detecta un nuevo pulso.

En caso de que la publicación falle, el sistema imprime un mensaje de error en el monitor serial. Por el contrario, si el envío es exitoso, se confirma mediante el mensaje "Publicado OK", lo que permite verificar el correcto funcionamiento de la comunicación.

Finalización automática del evento de lluvia

Adicionalmente, el sistema implementa un mecanismo para identificar el final de un evento de precipitación, basado en la ausencia de pulsos durante un periodo determinado.

Figura 20. Detección de finalización del evento de lluvia por inactividad.

```
162
163 // Fin de evento por inactividad
164 if (eventoActivo) {
165     unsigned long ahora = millis();
166     if (ahora - ultimoPulsoVistoMS > INACTIVIDAD_MS) {
167         eventoActivo = false;
168         hayPrevio = false; // reinicia: primer pulso del nuevo evento publica 1
169         pulsoPrevioMS = 0;
170         Serial.println("Evento TERMINADO (30 min sin pulsos).");
171     }
172 }
173
174 delay(5);
175 }
```

Este bloque evalúa continuamente si el sistema se encuentra dentro de un evento activo (`eventoActivo = true`). Si no se detectan nuevos pulsos durante un intervalo de tiempo definido (`INACTIVIDAD_MS`, equivalente a 30 minutos), el sistema asume que el evento de lluvia ha finalizado.

Al finalizar el evento:

- Se desactiva la variable `eventoActivo`
- Se reinicia la variable `hayPrevio`, permitiendo que el siguiente evento inicie correctamente
- Se reinicia el tiempo del pulso previo (`pulsoPrevioMS`)
- Se genera un mensaje indicando el cierre del evento

Este enfoque permite segmentar automáticamente los eventos de lluvia, diferenciando periodos de precipitación de intervalos secos sin intervención manual.

Finalmente, se incluye una pequeña pausa en la ejecución del programa:

```
delay(5);
```

la cual permite estabilizar el ciclo de ejecución sin afectar la capacidad de respuesta del sistema.

3.2.6 Arduino y lenguaje de programación

El sistema implementado utiliza la plataforma **Arduino**, específicamente mediante el microcontrolador **NodeMCU basado en ESP8266**, el cual permite la integración de sensores físicos con conectividad inalámbrica.

El código ha sido desarrollado en el entorno de programación de Arduino, empleando un lenguaje basado en **C/C++**, adaptado para sistemas embebidos. Este lenguaje permite el control directo del hardware, la gestión de interrupciones (como la detección de pulsos del pluviómetro) y la ejecución continua de procesos en tiempo real mediante funciones principales como `setup()` y `loop()`.

Gracias a este entorno, se logra:

- Capturar señales del pluviómetro (pulsos eléctricos).
- Procesar tiempos entre eventos (Δt).
- Gestionar comunicación con redes WiFi.
- Enviar datos hacia plataformas externas.

a. Adafruit IO como plataforma IoT

Para la gestión y almacenamiento de datos, se emplea **Adafruit IO**, una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) que permite recibir, visualizar y almacenar datos en tiempo real desde dispositivos conectados.

En este sistema, Adafruit IO funciona como el servidor donde se envían los datos generados por el pluviómetro, específicamente el tiempo entre pulsos (Δt), utilizando el protocolo **MQTT**, que es ligero y eficiente para dispositivos con recursos limitados.

El uso de esta plataforma permite:

- Registrar datos automáticamente con marca de tiempo (timestamp).
- Visualizar información en gráficos en tiempo real.
- Almacenar datos históricos para análisis posterior.
- Facilitar el acceso remoto a la información desde cualquier dispositivo.

b. Integración del sistema

La combinación de Arduino (hardware + programación) y Adafruit IO (plataforma IoT) permite construir un sistema de monitoreo de lluvia de bajo costo, capaz de transmitir datos en tiempo real sin necesidad de infraestructura compleja.

El flujo general del sistema es:

1. El pluviómetro genera pulsos por cada volumen de lluvia.
2. El microcontrolador registra el tiempo entre pulsos.
3. Se procesa el dato (Δt).
4. Se envía a Adafruit IO mediante WiFi.
5. La plataforma almacena y visualiza la información.

3.3 Instalación de estaciones

La instalación de las estaciones se realizó considerando criterios técnicos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), priorizando la ubicación en espacios abiertos y libres de interferencias, con el fin de garantizar la calidad de las mediciones. En ese sentido, se seleccionaron áreas sin obstáculos cercanos que pudieran alterar la captación de la precipitación, asegurando una adecuada exposición del pluviómetro al entorno. Según lo indicado en el manual, la distancia mínima respecto a obstáculos debe ser, preferentemente, cuatro veces la altura del mismo, o como mínimo el doble, con el propósito de evitar distorsiones en la medición de la lluvia. (Acuña & Robles, s. f.)

Asimismo, la instalación se realizó sobre superficies niveladas, condición fundamental para el correcto funcionamiento del pluviómetro, el cual cuenta con un nivel

incorporado (comúnmente denominado “ojo de pollo”), permitiendo verificar su correcta horizontalidad durante la instalación.

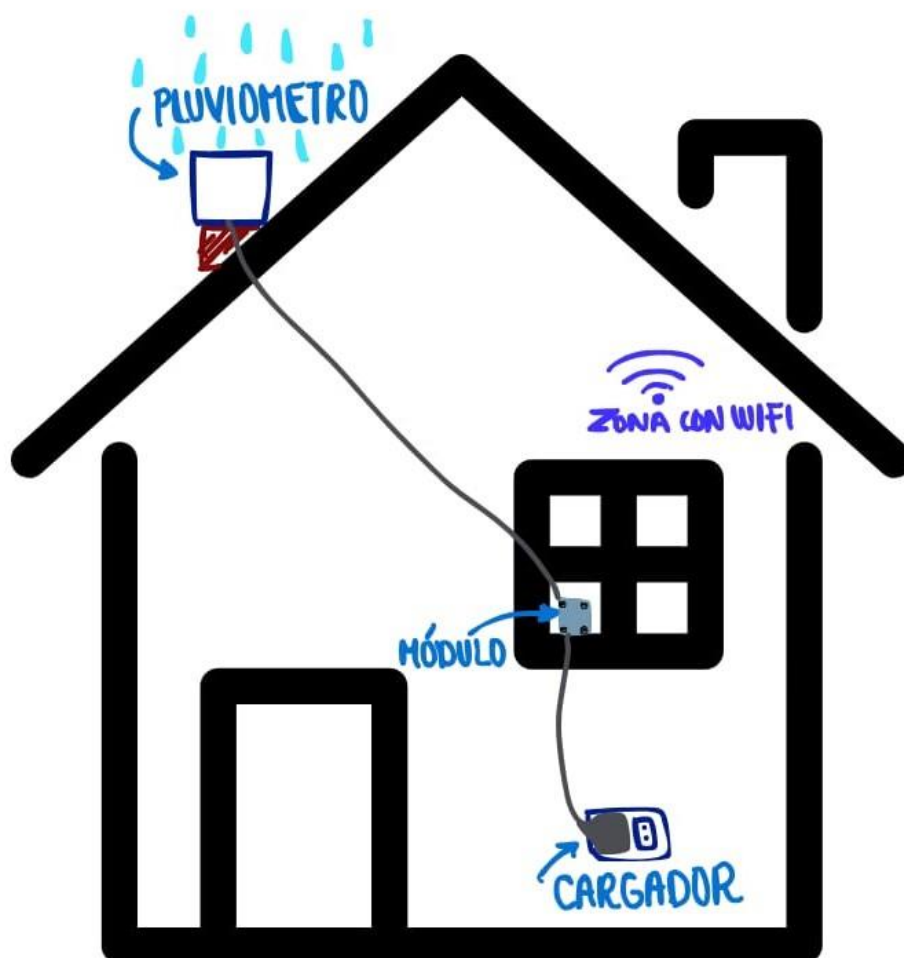
En algunos casos, los dispositivos fueron instalados sobre superficies como concreto o estructuras de calamina, debido a las condiciones del entorno. Sin embargo, estas decisiones fueron respaldadas mediante pruebas experimentales previas, en las cuales se verificó que dichas superficies no generan alteraciones significativas en el registro de datos, particularmente en relación con vibraciones o interferencias mecánicas, garantizando así que las mediciones no se vean afectadas.

En relación con la altura de instalación del pluviómetro respecto al nivel del suelo, se consideraron criterios técnicos y evidencia experimental reportada en la literatura. En estudios realizados en regiones andinas, los pluviómetros de cubeta basculante fueron instalados a alturas estandarizadas cercanas a 1 m sobre el nivel del suelo, siguiendo recomendaciones técnicas, sin evidenciarse variaciones significativas en los errores de medición atribuibles a la posición del sensor en el espacio local. (Muñoz et al., 2016a)

Asimismo, el análisis del comportamiento de las mediciones a lo largo de un gradiente altitudinal mostró que no existe una relación significativa entre la altitud y el error en la estimación de la precipitación, evidenciando que factores como la ubicación relativa o elevación del equipo no influyen de manera determinante en la precisión de los registros. (Muñoz et al., 2016a)

En ese contexto, durante la implementación del sistema de monitoreo, los pluviómetros fueron instalados en distintas condiciones físicas según la disponibilidad del entorno, incluyendo ubicaciones a nivel de suelo (patios) y en niveles superiores de viviendas (hasta tercer piso). Estas decisiones no comprometen la calidad de los datos registrados, ya que la evidencia indica que la variación en la altura de instalación, dentro de rangos razonables, no genera alteraciones significativas en la medición de la precipitación.

Figura 21. Representación de la instalación del Equipo en cada vivienda



Distribución espacial de las estaciones

La distribución de las estaciones de monitoreo no responde a un patrón regular o uniforme, sino a un criterio de **cobertura espacial representativa del área de estudio**. En ese sentido, la ubicación de las estaciones se definió considerando la disponibilidad de condiciones adecuadas de instalación, tales como acceso a energía eléctrica, conectividad WiFi y exposición directa a la precipitación.

Bajo estos criterios, las estaciones fueron ubicadas en diferentes sectores de la ciudad, buscando cubrir la mayor extensión posible del área urbana y periurbana. Este enfoque permitió obtener información distribuida espacialmente, adecuada para el análisis de la variabilidad de la precipitación a escala local.

Si bien la distribución puede considerarse no sistemática, esta responde a una estrategia de implementación en campo basada en condiciones reales, lo cual es común en

redes de monitoreo de bajo costo. La disposición de las estaciones permite la generación de un **mapeo preliminar de eventos de lluvia**, facilitando el análisis comparativo entre distintos puntos de la ciudad.

3.4 Proceso de calibración

3.4.1 Fundamento de la calibración

La calibración de pluviómetros tipo balancín puede realizarse mediante dos enfoques principales: calibración estática y calibración dinámica. De acuerdo con lo señalado por (Segovia-Cardozo et al., 2023) la calibración estática se desarrolla en condiciones controladas, mediante la aplicación de un volumen conocido de agua que permite determinar la relación entre el número de pulsos generados y la lámina de precipitación registrada. Por otro lado, la calibración dinámica evalúa el comportamiento del instrumento bajo condiciones de flujo continuo, simulando eventos reales de precipitación y considerando el efecto de la intensidad de lluvia en la medición.

En el presente estudio, se optó por emplear el método de **calibración estática**, debido a su aplicabilidad en condiciones de laboratorio y su facilidad para establecer la constante de conversión del pluviómetro. Este procedimiento permite obtener una relación directa entre el volumen de agua recolectado y el número de pulsos generados por el mecanismo de balancín.

La calibración dinámica no fue implementada en esta etapa inicial; sin embargo, se considera como un proceso complementario que puede desarrollarse a partir de los datos obtenidos en campo, mediante la comparación entre las mediciones registradas por el sistema implementado y datos de precipitación de referencia, lo cual permitiría evaluar el desempeño del pluviómetro bajo condiciones reales de operación.

3.4.2 Verificación del funcionamiento del mecanismo

Además de la verificación mecánica del balancín, se evaluó el correcto funcionamiento del sistema de detección y registro de pulsos. Para ello, se realizaron pruebas mediante la activación manual del mecanismo de basculación, observando simultáneamente la respuesta del sistema en el monitor serial del entorno Arduino.

Durante estas pruebas, cada movimiento del balancín generó un pulso eléctrico a través del interruptor magnético (reed switch), el cual fue detectado correctamente por el módulo NodeMCU. La correspondencia entre el número de basculaciones manuales y los pulsos registrados fue consistente, evidenciando una adecuada lectura del sistema.

Asimismo, se verificó que la detección del pulso ocurre de manera inmediata tras la basculación, sin presentar retrasos apreciables en el registro ni en la transmisión de datos. Los resultados obtenidos fueron corroborados mediante el monitoreo en tiempo real y la visualización de datos en la plataforma IoT empleada.

Tabla 6. Verificación de pulsos mediante control manual

N° de prueba	Basculaciones manuales (control)	Pulsos registrados en Arduino (monitor serial)	Pulsos registrados en Adafruit IO
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	10	10	10
7	10	10	10
8	10	10	10
9	10	10	10
10	15	15	15
11	15	15	15
12	15	15	15
13	15	15	15
14	5	5	5
15	8	8	8
16	12	12	12
17	7	7	7
18	9	9	9
19	6	6	6

20	11	11	11
21	3	3	3
22	14	14	14
23	2	2	2
24	13	13	13
25	4	4	4
26	16	16	16
27	1	1	1
28	18	18	18
29	20	20	20
30	25	25	25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Análisis de correspondencia de pulsos

Parámetro evaluado	Resultado
Número total de pruebas	30
Coincidencia Arduino vs control manual	100 %
Coincidencia Adafruit vs control manual	100 %
Diferencias detectadas	0
Error de conteo	0 %

Fuente: Elaboración propia

La obtención de los datos se realizó mediante pruebas experimentales controladas, orientadas a verificar la correspondencia entre el número de pulsos generados por el pluviómetro y el tiempo de registro del sistema.

Para ello, se procedió a la activación manual del mecanismo de basculación, generando una cantidad determinada de pulsos en cada ensayo. De manera simultánea, se registró el tiempo transcurrido utilizando un cronómetro, el cual permitió medir el intervalo necesario para alcanzar un número específico de basculaciones.

Paralelamente, el sistema fue programado para contabilizar el número de pulsos generados dentro de intervalos de tiempo definidos, específicamente a escala de un minuto, permitiendo así obtener el número de pulsos registrados por el módulo en función del tiempo.

Los valores obtenidos manualmente (número de basculaciones y tiempo medido) fueron comparados con los datos registrados por el sistema, tanto en el monitor serial del entorno Arduino como en la plataforma Adafruit IO. Esta comparación permitió evaluar la consistencia temporal del sistema, verificando que el conteo de pulsos y su registro en función del tiempo se realizan de manera adecuada.

Las diferencias observadas entre los tiempos registrados fueron mínimas, del orden de centésimas de segundo, las cuales se atribuyen a procesos de latencia en la transmisión de datos y a la precisión del cronómetro utilizado, considerándose despreciables para los fines del estudio.

Tabla 8. Verificación temporal del registro de pulsos

N°	Pulsos registrados	Tiempo medido (s)	Tiempo Arduino (s)	Tiempo Adafruit IO (s)
1	21	20.71	20.71	20.71
2	23	18.93	18.93	18.93
3	22	23.23	23.23	23.23
4	22	18.63	18.63	18.63
5	24	14.40	14.40	14.40
6	20	13.59	13.59	13.59
7	22	14.90	14.90	14.90
8	21	24.70	24.70	24.70
9	24	40.70	40.71	40.69
10	25	42.25	42.25	42.25
11	23	33.70	33.70	33.70
12	22	18.97	18.97	18.97
13	18	28.24	28.24	28.24

14	22	20.00	20.00	20.00
15	19	11.70	11.70	11.70
16	19	12.55	12.55	12.55
17	23	34.90	34.90	34.90
18	22	34.90	34.90	34.90
19	20	19.91	19.91	19.91
20	22	21.83	21.83	21.83
21	23	15.68	15.68	15.68
22	21	26.92	26.92	26.92
23	20	11.88	11.88	11.88
24	22	20.61	20.61	20.61
25	22	17.70	17.70	17.70
26	24	31.69	31.70	31.68
27	20	14.97	14.97	14.97
28	19	10.80	10.80	10.80
29	21	12.88	12.88	12.88
30	24	24.33	24.33	24.33
31	19	17.54	17.54	17.54
32	21	33.20	33.20	33.20
33	20	15.60	15.60	15.60
34	19	14.64	14.64	14.64
35	16	10.00	10.00	10.00
36	17	11.10	11.10	11.10
37	19	36.89	36.90	36.88
38	19	33.11	33.11	33.11

39	21	27.58	27.58	27.58
40	17	10.78	10.78	10.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Resumen de la comparación

Parámetro evaluado	Resultado
Número total de ensayos	40
Ensayos con coincidencia exacta	37
Ensayos con variación de centésimas	3
Diferencia máxima observada	0.01 s
Consistencia general del registro	Alta

Figura 22. Código de programación en Arduino.

```

// Arduino IDE 2.3.7
// NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module)

#include "Adafruit_MQTT_client.h"

// ===== Adafruit IO =====
#define AIO_SERVER "io.adafruit.com"
#define AIO_SERVERPORT 1883

WiFiClient client;
Adafruit_MQTT_client mqtt(&client, AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT,
                          AIO_USERNAME, AIO_KEY);

// [X] Un Solo feed (créalo en Adafruit IO)
Adafruit_MQTT_Publish feedIntensidad =
  Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/intensidad_mmh");

// ===== Pluviómetro (reed) =====
// #if defined(ESP8266)
// #define PIN_DRAIN D1 // NodeMCU: D1 = GPIO5
// #endif

// Monitor Serie X
// Sin ajuste de línea
// 115200 baudios

14.656 -> Leer :11 millis=67286 | Pulso = 1.seg4 | Pulso = segundo = 20.710
22.586 -> Leer :12 millis=84179 | Pulso = 2.seg4 | Pulso = segundo = 18.930
22.456 -> Leer :13 millis=109492 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 29.230
46.066 -> Leer :14 millis=128048 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 18.630
24.258 -> Leer :15 millis=128048 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 14.400
23.767 -> Leer :16 millis=124676 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 15.590
24.456 -> Leer :17 millis=257025 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 24.700
59.286 -> Leer :15 millis=239819 | Pulso = 22.seg4 | Pulso = segundo = 42.260
09.811 -> Leer :140 millis=292522 | Pulso = 17.seg3 | Pulso = 17 segundo = 10.780
09.811 -> Publicado OK
  
```

3.4.3 Determinación de la constante de conversión

a. Procedimiento de calibración (volumen–pulso)

Para determinar la relación entre el volumen de agua y el número de pulsos generados por el pluviómetro tipo *tipping bucket*, se realizó un ensayo experimental controlado.

Se utilizó una jarra medidora graduada para suministrar un volumen constante de **50 ml** de agua en cada prueba. El procedimiento consistió en verter el volumen de manera

uniforme sobre el sistema de captación del pluviómetro, registrando simultáneamente el número de pulsos generados.

Se realizaron **40 pruebas en total**, organizadas en 4 bloques de 10 repeticiones cada uno, con el objetivo de evaluar la repetibilidad del sistema y reducir la incertidumbre experimental.

Tabla 10. Resultados de Prueba Volumen - pulso

Bloque	Prueba	Volumen (ml)	Pulsos
1	1	50	21
1	2	50	23
1	3	50	22
1	4	50	22
1	5	50	24
1	6	50	20
1	7	50	22
1	8	50	21
1	9	50	24
1	10	50	25
2	1	50	23
2	2	50	22
2	3	50	18
2	4	50	22
2	5	50	19
2	6	50	19
2	7	50	23
2	8	50	22
2	9	50	20

2	10	50	22
3	1	50	23
3	2	50	21
3	3	50	20
3	4	50	22
3	5	50	22
3	6	50	24
3	7	50	20
3	8	50	19
3	9	50	21
3	10	50	24
4	1	50	19
4	2	50	21
4	3	50	20
4	4	50	19
4	5	50	16
4	6	50	17
4	7	50	19
4	8	50	19
4	9	50	21
4	10	50	17

b. Conversión volumen a milímetros de lluvia

Según la FAO, la lluvia se expresa como la **altura o lámina de agua** acumulada sobre una superficie horizontal. Si un recipiente de **1 m²** recoge agua con una profundidad

de **10 mm**, el volumen almacenado equivale a **0.01 m³**, es decir **10 litros**. De la misma manera, **1 mm de lluvia equivale a 1 litro por metro cuadrado**

De forma general, la relación entre volumen captado y altura de lluvia se calcula mediante:

$$V = A \cdot h$$

donde:

- $V = \text{volumen de agua recolectado}$
- $A = \text{área de captación}$
- $h = \text{altura de lluvia}$

Despejando la altura de lluvia:

$$h = \frac{V}{A}$$

Si se quiere expresar la altura en **milímetros**, y el volumen se encuentra en litros o mililitros, la conversión debe hacerse respetando las unidades. La base conceptual sigue siendo la misma: la lluvia es una **profundidad de agua sobre un área**.

Promedio por bloque.

Los valores promedio obtenidos para cada bloque de ensayo fueron:

- Bloque 1: 22.4 pulsos
- Bloque 2: 21.0 pulsos
- Bloque 3: 21.6 pulsos
- Bloque 4: 18.8 pulsos

El promedio general de los cuatro bloques fue de **20.95 pulsos** para un volumen de 50 mL.

Cálculo del factor de conversión volumen–pulso

Para determinar el volumen correspondiente a cada pulso, se emplea la siguiente relación:

$$V_{pulso} = \frac{50}{20.95}$$

$$V_{pulso} = 2.39 \text{ mL/pulso}$$

Conversión a milímetros de lluvia

Considerando que la precipitación se expresa como una lámina de agua sobre un área, se utiliza la relación:

$$h = V / A$$

Para el caso de un pulso:

$$h_{pulso} = V_{pulso} / A$$

En términos prácticos, si el volumen está en mL y el área en cm²:

$$\text{mm/pulso} = (V_{pulso} / A) \times 10$$

A partir de los 40 ensayos realizados con un volumen constante de 50 mL, se obtuvo un promedio general de **20.95 pulsos**. Con ello, el volumen equivalente a cada pulso se determinó mediante:

$$\frac{20.95 \text{ pulsos}}{50 \text{ mL}} = 2.39 \text{ mL/pulso}$$

Este valor representa el volumen de agua necesario para generar un pulso del sistema.

Considerando que la precipitación se expresa como una lámina de agua acumulada sobre una superficie horizontal, la conversión de volumen a milímetros de lluvia se basa en la relación entre volumen recolectado y área de captación del pluviómetro. De acuerdo con la FAO, la cantidad de lluvia corresponde a la profundidad de agua acumulada sobre una superficie, siendo equivalente que **1 mm de lluvia aporta 1 litro de agua por cada metro cuadrado**.

c. Especificación técnica del sensor

El pluviómetro utilizado en el presente estudio corresponde a un sensor tipo *tipping bucket* de la marca MISOL (modelo WH-SP-RG), el cual presenta una salida digital en forma de pulsos. De acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante, cada pulso generado por el sensor equivale a una lámina de precipitación de **0.3 mm**.

Este valor representa la calibración nominal del dispositivo bajo condiciones ideales de operación, siendo ampliamente reportado en distintas plataformas comerciales y documentación técnica asociada al sensor.

No obstante, debido a posibles variaciones asociadas a condiciones reales de instalación, tolerancias mecánicas del sistema y características del flujo de agua, se realizó una calibración experimental del sensor con la finalidad de determinar un factor de conversión propio.

La calibración del pluviómetro se realizó mediante un enfoque estático (volumétrico), utilizando un volumen conocido de agua y registrando el número de pulsos generados por el sensor.

3.4.4 Repetibilidad de las mediciones

La repetibilidad del sistema fue evaluada a partir de la ejecución de múltiples ensayos bajo condiciones controladas, así como mediante la comparación de los registros obtenidos a través de diferentes medios de adquisición de datos (lectura manual, sistema Arduino y plataforma Adafruit).

Los resultados evidenciaron una **alta consistencia en el conteo de pulsos**, observándose correspondencia exacta entre las distintas fuentes de registro. Esto indica que el sistema presenta una adecuada estabilidad en la detección y transmisión de señales, sin pérdidas ni duplicidad de pulsos durante la medición.

No obstante, se identificaron **variaciones en la relación volumen–pulso respecto al valor nominal del fabricante**, las cuales están asociadas principalmente a la dinámica de ingreso del agua al sistema. El pluviómetro empleado funciona mediante un mecanismo de balancín (*tipping bucket*), cuya respuesta depende de la tasa de flujo que ingresa al colector.

Durante las pruebas experimentales, al aplicar volúmenes de agua de forma directa e intensa, se observó que el colector tiende a acumular temporalmente el agua, regulando su ingreso hacia el balancín a través del sistema de drenaje interno. Este comportamiento introduce un retardo en la generación de pulsos, lo cual difiere de las condiciones reales de precipitación, donde el ingreso de agua ocurre de manera más gradual.

En contraste, bajo condiciones de lluvia natural —incluso en eventos de alta intensidad— no se evidenció saturación del colector, permitiendo un flujo continuo y representativo hacia el mecanismo de medición. Esto sugiere que las condiciones experimentales con alta tasa de vertido pueden sobredimensionar la acumulación interna del sistema y afectar la relación volumen–pulso.

En consecuencia, para la determinación del factor de calibración, se consideró como referencia el comportamiento asociado a **mayores tiempos de respuesta entre pulsos**, dado

que este escenario reproduce de manera más cercana las condiciones reales de operación del pluviómetro. De este modo, se garantiza que el factor adoptado represente de forma más fiel la dinámica natural de la precipitación y la respuesta hidráulica del dispositivo.

Se filtraron las pruebas donde el tiempo fue mayor a ~25 segundos, obteniendo 12 valores de pulsos:

24, 25, 23, 18, 23, 22, 21, 24, 21, 19, 19, 21

Promedio de pulsos (condición más realista)

Promedio = **21.67 pulsos**

Se seleccionaron las pruebas con mayores tiempos de respuesta, al representar condiciones de flujo más cercanas a la precipitación natural. A partir de estos datos, se obtuvo un promedio de **21.67 pulsos**, correspondiente a un volumen de **2.31 mL por pulso**, valor adoptado como factor de calibración representativo del sistema.

3.4.5 Observaciones operativas durante la calibración

Durante el proceso de calibración del pluviómetro se identificaron diversas condiciones operativas relacionadas con la adquisición y registro de datos, las cuales se describen a continuación:

Registro en tiempo real y retrasos

El sistema presenta una respuesta inmediata en la detección de pulsos a nivel del microcontrolador, registrándose cada evento en el instante en que ocurre.

No obstante, en la plataforma Adafruit se observaron **retrasos en la visualización de los datos**, atribuibles a la conexión a internet. Es importante señalar que estos retrasos no afectan el registro temporal de los pulsos, ya que la marca de tiempo corresponde al momento real de medición, siendo únicamente la visualización la que se presenta con algunos segundos de desfase.

Ruido eléctrico y rebotes

Durante las pruebas se identificó la presencia potencial de ruido eléctrico y señales espurias asociadas a la alimentación del sistema. Para mitigar este efecto, se implementó un esquema de conexión directa y programación adecuada del microcontrolador, reduciendo la ocurrencia de rebotes y falsas lecturas.

Asimismo, se observó que el uso compartido del tomacorriente con otros equipos generaba interferencias en la señal, ocasionando registros no deseados. Este problema fue resuelto mediante el uso de una fuente de alimentación independiente, eliminando dichas perturbaciones.

Pulsos espurios en condiciones de campo

En condiciones de campo se identificaron registros ocasionales de pulsos aislados o con intervalos menores al tiempo de vuelco esperado del balancín. Estos eventos no corresponden necesariamente a fallas del sistema, sino a perturbaciones propias del entorno de medición.

Dichos valores fueron considerados como **ruido en la señal** y tratados mediante procesos de limpieza y organización de datos, permitiendo su adecuado manejo durante el análisis sin afectar significativamente los resultados.

Pérdida o exceso de pulsos

No se evidenció pérdida de pulsos durante las pruebas. Por el contrario, en ciertas condiciones se registró un **ligero exceso de pulsos**, asociado principalmente a interferencias externas y condiciones operativas del sistema, las cuales fueron controladas mediante ajustes en la instalación y procesamiento de datos.

Nivelación del equipo

De acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el pluviómetro debe instalarse en una superficie perfectamente nivelada para garantizar mediciones precisas. En el presente estudio no se evaluó el efecto del desnivel, optándose por seguir las recomendaciones técnicas durante la instalación.

Sensibilidad del sistema

En condiciones estáticas, el sistema mostró una respuesta adecuada del mecanismo de balancín, sin errores en la generación de pulsos, una vez controladas las condiciones de alimentación eléctrica.

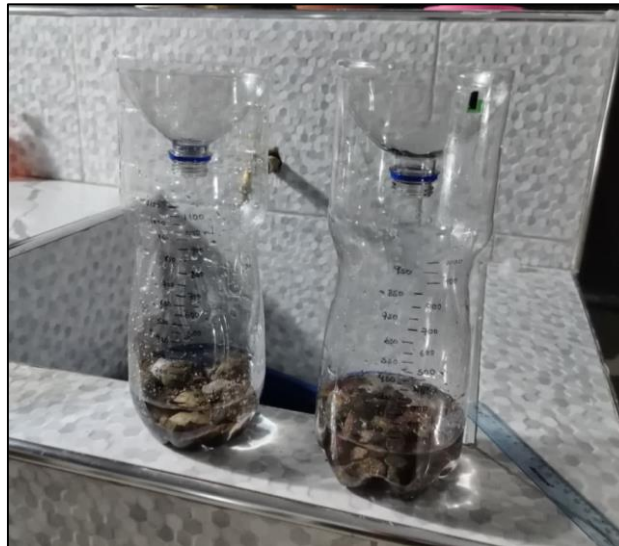
En condiciones de campo, si bien se observaron variaciones en la frecuencia de registro de pulsos, estas no representan fallas críticas del sistema, sino características propias del entorno de medición, constituyendo un aspecto a considerar en estudios posteriores.

3.4.6 Validación posterior en campo

Con la finalidad de evaluar el desempeño del pluviómetro IoT en condiciones reales de operación, se realizó una validación en campo mediante la comparación de los registros obtenidos con un pluviómetro de referencia de tipo casero.

El pluviómetro casero fue construido utilizando botellas plásticas transparentes, acondicionadas con material inerte en la base para garantizar su estabilidad frente a condiciones ambientales. Se implementó una escala graduada en mililitros sobre la superficie del recipiente, permitiendo la medición directa del volumen de agua acumulado. El nivel inicial de medición se estableció en 0 mL, de modo que cada lectura diaria represente únicamente la precipitación registrada en el intervalo de 24 horas.

Figura 23. Diseño de pluviómetro casero.



Se instalaron **dos pluviómetros caseros** y **dos pluviómetros IoT** en un mismo punto, con el objetivo de comparar simultáneamente los registros bajo las mismas condiciones de precipitación.

El periodo de evaluación comprendió del **08 de enero al 18 de enero**, realizándose lecturas diarias aproximadamente a las 10:00 horas. Durante este periodo se identificaron **eventos de precipitación en días específicos**, mientras que en otros días no se registraron acumulaciones significativas.

Es importante señalar que durante el monitoreo se presentaron algunas incidencias operativas en los pluviómetros IoT, tales como fallas de registro por problemas de conexión

eléctrica y daño de componentes por ingreso de agua, las cuales fueron debidamente identificadas y consideradas en el análisis posterior.

Tabla 11. Resultados de prueba con pluviómetro casero e IoT.

Fecha	Pluviómetro Casero 1 (mL)	Pluviómetro Casero 2 (mL)	IoT 1 (pulsos)	IoT 2 (pulsos)
08-Ene	50	49	30	28
09-Ene	48	48	32	0
10-Ene	40	40	23	20
11-Ene	35	34	21	0
16-Ene	47	46	20	25
17-Ene	42	42	25	23
18-Ene	36	35	21	26

A partir de los resultados obtenidos, se procedió a realizar la conversión de los datos registrados por ambos sistemas a una unidad común de análisis, expresada en milímetros de precipitación (mm).

Para el caso de los pluviómetros caseros, la conversión se realizó a partir del volumen acumulado medido (mL), considerando el área de captación del dispositivo. En el caso de los pluviómetros IoT, los valores fueron obtenidos a partir del número de pulsos registrados, empleando dos factores de conversión derivados de la calibración volumétrica: **2.39 mL/pulso** y **2.31 mL/pulso**, los cuales fueron posteriormente transformados a milímetros de lluvia.

La comparación de los resultados permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de campo, observándose diferencias entre los valores registrados por los pluviómetros caseros y los dispositivos IoT.

En general, los valores obtenidos por los pluviómetros IoT presentan una **tendencia a sobreestimar la precipitación** respecto a los valores medidos por los pluviómetros caseros. Esta diferencia se mantiene tanto para el factor de conversión base (2.39 mL/pulso) como para el valor ajustado (2.31 mL/pulso), aunque este último muestra una ligera reducción en la magnitud de la sobreestimación.

Estas variaciones pueden atribuirse a diversos factores asociados al funcionamiento del sistema en condiciones reales, tales como la presencia de pulsos espurios, interferencias en la señal, dinámica de respuesta del balancín y condiciones ambientales que influyen en el ingreso del agua al mecanismo de medición.

Asimismo, se evidencia que el ajuste del factor de conversión permite aproximar los valores del pluviómetro IoT hacia los registros del pluviómetro de referencia, lo cual indica que el proceso de calibración y refinamiento del modelo es adecuado para mejorar la representatividad de los datos obtenidos.

Tabla 12. Resultado en mm de los Resultados de prueba con pluviómetro casero e IoT

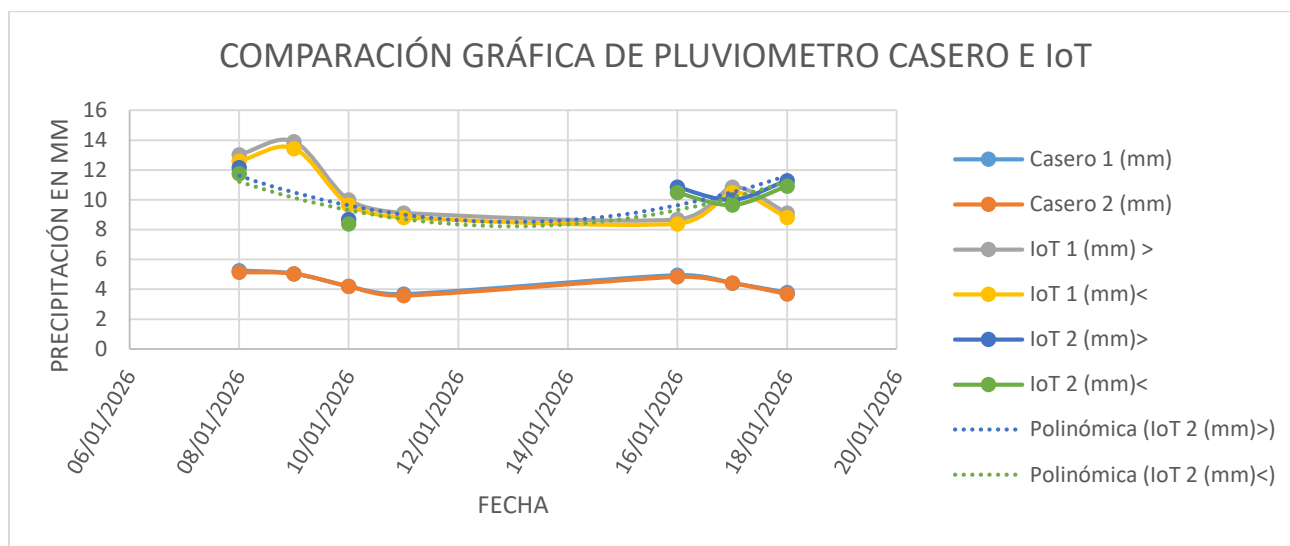
Fecha	Casero 1 (mm)	Casero 2 (mm)	IoT 1 (mm)	IoT 1 (mm)	IoT 2 (mm)	IoT 2 (mm)
			2.39 ml	2.31 ml	2.39 ml	2.31 ml
08-Ene	5.2615	5.1563	13.0364	12.6000	12.1673	11.7600
09-Ene	5.0510	5.0510	13.9055	13.4400		
10-Ene	4.2092	4.2092	9.9945	9.6600	8.6909	8.4000
11-Ene	3.6830	3.5778	9.1255	8.8200		
16-Ene	4.9458	4.8406	8.6909	8.4000	10.8636	10.5000
17-Ene	4.4197	4.4197	10.8636	10.5000	9.9945	9.6600
18-Ene	3.7883	3.6830	9.1255	8.8200	11.2982	10.9200

Con el propósito de evaluar el comportamiento del pluviómetro IoT en condiciones reales, se realizó una comparación gráfica entre los valores de precipitación obtenidos mediante los pluviómetros caseros y los registrados por los sensores IoT, expresados en milímetros de lluvia.

Los datos utilizados corresponden a los eventos de precipitación registrados durante el periodo del 08 al 18 de enero, considerando únicamente los días en los que se presentó acumulación significativa. Para el caso del sistema IoT, se emplearon dos factores de conversión derivados de la calibración volumétrica (2.39 mL/pulso y 2.31 mL/pulso), con el fin de analizar la influencia del ajuste en los resultados obtenidos.

La representación gráfica permite visualizar la relación entre ambos sistemas de medición, facilitando la identificación de tendencias, diferencias y posibles desviaciones en el comportamiento del sensor bajo condiciones de campo.

Figura 24. Comparación gráfica de pluviómetro casero IoT



3.5 Sistema de almacenamiento y gestión de datos

3.5.1 Plataforma de almacenamiento

Para el almacenamiento y gestión de los datos de precipitación, se utilizó la plataforma en la nube **Adafruit IO**, un sistema orientado al Internet de las Cosas (IoT) que permite la recepción, visualización y almacenamiento de datos en tiempo real mediante protocolos de comunicación como MQTT.

Esta plataforma funciona como un entorno digital donde los dispositivos conectados envían información de manera continua, la cual es almacenada y organizada automáticamente en canales denominados *feeds*. En el presente estudio, cada pluviómetro IoT fue configurado para transmitir sus datos a un feed específico, implementándose un total de **10 feeds**, correspondientes a los diferentes dispositivos instalados en campo.

Una de las principales ventajas de Adafruit IO es su accesibilidad, ya que permite la visualización de los datos en tiempo real desde cualquier dispositivo con conexión a internet, como computadoras, laptops, tablets o teléfonos móviles. Esto facilita el monitoreo remoto de las estaciones, permitiendo consultar la información en cualquier momento y desde cualquier ubicación, sin necesidad de acceso físico al equipo.

Cada registro almacenado incluye el valor transmitido y su respectiva marca temporal (*timestamp*), lo que permite el seguimiento cronológico de los eventos de precipitación y su posterior análisis.

Figura 25. Pantalla de Adafruit con las 10 estaciones.

ed Name	Key	Last value	Recorded	
] Estación 1 – Ximena	ximena	1.00	1 minute ago	
] Estación 2 – Mar	mar	0.92	1 day ago	
] Estación 3 – Sara	sara	0.75	2 days ago	
] Estación 4 – Alder	alder	0.37	2 days ago	
] Estación 5 – Myfa	myfa	843.67	2 days ago	
] Estación 6 – IE Molepata 2	iemolepata-2	0.61	1 minute ago	
] Estación 7 – Arvin	arvin	0.50	1 day ago	
] Estación 8 – Pedagógico	pedagogico	0.50	1 day ago	
] Estación 9 – Omar	omar	0.25	2 days ago	
] Estación 10 – Asucena	asucena	1.00	1 day ago	

3.5.2 Formato de almacenamiento

La plataforma Adafruit IO permite la exportación de los datos en distintos formatos. Para efectos del análisis, los datos fueron descargados en formato **CSV (Comma Separated Values)**, debido a su compatibilidad con herramientas de procesamiento como Excel y RStudio.

Este formato facilita la organización, limpieza y tratamiento de la información, permitiendo su posterior análisis estadístico y gráfico.

3.5.3 Frecuencia de descarga y gestión de datos

La descarga de datos se realizó de manera **semanal**, con el objetivo de mantener un control continuo de la información registrada y evitar la pérdida de datos en la plataforma.

Una vez descargados, los datos fueron sometidos a un proceso de depuración, el cual incluyó:

- eliminación de registros erróneos o incompletos
- identificación y filtrado de pulsos espurios
- organización por eventos de precipitación

Este proceso permitió obtener una base de datos confiable para el análisis posterior.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Limpieza y depuración de datos

4.1.1 Eliminación de ruidos

En la etapa inicial del procesamiento de datos se realizó la depuración de registros erróneos y la eliminación de ruido, con el objetivo de garantizar la calidad de la información antes de cualquier análisis posterior.

