

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES**



**“CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE LLUVIA A PARTIR DE LA
MICROESTRUCTURA DE GOTAS, OCURRIDOS EN EL OBSERVATORIO DE
HUANCAYO, JUNÍN-PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**

AUTORES:

**CASTILLO SEGURA, SERGIO HERNAN
CONTRERAS REYNAGA, KEVIN IRWING**

ASESOR:

MTRO. CESAR GUALBERTO VICTORIA BARROS

LINEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

**Callao, 2022
PERÚ**



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



III CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 002-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 50 ACTA N°002-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 19 días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 8:16 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/wbt-okpc-qmv>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Ms.C. María Teresa Valderrama Rojas	: Presidente
Mtra. Janet Mamani Ramos	: Secretaria
Mtro. Dan Skipper Anarcaya Torres	: Vocal
Dr. Miguel Ángel De La Cruz Cruz	: Suplente
Mg. Cesar Gualberto Victoria Barros	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres Kevin Irwing Contreras Reynaga y Sergio Hernán Castillo Segura, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **"CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE LLUVIA A PARTIR DE LA MICROESTRUCTURA DE GOTAS, OCURRIDOS EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO, JUNÍN – PERÚ"**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa Muy Bueno y calificación cuantitativa 17 la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por cerrada la Sesión a las 16:30 horas del día sábado 19 de noviembre del año en curso.

Presidente

Secretaria

Vocal

Asesor

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD

Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales

Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales

TÍTULO

Caracterización de los eventos de lluvia a partir de la microestructura de gotas, ocurridos en el observatorio de Huancayo, Junín – Perú

AUTOR (es)

Kevin Irwing Contreras Reynaga / 0000-0002-0008-6911 / 70230733

Sergio Hernán Castillo Segura / 0000-0003-4529-093 / 75674020

ASESOR

Mtro. CESAR GUALBERTO VICTORIA RAMOS / 0000-0003-3666-7221 / 44799329

LUGAR DE EJECUCIÓN

Observatorio de Huancayo – Instituto Geofísico del Perú (IGP)

UNIDADES DE ANÁLISIS

Microestructura de la gota de lluvia

TIPO DE INVESTIGACIÓN

No Experimental / Exploratorio descriptivo

TEMA OCDE

1.05.09 -- Ciencias de la tierra y del ambiente

DEDICATORIA

El resultado de este trabajo lo dedicamos a nuestras familias, por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas para afrontar los momentos difíciles y por ser un ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Al Mtro. Cesar Gualberto Victoria Barros, por brindarnos la asesoría respectiva en la elaboración de este trabajo, por orientarnos en la ejecución del proyecto mediante su amplia experiencia y estar pendiente en los diferentes aspectos de la investigación.

A los investigadores del Instituto Geofísico del Perú, en especial a la Sub área de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera, por impartir sus conocimientos acerca del tema de estudio, por brindar acceso a la base de datos y mediciones, por asesoría en la ejecución de la parte metodológica de la investigación y su buena predisposición en todo momento.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, por habernos formado profesionalmente, para enfrentar los retos laborales, personales, entre otros que a lo largo de la vida se presentan.

ÍNDICE

RESUMEN	9
ABSTRAC	10
INTRODUCCIÓN	11
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 Descripción de la realidad problemática	12
1.2 Formulación del problema	13
1.2.1 Problema general	13
1.2.2 Problema específico	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Justificación	14
1.5 Delimitantes de la investigación	15
1.5.1 Delimitación Teórica:	15
1.5.2 Delimitación Temporal:	16
1.5.3 Delimitación Espacial:	16
II MARCO TEÓRICO	17
2.1 Antecedentes	17
2.1.1 Internacional	17
2.1.2 Nacional	19
2.2 Bases Teóricas:	22
2.2.1 Precipitación atmosférica	22
2.2.1.1 Formación de la precipitación	22
2.2.2 Lluvia	23
2.2.2.1 Núcleos de condensación	23

2.2.2.2	Crecimiento de las gotas de lluvia	23
2.2.2.3	Caída de las gotas de lluvia	24
2.2.3	Mediciones de lluvia	24
2.2.3.1	Unidades de medida y escala	24
2.2.3.2	Equipos de medición de lluvia	25
2.2.3.3	Fuentes de error en la medición de la precipitación	25
2.2.3.4	Variaciones en la estimación de la precipitación	27
2.2.4	Características climatológicas de la zona de estudio	28
2.2.4.1	Variabilidad de la Precipitación	28
2.2.4.2	Variabilidad de la temperatura	30
2.2.4.3	Clima	31
2.3	Marco Conceptual	31
2.3.1	Distribución de tamaño de gotas (DSD)	31
2.3.2	Parámetros integrales de lluvia	32
2.3.3	Modelo de Ajuste Matemático aplicado a la DSD	33
2.3.4	Microestructura de lluvias	34
2.3.5	Eventos de lluvia	34
2.3.6	Clasificación de los eventos de lluvia	35
2.4.	Definición de términos básicos	37
III	HIPÓTESIS Y VARIABLES	39
3.1	Hipótesis de la Investigación	39
3.1.1	Operacionalización de las Variables	40
IV	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	41
4.1	Diseño metodológico.	41
4.2	Método de investigación.	42

4.2.1	Metodología para el objetivo específico: Estimar los parámetros integrales de lluvia.	42
4.2.2	Metodología para el objetivo específico: Determinar los valores de los parámetros del ajuste matemático gamma aplicado a la DSD	43
4.2.3	Metodología para el objetivo específico: Clasificar los eventos de la lluvia.	44
4.2.4	Metodología para el objetivo específico: Determinar el cambio del espectro de gotas de lluvia.	45
4.3	Población y muestra.	45
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado.	46
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.	48
4.5.1	Técnicas de investigación	48
4.5.2	Instrumentos de recolección de datos	49
4.5.3	Equipos de Medición	49
4.6	Análisis y procesamiento de datos	54
4.6.1	Análisis descriptivo de datos	54
4.6.2	Uso de software	55
4.7	Aspectos Éticos en Investigación	56
V.	RESULTADOS	57
5.1	Resultados descriptivos	57
5.1.1	Eventos de lluvia	57
5.1.2	Estimación de la variación en las mediciones de precipitación acumulada	64
5.1.3	Clasificación de los eventos de lluvia	65
5.1.4	Selección de eventos de lluvias representativos de acuerdo a su clasificación	66
5.1.5	Comparación de las intensidades de lluvia	67

5.1.6	Parámetros integrales de lluvia y parámetros del ajuste matemático gamma 73	
5.1.7	Espectro de gotas de lluvia	76
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.	84
6.2	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	86
VII.	CONCLUSIONES	88
VIII.	RECOMENDACIONES	90
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	91
VIII	ANEXOS	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de Medición e Incertidumbres para la Intensidad de Lluvia	25
Tabla 2. Promedio de la Precipitación 1981 – 2010.....	29
Tabla 3. Promedio de la Temperatura Mínima 1981 – 2010	30
Tabla 4. Promedio de la Temperatura Máxima 1981 – 2010	31
Tabla 5. Clasificación de Eventos de Lluvias de acuerdo con la Intensidad de Lluvia.....	36
Tabla 6. Operacionalización de Variables.....	40
Tabla 7. Equipos utilizados	50
Tabla 8 Eventos de lluvia registrados por el psv2a	57
Tabla 9 Eventos de lluvia registrados por el psv2b	60
Tabla 10 Resumen de la cantidad de eventos de lluvia por cada tipo	66
Tabla 11 Eventos seleccionados en las 4 categorías.	67
Tabla 12. Matriz de consistencia.....	96
Tabla 13. Reporte de Datos Pluviómetros	98
Tabla 14. Reporte de Datos Disdrómetros ópticos.....	98
Tabla 15 Eventos registrados por el psv2a	105
Tabla 16 Eventos registrados por el psv2b	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diámetros típicos de gotas de lluvia y aerosoles en la atmósfera.....	23
Figura 2. Interacción del flujo de viento respecto a las formas de los medidores de precipitación.....	26
Figura 3. Promedio de la Precipitación 1981 – 2010.....	28
Figura 4. Promedio de la Temperatura 1981 - 2010..	30
Figura 5. 3 Diferentes Distribuciones Gamma.....	34
Figura 6. Clasificación de los Tipos de Eventos de Precipitación..	36
Figura 7. Relación de variables.....	41
Figura 8. Diseño de la Investigación para la caracterización de los eventos de lluvia.....	41
Figura 9. Esquema detallado del diseño de investigación aplicado.	42
Figura 10. Proceso de estimación de los parámetros integrales de lluvia.....	43
Figura 11. Estimación de los parámetros del ajuste matemático gamma	44
Figura 12. Clasificación de los eventos de lluvia.....	44
Figura 13. Representación gráfica de los espectros de gotas.	45
Figura 14. Mapa de Localización del Observatorio de Huancayo.	47
Figura 15. <i>Proceso de acceso y descarga de datos.</i>	49
Figura 16. Pluviómetro Estándar.....	51
Figura 17. Señales de Partículas Cayendo a Través de la Lámina de Luz.....	52
Figura 18. Disdrómetros instalados en el Observatorio Huancayo – IGP.	53
Figura 19. Esquema de procesamiento de los scripts en MATLAB.	55
Figura 20. Comparación de los totales de lluvia de los 8 eventos seleccionados..	65
.....	65
Figura 21. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos estratiformes.....	68

Figura 22. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos mixtos o de transición.....	69
Figura 23. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos convectivos.....	71
Figura 24. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos convectivos.....	73
Figura 25. Distribución de probabilidad para eventos estratiformes de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.....	74
Figura 26. Distribución de probabilidad para eventos mixtos de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.	75
Figura 27. Distribución de probabilidad para eventos convectivos de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.....	76
Figura 28. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos estratiformes.....	77
Figura 29. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos Mixtos.....	78
Figura 30. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos convectivos.....	79
Figura 31. Comparación de los espectros de gotas de eventos estratiformes, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas.....	80
Figura 32. Comparación de los espectros de gotas de eventos mixtos, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas.	81
Figura 33. Comparación de los espectros de gotas de eventos convectivos, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas.....	82

ABREVIATURAS

DSD: Distribución de tamaño de gotas.

IGP: Instituto Geofísico del Perú.

WMO: Organización Meteorológica Mundial

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

LAMAR: Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación.

MAGNET: Proyecto de Atracción de Investigación Científica.

S: Eventos de lluvia estratiformes

C: Eventos de lluvia convectivos

S - C: Eventos de lluvia mixtos

NO: Eventos de precipitación diferentes a la lluvia.

RI: Intensidad de lluvia.

N: Concentración numérica de gotas de lluvia.

W: Contenido de agua líquida.

Z: Reflectividad.

μ : Parámetro de forma del ajuste matemático gamma.

NAN: Formato alfa no numérico.

psv2a: Disdrómetro óptico 1

psv2b: Disdrómetro óptico 2

Met: Pluviómetro en la estación meteorológica.

Exp: Pluviómetro en el laboratorio experimental.

V.C: Velocidad de caída de la gota.

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo general caracterizar los eventos de lluvia a partir el análisis de la microestructura de gotas, con la finalidad de mejorar la descripción y análisis de estos fenómenos. Los datos empleados corresponden a mediciones de precipitación acumulada y distribución de tamaño de gotas (DSD) recolectadas cada minuto, en el Observatorio de Huancayo – Junín, durante el período del mes de agosto del 2018 hasta el mes de abril del 2020. La investigación es de tipo exploratorio con un diseño descriptivo. La metodología aplicada consiste en la segregación de la data en eventos de lluvia, para estimar los valores de los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático; y mediante las tasas de intensidad la lluvia clasificar a los eventos en estratiformes, convectivas y mixtos. Se registraron alrededor de 140 eventos de lluvia de los cuales se seleccionaron 4 eventos por cada categoría, teniendo en cuenta el acumulado de lluvia y el tiempo de duración. La clasificación nos arroja una predominancia de eventos estratiformes y muy pocos eventos convectivos; de todo ello se puede evidenciar variaciones de los valores de las tasas de lluvia (entre 2 mm/h a 20 mm/h), de los diámetros de gotas (entre 2 mm a 4 mm y entre 4 mm a 8 mm) y las velocidades de caída de las gotas (entre 5 m/s a 7 m/s y valores cercanos a los 10 m/s), de lo cual los valores más bajos se concentran en lluvia estratiforme y sucede caso contrario para lluvia convectiva.

Palabras clave: Eventos de lluvia, disdrómetro óptico, DSD.

ABSTRAC

The general objective of this thesis was to characterize rain events from the analysis of the microstructure of drops to improve the description and analysis of these phenomena. The data used correspond to measurements of accumulated precipitation and droplet size distribution (DSD) collected every minute, at the Huancayo - Junín Observatory, from August 2018 to April 2020. The research is an exploratory type with a descriptive design. The applied methodology consists of the segregation of the data in rainfall events to estimate the values of the integral rainfall parameters and the parameters of the mathematical adjustment, and using the intensity rates; the rain classifies the events in stratiform, convective and mixed. About 140 rain events were recorded, of which 4 events were selected for each category, considering the accumulated rainfall and the duration time. The classification gives us a predominance of stratiform events and very few convective events; from all of this, variations in the values of the rain rates (between 2 mm/h to 20 mm/h), of the diameters of drops (between 2 mm to 4 mm and between 4 mm to 8 mm) and the speeds can be evidenced of falling drops (between 5 m/s to 7 m/s and values close to 10 m/s), the lowest values are concentrated in stratiform rain, and the opposite occurs for convective precipitation.

Keywords: Rain events, optical disdrometer, DSD.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación está orientada al estudio de las características de los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo, en función al análisis de la distribución del tamaño de gotas (DSD) y los parámetros integrales de lluvia. La cual tiene como finalidad ampliar los conocimientos acerca de los tipos de eventos de lluvia, y ser un eje de apoyo para posteriores investigaciones, que tomen como punto de partida las propiedades microfísicas de la lluvia.

Para ello es necesario es necesario entender que es un evento de precipitación y los procesos que involucra. De tal forma, que se pueda mejorar la comprensión de cómo se desarrollan los eventos de lluvia en esta localidad, y que características presentan.

Debido a esto, el nivel aplicado en el análisis corresponde a un diseño no experimental y de carácter descriptivo. Los datos empleados fueron recogidos mediante análisis documental, y llenados en una matriz de reporte, que posteriormente fueron procesados para estimar los parámetros integrales de lluvia, los parámetros del ajuste matemático y la clasificación de la lluvia. Las mediciones corresponden a totales de lluvia, intensidad de lluvia, diámetro de gota y velocidad de caída recolectados por pluviómetros y disdrómetros ópticos, todo ello en el Observatorio de Huancayo, durante el periodo de agosto del 2018 a abril del 2020.

Los resultados del estudio ofrecen una visión que parte desde la identificación de del tipo de lluvia, y de como este se relacionan con sus propiedades microfísicas, dando características propias en cada tipo de lluvia. Todo ello reforzado en trabajos anteriormente realizados con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos.

El trabajo concluye, en función a los objetivos planteados y como estos guardan relación entre sí, de forma que las características de cada tipo de lluvia puedan interconectarse entre ellas.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La alteración del clima de la Tierra, es un fenómeno actual, que ha ido, incrementándose en los últimos años, el cual se evidencia a través de la variación por periodos prolongados de los valores normales de los parámetros meteorológicos (IPCC 2022). Esta alteración según Oreskes (2004) puede deberse a procesos naturales o antrópicos. Cabe señalar que uno de los parámetros meteorológicos afectados es la precipitación (caso de la lluvia), donde su alteración tanto en cantidad como calidad afecta directamente a la naturaleza debido a su rol en ciclo hidrológico del agua (Montero-Martínez, Gómez-Balvás y García-García 2021). Por lo tanto, para evidenciar estos cambios es necesario comprender el proceso de precipitación en todos sus aspectos (Bringi et al. 2003).

Una manera de entender al proceso de lluvia, es mediante el análisis de su microestructura y propiedades físicas, utilizando observaciones de distribución de tamaño de gotas, así lo expresan Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021 y Jwa et al. 2021). Es a partir de esta información que se puede identificar el tipo de evento de precipitación (Houze 2014; Bringi et al. 2003), la variación en los tamaños y velocidades de las gotas (Jwa et al. 2021) y factores que se encuentran presentes en el proceso de precipitación, como es el caso de la evaporación de las gotas (Kumar et al. 2020).

El análisis de lluvia en base al tipo (estratiforme y convectiva), es ampliamente utilizado a nivel mundial, tanto para el estudio de eventos de precipitaciones normales y extremos, para regímenes climáticos, entre otros. Enfocando la región tropical del planeta correspondiente al continente americano, este tipo de estudio ha empezado a utilizarse con más frecuencia, debido a que es necesario precisar el comportamiento y las relaciones entre la precipitación y los ecosistemas (Valencia Leguizamon, Tobón Marín 2017).

En Perú, exclusivamente a los valles ubicados dentro de la cordillera de los Andes, se tiene que el estudio de la precipitación juega un rol muy importante,

ya que se encuentra directamente vinculada con actividades agropecuarias. Uno de estos valles es el formado por el río Mantaro, donde se producen grandes cantidades de alimentos que abastecen a las principales ciudades del país. El gobierno peruano a través del Marco Nacional de estrategias para Mitigar los Efectos del Cambio Climático, plantea la realización de estudios sobre precipitación para este tipo de escenarios (MINAGRI 2012; SENAMHI 2013; MINAM 2016). Es por ello que, mediante el Observatorio de Huancayo, perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP), se ha venido realizando estudios acerca de los procesos meteorológicos en esta área.

Después de las consideraciones anteriores, el tema objeto de estudio presenta la caracterización a nivel de propiedades microfísicas de los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo, en el periodo 2018 – 2021. Con el propósito de complementar y ampliar información ya existente, acerca del proceso y de las características de la precipitación, de tal modo que se pueda mejorar la comprensión y análisis de estos eventos para esta región.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo se caracteriza los eventos de lluvia a partir del análisis de la microestructura de gotas, ocurridos en el Observatorio de Huancayo?

1.2.2 Problema específico

- ¿Cómo se estiman los parámetros integrales de la lluvia a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia?
- ¿Qué información proporciona los parámetros del ajuste matemático aplicados a la distribución de tamaño de gotas de lluvia acerca de la evaporación, de la concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro?
- ¿Cómo se clasifican los eventos de lluvia en base a la intensidad de lluvia y desviación estándar?
- ¿Cómo cambian los espectros de gotas de lluvia de acuerdo al tipo de lluvia?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar los eventos de lluvia a partir el análisis de la microestructura de gotas, ocurridos en el Observatorio de Huancayo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar los parámetros integrales de lluvia a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia.
- Determinar los valores de los parámetros del ajuste matemático aplicado a la distribución de tamaño de gotas de lluvia, para obtener información acerca de la evaporación, de la concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro.
- Clasificar los eventos de lluvia, por medio de la intensidad de lluvia y desviación estándar.
- Determinar el cambio del espectro de gotas de lluvia de acuerdo al tipo de lluvia.

1.4 Justificación

La alteración del clima es un fenómeno que en los últimos años se ha ido incrementando (IPCC 2022); es por ello que se tiene la necesidad de comprender los diferentes procesos climatológicos y meteorológicos que suceden en el planeta, para de este modo poder identificar, analizar y plantear medidas de mitigación a estas variaciones, que en muchos casos son de carácter negativo.

Uno de estos componentes alterados es la precipitación (mayormente lluvia) y debido a la relación directa que tiene con el ciclo hidrológico, se han venido desarrollando una gran cantidad de estudios en este campo, con la finalidad generar información útil, detalla precisa acerca de todo lo que implica la precipitación; y de este modo se planteen respuestas que busquen reducir los efectos de esta alteración (MINAGRI 2012; SENAMHI 2013; MINAM 2016).

De acuerdo a Chen et al. (2013) y Montero-Martínez et al. (2021), se menciona que un análisis de la precipitación en función a sus propiedades microfísicas, es un buen punto de partida para la obtención de información detallada y precisa

acerca del tipo de tormenta, del tipo de hidrometeoro, de la cantidad la precipitación, entre otros aspectos. Este análisis facilita el entendimiento de como sucede el proceso de precipitación desde su formación en las nubes hasta su llegada a la superficie terrestre y de cómo influyen otros mecanismos atmosféricos en este proceso.

El territorio peruano presenta una serie de escenarios ligados a la precipitación, como son los ecosistemas tropicales, las áreas de producción agropecuaria, entre otros (Valencia Leguizamon, Tobón Marín 2017). Uno de estos espacios corresponde al valle del río Mantaro, el cual se ha caracterizado desde hace muchos años por la gran cantidad de alimentos que produce. Y es por ello que el Instituto Geofísico del Perú, a través del Observatorio de Huancayo monitorea y estudia los procesos atmosféricos que suceden sobre el valle.

La presente investigación al igual que los diferentes estudios desarrollados dentro del Observatorio de Huancayo, buscan complementar la información acerca de sistema meteorológico y climatológico del lugar. Este estudio se centra en el análisis de las propiedades microfísicas de la lluvia, con la finalidad de caracterizar los eventos de lluvia, que tiene como finalidad complementar la información acerca de su desarrollo, tomando como esquema el análisis microestructura y la división de los datos en eventos de lluvia, a diferencia del análisis que emplea el Servicio Nacional de meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Perú.

1.5 Delimitantes de la investigación

1.5.1 Delimitación Teórica:

Para efectos del presente estudio se realizó un análisis de la microestructura de los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo. El estudio está enfocado en una caracterización de eventos de lluvia a través de mediciones de DSD a nivel superficial, con datos de disdrómetros ópticos.

A nivel de Perú, no se cuenta con estudios que empleen mediciones de DSD provenientes de disdrómetros, y mucho menos para la zona de estudio.

Es necesario señalar, que el bloque de mediciones de DSD disponibles, corresponden a 3 años, dificultando la mejora de ajustes técnicos en el momento de medición, ya que la influencia de las condiciones geográficas del área de estudio altera el proceso de medición.

1.5.2 Delimitación Temporal:

Las mediciones de DSD empleadas, provienen de observaciones de disdrómetros ópticos, los cuales fueron instalados en el mes de agosto del 2018; a partir de esa registraron datos permanentes hasta el 2020. Por temas de accesibilidad a las mediciones originales, el estudio se basó en el periodo agosto del 2018 a abril del 2020.

1.5.3 Delimitación Espacial:

En lo referente a la disponibilidad de información espacial, las mediciones corresponden solo a un punto (Observatorio de Huancayo). Por tal motivo una caracterización espacial de la lluvia requeriría una red de estaciones con los mismos equipos a lo largo de todo el valle; así mismo, para el estudio de una caracterización en escala vertical, se requería emplear otros equipos como son los radares o imágenes satelitales.

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Internacional

Chen et al. (2022), desarrollaron un estudio acerca de la microfísica de la precipitación de eventos de lluvia convectiva y estratiforme, con el objetivo de revelar las características estadísticas de la microfísica de la precipitación y comprender si la temperatura de brillo de las imágenes de satélite se puede utilizar para inferir estructuras microfísicas de lluvia. Para ello se utilizaron 6 años de observaciones del satélite de Medición de Precipitación Global, en la temporada de monzones de verano (junio-agosto) entre 2014 y 2019 sobre el valle del río Yangtze-Huaihe. Los resultados indican que la precipitación convectiva más intensa, está asociada con gotas pequeñas de diámetro medio ponderado por masa alrededor de 1.65 mm, así mismo la temperatura corregida por polarización del radar señala altas concentraciones de hidrometeoros de hielo. En caso de precipitación estratiforme se caracteriza por un diámetro medio ponderado por masa más pequeño que la precipitación convectiva. En lo que refiere a la lluvia intensa, es mucho mayor en la precipitación estratiforme que para la precipitación convectiva, probablemente debido a un crecimiento más eficiente de los procesos de lluvia cálida.

Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García (2021), realizaron el estudio de la clasificación de la lluvia y la tendencia de las parametrizaciones gamma aplicados a la distribución del tamaño de gotas de lluvias en México, presentando un análisis de datos microfísicos y de distribuciones de tamaño de gota, con la finalidad de presentar una evaluación estadística de cuatro métodos de momentos utilizados para estimar los parámetros del modelo gamma y otro para el caso gamma normalizado, aplicado a las mediciones recolectadas por disdrómetros ópticos PWS100 para 4 localidades de México. Se estimaron los parámetros de agua acumulada e intensidad de lluvia, calculados a partir del tamaño de gota y velocidad de caída. Se empleó el método de momentos (4 momentos diferentes) en el ajuste de los parámetros gamma DSD para la estimación de agua acumulada. Los resultados muestran que el método de los

momentos DSD segundo, cuarto y sexto tienen un buen rendimiento. Así mismo, se aplica un nuevo método, para la clasificación de la lluvia basado en la variación del agua acumulada y el diámetro del volumen medio; donde se plantean tres categorías (convectiva, estratiforme y superficial). La investigación muestra que los 3 parámetros del ajuste gamma, tienen valores grandes cuando el espectro está dominado por un gran número de gotas de diámetros pequeños y medianos (tasa de lluvia baja) y valores pequeños cuando las gotas se desplazan a diámetros grandes (tasa de lluvia mayor).

Adirosi, Baldini, Tokay (2020), elaboran un estudio acerca la comparación de parámetros de lluvia y distribución de tamaño de gotas en base a mediciones de una serie de equipos. La finalidad del estudio es evaluar el rendimiento entre radar Micro Rain, video bidimensional y disdrómetros Parsivel², y radar de polarización dual de banda S, respecto a sus mediciones. Los datos fueron recolectados durante la campaña de campo de Estudios de Inundaciones de Iowa (IFloodS), entre abril y junio de 2013, que incluyó todos los minutos de lluvia, así como los minutos de lluvia estratiforme y lluvia convectiva. Se aplicó metodología de sesgo porcentual y absoluto, tomando como referencia las mediciones del disdrómetro video bidimensional. Los resultados arrojan un sesgo absoluto de menos de 2 dB en reflectividad entre el equipo de referencia y el menos confiable, incluso en lluvia convectiva. Para la tasa de lluvia, el sesgo absoluto porcentual entre los equipos mencionados, osciló entre 25% y 35% en lluvia estratiforme y alrededor de un 10% más alto en lluvia convectiva. La concordancia para el diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia fue optima, con un sesgo inferior a 0,1 mm, mientras que el radar Micro Rain sobrestimó el parámetro de intercepción normalizado de gamma.

Tokay, Wolff, Petersen (2014), estudiaron la evaluación de la nueva versión del disdrómetro láser-óptico, OTT Parsivel, que tiene como objetivo evaluar el rendimiento de esta nueva versión de disdrómetro frente a equipos más antiguos. Los datos empleados corresponden a mediciones recolectadas por pluviómetros y disdrómetro ópticos (2 equipos OTT Parsivel y un Joss-Waldvogel), durante el período del 28 de febrero al 2 de agosto del 2011, en el Centro de Vuelo Espacial

Goddard de la NASA. Se emplea una clasificación de datos en base a eventos de lluvia, obteniéndose un total de 36 eventos de lluvia con una tasa superior a 1 mm de lluvia. La estimación de la variación en entre las medidas de los equipos toma como medida el sesgo porcentual (bias) y el sesgo porcentual absoluto (absolute bias). Los resultados muestran que la variación en las mediciones entre la última versión del disdrómetro Parsivel respecto al medidor de referencia, es considerablemente mayor (6%). Así mismo, se observa variaciones en el diámetro de caída de las gotas (0.5 mm - 4 mm), para mediciones del espectro de gotas en el caso de disdrómetros.

Chen, Yang, Pu (2013), estudiaron las características estadísticas de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia en la temporada de Meiyu observadas en el este de China, con la finalidad de comparar analizar los valores de los parámetros integrales de lluvia. Las mediciones fueron recolectadas por disdrómetros ópticos para el periodo 2009 – 2011, tales mediciones son clasificadas en eventos de lluvia, de acuerdo al total de precipitación acumulada y a la desviación estándar de las muestras. Los resultados que obtuvieron a partir de la estimación de la concentración logarítmica de gotas y el diámetro medio ponderado en masa de las gotas de lluvia, determinaron valores para la clasificación de la lluvia en estratiformes y convectivas. La información recabada en este artículo ofrece un punto de apoyo para la discusión de similitudes o diferencias en la estimación de los parámetros integrales de lluvia.

2.1.2 Nacional

Flores-Rojas et al. (2021), estudiaron el análisis de eventos meteorológicos extremos en los Andes centrales del Perú utilizando un conjunto de instrumentos especializados, con la finalidad de identificar eventos meteorológicos extremos. Se emplearon un conjunto de instrumentos (PARSIVEL², entre otros) para medir varias propiedades físicas, microfísicas y radiactivas de la atmósfera y de las nubes, que permitan identificar, comprender y, posteriormente, pronosticar y prevenir los efectos de eventos meteorológicos extremos. Las mediciones corresponden al observatorio de Huancayo, ubicado en la cuenca del río Mantaro. El estudio realiza un análisis dinámico y energético detallado de dos

eventos de lluvia extrema, dos eventos de heladas intensas y tres eventos de alta contaminación ocurridos en el observatorio de Huancayo entre 2018 y 2019. Donde los resultados destacan los patrones de reflectividad en función de la altura para ambos eventos, que se mide en función de la presencia de tipos de lluvia convectiva y estratiforme.

Kumar et al. (2020), realiza el estudio de las características verticales de las precipitaciones en los Andes centrales del Perú, con el objetivo de investigar las características/patrones de precipitación, incluida la variación diurna, las características de la banda brillante y la estructura vertical de la lluvia. Para ello se utilizó 3 años de datos de radar de perfil apuntado verticalmente, ubicado en el Observatorio de Huancayo. Se trabaja a base de la reflectividad de radar, la tasa de lluvia, contenido de agua líquida y velocidad Doppler. La precipitación muestra la distribución bimodal, con intensidad de lluvia frecuente y más alta durante la tarde y la noche. La banda brillante muestra un patrón diurno con mayores alturas durante la tarde y la noche, donde se estimó que más del 70% de la altura de la banda brillante se encuentra entre alrededor de 4,34,7 km y solo el 20% de la banda brillante tiene una altitud superior a los 5 km. En caso de la distribución del tamaño de gotas, los parámetros muestran mayor variación por debajo del nivel de congelación, y se observa una mayor concentración de hidrometeoros de gran tamaño para altas intensidades de lluvia; sin embargo, los modos dominantes del diámetro ponderado de masa son inferiores a 1 mm. Los cambios en la estructura vertical de la lluvia referente a los parámetros de la distribución del tamaño de gotas son significativos para tasas de lluvia mayor a 20 mm/h, mientras que para tasas inferiores a 2mm/h no existen muchas diferencias. Los datos satelitales y de reanálisis revelan períodos cortos de actividad convectiva, con mayor precipitación acumulada sobre el Observatorio en comparación con la precipitación estratiforme, que es más común durante la noche y se mantiene durante muchas horas.

Valdivia et al. (2020), estudiaron la estimación de la tasa de precipitación con múltiples instrumentos en los Andes centrales peruanos, emplea diferentes medidores de precipitación con el objetivo de estimar la tasa de lluvia en

diferentes condiciones, con una serie de instrumentos. Los equipos utilizados son un conjunto de radares (un perfilador de nubes en banda Ka (MIRA-35c), un perfilador de viento UHF (CLAIRE) y un perfilador de viento VHF (BLTR)), que proporcionan información sobre la relación de la altitud respecto al diámetro del tamaño de la gota versus la velocidad de caída. La estimación de la tasa de lluvia por radares fue válida por observaciones de disdrómetro óptico (PARSIVEL²) y dos pluviómetros. Los resultados arrojaron sesgos de totales de acumulados de lluvia para PARSIVEL2, MIRA-35c y CLAIRE de 18%, 23% y -32%, respectivamente. Esto sugiere que la calibración en tiempo real de los radares, es fundamental para una mejor estimación de la precipitación a nivel superficial.

Del Castillo (2019), realizó la evaluación de los algoritmos del GPM para estimar los parámetros de la distribución del tamaño de gotas, con la finalidad de determinar cuáles son los factores que influyen en la sobrestimación o subestimación de las precipitaciones por los equipos. Para tal motivo se recurre al radar de precipitación, abordo del Global Precipitation Measurement (GPM), el cual nos permite observar la precipitación en una estructura 3D; y a mediciones in situ del radar MIRA35c y disdrómetro óptico PARSIVEL2. La metodología aplica corresponde al método de la matriz T, para determinar las secciones eficaces de dispersión de una gota y de este modo simular las mediciones de reflectividad en las bandas Ku y Ka, que luego se emplearon en los algoritmos single frequency y dual frequency, y a su vez compararlos con los parámetros de la distribución de tamaño de gotas determinados experimentalmente. Los resultados muestran que el algoritmo single frequency, presenta una mejor correlación de los parámetros; así mismo, este algoritmo presenta un mejor rendimiento para tasas de lluvia menores a 2 mm/h y mayores a 8 mm/h; sin embargo, el algoritmo dual frequency destaca en intensidades de lluvia entre 2 y 8 mm/h.

Villalobos et al. (2019), elaboraron el estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM, con la finalidad de analizar estas tormentas en los Andes Centrales del Perú. Para ello, se empleó estimadores estadísticos de la reflectividad tridimensional, intensidad

de la lluvia y parámetros microfísicos; utilizando mediciones de radares a bordo de los satélites del TRMM y el núcleo GPM. La zona de estudio fue dividida en 4 áreas (norte, centro, sur y este) a lo largo de la cuenca del río Mantaro. Los principales resultados fueron que el ciclo diurno de lluvia es cambiante, ya que se observa un incremento de eventos en los intervalos de 13-23 horas local y 18-06 hora local. Los porcentajes de ocurrencia de precipitaciones estratiforme y convectivas en las áreas son 30% y 70% respectivamente y su contribución a la lluvia son de 63.3% y 36.7% respectivamente, para la zona de los Andes; mientras que en la región de transición Amazonía - Andes, los porcentajes de ocurrencia son 31% y 69% y sus contribuciones acumulativas a la lluvia son equivalentes. La investigación concluye que las precipitaciones convectivas en las áreas de los Andes se intensifican con el mecanismo de forzamiento orográfico.

2.2 Bases Teóricas:

2.2.1 Precipitación atmosférica

Michaelides et al. (2009) y Liang, Wang (2019), mencionan que la precipitación se define como el proceso por el cual todas las partículas acuosas en fase líquida o sólida que se originan en la atmósfera, caen a la superficie terrestre. Houze (2014) determina que este proceso se da mediante flujos de humedad de la atmósfera hacia el suelo, donde interactúa la gravedad, las corrientes de aire, el flujo de calor, entre otros.

2.2.1.1 Formación de la precipitación

Según Houze (2014) la formación de la precipitación se da a través de la condensación de humedad en la atmósfera, resultado de las gradientes de temperatura. Liang y Wang (2019) mencionan que la mayor fuente que aporta humedad a este proceso, proviene de la constante evaporación de los cuerpos de agua presentes en la superficie terrestre, en el desarrollo normal de ciclo hidrológico. El fenómeno ocurre cuando las masas de vapor de agua se enfrían hasta llegar al punto de saturación y precipiten en forma de hidrometeoros.

2.2.2 Lluvia

Liang y Wang (2019) hacen referencia a que la lluvia es la forma más común y principal de precipitación, y se caracteriza porque los hidrometeoros están en estado líquido (gotas). En comparación con otros parámetros meteorológicos, la lluvia presenta variabilidad espacial y temporal y en ocasiones comportamientos anómalos. Por ello la precisión de las mediciones resultan un tanto desafiantes. A continuación, se detalla aspectos importantes en su formación.

2.2.2.1 Núcleos de condensación

Sun y Ariya (2006) mencionan que son elementos que sirven de base para la formación de gotas de agua o cristales de hielo. Estos núcleos normalmente son partículas muy pequeñas y de diferentes sustancias (partículas de polvo, sales, aerosoles, incluso pequeños cristales de hielo) que se encuentran suspendidas en la atmósfera.

2.2.2.2 Crecimiento de las gotas de lluvia

Houze (2014) indica que después del proceso de nucleación, las gotas empiezan a crecer en la nube, teniendo un tamaño límite de $200\ \mu\text{m}$; una vez superada este tamaño se convierten en gotas de lluvia, donde el diámetro oscila alrededor de los $2\ \text{mm}$, como se observa en la Figura 1.