Dado que el sistema de medición empleado se basa en pluviómetros de cubeta basculante, los cuales registran la precipitación mediante pulsos asociados a incrementos discretos de lluvia, se establecieron criterios de filtrado considerando tanto el comportamiento físico del sensor como recomendaciones reportadas en la literatura especializada, donde se destaca la necesidad de aplicar controles de calidad para asegurar la confiabilidad de los datos (Segovia-Cardozo et al., 2023)

En este contexto, se aplicaron los siguientes criterios de depuración:

- **Eliminación de valores con intervalos de tiempo negativos ($\Delta t < 0$):**

Los valores negativos en los intervalos de tiempo entre pulsos corresponden a inconsistencias en el registro o errores de sincronización. No obstante, se exceptúan aquellos casos en los que dichos valores se generan inmediatamente después de un registro inicial configurado con un valor fijo ($t = 1$), utilizado por el sistema como marcador de inicio de evento. En estos casos, el valor negativo no representa un error físico, sino una consecuencia del procedimiento de registro, por lo que no fue eliminado. Por el contrario, los valores negativos intermedios dentro de la serie fueron considerados ruido y eliminados.

- **Eliminación de valores con datos faltantes (NA):**

Se identificaron registros con valores faltantes en la serie de datos, correspondientes a fallas puntuales en la transmisión o almacenamiento de la información. Dado que estos registros no permiten calcular adecuadamente los intervalos de tiempo ni representan mediciones válidas, fueron eliminados del análisis.

- **Eliminación de intervalos de tiempo excesivamente largos ($\Delta t > 900$ s):**

Los intervalos mayores a 900 segundos (15 minutos) fueron considerados no representativos de una precipitación continua, pudiendo corresponder a registros aislados o interrupciones

en la adquisición de datos. Estos valores fueron eliminados con el fin de evitar la inclusión de datos espurios en el análisis.

Estos criterios permitieron discriminar entre señales reales de precipitación y registros inconsistentes, garantizando que la base de datos depurada represente adecuadamente el comportamiento del sistema de medición.

4.1.2 Organización y estructuración de la base de datos

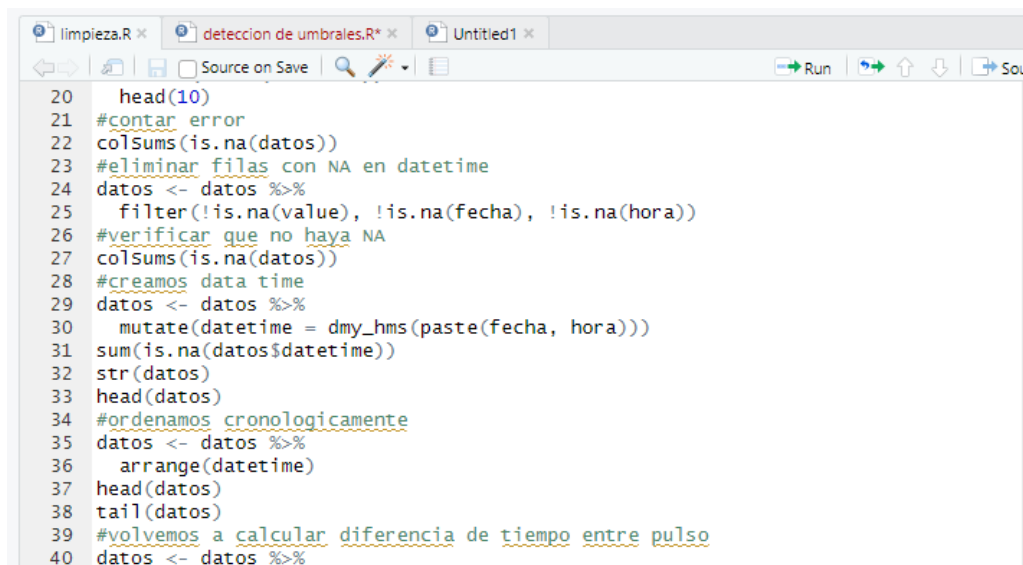
El procesamiento de los datos se realizó en el entorno de programación **RStudio**, a partir de los registros descargados desde la plataforma Adafruit IO. El archivo original presenta una estructura compuesta por tres variables principales: **fecha**, **hora** y **value**, donde:

- **Fecha y hora** representan el instante exacto en el que se detecta cada pulso registrado por el pluviómetro.
- **Value** corresponde al intervalo de tiempo entre pulsos, calculado automáticamente por la programación del sistema durante la adquisición de datos.

Con el fin de preparar la información para el análisis de eventos de precipitación, se desarrolló un proceso de organización y reconstrucción temporal de la serie, previo a la identificación de eventos de lluvia.

En primer lugar, se generó una variable de tipo **fecha-hora (datetime)** mediante la unificación de las columnas de fecha y hora, permitiendo ordenar cronológicamente los registros.

Figura 26. Código de programación en Arduino.



```
limpieza.R x  deteccion de umbrales.R* x  Untitled1 x
Source on Save  Run  Up  Down  Sou

20 head(10)
21 #contar error
22 colSums(is.na(datos))
23 #eliminar filas con NA en datetime
24 datos <- datos %>%
25   filter(!is.na(value), !is.na(fecha), !is.na(hora))
26 #verificar que no haya NA
27 colSums(is.na(datos))
28 #creamos data time
29 datos <- datos %>%
30   mutate(datetime = dmy_hms(paste(fecha, hora)))
31 sum(is.na(datos$datetime))
32 str(datos)
33 head(datos)
34 #ordenamos cronologicamente
35 datos <- datos %>%
36   arrange(datetime)
37 head(datos)
38 tail(datos)
39 #volvemos a calcular diferencia de tiempo entre pulso
40 datos <- datos %>%
```

Posteriormente, se calculó un nuevo intervalo de tiempo denominado Δt_{real} , definido como la diferencia entre marcas temporales consecutivas ($t_2 - t_1$), con el objetivo de obtener una estimación directa del tiempo real transcurrido entre pulsos.

Durante este proceso se identificó la presencia de múltiples valores iguales a cero en Δt_{real} , los cuales se originan debido a la resolución temporal del registro (segundos), que no captura la precisión en milisegundos presente en el sistema. Esto genera aparentes intervalos nulos cuando en realidad sí existe un tiempo transcurrido entre pulsos.

Figura 27. Comparación de registro de programación y el calculado.

value	fecha	hora	datetime	dt_real	value_corregido
1	25/01/2026	01:50:53	25/01/2026 01:50	NA	NA
4.47	25/01/2026	01:50:57	25/01/2026 01:50	4	4.47
0.96	25/01/2026	01:50:58	25/01/2026 01:50	1	0.96
16.08	25/01/2026	01:51:14	25/01/2026 01:51	16	16.08
0.66	25/01/2026	01:51:15	25/01/2026 01:51	1	0.66
0.32	25/01/2026	01:51:15	25/01/2026 01:51	0	0.32
0.38	25/01/2026	01:51:16	25/01/2026 01:51	1	0.38
0.22	25/01/2026	01:51:16	25/01/2026 01:51	0	0.22
0.15	25/01/2026	01:51:16	25/01/2026 01:51	0	0.15
0.22	25/01/2026	01:51:16	25/01/2026 01:51	0	0.22
0.23	25/01/2026	01:51:16	25/01/2026 01:51	0	0.23
0.2	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	1	0.2
0.2	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	0	0.2
0.19	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	0	0.19
0.15	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	0	0.15
0.19	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	0	0.19
0.19	25/01/2026	01:51:17	25/01/2026 01:51	0	0.19
1.62	25/01/2026	01:51:19	25/01/2026 01:51	2	1.62
2.26	25/01/2026	01:51:21	25/01/2026 01:51	2	2.26

Por otro lado, se observó que los valores registrados como $t = 1$ en la variable *value* corresponden al reinicio del conteo luego de periodos prolongados sin precipitación (mayores a 30 minutos), lo que indica el inicio de un nuevo evento de lluvia.

En ese sentido, para reconstruir de manera más precisa la serie temporal, se realizó la integración de ambas fuentes de información:

- Para intervalos donde Δt_{real} presenta valores no representativos (ceranos o iguales a cero), se utilizaron los valores provenientes de la variable *value*.
- Para intervalos asociados al inicio de eventos ($t = 1$), se reemplazó este valor por el tiempo real calculado mediante Δt_{real} , permitiendo representar adecuadamente la duración del periodo seco previo.

De esta manera, se generó una nueva variable de tiempo corregido, que representa de forma más consistente el comportamiento real del intervalo entre pulsos, y que fue utilizada en los análisis posteriores para la identificación y caracterización de eventos de precipitación.

Figura 28. Código de programación en Arduino.

```

55 Go forward to the next source location (Ctrl+F10)
56 datos %>%
57   filter(dt_real == 0) %>%
58   select(value, dt_real) %>%
59   head(20)
60
61 datos_ceros <- datos %>%
62   filter(dt_real == 0)
63
64 write.csv(datos_ceros, "dt_real_ceros.csv", row.names = FALSE)
65 getwd()
66 #probar valore 1 de reinicio
67 datos %>%
68   filter(value == 1) %>%
69   select(fecha, hora, value, dt_real) %>%
70   head(20)
71 #agregamos columna con el tiempo corregido
72 datos <- datos %>%
73   mutate(value_corregido = ifelse(value == 1, dt_real, value))
74 #descargar toda la tabla
75 write.csv(datos, "datos_con_dt_real.csv", row.names = FALSE)

```

```

36:20 (Top Level)
R Script

```

```

R 4.3.1 - E:/TESIS/RSTUDIO/1. XIMENA/
3 0.96 25/01/2026 01:50:58 2026-01-25 01:50:58 1 0.96
4 16.08 25/01/2026 01:51:14 2026-01-25 01:51:14 16 16.08
5 0.66 25/01/2026 01:51:15 2026-01-25 01:51:15 1 0.66
6 0.32 25/01/2026 01:51:15 2026-01-25 01:51:15 0 0.32
> tail(datos)
      value  fecha      hora      datetime dt_real value_corregido
132894 0.65 31/03/2026 16:55:36 2026-03-31 16:55:36 0 0.65
132895 1.32 31/03/2026 16:55:37 2026-03-31 16:55:37 1 1.32
132896 0.27 31/03/2026 16:55:37 2026-03-31 16:55:37 0 0.27
132897 0.45 31/03/2026 16:55:38 2026-03-31 16:55:38 1 0.45
132898 0.73 31/03/2026 16:55:38 2026-03-31 16:55:38 0 0.73
132899 0.93 31/03/2026 16:55:39 2026-03-31 16:55:39 1 0.93
> tiempo_min = value_corregido / 60

```

4.2 Definición de evento de lluvia

Una vez realizada la limpieza y reorganización de la base de datos, se obtuvo una columna de tiempo real que representa el instante exacto en el que se detecta cada pulso de precipitación. Asimismo, el valor registrado (*value*) corresponde al tiempo transcurrido entre pulsos consecutivos, calculado automáticamente por la programación implementada en la plataforma Adafruit IO.

4.2.1 Determinación del Inter-Event Time Definition (IETD)

Se analizó la distribución del tiempo entre pulsos con el objetivo de identificar un umbral de separación entre eventos de lluvia, conocido como *Inter-Event Time Definition*

(IETD). Este parámetro representa el tiempo mínimo sin precipitación necesario para considerar que un evento ha finalizado y uno nuevo ha iniciado.

A partir de esta estructura de datos, se procedió a analizar el comportamiento temporal entre pulsos con el objetivo de identificar patrones que permitan definir eventos de lluvia. Para ello, se evaluaron diferentes umbrales de tiempo de separación entre pulsos (5, 10, 15, 20, 30 y 60 minutos), los cuales permiten discriminar cuándo una secuencia de pulsos pertenece a un mismo evento o cuándo corresponde al inicio de uno nuevo.

El criterio adoptado establece que, si el tiempo transcurrido entre pulsos consecutivos supera un umbral definido, se considera que el evento de lluvia anterior ha finalizado y que un nuevo evento inicia con el siguiente pulso registrado. Este enfoque se basa en la premisa hidrológica de que periodos prolongados sin precipitación indican la interrupción del proceso lluvioso (Scorah et al., 2025).

Con el fin de sustentar la selección del umbral más representativo, se realizó un análisis estadístico descriptivo del tiempo entre pulsos. Para ello, se construyó la distribución de frecuencias y se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, incluyendo el valor mínimo, máximo, media, mediana y cuartiles.

Una vez obtenida la columna de tiempo real (*dt_real*), que representa el instante exacto de detección de cada pulso, y el valor (*value_corregido*), correspondiente al tiempo transcurrido entre pulsos consecutivos, se procedió a analizar la separación temporal de los registros para identificar eventos de lluvia.

Para ello, se transformó el tiempo entre pulsos a minutos (*tiempo_min*), con el fin de facilitar su interpretación hidrológica. A partir de esta variable, se realizó un análisis estadístico descriptivo para la estación evaluada.

En el caso de la **Estación 1**, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Valor mínimo: **0.00 min**
- Primer cuartil (Q1): **0.01 min**
- Mediana: **0.03 min**
- Media: **0.61 min**
- Tercer cuartil (Q3): **0.10 min**
- Valor máximo: **42675.45 min**

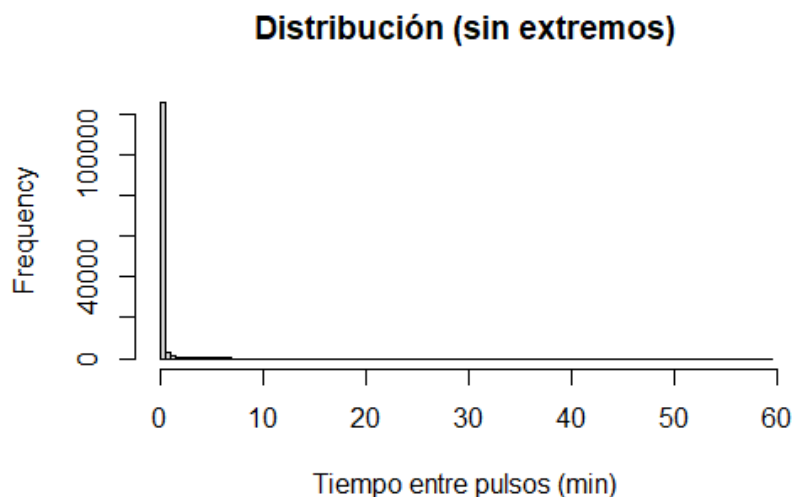
Estos resultados evidencian una **alta concentración de valores bajos**, lo que indica que la mayoría de los pulsos ocurren en intervalos muy cortos, asociados a periodos activos de precipitación. En contraste, el valor máximo extremadamente alto corresponde a periodos prolongados sin lluvia, lo que refleja pausas entre eventos.

La diferencia marcada entre la mediana (0.03 min) y la media (0.61 min) indica la presencia de valores extremos (outliers), lo cual es consistente con la naturaleza intermitente de la precipitación. En este contexto, la mediana resulta más representativa del comportamiento típico del tiempo entre pulsos.

Asimismo, el rango intercuartílico (Q1–Q3), comprendido entre 0.01 y 0.10 minutos, muestra que el 50% de los datos se concentra en intervalos muy cortos, lo que confirma que los pulsos dentro de un mismo evento presentan alta frecuencia.

Complementariamente, se construyó el histograma de la variable *tiempo_min* (Figura 29), el cual muestra una distribución fuertemente sesgada hacia la izquierda, con una alta frecuencia de valores pequeños y una cola larga hacia valores mayores. Este comportamiento es característico de series de precipitación registradas mediante pluviómetros de balancín.

Figura 29. Histograma de umbrales de tiempo entre pulso



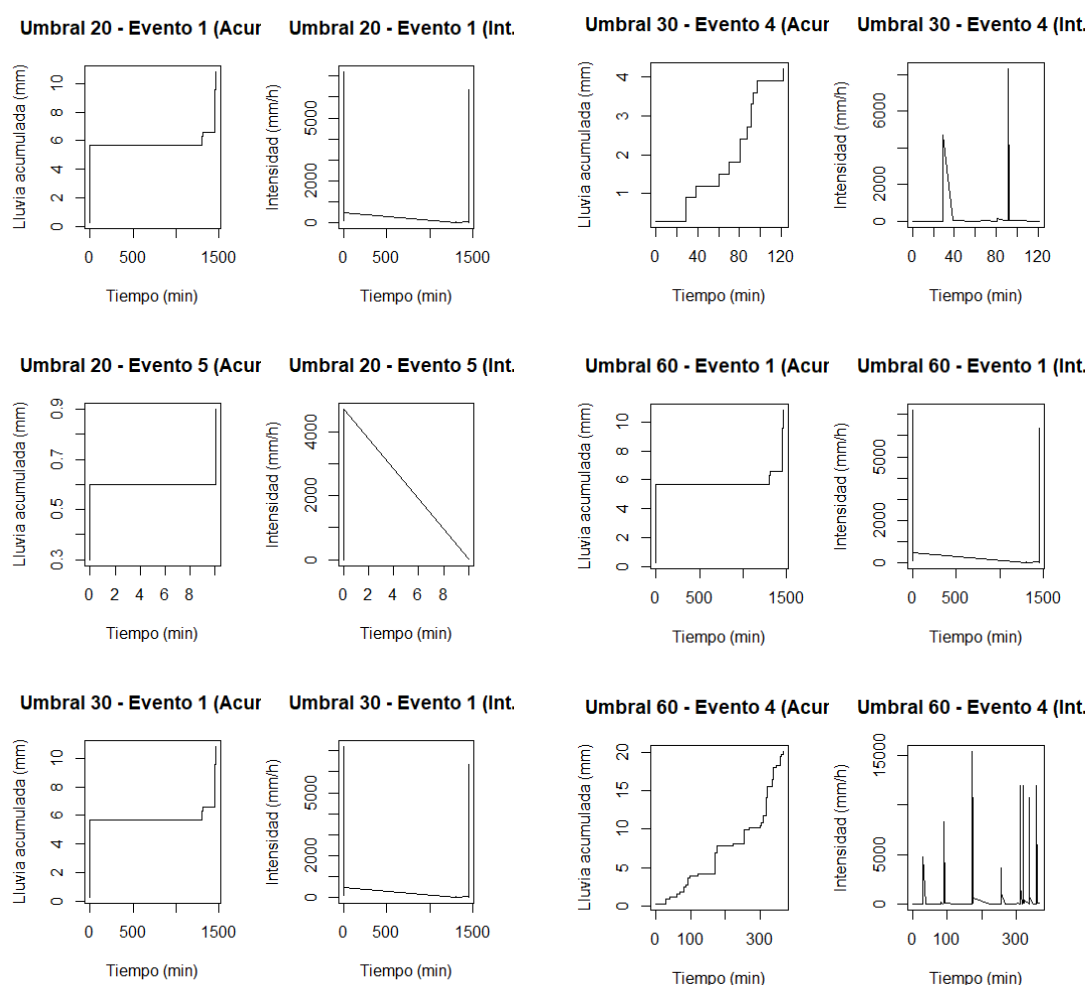
A partir de este análisis, se definieron distintos umbrales de separación temporal (5, 10, 15, 20, 30 y 60 minutos), con el objetivo de evaluar su efecto en la identificación de eventos de lluvia. Bajo este criterio, se considera que un evento finaliza cuando el tiempo entre pulsos supera el umbral definido, iniciándose un nuevo evento con el siguiente registro.

4.2.2 Análisis gráfico para la selección del IETD

Con el fin de definir el umbral de separación de eventos (IETD), no solo se evaluaron los valores estadísticos del tiempo entre pulsos, sino también la **estructura interna de los eventos obtenidos bajo distintos umbrales**, mediante su representación gráfica en términos de lluvia acumulada e intensidad.

Para ello, en RStudio se generaron gráficos de los primeros eventos identificados para cada umbral evaluado (20, 30 y 60 minutos), permitiendo analizar visualmente cómo se segmenta la precipitación en cada caso.

Figura 30- Comparación de umbrales de separación entre evento.



A partir de estos resultados, se identificaron diferencias claras en la forma en que cada umbral representa los eventos de lluvia:

- Para el **umbral de 20 minutos**, se observa que algunos eventos tienden a fragmentarse. Aunque en ciertos casos la forma general del evento se mantiene,

existen cortes en la serie que interrumpen la continuidad del proceso lluvioso, especialmente cuando ocurren pausas cortas entre pulsos.

- En el caso del **umbral de 60 minutos**, los gráficos muestran eventos excesivamente largos, donde periodos sin precipitación son incluidos dentro del mismo evento. Esto se evidencia, por ejemplo, en el Evento 1, donde la lluvia acumulada presenta tramos planos prolongados antes de continuar, indicando que se están agrupando eventos que deberían ser independientes.
- Por otro lado, el **umbral de 30 minutos** presenta una representación más coherente del comportamiento de la lluvia. En los gráficos analizados (Evento 1 y Evento 4), se observa que:
 - La lluvia acumulada sigue una progresión continua sin interrupciones artificiales.
 - La intensidad muestra picos definidos, seguidos de un descenso, manteniendo la forma característica de un evento de lluvia.
 - No se incluyen periodos secos prolongados dentro del mismo evento.

Este análisis permitió verificar que el umbral de 30 minutos logra conservar la **estructura hidrológica típica de un evento**, caracterizada por un inicio, un incremento de intensidad, un pico máximo y una fase de descenso.

En consecuencia, la selección del IETD no se basó únicamente en criterios estadísticos, sino también en la **consistencia física de los eventos representados**, asegurando que la segmentación respete la dinámica real de la precipitación.

Por lo tanto, se definió un **IETD de 30 minutos**, ya que:

- Evita la fragmentación de eventos (como ocurre con umbrales menores).
- Evita la sobreagrupación de eventos independientes (como ocurre con umbrales mayores).
- Mantiene la coherencia hidrológica del fenómeno.

4.2.3 Definición de evento de lluvia

A partir del análisis del tiempo entre pulsos y de la evaluación de distintos umbrales de separación, se estableció el criterio para la identificación de eventos de lluvia en la presente investigación.

Un evento de lluvia se definió como una **secuencia continua de pulsos de precipitación**, en la cual los intervalos de tiempo entre pulsos consecutivos no superan un umbral determinado. Un evento finaliza cuando se presenta un periodo sin lluvia mayor o igual al umbral definido, iniciándose un nuevo evento con el siguiente pulso registrado.

En este estudio, se adoptó un **Inter-Event Time Definition (IETD) de 30 minutos**, determinado a partir del análisis estadístico y gráfico de la serie de datos. Este valor permitió representar de manera adecuada la continuidad de la precipitación, evitando tanto la fragmentación de eventos como la agrupación de eventos independientes.

En términos operativos, el criterio aplicado en RStudio consistió en evaluar el tiempo entre pulsos (*tiempo_min*) y asignar un nuevo identificador de evento cuando dicho valor superaba los 30 minutos. De esta manera, cada evento quedó definido como un conjunto de registros consecutivos con separación temporal inferior al umbral establecido.

Este enfoque es consistente con lo reportado en la literatura hidrológica, donde un evento de lluvia se define como un periodo de precipitación separado de otros por un intervalo seco suficientemente largo, garantizando la independencia entre eventos (Adams & Papa, 2000; WMO, 2018). Asimismo, el concepto de *Inter-Event Time* (IET) establece que la delimitación de eventos depende de la identificación de periodos sin lluvia que marcan la interrupción del proceso precipitante.

En concordancia con ello, y considerando el comportamiento observado en los datos analizados, se establece que:

Un evento de lluvia corresponde a una secuencia continua de pulsos de precipitación, separada de otros eventos por un periodo seco mayor o igual a 30 minutos.

4.3 Parámetros analizados

4.3.1. Caracterización hidrológica y temporal de eventos de lluvia por estación

Una vez definidos y delimitados los eventos de lluvia mediante el criterio de separación temporal (IETD = 30 minutos), se procedió a la caracterización de cada evento a partir de sus propiedades hidrológicas.

El procesamiento se realizó en el entorno de **RStudio**, donde los datos previamente organizados por evento permitieron calcular los parámetros fundamentales de cada episodio de precipitación.

En primer lugar, se incorporó el volumen de lluvia asociado a cada pulso, considerando un valor constante de **0.42 mm por pulso**, correspondiente a la resolución del pluviómetro de balancín utilizado. A partir de ello, se obtuvo la lluvia acumulada por evento mediante la suma de los pulsos registrados.

Asimismo, se calculó la **intensidad de precipitación**, definida como la relación entre el volumen de lluvia y el tiempo transcurrido entre pulsos, permitiendo representar la variabilidad temporal de la lluvia dentro de cada evento.

Posteriormente, cada evento fue segmentado en cuatro partes iguales en función de su duración (cuartiles temporales: Q1, Q2, Q3 y Q4), con el objetivo de analizar la **distribución temporal de la precipitación dentro del evento**. Esta segmentación permitió identificar en qué fase del evento se concentra la mayor intensidad de lluvia.

A partir de esta estructura, se generó una tabla resumen por evento (*resumen_final*), en la cual se calcularon los siguientes parámetros:

- **Duración del evento (min):** tiempo total comprendido entre el primer y último pulso del evento.
- **Lluvia acumulada total (mm):** suma del volumen de todos los pulsos registrados en el evento.
- **Intensidad máxima (mm/h):** valor máximo de intensidad registrado dentro del evento.
- **Intensidad media (mm/h):** promedio de la intensidad a lo largo del evento.
- **Distribución temporal (Q1, Q2, Q3, Q4):** volumen de lluvia acumulado en cada cuarto del evento.

Adicionalmente, con base en la distribución temporal de la lluvia, se realizó la **clasificación de los eventos según su patrón de precipitación**, identificando el cuartil en el cual se concentra el mayor aporte de lluvia. De esta manera, se definieron los siguientes tipos de evento:

- **Tipo I:** mayor concentración de lluvia en el primer cuartil (evento adelantado o *early peak*).
- **Tipo II:** mayor concentración en el segundo cuartil.
- **Tipo III:** mayor concentración en el tercer cuartil.

- **Tipo IV:** mayor concentración en el último cuartil (evento atrasado o *late peak*).

Este procedimiento fue implementado en RStudio mediante la comparación de los valores acumulados en cada cuartil, asignando automáticamente el tipo de evento correspondiente.

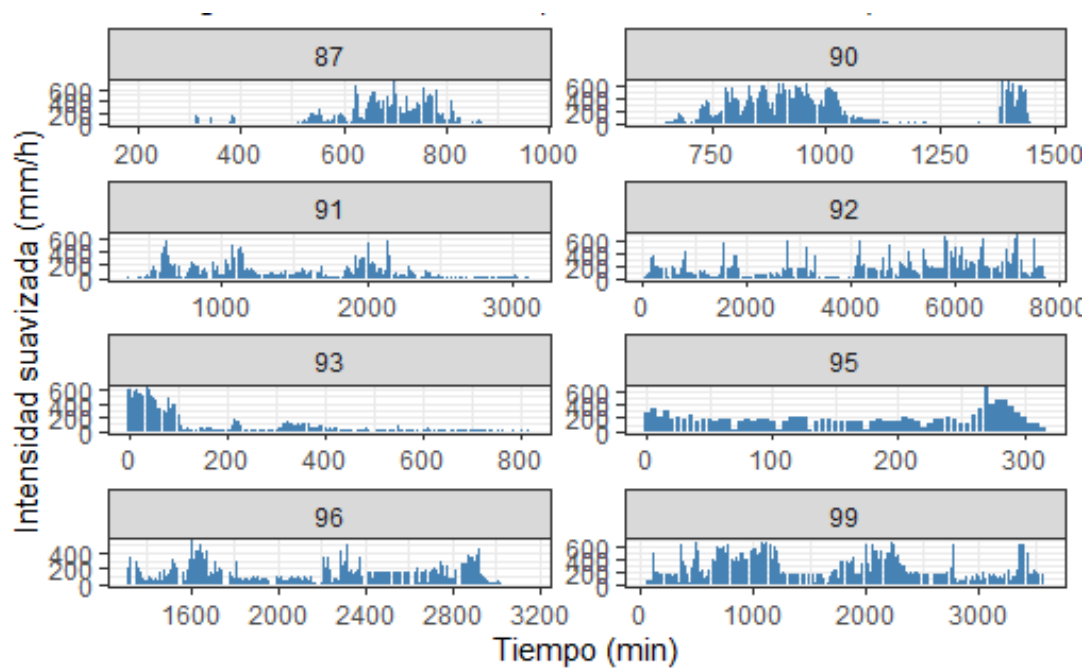
Figura 31. Resultados de clasificación en cuartiles.

evento_id	duracion_min	lluvia_total_mm	intensidad_max	intensidad_media	Q1	Q3	Q4	Q2	tipo_ev
1	0.478166667	7.98	10080	5226.530724	1.26	0.42	6.3	0	Tipo 4
2	20.46666667	1.26	11.06152608	5.534544941	0	0.42	0.42	0.42	Tipo 2
3	12.944	5.88	8894.117647	1168.678327	0.42	2.94	2.52	0	Tipo 3
4	1563.266667	0.42	0.01612009	0.01612009	0	0	0.42	0	Tipo 4
5	391.1	0.42	0.064433649	0.064433649	0	0	0.42	0	Tipo 4
6	323.4231667	5.88	11630.76923	1317.30362	0	1.68	4.2	0	Tipo 4
7	53.416	5.04	21600	7240.12841	0	0	5.04	0	Tipo 4
8	47.51666667	0.42	0.530340231	0.530340231	0	0	0.42	0	Tipo 4
9	44.9005	2.94	5040	1044.769513	0	2.52	0.42	0	Tipo 3
10	98.13583333	13.86	16800	4439.928196	0	8.82	2.94	2.1	Tipo 3
11	96.89366667	7.98	21600	3665.090308	0	0.42	7.56	0	Tipo 4
12	73.90983333	4.2	8894.117647	3350.977864	0	0	4.2	0	Tipo 4
13	156.1313333	1.26	1680	585.2791463	0	0	1.26	0	Tipo 4
14	147.6205	13.02	10080	586.5809776	4.62	1.68	1.68	5.04	Tipo 2
15	36.05433333	1.68	4725	2808.347915	0	0	1.68	0	Tipo 4
16	173.6	0.42	0.14516129	0.14516129	0	0	0.42	0	Tipo 4
17	337.8081667	7.98	13.48434852	7.015915583	0	0	7.98	0	Tipo 4
18	3.704666667	0.42	6.80223142	6.80223142	0	0	0.42	0	Tipo 4
19	26.6605	0.42	0.945218582	0.945218582	0	0	0.42	0	Tipo 4
20	1272.7255	1.26	3.424455869	1.798514725	0	0	1.26	0	Tipo 4
21	250.85	0.42	0.100458441	0.100458441	0	0	0.42	0	Tipo 4
22	97.58333333	0.42	0.25824082	0.25824082	0	0	0.42	0	Tipo 4
23	60.4585	1.26	2.617909828	1.601718886	0	0.84	0.42	0	Tipo 3

De esta manera, cada evento de lluvia no solo queda definido en términos de su duración e intensidad, sino también en función de su comportamiento temporal, lo cual resulta fundamental para el análisis hidrológico posterior.

Cabe resaltar que el análisis se realizó de manera independiente para cada estación, permitiendo evaluar las características propias de la precipitación en cada punto de medición.

Figura 32. Hietogramas representativos de eventos de lluvia delimitados mediante IETD = 30 minutos



En la Figura 32 se presentan ejemplos de eventos ya delimitados a partir del umbral definido, mostrando que la precipitación no ocurre de manera uniforme, sino que presenta variaciones internas en intensidad, duración y concentración temporal. En algunos casos se observan eventos con picos intensos concentrados en una fase específica, mientras que en otros la lluvia se distribuye de forma más homogénea a lo largo de todo el evento.

Cabe precisar que los eventos mostrados corresponden solo a una selección representativa y se presentan con fines ilustrativos, sin reemplazar el análisis completo realizado sobre el total de eventos identificados en la estación.

4.3.2. Análisis horario de ocurrencia de eventos de lluvia

Con la finalidad de evaluar la distribución temporal diaria de la precipitación, se realizó un análisis horario de ocurrencia de eventos de lluvia para cada estación de monitoreo. Este análisis permitió identificar las horas del día en las que se concentró la mayor cantidad de lluvia registrada, así como reconocer posibles patrones de ocurrencia asociados a periodos diurnos, vespertinos, nocturnos o de madrugada.

El análisis horario se desarrolló a partir de los registros individuales de precipitación previamente depurados y organizados. Cada registro contiene la fecha, hora, marca temporal completa (datetime) y volumen de lluvia asociado a cada pulso del pluviómetro. Este enfoque permite tratar la precipitación como una serie de eventos temporales, donde cada registro posee una ubicación específica en el tiempo. Este criterio es coherente con los

enfoques basados en series de eventos, los cuales consideran los tiempos de ocurrencia como base para analizar el comportamiento de fenómenos climáticos extremos y sus relaciones temporales. (Donges et al., 2016)

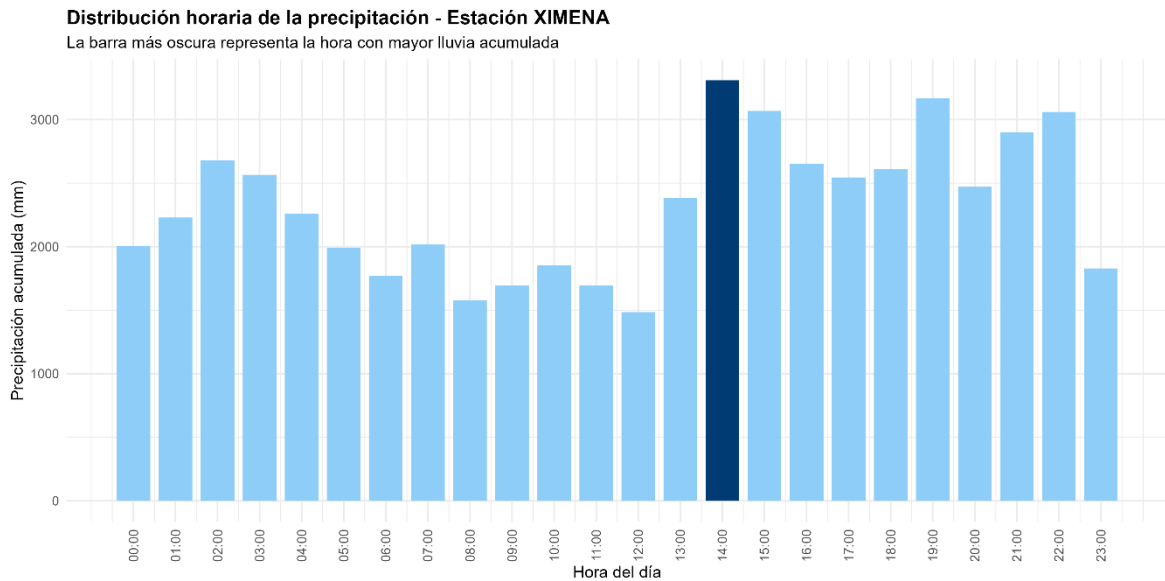
En RStudio, se extrajo la hora correspondiente de cada registro datetime, asignando cada pulso de lluvia a una de las 24 horas del día. De esta manera, los registros fueron agrupados según la hora de ocurrencia, desde las 00:00 hasta las 23:00 horas. Posteriormente, se sumó la precipitación registrada dentro de cada intervalo horario, obteniéndose la lluvia acumulada total por hora para cada estación.

El procedimiento permitió construir una tabla de distribución horaria, en la cual cada hora del día quedó asociada con el volumen total de precipitación acumulado durante el periodo de análisis. Esta tabla fue utilizada para elaborar gráficos de barras, donde el eje X representa las 24 horas del día y el eje Y representa la precipitación acumulada en milímetros.

La representación gráfica permitió identificar visualmente los periodos horarios con mayor concentración de lluvia. Así, fue posible reconocer si la precipitación presentó mayor ocurrencia durante la tarde, la noche, la madrugada o si tuvo una distribución más homogénea a lo largo del día. Este tipo de análisis resulta relevante porque la organización temporal de los eventos de lluvia permite aproximarse al comportamiento diario de la precipitación y observar patrones locales asociados a la dinámica atmosférica.

La literatura sobre precipitación extrema reconoce que los sistemas regionales pueden presentar comportamientos coherentes en el tiempo y en el espacio, y que la identificación de estructuras temporales contribuye a comprender mejor la dinámica de los eventos de lluvia. (Su et al., 2022)

Figura 33. Distribución horaria acumulada de la precipitación registrada en la estación Ximena



4.3.3. Análisis de máximos pluviométricos por estación

El análisis de máximos pluviométricos se realizó con la finalidad de identificar, dentro de cada estación, los eventos de lluvia de mayor magnitud y evaluar su estructura temporal. Este procedimiento no se limitó a reconocer los eventos con mayor precipitación acumulada, sino que permitió analizar su duración, intensidad, momento del pico, número de picos y patrón de concentración temporal.

Este enfoque parte del tratamiento de la lluvia como una serie de eventos temporales, donde cada evento posee un tiempo de ocurrencia, una duración y una estructura interna. Este tipo de análisis es coherente con los enfoques de series de eventos utilizados en estudios climáticos, donde los tiempos de ocurrencia permiten caracterizar eventos extremos y sus relaciones temporales. (Donges et al., 2016)

Paso 1. Selección de eventos máximos por estación

El análisis se realizó de manera independiente para cada estación de monitoreo.

A partir de la tabla resumen de eventos generada previamente, se ordenaron todos los eventos registrados en función de su precipitación acumulada total.

El criterio de selección fue:

$$P_{acum} = \sum lluvia_{mm}$$

Donde:

- P_{acum} = precipitación acumulada total del evento, en mm.

- lluvia_mm = precipitación asociada a cada pulso del pluviómetro.

Luego, los eventos fueron ordenados de forma descendente y se seleccionaron los **cinco eventos con mayor precipitación acumulada** por estación.

El criterio aplicado fue:

- variable de ordenamiento: precipitación acumulada total del evento;
- orden: descendente;
- selección: Top 10 eventos por estación.

La selección se realizó por volumen acumulado y no únicamente por intensidad instantánea, debido a que el volumen total del evento tiene relevancia hidrológica para procesos como saturación del suelo, escorrentía, erosión y respuesta de cuenca. En el procesamiento planteado, la selección de eventos máximos se hizo estación por estación, considerando los eventos previamente delimitados con IETD = 30 minutos y eligiendo los cinco mayores acumulados.

Paso 2. Recuperación de la serie temporal de cada evento máximo

Una vez seleccionados los eventos máximos, se recuperaron los registros detallados de cada evento desde la base de datos depurada.

Para cada evento seleccionado se extrajo:

- evento_id;
- fecha de ocurrencia;
- hora de inicio;
- hora de finalización;
- duración;
- precipitación acumulada;
- intensidad máxima;
- intensidad media;
- tipo temporal del evento;
- registros de lluvia por pulso;
- tiempo relativo desde el inicio del evento.

El tiempo relativo se calculó tomando como origen el primer registro del evento:

$$t_{relativo} = datetime_i - datetime_{inicio}$$

De esta forma, todos los eventos inician en $t = 0$, lo que permite comparar su evolución interna sin depender de la hora real en que ocurrió cada evento. Este paso es importante porque permite superponer eventos distintos dentro de una misma estación y observar si presentan formas temporales similares o diferentes. En la lógica aplicada, se recomendó trabajar con tiempo relativo para que todos los eventos empiecen desde cero y puedan compararse gráficamente.

Paso 3. Agrupación de la lluvia en intervalos de 5 minutos

Debido a que los datos originales provienen de pulsos individuales del pluviómetro de balancín, cada pulso representa una cantidad fija de lluvia. Sin embargo, graficar pulso por pulso puede generar una representación muy ruidosa y difícil de interpretar, porque los registros pueden ser demasiado frecuentes o irregulares.

Por ello, los registros fueron agrupados en intervalos regulares de **5 minutos**.

Para cada intervalo se sumó la lluvia registrada dentro de esa ventana temporal:

$$P_{5min} = \sum lluvia_mm$$

Donde:

- P_{5min} = lluvia acumulada dentro de cada intervalo de 5 minutos.
- lluvia_mm = lluvia registrada por cada pulso dentro del intervalo.

Este procedimiento no modifica el volumen total del evento; únicamente reorganiza temporalmente la lluvia para facilitar la visualización e interpretación de su estructura interna. Según el procesamiento aplicado, el volumen por intervalo de 5 minutos representa cuánta lluvia cayó en cada bloque temporal, no la lluvia acumulada total ni la intensidad instantánea.

Paso 4. Representación en tiempo real del evento

Para cada estación se elaboró un gráfico de los eventos máximos en tiempo real.

En este gráfico:

- eje X: tiempo relativo desde el inicio del evento, en minutos;
- eje Y: lluvia caída en cada intervalo de 5 minutos, en mm;

- cada línea: un evento máximo seleccionado.

Este gráfico permite observar:

- duración real de cada evento;
- magnitud de los intervalos de lluvia;
- presencia de picos intensos;
- persistencia de la precipitación;
- eventos cortos e intensos;
- eventos largos y continuos;
- eventos con uno o varios núcleos de lluvia.

La representación en tiempo real conserva la duración física de cada evento, por lo que es útil para analizar el comportamiento operativo de la lluvia. La desventaja es que los eventos más largos pueden dominar visualmente el gráfico, porque claro, hasta en los gráficos hay eventos que quieren llamar la atención más que el resto.

Paso 5. Normalización temporal de los eventos máximos

Además del gráfico en tiempo real, se aplicó una normalización temporal para comparar la forma interna de los eventos.

La duración de cada evento se transformó a una escala común de 0 a 100 %:

$$t_{norm} = \frac{t_{relativo}}{duracion\ total} \times 100$$

Donde:

- t_{norm} = tiempo normalizado del evento, en porcentaje.
- $t_{relativo}$ = tiempo transcurrido desde el inicio del evento.
- duración total = duración del evento en minutos.

Con esta transformación:

- inicio del evento = 0 %;
- final del evento = 100 %.