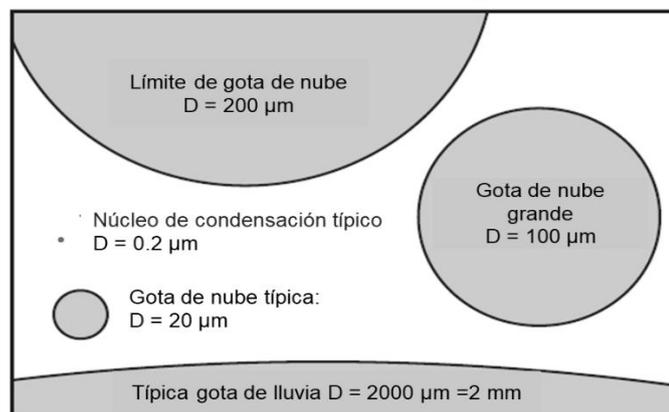


Figura 1. Diámetros típicos de gotas de lluvia y aerosoles en la atmósfera. Tomada de «Cloud Dynamics», por Houze, 2014, p. 48.

2.2.2.3 Caída de las gotas de lluvia

Houze (2014) menciona que para que la gota de lluvia precipite, debe alcanzar un tamaño donde su masa por acción de la gravedad pueda generar una velocidad de caída mayor a la tasa ascensional del aire. Kumar et al. (2020) así mismo, destaca que mientras el hidrometeoro sea más grande, está menos expuesto a la acción de evaporación presente en el recorrido de la base de la nube a la superficie.

Houze (2014) añade otros aspectos que influyen en el tamaño de la gota durante la precipitación como son los gradientes de temperatura, la velocidad de viento entre las regiones de la nube, la coexistencia de gotas de agua y cristales de hielo, y el aumento del tamaño de las gotas por captura mediante choques ellas.

2.2.3 Mediciones de lluvia

Representan la cantidad total de precipitación que llega al suelo en un periodo establecido. Para tal efecto, existen un gran número de equipos con diferentes metodologías y características.

2.2.3.1 Unidades de medida y escala

La Organización Meteorológica Mundial - WMO (2014) propone que la unidad de medida de la precipitación es generada por la profundidad lineal sobre una superficie horizontal uniforme generalmente expresada en milímetros (volumen/área) o en Kg / m^2 (masa / área), en intervalos de tiempos fijos. En caso de la intensidad de lluvia está representada por la profundidad lineal por unidad de tiempo, generalmente en milímetros por hora (mm / h). La Tabla 1, precisa el rango de medición y las incertidumbres para la intensidad de lluvia.

Tabla 1. *Rango de Medición e Incertidumbres para la Intensidad de Lluvia*

Rango Completo:	0.02 - 2000 mm/h
Reportado como traza	0.02 - 0.2 mm/h
Tiempo promedio de salida:	1 minuto
Incertidumbre de medida requerida:	
0.2 - 2 mm/h:	0.1 mm/h
2 - 2000 mm/h:	5 %

Nota: Rango de medición e incertidumbres para la intensidad de lluvia estipuladas por la WMO. mm/h: milímetros por hora. Tomado de Lanza et al. 2005, p. 80.

2.2.3.2 Equipos de medición de lluvia

La WMO (2014) refiere a que existe una amplia gama de instrumentos que cuantifican la precipitación, en base a la medición de sus propiedades. Generalmente se usan recipientes con forma de cilindro con un embudo y abiertos en la parte superior, conocidos como pluviómetros convencionales. Michaelides et al. (2009) mencionan que en la actualidad se cuenta con medidores más sofisticados que mejoren la precisión y proporcionen información a detalle acerca de la distribución del tamaño de gotas de lluvia (caso de disdrómetros ópticos); como también abarcar grandes extensiones de terreno (caso de radares y satélites).

2.2.3.3 Fuentes de error en la medición de la precipitación

Para Førland et al. (1996) los medidores de precipitación presentan datos puntuales y precisos. Sin embargo, existe una serie de errores que pueden influir en la precisión de las mediciones, dentro las cuales las fuentes de errores más frecuentes son:

- **Error de viento:** Existe una distorsión del campo de viento en el orificio del medidor lo que impide que parte de la precipitación ingrese al medidor.
- **Error de evaporación:** Pérdida de la precipitación en el colector por acción de la evaporación.

- **Error de humedecimiento:** Debido a la adherencia del agua en las paredes del medidor, cierta cantidad de precipitación permanece en el recipiente cuando este se vacía.
- **Error de salpicadura:** En casos de lluvias intensas, existe salpicaduras producto de las gotas que impactan dentro del colector, y si el recipiente se encuentra cerca del suelo sucede el efecto contrario con salpicaduras de lluvia que impactan fuera del contenedor.
- **Error de la ubicación:** El sitio no es representativo del entorno o está muy influenciado por las condiciones de localización, lo que lleva a mediciones no representativas.
- **Error del instrumento:** El equipo de medición está diseñado y/o instalado incorrectamente, lo que lleva a errores de medición.
- **Errores observadores e imprevistos:** Principalmente errores humanos (tanto sistemáticos como aleatorios) y otros errores aleatorios, ejemplo de los cuales son errores durante la lectura.

Según Michelson (2004), de todas las fuentes mencionadas resaltan las producidas por acción del viento como se evidencia en la Figura 2, donde las mediciones se alteran pese a que los sensores cuentan con un sistema de protección. A esto se añade la aparición de los errores por evaporación y humectación, agravando aún más la ocurrencia de errores sistemáticos.

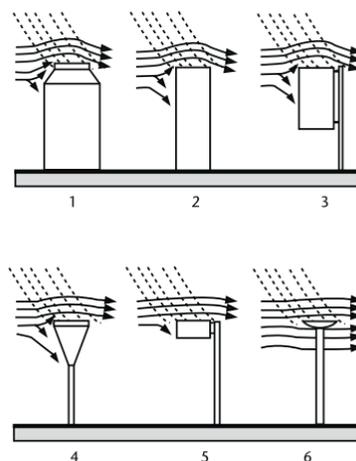


Figura 2. Interacción del flujo de viento respecto a las formas de los medidores de precipitación. Las líneas continuas muestran la corriente de aire y las líneas discontinuas muestran las trayectorias de las partículas de precipitación. Tomada de «Measurement of Precipitation», por WMO 2014, p. 190.

En caso del disdrómetro óptico (OTT Parsivel²), se presentan una serie de inconvenientes durante la medición. Los cuales son:

- Cuando sólo una porción del hidrometeoro cruza el haz, el sensor tiende a registrar la partícula como una de menor tamaño y con mayor velocidad de caída. Este error se incrementa cuando el tipo de hidrometeoro se encuentra en estado sólido (principalmente nieve) ya el tamaño de las partículas y el margen de caída se superponen. Para minimizar esta clasificación errónea se recurre a un ajuste en el umbral de consideración en función al diámetro de la partícula.
- Cuando el viento y la vibración afectan el rendimiento del disdrómetro Parsivel. Por tanto, es recomendable tener en cuenta las condiciones ambientales antes de realizar las mediciones.

2.2.3.4 Variaciones en la estimación de la precipitación

Tokay et al. (2014) y Flores-Rojas et al. (2021), mencionan que la estimación del total de lluvia está ligado a la resolución del equipo de medición, por ende es necesario realizar comparar las mediciones para evidenciar cuanto varían.

Tokay et al. (2014) aplica el método estadístico del sesgo porcentual (ecuación 1) y sesgo porcentual absoluto (ecuación 2), para calcular la variación del total de lluvia registrado por los pluviómetros y disdrómetros, en base a eventos de lluvia.

Este método toma las dos mediciones del total de lluvia por cada evento entre los 2 instrumentos (x , y) para n muestras, siendo x el instrumento de referencia. Advertir que los eventos de lluvia estimados, presentan un intervalo de confianza de 5% respecto a la pérdida de datos. El equipo de referencia será aquel que cuente con la serie de datos más completa.

$$sesgo\ porcentual = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{sesgo porcentual absoluto} = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

2.2.4 Características climatológicas de la zona de estudio

2.2.4.1 Variabilidad de la Precipitación

En la cuenca del río Mantaro existe una fuerte variabilidad estacional en las precipitaciones, con valores máximos entre enero y marzo y mínimos entre los meses de junio y julio (Silva et al. 2006); así mismo, el 83 % de la precipitación anual ocurre entre octubre y abril, de los cuales el 48% se concentra en los meses de enero, febrero y marzo (IGP 2005). Respecto a la distribución mensual de la precipitación (Figura 3), la Tabla 2 presenta el registro de mediciones hechas por SENAMHI en la estación Huayao, próxima al Observatorio de Huancayo.

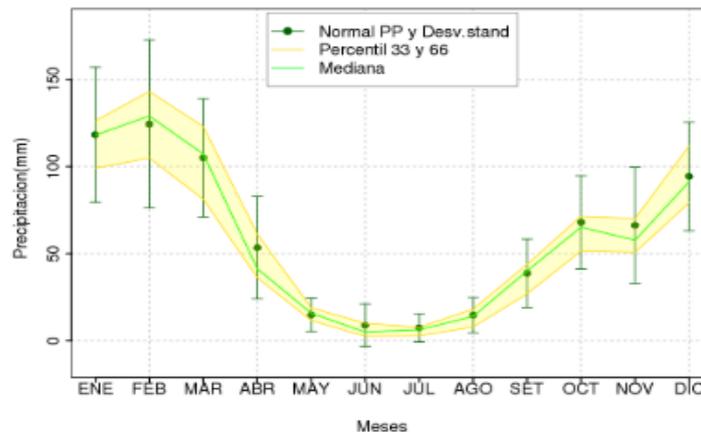


Figura 3. Promedio de la Precipitación 1981 – 2010. Tomado de «Normales Climatológicas 1981 - 2010 de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima del aire», por SENAMHI 2010, p. 158.

Tabla 2. Promedio de la Precipitación 1981 – 2010

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normales	118.2	124.4	105.0	53.4	14.9	8.9	7.4	14.6	38.7	68.0	66.3	94.3
Desv. Estándar	38.8	48.2	33.8	29.4	9.5	12.2	8.1	10.1	19.6	26.8	33.3	31.2
Mediana	118.0	129.0	107.2	41.3	15.8	5.0	6.3	14.0	40.1	65.2	57.7	91.2
Percentil 33	99.0	104.9	81.2	36.2	11.6	2.6	2.8	7.9	26.9	51.6	50.7	79.2
Percentil 66	126.2	143.1	122.9	61.2	18.9	10.0	7.7	18.2	43.8	71.4	70.2	111.7

Nota: Promedios de lluvia mensual, teniendo en cuenta la distribución por percentiles y la desviación estándar. Desv. Estándar: Desviación estándar. Tomado de SENAMHI 2010, p. 158.

De acuerdo a las mediciones de otras estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca, existe variabilidad en sus reportes, debido a la influencia de la altitud. Teniendo un mayor registro de lluvias en las partes altas de la cuenca. Esta relación también se ve afectada por otros aspectos físicos como son el grado de exposición del terreno al sol, influencia de la brisa montaña - valle – montaña, la dirección de los flujos de viento y el contenido de humedad (IGP 2005).

La variabilidad espacial de la lluvia presenta valores máximos de 1000 mm/año en las áreas norte y sur oeste, y mínimos de 550 mm/año en la parte central y sureste de la cuenca (Silva et al. 2006). El Observatorio de Huancayo se encuentra en la región centro-occidental de la cuenca donde las precipitaciones oscilan entre 700 y 800 mm/año (IGP 2005).

La comparación de la variabilidad interanual de la precipitación, muestra que los periodos secos son más frecuentes, en casi un 70% de las estaciones de la cuenca, principalmente a partir del año 1986/1987, originando una tendencia negativa de lluvias (Silva, Takahashi, Chávez 2008). Esta tendencia se centra principalmente en las áreas norte y centro de la cuenca; con una reducción de lluvias de 3% por década en el periodo de 1971 - 2000 (Silva et al. 2006). Así mismo, para más largo (1922 - 2009) la tendencia es de + 0.74% por década, mientras que en un análisis más corto (1977 - 2009) la tendencia es -7.2% por década (Silva, Transmote, Giráldez 2010), esto sugiere que existe una variabilidad negativa en las últimas décadas.

2.2.4.2 Variabilidad de la temperatura

El promedio mensual de la temperatura mínima del aire en la cuenca del río Mantaro está muy marcado por el ciclo anual, los valores mínimos se centran en los meses de junio y julio y el máximo entre enero y marzo (Figura 4a), cómo se puede observar en el cálculo del promedio mensual de la temperatura mínima en la Tabla 3. En el caso del promedio de la temperatura máxima la estacionalidad es débil (Figura 4b), con valores máximos en noviembre y los mínimos en febrero, con una variación muy poco significativa (Silva et al. 2006). Si nos enfocamos en el promedio mensual de la temperatura máxima en la Tabla 4; los valores se mantienen casi constantes a lo largo de todo el año.

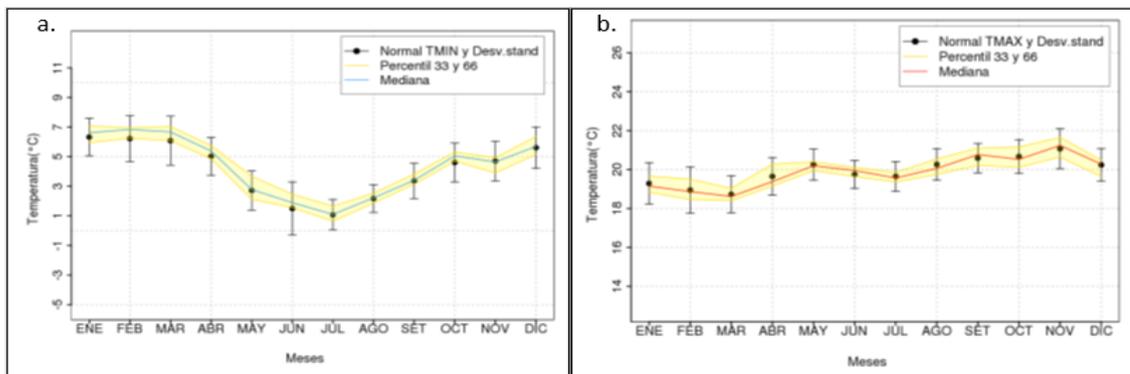


Figura 4. Promedio de la Temperatura 1981 -2010. a) Promedio de la temperatura mínima. b) promedio de la temperatura máxima. Tomado de «Normales Climatológicas 1981 - 2010 de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima del aire», por SENAMHI 2010, p. 159-160.

Tabla 3. Promedio de la Temperatura Mínima 1981 – 2010

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normales	6.3	6.2	6.1	5.0	2.7	1.5	1.1	2.2	3.4	4.6	4.7	5.6
Desv. Estándar	1.3	1.6	1.7	1.3	1.3	1.8	1.0	0.9	1.2	1.3	1.3	1.4
Mediana	6.6	6.8	6.7	5.4	2.8	1.9	1.1	2.2	3.4	5.0	4.6	5.7
Percentil 33	5.9	6.2	6.1	4.9	2.1	1.6	0.6	1.9	1.2	4.7	3.9	5.1
Percentil 66	7.1	6.9	7.0	5.7	3.7	2.5	1.6	2.5	3.4	5.3	4.9	6.4

Nota: Desv. Estándar: Desviación estándar. Tomado de SENAMHI 2010, p. 160.

Tabla 4. Promedio de la Temperatura Máxima 1981 – 2010

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normales	19.3	18.9	18.7	19.7	20.3	19.7	19.6	20.3	20.6	20.6	20.7	20.2
Desv. Estándar	1.1	1.2	1.0	1.0	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.8
Mediana	19.1	18.9	18.6	19.4	20.2	19.9	19.6	20.1	20.1	20.8	21.2	20.3
Percentil 33	18.8	18.5	18.4	19.2	19.9	19.6	19.4	19.6	19.6	20.2	20.6	19.6
Percentil 66	19.7	19.5	19.0	20.3	20.4	20.1	19.9	20.5	20.5	21.1	21.6	20.5

Nota: Desv. Estándar: Desviación estándar. Tomado de SENAMHI 2010, p. 159.

La distribución espacial del promedio anual de la temperatura máxima presenta valores de 12 °C en la parte oeste y centro oriental de la cuenca, mientras que para el valle la temperatura máxima alcanza valores entre los 16 °C y 18 °C (Silva et al. 2006).

2.2.4.3 Clima

En base a la clasificación climática de Thornthwaite (1948), existe una variación de Semi Húmedo a Muy Húmedo en la mayor parte de la cuenca, mientras que en la zona sur predominan los regímenes secos (Semi seco y seco). Desde el punto de vista térmico, Silva et al. (2006) mencionan que el clima varía desde la tundra en las partes altas hasta un clima semi frío en la zona del valle del río Mantaro.

2.3 Marco Conceptual

La presente investigación maneja una serie de conceptos con la finalidad de caracterizar de la lluvia a través del análisis de la microestructura. Así mismo, se contemplan otras medidas para mejorar el análisis de la lluvia.

2.3.1 Distribución de tamaño de gotas (DSD)

Wen et al. (2016) mencionan que la DSD (siglas en inglés de Drop Size Distribution) es una propiedad microfísica fundamental de la precipitación, y se expresa como la disposición de las frecuencias de las características de las gotas (diámetro, volumen y número), propias en una nube o evento de lluvia. Ladino (2017) señala en términos generales que la DSD es una forma detallada de expresar las características de la lluvia como el tamaño, forma y concentración

de partículas que permite entender los procesos físicos involucrados en la precipitación y la estimación de la lluvia. Así mismo, Montero-Martínez et al. (2021) resaltan que la medición de la DSD, facilita comprender los procesos de formación de lluvias, mejorar las metodologías de pronóstico y estimar la cantidad de agua en las tormentas.

2.3.2 Parámetros integrales de lluvia

Chen et al. (2013) señala que la DSD se encuentra expresada como el número de gotas por volumen de aire para un intervalo de tamaño de gota dado. Las mediciones de DSD recolectadas por el disdrómetro Parsivel, se encuentran en una matriz de salida de 32x32 datos, que relaciona el tamaño de caída (i enésima) y la velocidad de la gota (j enésima) (OTT Hydromet 2016). A partir de estas mediciones se puede calcular los 4 parámetros integrales de lluvia.

El primer parámetro es el $N(D_i)$, que representa la concentración numérica de las gotas en función al diámetro dentro del intervalo que va desde D_i a $D_i + \Delta D_i$. La ecuación 3 muestra el cálculo de este parámetro, donde n_{ij} es la cantidad de gotas dentro del contenedor de tamaño i y el contenedor de velocidad j , el $A(D_i)$ es el área de muestreo efectivo del disdrómetro expresada en m^2 , Δt es el periodo de observación que corresponde a 60 segundos para este estudio, V_j ($m.s^{-1}$) es la velocidad de caída en el contenedor j y ΔD_i corresponde al intervalo de diámetro (mm) en el contenedor i .

$$N(D_i) = \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A(D_i) \times \Delta t \times V_j \times \Delta D_i} \quad (3)$$

A partir de la $N(D_i)$ se puede calcular los otros parámetros integrales de la DSD como la reflectividad dado en $mm^6.m^{-3}$ (ecuación 4), intensidad de lluvia en $mm.h^{-1}$ (ecuación 5) y contenido de agua líquida en g/m^{-3} (ecuación 6).

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) \times D_i^6 \times \Delta D_i \quad (4)$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \times \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} V_j \times N(D_i) \times D_i^3 \times \Delta D_i \quad (5)$$

$$W = \frac{\pi}{6000} \times \sum_{i=1}^{32} N(D_i) \times D_i^3 \times \Delta D_i \quad (6)$$

2.3.3 Modelo de Ajuste Matemático aplicado a la DSD

Ladino (2017), describe una serie de modelos de ajuste matemático (funciones exponenciales, gaussiana, lognormal y gamma) que se puede emplear a la DSD, con la finalidad de mejorar el entendimiento del espectro de gotas. Ulbrich (1983) señala que el modelo gamma es ampliamente usado por la descripción del espectro de gotas a través de 3 parámetros (intercepción, forma y pendiente); y de acuerdo a Ladino (2017) este ajuste presenta mejor adaptabilidad a datos de DSD provenientes de disdrómetros Parsivel.

Ulbrich (1983), propone que el cálculo de la concentración de gotas se puede realizar a través de los parámetros del ajuste matemático gamma (ecuación 7). Donde D (mm) es el diámetro de la gota de lluvia, N_0 ($\text{mm}^{-1-\mu} \cdot \text{m}^{-3}$) es el parámetro de intercepción, μ es el parámetro de forma y Λ (mm^{-1}) es el parámetro de pendiente.

$$N(D) = N_0 \times D^\mu \times \exp(-\Lambda D) \quad (7)$$

Ulbrich (1983) y Chen, Yang, Pu (2013) recomiendan que el cálculo de estos 3 parámetros (N_0 , μ y Λ), se realice a través del método del momento, tomando para ello el segundo, tercer y cuarto momento.

La representación gráfica del espectro de la DSD para el modelo de ajuste gamma, permite evaluar la evolución del espectro de gotas. Ulbrich (1983), elabora un gráfico con diferentes curvas de concentración de gotas para 3 tipos de valores en el parámetro de forma (μ) (Figura 5). Las curvas están expresadas en concentración logarítmica de las gotas y el diámetro de las gotas.

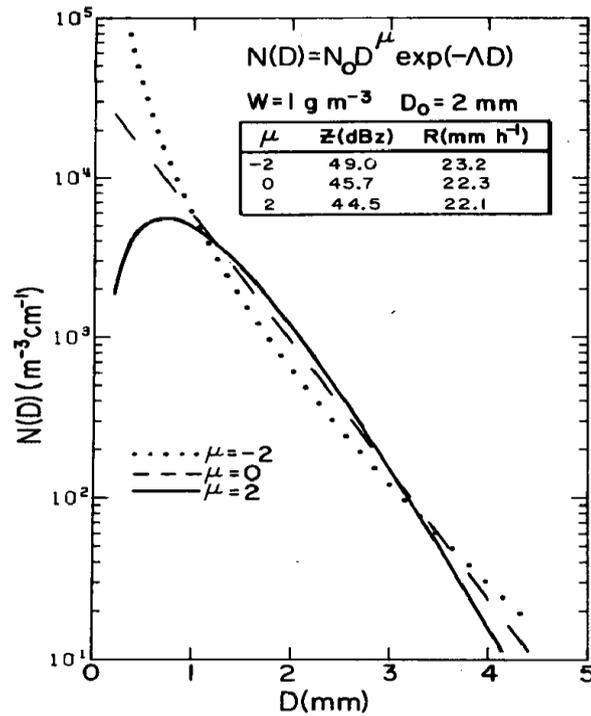


Figura 5. 3 Diferentes Distribuciones Gamma. Tomado de «Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution», por Ulbrich 1983, p. 1766.

2.3.4 Microestructura de llluvias

Chen et al. (2013); Tokay, et al. (2014) y Wen et al. (2016) mencionan que la microestructura se encuentra en función a los valores de los parámetros integrales de llluvias (reflectividad, contenido de agua líquida, intensidad de llluvia y concentración de las gotas de llluvia), los cuales son estimados a partir de mediciones de DSD. Tokay et al. (2014) refiere que también toma en consideración al espectro de gotas en función al diámetro de las gotas

2.3.5 Eventos de llluvia

El procesamiento de las mediciones de llluvia bajo el criterio de evento de llluvia, es una herramienta recientemente aplicada en el contexto del Perú. Para

determinar a que se considera un evento de lluvia, se toma en cuenta con consideraciones de estudios internacionales.

Chen et al. (2013) plantean que un evento de lluvia debe estar en base a 2 minutos lluviosos consecutivos y con un periodo de duración mayor a 30 minutos. Tokay et al. (2014) refieren a que la diferencia entre un evento y otro, debe tener un intervalo de datos sin registro de lluvias mayor a 2 horas, en caso contrario se consideran un solo evento de lluvia. Para Chen et al. (2013) y Tokay et al. (2014) otra medida complementaria es que el umbral mínimo debe ser de 10 gotas de lluvia, con un acumulado de lluvia mayor a 1 mm; en caso de no cumplir con estas condiciones se considera como ruido o traza.