La normalización permitió comparar eventos de distinta duración en una misma escala temporal. Esto es especialmente útil cuando una estación presenta eventos de 40

minutos, 2 horas o más de 7 horas, porque permite analizar la forma temporal sin que la duración absoluta distorsione la comparación. En el procedimiento trabajado, se plantearon dos representaciones complementarias: tiempo real para conservar la duración física y tiempo normalizado para comparar la estructura temporal del evento.

Paso 6. Cálculo de indicadores de estructura temporal

Para cada evento máximo se calcularon indicadores adicionales destinados a describir su estructura interna.

Los principales indicadores fueron:

Tabla 13. Indicadores principales calculados.

Indicador	Descripción
Duración	Tiempo total entre el inicio y final del evento
Precipitación acumulada	Suma total de lluvia registrada durante el evento
Intensidad máxima	Mayor valor de intensidad o volumen por intervalo registrado
Intensidad media	Relación entre precipitación total y duración del evento
Momento del pico	Tiempo en el que ocurre el mayor valor de lluvia o intensidad
Pico porcentual	Ubicación del pico dentro de la duración total del evento
Número de picos	Cantidad de máximos locales identificados
Simetría del evento	Clasificación del pico como temprano, central o tardío
Tipo temporal	Clasificación según cuartil dominante: I, II, III o IV

El momento relativo del pico se calculó como:

$$Pico \% = \frac{t_{pico}}{duracion\ total} \times 100$$

Este indicador permite saber si la mayor concentración de lluvia ocurre al inicio, en la parte media o hacia el final del evento.

Paso 7. Interpretación de los eventos máximos

La interpretación de los eventos máximos se realizó considerando tanto sus parámetros numéricos como su forma gráfica.

Se evaluaron los siguientes aspectos:

- si el evento fue corto e intenso;
- si el evento fue largo y persistente;
- si presentó un solo pico dominante;
- si presentó varios picos o reactivaciones;
- si el pico ocurrió al inicio, centro o final;
- si la lluvia fue concentrada o distribuida;
- si los eventos máximos de una misma estación mostraron patrones similares.

Este análisis es importante porque dos eventos pueden presentar un acumulado similar, pero tener comportamientos hidrológicos completamente diferentes. Por ejemplo, un evento puede acumular un volumen considerable durante varias horas de lluvia persistente, mientras otro puede concentrar un volumen parecido en pocos minutos de alta intensidad.

4.3.4. Construcción de curvas envolventes por estación

. La construcción de curvas envolventes se realizó con el objetivo de sintetizar la variabilidad temporal de los eventos de lluvia registrados en cada estación pluviométrica. Este procedimiento permitió representar, en una sola figura, el rango de comportamiento observado de los eventos, identificando una envolvente máxima, una envolvente mínima y una curva representativa.

A diferencia del análisis de máximos, donde se seleccionaron únicamente los eventos de mayor precipitación acumulada, en este apartado se consideró el conjunto de eventos registrados por estación. De esta manera, la curva envolvente no representa un evento individual, sino el comportamiento general de la estación frente a todos los eventos analizados.

Para cada estación se utilizaron los eventos previamente delimitados mediante el criterio IETD = 30 minutos. Cada evento contaba con:

- fecha y hora de inicio;
- fecha y hora de finalización;

- duración total;
- precipitación acumulada;
- intensidad máxima;
- intensidad media;
- serie temporal de pulsos de lluvia;
- lluvia asociada a cada pulso.

A partir de esta información, cada evento fue reorganizado en una serie regular de tiempo, usando intervalos de **5 minutos**. En cada intervalo se calculó la precipitación ocurrida dentro de dicho bloque temporal.

La variable base del análisis fue:

$$P_{5min} = \sum lluvia_mm$$

Donde:

- P_{5min} = precipitación acumulada en cada intervalo de 5 minutos;
- lluvia_mm = precipitación asociada a cada pulso del pluviómetro.

Este procedimiento no modifica la lluvia total del evento, solo reorganiza los registros para facilitar la comparación temporal entre eventos. La lógica coincide con el uso de incrementos de tiempo para construir hietogramas, donde la tormenta se divide en intervalos y se estima la lluvia correspondiente en cada uno.(Texas Department of Transportation, 2019)

Normalización temporal de los eventos

Debido a que los eventos de lluvia no presentan la misma duración, no fue adecuado compararlos directamente en tiempo real. Algunos eventos pueden durar pocos minutos, mientras que otros pueden extenderse durante varias horas.

Por ello, cada evento fue transformado a una escala temporal normalizada, donde:

- inicio del evento = 0 %;
- final del evento = 100 %.

La normalización se calculó mediante:

$$t_{norm} = \frac{t_{relativo}}{duración\ total} \times 100$$

Donde:

- t_{norm} = tiempo normalizado del evento, en porcentaje;
- $t_{relativo}$ = tiempo transcurrido desde el inicio del evento;
- duración total = duración del evento.

Este procedimiento permitió comparar eventos con duraciones diferentes dentro de una misma escala común. La normalización por porcentaje de duración y porcentaje de lluvia es consistente con las curvas de distribución temporal de tormentas propuestas por Huff, donde la comparación entre tormentas se realiza mediante porcentajes de duración y precipitación acumulada.

Construcción de la matriz temporal normalizada

Luego de normalizar cada evento, se interpolaron o asignaron sus valores de lluvia a posiciones comunes del tiempo normalizado, por ejemplo:

0%, 5%, 10%, 15%, ..., 100%

de esta manera, para cada estación se construyó una matriz donde:

- las filas representan eventos;
- las columnas representan posiciones del tiempo normalizado;
- los valores representan la lluvia en mm por intervalo de 5 minutos.

Esquema conceptual:

Evento	0 %	5 %	10 %	...	100 %
Evento 1	P1P_1P1	P2P_2P2	P3P_3P3	...	PnP_nPn
Evento 2	P1P_1P1	P2P_2P2	P3P_3P3	...	PnP_nPn
Evento 3	P1P_1P1	P2P_2P2	P3P_3P3	...	PnP_nPn

Esta matriz permitió calcular las curvas envolventes y la curva representativa en cada posición del tiempo normalizado.

Cálculo de la envolvente máxima

La envolvente máxima se obtuvo seleccionando, para cada posición del tiempo normalizado, el mayor valor de lluvia registrado entre todos los eventos de la estación.

$$E_{max(t)} = \max(P_{1t}, P_{2t}, P_{3t}, \dots, P_{nt})$$

Donde:

- $E_{max(t)}$ = envolvente máxima en el tiempo normalizado t;
- P_{nt} = precipitación del evento n en el tiempo normalizado t.

Esta curva representa el límite superior del comportamiento observado. Permite identificar en qué fase del evento se presentaron los mayores aportes de lluvia dentro del conjunto analizado.

Cálculo de la envolvente mínima

La envolvente mínima se obtuvo seleccionando, para cada posición del tiempo normalizado, el menor valor de lluvia registrado entre todos los eventos.

$$E_{min(t)} = \max(P_{1t}, P_{2t}, P_{3t}, \dots, P_{nt})$$

Donde:

- $E_{min(t)}$ = envolvente mínima en el tiempo normalizado ttt;
- P_{nt} = precipitación del evento nnn en el tiempo normalizado ttt.

Esta curva representa el límite inferior del comportamiento observado. En conjunto con la envolvente máxima, permite definir el rango de variabilidad temporal de los eventos de lluvia registrados en cada estación.

Cálculo de la curva representativa

La curva representativa se obtuvo mediante la **mediana** de los valores de lluvia en cada posición del tiempo normalizado.

$$E_{rep(t)} = \text{mediana}(P_{1t}, P_{2t}, P_{3t}, \dots, P_{nt})$$

Donde:

- $E_{rep(t)}$ = curva representativa en el tiempo normalizado t;
- P_{nt} = precipitación del evento n en el tiempo normalizado t.

Se adoptó la mediana como medida representativa porque reduce la influencia de eventos extremos y permite obtener una curva central más robusta que el promedio. Esta decisión es coherente con el enfoque de Huff, donde la curva mediana se considera la representación central de la distribución temporal de tormentas dentro de una familia de curvas.(Huff, 1990)

Identificación del evento representativo real

Luego de construir la curva representativa por mediana, se identificó el evento real más cercano a dicha curva. Este paso permitió evitar que la representación final dependa únicamente de una curva sintética.

El procedimiento consistió en comparar cada evento observado con la curva representativa, calculando su diferencia respecto a la mediana en todas las posiciones del tiempo normalizado. El evento con menor diferencia total fue seleccionado como **evento representativo real de la estación**.

Conceptualmente:

$$D_i = \sum |P_{it} - E_{rep}(t)|$$

Donde:

- D_i = distancia o diferencia total del evento i respecto a la curva representativa;
- P_{it} = lluvia del evento i en el tiempo normalizado t ;
- $E_{rep}(t)$ = valor de la curva representativa en el tiempo normalizado t .

El evento con menor D_i fue considerado el evento observado más representativo.

4.4. Comparación entre estaciones

Y aquí sí entra lo que ya redactaste de coincidencias y regionalización temporal.

4.4.1. Identificación de coincidencias temporales entre estaciones

Una vez integradas las tablas resumen de eventos individuales de las diez estaciones, se procedió a identificar eventos de lluvia con comportamiento regional. Para ello, se compararon los intervalos temporales de inicio y fin de cada evento registrado en una estación con los eventos registrados en las demás estaciones. Este procedimiento se basa en el análisis de series de eventos, donde cada evento es representado por su tiempo de ocurrencia y puede ser comparado con eventos registrados en otras series temporales. Donges et al. señalan que el análisis de coincidencia de eventos permite cuantificar relaciones estadísticas, desfases y coincidencias temporales entre series de eventos, lo cual resulta aplicable al estudio de fenómenos climáticos y extremos naturales. (Donges et al., 2016)

El criterio de comparación se basó en la superposición temporal entre eventos. Dos eventos fueron considerados coincidentes cuando sus ventanas de duración se interceptaron

parcial o totalmente. Es decir, no se exigió que los eventos iniciaran exactamente a la misma hora, sino que ambos se desarrollaran durante un periodo común. Esta lógica es coherente con los enfoques de coincidencia de eventos, en los cuales la relación temporal entre dos eventos se evalúa mediante una ventana o intervalo de coincidencia, permitiendo considerar eventos cercanos o parcialmente coincidentes en el tiempo.(Donges et al., 2016)

La condición lógica aplicada fue la siguiente:

$$InicioA \leq FinB$$

$$FinA \geq InicioB$$

Donde A y B representan eventos registrados en estaciones diferentes. Esta condición indica que existe coincidencia temporal cuando el inicio de un evento ocurre antes o durante la finalización del otro, y cuando su finalización ocurre después o durante el inicio del otro.

En términos prácticos, esta condición permitió identificar aquellos casos en los que, mientras un evento de lluvia se encontraba en desarrollo en una estación, otro evento también ocurría en una estación distinta. De esta manera, la comparación no se limitó a la hora exacta de inicio, sino al periodo completo de ocurrencia de cada evento.

A partir de esta evaluación, se construyeron grupos de eventos coincidentes. Cada grupo estuvo conformado por eventos individuales de distintas estaciones que presentaron superposición temporal entre sí. La identificación de estos grupos permite reconocer episodios de lluvia con comportamiento simultáneo o sincronizado dentro de la red de monitoreo. En estudios de precipitación extrema, la sincronización de eventos registrados en distintos puntos ha sido empleada para analizar estructuras espacio-temporales coherentes y relaciones climáticas entre regiones. Su et al. indican que regiones con propiedades climatológicas similares pueden presentar coherencia temporal y espacial, manifestándose mediante comportamientos sincronizados en eventos de precipitación extrema.(Su et al., 2022)

Posteriormente, se aplicó un criterio mínimo de cobertura para diferenciar coincidencias aisladas de eventos con comportamiento regional. Para esta investigación, se estableció que un evento regional debía estar presente en **al menos tres estaciones diferentes**. Este umbral fue adoptado como criterio operativo del estudio, con el fin de evitar que coincidencias entre solo dos estaciones fueran clasificadas directamente como eventos regionales.

En este sentido, se definió como **evento regional** a toda agrupación de eventos de lluvia registrada en tres o más estaciones, cuyos intervalos de inicio y fin presentaron coincidencia temporal parcial o total.

Este criterio permitió distinguir entre eventos locales, eventos con coincidencia limitada y eventos con mayor cobertura dentro de la red de monitoreo. Así, únicamente se consideraron regionales aquellos episodios en los que la precipitación ocurrió de manera simultánea o con traslape temporal en tres o más puntos de observación.

Para cada evento regional identificado se asignó un código único y se consolidó la información de las estaciones participantes. La hora de inicio regional fue definida como la hora más temprana registrada entre los eventos individuales del grupo, mientras que la hora de finalización regional correspondió al último término registrado dentro del mismo grupo.

La duración regional se calculó como:

$$Duracion_{regional} = Fin_{regional} - Inicio_{regional}$$

Asimismo, para cada estación participante se conservaron los parámetros hidrológicos individuales del evento: precipitación acumulada, intensidad máxima, intensidad media, duración y tipo temporal.

También se calculó el desfase temporal de cada estación respecto al inicio regional:

$$Desfase_i = Inicio_i - Inicio_{regional}$$

Donde $Desfase_i$ representa la diferencia temporal entre el inicio del evento registrado en la estación i y el inicio más temprano del evento regional. Este indicador permitió identificar qué estación registró primero la lluvia y cuáles la registraron posteriormente, sirviendo como insumo para el análisis espacial posterior.

4.4.2. Parámetros resumen de los eventos regionales

- estaciones participantes
- hora de inicio y fin por estación
- hora inicial regional
- hora final regional
- duración regional
- número de estaciones involucradas

- precipitación acumulada por estación
- intensidad máxima e intensidad media por estación
- desfase temporal entre estaciones
- distancia entre estaciones, cuando corresponda

4.4.3. Comparación de patrones horarios entre estaciones

Este análisis permite evaluar si las estaciones presentan un patrón horario común o si existen desfases temporales entre ellas. La comparación horaria es relevante porque el ciclo diario de la precipitación puede estar influenciado por procesos locales y regionales, como el calentamiento diurno, la convección, el transporte de humedad y la orografía. En los Andes tropicales, los estudios sobre ciclo diurno de precipitación muestran que la distribución horaria de la lluvia varía espacialmente y puede presentar máximos distintos según la posición respecto a la cordillera y los valles.

Paso 1. Integración de archivos horarios por estación

Primero se trabajó con los archivos generados individualmente para cada estación:

Estos archivos contienen la lluvia organizada por hora del día y fueron utilizados para construir una base integrada de comparación horaria. El procedimiento consistió en unir los archivos de todas las estaciones en una sola base general.

Paso 2. Agrupación por hora del día

Una vez integrada la base general, los registros fueron agrupados según la hora del día, desde las 00:00 hasta las 23:00 horas.

Para cada hora se calcularon, según la disponibilidad de variables en la base:

- frecuencia de eventos por hora;
- precipitación acumulada por hora;
- intensidad promedio por hora;
- número de estaciones con registro de lluvia en esa hora.

La agrupación horaria permitió responder la pregunta:

¿En qué horas del día se concentra la mayor ocurrencia o acumulación de lluvia en el conjunto de estaciones?

Este enfoque se relaciona con los análisis del ciclo diurno de la precipitación, donde la lluvia se organiza por horas del día para identificar máximos horarios, periodos dominantes y variaciones espaciales. Poveda et al. trabajaron el ciclo diurno de la precipitación en los Andes tropicales usando registros horarios de estaciones pluviométricas, lo cual respalda la utilidad de analizar la lluvia a escala horaria para reconocer patrones temporales.(Poveda et al., 2005)

Paso 3. Cálculo del patrón horario general del área de estudio

Con la base integrada se calculó un patrón horario general para toda la red de monitoreo.

El cálculo básico fue:

$$Ph = \sum_{i=1}^n p_{i,h}$$

Donde:

- Ph = precipitación acumulada total en la hora h ;
- $p_{i,h}$ = precipitación registrada por la estación i en la hora h ;
- n = número de estaciones.

También se calculó la frecuencia horaria de eventos:

$$Fh = \sum_{i=1}^n E_{i,h}$$

Donde:

- Fh = frecuencia total de eventos registrados en la hora h ;
- $E_{i,h}$ = número de eventos o registros asociados a la estación i en la hora h .

Además, cuando correspondía, se calculó la cantidad de estaciones activas por hora:

$$N_h = \text{número de estaciones con lluvia en la hora } h$$

Este indicador permitió diferenciar horas con lluvia concentrada en pocas estaciones de horas con lluvia distribuida en varias estaciones.

Paso 4. Representación gráfica del patrón horario general

El patrón horario general fue representado mediante gráficos de barras o gráficos combinados de barras y línea.

En estos gráficos:

- eje X = hora del día;
- eje Y principal = precipitación acumulada o frecuencia de eventos;
- eje secundario, si corresponde = número de estaciones activas o intensidad promedio.

El gráfico permitió identificar visualmente las horas de mayor concentración de precipitación a nivel del área de estudio. Este producto corresponde al análisis general de ciudad o red, donde todavía no se evalúan diferencias individuales entre estaciones, sino el comportamiento agregado del sistema.

Paso 5. Integración de archivos para comparación inicio, pico y fin

Para comparar el comportamiento horario entre estaciones, se utilizaron archivos que contienen, por evento, variables temporales como:

- hora de inicio;
- hora de pico;
- hora de finalización.

Luego, los archivos de todas las estaciones fueron unidos en una sola base general y transformados a formato largo:

Tabla 14. Identificación de variables temporales.

Estación	Momento	Hora
Ximena	Inicio	14:20
Ximena	Pico	15:05
Ximena	Fin	16:10
Alder	Inicio	14:40
Alder	Pico	15:30
Alder	Fin	16:30

Este formato permitió comparar de manera directa los tres momentos principales del evento: inicio, pico y fin, esta base fue pensada específicamente para construir boxplots por estación y evaluar si algunas estaciones inician, alcanzan el pico o terminan antes que otras.

Paso 6. Conversión de hora a formato numérico

Para facilitar el análisis estadístico y la construcción de boxplots, las horas fueron convertidas a formato decimal.

Por ejemplo:

$$14:30 = 14.5$$

$$15:45 = 15.75$$

La conversión se realizó mediante:

$$Hora_{decimal} = Hora + \frac{Minutos}{60}$$

Esto permitió representar las horas como valores continuos dentro del rango de 0 a 24 horas.

Una advertencia metodológica importante: cuando un evento cruza la medianoche, el análisis horario debe tratarse con cuidado, porque 23:50 y 00:10 están cerca en el tiempo, aunque numéricamente parezcan extremos opuestos.

Paso 7. Comparación mediante boxplots

La comparación entre estaciones se realizó mediante gráficos de caja y bigotes.

Se construyeron boxplots para comparar:

- hora de inicio de eventos;
- hora de pico de precipitación;
- hora de finalización de eventos.

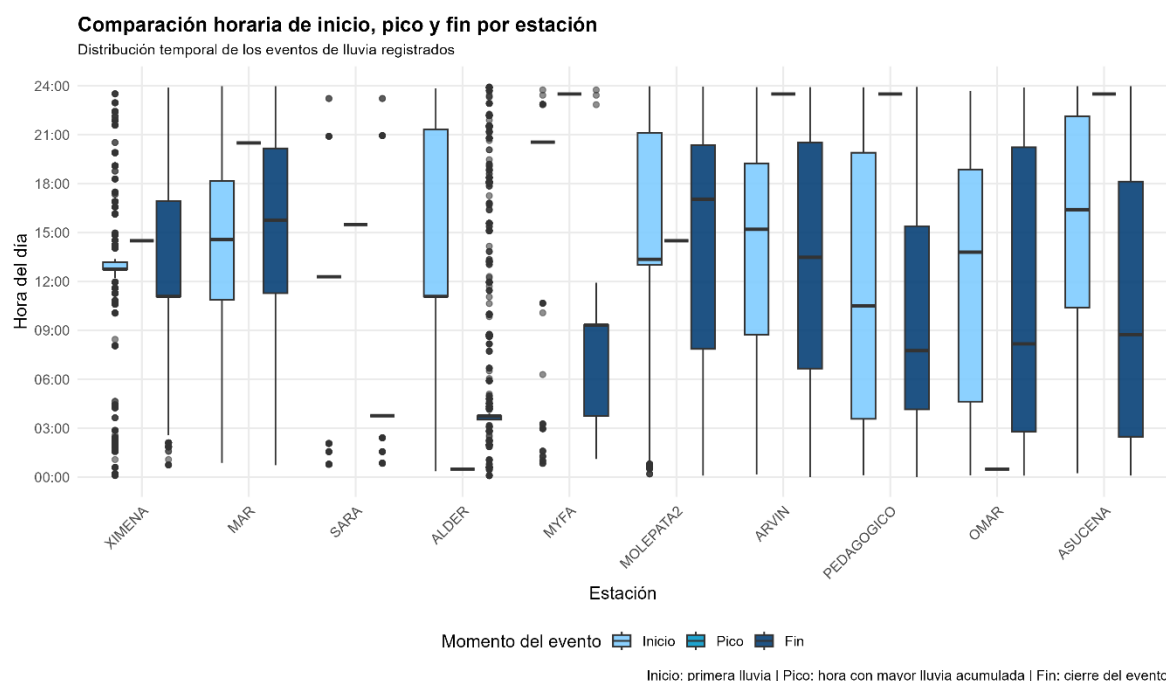
El gráfico permitió observar:

- mediana horaria de inicio por estación;
- dispersión de los horarios;
- estaciones con inicios más tempranos o tardíos;
- estaciones con picos más adelantados o atrasados;

- estaciones con mayor variabilidad horaria;
- posibles desfases temporales entre puntos de monitoreo.

Gráfico sugerido:

Figura 34. Comparación de horas de inicio, pico y finalización de eventos de lluvia entre estaciones



Los boxplots permiten comparar la distribución de los horarios de inicio, pico y finalización de los eventos entre estaciones. Las diferencias en la posición de las medianas y en la dispersión de los datos permiten identificar posibles desfases temporales en el desarrollo de la precipitación dentro del área de estudio.

Paso 8. Interpretación de desfases horarios

A partir de los boxplots y tablas resumen se identificaron diferencias temporales entre estaciones. Si una estación presentó medianas de inicio más tempranas, se interpretó como una estación donde los eventos tienden a registrarse primero. Si otra estación presentó picos o finalizaciones más tardías, se interpretó como una posible persistencia o retraso en el desarrollo del evento.

Este análisis se vincula con el concepto de desfase temporal entre series de eventos. Donges et al. indican que el análisis de coincidencia de eventos permite cuantificar relaciones temporales, dirección y desfase entre series de eventos, enfoque que respalda la comparación de horarios entre estaciones cuando se busca reconocer sincronización o retrasos en la ocurrencia de eventos. (Donges et al., 2016)

Asimismo, estudios sobre precipitación extrema han mostrado que los eventos pueden presentar estructuras sincronizadas y características espacio-temporales diferenciadas. Su et al. identificaron estructuras sincronizadas de eventos extremos de lluvia con características temporales y espaciales independientes, lo cual respalda la utilidad de comparar patrones horarios entre puntos de observación para reconocer coherencia o desfase temporal.(Su et al., 2022)

4.4.4. Comparación de máximos y envolventes entre estaciones

El objetivo de este análisis fue comparar entre estaciones los eventos de mayor intensidad y los patrones temporales representativos obtenidos mediante curvas envolventes. Este procedimiento permitió identificar diferencias en la magnitud, duración, concentración temporal y distribución espacial de los eventos máximos dentro de la red pluviométrica.

La comparación se realizó en dos niveles:

1. **Comparación de eventos máximos entre estaciones**, considerando principalmente la intensidad máxima, duración, volumen acumulado y coincidencia temporal.
2. **Comparación de curvas envolventes y eventos representativos**, evaluando la forma temporal de la lluvia en cada estación.

Este análisis se apoya en el enfoque de series de eventos, donde los eventos climáticos pueden compararse entre estaciones a partir de sus tiempos de ocurrencia y características internas. Donges et al. indican que el análisis de coincidencia de eventos permite cuantificar relaciones temporales, desfases y coincidencias entre series de eventos, lo cual respalda la comparación temporal de eventos extremos registrados en distintas estaciones.(Donges et al., 2016)

A. Comparación de eventos máximos entre estaciones

Paso 1. Integración de bases de eventos por estación

Se integraron las bases de eventos previamente generadas para cada estación pluviométrica. Para este análisis se consideraron dos tipos de bases:

- base total de eventos registrados por estación;
- base de eventos máximos por estación.

La base integrada incluyó variables temporales e hidrológicas como:

- estación;

- ID del evento;
- fecha y hora de inicio;
- fecha y hora de fin;
- duración;
- volumen acumulado;
- volumen máximo por intervalo;
- intensidad máxima;
- intensidad media;
- momento del pico.

Según el procedimiento aplicado, la integración permitió construir una tabla general de eventos por estación, incorporando información temporal y pluviométrica básica para la comparación posterior.

Paso 2. Selección de eventos máximos de intensidad

Para cada estación se seleccionaron los eventos con mayor intensidad máxima. En este caso, el criterio principal no fue únicamente la precipitación acumulada total, sino la **intensidad máxima**, debido a que este parámetro permite identificar lluvias concentradas y de alta energía en intervalos cortos.

El criterio de selección fue:

$$I_{max} = \max(I_i)$$

Donde:

- I_{max} = intensidad máxima del evento;
- I_i = intensidad calculada en cada intervalo del evento.

Cuando la variable disponible correspondía al volumen máximo registrado en un intervalo de tiempo, la intensidad máxima se calculó mediante:

$$I_{max} = \frac{P_{\Delta t}}{\Delta t}$$

Donde:

- $P_{\Delta t}$ = precipitación registrada en el intervalo;

- Δt = duración del intervalo expresada en horas.

La selección de eventos máximos por intensidad fue planteada como criterio para identificar lluvias concentradas y de alta energía en periodos cortos.

La literatura sobre distribución temporal de tormentas también respalda el análisis de eventos máximos desde su estructura interna, ya que la forma temporal del evento influye en su impacto hidrológico. Huff desarrolló curvas de distribución temporal de tormentas fuertes usando porcentajes acumulados de lluvia y duración, permitiendo comparar tormentas de distinta duración bajo una misma escala temporal.(Huff, 1990)

Paso 3. Control de calidad de eventos máximos

Antes de realizar la comparación entre estaciones, se aplicó un control de calidad para evitar que registros inconsistentes distorsionaran los resultados.

Se revisaron eventos con:

- ausencia de fecha u hora de inicio;
- ausencia de fecha u hora de fin;
- hora final anterior a la hora inicial;
- duración excesivamente prolongada;
- ausencia de intensidad máxima;
- valores anómalamente elevados;
- datos incompletos en variables principales.

Los registros sospechosos fueron excluidos o marcados para revisión. Este paso fue necesario para evitar que valores atípicos o errores de registro afectaran la clasificación local/regional y los gráficos comparativos.

Paso 4. Comparación temporal de eventos máximos

Cada evento máximo seleccionado en una estación fue comparado con los eventos registrados en las demás estaciones. La finalidad fue determinar si el evento máximo ocurrió de forma aislada o si coincidió temporalmente con eventos de lluvia en otros puntos de la red.

La condición de coincidencia temporal fue:

$$Inicio_{extremo} \leq Fin_{evento}$$

$$Fin_{extremo} \geq Inicio_{evento}$$

Esta condición permitió identificar si las ventanas temporales de dos eventos se superponían parcial o totalmente.

En términos prácticos, un evento máximo registrado en una estación fue considerado coincidente con otra estación cuando ambos eventos ocurrieron durante un intervalo temporal común. Este enfoque es coherente con el análisis de coincidencia de eventos, donde las relaciones entre series de eventos se evalúan mediante ventanas temporales y posibles desfases. (Donges et al., 2016)

Paso 5. Clasificación de eventos máximos según cobertura

A partir del número de estaciones con eventos coincidentes, los eventos máximos fueron clasificados en tres categorías:

Tabla 15. Clasificación en 3 categorías.

Clasificación	Criterio
Evento local	Registrado únicamente en una estación
Evento local compartido	Registrado en dos estaciones
Evento regional	Registrado en tres o más estaciones

Paso 6. Identificación de la estación núcleo

Para cada evento clasificado como regional, se identificó la **estación núcleo**, definida como la estación que registró la mayor intensidad máxima durante el intervalo coincidente.

$$Estación_{núcleo} = \text{estación con mayor } I_{max}$$

Esta variable permitió reconocer el punto donde el evento presentó mayor concentración de intensidad. Además, permitió diferenciar eventos regionales relativamente homogéneos de eventos regionales con un núcleo de lluvia más localizado.

Este paso es importante porque un evento puede ocurrir en varias estaciones, pero no necesariamente con la misma intensidad en todas.

Paso 7. Cálculo del índice de dominancia

Para evaluar la concentración espacial de la intensidad, se calculó un índice de dominancia:

$$ID = \frac{I_{max\ regional}}{I_{media\ estaciones}}$$

Donde:

- ID = índice de dominancia;
- $I_{max\ regional}$ = mayor intensidad máxima registrada entre las estaciones participantes;
- $I_{media\ estaciones}$ = intensidad media de las estaciones afectadas.

Este índice permitió clasificar el comportamiento del evento según la concentración de la intensidad:

Tabla 16. Interpretación de patrones

Patrón	Interpretación
Distribución relativamente homogénea	Intensidades similares entre estaciones
Núcleo moderadamente concentrado	Una estación destaca sobre las demás
Núcleo muy concentrado	La intensidad máxima se concentra claramente en una estación

Este procedimiento permitió evitar asumir que todo evento regional es espacialmente uniforme. La literatura sobre eventos extremos de precipitación también resalta que los eventos pueden presentar estructuras temporales y espaciales diferenciadas, incluso cuando forman parte de un mismo sistema regional. Su et al. señalan que las regiones con propiedades climatológicas similares pueden presentar comportamientos sincronizados, pero con características espacio-temporales propias.(Su et al., 2022)

Paso 8. Consolidación de eventos regionales extremos únicos

Los eventos regionales extremos identificados inicialmente podían aparecer duplicados, porque un mismo sistema de lluvia podía ser detectado como evento máximo en más de una estación.

Para evitar duplicidades, se consolidaron los eventos regionales mediante agrupamiento de coincidencias temporales. Los eventos máximos que compartían estaciones o eventos coincidentes fueron agrupados dentro de un mismo **evento regional extremo único**.

Cada evento regional extremo único quedó representado por:

- intervalo regional de inicio y fin;
- número de estaciones afectadas;
- estaciones participantes;
- intensidad máxima regional;
- estación núcleo;
- duración regional;
- índice de dominancia;
- patrón de intensidad;
- eventos extremos asociados.

Este paso permitió representar cada sistema de lluvia una sola vez, evitando contar repetidamente el mismo evento regional. En análisis de eventos, la agregación de coincidencias entre varias series permite obtener una medida integrada de interrelación entre eventos distribuidos espacialmente.(Donges et al., 2016)

B. Comparación de curvas envolventes entre estaciones

Paso 9. Integración de curvas envolventes por estación

Para la comparación de envolventes se utilizaron los productos generados previamente en el análisis por estación:

- envolvente máxima;
- envolvente mínima;
- curva representativa por mediana;
- evento representativo real;
- datos exportados del evento representativo.

En el análisis por estación, cada evento fue reorganizado en intervalos de 5 minutos y transformado a una escala temporal normalizada de 0 a 100 %, permitiendo comparar eventos de distinta duración bajo una misma estructura temporal.

Paso 10. Comparación de curvas representativas

La comparación entre estaciones se realizó principalmente a partir de la curva representativa por mediana.

Para cada estación se comparó:

- posición del pico representativo;
- magnitud del pico;
- concentración de lluvia al inicio, centro o final;
- amplitud de la envolvente;
- forma general de la curva;
- comportamiento adelantado, central o tardío.

El uso de curvas normalizadas permite comparar tormentas de distinta duración. Huff expresa las distribuciones temporales como porcentajes acumulados de lluvia y duración para facilitar la comparación entre tormentas, y considera la curva mediana como la representación central más útil dentro de una familia de curvas.(Huff, 1990)

Paso 11. Comparación de amplitud de envolventes

Se evaluó la amplitud entre la envolvente máxima y mínima de cada estación:

$$A(t) = E_{max}(t) - E_{min}(t)$$

Donde:

- $A(t)$ = amplitud de la envolvente en el tiempo normalizado ttt ;
- $E_{max}(t)$ = envolvente máxima;
- $E_{min}(t)$ = envolvente mínima.

Una amplitud mayor indica mayor variabilidad temporal entre los eventos de una estación. Una amplitud menor indica comportamiento más homogéneo.

Este indicador permitió comparar qué estaciones presentan eventos más variables y cuáles muestran patrones temporales más estables.

Paso 12. Comparación de eventos representativos reales

Luego de identificar el evento real más cercano a la curva representativa de cada estación, se compararon dichos eventos entre estaciones. A diferencia de la curva representativa, estos eventos conservan su duración real y su secuencia temporal observada.

Para cada evento representativo real se compararon:

- duración;
- precipitación acumulada;
- intensidad máxima;
- intensidad media;
- momento del pico;
- forma temporal;
- número de picos;
- persistencia de lluvia.

En el procedimiento aplicado, el evento representativo real fue seleccionado como aquel cuyo comportamiento temporal fue más cercano a la curva mediana de su estación, y luego fue graficado sin normalización para conservar su forma real.

4.5. Integración espacial-temporal

4.5.1. Articulación de los análisis previos

Una vez caracterizados los eventos de lluvia por estación y comparados temporalmente entre estaciones, se procedió a integrar los resultados obtenidos en una lectura espacial-temporal conjunta. Esta etapa tuvo como finalidad relacionar el comportamiento temporal de la precipitación con la ubicación geográfica de las estaciones, permitiendo interpretar la lluvia no solo en función de su magnitud, sino también de su forma temporal, intensidad extrema, horario de ocurrencia, coincidencia entre estaciones y posible desplazamiento espacial.

La integración espacial-temporal se estructuró a partir de cuatro bloques de análisis previamente desarrollados: curvas representativas y envolventes, eventos máximos, patrones horarios, y eventos regionales con rutas de propagación. Esta lógica se sustenta en el análisis de eventos como unidades temporales comparables, enfoque utilizado en estudios de eventos climáticos para evaluar relaciones, desfases y coincidencias entre series temporales. Donges

et al. plantean que el análisis de coincidencia de eventos permite cuantificar la fuerza, dirección y desfase temporal entre series de eventos, lo cual respalda el uso de eventos de lluvia como unidades de comparación entre estaciones.(Donges et al., 2016)

El primer bloque correspondió a las **curvas representativas y envolventes**, utilizadas para describir la forma temporal típica de la lluvia en cada estación. A partir de las curvas normalizadas, se identificó si los eventos de una estación tienden a concentrar la precipitación al inicio, en la parte media o hacia el final de su duración. Este componente permitió representar la “firma temporal” de cada estación, es decir, la forma característica en la que se distribuye la lluvia durante los eventos. El uso de curvas de distribución temporal se relaciona con los trabajos de Huff, quien desarrolló relaciones de distribución temporal de tormentas fuertes mediante porcentajes de duración y precipitación, permitiendo comparar tormentas con duraciones diferentes bajo una escala común.(Huff, 1990)

El segundo bloque correspondió al análisis de **eventos máximos**, empleado para identificar los episodios de mayor magnitud o intensidad dentro de cada estación. Este análisis permitió reconocer eventos extremos, diferenciar si su ocurrencia fue local o regional, identificar la estación núcleo y evaluar la concentración espacial de la intensidad. En este contexto, los eventos máximos no fueron interpretados únicamente como valores altos, sino como episodios capaces de revelar diferencias entre estaciones en términos de intensidad dominante, cobertura espacial y posible impacto hidrológico.

El tercer bloque correspondió a los **patrones horarios de ocurrencia**, orientados a reconocer las horas de inicio, pico y finalización de los eventos de lluvia. Este componente permitió evaluar si las estaciones presentan horarios similares de ocurrencia o si existen desfases temporales entre ellas. La comparación horaria es relevante en zonas andinas, donde el ciclo diurno de la precipitación puede variar según la topografía, la exposición de laderas, los valles y los procesos convectivos. Estudios en los Andes tropicales han mostrado que la precipitación presenta ciclos horarios diferenciados, y en los Andes centrales la orografía influye en la ocurrencia de máximos diurnos o nocturnos según la ubicación respecto a la cordillera.(Poveda et al., 2005)

El cuarto bloque correspondió a los **eventos regionales y rutas de propagación**, definidos a partir de la coincidencia temporal de eventos registrados en tres o más estaciones. Este componente permitió identificar estaciones participantes, intervalos regionales de inicio y fin, desfases entre estaciones y posibles recorridos espaciales de la lluvia. La comparación

de eventos entre estaciones se relaciona con enfoques de sincronización de eventos extremos de precipitación, donde la coincidencia temporal permite reconocer estructuras coherentes de lluvia en el espacio. Su et al. señalan que regiones con propiedades climatológicas similares pueden presentar coherencia temporal y espacial, y que el agrupamiento permite identificar estructuras sincronizadas de eventos extremos de lluvia.(Su et al., 2022)

De esta manera, el análisis espacial-temporal permitió pasar de una caracterización individual por estación a una interpretación conjunta de la red pluviométrica. Esto hizo posible reconocer estaciones con comportamiento temporal semejante, eventos extremos con cobertura local o regional, horarios dominantes de ocurrencia y posibles rutas de propagación dentro del área de estudio.

4.5.2. Matriz de integración espacial-temporal

Para integrar los resultados obtenidos en los análisis previos, se construyó una matriz metodológica que relaciona cada bloque de análisis con sus variables principales, el insumo utilizado y su aporte a la interpretación espacial-temporal de la precipitación. Esta matriz permitió organizar los resultados y establecer cómo cada componente contribuye a la regionalización del comportamiento de la lluvia.

Tabla 17. Matriz de integración espacial-temporal de los eventos de lluvia

Bloque de análisis	Insumo principal	Variable o indicador integrado	Escala de análisis	Aporte espacial-temporal
Curvas representativas	Curva mediana por estación	Forma temporal típica del evento	Estación	Permite identificar estaciones con patrones similares de distribución temporal de lluvia.
Envolventes	Envolvente máxima, mínima y representativa	Rango de variabilidad temporal	Estación	Evalúa la dispersión del comportamiento temporal de los eventos dentro de cada estación.
Eventos máximos	Top de eventos por intensidad o acumulado	Intensidad máxima, acumulado, duración y estación núcleo	Estación / red	Permite identificar eventos extremos y diferenciar su comportamiento local, compartido o regional.
Eventos regionales	Tabla de coincidencias temporales	Número de estaciones participantes, inicio regional, fin regional y duración regional	Red de estaciones	Define la cobertura temporal y espacial de los eventos de lluvia con presencia en tres o más estaciones.
Patrones horarios	Horas de inicio, pico y fin	Hora de ocurrencia y desfase temporal	Estación / red	Permite reconocer diferencias horarias entre estaciones y posibles desfases en el desarrollo de la lluvia.

Rutas de propagación	Eventos regionales ordenados por hora de inicio	Orden de activación de estaciones	Red de estaciones	Permite inferir posibles direcciones de desplazamiento de la lluvia durante eventos regionales.
Distancia entre estaciones	Coordenadas UTM	Distancia euclidiana entre puntos de monitoreo	Espacial	Apoya la interpretación de similitud o diferencia entre estaciones según su separación geográfica.
Clúster Ward	Matriz de similitud de curvas representativas	Grupo de comportamiento temporal	Espacial-temporal	Permite definir zonas o grupos de estaciones con comportamiento temporal semejante.
Representación cartográfica	Coordenadas, grupos y eventos regionales	Mapas, polígonos, elipses, flechas y puntos de estación	Espacial	Permite visualizar la regionalización, la cobertura de eventos y las posibles rutas de propagación.

4.5.3. Criterios de interpretación conjunta

Para la interpretación espacial-temporal de los eventos de lluvia, se establecieron criterios de lectura conjunta a partir de la integración de los análisis previos. Estos criterios permitieron relacionar la forma temporal de los eventos, la distancia entre estaciones, la ocurrencia de eventos máximos, la coincidencia regional y el orden temporal de activación de las estaciones.

La comparación se basó en el tratamiento de los eventos de lluvia como series temporales, donde la coincidencia, el desfase y la sincronización entre estaciones permiten reconocer relaciones espaciales y temporales. El análisis de coincidencia de eventos permite evaluar relaciones temporales, dirección y desfase entre series de eventos, mientras que los estudios de eventos extremos de precipitación reconocen que regiones con comportamiento climatológico semejante pueden presentar coherencia temporal y espacial.

Tabla 18. Criterios de interpretación conjunta para el análisis espacial-temporal

Criterio integrado	Condición evaluada	Interpretación metodológica
Similitud temporal + cercanía espacial	Dos o más estaciones presentan curvas representativas similares y se encuentran próximas geográficamente.	Se interpreta como una posible zona con comportamiento temporal semejante de lluvia.
Cercanía espacial + diferencia temporal	Estaciones cercanas presentan curvas representativas diferentes, picos en momentos distintos o distinta concentración temporal.	Se interpreta como variabilidad local del comportamiento de lluvia.
Evento máximo en una sola estación	Un evento extremo de alta intensidad o acumulado se registra únicamente en una estación.	Se interpreta como evento extremo local.
Evento máximo en dos estaciones	Un evento extremo coincide temporalmente en dos estaciones.	Se interpreta como evento local compartido o de cobertura limitada.