2.3.6 Clasificación de los eventos de lluvia

Houze (2014) detalla una clasificación de lluvias en estratiformes (S) y convectivas (C). El principio que rige a esta clasificación es de acuerdo al tipo de nube de donde provienen los hidrometeoros. La lluvia estratiforme generalmente procede de nubes nimboestrato y la lluvia convectiva de nubes cúmulos - cumulonimbos. Sin embargo, en algunas ocasiones ambos tipos de nube coexisten dando como producto una precipitación mixta, dificultando la identificación del tipo de nube del cual provenía la precipitación.

Para mejorar los criterios de clasificación, es conveniente definir precipitación estratiforme y convectiva, en función a la relación entre el movimiento vertical del aire, el tamaño y la velocidad de caída de las partículas (Houze 2014; Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021).

De acuerdo a Houze (2014), la precipitación estratiforme se refiere al proceso en el cual el movimiento vertical del aire es generalmente pequeño en comparación con las velocidades de caída de los cristales de hielo y la nieve (1 – 3 m/s). En caso de precipitación convectiva la condición de eventos estratiformes no llega a cumplirse, debido a que la velocidad vertical promedio del aire a una altura dada tiene una magnitud de 1 – 10 m/s. Así mismo, las observaciones muestran que el tiempo de crecimiento de los hidrometeoros convectivos es limitado,

teniendo un intervalo de media hora desde su formación hasta su caída, mientras que para hidrometeoros estratiformes el tiempo es más amplio (1 – 3 horas).

En base a datos obtenidos por radar (Figura 6), se visualiza un contraste entre ambos tipos de precipitación. En eventos convectivos se muestran máximos de eco de radar en forma de columnas orientadas verticalmente; mientras que los eventos estratiformes presentan capas horizontales producidas por la banda brillante.

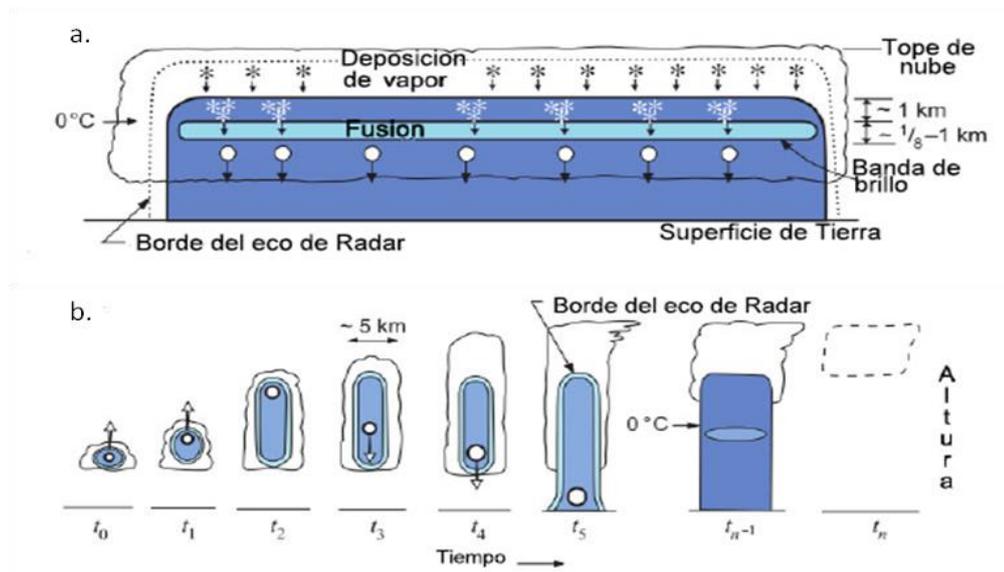


Figura 6. Clasificación de los Tipos de Eventos de Precipitación. a) Precipitación estratiforme (S), b) Precipitación convectiva (C). Tomado de «Cloud Dynamics», por Houze. 2014, p. 142.

Bringi et al. (2003) señala otro método para clasificar las lluvias en S y C, es a través de la tasa promedio de la intensidad de lluvia (RI) y la desviación estándar (σ) del periodo de datos analizados. La Tabla 5 define los valores de clasificación.

Tabla 5. Clasificación de Eventos de Lluvias de acuerdo con la Intensidad de Lluvia

Tipo de Evento	Umbral de Intensidad de lluvia (mm/h)	Desviación estándar
Estratiforme	$RI \geq 0.5$	$\sigma \leq 1.5$
Convectiva	$RI \geq 5.0$	$\sigma > 1.5$

Nota: RI: Intensidad de Lluvia. σ : Desviación estándar. Tomado de Bringi, Chandrasekar, Hubbert 2003, p. 357.

Atlas y Ulbrich (2006) y Montero-Martínez et al. (2021) combinan los resultados de la clasificación con los valores de los parámetros del ajuste gamma, donde se tiene que cuando el espectro de la DSD está dominado por gotas pequeñas y medianas (típico de eventos estratiformes), el parámetro de concentración, el parámetro de forma y la pendiente contemplan valores grandes. Sin embargo, cuando las gotas son grandes (eventos convectivos) estos tres parámetros tienen valores pequeños.

2.4. Definición de términos básicos

a. Precipitación

Es el proceso por el cual los hidrometeoros formados en la atmósfera caen a la superficie terrestre, a través de una serie de procesos que involucra las corrientes de los vientos y las gradientes de temperatura (Michaelides et al. 2009; Liang, Wang 2019). Las mediciones se realizan en base a la cantidad total que llega al suelo respecto a una proyección horizontal en un periodo establecido (WMO 2014).

b. Hidrometeoros

Son las diferentes formas de humedad que pueden ser líquidas o sólidas y que son producto de la condensación del vapor del agua en la atmósfera. Estos cuerpos tienden agruparse entre sí, para luego precipitar en diferentes formas como: llovizna, lluvia, escarcha, granizo y nieve (Houze 2014).

c. Lluvia

Es la forma de precipitación más conocida, que consiste en gotas de agua líquida con diferentes tamaños. Se clasifican según a su intensidad en: ligera, moderada y fuerte. Es una de las variables meteorológicas más estudiadas, debido a la importancia que tiene para diversos proyectos hidrológicos (Liang, Wang 2019).

d. Evento de lluvia

Se considera evento de lluvia a periodo en cual la tasa de lluvia supera los 0.1 mm/h, con un acumulado total de precipitación por encima de un milímetro de lluvia y con un registro de mayor a 10 gotas. Además, el intervalo de duración

debe ser superior a 30 minutos y el espacio entre datos con lluvia no sobrepasar las 2 horas (Chen, Yang, Pu 2013; Tokay, Wolff, Petersen 2014).

e. Equipos de medición de lluvia

Engloba todos los equipos encargados de medir la lluvia, en base a diferentes principios y con diversas estructuras. Entre los más resaltantes están los pluviómetros y pluviógrafos que miden la lluvia en función al peso y altura de agua que cae en un periodo de tiempo; mientras que un equipo más avanzado es el disdrómetro, el cual recaba información sobre la distribución del tamaño de gotas y a partir de ahí obtiene mediciones de lluvia (WMO 2014).

f. Espectro de gota de lluvia

Estructura que relaciona el diámetro, la concentración y la velocidad de caída de las gotas de lluvia (Wen et al. 2016).

g. Parámetros integrales de lluvia

Son propiedades microfísicas de los eventos de lluvia, que facilitan su caracterización; así mismo proporcionan información acerca de cómo sucede el evento (Chen, Yang, Pu 2013).

III HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis de la Investigación

Hipótesis general

Los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo, se caracterizan mediante el análisis de la microestructura de gotas.

Hipótesis específicas

- Los parámetros integrales de lluvias se calculan a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia.
- Los parámetros del ajuste matemático aplicado a la distribución de tamaño de gotas de lluvia, proporciona información acerca de la evaporación, de la concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro.
- Las lluvias se clasifican en estratiforme, convectiva y mixta, utilizando la intensidad de lluvia y desviación estándar.
- Los espectros de gotas cambian de acuerdo al tipo de evento de lluvia

3.1.1 Operacionalización de las Variables

Tabla 6. Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices / Ítems	Método	Técnica
Variable Independiente: Microestructura de los eventos de lluvia	Análisis de las mediciones de distribución de tamaño de gotas, a través de los parámetros integrales de lluvia y el espectro de gotas (Chen, Yang, Pu 2013; Wen et al. 2016; Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021).	La microestructura está en función los parámetros integrales de lluvia y a los parámetros del ajuste matemático aplicado al espectro de gotas $X = f(x_1, x_2)$	Ajuste Matemático de la DSD	Parámetro de forma y pendiente	Adimensional	Analítico	Análisis documental
			Parámetros integrales de lluvia	Reflectividad	dB	Analítico	Análisis documental
				Intensidad de lluvia	mm/h	Analítico	Análisis documental
				Concentración de gotas	$m^{-3}.mm^{-1}$	Analítico	Análisis documental
				Contenido de agua líquida	g/m^3	Analítico	Análisis documental
Variable dependiente: Eventos de lluvia	Proceso que busca clasificar y comprender los eventos de lluvia; así mismo, permite la identificación los tipos de hidrometeoro presentes (Bringi et al. 2003; Houze 2014; Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021).	Los eventos de lluvia se clasifican en estratiformes y convectivos, que se validan mediante el espectro de gotas $Y = f(y_1, y_2)$	Clasificación de los eventos de lluvia	Tasa de lluvia y desviación estándar	Estratiforme, convectivo y mixto	Analítico	Análisis documental
				Mediciones de DSD	Estratiforme, convectivo y mixto	Analítico	Análisis documental
			Espectro de gotas	Diámetro	mm.	Analítico	Análisis documental
				Velocidad de caída	Procesamiento y análisis estadístico	Analítico	Análisis documental
				Concentración de gotas	Procesamiento y análisis estadístico	Analítico	Análisis documental

IV METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1 Diseño metodológico.

El diseño de investigación es de nivel no experimental, ya que no se tiene injerencia en el desarrollo de los eventos lluvia ni en sus propiedades, debido a que es un fenómeno natural. La Figura 7, muestra el procedimiento del diseño de la investigación.

El tipo de la investigación es de carácter exploratorio descriptivo, debido a que está en función al análisis del espectro de gotas de lluvia, y como a partir de estas mediciones se detalla mejor las características de los eventos de lluvia, proporcionando información más precisa y eficiente.

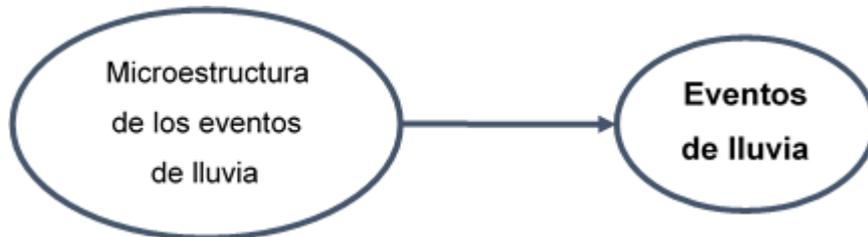


Figura 7. Relación de variables.

Los datos se recolectaron a través de 2 pluviómetros y 2 disdrómetros. El pluviómetro realizó las mediciones de precipitación acumulada de cada minuto. En el caso del disdrómetro las mediciones son almacenados dentro de una matriz de 32x32 intervalos, que relaciona el diámetro y la velocidad de caída de la gota, en intervalos de tiempo de un minuto.

La Figura 8 se esquematiza el tratamiento efectuado a los datos desde su medición, hasta el cálculo de los indicadores y criterios para la caracterización de los eventos de lluvia.

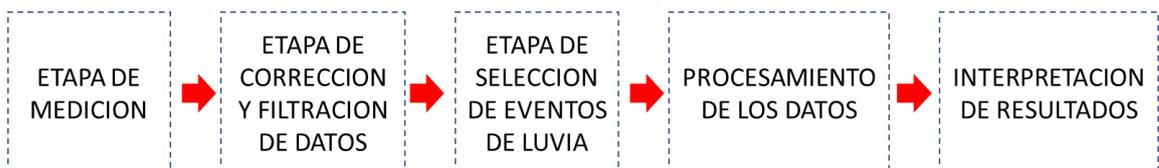


Figura 8. Diseño de la Investigación para la caracterización de los eventos de lluvia.

4.2 Método de investigación.

La figura 9 muestra el diseño metodológico detallado del todo proceso de la investigación, donde se encuentran incorporados los objetivos secundarios con sus respectivas medidas estadísticas, con la finalidad de llegar a la caracterización de los eventos de lluvia.