Evento máximo en tres o más estaciones	Un evento extremo coincide temporalmente en tres o más estaciones.	Se interpreta como evento extremo regional.
Estación con mayor intensidad durante un evento regional	Una estación registra la intensidad máxima dentro del conjunto de estaciones participantes.	Se interpreta como estación núcleo del evento.
Estación núcleo recurrente	Una estación aparece repetidamente como núcleo en diferentes eventos regionales o máximos.	Se interpreta como zona con mayor recurrencia de intensidad extrema.
Diferencia horaria entre estaciones	Las estaciones presentan distintos horarios de inicio, pico o fin durante eventos comparables.	Se interpreta como desfase temporal entre puntos de monitoreo.
Activación secuencial de estaciones	Durante un evento regional, las estaciones registran el inicio de lluvia en un orden temporal definido.	Se interpreta como posible ruta de propagación de la lluvia.
Curvas representativas agrupadas por clúster	Estaciones agrupadas mediante Ward presentan formas temporales similares.	Se interpreta como grupo espacial-temporal de comportamiento semejante.
Clúster sin continuidad espacial clara	Estaciones agrupadas temporalmente no se encuentran próximas geográficamente.	Se interpreta como similitud temporal no necesariamente explicada por cercanía espacial.
Alta amplitud entre envolvente máxima y mínima	La estación presenta gran diferencia entre eventos extremos y eventos mínimos.	Se interpreta como alta variabilidad temporal de los eventos en esa estación.

Baja amplitud entre envolvente máxima y mínima	La estación presenta curvas más concentradas dentro de un rango estrecho.	Se interpreta como comportamiento temporal más homogéneo.
---	---	---

4.5.4. Flujograma de integración metodológica

Figura 35. Flujograma de integración espacial-temporal de los análisis de eventos de lluvia

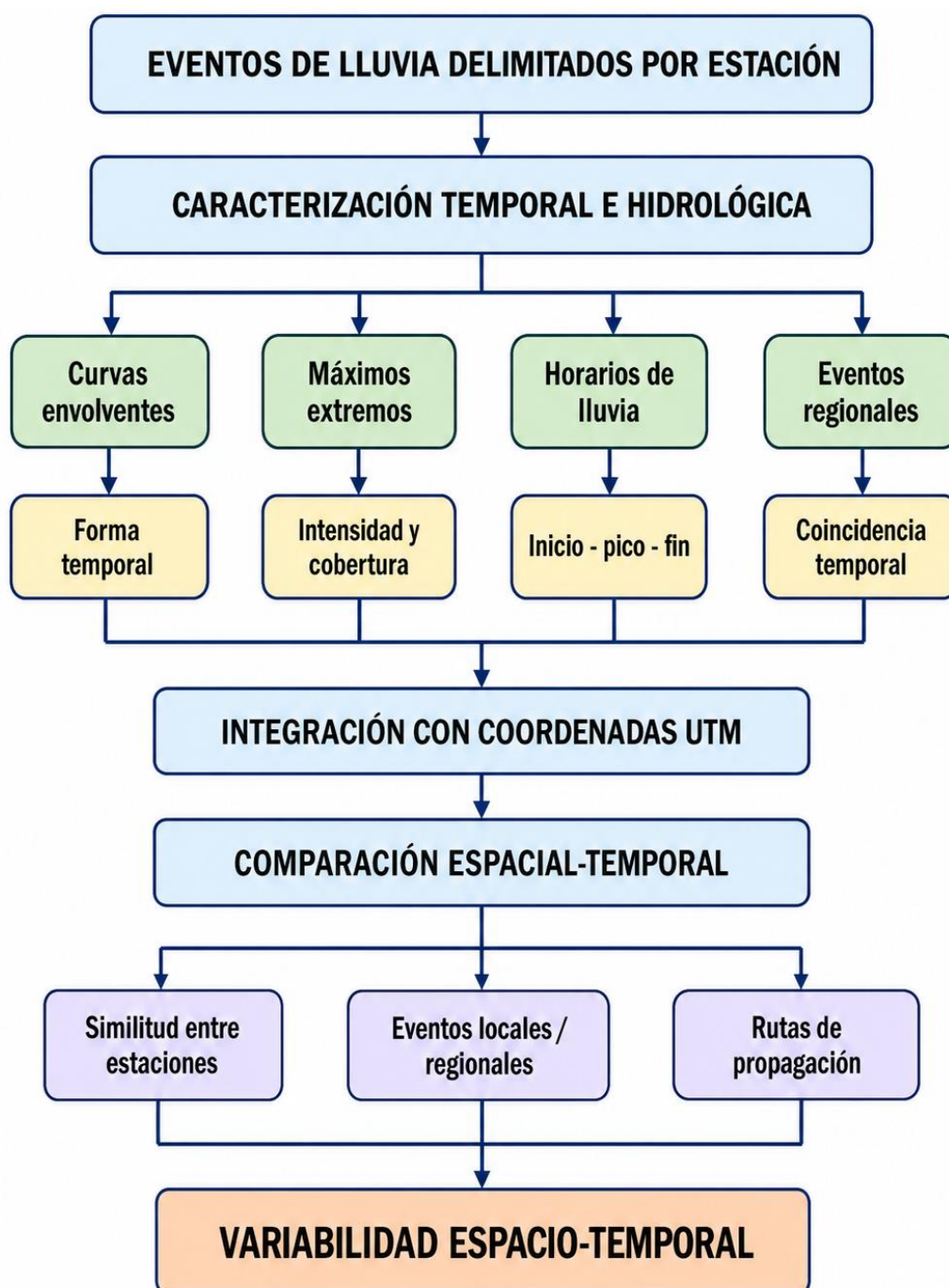
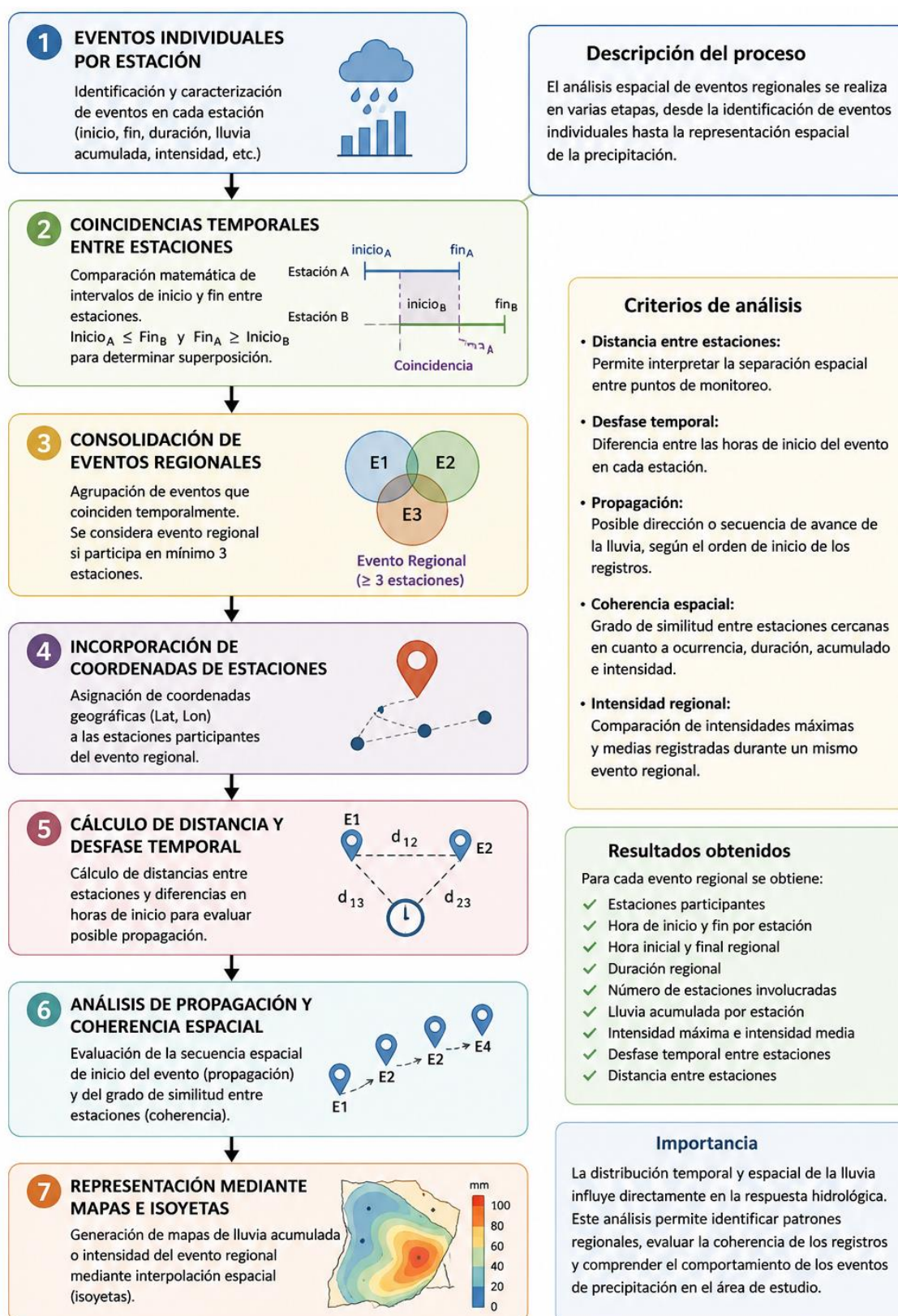


Figura 36. Flujograma del análisis espacial de eventos regionales



CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Eventos de lluvia identificados por estación

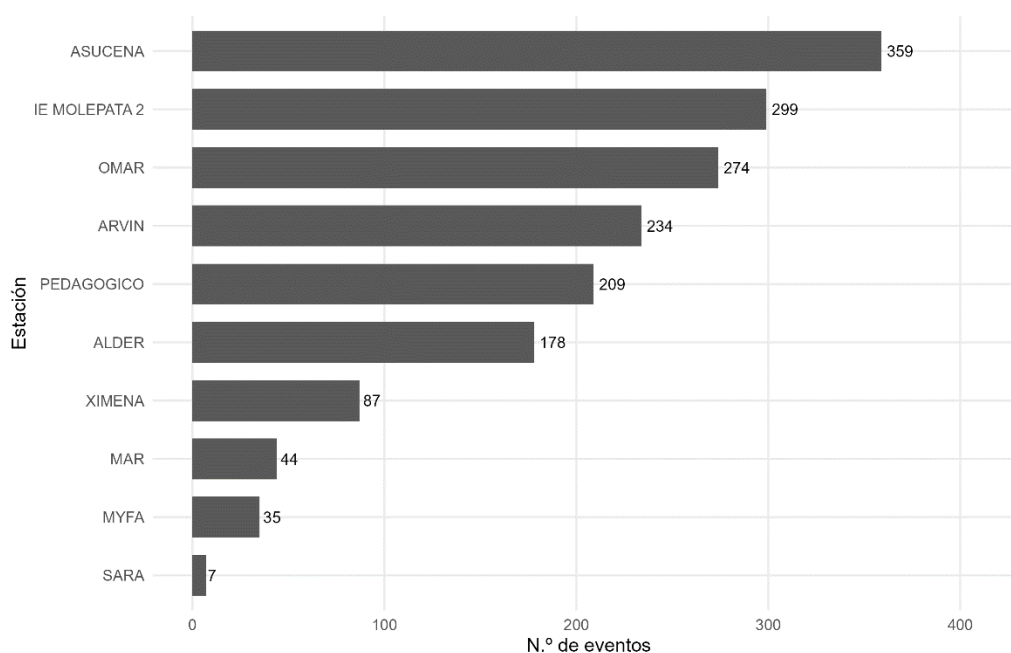
En esta sección se presentan los eventos de lluvia identificados en las diez estaciones pluviométricas consideradas en el estudio. La delimitación de eventos se realizó a partir del criterio IETD de 30 minutos, definido en la metodología, lo que permitió separar episodios independientes de precipitación y obtener una base comparable entre estaciones. A partir de ello, se resume el número de eventos registrados, la precipitación acumulada total y los principales parámetros generales de cada estación.

Tabla 19. Resumen general de eventos de lluvia identificados por estación

Estación	N.º de eventos	Lluvia total registrada (mm)	Duración media (min)	Intensidad máxima (mm/h)	Tipo temporal dominante
ASUCENA	359	2315.04	166.2	30240	Tipo 4
IE MOLEPATA 2	299	16288.44	316.09	1159.2	Tipo 4
OMAR	274	1951.74	258.31	705.6	Tipo 4
ARVIN	234	6315.54	401.8	117484.02	Tipo 4
PEDAGOGICO	209	7034.58	203.3	913407.41	Tipo 4
ALDER	178	4309.2	258.77	30240	Tipo 4
XIMENA	87	55817.58	929.87	30240	Tipo 4
MAR	44	3887.52	2133.43	30240	Tipo 4
MYFA	35	94.5	776.62	21600	Tipo 4
SARA	7	2043.72	836.58	37649.01	Tipo 4

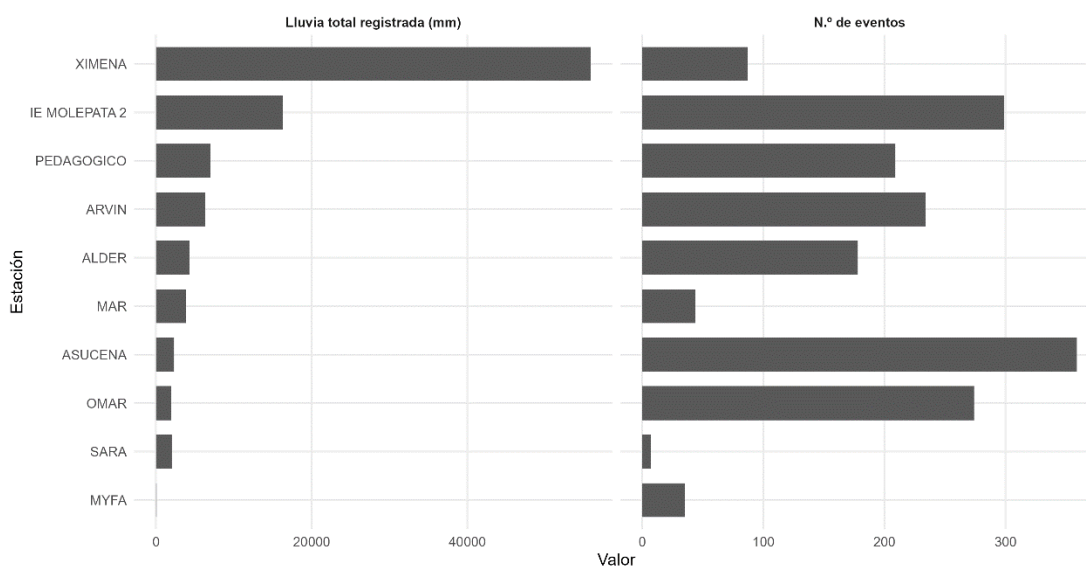
Nota. Los eventos fueron delimitados considerando un periodo seco mínimo de 30 minutos entre episodios consecutivos de precipitación.

Figura 37. Número de eventos de lluvia identificados por estación.



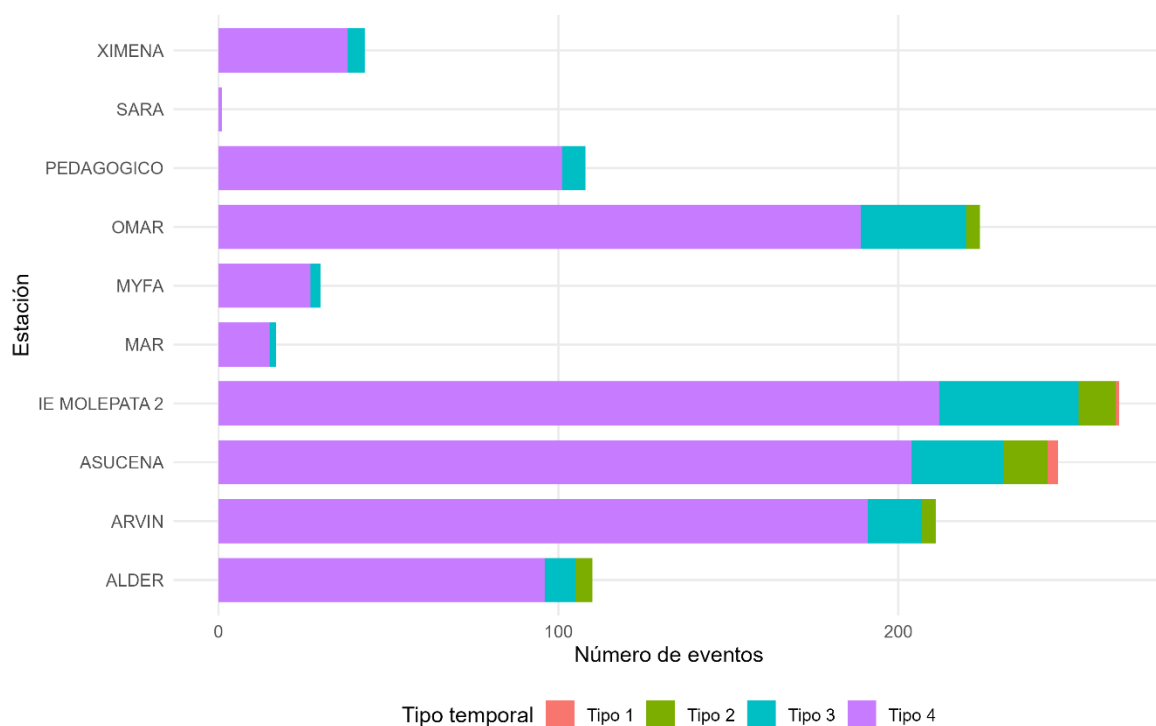
Los resultados muestran diferencias en la cantidad de eventos de lluvia identificados entre las estaciones. La estación Asucena presentó el mayor número de eventos, mientras que la estación Sara registró la menor cantidad. Este comportamiento evidencia que la frecuencia de ocurrencia de lluvia no fue homogénea en toda la red de monitoreo.

Figura 38. Comparación entre número de eventos identificados y precipitación acumulada total por estación.



Asimismo, se observa que la mayor cantidad de eventos no necesariamente coincide con la mayor precipitación acumulada. Esto indica que algunas estaciones registraron lluvias más frecuentes, pero de menor magnitud, mientras que otras concentraron mayores volúmenes en un menor número de eventos.

Figura 39. Frecuencia de tipo temporales de lluvia por estación.



La Figura 39 evidencia el predominio del **Tipo 4** en casi todas las estaciones, lo que indica que la lluvia se concentró principalmente en el último cuartil del evento. **IE Molepata 2, Asucena, Arvin y Omar** presentan mayor cantidad y diversidad de tipos temporales, mientras que **Mar, Myfa, Ximena, Pedagógico y Sara** muestran menor frecuencia y predominio casi exclusivo del Tipo 4.

5.2 Caracterización temporal e hidrológica de los eventos por estación

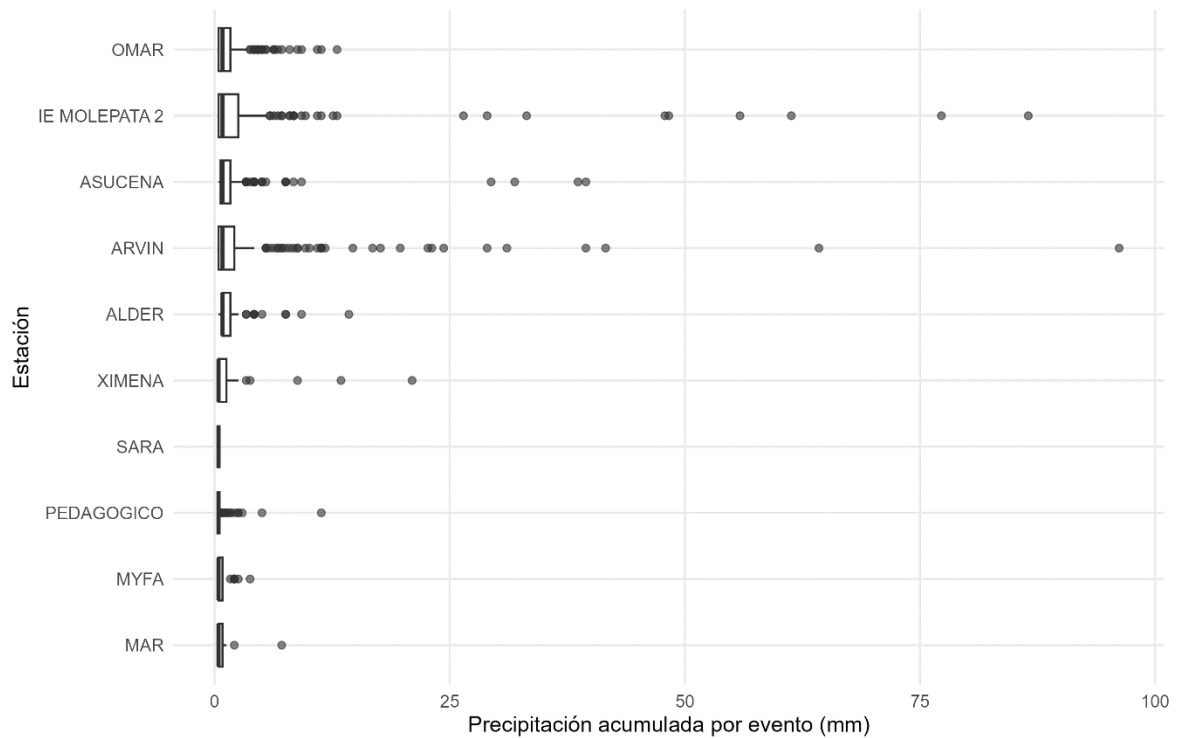
En la Tabla 20 se presentan los principales parámetros hidrológicos y temporales de los eventos de lluvia identificados en cada estación. Se consideraron la duración mediana, la precipitación acumulada mediana, la intensidad máxima absoluta, la intensidad media promedio y el tipo temporal dominante, con el fin de comparar el comportamiento general de la precipitación entre estaciones.

Tabla 20. Parámetros principales de los eventos de lluvia por estación

Estacion	N.º de eventos válidos	Duración mediana (min)	Acumulado mediano (mm)	Intensidad máxima absoluta (mm/h)	Intensidad media promedio (mm/h)	Tipo temporal dominante
ASUCENA	247	87.27	0.84	294.16	6.98	Tipo 4
ARVIN	211	161	0.84	277.2	23.14	Tipo 4
IE MOLEPATA 2	265	82.5	0.84	277.2	19.86	Tipo 4
OMAR	224	80	0.84	277.2	23.72	Tipo 4
ALDER	110	87.14	0.84	213.26	4.34	Tipo 4
MAR	17	145.5	0.42	48.43	1.89	Tipo 4
XIMENA	43	90.97	0.42	41.03	2.36	Tipo 4
MYFA	30	125.89	0.42	25.2	1.07	Tipo 4
PEDAGOGICO	108	122.92	0.42	25.2	0.78	Tipo 4
SARA	1	94.75	0.42	0.27	0.27	Tipo 4

Los resultados evidencian diferencias en el comportamiento de los eventos de lluvia entre estaciones. Algunas estaciones presentan eventos de mayor duración, mientras que otras registran eventos más cortos, pero con mayores valores de intensidad. Esto indica que la precipitación no se comporta de manera uniforme en toda el área de estudio, sino que varía tanto en magnitud como en estructura temporal.

Figura 40. Distribución de la precipitación acumulada por evento en cada estación



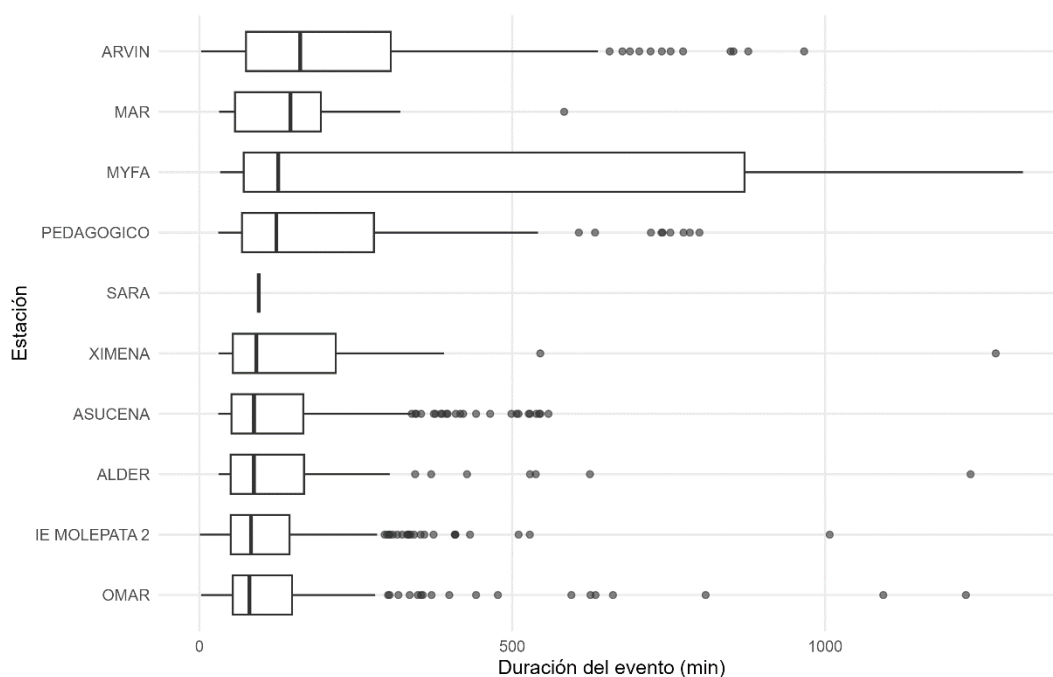
La distribución de la precipitación acumulada por evento en cada estación. Los eventos se concentran en valores bajos de precipitación acumulada, como se evidencia en la reducida amplitud de las cajas en la mayoría de estaciones. No obstante, se observan valores atípicos en varias de ellas, lo que indica la presencia de eventos aislados con acumulados significativamente mayores al comportamiento típico.

Las estaciones **Omar**, **IE Molepata 2** y **Arvin** muestran mayor dispersión y una presencia más marcada de valores extremos, lo que refleja una mayor variabilidad en la magnitud de sus eventos. En cambio, **Mar**, **Myfa**, **Pedagógico** y **Sara** presentan distribuciones más compactas, asociadas a un comportamiento más homogéneo.

Horizontal box plot showing the maximum intensity of rain events (mm/h) for ten stations. The x-axis represents the maximum intensity per event (mm/h), ranging from 0 to 300. The y-axis lists the stations. The plot displays the median (vertical line inside the box), the interquartile range (the box), and the range of the data (whiskers). Individual data points are overlaid as small circles.

Estación	Minimum (mm/h)	Q1 (mm/h)	Median (mm/h)	Q3 (mm/h)	Maximum (mm/h)
IE MOLEPATA 2	0	~5	~15	~35	100
ARVIN	0	~2	~10	~35	100
OMAR	0	~2	~10	~35	100
XIMENA	0	~2	~5	~10	~50
ALDER	0	~2	~5	~10	~70
ASUCENA	0	~5	~10	~20	~100
MAR	0	~1	~2	~5	~20
MYFA	0	~1	~2	~5	~10
PEDAGOGICO	0	~1	~2	~5	~10
SARA	0	~1	~2	~5	~10

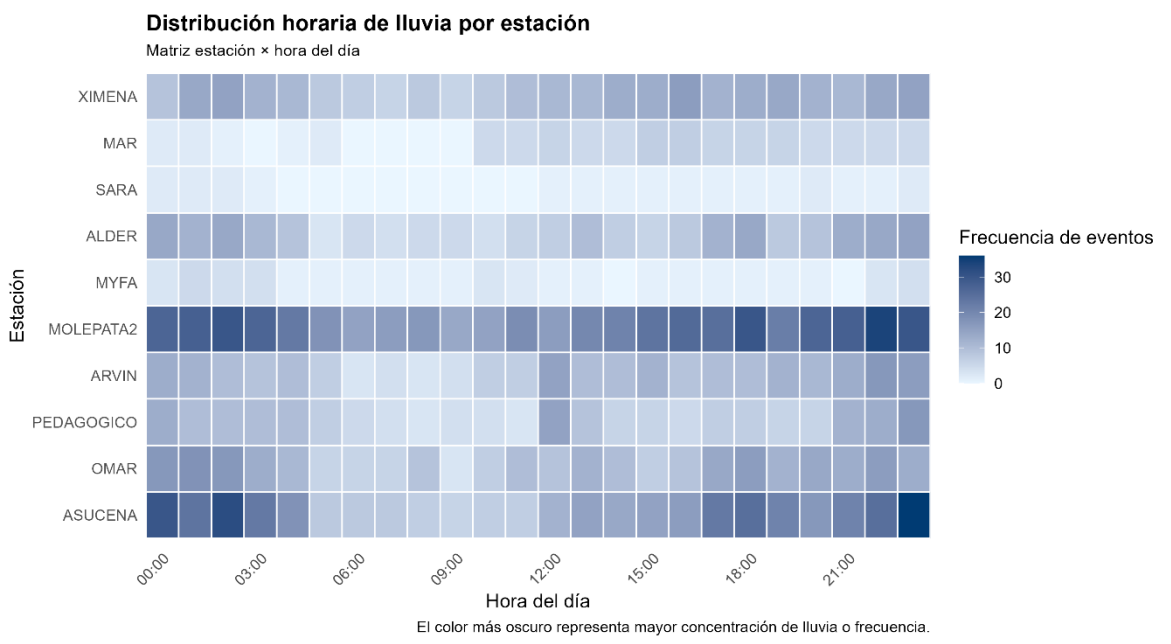
Figura 42. Distribución de la duración de eventos de lluvia por estación



La Figura 43 muestra que la duración de los eventos varía entre estaciones. **Myfa** y **Arvin** presentan mayor amplitud, con eventos más prolongados. **Omar, IE Molepata 2, Alder, Asucena y Ximena** registran valores atípicos de larga duración. En cambio, **Sara** muestra baja variabilidad. En general, predominan eventos de duración baja a media, con algunos episodios persistentes.

5.3 Análisis horario de ocurrencia de la precipitación

Figura 43. Mapa de calor de la frecuencia horaria de ocurrencia de eventos de lluvia por estación

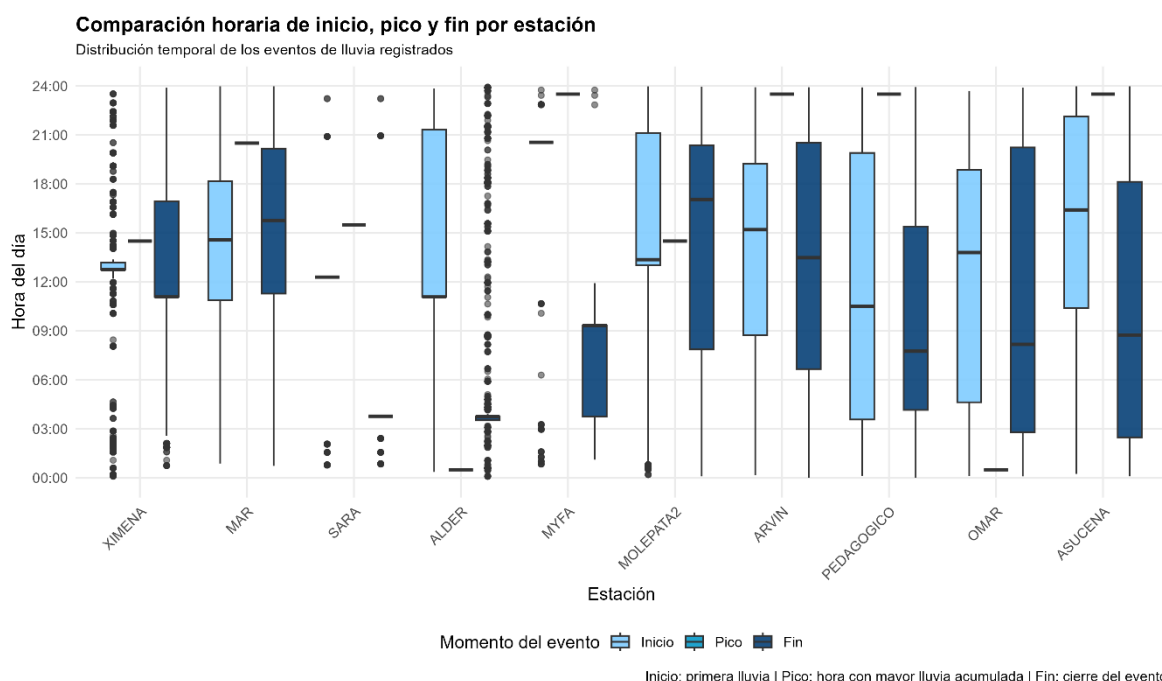


La Figura 43 muestra la frecuencia horaria de eventos de lluvia por estación. La mayor recurrencia se concentra en horas nocturnas, principalmente entre las **22:00 y 23:00 h**. **Asucena** registró el valor máximo a las **23:00 h**, con **36 eventos**, seguida de **Molepata 2**, con **34 eventos** a las **22:00 h**.

En **Arvin, Pedagógico y Alder**, las mayores frecuencias también se ubicaron entre las **22:00 y 23:00 h**, con **17, 17 y 15 eventos**, respectivamente. **Omar** y **Myfa** presentaron máximos a la **01:00 h**, con **18 y 5 eventos**. **Mar** mostró un patrón diferente, con mayor frecuencia en la tarde, a las **15:00 y 16:00 h**, con **7 eventos**. **Sara** presentó baja frecuencia horaria, con máximos de **2 eventos**.

En conjunto, la figura indica que la lluvia ocurrió con mayor frecuencia durante la **noche**, aunque con diferencias entre estaciones.

Figura 44. Comparación de horas de inicio, pico y finalización de eventos por estación



La Figura 45 muestra diferencias horarias entre el inicio, pico y fin de los eventos de lluvia. Los picos se concentran principalmente entre la **tarde y noche**, con mayor presencia entre **13:00 y 18:00 h**. Las estaciones **Mar, Molepata 2, Arvin y Asucena** presentan picos más definidos en ese rango, mientras que **Omar y Pedagógico** muestran mayor dispersión.

Los inicios presentan mayor variabilidad, especialmente en **Molepata 2, Arvin, Pedagógico, Omar y Asucena**, donde los eventos pueden empezar desde la madrugada hasta la noche. El fin de los eventos se ubica con mayor frecuencia hacia la **tarde-noche**, entre **18:00 y 24:00 h**. Esto indica un desfase temporal entre estaciones, asociado a diferencias en la ocurrencia y evolución de los eventos de lluvia.

5.4 Eventos máximos por estación

Tabla 21. Eventos máximos principal por estación.

Estación	Evento máximo	Fecha	Duración	Acumulado	Intensidad máxima	Tipo temporal
Alder	4	26/01/2026	6.6 min	61.32	715.68	Pico temprano
Arvin	215	22/03/2026	11 min	97.86	529.2	Pico temprano
Asucena	277	17/03/2026	38.9 min	104.16	665.28	Pico temprano
Mar	36	30/01/2026	472.5 min	1805.58	599.76	Pico tardío
Molepata2	176	07/03/2026	118 min	87.78	413.28	Pico tardío

Myfa	8	03/03/2026	15.2 min	2.1	15.12	Pico temprano
Omar	50	31/01/2026	213 min	215.88	322.56	Pico central
Pedagogico	187	22/03/2026	11 min	126.84	685.44	Pico temprano
Sara	7	02/03/2026	20.8 min	6.72	50.4	Pico temprano
Ximena	52	11/03/2026	70 min	280.56	539.28	Pico tardío

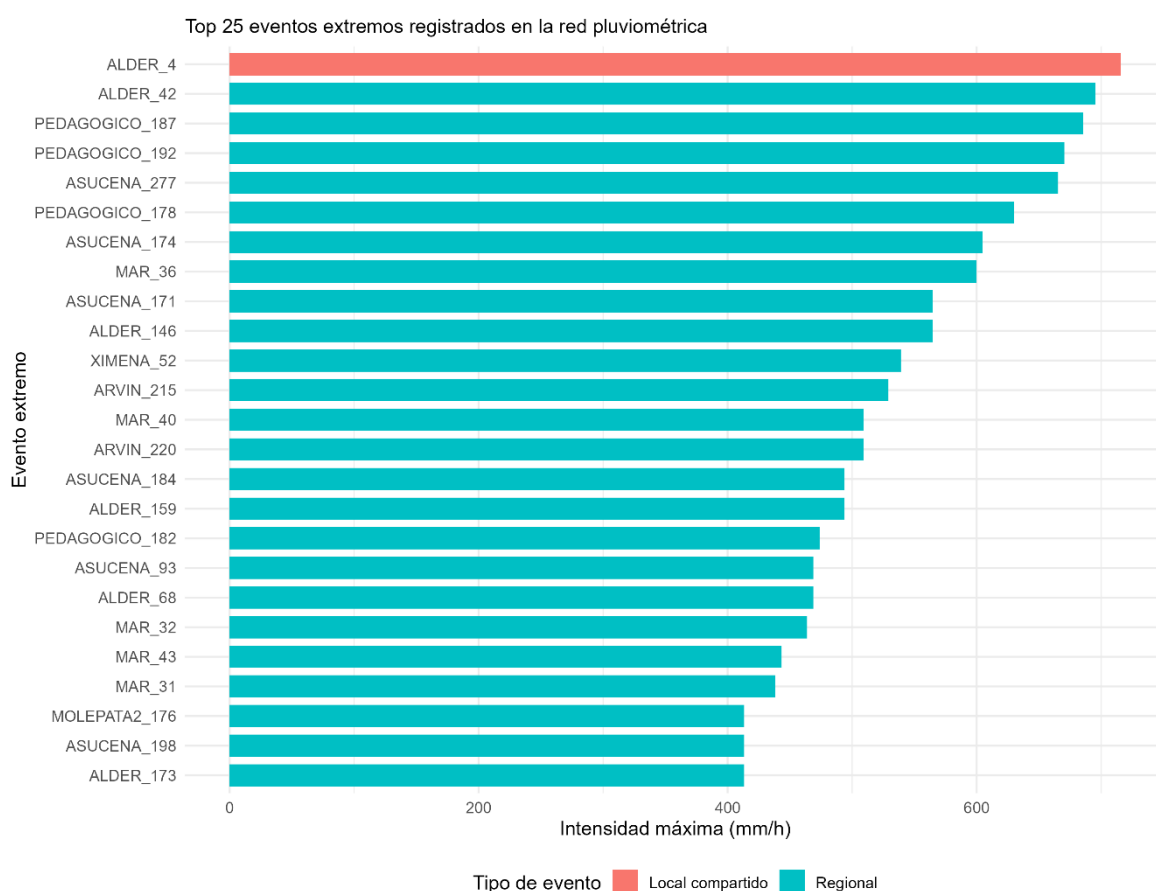
El evento máximo de **Mar** destaca por el mayor volumen acumulado, con **1805.58 mm**, asociado a una duración prolongada de **472.5 min**, equivalente a aproximadamente **7.9 horas**. Esto evidencia un evento de carácter acumulativo y persistente. En contraste, el **evento 4 de Alder** presentó la mayor intensidad máxima, con **715.68 mm/h**, en solo **6.6 min**, y fue clasificado como **pico temprano**, lo que indica una lluvia muy concentrada al inicio del evento. Por tanto, los eventos máximos muestran dos comportamientos extremos: uno dominado por el volumen y la duración, y otro por la intensidad en corto tiempo.

El evento máximo de **Mar**, identificado como **evento 36**, no corresponde a un evento local aislado. Según la matriz de asociación, este evento forma parte del **evento regional extremo ERE_06**, registrado entre el **30/01/2026 y 31/01/2026**, con una duración regional de **718.4 min**, equivalente a **12.0 horas**. Este evento afectó a **7 estaciones**: Alder, Arvin, Asucena, Mar, Molepata 2, Omar y Ximena.

Dentro de este evento regional, **Mar_36** presentó el mayor volumen individual, con **1805.58 mm** y una duración de **472.5 min**. Su pico ocurrió al **76.2 %** del desarrollo del evento, por lo que se clasifica como **pico tardío**. Esto indica que el mayor aporte de lluvia en Mar se concentró hacia la fase final del evento, no al inicio.

A diferencia de Mar, el núcleo de mayor intensidad regional se ubicó en **Alder**, con el evento **Alder_42**, que alcanzó **695.52 mm/h**. Esto muestra que el evento regional tuvo dos comportamientos: **Mar concentró el mayor volumen acumulado**, mientras que **Alder concentró la mayor intensidad**. Bonito caos atmosférico, pero al menos los datos lo confiesan.