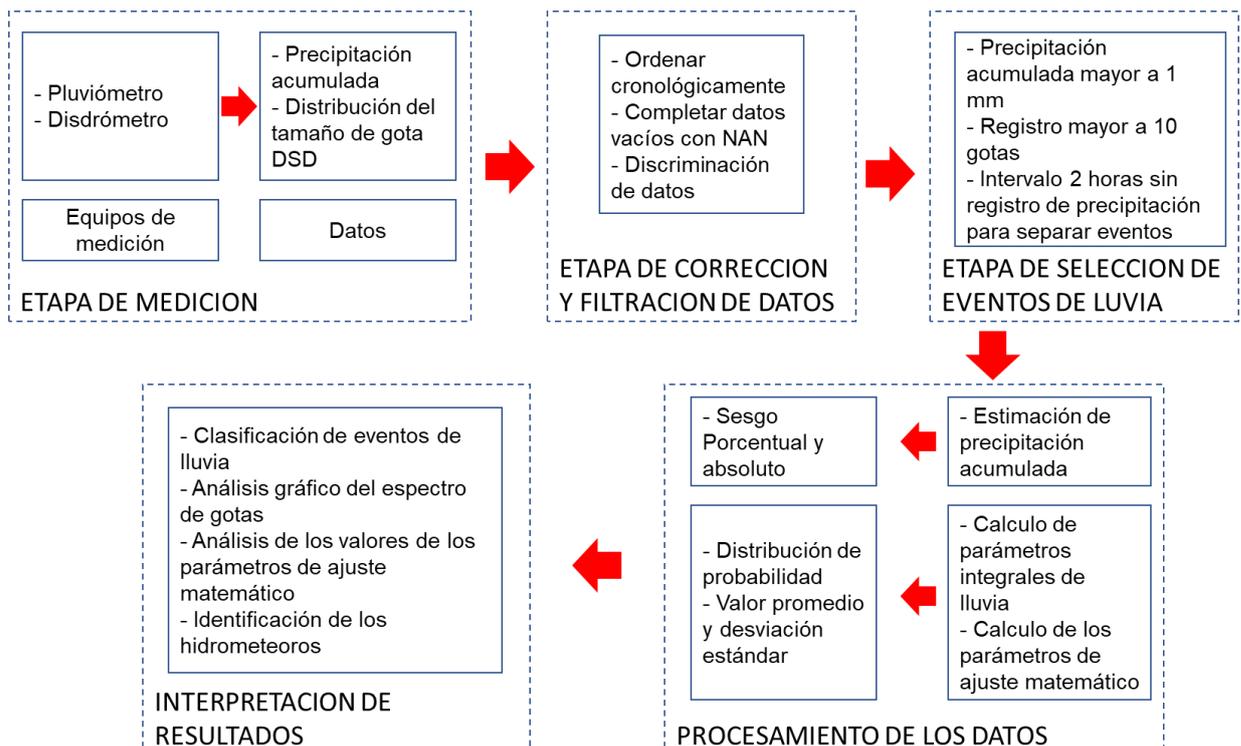


Figura 9. Esquema detallado del diseño de investigación aplicado.

4.2.1 Metodología para el objetivo específico: Estimar los parámetros integrales de lluvia.

La metodología para la estimación de los parámetros integrales de lluvia se muestra en la figura 10. Para ello se emplean ecuaciones descritas en el marco conceptual, las cuales se encuentran en función a las mediciones de los

disdrómetros, que contiene una matriz con intervalos de tamaño y velocidad de caída de las gotas de lluvia.

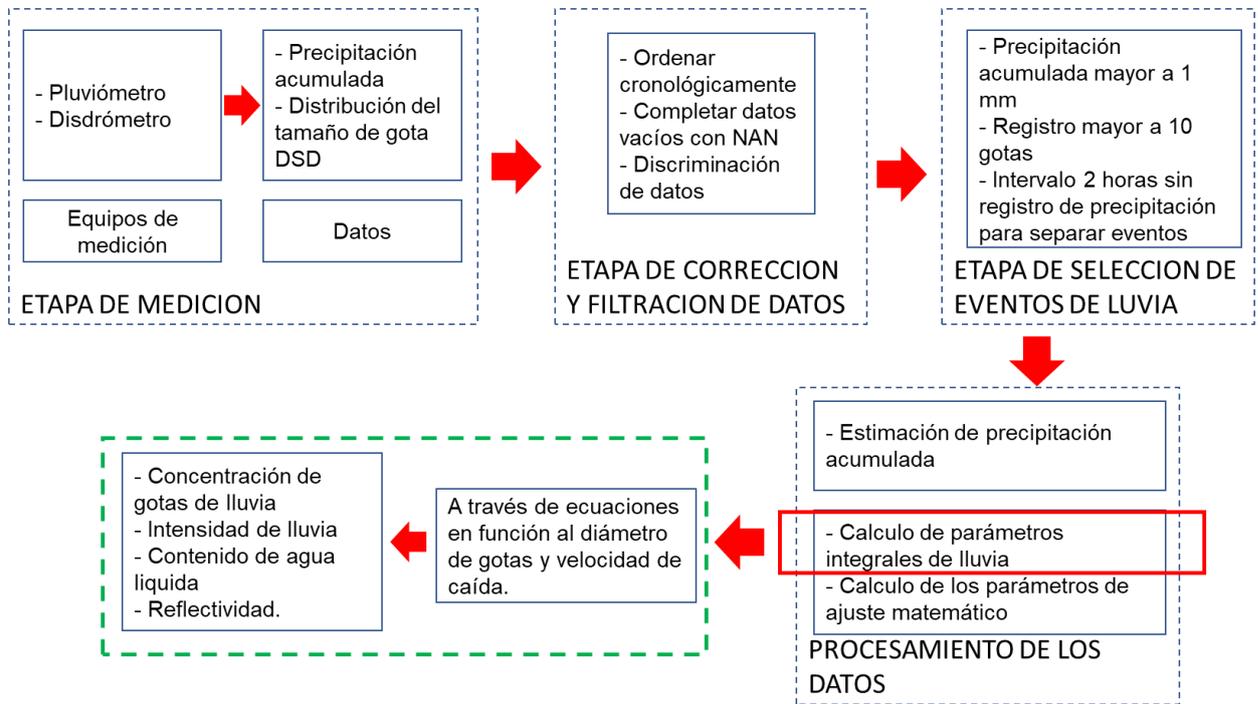


Figura 10. Proceso de estimación de los parámetros integrales de lluvia.

4.2.2 Metodología para el objetivo específico: Determinar los valores de los parámetros del ajuste matemático gamma aplicado a la DSD

La figura 11 muestra, muestra el proceso para el cálculo de los parámetros del ajuste matemático gamma, para lo cual se empleará el método del momento (segundo, tercer y cuarto momento) en su tabulación.

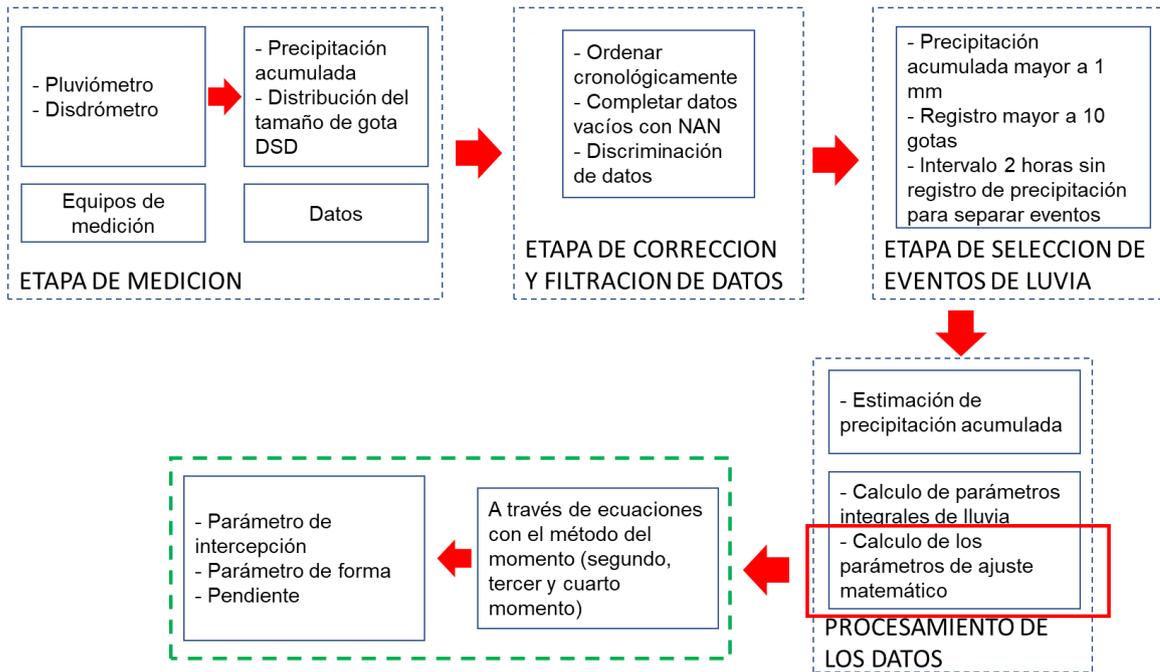


Figura 11. Estimación de los parámetros del ajuste matemático gamma

4.2.3 Metodología para el objetivo específico: Clasificar los eventos de la lluvia.

La Figura 12 describe el proceso de clasificación de los eventos de lluvia, para ello se empleó los criterios de lluvia convectiva, estratiforme y mixta; basándose en la intensidad de lluvia y el tamaño de las gotas de lluvia.

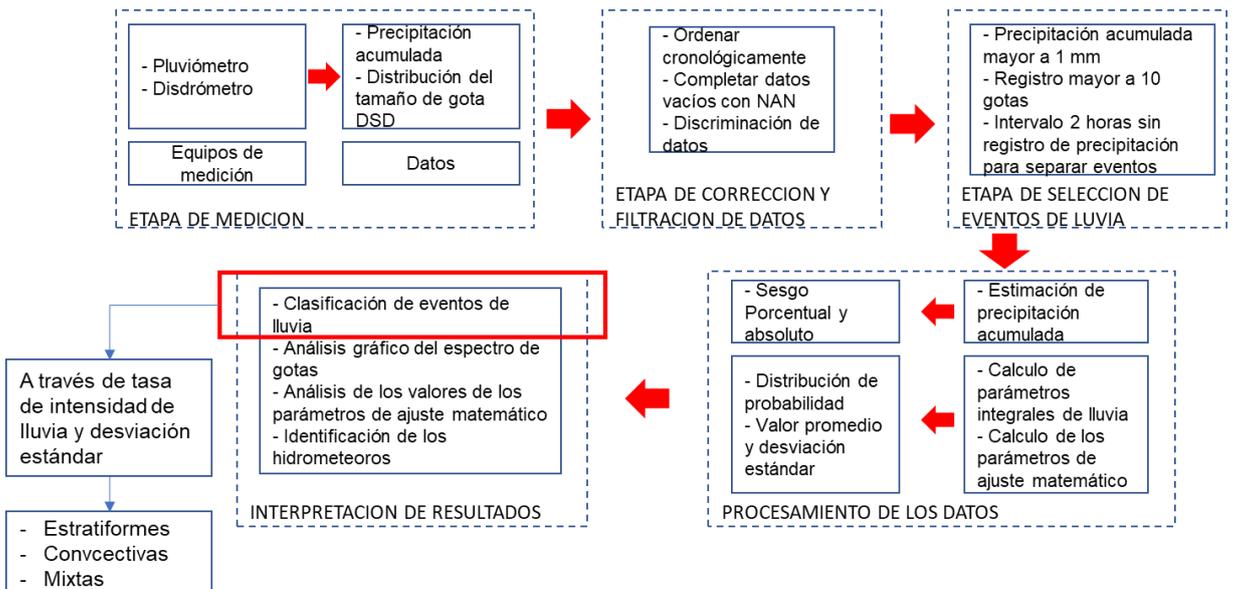


Figura 12. Clasificación de los eventos de lluvia.