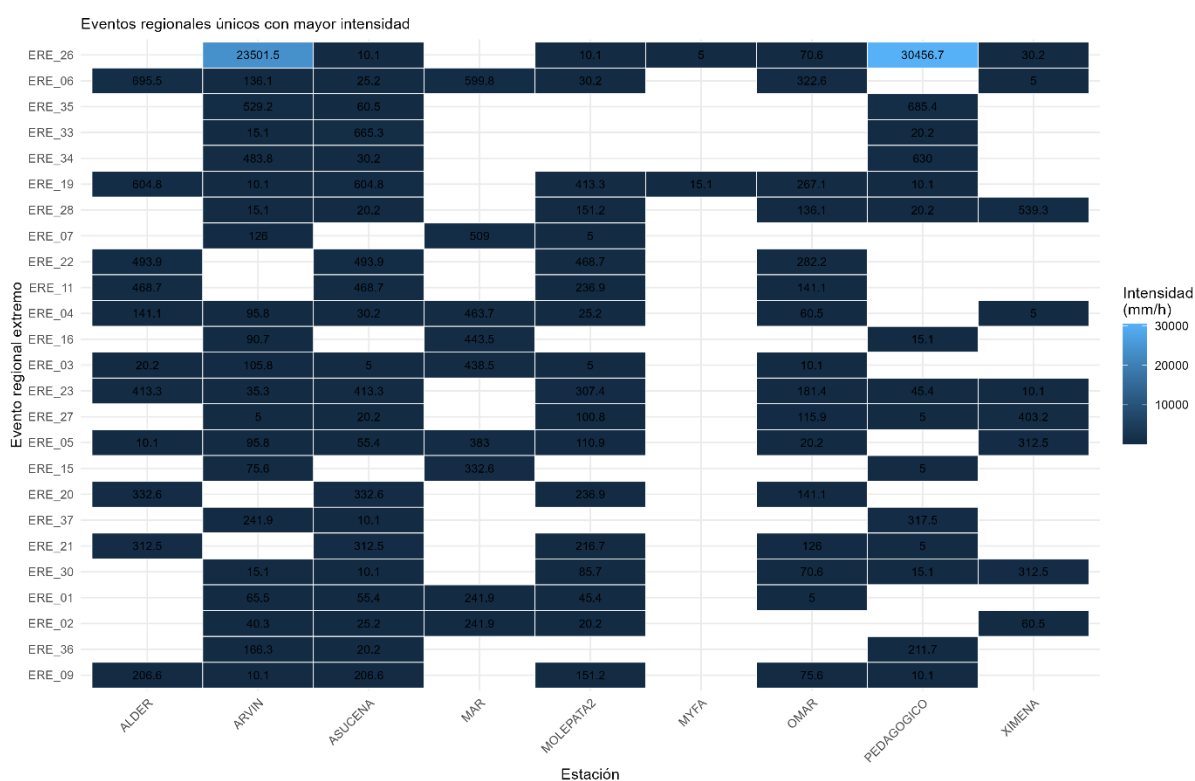
Figura 45. Ranking de eventos máximos de intensidad



La figura muestra los **25 eventos con mayor intensidad máxima** registrados en la red pluviométrica. El evento de mayor intensidad corresponde a **ALDER_4**, clasificado como **local compartido**, con una intensidad aproximada de **715.68 mm/h**. Este evento se diferencia de los eventos regionales porque no afectó a gran parte de la red, sino que estuvo asociado principalmente a **Alder y Omar**.

En el ranking también aparecen eventos regionales importantes, como **ALDER_42**, **PEDAGOGICO_187**, **ASUCENA_277**, **MAR_36**, **XIMENA_52** y **ARVIN_215**. Esto indica que las intensidades máximas más altas no siempre corresponden a eventos regionales amplios; también pueden presentarse en eventos localizados o compartidos entre pocas estaciones.

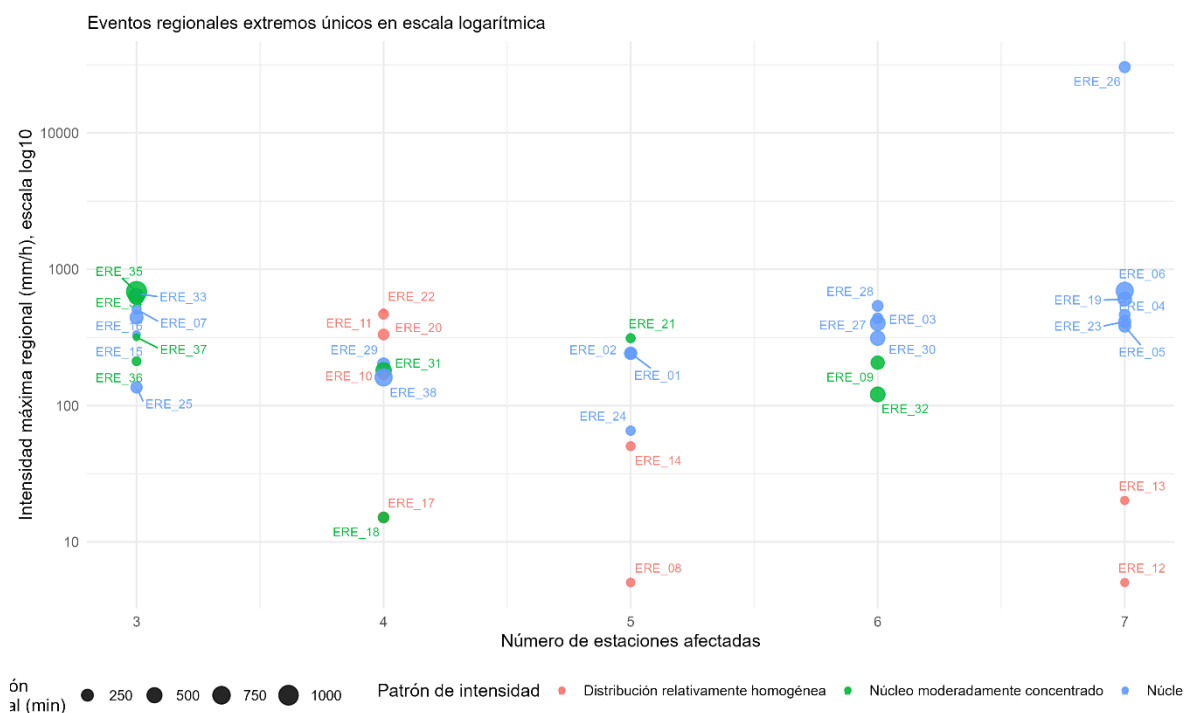
Figura 46. Distribución de intensidad máxima por evento regional extremo



La figura permite comparar la intensidad máxima registrada en cada estación dentro de los eventos regionales extremos. El evento **ERE_06** agrupa el evento máximo **MAR_36** y otros eventos extremos asociados, como **ALDER_42**, **ARVIN_39** y **OMAR_50**.

En este evento regional, **Mar** presentó el mayor volumen acumulado como evento individual, con **1805.58 mm**, mientras que **Alder** concentró la mayor intensidad del evento regional, con **695.52 mm/h**. Esto muestra que dentro de un mismo evento regional pueden existir comportamientos distintos: una estación puede dominar en volumen y otra en intensidad.

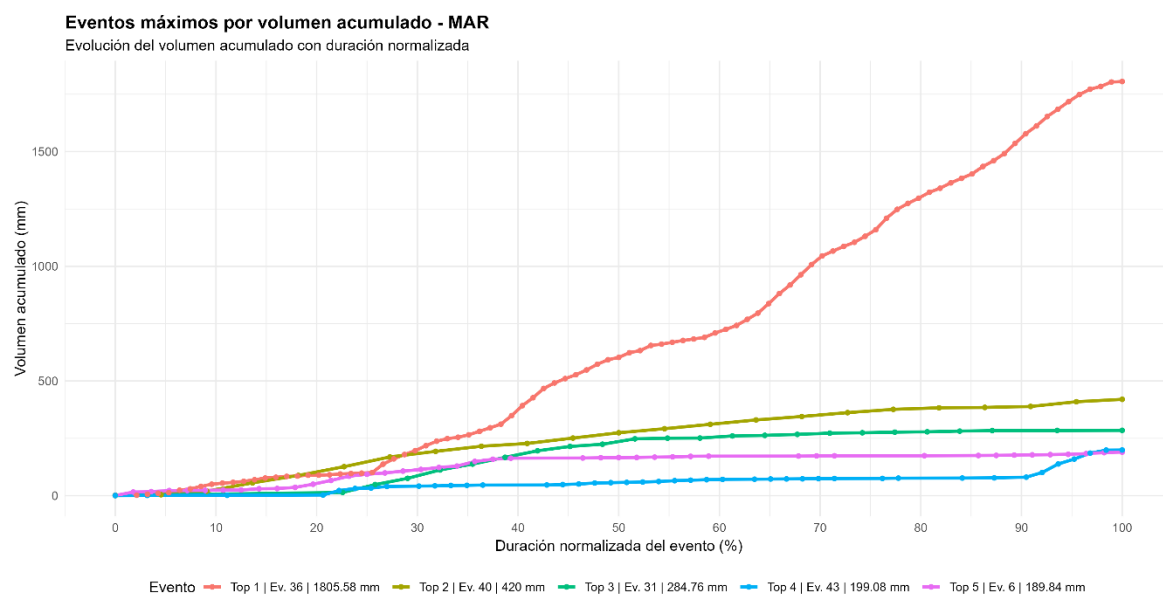
Figura 47. Relación entre intensidad máxima y extensión espacial



La figura relaciona la **intensidad máxima regional** con el **número de estaciones afectadas**. El evento **ERE_06** afectó a **7 estaciones**: Alder, Arvin, Asucena, Mar, Molepata 2, Omar y Ximena. Su duración regional fue de **718.4 min**, equivalente a casi **12 horas**, con un desfase de inicio de **145.1 min**.

Esto confirma que el evento asociado a **MAR_36** no fue local, sino parte de un evento regional de amplia cobertura. Además, el patrón fue clasificado como **núcleo muy concentrado**, porque la mayor intensidad se concentró en **Alder**, mientras que el mayor volumen se presentó en **Mar**.

Figura 48. Evolución del volumen acumulado en los eventos máximos de Mar

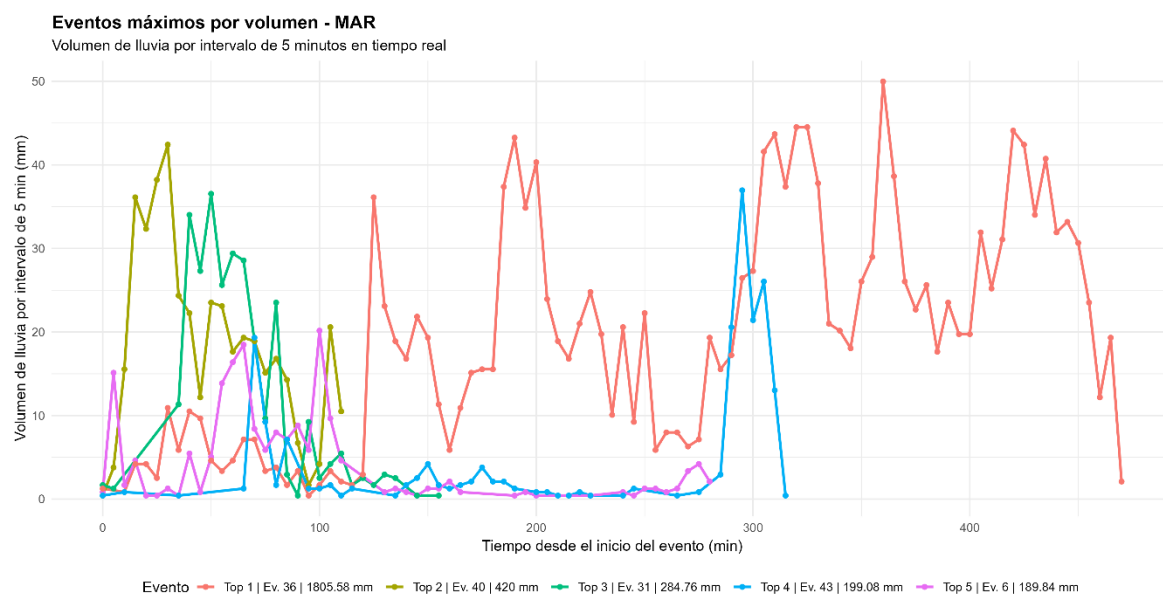


Top	Evento	Duración h	Volumen total mm	Vol. máx 5min mm	Pico %	N° picos	Simetría
1	36	7.88	1805.58	49.98	76.2	19	Pico tardío
2	40	1.83	420.00	42.42	27.4	6	Pico temprano
3	31	2.64	284.76	36.54	31.5	6	Pico temprano
4	43	5.27	199.08	36.96	93.3	6	Pico tardío
5	6	4.67	189.84	20.16	35.7	9	Pico central

La figura muestra que el evento **MAR_36** se separa claramente de los demás eventos máximos de la estación. Alcanzó **1805.58 mm** en **7.88 horas**, superando ampliamente al segundo evento de Mar, que acumuló **420 mm**.

La curva de **MAR_36** presenta crecimiento sostenido durante casi todo el evento, con mayor incremento hacia la parte final. Su pico ocurrió al **76.2 %** de la duración, por eso se clasifica como **pico tardío**. Esto indica un evento de acumulación prolongada, no una lluvia breve.

Figura 49. Volumen de lluvia por intervalos de 5 minutos en los eventos máximos de Mar



Top	Evento	Duración h	Volumen total mm	Vol. máx 5min mm	Pico %	N° picos	Simetría
1	36	7.88	1805.58	49.98	76.2	19	Pico tardío
2	40	1.83	420.00	42.42	27.4	6	Pico temprano
3	31	2.64	284.76	36.54	31.5	6	Pico temprano
4	43	5.27	199.08	36.96	93.3	6	Pico tardío
5	6	4.67	189.84	20.16	35.7	9	Pico central

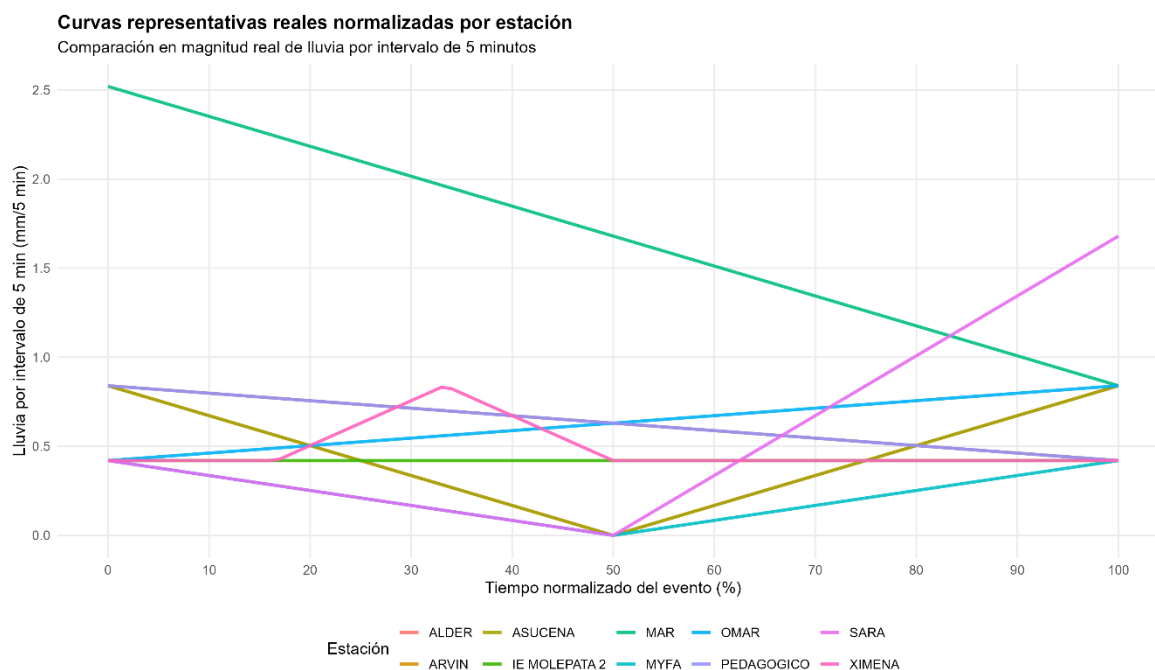
Esta figura muestra el comportamiento interno de los eventos máximos de Mar. En **MAR_36**, la lluvia se distribuyó en varios pulsos durante el evento y alcanzó un volumen máximo de **49.98 mm en 5 minutos**. La mayor actividad se concentra hacia la fase final, coincidiendo con su clasificación de **pico tardío**.

En cambio, otros eventos de Mar, como **MAR_40** y **MAR_31**, presentan picos más tempranos y menor acumulado total. Esto diferencia a **MAR_36** como un evento extremo por duración, volumen y persistencia.

En conjunto, los gráficos muestran que los eventos extremos no responden a un solo patrón. **ALDER_4** representa un evento extremo por **alta intensidad en corto tiempo**, compartido principalmente con **Omar**. En cambio, **MAR_36** representa un evento extremo por **volumen acumulado y duración**, y forma parte del evento regional **ERE_06**, que afectó a **7 estaciones**. Dentro de este evento regional, **Mar** concentró el mayor volumen, mientras que **Alder** concentró la mayor intensidad. Esto evidencia que la intensidad máxima y el volumen acumulado pueden tener núcleos distintos dentro de un mismo sistema de lluvia.

5.5. Curvas envolventes y eventos representativos por estación

Figura 50. Curvas representativas del comportamiento de los eventos por estación.



La Figura 51 muestra diferencias en la forma temporal de la lluvia entre estaciones. **Mar** presenta la mayor magnitud representativa, con valores cercanos a **2.5 mm/5 min** al inicio del evento y una disminución progresiva hacia el final, lo que indica un patrón de concentración inicial. En cambio, estaciones como **Sara** y **Omar** muestran un comportamiento creciente, asociado a una mayor concentración de lluvia hacia la fase final del evento. **Ximena** presenta un pico intermedio, mientras que **IE Molepata 2** mantiene una distribución casi uniforme. Estos patrones evidencian que la lluvia no solo varía en cantidad, sino también en la forma en que se distribuye durante el evento.

Figura 51. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Mar.

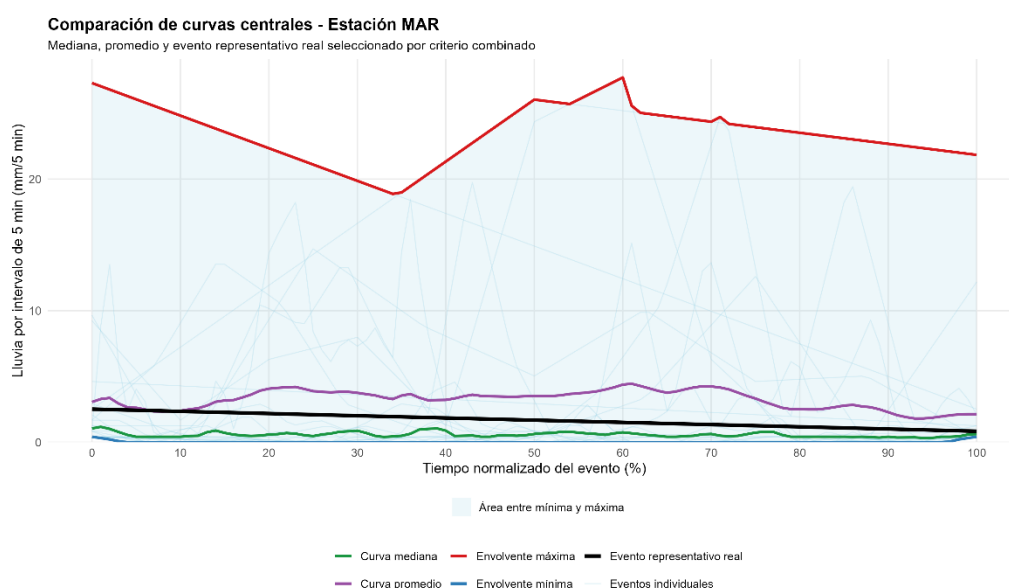
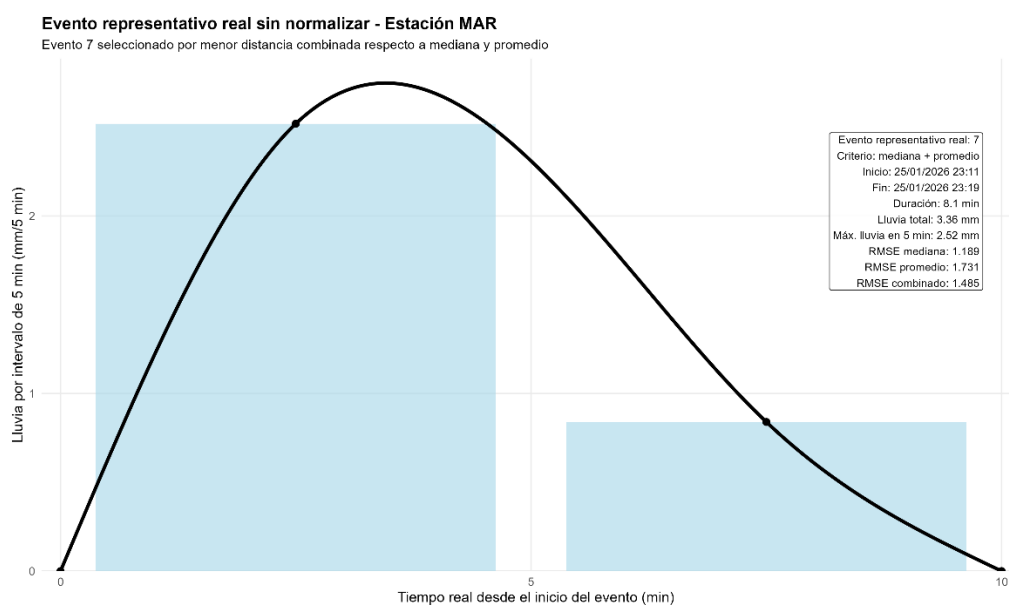


Figura 52. Evento representativo real de lluvia en la estación Mar.



La estación **Mar** representa un patrón de **concentración inicial**. Su evento representativo real corresponde al **evento 7**, con una duración de **8.1 min**, lluvia total de **3.36 mm** y máximo de **2.52 mm/5 min**. La mayor lluvia ocurre al inicio y luego disminuye, lo que indica un evento corto con aporte principal en la primera parte.

Figura 53. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Ximena

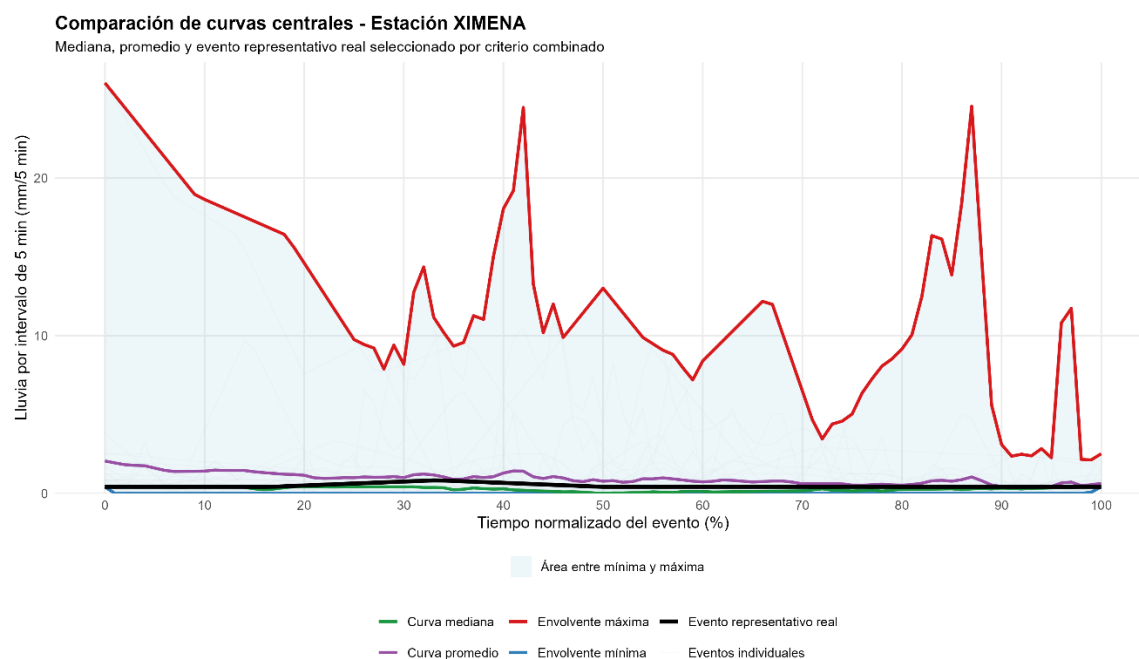
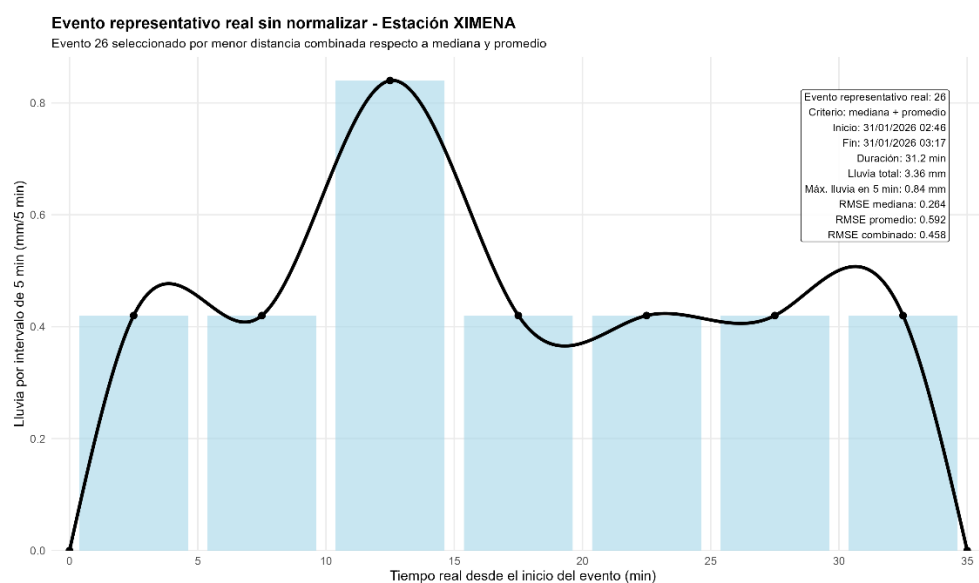


Figura 54. Evento representativo real de lluvia en la estación Ximena



La estación **Ximena** muestra un patrón de **pico central**. El evento representativo real fue el **evento 26**, con duración de **31.2 min**, lluvia total de **3.36 mm** y máximo de **0.84 mm/5 min**. La lluvia se mantiene baja al inicio, aumenta hacia la parte media y luego disminuye. Este comportamiento representa una distribución más equilibrada, con mayor aporte en la fase central.

Figura 55. Curvas centrales y evento representativo real de la estación Sara

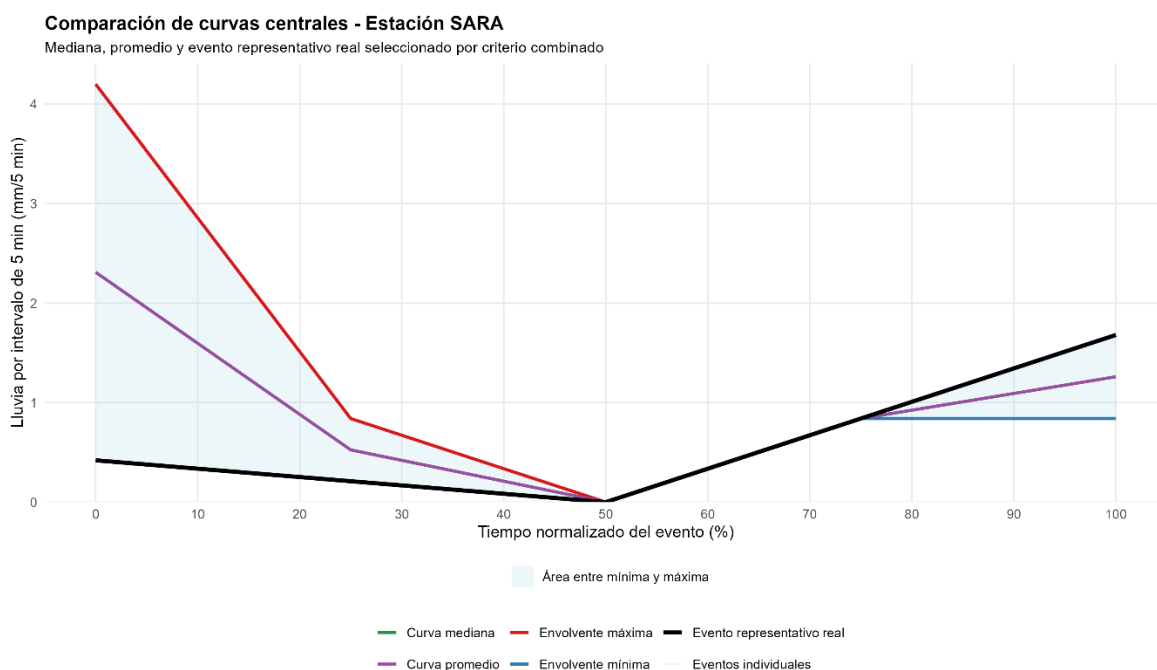
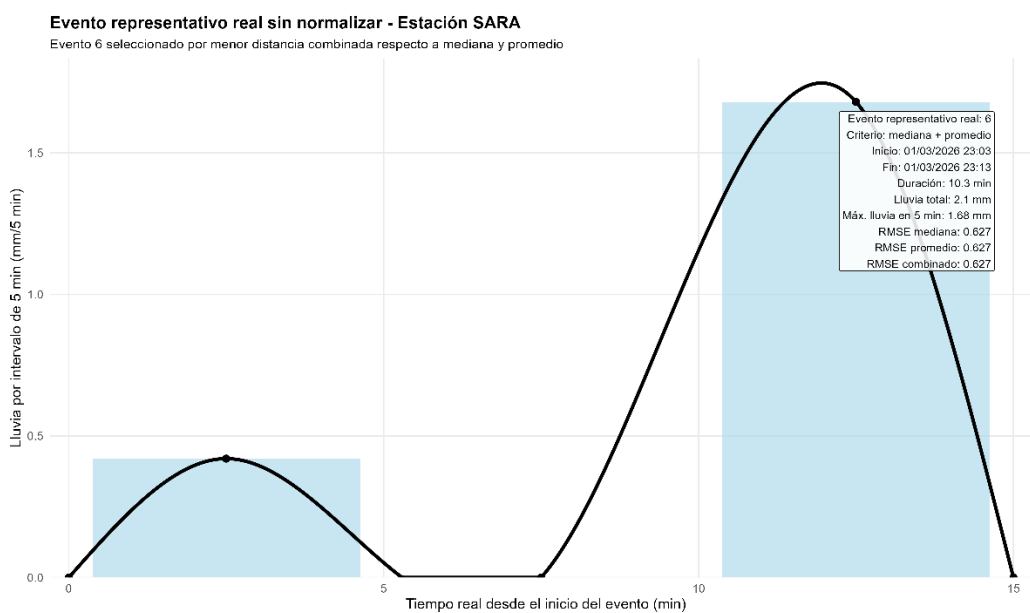


Figura 56. Evento representativo real de lluvia en la estación Sara



La estación **Sara** representa un patrón de **concentración tardía**. Su evento representativo real fue el **evento 6**, con duración de **10.3 min**, lluvia total de **2.10 mm** y máximo de **1.68 mm/5 min**. En este caso, la mayor lluvia aparece hacia el final del evento, indicando un desarrollo progresivo.

Las curvas representativas muestran tres formas temporales principales. **Mar** presenta un patrón de concentración inicial, con el evento 7 acumulando **3.36 mm** en **8.1 min** y un máximo de **2.52 mm/5 min**. **Ximena** representa un pico central, mediante el evento

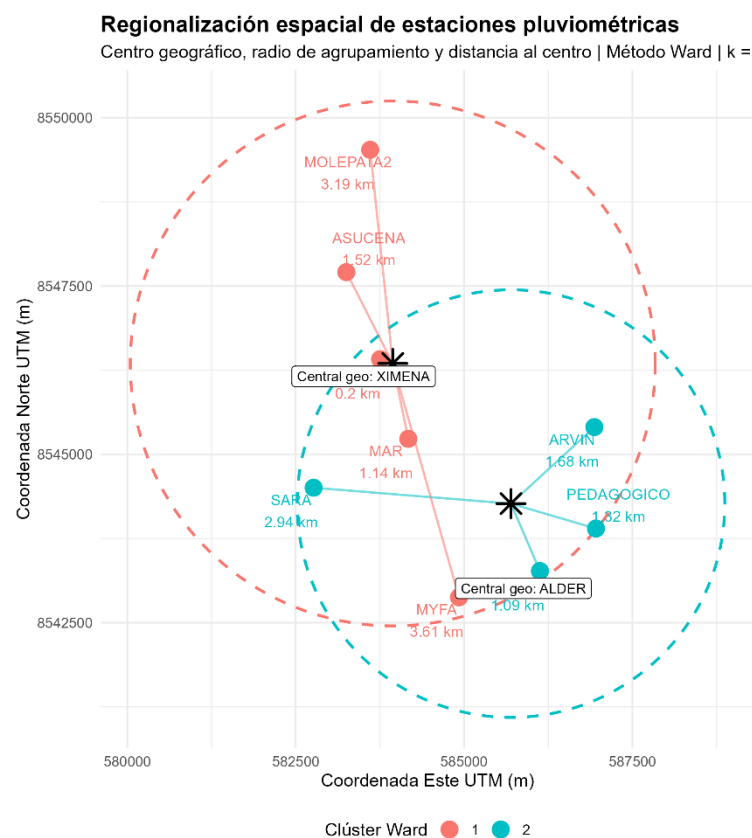
26, con **3.36 mm** en **31.2 min** y máximo de **0.84 mm/5 min**. **Sara** muestra concentración tardía, con el evento 6, de **2.10 mm** en **10.3 min** y máximo de **1.68 mm/5 min**. Estos tres casos resumen los comportamientos de lluvia con mayor aporte al inicio, al centro y al final del evento.

5.6. Comparación espacial y regionalización de estaciones

5.6.1. Regionalización integral de estaciones

La Figura 58 muestra la distribución espacial de las estaciones agrupadas mediante el método Ward, considerando la similitud temporal de los eventos de lluvia. El agrupamiento generó dos clústeres principales. El **clúster 1** integra estaciones ubicadas principalmente en el eje central-norte y centro-sur del área de estudio, con **Ximena** como estación cercana al centro geográfico del grupo. El **clúster 2** agrupa estaciones ubicadas hacia el sector este y sureste, con **Alder** como centro geográfico de referencia.

Figura 57. Regionalización espacial de estaciones pluviométricas según similitud integral de eventos de lluvia.



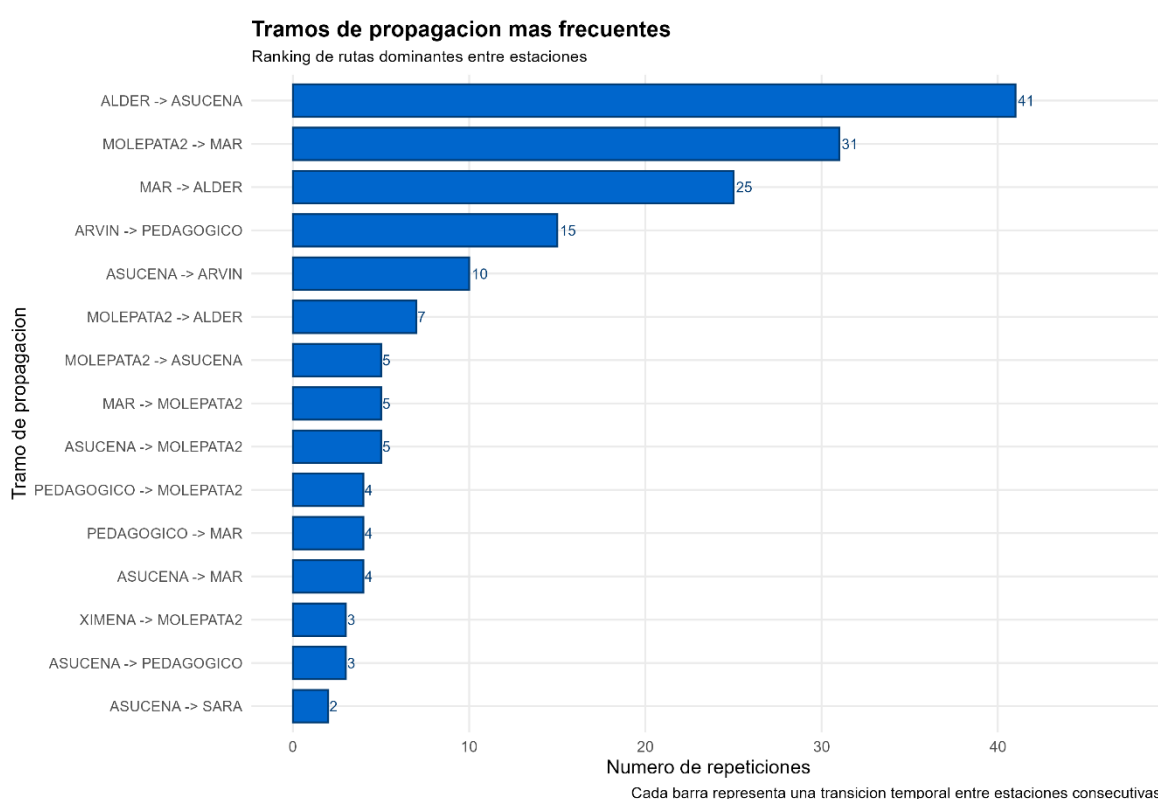
En el clúster 1, las distancias al centro varían aproximadamente entre **0.2 km** y **3.61 km**, destacando **Ximena** como la estación más cercana al centro y **Myfa** como la más alejada. En el clúster 2, las distancias se encuentran entre aproximadamente **1.09 km** y **2.94 km**, con **Sara** como la estación más distante del centro del grupo. Esto indica que los grupos

no dependen únicamente de la cercanía espacial, sino del comportamiento temporal similar de los eventos registrados.

El resultado evidencia una diferenciación espacial del comportamiento pluviométrico. Las estaciones de un mismo clúster presentan patrones temporales semejantes, lo que permite identificar zonas con respuesta similar frente a los eventos de lluvia. Esta agrupación constituye la base para la regionalización temporal-espacial de la precipitación en el área de estudio.

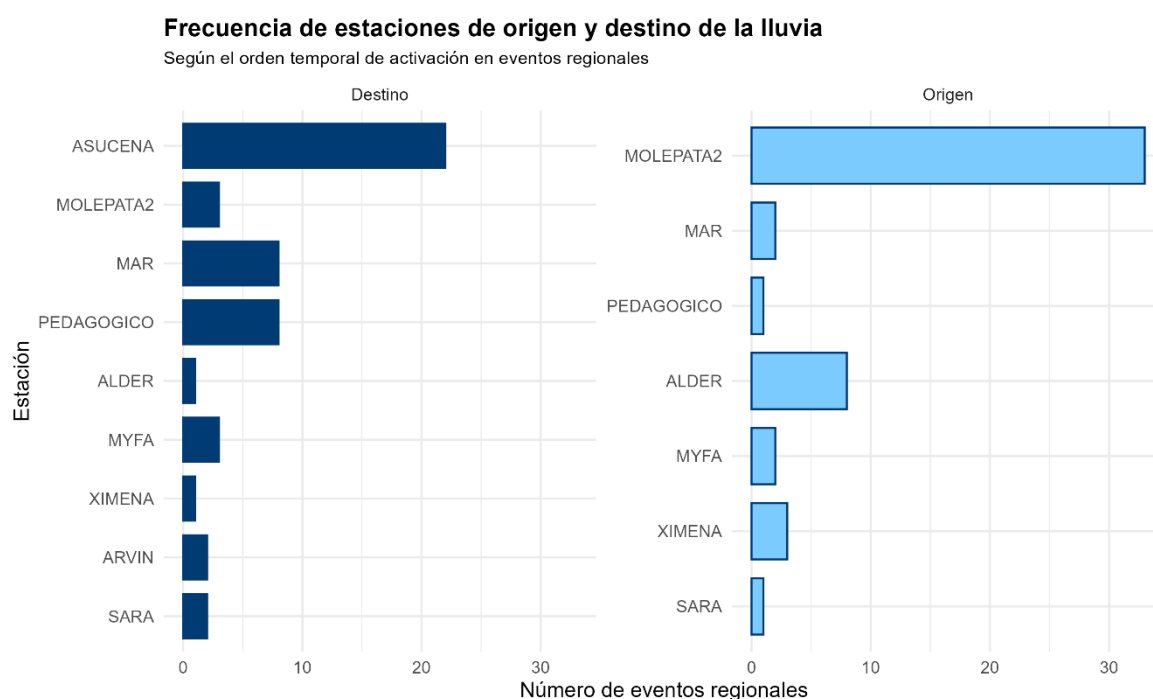
5.6.2. Agrupamiento según patrón horario

Figura 58. Ranking de tramos dominantes de propagación entre estaciones



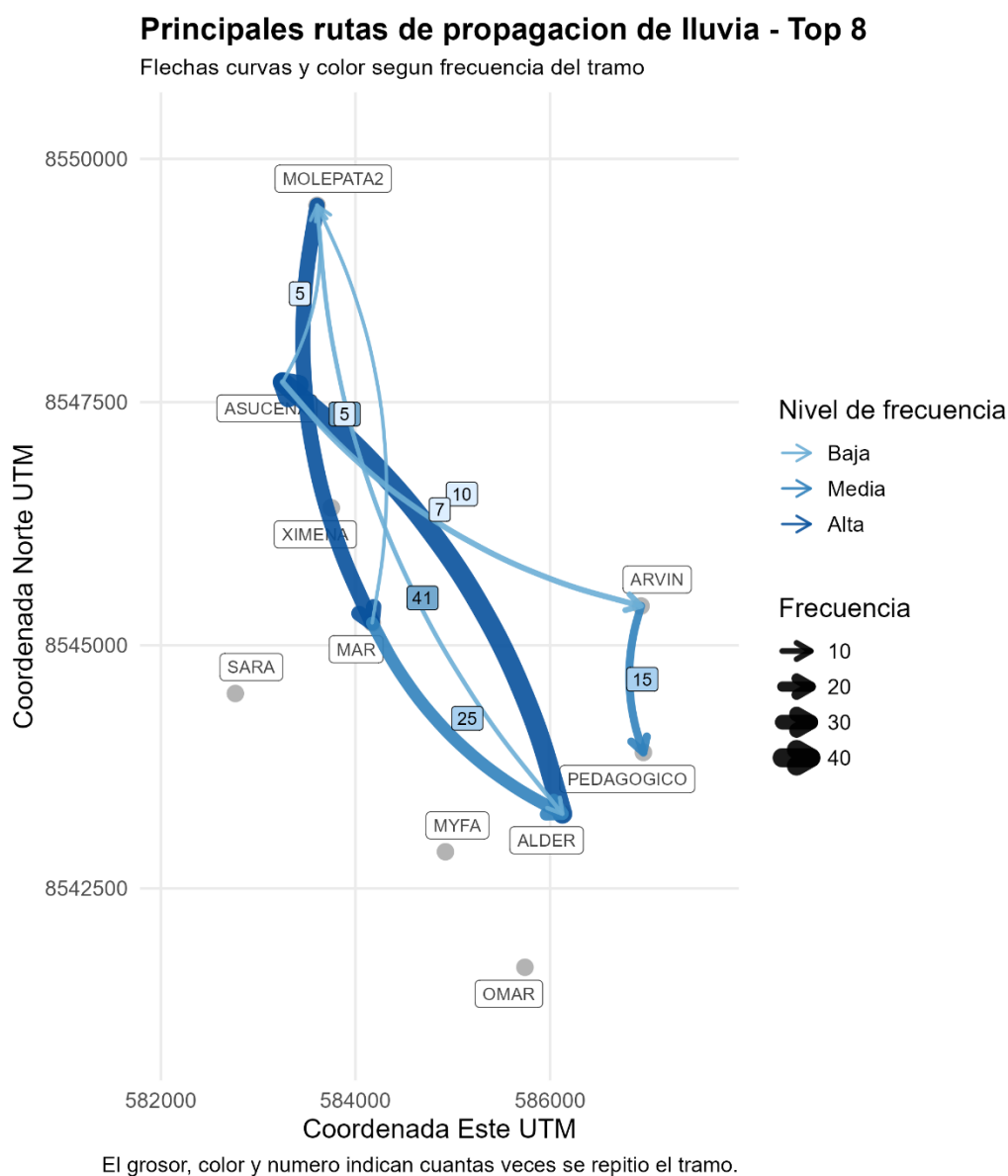
La figura muestra las transiciones temporales más repetidas entre estaciones durante los eventos regionales. El tramo más frecuente fue **Alder → Asucena**, con **41 repeticiones**, seguido de **Molepata 2 → Mar** con **31**, **Mar → Alder** con **25**, **Arvin → Pedagógico** con **15** y **Asucena → Arvin** con **10**. Estos resultados indican que la activación de la lluvia no fue aleatoria, sino que presentó rutas recurrentes entre estaciones.

Figura 59. Estaciones de origen y destino más frecuentes en eventos regionales



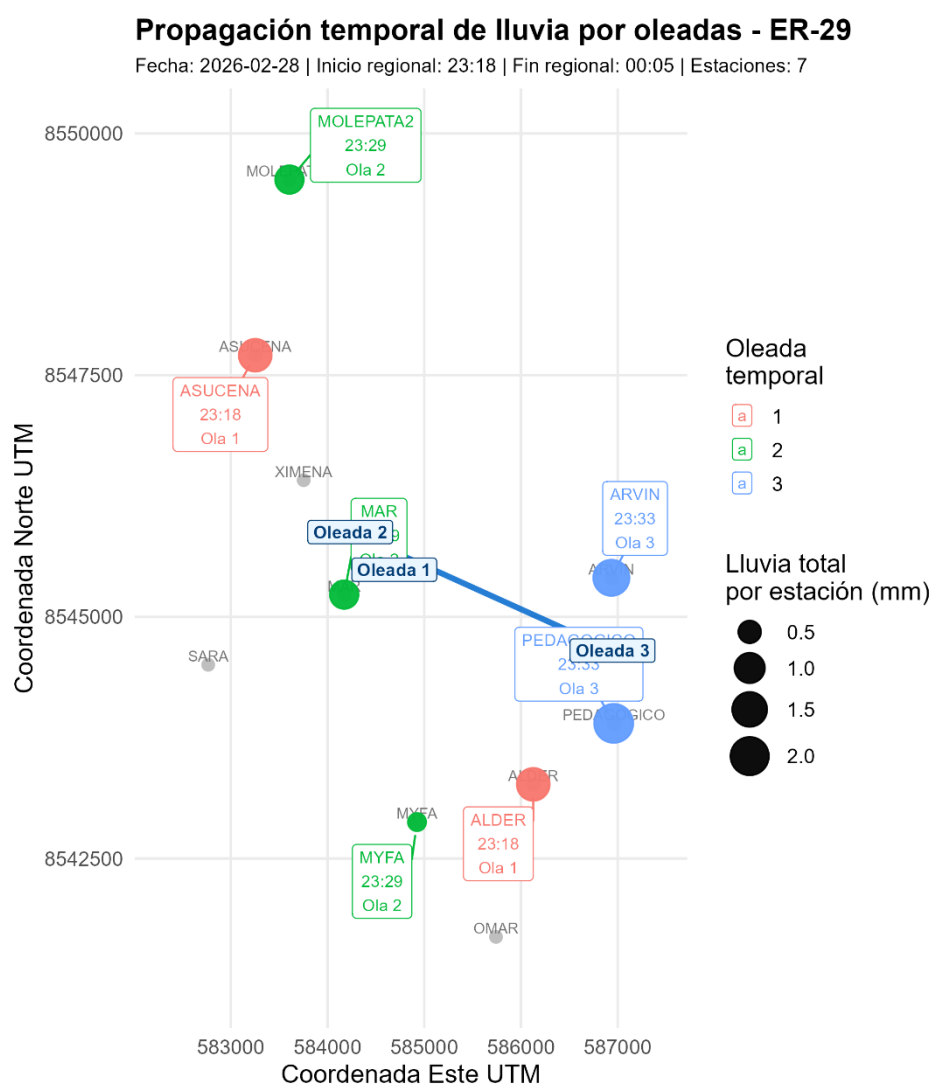
La figura resume el rol temporal de las estaciones dentro de los eventos regionales. **Molepata 2** aparece como la estación de origen más frecuente, con más de **30 activaciones iniciales**, mientras que **Asucena** destaca como destino principal, con más de **20 registros**. Esto indica que algunas estaciones tienden a activarse primero, mientras que otras aparecen con mayor frecuencia como estaciones posteriores dentro de la secuencia de lluvia.

Figura 60. Principales rutas espaciales de propagación de lluvia en la red pluviométrica



La figura representa espacialmente los tramos de propagación más frecuentes. Las flechas más gruesas corresponden a las rutas con mayor repetición. Destacan los tramos **Alder → Asucena**, **Molepata 2 → Mar** y **Mar → Alder**, que conectan sectores norte, centro y sur de la red. Este mapa complementa el ranking anterior, ya que permite observar no solo la frecuencia del tramo, sino también su orientación espacial.

Figura 61. Propagación temporal por oleadas del evento regional ER-29



Las estaciones con inicio separado por ≤ 3 min se agrupan en una misma oleada temporal.

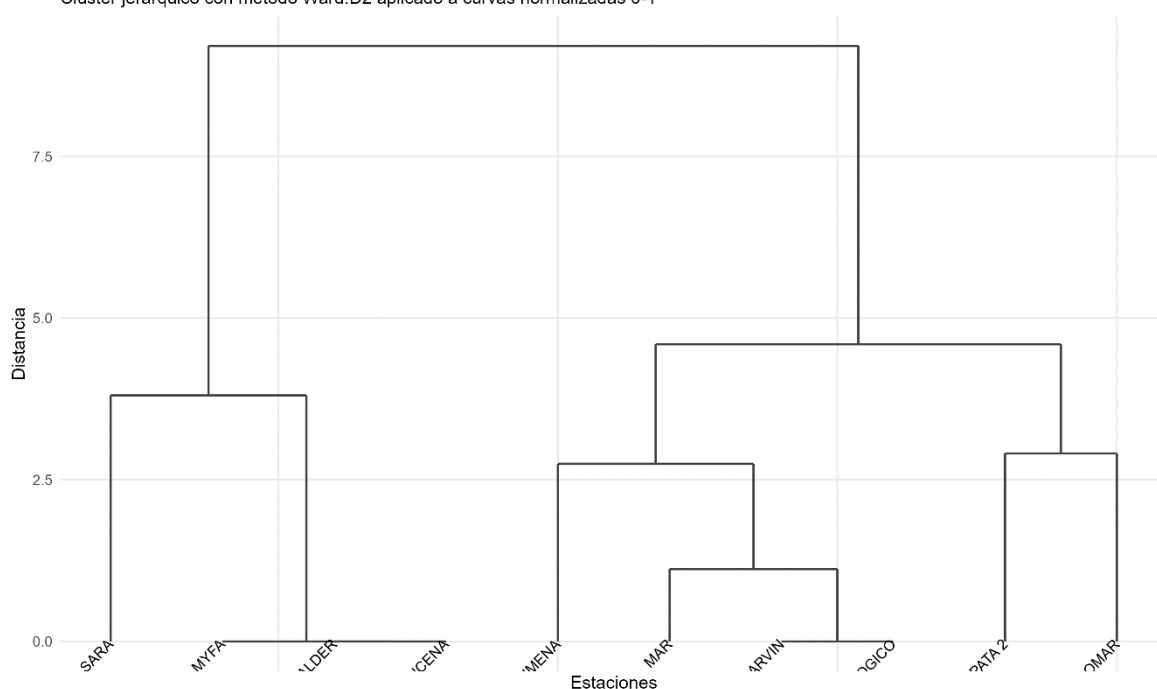
La figura muestra la activación temporal del evento regional **ER-29**, registrado el **28/02/2026**, con inicio regional a las **23:18** y fin a las **00:05**, afectando **7 estaciones**. Se identifican tres oleadas: la primera en **Alder** y **Asucena** a las **23:18**; la segunda en **Mar**, **Molepata 2** y **Myfa** alrededor de las **23:29**; y la tercera en **Arvin** y **Pedagógico** hacia las **23:33**. Esto evidencia una activación progresiva de la lluvia dentro de la red, con desfases temporales de aproximadamente **11 a 15 min** entre grupos de estaciones.

5.6.3. Agrupamiento según forma temporal de lluvia

Figura 62. Dendrograma de estaciones según forma temporal representativa de lluvia

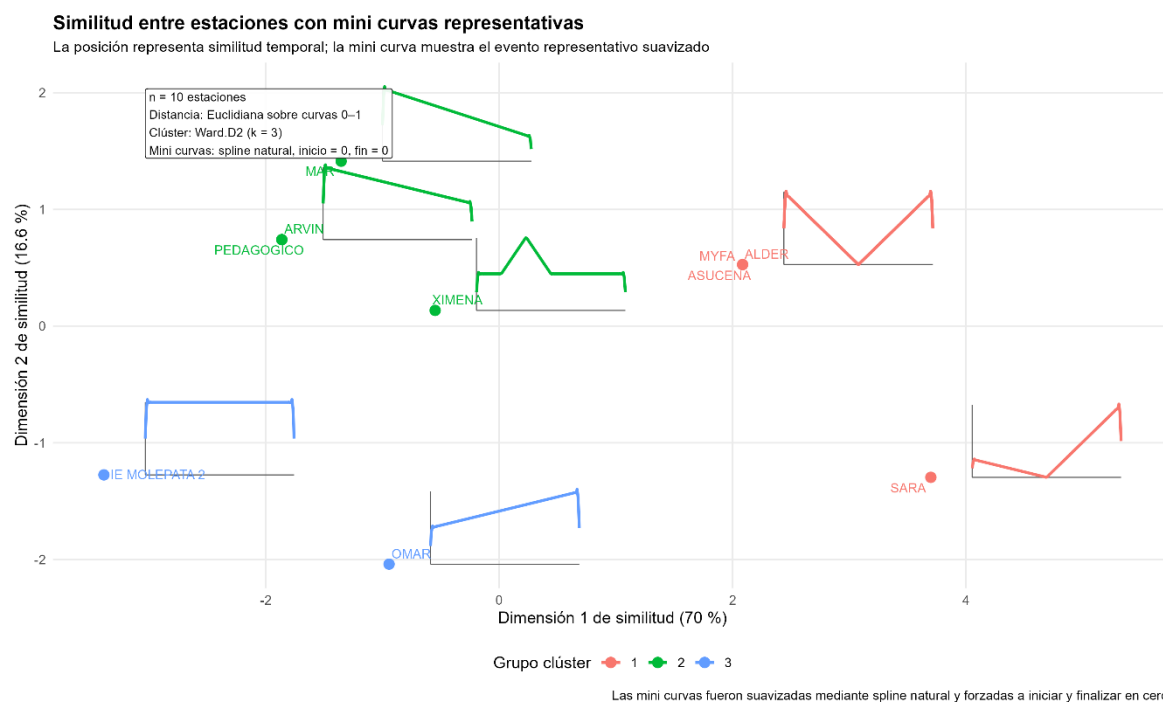
Dendrograma de estaciones según comportamiento temporal representativo

Clúster jerárquico con método Ward.D2 aplicado a curvas normalizadas 0-1



El dendrograma muestra que las estaciones se organizaron en **tres grupos principales** según la forma temporal de sus curvas representativas. Un primer grupo reúne a **Sara, Myfa, Alder y Asucena**, que comparten un patrón temporal semejante. Un segundo grupo incluye a **Ximena, Mar, Arvin y Pedagógico**, con mayor similitud entre sí, especialmente entre **Mar, Arvin y Pedagógico**. Un tercer grupo está formado por **IE Molepata 2 y Omar**, que presentan un comportamiento diferenciado respecto de las demás estaciones. La separación entre ramas indica que la similitud no es uniforme en toda la red, sino que existen subconjuntos con formas de lluvia temporalmente distintas.

Figura 63. Configuración bidimensional de similitud entre estaciones según curvas representativas de lluvia.



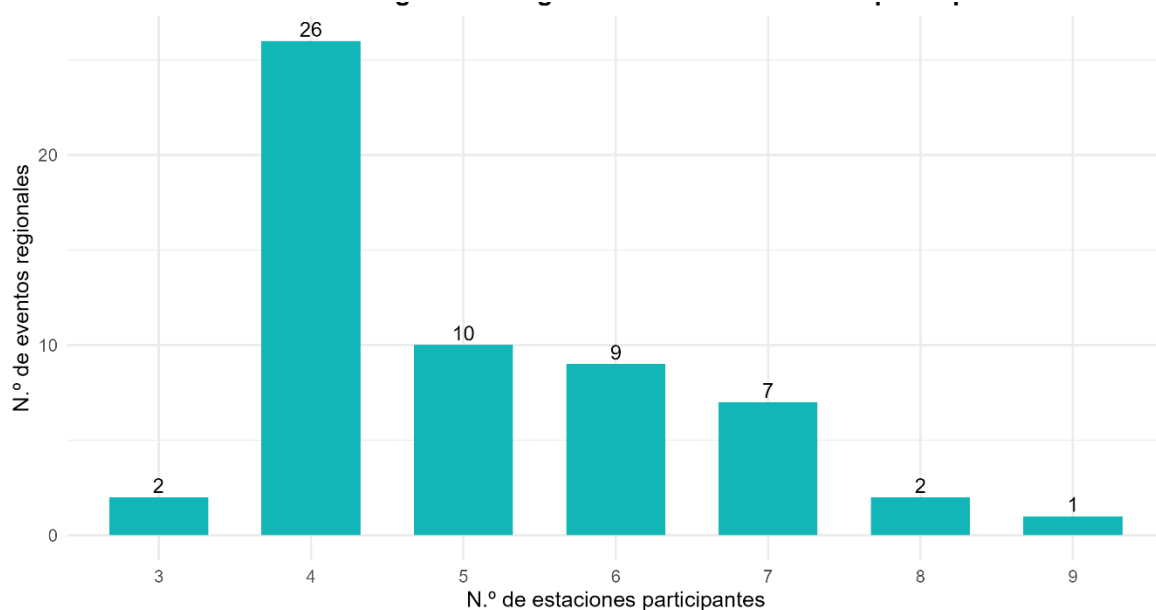
La configuración bidimensional confirma la existencia de **tres grupos de estaciones** según la forma temporal de la lluvia. El **grupo 1** reúne a **Alder, Asucena, Myfa y Sara**, asociado a curvas con mayor concentración hacia el inicio o con comportamiento en “V”. El **grupo 2** incluye a **Ximena, Mar, Arvin y Pedagógico**, caracterizado por curvas más próximas entre sí y con comportamiento intermedio. El **grupo 3** está conformado por **IE Molepata 2 y Omar**, cuyas mini curvas muestran un patrón diferenciado respecto al resto. La cercanía entre puntos indica mayor similitud temporal, mientras que la separación entre grupos evidencia diferencias en la distribución interna de la lluvia durante el evento.

5.7. Clasificación espacial de eventos de lluvia

Tabla 22. Clasificación de eventos de lluvia según cobertura espacial

Clasificación	Criterio	N.º de eventos	Porcentaje
Local	1 estación	82	45.05
Compartido	2 estaciones	43	23.63
Regional	≥ 3 estaciones	57	31.32

Figura 64. Distribución de eventos regionales según número de estaciones participantes

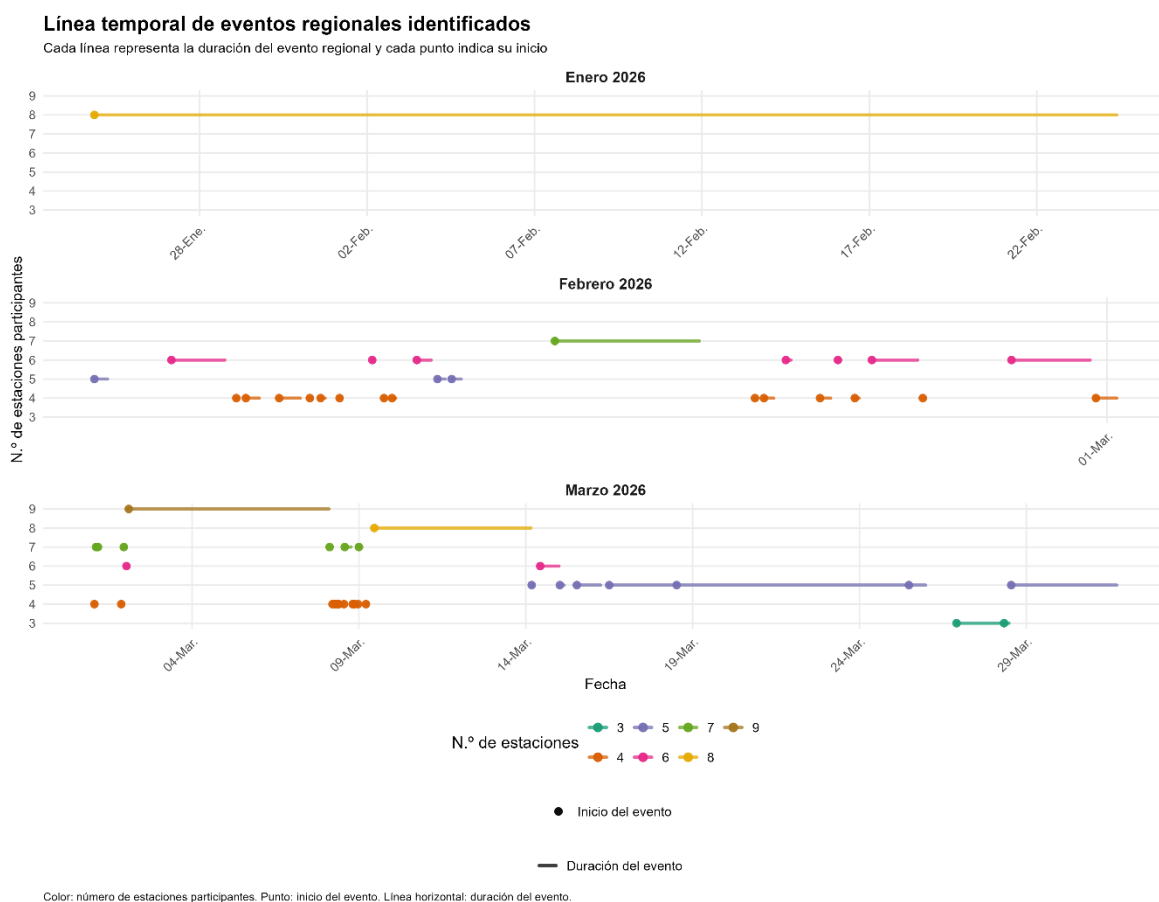


La mayor cantidad de eventos regionales involucró **4 estaciones**, con **26 eventos**, equivalente al **45.6 %** del total regional. Le siguen los eventos con **5 estaciones** con **10 eventos** (**17.5 %**) y los de **6 estaciones** con **9 eventos** (**15.8 %**).

Los eventos con mayor cobertura fueron menos frecuentes: **7 estaciones** participaron en **7 eventos** (**12.3 %**), **8 estaciones** en **2 eventos** (**3.5 %**) y **9 estaciones** en **1 evento** (**1.8 %**).

En conjunto, predominan los eventos regionales de cobertura intermedia, principalmente entre **4 y 6 estaciones**, que concentran **45 de 57 eventos regionales** (**78.9 %**). Esto indica que la mayoría de lluvias regionales no afectó a toda la red, sino a grupos parciales de estaciones.

Figura 65. Línea temporal de eventos regionales identificados por mes



La línea temporal muestra que los eventos regionales se concentraron principalmente en **febrero y marzo de 2026**. En febrero predominan eventos de **4 a 6 estaciones**, lo que indica lluvias regionales de cobertura media. En marzo se observa mayor diversidad, con eventos que afectaron desde **3 hasta 9 estaciones**, incluyendo los episodios de mayor cobertura espacial.

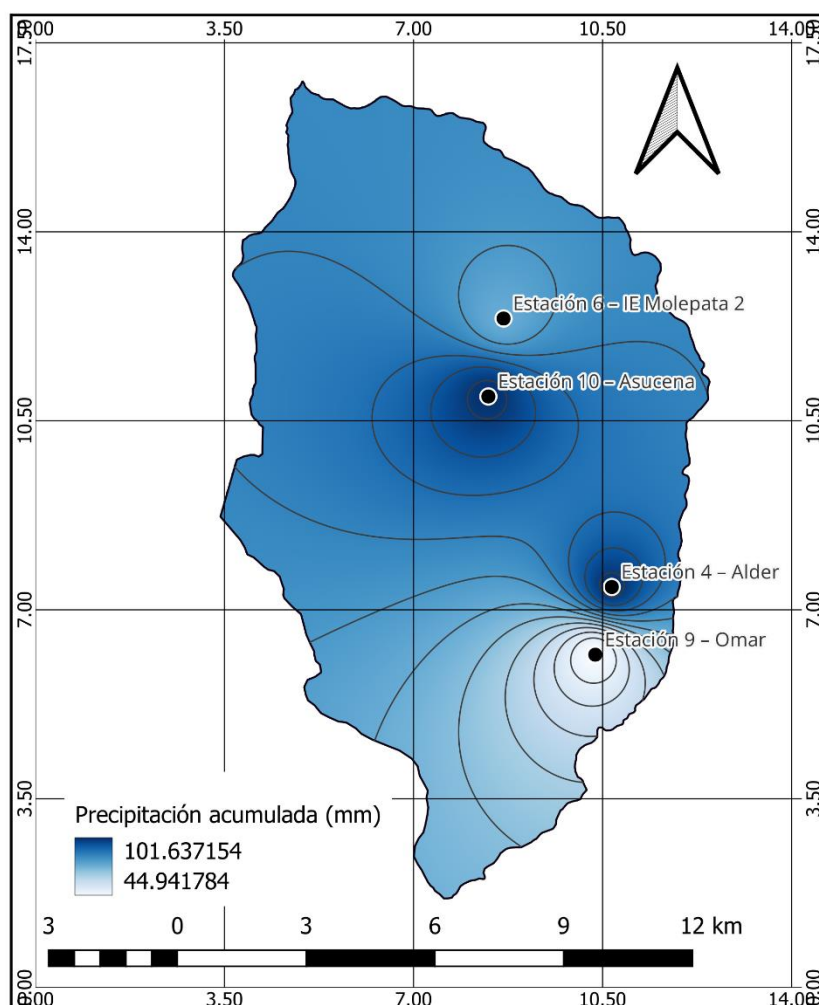
El evento con **9 estaciones participantes** aparece como el caso de mayor extensión dentro del periodo analizado. También se identifican eventos con **7 y 8 estaciones**, aunque son menos frecuentes. Esto confirma que los eventos de alta cobertura existen, pero no son los dominantes.

En general, la figura evidencia que la ocurrencia regional no fue constante durante todo el periodo. La mayor actividad se presentó entre febrero y marzo, con eventos regionales de distinta duración y cobertura espacial.

5.8. Síntesis espacial-temporal de la precipitación

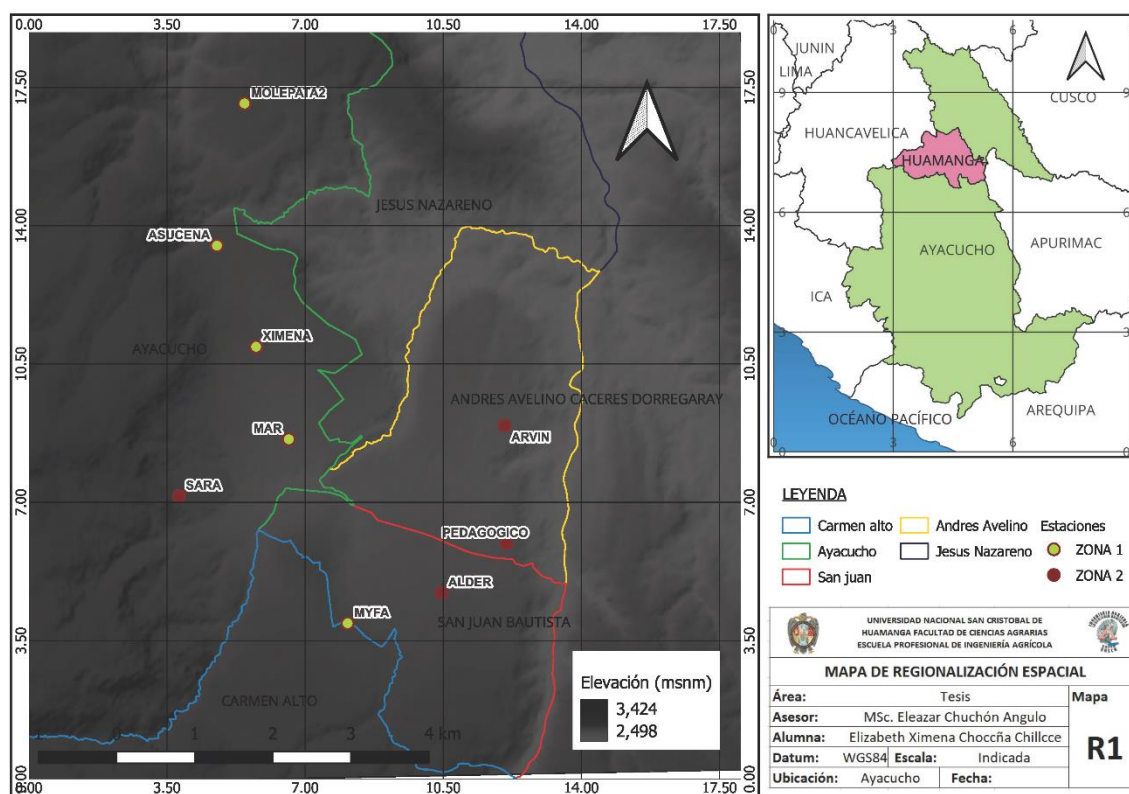
Figura 66. Isoyeta del evento regional extremo ERE-006

ISOYETA - EVENTO REGIONAL 006



La Figura 67 muestra la distribución espacial de la precipitación acumulada durante el evento regional extremo ERE-006. El mapa evidencia una variación espacial marcada, con acumulados entre aproximadamente **44.94 y 101.64 mm**. Las mayores concentraciones se ubican hacia el sector centro-este del área interpolada, próximas a las estaciones **Asucena** y **Alder**, mientras que los menores valores se presentan hacia el sector sureste, cercano a **Omar**.

Figura 67. Mapa de regionalización espacial de estaciones pluviométricas según clúster Ward.



La Figura 68 muestra la regionalización de estaciones a partir del agrupamiento Ward. Esta clasificación permite identificar zonas con comportamiento temporal semejante dentro de la red pluviométrica.

La regionalización muestra que las estaciones con comportamiento semejante no siempre forman grupos perfectamente compactos, pero sí permiten distinguir zonas de respuesta pluviométrica diferenciada. Esto complementa la isoyeta, ya que la isoyeta representa un evento específico, mientras que el clúster resume el comportamiento de la red durante el periodo analizado.

Tabla 23. Síntesis espacial-temporal de la precipitación por estación

Estación	Zona integral Ward	Grupo forma temporal	Comportamiento temporal sintetizado	Evento máximo / tipo temporal	Hora pico mediana	Participación regional	Veces como núcleo ERE	Rol espacial-temporal	Lectura para resultados
Ximena	Zona 1	Grupo forma 2	Pico central en curva representativa; máximo tardío	XIMENA_52 / Pico tardío	14:30	16/57 (28.1 %) - Media	6	Transición temporal; participación regional media	Funciona como estación de enlace dentro de la red; no domina volumen ni intensidad.
Mar	Zona 1	Grupo forma 2	Concentración inicial; evento máximo tardío/acumulativo	MAR_36 / Pico tardío	20:30	3/57 (5.3 %) - Baja	8	Núcleo de acumulación extrema; ruta Molepata2→Mar→Alder	Caso clave por volumen acumulado; su máximo pertenece a ERE_06.
Sara	Zona 2	Grupo forma 1	Concentración tardía; baja magnitud	SARA_7 / Pico temprano	15:30	4/57 (7.0 %) - Baja	0	Estación periférica; baja participación regional	Muestra comportamiento más aislado; aporta menos a eventos regionales.
Alder	Zona 2	Grupo forma 1	Pico temprano; alta intensidad	ALDER_4 / Pico temprano	00:30	45/57 (78.9 %) - Muy alta	13	Núcleo de intensidad; tramo dominante Alder→Asucena	Explica extremos por intensidad; clave en rutas hacia Asucena.
Myfa	Zona 1	Grupo forma 1	Patrón variable / transición	MYFA_8 / Pico temprano	23:30	10/57 (17.5 %) - Baja	1	Estación de transición; baja participación regional	Participa como punto secundario en oleadas, sin dominar la red.
Molepata 2	Zona 1	Grupo forma 3	Distribución uniforme; origen frecuente	MOLEPATA2_176 / Pico tardío	14:30	57/57 (100.0 %) - Muy alta	1	Origen frecuente de propagación; participación constante	Aparece en todos los eventos regionales y como origen frecuente.
Arvin	Zona 2	Grupo forma 2	Pico temprano; conector hacia Pedagógico	ARVIN_215 / Pico temprano	23:30	25/57 (43.9 %) - Media	0	Conector oriental; tramo Arvin→Pedagógico	Conecta el sector oriental y participa en eventos extremos regionales.

Pedagógico	Zona 2	Grupo forma 2	Pico temprano; núcleo de intensidad en eventos extremos	PEDAGOGICO_187 / Pico temprano	23:30	25/57 (43.9 %) - Media	6	Destino/conector oriental; núcleo extremo en ERE_26	Registra picos intensos y actúa como nodo oriental.
Omar	Transición / verificar en mapa Ward	Grupo forma 3	Pico central/tardío; receptor en eventos regionales	OMAR_50 / Pico central	00:30	46/57 (80.7 %) - Muy alta	2	Receptor regional; asociado al evento ERE_06	Alta participación regional; relevante como estación receptora.
Asucena	Zona 1	Grupo forma 1	Pico temprano y núcleo espacial frecuente	ASUCENA_277 / Pico temprano	23:30	57/57 (100.0 %) - Muy alta	1	Destino frecuente y núcleo espacial en isoyeta ERE_006	Participa en todos los eventos regionales y aparece como destino principal.

La síntesis muestra que la precipitación presentó diferencias espaciales y temporales claras dentro de la red de estaciones. **Molepata 2** y **Asucena** tuvieron la mayor participación regional, apareciendo en **57 de 57 eventos regionales**, mientras que **Alder** y **Omar** también mostraron alta participación, con **45/57** y **46/57 eventos**, respectivamente.

En términos funcionales, **Molepata 2** se comporta como estación de origen frecuente, **Asucena** como destino o núcleo espacial recurrente, **Alder** como núcleo de intensidad, y **Mar** como estación clave por acumulación extrema. En cambio, **Sara** y **Myfa** presentan menor participación regional, por lo que cumplen un rol más periférico o secundario.

En conjunto, la variabilidad de la precipitación no se explica solo por volumen o intensidad, sino por la combinación entre forma temporal, horario, cobertura regional y propagación espacial. Esa es la idea fuerte del cierre, no el clásico “llovió diferente”, que sería técnicamente cierto pero intelectualmente triste.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1. Variabilidad general de los eventos de lluvia entre estaciones

Los resultados muestran diferencias marcadas en la cantidad de eventos de lluvia registrados entre las estaciones de monitoreo. Según la Tabla 19 y la Figura 37, Asucena presentó el mayor número de eventos identificados, mientras que Sara registró la menor cantidad. Esta diferencia evidencia que la ocurrencia de precipitación no fue homogénea en toda la red pluviométrica, sino que presentó variaciones entre puntos de monitoreo.

Sin embargo, el número de eventos no debe interpretarse de manera aislada. Como se observa en la Figura 38, una mayor cantidad de eventos no necesariamente coincide con una mayor precipitación acumulada. Esto indica que algunas estaciones pudieron registrar lluvias frecuentes, pero de baja magnitud, mientras que otras concentraron mayores volúmenes en menor número de eventos. Por tanto, la frecuencia de ocurrencia y el volumen acumulado representan dimensiones distintas del comportamiento pluviométrico.

Esta diferencia puede explicarse por la variabilidad espacial propia de la lluvia, especialmente en eventos de carácter localizado, donde los núcleos de precipitación pueden afectar con distinta intensidad a estaciones cercanas. No obstante, también debe considerarse la calidad del registro. En el caso de Sara, la baja cantidad de eventos puede estar influenciada por problemas de conexión o lectura del pluviómetro IoT, por lo que su comportamiento debe discutirse con cautela y no atribuirse únicamente a condiciones naturales de precipitación.

Este resultado se relaciona con la validación y confiabilidad del sistema de monitoreo IoT. La mayoría de estaciones generó información suficiente para el análisis, lo que muestra un desempeño operativo favorable de la red; sin embargo, la falla o baja continuidad de una estación evidencia la necesidad de controlar la transmisión, almacenamiento y depuración de datos. En ese sentido, la calibración del pluviómetro garantiza la correcta equivalencia entre pulsos y precipitación, pero la confiabilidad final del registro también depende de la estabilidad del sistema de adquisición de datos.

Desde el punto de vista hidrológico, esta diferencia entre número de eventos y lluvia acumulada resulta importante para el análisis de tormentas de diseño. Una estación con mayor frecuencia de eventos no necesariamente representa la condición más crítica para el dimensionamiento de infraestructura hidráulica. Por ello, el uso de pluviómetros IoT permite identificar no solo dónde llueve con mayor frecuencia, sino también dónde se concentran

eventos de mayor volumen o intensidad, información necesaria para una evaluación más precisa del comportamiento de las tormentas en el área de estudio.

6.2. Relación entre duración, acumulado e intensidad

La caracterización temporal e hidrológica permitió diferenciar el comportamiento de los eventos de lluvia a partir de la duración mediana, precipitación acumulada mediana, intensidad máxima absoluta e intensidad media promedio, presentadas en la Tabla 20. Los resultados muestran que las estaciones no solo variaron en la cantidad de eventos registrados, sino también en la forma en que dichos eventos se desarrollaron. Algunas estaciones presentaron eventos de mayor duración, mientras que otras registraron lluvias más cortas, pero con mayores valores de intensidad. Esto confirma que la precipitación no tuvo un comportamiento uniforme en toda la red, sino que varió tanto en magnitud como en estructura temporal.

En la Figura 40 se observa que la precipitación acumulada por evento se concentró principalmente en valores bajos, lo cual indica que gran parte de los eventos registrados correspondieron a lluvias de baja magnitud. Este comportamiento coincide con lo señalado por ,(Muñoz et al., 2016b) quienes encontraron que en ambientes andinos predominan intensidades bajas y que la estimación de lluvia puede ser sensible a la resolución del pluviómetro y al método de cálculo utilizado. En ese sentido, los acumulados medianos de 0.42 mm y 0.84 mm registrados en varias estaciones pueden estar relacionados tanto con la ocurrencia de eventos pequeños como con la resolución del sistema de medición por pulsos.

Sin embargo, la presencia de valores atípicos en estaciones como Omar, IE Molepata 2 y Arvin evidencia que, aunque el comportamiento típico estuvo dominado por eventos de baja acumulación, también ocurrieron episodios aislados con acumulados superiores al patrón general. Esto es importante porque demuestra que el análisis de medianas permite describir el comportamiento común, pero no reemplaza la evaluación de eventos extremos. En términos hidrológicos, esta diferencia es clave, ya que los eventos poco frecuentes, pero de mayor acumulación pueden tener mayor relevancia para el diseño de drenaje e infraestructura hidráulica.

La Figura 41 muestra diferencias claras en la intensidad máxima por evento. IE Molepata 2, Arvin, Omar y Asucena presentaron mayores valores de intensidad o mayor variabilidad, lo que sugiere una mayor concentración temporal de la lluvia en estas estaciones. Este resultado puede estar asociado a la ocurrencia de núcleos de precipitación

localizados, característicos de tormentas con alta variabilidad espacial. Asimismo, guarda relación con lo reportado por (Saha et al., 2023), quienes evidenciaron que en redes urbanas densas pueden existir diferencias significativas de precipitación entre estaciones próximas, por lo que la comparación espacial entre puntos de monitoreo resulta necesaria para distinguir eventos reales de posibles inconsistencias de registro.

En la Figura 42 se observa que la duración de los eventos también varió entre estaciones. Myfa y Arvin presentaron mayor amplitud en la duración, mientras que otras estaciones mostraron eventos concentrados en rangos bajos o medios. Esta diferencia indica que algunos sectores registraron lluvias más persistentes, mientras que otros estuvieron dominados por eventos breves. Desde el punto de vista hidrológico, esta distinción es relevante porque una lluvia corta e intensa puede generar mayores caudales pico, mientras que una lluvia prolongada puede favorecer procesos de acumulación, saturación o escorrentía sostenida.

No obstante, estos resultados deben interpretarse considerando también las condiciones de instalación y exposición de los pluviómetros. En el control del colector no se consideraron barreras específicas contra el viento ni otros factores de protección del sitio, por lo que la captación pudo verse influenciada por condiciones locales como exposición directa, turbulencia, obstáculos cercanos o variaciones en la trayectoria de las gotas. La Organización Meteorológica Mundial señala que la exposición del pluviómetro es un aspecto crítico, debido a que el viento y las condiciones del sitio pueden generar errores de medición, ya sea por déficit o exceso de captación.

En conjunto, los resultados muestran que el comportamiento de la lluvia no puede explicarse únicamente mediante el acumulado total. La duración, la intensidad máxima, la intensidad media y la distribución de valores por estación permiten reconocer distintos tipos de respuesta pluviométrica dentro del área de estudio. Esta información resulta útil para el análisis de tormentas de diseño, debido a que el dimensionamiento de infraestructura hidráulica requiere identificar no solo cuánto llueve, sino también en cuánto tiempo ocurre y con qué intensidad se concentra la precipitación.

6.3. Influencia del horario en la ocurrencia de lluvia

El análisis horario permitió identificar diferencias en el momento de ocurrencia de los eventos de lluvia entre estaciones. En la Figura 43 se observa que la mayor frecuencia de eventos se concentró durante la noche, principalmente entre las 22:00 y 23:00 h. Asucena

registró el valor máximo a las 23:00 h, mientras que Molepata 2 presentó su mayor frecuencia a las 22:00 h. De forma similar, Arvin, Pedagógico y Alder también concentraron sus mayores frecuencias en ese rango horario. Sin embargo, no todas las estaciones siguieron el mismo patrón, ya que Omar y Myfa presentaron máximos hacia la 01:00 h, mientras que Mar mostró mayor frecuencia entre las 15:00 y 16:00 h. Sara presentó baja frecuencia horaria, por lo que su interpretación debe considerarse referencial debido a la limitada cantidad de registros válidos.

Este comportamiento indica que la precipitación no solo varió espacialmente, sino también según el momento del día. El predominio de eventos entre la tarde y la noche puede relacionarse, de manera probable, con procesos convectivos diarios, donde el calentamiento superficial durante el día favorece el ascenso de aire cálido, la formación de nubosidad y la posterior ocurrencia de precipitación. La precipitación convectiva suele producir lluvias localizadas, variables y de corta duración, por lo que puede explicar la diferencia horaria observada entre estaciones cercanas. La Met Office describe las lluvias convectivas como precipitaciones generadas por calentamiento superficial, con áreas menores, alta variabilidad espacial y comportamiento tipo chubasco.

Asimismo, la actividad urbana durante horas de la tarde y noche puede contribuir indirectamente a modificar las condiciones locales de temperatura, turbulencia y circulación superficial. Sin embargo, este aspecto debe plantearse como una posible influencia urbana y no como una causa comprobada, debido a que en el estudio no se midieron temperatura, viento, humedad ni concentración de aerosoles. La NASA indica que el uso del suelo urbano, la isla de calor urbana y los aerosoles son factores considerados en la discusión sobre la influencia de las ciudades en la lluvia. (Organización Meteorológica Mundial, 2022)

La Figura 44 complementa este análisis al mostrar diferencias entre las horas de inicio, pico y finalización de los eventos. Los picos de lluvia se concentraron principalmente entre la tarde y la noche, con mayor presencia entre las 13:00 y 18:00 h, mientras que los inicios fueron más variables y los finales tendieron a ubicarse entre las 18:00 y 24:00 h. Este desfase temporal sugiere que los eventos no evolucionaron de manera simultánea en toda la red, sino que pudieron desarrollarse de forma progresiva entre estaciones.

Desde el punto de vista del tipo de lluvia, los eventos de menor duración, mayor intensidad y pico temprano pueden asociarse a un comportamiento convectivo o tipo chubasco, caracterizado por lluvias localizadas, súbitas y variables. En cambio, los eventos

de mayor duración, menor intensidad y menor volumen por intervalo pueden asociarse a un comportamiento más persistente o estratiforme débil, siempre considerando que esta clasificación es inferida a partir del patrón pluviométrico y no de observaciones directas de nubosidad o radar. La Met Office diferencia los chubascos convectivos como eventos cortos, localizados y variables, mientras que la lluvia asociada a nubes estratiformes suele ser más continua y persistente.

En conjunto, el análisis horario demuestra que los pluviómetros IoT permitieron identificar no solo la cantidad de lluvia registrada, sino también el momento de inicio, concentración y finalización de los eventos. Esta información es relevante porque permite diferenciar lluvias breves e intensas de lluvias más prolongadas y débiles, lo cual no sería posible con registros diarios acumulados. Por tanto, el horario de ocurrencia constituye una variable clave para interpretar la variabilidad temporal de las tormentas y su posible implicancia en el análisis hidrológico del área de estudio.

6.4. Discusión de eventos máximos y extremos

El evento máximo registrado en la estación Mar, identificado como **MAR_36**, no corresponde a un evento local aislado, sino que forma parte del **evento regional extremo ERE_06**. Este evento se desarrolló entre el **30/01/2026 y el 31/01/2026**, con una duración regional de **718.4 minutos**, equivalente a aproximadamente **12 horas**, y afectó a siete estaciones: **Alder, Arvin, Asucena, Mar, Molepata 2, Omar y Ximena**. Esta cobertura espacial permite clasificarlo como un evento regional de amplia extensión dentro de la red pluviométrica.

Según el mapa de regionalización espacial, las estaciones de la red se distribuyen sobre un gradiente altitudinal aproximado entre **2498 y 3424 m s.n.m.**, abarcando sectores de los distritos de **Ayacucho, Jesús Nazareno, Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, San Juan Bautista y Carmen Alto**. En esta configuración, **IE Molepata 2** se ubica hacia el sector norte de la red, **Asucena** hacia el noroeste, **Mar y Ximena** en el eje central-oeste, mientras que **Alder, Pedagógico y Arvin** se localizan hacia el sector centro-este y sureste. Esta disposición espacial permite interpretar que el ERE_06 no se desarrolló sobre una superficie homogénea, sino sobre un relieve urbano con diferencias altitudinales, posiciones contrastantes y posibles cambios locales en la exposición de cada estación.

Dentro de este evento, **Mar presentó el mayor volumen acumulado individual**, con **1805.58 mm** durante **472.5 minutos**. La curva acumulada de MAR_36 muestra un

crecimiento sostenido durante casi todo el evento, con mayor incremento hacia la fase final. Su pico ocurrió al **76.2 % de la duración**, por lo que se clasifica como un evento de **pico tardío**. Esto indica que el aporte principal de lluvia en Mar no ocurrió al inicio, sino después de varias horas de desarrollo, comportamiento asociado a una tormenta persistente y acumulativa.

Sin embargo, el núcleo de mayor intensidad regional no se ubicó en Mar, sino en **Alder**. El evento **ALDER_42** alcanzó una intensidad máxima de **695.52 mm/h**, mientras que Mar concentró el mayor volumen acumulado. Esta diferencia demuestra que el ERE_06 tuvo una estructura interna heterogénea: el núcleo de acumulación y el núcleo de intensidad no coincidieron espacialmente. Por tanto, el evento no debe interpretarse como una lluvia uniforme sobre toda la red, sino como un sistema regional con sectores diferenciados de mayor volumen y mayor intensidad.

La distribución espacial observada en la **isoyeta del ERE_06** refuerza esta interpretación. El mapa muestra mayores acumulados hacia el sector centro-este del área interpolada, próximos a las estaciones **Asucena y Alder**, mientras que los menores valores se ubicaron hacia el sureste, cercano a **Omar**. Esto confirma que, incluso dentro de un evento regional, la precipitación presentó una distribución espacial desigual, con concentración marcada en sectores específicos de la red.

Respecto a la propagación, los resultados generales de rutas muestran que los tramos más frecuentes fueron **Alder → Asucena**, **Molepata 2 → Mar** y **Mar → Alder**. Además, Molepata 2 fue identificada como estación de origen frecuente, Mar como núcleo de acumulación extrema, Alder como núcleo de intensidad y Asucena como destino frecuente. En función de estos patrones, la secuencia espacial más coherente para interpretar el ERE_06 es **Molepata 2 → Mar → Alder → Asucena**. Esta ruta debe entenderse como una secuencia funcional de activación pluviométrica dentro de la red, no como una trayectoria atmosférica exacta, debido a que no se incorporaron datos de viento o radar.

Desde el punto de vista hidrológico, el ERE_06 resulta relevante porque combina dos condiciones críticas: **acumulación prolongada e intensidad localizada**. El comportamiento de Mar representa un escenario crítico por volumen y duración, asociado a una posible respuesta sostenida del sistema de drenaje. En cambio, Alder representa un escenario crítico por intensidad, asociado a posibles caudales pico de respuesta rápida. Esta diferencia evidencia que el análisis de tormentas extremas debe considerar simultáneamente

la duración, el acumulado, la intensidad máxima, el momento del pico y la cobertura espacial.

Finalmente, es importante diferenciar este evento del **ER_006** registrado en la Tabla 22, correspondiente al **25/02/2026**, entre las **06:29 y 08:45**, con una duración de **136.7 minutos** y participación de cuatro estaciones: **Alder, Asucena, IE Molepata 2 y Omar**. A diferencia del ERE_06 asociado a MAR_36, el ER_006 presentó menor duración y menor cobertura espacial, por lo que representa un evento regional de cobertura intermedia. Esta distinción evita confundir un evento regional común con el evento regional extremo analizado, que destacó por su duración, acumulación, intensidad localizada y mayor extensión dentro de la red.

6.5. Discusión de curvas y perfil temporal de eventos por estación

Las curvas representativas permitieron caracterizar el perfil temporal de los eventos de lluvia a escala puntual, respondiendo al objetivo de identificar el comportamiento característico de las tormentas en puntos específicos de Ayacucho mediante datos de pluviómetros IoT. A diferencia del análisis basado solo en acumulado o intensidad máxima, estas curvas muestran **cómo se distribuye la lluvia dentro del evento**, es decir, si el mayor aporte ocurre al inicio, en la parte central o hacia el final.

En la **Figura 50**, las estaciones muestran diferencias claras en la forma temporal de la precipitación. **Mar** presenta un patrón de concentración inicial, con mayor aporte de lluvia al inicio del evento y disminución progresiva posterior. Este comportamiento representa eventos breves con descarga temprana, asociados a una respuesta rápida de intensidad. En contraste, **Sara y Omar** muestran curvas crecientes, con mayor concentración hacia la fase final, lo que indica eventos de desarrollo progresivo. **Ximena** presenta un pico central, mientras que **IE Molepata 2** mantiene una distribución más uniforme. Estos resultados evidencian que el perfil de tormenta no es único para toda la red, sino que varía según la estación.

Los eventos representativos reales permiten validar esta interpretación, ya que corresponden a eventos observados que se aproximan al patrón central de cada estación. En **Mar**, el evento representativo fue el **evento 7**, con una duración de **8.1 min**, acumulado de **3.36 mm** y máximo de **2.52 mm/5 min**. Su mayor aporte ocurre al inicio, por lo que representa un perfil de **concentración inicial**. Este tipo de comportamiento es relevante

hidrológicamente porque puede generar respuestas rápidas en superficies urbanas, aun cuando el acumulado total no sea alto.

En **Ximena**, el evento representativo fue el **evento 26**, con duración de **31.2 min**, acumulado de **3.36 mm** y máximo de **0.84 mm/5 min**. La lluvia aumenta hacia la parte media y luego disminuye, configurando un perfil de **pico central**. Este patrón refleja una distribución más equilibrada del evento, donde la fase crítica no ocurre inmediatamente al inicio ni exclusivamente al final, sino durante el desarrollo medio de la tormenta.

En **Sara**, el evento representativo fue el **evento 6**, con duración de **10.3 min**, acumulado de **2.10 mm** y máximo de **1.68 mm/5 min**. En este caso, el mayor aporte aparece hacia el final, por lo que representa un perfil de **concentración tardía**. Este comportamiento indica una tormenta que se intensifica progresivamente, con una fase final más activa que la inicial. Sin embargo, esta estación debe interpretarse con cautela debido a su menor cantidad de registros válidos, lo cual limita la generalización de su perfil.

En conjunto, las curvas representativas permiten reconocer **tres perfiles temporales principales**: concentración inicial, pico central y concentración tardía. Estos perfiles no corresponden necesariamente a tipos meteorológicos por origen, como lluvia convectiva u orográfica, sino a **tipos temporales de distribución interna de la lluvia** dentro del evento. Esta diferencia es importante: el análisis no busca clasificar el origen atmosférico de cada tormenta, sino caracterizar su forma temporal a partir del registro pluviométrico.

6.6. Discusión de análisis espacial mediante Ward

La regionalización mediante Ward permitió identificar zonas funcionales de comportamiento pluviométrico, definidas por la similitud temporal e hidrológica de los eventos registrados y no únicamente por la cercanía entre estaciones. En la **Figura 58**, el agrupamiento integral separó dos zonas principales: la **Zona 1**, conformada por **Molepata 2, Asucena, Ximena, Mar y Myfa**; y la **Zona 2**, integrada por **Sara, Alder, Pedagógico y Arvin**. Las distancias al centro de cada grupo indican que la proximidad espacial no explica completamente la agrupación, ya que las estaciones fueron asociadas según la respuesta de sus parámetros de lluvia durante el periodo evaluado.

La ausencia de **Omar** en la regionalización integral de la Figura 58 debe interpretarse desde el criterio metodológico aplicado al análisis. En el procesamiento se consideró un número mínimo de pulsos por evento, definido como $n_min_pulsos < -4$, con el fin de excluir eventos demasiado breves o con baja información temporal. Este criterio es necesario porque

eventos con pocos pulsos no representan adecuadamente la forma ni la evolución interna de la lluvia. Por tanto, la no inclusión de Omar en este agrupamiento no implica ausencia de comportamiento pluviométrico relevante, sino una limitación de representatividad dentro de la matriz usada para el clúster integral.

Desde el punto de vista físico, la separación entre la Zona 1 y la Zona 2 puede asociarse a la interacción entre lluvias convectivas, posible realce orográfico local y diferencias de exposición dentro del relieve urbano. La precipitación no se distribuyó como una superficie uniforme, sino mediante activaciones sectorizadas, lo cual es coherente con la **Tabla 21**, donde predominan eventos locales y compartidos sobre eventos regionales. Es decir, una parte importante de los eventos no afectó simultáneamente a toda la red, sino a sectores específicos del área de estudio.

Esta sectorización ayuda a explicar por qué estaciones del eje **Molepata 2-Asucena-Ximena-Mar-Myfa** fueron agrupadas en la Zona 1. Este sector combina zonas abiertas, presencia de río, bajadas y áreas parcialmente condicionadas por el relieve, como el entorno del cerro Wapapiccho. Bajo condiciones de humedad e inestabilidad, estas características pueden modificar localmente el ascenso, desplazamiento o persistencia de núcleos de lluvia. Esta interpretación se refuerza con los resultados de propagación, donde se identificaron tramos recurrentes como **Molepata 2 → Mar** y **Mar → Alder**, además del rol de Molepata 2 como estación de origen frecuente.

En contraste, la Zona 2 agrupa estaciones ubicadas hacia sectores más bajos, abiertos o de transición, como **Alder, Pedagógico, Arvin y Sara**. Su agrupamiento indica una respuesta hidrológica y temporal distinta respecto a la Zona 1. En este sector, la lluvia puede responder con mayor sensibilidad a núcleos convectivos localizados o a la fase de desplazamiento del evento. Esto es consistente con el rol de **Alder** como núcleo de intensidad y con las rutas recurrentes **Alder → Asucena** y **Arvin → Pedagógico**, que muestran que la lluvia presentó direcciones de activación entre sectores, no una ocurrencia simultánea en toda la red.

Las **Figuras 63 y 64** complementan esta interpretación porque el agrupamiento por forma temporal no reproduce exactamente las zonas de la Figura 58. En el análisis de forma temporal, **Sara, Myfa, Alder y Asucena** conforman un primer grupo; **Ximena, Mar, Arvin y Pedagógico** forman un segundo grupo; e **IE Molepata 2 y Omar** integran un tercer grupo diferenciado. Esto demuestra que una estación puede pertenecer a una zona integral por sus

parámetros generales, pero agruparse de otra manera cuando se analiza únicamente la distribución interna de la lluvia durante el evento.

El caso de **IE Molepata 2 y Omar** es relevante porque confirma que la similitud pluviométrica no depende necesariamente de la cercanía geográfica. Aunque Omar no fue considerado en el clúster integral de la Figura 58, sí aparece junto a Molepata 2 en el análisis de forma temporal. Esto sugiere que ambas estaciones presentan una estructura interna de lluvia semejante, posiblemente relacionada con la fase en que reciben la precipitación dentro de eventos regionales o con una respuesta temporal parecida frente al desplazamiento de los núcleos de lluvia.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

1. La implementación de la red de pluviómetros IoT programados con Arduino permitió caracterizar eventos de tormenta con mayor detalle temporal y espacial en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026. Los registros obtenidos evidenciaron que la precipitación no presenta un comportamiento uniforme en la zona urbana, por lo que el análisis con múltiples puntos de medición mejora la identificación de diferencias de intensidad, acumulado, duración y momento de ocurrencia de los eventos.
2. Los eventos de tormenta analizados presentaron perfiles temporales diferenciados, con variaciones en duración, acumulado total, intensidad máxima y distribución interna de la lluvia. La delimitación de eventos mediante un umbral de separación temporal permitió reconocer eventos continuos y evitar fragmentaciones artificiales, mientras que la clasificación temporal por distribución de volumen permitió identificar si la mayor precipitación se concentró al inicio, en la parte media o al final del evento.
3. La comparación entre los diez puntos de medición demostró la existencia de variabilidad espacio-temporal significativa dentro de Ayacucho. Se identificaron eventos de comportamiento regional, registrados en varias estaciones, y eventos de carácter más local, con respuesta marcada solo en determinados sectores. Esto coincide con antecedentes que indican que una red pluviométrica densa permite capturar diferencias espaciales que una estación aislada no puede representar adecuadamente.
4. La calibración de los pluviómetros IoT permitió mejorar la confiabilidad de los registros y ajustar la conversión real entre el volumen captado y la precipitación registrada. Sin embargo, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones propias de los pluviómetros tipo balancín, especialmente en la estimación de intensidades máximas en intervalos cortos. Esto es coherente con los antecedentes revisados, donde se señala que estos equipos son confiables para acumulados por evento, pero requieren calibración y procesamiento adecuado para el análisis de intensidades.

5. Los datos generados por la red IoT constituyen una base útil para mejorar la evaluación hidrológica local y aportar al diseño de infraestructura hidráulica, principalmente porque permiten construir tormentas de diseño más representativas de la dinámica urbana de Ayacucho. No obstante, por corresponder a un periodo específico de monitoreo, estos resultados deben utilizarse como información complementaria a series históricas, curvas IDF oficiales y criterios normativos de diseño, no como reemplazo directo.

7.2. Recomendaciones

1. Ampliar el periodo de monitoreo a más temporadas de lluvia, incorporando al menos dos o tres veranos australes adicionales, para fortalecer la representatividad estadística de los eventos extremos y mejorar su aplicabilidad en estudios hidrológicos y diseño hidráulico.
2. Mantener un protocolo permanente de calibración, limpieza y validación de datos en los pluviómetros IoT, incluyendo pruebas de volumen, revisión de pulsos anómalos, control de fallas de energía/conectividad y comparación cruzada entre estaciones cercanas.
3. Complementar los registros IoT con información de estaciones convencionales, curvas IDF, imágenes radar o satelitales e información topográfica urbana, a fin de integrar la variabilidad espacio-temporal de la lluvia con el análisis de escorrentía, drenaje pluvial y zonas críticas de acumulación.

CAPITULO VIII. BIBLIOGRAFIA

- Acuña, D., & Robles, D. (s. f.). *Proyecto “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña”*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988a). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988b). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Donges, J. F., Schleussner, C.-F., Siegmund, J. F., & Donner, R. V. (2016). Event coincidence analysis for quantifying statistical interrelationships between event time series: On the role of flood events as possible triggers of epidemic outbreaks. *The European Physical Journal Special Topics*, 225(3), 471-487. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-50233-y>
- Huff, F. A. (1990). *Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois*.
- Muñoz, P., Céleri, R., & Feyen, J. (2016). Effect of the Resolution of Tipping-Bucket Rain Gauge and Calculation Method on Rainfall Intensities in an Andean Mountain Gradient. *Water*, 8(11), 534. <https://doi.org/10.3390/w8110534>
- Organización Meteorológica Mundial. (2022). *Urban heat island*.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., & Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Saha, U., Gupta, M. D., Mitra, A. K., & Prasad, V. S. (2023). *Development of Real-time Quality Monitoring Module for ARG network over Mumbai: Results from Monsoon 2020-202*.
- Salcedo, E. (2024a). *Graph Learning-based Regional Heavy Rainfall Prediction Using Low-Cost Rain Gauges* (arXiv:2412.16842). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.16842>

- Salcedo, E. (2024b, diciembre 22). *Graph Learning-based Regional Heavy Rainfall Prediction Using Low-Cost Rain Gauges*. Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.16842>
- Sánchez San Román, F. J. (sf). *Precipitaciones*. Universidad de Salamanca.
- Scorah, M., Nathan, R., & Wasko, C. (2025). Rainfall events become temporally more uniform with increasing storm depth. *Journal of Hydrology*, 657, 133101. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133101>
- Segovia-Cardozo, D. A., Bernal-Basurco, C., & Rodríguez-Sinobas, L. (2023). Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research: Summary on Measurement Uncertainties, Calibration, and Error Reduction Strategies. *Sensors*, 23(12), 5385. <https://doi.org/10.3390/s23125385>
- Su, Z., Meyerhenke, H., & Kurths, J. (2022). The climatic interdependence of extreme-rainfall events around the globe. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 32(4), 043126. <https://doi.org/10.1063/5.0077106>
- Texas Department of Transportation. (2019). *Hydraulic Design Manual*.
- Adams, B. J., & Papa, F. (2000). *Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models*. John Wiley & Sons.
- World Meteorological Organization. (2018). *Guide to instruments and methods of observation* (WMO-No. 8). World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization. (s. f.). *Falling particles (precipitation)*. International Cloud Atlas.

CAPITULO IX: ANEXOS

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 1. Recepción de módulos NodeMCU, protoboards y accesorios electrónicos para la implementación del sistema IoT.

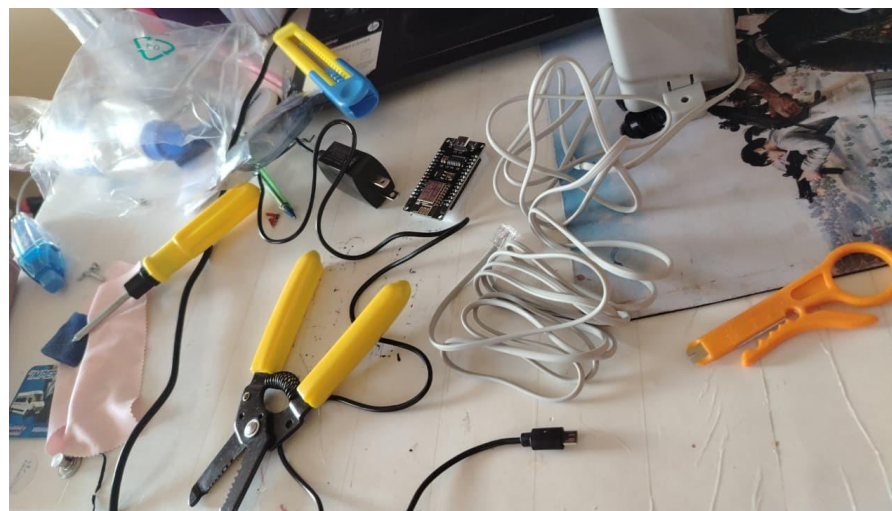


Fotografía 2. Organización de módulos NodeMCU, protoboards y cables de conexión para el prototipado del sistema

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental

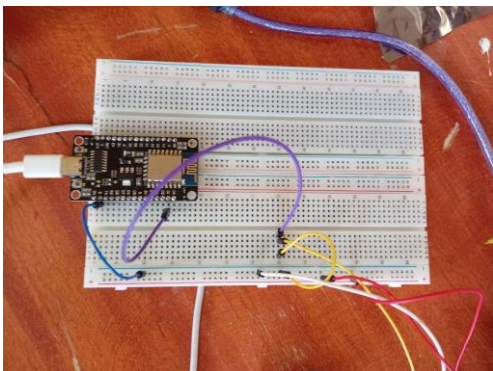


Fotografía 3. Detalle de cables jumper para el acondicionamiento de las conexiones del sistema

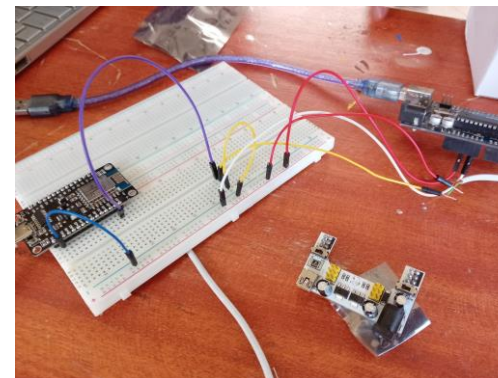


Fotografía 4. Herramientas y cableado utilizados para el acondicionamiento de los equipos de monitoreo

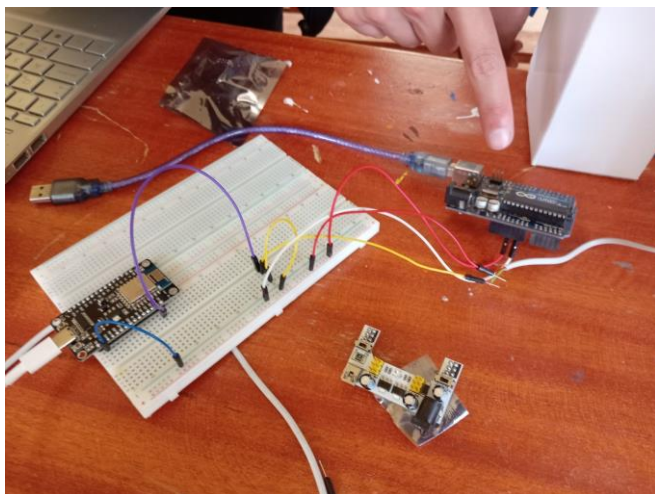
Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



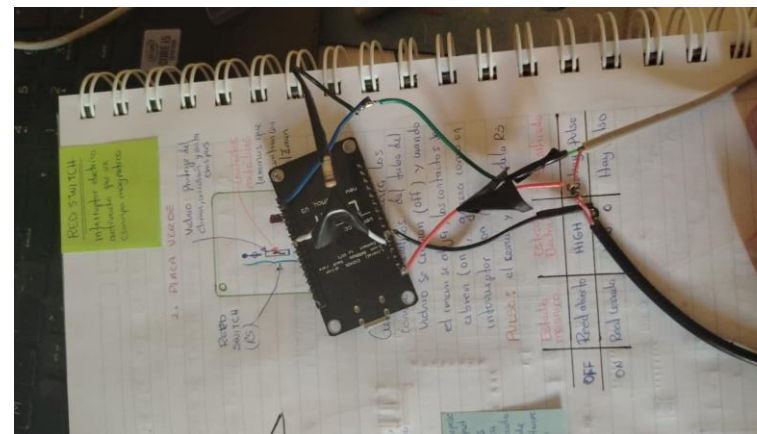
Fotografía 5. Montaje preliminar del módulo NodeMCU ESP8266 en protoboard



Fotografía 6. Prueba de conexión entre el NodeMCU, protoboard y sistema de alimentación externa.



Fotografía 7. Verificación del circuito de comunicación entre módulos durante pruebas de escritorio.



Fotografía 8. Prueba del sensor Reed Switch y verificación de la generación de pulsos eléctricos.

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 9. Ensayo de funcionamiento del prototipo de adquisición de datos en campo



Fotografía 10. Ensayo volumétrico para calibración del pluviómetro tipo balancín.

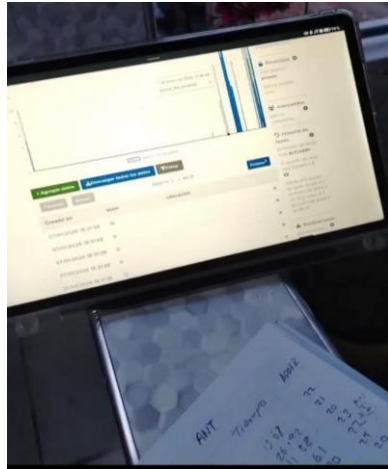


Fotografía 11. Pluviómetros caseros utilizados como referencia para la validación posterior en campo.

NUE - FASE				NUE - FASE				NUE - FASE			
N.º de Pulso		Pulsos por litro		Pulsos por litro		Pulsos por litro		Pulsos por litro		Pulsos por litro	
1	20	21	20.31	21	20.31	21	20.31	21	20.31	21	20.31
2	20	23	18.69	23	18.69	23	18.69	23	18.69	23	18.69
3	20	24	16.67	24	16.67	24	16.67	24	16.67	24	16.67
4	20	25	14.00	25	14.00	25	14.00	25	14.00	25	14.00
5	20	26	12.50	26	12.50	26	12.50	26	12.50	26	12.50
6	20	27	11.11	27	11.11	27	11.11	27	11.11	27	11.11
7	20	28	10.00	28	10.00	28	10.00	28	10.00	28	10.00
8	20	29	9.09	29	9.09	29	9.09	29	9.09	29	9.09
9	20	30	8.33	30	8.33	30	8.33	30	8.33	30	8.33
10	20	31	7.69	31	7.69	31	7.69	31	7.69	31	7.69

Fotografía 12. Registro manual de ensayos de volumen, pulsos y tiempos de respuesta durante la calibración.

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 13. Verificación de datos registrados y descargados desde la plataforma Adafruit IO



Fotografía 14. Registro de actividades de verificación y control durante la etapa experimental.



Fotografía 15. Presentación del funcionamiento del sistema y verificación del código de programación.

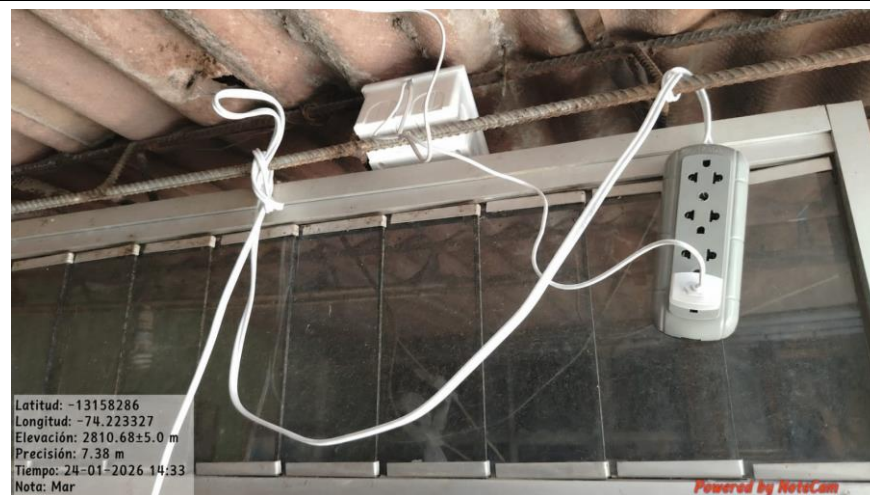


Fotografía 16. Instalación y verificación del equipo de monitoreo en punto de control interior.

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 17. Instalación de estación de monitoreo Ximena.



Fotografía 18. Instalación de estación de monitoreo Mar

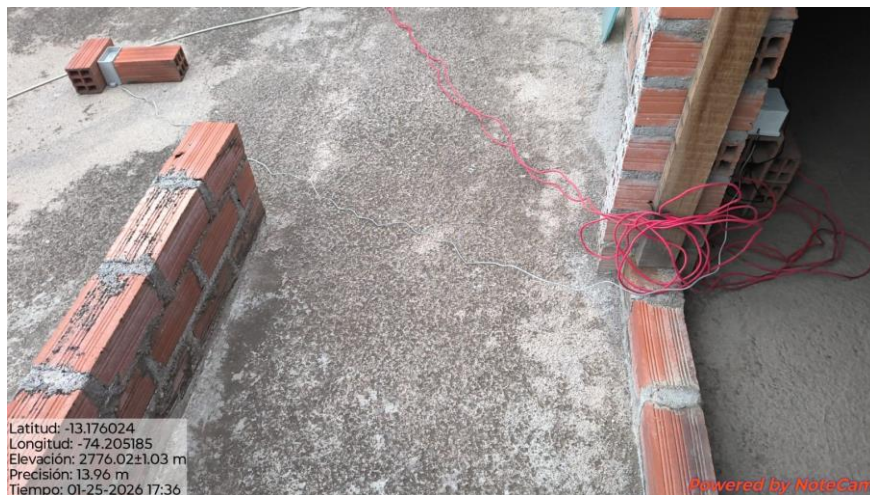


Fotografía 19. Instalación de estación de monitoreo Sara.



Fotografía 20. Ubicación del pluviómetro en la estación de monitoreo Alder.

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 21. Vista general del cableado y ubicación de la estación de monitoreo Alder.



Fotografía 22. Acondicionamiento del módulo de transmisión en la estación de monitoreo Alder.



Fotografía 23. Instalación de estación de monitoreo Arvin.



Fotografía 24. Instalación de pluviómetro y módulo de registro en estación de monitoreo Myfa.

Panel fotográfico de evidencias de campo e implementación instrumental



Fotografía 25. Instalación de estación de monitoreo Asucena.



Fotografía 26. Instalación de estación de monitoreo en el Pedagógico.



Fotografía 27. Instalación de pluviómetro y módulo de adquisición en estación de monitoreo Omar



Fotografía 28. Instalación del sensor y módulo de registro en la estación IE Molepata.

Tabla 24. Eventos regionales identificados en la red pluviométrica

Evento regional	Fecha	Inicio	Fin	Duración (min)	Duración (h)	N.º estaciones	Estaciones participantes
ER_001	25/01/2026	20:32	09:19	43967.9	732.8	8	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, mar, myfa, omar, ximena
ER_002	24/02/2026	10:30	11:55	85.4	1.42	5	Alder, asucena, ie molepata 2, myfa, omar
ER_003	24/02/2026	18:50	00:36	346.2	5.77	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_004	25/02/2026	01:51	01:58	7.7	0.13	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_005	25/02/2026	02:52	04:19	87	1.45	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_006	25/02/2026	06:29	08:45	136.7	2.28	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_007	25/02/2026	09:48	10:00	12.7	0.21	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_008	25/02/2026	10:58	11:27	29.1	0.49	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_009	25/02/2026	13:01	13:10	9.6	0.16	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_010	25/02/2026	16:32	16:44	11.9	0.2	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_011	25/02/2026	17:49	17:51	2.7	0.04	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_012	25/02/2026	18:41	19:05	24.5	0.41	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_015	26/02/2026	01:08	02:10	62.5	1.04	5	Alder, asucena, ie molepata 2, omar, sara
ER_016	26/02/2026	12:17	03:55	937.4	15.62	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico, sara
ER_013	26/02/2026	21:22	22:55	93.1	1.55	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_014	26/02/2026	23:36	00:27	51.5	0.86	5	Alder, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_017	27/02/2026	09:56	09:58	2.7	0.04	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_018	27/02/2026	10:54	11:57	63.6	1.06	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_019	27/02/2026	13:16	13:50	34.1	0.57	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_020	27/02/2026	16:58	18:07	69.3	1.16	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_021	27/02/2026	18:54	19:11	17.7	0.3	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_024	28/02/2026	04:05	04:08	3.9	0.06	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_025	28/02/2026	13:40	22:10	510.3	8.51	6	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico
ER_022	28/02/2026	20:44	21:11	27.8	0.46	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_023	28/02/2026	22:34	03:32	298.1	4.97	6	Alder, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico
ER_027	01/03/2026	01:44	01:51	7.9	0.13	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_028	01/03/2026	02:54	04:02	68	1.13	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico
ER_029	01/03/2026	04:18	05:05	47.5	0.79	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico
ER_026	01/03/2026	22:48	01:03	135.4	2.26	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar

ER_032	02/03/2026	00:48	02:24	97	1.62	6	Alder, asucena, ie molepata 2, omar, sara, ximena
ER_033	02/03/2026	02:27	02:27	8640.7	144.01	9	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, mar, myfa, omar, pedagogico, ximena
ER_030	02/03/2026	21:02	21:33	31.5	0.52	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_031	02/03/2026	22:53	00:05	73	1.22	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico, sara
ER_034	08/03/2026	02:55	04:09	74.1	1.23	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico
ER_035	08/03/2026	04:58	04:59	1.1	0.02	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_036	08/03/2026	06:39	06:41	2.5	0.04	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_037	08/03/2026	07:32	08:10	38.8	0.65	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_038	08/03/2026	08:42	08:42	0.8	0.01	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_039	08/03/2026	09:32	09:59	27	0.45	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_040	08/03/2026	13:13	13:13	0.9	0.02	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_041	08/03/2026	13:48	18:22	274.1	4.57	7	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, omar, pedagogico, ximena
ER_046	09/03/2026	05:03	06:12	69.6	1.16	4	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico
ER_047	09/03/2026	11:04	03:44	6760.8	112.68	8	Alder, arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico, ximena
ER_042	09/03/2026	19:28	19:28	0.8	0.01	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_043	09/03/2026	20:37	20:38	2	0.03	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_044	09/03/2026	23:19	23:27	8.4	0.14	4	Alder, asucena, ie molepata 2, omar
ER_045	09/03/2026	23:58	02:07	129.5	2.16	7	Arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, omar, pedagogico, ximena
ER_048	14/03/2026	04:15	05:10	55.4	0.92	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_049	14/03/2026	10:24	23:53	809.2	13.49	6	Arvin, asucena, ie molepata 2, myfa, pedagogico, ximena
ER_050	15/03/2026	00:33	03:34	181.5	3.02	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_051	15/03/2026	12:43	05:53	1029.6	17.16	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_052	16/03/2026	12:02	11:56	2874.4	47.91	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_053	18/03/2026	12:31	11:05	9993.4	166.56	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_054	25/03/2026	11:35	23:36	721.1	12.02	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, pedagogico, ximena
ER_055	27/03/2026	21:52	07:15	2003.7	33.4	3	Asucena, ie molepata 2, ximena
ER_056	28/03/2026	08:01	11:32	211.3	3.52	3	Asucena, ie molepata 2, ximena
ER_057	28/03/2026	13:08	17:04	4555.2	75.92	5	Arvin, asucena, ie molepata 2, mar, ximena

Cuadro. Resumen de costos del pluviómetro IoT

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo (S/)
1	NodeMCU ESP8266	1	6.24
2	Pluviómetro de pulsos Misol	1	33.66
3	Cable jumper Dupont	1	2.98
4	Cargador / fuente de alimentación	1	10.35
5	Gastos de soldadura y armado	1	20.00
	Total		73.23

Fuente: elaboración propia con base en precios referenciales de mercado.

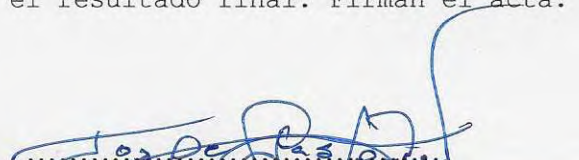
**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**
Bach. ELIZABETH XIMENA CHOCCÑA CHILLCCE**R.D. N° 287-2026-UNSCH-FCA-D**

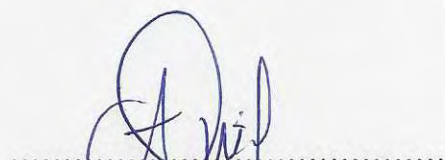
En la ciudad de Ayacucho, a los quince días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe, Dr. Eleazar Chuchón Angulo como asesor, Dr. Richard Alex Oscco Peceros y el Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Variabilidad espacio-temporal y perfiles de eventos de tormenta en la ciudad de Huamanga durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IOT**, para obtener el Título Profesional de Ingeniera Agrícola, presentado por la Bachiller **ELIZABETH XIMENA CHOCCÑA CHILLCCE**.

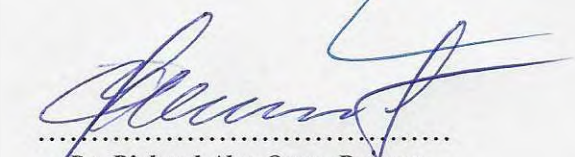
El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe	18	17	18	18
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	18	18	18	18
Dr. Richard Alex Oscco Peceros	14	14	14	14
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	17	16	17	17
PROMEDIO GENERAL				17

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe
Presidente


.....
Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Asesor


.....
Dr. Richard Alex Oscco Peceros
Jurado


.....
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por **R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF**; hace constar que el trabajo titulado:

Variabilidad espacio-temporal de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IoT

Autor : Elizabeth Ximena Chocña Chillce
Asesor : Eleazar Chuchón Angulo

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobado mediante RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de **uno (1%)** de índice de similitud, con exclusión de citas y bibliografía, y de coincidencias menores de 30 palabras.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3001334898

Ayacucho, 21 de Julio de 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Prof. Dr. Eleazar Chuchón Angulo
DNI 42682714

Variabilidad espacio-temporal de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IoT

por Elizabeth Ximena Choccña Chilcce

Fecha de entrega: 21-jul-2026 11:24a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3001334898

Nombre del archivo: Tesis-EXCHCH-revB.pdf (8.51M)

Total de palabras: 40614

Total de caracteres: 239495

Variabilidad espacio-temporal de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IoT

INFORME DE ORIGINALIDAD

1 %

INDICE DE SIMILITUD

1 %

FUENTES DE INTERNET

0 %

PUBLICACIONES

0 %

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

2

repositorio.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

3

dspace.upse.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

4

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

5

www.puertoscostas.com

Fuente de Internet

<1 %

6

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

7

dspace.unl.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

8

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Variabilidad espacio-temporal de tormentas en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante pluviómetros IoT

Spatiotemporal Variability of Storm Events in the City of Ayacucho during the 2026 Austral Summer Using IoT Rain Gauges

Elizabeth Ximena Chocña Chillce¹

Elizabeth.chocna.21@ unsch.edu.

Eleazar Chuchon Angulo²

Eleazar.chuchon@unsch.edu.pe

RESUMEN

La investigación analizó la variabilidad espacio-temporal y caracterizó los perfiles de los eventos de tormenta registrados en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026, mediante una red de diez pluviómetros IoT. Los equipos estuvieron conformados por sensores tipo balancín conectados a módulos NodeMCU ESP8266, programados mediante Arduino y configurados para transmitir los registros en tiempo real hacia la plataforma Adafruit IO.

Los datos obtenidos fueron sometidos a procesos de calibración, depuración y procesamiento en RStudio. Mediante ensayos volumétricos controlados se determinó un factor representativo de conversión de 2.31 mL por pulso, equivalente aproximadamente a 0.42 mm de precipitación por basculación. Los eventos de lluvia fueron delimitados utilizando un tiempo mínimo entre eventos (IETD) de 30 minutos y caracterizados según su duración, precipitación acumulada, intensidad máxima, intensidad media y distribución temporal interna. Asimismo, se evaluaron las coincidencias temporales entre estaciones, la cobertura espacial de los eventos, sus patrones de propagación y la similitud pluviométrica mediante agrupamiento jerárquico de Ward.

Los resultados evidenciaron una marcada heterogeneidad de la precipitación dentro del área urbana, con diferencias entre estaciones en la frecuencia, acumulación, intensidad, duración y perfil temporal de los eventos. Se identificaron eventos locales, compartidos y regionales, así como patrones recurrentes de propagación y agrupamientos de estaciones con comportamiento pluviométrico semejante. Se concluye que una red distribuida de pluviómetros IoT permite obtener información pluviométrica de alta resolución temporal y espacial, mejorando la caracterización de las tormentas urbanas y proporcionando información técnica útil para estudios hidrológicos y el diseño de infraestructura hidráulica.

Palabras clave: precipitación, tormentas, variabilidad espacio-temporal, pluviómetros IoT, Ayacucho.

ABSTRACT

This study analyzed the spatiotemporal variability and characterized the temporal profiles of storm events recorded in the city of Ayacucho during the 2026 austral summer using a network of ten IoT rain gauges. The monitoring devices consisted of tipping-bucket sensors connected to NodeMCU ESP8266 modules, programmed through Arduino and configured to transmit rainfall records in real time to the Adafruit IO platform.

The collected data were calibrated, cleaned, and processed in RStudio. Controlled volumetric tests yielded a representative conversion factor of 2.31 mL per pulse, equivalent to approximately 0.42 mm of rainfall per tipping event. Rainfall events were separated using a 30-minute Inter-Event Time Definition (IETD) and characterized according to duration, accumulated precipitation, maximum intensity, mean intensity, and internal temporal distribution. Temporal coincidences among stations, spatial event coverage, propagation patterns, and rainfall similarity were also evaluated using Ward's hierarchical clustering method.

The results revealed marked spatial heterogeneity in urban rainfall, with differences among stations in event frequency, accumulated precipitation, intensity, duration, and temporal rainfall patterns. Local, shared, and regional events were identified, together with recurrent propagation patterns and groups of stations exhibiting similar pluviometric behavior. The study concludes that a distributed IoT rain-gauge network provides high temporal and spatial resolution rainfall information, improving the characterization of urban storm dynamics and providing useful technical data for hydrological studies and hydraulic infrastructure design.

Keywords: precipitation, storm events, spatiotemporal variability, IoT rain gauges, Ayacucho.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación constituye una de las variables hidrológicas más importantes para la planificación territorial, la gestión del riesgo y el diseño de infraestructura hidráulica, debido a su influencia directa en procesos como la escorrentía superficial, infiltración, erosión, inundaciones y generación de caudales máximos. En zonas urbanas, la ocurrencia de lluvias intensas y de corta duración puede producir respuestas hidrológicas rápidas, por lo que resulta fundamental disponer de información pluviométrica con suficiente resolución temporal y espacial para representar adecuadamente la dinámica de las tormentas.

En el Perú, la diversidad climática y topográfica condiciona una distribución irregular de la precipitación. Esta variabilidad es especialmente importante en las regiones andinas, donde factores como el relieve, la altitud, la circulación atmosférica y el desarrollo de tormentas convectivas durante la temporada húmeda pueden generar diferencias significativas entre localidades próximas. En ciudades como Ayacucho, ubicada en un entorno montañoso y con marcada estacionalidad de las lluvias, un mismo evento puede presentar diferencias en precipitación acumulada, intensidad, duración y momento de ocurrencia del pico entre distintos sectores urbanos. Sin embargo, la información disponible procede principalmente de estaciones convencionales con baja densidad espacial y registros que no siempre permiten representar la estructura interna de eventos de corta duración.

Esta limitación adquiere especial importancia en aplicaciones hidrológicas e hidráulicas, debido a que el empleo de información poco representativa puede incrementar la incertidumbre en la estimación de tormentas de diseño y, en

consecuencia, influir en el dimensionamiento de sistemas de drenaje, canales y otras obras hidráulicas. Asimismo, los registros diarios permiten conocer la precipitación acumulada, pero resultan insuficientes para identificar características como la duración efectiva del evento, la intensidad máxima, la distribución temporal de la lluvia, los desfases entre sectores o el desplazamiento espacial de una tormenta dentro de una ciudad.

En este contexto, las redes de pluviómetros automáticos basadas en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) constituyen una alternativa para incrementar la densidad de monitoreo y obtener información en tiempo real. Salcedo (2024) evidenció que la incorporación de múltiples pluviómetros de bajo costo permite representar relaciones espaciales entre estaciones y mejorar la caracterización regional de eventos de precipitación. De manera similar, Saha et al. (2023) demostraron que las redes densas de pluviómetros automáticos permiten identificar diferencias pluviométricas significativas entre sectores cercanos y utilizar la consistencia espacial entre estaciones como criterio adicional para evaluar la calidad de los registros.

No obstante, la utilización de sensores tipo balancín requiere considerar las incertidumbres propias del instrumento. Segovia-Cardozo et al. (2023) señalan que estos dispositivos presentan un desempeño adecuado para estimar precipitación acumulada, aunque pueden introducir errores en la determinación de intensidades en escalas temporales cortas si no se realizan procesos apropiados de calibración y tratamiento de datos. Asimismo, Muñoz et al. (2016) encontraron en ambientes andinos que la resolución del pluviómetro y el método empleado para calcular la intensidad influyen considerablemente en la incertidumbre de las mediciones, especialmente en intervalos temporales reducidos. Estos antecedentes resaltan la

necesidad de complementar la instrumentación de bajo costo con procedimientos de calibración, control de calidad y procesamiento de la información.

A pesar de estos avances, en la ciudad de Ayacucho existe limitada información pluviométrica distribuida espacialmente y con resolución subhoraria que permita estudiar simultáneamente la evolución temporal y espacial de las tormentas urbanas. Esta brecha dificulta determinar si los eventos registrados en diferentes sectores presentan comportamientos semejantes, si existen zonas con patrones pluviométricos diferenciados y cómo se propaga la precipitación dentro del área urbana. El monitoreo mediante múltiples estaciones ofrece, por tanto, la posibilidad de pasar del análisis puntual de la lluvia hacia una interpretación integrada de su comportamiento espacio-temporal.

En respuesta a esta problemática, en la presente investigación se implementó una red de diez pluviómetros IoT tipo balancín conectados a módulos NodeMCU ESP8266 y configurados para transmitir información en tiempo real mediante la plataforma

Adafruit IO. Los equipos fueron sometidos a procedimientos de calibración y los registros obtenidos fueron depurados y procesados en RStudio. Los eventos de lluvia se delimitaron mediante un tiempo mínimo entre eventos (IETD) de 30 minutos y fueron caracterizados considerando duración, precipitación acumulada, intensidad máxima, intensidad media y distribución temporal interna. Adicionalmente, se analizaron las coincidencias entre estaciones, la extensión espacial de los eventos, sus patrones de propagación y la similitud pluviométrica mediante agrupamiento jerárquico.

En este sentido, **el objetivo de la investigación fue analizar la variabilidad espacio-temporal y caracterizar los perfiles de los eventos de tormenta registrados en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026 mediante una red de pluviómetros IoT**, generando información de alta resolución que contribuya a una mejor comprensión de la dinámica de las tormentas urbanas y proporcione insumos técnicos para futuras aplicaciones hidrológicas y de diseño de infraestructura hidráulica.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Para el desarrollo de la investigación se emplearon equipos de monitoreo pluviométrico, componentes electrónicos y herramientas informáticas destinadas a la adquisición, transmisión, almacenamiento y procesamiento de los registros de precipitación.

2.1.1. Materiales y equipos de campo

- 10 pluviómetros automáticos tipo balancín (*tipping bucket*), modelo MISOL WH-SP-RG.
- Módulos NodeMCU V3 con microcontrolador ESP8266 ESP-12E.
- Protoboards para conexión de componentes.
- Cables de conexión y conductores eléctricos.
- Fuentes de alimentación de 5 V mediante adaptadores USB.
- Sensores magnéticos *Reed Switch* incorporados en los pluviómetros.
- Acceso a redes WiFi para transmisión de información.
- Materiales de acondicionamiento, fijación y nivelación de los equipos.

Para la etapa de validación en campo se emplearon además dos pluviómetros de referencia elaborados con recipientes transparentes graduados, instalados conjuntamente con dos equipos IoT para comparar los volúmenes de precipitación registrados.

2.1.2. Equipos para procesamiento y almacenamiento

- Computadora portátil.

- Plataforma IoT Adafruit IO.
- Servidor de almacenamiento de datos mediante *feeds* individuales para cada estación.
- Archivos digitales en formato CSV para procesamiento de los registros.

2.1.3. Programas utilizados

- Arduino IDE.
- RStudio.
- QGIS.
- Adafruit IO.
- Protocolo MQTT para transmisión de datos.

2.2. METODOLOGÍA

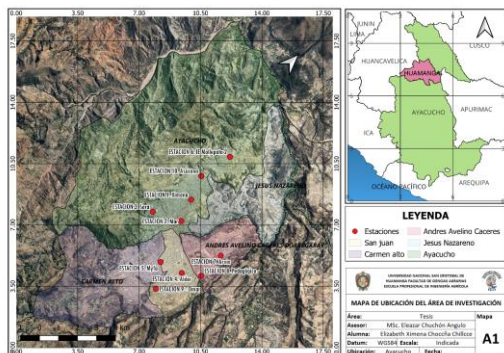
2.2.1. Área de estudio

La investigación se desarrolló en la ciudad de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, ubicada en la región centro-sur del Perú. La zona presenta un clima templado subhúmedo y una marcada estacionalidad de las precipitaciones, concentradas principalmente durante el verano austral.

Para analizar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación se implementó una red compuesta por diez estaciones distribuidas en diferentes sectores urbanos y periurbanos. Su ubicación fue determinada considerando cobertura espacial, disponibilidad de energía eléctrica, conexión WiFi, accesibilidad, seguridad y exposición directa a la precipitación.

Las estaciones fueron denominadas Ximena, Mar, Sara, Alder, Myfa, IE Molepata 2, Arvin, Pedagógico, Omar y Asucena, distribuidas en diferentes sectores de la ciudad.

Figura 1.
Ubicación de las estaciones pluviométricas instaladas en la ciudad de Ayacucho.



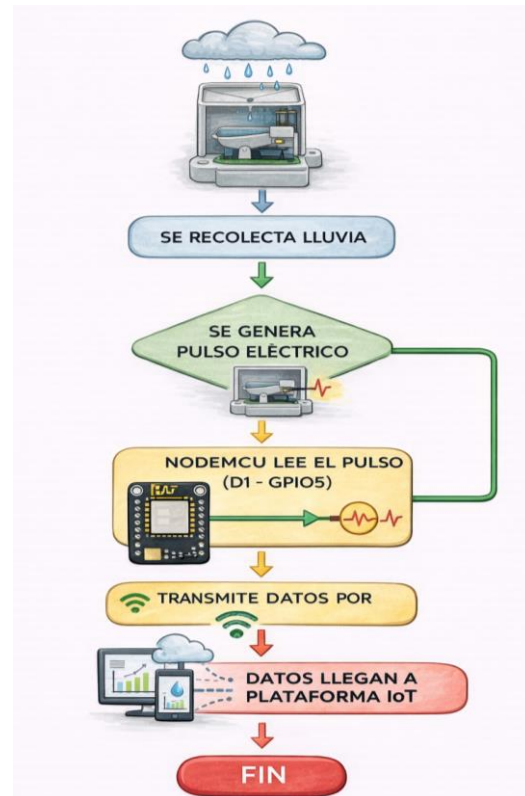
2.2.2. Diseño e implementación de la red de monitoreo

Cada estación estuvo conformada por un pluviómetro automático tipo balancín conectado a un módulo NodeMCU V3 basado en el microcontrolador ESP8266. El funcionamiento del equipo se basa en la acumulación de agua en las cazoletas internas del pluviómetro; cuando se alcanza un volumen determinado, el balancín bascula y un imán activa el interruptor magnético *Reed Switch*, generando un pulso eléctrico.

La señal fue registrada por el NodeMCU mediante el pin digital D1 (GPIO5). El microcontrolador contabilizó los pulsos y determinó el intervalo temporal entre basculaciones (Δt). Para reducir registros falsos producidos por rebotes mecánicos o eléctricos se incorporó un tiempo de protección mediante programación.

Los módulos fueron programados en Arduino IDE y configurados para conectarse a las redes WiFi disponibles en cada punto de instalación. La información fue transmitida mediante el protocolo MQTT hacia la plataforma Adafruit IO, donde cada estación contó con un *feed* independiente para el almacenamiento de sus registros.

Figura 2.
Esquema general del sistema de monitoreo mediante pluviómetros IoT.



2.2.3. Calibración de los pluviómetros

La calibración se realizó mediante un procedimiento estático volumétrico. Se aplicaron volúmenes conocidos de 50 mL de agua sobre el colector del pluviómetro y se registró el número de pulsos producidos por el mecanismo de balancín.

Se realizaron 40 ensayos distribuidos en cuatro bloques de diez repeticiones. Paralelamente, se verificó la correspondencia entre las basculaciones manuales, los pulsos registrados por Arduino y los almacenados en Adafruit IO.

La verificación mostró una correspondencia del 100 % en el conteo de pulsos entre el control manual, Arduino y Adafruit IO. En la evaluación temporal se realizaron 40 ensayos, de los cuales 37 presentaron coincidencia exacta, mientras que tres mostraron diferencias máximas de 0.01 s.

Para determinar el factor representativo de conversión se seleccionaron los ensayos con mayores tiempos de respuesta, por representar condiciones de flujo más próximas a una precipitación natural. Se

obtuvo un promedio de 21.67 pulsos para 50 mL, determinándose un factor de **2.31 mL por pulso**, equivalente aproximadamente a **0.42 mm de precipitación por basculación**, valor utilizado posteriormente para el procesamiento de los registros.

2.2.4. Adquisición y almacenamiento de datos

Los registros generados por cada estación fueron transmitidos en tiempo real hacia Adafruit IO. Cada observación almacenó el valor registrado y su correspondiente marca temporal (*timestamp*).

Los datos fueron descargados periódicamente en formato CSV y organizados individualmente para cada una de las diez estaciones. Posteriormente, las bases de datos fueron integradas y procesadas en RStudio para realizar el análisis hidrológico y espacio-temporal.

2.2.5. Limpieza y depuración de los registros

Antes del análisis se realizó un control de calidad de los datos con la finalidad de eliminar registros inconsistentes asociados a ruido eléctrico, problemas de transmisión o perturbaciones del sistema.

Se eliminaron:

- valores faltantes (NA);
- intervalos temporales negativos asociados a inconsistencias del registro;
- pulsos considerados espurios;
- intervalos mayores de 900 s cuando no representaban una precipitación continua.

Posteriormente, los registros fueron ordenados cronológicamente y convertidos a valores de precipitación utilizando el factor de calibración adoptado.

2.2.6. Delimitación de eventos de lluvia

La separación de los eventos se realizó mediante el criterio **Inter-Event Time Definition (IETD)**. Se evaluaron diferentes umbrales temporales de independencia y, a partir de su comparación, se adoptó un **IETD de 30 minutos**.

Por tanto, dos registros de precipitación fueron considerados pertenecientes a eventos diferentes cuando entre ellos existió un periodo sin precipitación igual o superior a 30 minutos.

Este procedimiento permitió delimitar de manera homogénea los eventos registrados en las diez estaciones.

2.2.7. Caracterización de los eventos

Para cada evento identificado se calcularon los siguientes parámetros:

- fecha y hora de inicio;
- fecha y hora de finalización;
- duración total;
- precipitación acumulada;
- intensidad máxima;
- intensidad media;
- hora de máxima precipitación;
- distribución temporal interna del evento.

Para estudiar la estructura temporal, cada evento fue dividido en cuatro cuartiles de duración. El cuartil que concentró la mayor proporción de precipitación permitió clasificar los eventos según la posición temporal de su mayor concentración de lluvia.

Asimismo, los registros fueron reorganizados en intervalos de **5 minutos** para la construcción de hietogramas y curvas temporales comparables entre estaciones.

2.2.8. Análisis temporal y eventos máximos

Se analizó la distribución horaria de los eventos mediante las horas de inicio, ocurrencia del pico y finalización de la precipitación. Posteriormente, se identificaron los eventos máximos de cada estación considerando precipitación acumulada e intensidad.

Para cada estación también se construyeron curvas temporales representativas. Debido a las diferentes duraciones de los eventos, el tiempo fue normalizado entre **0 % y 100 % de la duración**, permitiendo comparar tormentas de distintas longitudes dentro de una escala común.

2.2.9. Análisis espacio-temporal

Los eventos registrados simultáneamente en diferentes estaciones fueron comparados para identificar coincidencias temporales y determinar su extensión dentro de la red.

De acuerdo con el número de estaciones participantes, los eventos fueron diferenciados según su cobertura espacial, permitiendo reconocer eventos locales, compartidos y regionales. Para los eventos regionales se analizó además el orden temporal de activación de las estaciones, identificándose rutas y patrones recurrentes de propagación de la precipitación.

Finalmente, se realizó un análisis de similitud entre estaciones mediante **agrupamiento jerárquico utilizando el método de Ward**, con el objetivo de identificar sectores con comportamiento pluviométrico semejante. La interpretación espacial se complementó mediante herramientas SIG y la elaboración de mapas e isoyetas para eventos representativos.

CAPÍTULO

III.

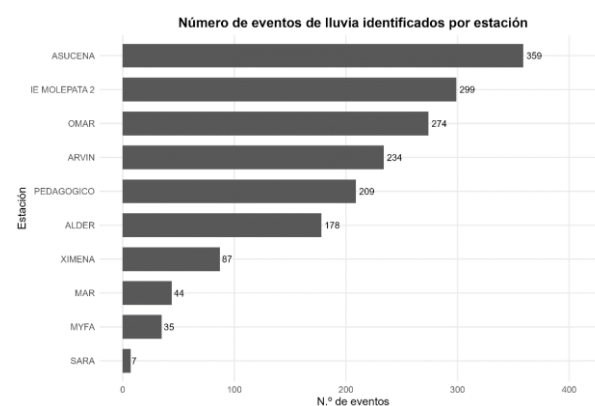
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Variabilidad de los eventos de lluvia entre estaciones

La delimitación mediante un IETD de 30 minutos permitió identificar eventos independientes de lluvia en las diez estaciones de la red. La frecuencia de ocurrencia presentó diferencias marcadas: Asucena registró 359 eventos, IE Molepata 2 registró 299, Omar 274, Arvin 234, Pedagógico 209 y Alder 178. En las estaciones con menor continuidad de registro se identificaron 87 eventos en Ximena, 44 en Mar, 35 en Myfa y 7 en Sara. Esta distribución demuestra que la ocurrencia de precipitación no fue homogénea dentro del área urbana.

Figura 3. Número de eventos de lluvia identificados por estación.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

El número de eventos no representó por sí solo la magnitud de la precipitación. Algunas estaciones presentaron lluvias frecuentes de menor aporte, mientras que otras concentraron volúmenes mayores en un número más reducido de episodios. Por ello, la frecuencia, el acumulado, la duración y la intensidad fueron analizados de manera conjunta para caracterizar la variabilidad espacio-temporal.

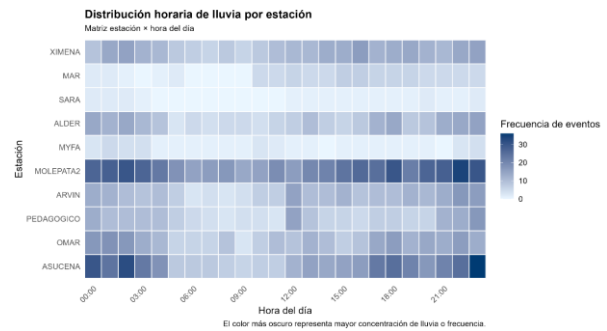
La clasificación temporal por cuartiles mostró predominio del Tipo 4 en la mayoría de estaciones, es decir, una mayor concentración de lluvia hacia el último cuartil del evento. No obstante, los eventos individuales y las curvas representativas revelaron también perfiles de concentración inicial y central, por lo que el patrón dominante no implica uniformidad entre todos los episodios registrados.

3.1.2. Caracterización temporal, intensidad y horario de ocurrencia

Los eventos válidos mostraron diferencias en duración, acumulado e intensidad. Las medianas de precipitación por evento fueron de 0.84 mm en Asucena, Arvin, IE Molepata 2, Omar y Alder, y de 0.42 mm en Mar, Ximena, Myfa, Pedagógico y Sara. En duración mediana destacaron Arvin con 161 min, Mar con 145.5 min, Myfa con 125.89 min y Pedagógico con 122.92 min, mientras que Omar registró una mediana de 80 min. Estas diferencias evidencian eventos prolongados en algunos sectores y lluvias más concentradas temporalmente en otros.

La distribución horaria mostró una recurrencia predominantemente nocturna. Asucena alcanzó su mayor frecuencia a las 23:00 h con 36 eventos e IE Molepata 2 a las 22:00 h. Arvin y Pedagógico presentaron máximos de 17 eventos entre las 22:00 y 23:00 h, y Alder alcanzó 15 eventos en el mismo intervalo. Omar y Myfa mostraron máximos hacia la 01:00 h, mientras que Mar presentó una mayor ocurrencia entre las 15:00 y 16:00 h.

Figura 4. Distribución horaria de la lluvia por estación.



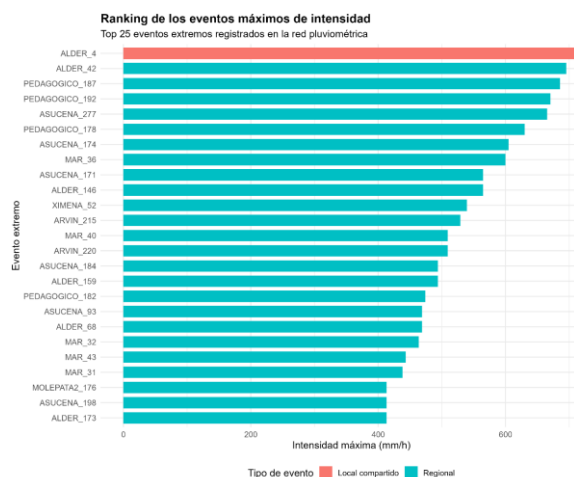
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

Al comparar las horas de inicio, pico y finalización, los picos se concentraron principalmente entre la tarde y la noche, con mayor presencia entre las 13:00 y 18:00 h. Los inicios fueron más variables y los finales tendieron a ubicarse hacia la tarde y la noche. Esta separación temporal confirma que las tormentas presentaron desarrollos distintos entre estaciones, incluso durante episodios compartidos.

3.1.3. Eventos máximos y extremos

Los máximos por estación evidenciaron dos formas principales de criticidad hidrológica: eventos de alta intensidad y corta duración, y eventos persistentes con gran acumulación. Alder registró el evento ALDER_4 el 26/01/2026, con 61.32 mm en 6.6 min y una intensidad máxima de 715.68 mm/h. Asucena alcanzó 104.16 mm e intensidad máxima de 665.28 mm/h en ASUCENA_277, mientras que Pedagógico registró 126.84 mm e intensidad máxima de 685.44 mm/h en PEDAGOGICO_187.

Figura 5. Ranking de los eventos con mayor intensidad máxima en la red.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

El caso más destacado por acumulación fue MAR_36, ocurrido el 30/01/2026, con una duración de 472.5 min, acumulado de 1805.58 mm e intensidad máxima de 599.76 mm/h. Este evento formó parte del evento regional extremo ERE_06, desarrollado entre el 30 y 31 de enero de 2026, con una duración regional de 718.4 min y participación de siete estaciones: Alder, Arvin, Asucena, Mar, IE Molepata 2, Omar y Ximena.

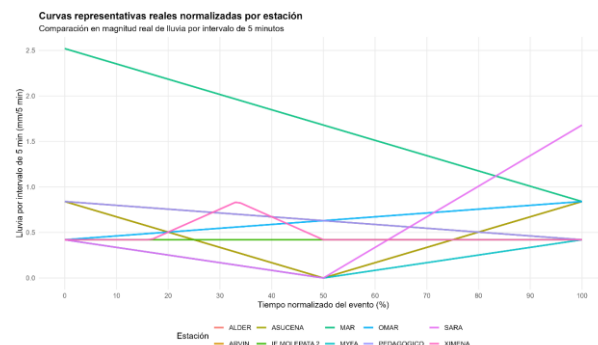
Dentro del ERE_06, Mar concentró el mayor volumen acumulado individual, pero el núcleo de mayor intensidad se ubicó en Alder, donde ALDER_42 alcanzó 695.52 mm/h. En consecuencia, el núcleo de acumulación y el núcleo de intensidad no coincidieron espacialmente, evidenciando una estructura interna heterogénea del evento regional.

3.1.4. Perfiles temporales representativos de tormenta

La normalización de las curvas permitió comparar la distribución interna de la lluvia independientemente de la duración de cada evento. Se identificaron perfiles claramente diferenciados entre estaciones. Mar presentó una concentración inicial, con mayor aporte al comienzo y disminución progresiva; Ximena mostró un pico central; Sara y Omar presentaron tendencias de

concentración tardía; e IE Molepata 2 mantuvo una distribución comparativamente más uniforme.

Figura 6. Curvas representativas reales normalizadas por estación.



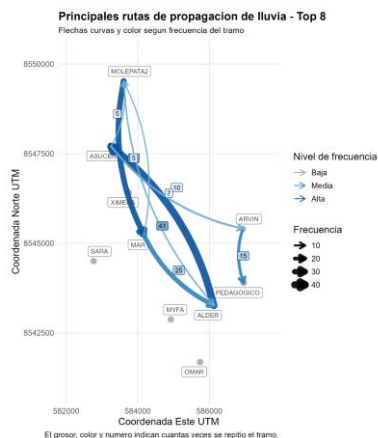
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

Los eventos reales más próximos al comportamiento central confirmaron estas formas. En Mar, el evento 7 tuvo 8.1 min de duración, 3.36 mm de acumulado y un máximo de 2.52 mm/5 min, representando concentración inicial. En Ximena, el evento 26 tuvo 31.2 min, 3.36 mm y un máximo de 0.84 mm/5 min, con pico central. En Sara, el evento 6 presentó 10.3 min, 2.10 mm y un máximo de 1.68 mm/5 min, con concentración tardía. Estos resultados muestran que no existe un único perfil temporal de tormenta aplicable a toda la ciudad.

3.1.5. Propagación y agrupamiento espacial

El análisis de coincidencias temporales permitió identificar rutas recurrentes de activación entre estaciones. Los tramos más frecuentes fueron Alder → Asucena, con 41 repeticiones; IE Molepata 2 → Mar, con 31; Mar → Alder, con 25; Arvin → Pedagógico, con 15; y Asucena → Arvin, con 10. Molepata 2 apareció como estación de origen frecuente, mientras que Asucena se comportó con mayor frecuencia como destino dentro de las secuencias regionales.

Figura 7. Principales rutas de propagación de lluvia identificadas en la red.

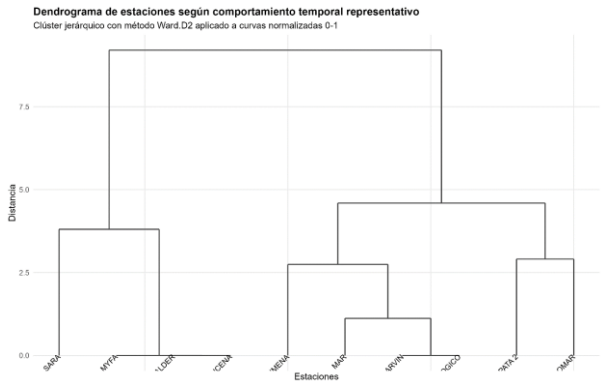


Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

La propagación no fue simultánea en toda la red. En el evento regional ER-29 del 28/02/2026 se identificaron tres oleadas: Alder y Asucena se activaron a las 23:18 h; Mar, IE Molepata 2 y Myfa alrededor de las 23:29 h; y Arvin y Pedagógico hacia las 23:33 h. Los desfases de aproximadamente 11 a 15 minutos evidencian una activación progresiva entre sectores.

El agrupamiento jerárquico de Ward aplicado a la forma temporal representativa generó tres grupos. El primero integró Sara, Myfa, Alder y Asucena; el segundo reunió Ximena, Mar, Arvin y Pedagógico; y el tercero agrupó IE Molepata 2 y Omar. Esta organización demuestra que estaciones separadas geográficamente pueden presentar formas temporales semejantes.

Figura 8. Dendrograma de estaciones según comportamiento temporal representativo.

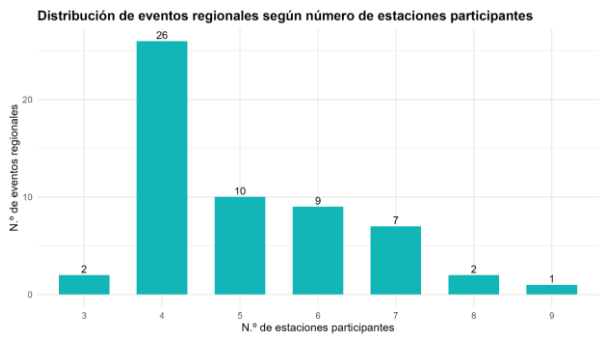


Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

3.1.6. Cobertura regional y síntesis espacial-temporal

La clasificación espacial contabilizó 182 eventos: 82 locales (45.05 %), 43 compartidos entre dos estaciones (23.63 %) y 57 regionales con participación de tres o más estaciones (31.32 %). Dentro de los eventos regionales predominó la cobertura intermedia. Veintiséis eventos involucraron cuatro estaciones (45.6 % del total regional), diez involucraron cinco estaciones (17.5 %) y nueve involucraron seis estaciones (15.8 %). En conjunto, 45 de 57 eventos regionales (78.9 %) afectaron entre cuatro y seis estaciones.

Figura 9. Distribución de eventos regionales según número de estaciones participantes.



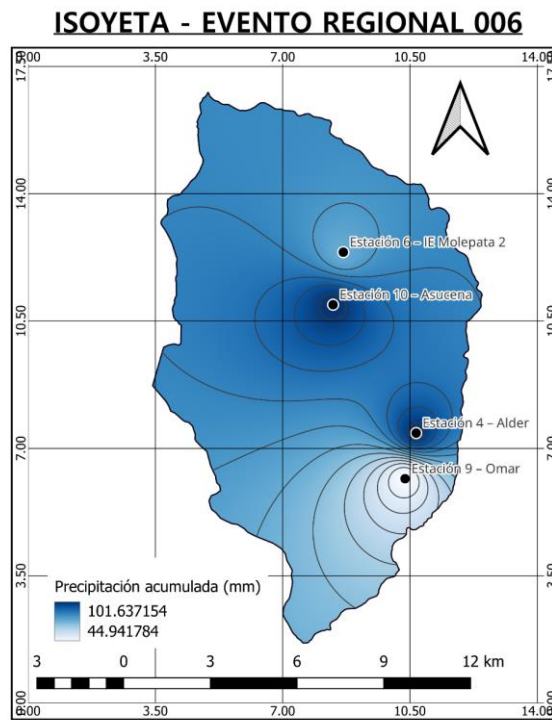
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

Los eventos de mayor cobertura fueron menos frecuentes: siete estaciones participaron en siete eventos, ocho estaciones en dos eventos y nueve

estaciones en un evento. La actividad regional se concentró principalmente en febrero y marzo de 2026, con mayor diversidad espacial durante marzo.

La isoyeta del evento regional extremo ERE-006 mostró una variación espacial marcada, con acumulados aproximados entre 44.94 y 101.64 mm. Las mayores concentraciones se localizaron hacia el sector centro-este del área interpolada, próximas a Asucena y Alder, y los menores valores hacia el sureste, cercano a Omar.

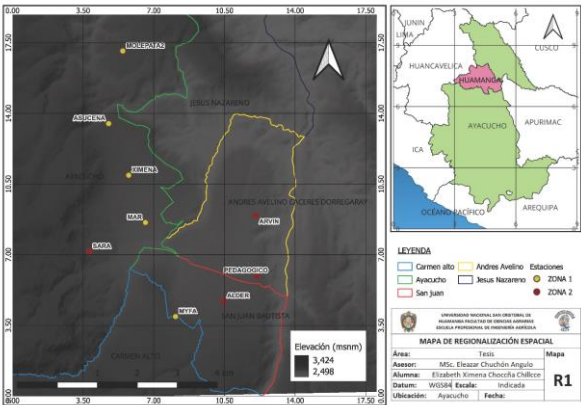
Figura 10. Isoyeta del evento regional extremo ERE-006.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

La regionalización integral mediante Ward distinguió dos zonas principales de comportamiento pluviométrico. La Zona 1 estuvo conformada por IE Molepata 2, Asucena, Ximena, Mar y Myfa, mientras que la Zona 2 agrupó Sara, Alder, Pedagógico y Arvin. La clasificación responde a similitudes temporales e hidrológicas y no exclusivamente a proximidad geográfica.

Figura 11. Regionalización espacial de las estaciones según clúster Ward.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados de la tesis.

En términos funcionales, IE Molepata 2 presentó participación en los 57 eventos regionales y actuó como origen frecuente; Asucena también participó en 57 de 57 eventos y apareció como destino recurrente; Alder participó en 45 eventos regionales y destacó como núcleo de intensidad; Omar participó en 46 y funcionó principalmente como receptor; y Mar, aunque tuvo menor participación regional, destacó como núcleo de acumulación extrema. Esta síntesis evidencia que el comportamiento espacial de la lluvia depende de la combinación entre frecuencia, forma temporal, intensidad, cobertura y secuencia de propagación.

3.2. Discusión

3.2.1. Variabilidad general entre estaciones

Las diferencias observadas en el número de eventos y en su magnitud confirman que la precipitación urbana en Ayacucho presentó una estructura espacial heterogénea. Una estación con mayor frecuencia no necesariamente representó la condición más crítica por acumulación o intensidad. Este comportamiento coincide con Saha et al. (2023), quienes reportaron diferencias significativas entre estaciones cercanas dentro de una red urbana, y con Salcedo

(2024), quien destaca que una mayor densidad de sensores permite representar relaciones espaciales que se pierden cuando cada punto se analiza de forma aislada.

La interpretación debe considerar también la continuidad del registro. Sara presentó una cantidad reducida de eventos, por lo que su comportamiento no puede atribuirse únicamente a una condición natural de menor precipitación. La confiabilidad de una red IoT depende tanto de la calibración del sensor como de la estabilidad de la alimentación, conectividad, transmisión y control de calidad de los datos.

3.2.2. Duración, acumulado e intensidad

La predominancia de acumulados medianos bajos, junto con la presencia de valores extremos, indica que el régimen observado estuvo compuesto por numerosos eventos pequeños y un conjunto reducido de episodios de alta magnitud. Muñoz et al. (2016) señalaron que, en ambientes andinos, las intensidades bajas son frecuentes y que la resolución del pluviómetro influye especialmente en escalas cortas. Por ello, la caracterización de eventos debe integrar acumulado, duración e intensidad y no depender de una sola variable.

Las diferencias en intensidad también son consistentes con las limitaciones instrumentales descritas por Segovia-Cardozo et al. (2023) para pluviómetros de balancín, particularmente en la estimación de intensidades en intervalos cortos. En este estudio, la calibración volumétrica y la depuración de pulsos redujeron parte de esa incertidumbre; sin embargo, los máximos deben interpretarse junto con las condiciones de exposición del equipo, la resolución de 0.42 mm por basculación y la posibilidad de perturbaciones operativas durante eventos intensos.

3.2.3. Influencia del horario de ocurrencia

La mayor recurrencia entre la tarde y la noche muestra que la variabilidad temporal también está organizada dentro del ciclo diario. El predominio nocturno en varias estaciones, junto con máximos vespertinos en Mar y máximos de madrugada en Omar y Myfa, evidencia que la dinámica diaria no fue idéntica en todos los sectores. Este tipo de análisis horario es coherente con los estudios del ciclo diurno de la precipitación en los Andes tropicales, donde Poveda et al. (2005) demostraron la utilidad de los registros horarios para identificar máximos y diferencias espaciales.

La información subhoraria obtenida mediante los pluviómetros IoT aporta una ventaja frente a los registros diarios acumulados: permite distinguir el inicio, el momento de máxima concentración y el final del evento. Para el diseño hidráulico, esta diferencia es relevante porque dos tormentas con acumulados similares pueden generar respuestas distintas si una concentra la precipitación en pocos minutos y otra la distribuye durante varias horas.

3.2.4. Eventos máximos, perfiles y regionalización

El ERE_06 ilustra con claridad la necesidad de analizar simultáneamente espacio y tiempo. Mar concentró el mayor volumen y una larga persistencia, mientras que Alder registró el núcleo de mayor intensidad. Por tanto, el punto de mayor acumulación no coincidió con el punto de mayor intensidad. Este resultado demuestra que utilizar una sola estación como representación de toda la ciudad puede ocultar diferencias críticas para la estimación de caudales pico, saturación y funcionamiento de sistemas de drenaje.

Las curvas representativas complementan esta lectura al mostrar tres perfiles temporales principales: concentración inicial, pico central y concentración tardía.

Estos perfiles describen la distribución interna de la lluvia y no deben interpretarse como una clasificación meteorológica del origen de la tormenta. Su utilidad está en reconocer que la posición del pico dentro del evento modifica la respuesta hidrológica potencial, aun cuando la precipitación total sea similar.

Finalmente, la regionalización mediante Ward mostró que la similitud pluviométrica no depende exclusivamente de la distancia geográfica. La Zona 1 y la Zona 2 agrupan estaciones con comportamientos integrales semejantes, mientras que el agrupamiento por forma temporal genera tres conjuntos parcialmente diferentes. Esta diferencia indica que la estructura espacial de la lluvia depende del indicador analizado. En conjunto, los resultados respaldan el uso de redes densas de bajo costo para identificar sectores funcionales, rutas de propagación y núcleos de intensidad o acumulación dentro de entornos urbanos andinos.

La principal implicancia para la ingeniería hidráulica es que la tormenta de diseño no debería interpretarse

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

La red de diez pluviómetros IoT permitió caracterizar con alta resolución temporal y espacial los eventos de tormenta registrados en la ciudad de Ayacucho durante el verano austral 2026. Los resultados evidenciaron que la precipitación urbana no presenta un comportamiento uniforme, observándose diferencias entre estaciones en la frecuencia de eventos, precipitación acumulada, intensidad, duración y momento de ocurrencia del pico de lluvia.

Los eventos presentaron perfiles temporales diferenciados y distribuciones internas variables. La delimitación mediante un IETD de 30 minutos permitió identificar eventos continuos evitando fragmentaciones artificiales, mientras que

el análisis de la distribución temporal permitió reconocer tormentas cuya mayor concentración de precipitación ocurrió en diferentes etapas de su desarrollo. La ocurrencia de eventos locales, compartidos y regionales confirmó que una misma tormenta puede afectar de manera diferenciada distintos sectores de la ciudad.

El análisis conjunto de las estaciones permitió identificar patrones de propagación y agrupamientos con comportamiento pluviométrico semejante. La regionalización mediante el método de Ward evidenció que la similitud entre estaciones no depende exclusivamente de su proximidad geográfica, sino también de características como intensidad, acumulación, duración y estructura temporal de los eventos. Estos resultados confirman la existencia de una variabilidad espacio-temporal significativa de la precipitación a escala urbana.

La calibración permitió establecer un factor representativo de **2.31 mL por pulso, equivalente aproximadamente a 0.42 mm por basculación**, mejorando la interpretación de los registros obtenidos mediante los sensores tipo balancín. En conjunto, la información generada por la red IoT constituye un insumo útil para la evaluación hidrológica y el diseño de infraestructura hidráulica; sin embargo, debido a que el monitoreo corresponde a una sola temporada de lluvias, estos resultados deben utilizarse como complemento de series históricas, curvas IDF y criterios normativos de diseño, y no como sustitución directa de estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Donges, J. F., Schleussner, C.-F., Siegmund, J. F., & Donner, R. V. (2016). Event coincidence analysis for quantifying statistical interrelationships between event

time series: On the role of flood events as possible triggers of epidemic outbreaks. *The European Physical Journal Special Topics*, 225(3), 471–487.

Huff, F. A. (1990). *Time distributions of heavy rainstorms in Illinois*.

Muñoz, P., Céleri, R., & Feyen, J. (2016). Effect of the resolution of tipping-bucket rain gauge and calculation method on rainfall intensities in an Andean mountain gradient. *Water*, 8(11), 534.

Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., & Alvarez, J. F. (2005). The diurnal cycle of precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228–240.

Saha, U., Gupta, M. D., Mitra, A. K., & Prasad, V. S. (2023). *Development of Real-time Quality Monitoring Module for ARG network over Mumbai: Results from Monsoon 2020–2022*.

Salcedo, E. (2024). *Graph Learning-based Regional Heavy Rainfall Prediction Using Low-Cost Rain Gauges*. arXiv.

Scorah, M., Nathan, R., & Wasko, C. (2025). Rainfall events become temporally more uniform with increasing storm depth. *Journal of Hydrology*, 657, 133101.

Segovia-Cardozo, D. A., Bernal-Basurco, C., & Rodríguez-Sinobas, L. (2023). Tipping bucket rain gauges in hydrological research: Summary on measurement uncertainties, calibration, and error reduction strategies. *Sensors*, 23(12), 5385.