4.2.4 Metodología para el objetivo específico: Determinar el cambio del espectro de gotas de lluvia.

La metodología para evaluar el espectro de gotas de los eventos de lluvia se muestra en la figura 13, donde a través de la representación gráfica de la concentración numérica de gotas y la velocidad de caída respecto al diámetro de la gota, se obtuvo información importante sobre el evento de lluvia.



Figura 13. Representación gráfica de los espectros de gotas.

4.3 Población y muestra.

La unidad de análisis es la microestructura de la gota de lluvia

- **Población**

El total de eventos de lluvias medidos por los dos disdrómetros ópticos a partir de su instalación del mes de agosto del 2018 hasta el mes de abril del 2020, para la ubicación del Observatorio de Huancayo, que se encuentra en la parte central del valle del río Mantaro.

- **Muestra**

La muestra tomada corresponde a eventos donde el acumulado total de lluvia sea igual o mayor a 1mm, así mismo, la pérdida de datos (minutos con lluvia) en el evento sea inferior al 5%. Para determinar la muestra se ha considerado como referencia las investigaciones de Chen, Yang, Pu (2013) y Villalobos et al. (2019).

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado.

El área de estudio del proyecto corresponde a las instalaciones del Observatorio de Huancayo (Figura 14), en las coordenadas geográficas 12°02'18"S y 75°19'22"W, a una altitud de 3350 m.s.n.m. Con un área de 106957.123 m². Se encuentra en la parte central de la cuenca del río Mantaro, en la parte baja de las subcuencas de los ríos Shullcas, Cunas y Achamayo.

La ruta de acceso es a través de paralela de la carreta Huancayo – Cañete Yauyos, que une los pueblos de Huayao y Pilcomayo; el Observatorio se encuentra alrededor de la división de la vía, para los poblados de Manzanares y Huayao. El acceso se puede hacer por movilidad particular o mediante transporte público (servicio de taxi colectivo) que tiene como ruta a los poblados mencionados.

El periodo de evaluación comprende el mes de agosto del 2018 al mes de abril del año 2020.

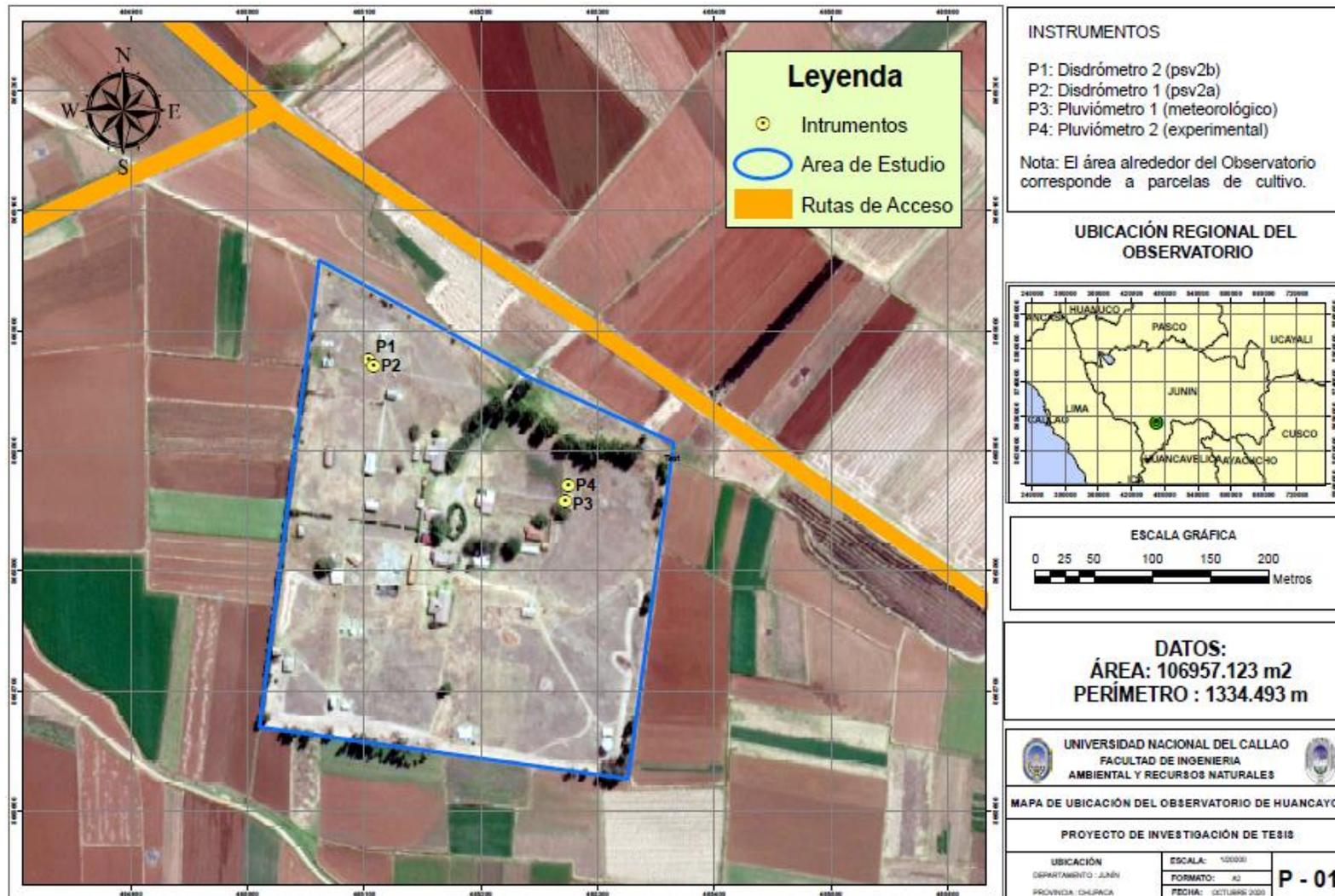


Figura 14. Mapa de Localización del Observatorio de Huancayo.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1 Técnicas de investigación

- **Análisis documental**

Las mediciones de DSD y precipitación acumulada registrada por los equipos empleados se efectúan en intervalos de 1 minuto; estas mediciones son almacenadas en ficheros de tipo texto (.txt). Cada pluviómetro almacena sus mediciones en un solo archivo, donde contiene fecha de medición (año/mes/día/hora/minuto) y precipitación en mm acumulada para un minuto. En caso de los disdrómetros Parsivel se genera un fichero *.txt cada minuto con pesos de 5,209 bytes y 5,208 bytes para el psv2a y psv2b respectivamente, cada fichero contiene una serie de códigos numéricos que representa una variable medida, en caso de la investigación nos centraremos en las variables de tiempo, intensidad de lluvia, concentración de gotas, velocidad de caída de las gotas y diámetro de las gotas.

Una vez que se genera los archivos de las mediciones, son transmitidas a través de señal de internet a la base de datos del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), perteneciente a Instituto Geofísico del Perú (IGP); donde se encuentran en diferentes directorios dependiendo del tipo dato.

La técnica empleada para la investigación corresponde al análisis documental de estos ficheros generados por los equipos. Por motivos de obtener los datos originales, tal como salen del equipo sin ningún pre procesamiento, se solicitó mediante correo electrónico al área encargada de estos equipos, acceso a la base de datos para realizar la descarga de los ficheros. La Figura 15 muestra el proceso desde la medición de los datos hasta la descarga de los ficheros por parte del solicitante.

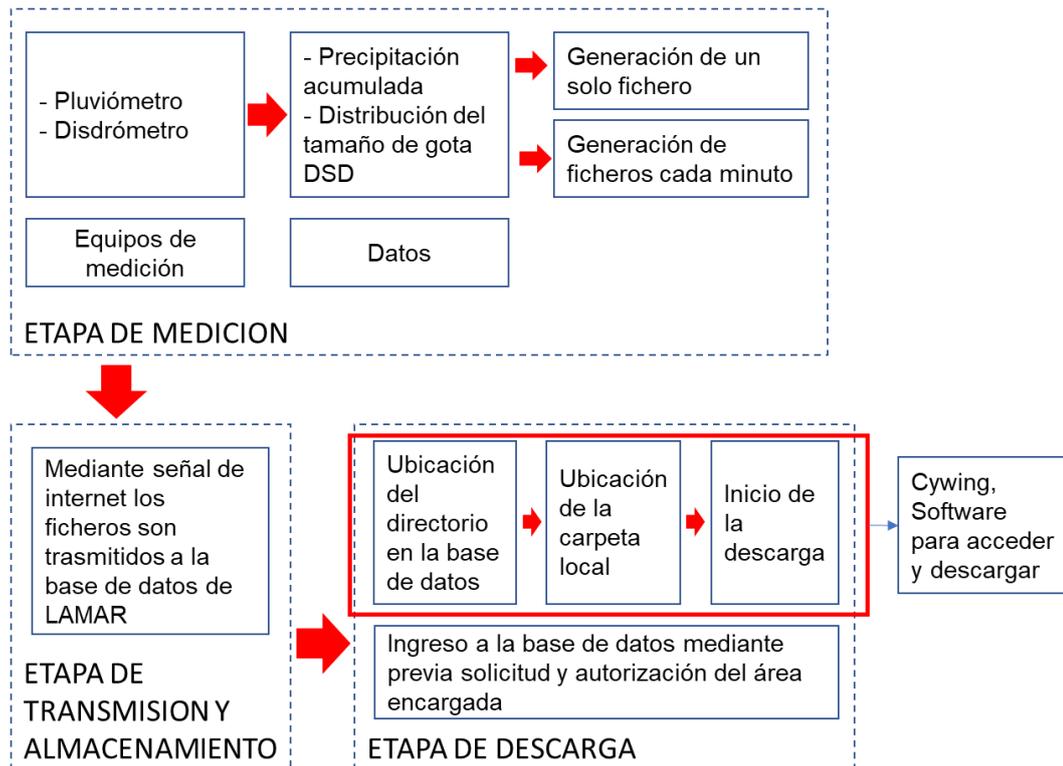


Figura 15. *Proceso de acceso y descarga de datos.*

4.5.2 Instrumentos de recolección de datos

- **Reporte de datos**

Una vez realizada la descarga de los datos, estos serán esquematizados en una matriz por cada equipo de medición. El Anexo II detalla la estructura empleada, donde contempla desde mediciones desde 00:00:00 horas del día 01 de agosto del 2018 hasta 23:59:00 del día 30 de abril del 2020.

4.5.3 Equipos de Medición

Para la recolección de datos, se empleó 2 tipos de medidores de precipitación: pluviómetros convencional y disdrómetros ópticos (Tabla 7). Así mismo se contempla reporte de datos disponible en la bibliografía.

Tabla 7. Equipos utilizados

Instrumentos	Descripción
Pluviómetros convencional	Equipo para medir total de lluvia acumulado en un intervalo de tiempo.
Disdrómetro óptico	Equipo para medir velocidad de caída y tamaño de los hidrometeoros

Estos instrumentos pertenecen a Laboratorio de microfísica atmosférica y radiación –LAMAR, el cual se encuentra funcionando dentro del Observatorio de Huancayo, que a su vez está a cargo del Sub Área de Ciencias de la Atmosfera e Hidrosfera - SCAH, todo ello perteneciente al Instituto Geofísico del Perú - IGP.

La calibración y validación de los datos de los pluviómetros se encierra a cargo del personal de investigación del IGP, responsable de estos equipos (Anexo III). Estas mediciones son procesadas y publicadas en la plataforma web de LAMAR (<http://met.igp.gob.pe/lamar/>).

En caso de los disdrómetros, fueron adquiridos bajo el Proyecto de Atracción de Investigación Científica – MAGNET, financiado por FONDECYT. La instalación y calibración estuvo a cargo de la empresa representante de OTT HydroMet en el Perú. El mantenimiento de los equipos está a cargo del personal investigador destinado a esta área, bajo la asesoría de la empresa representante de OTT HydroMet.

Las mediciones de los disdrómetros se publicaron a través del artículo científico “Dataset on raindrop size distribution, raindrop fall velocity and precipitation data measured by disdrometers and rain gauges over Peruvian central Andes (12.0°S)” (<https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105215>), elaborado por personal del IGP, donde se detalla el procesamiento y tratamiento que reciben estos datos antes de ser publicados (Valdivia, Contreras, et al. 2020); todo esto se detalla en el Anexo IV.

a. Pluviómetro convencional

Villón (2009) determina que la medición con el pluviómetro convencional consta de un recipiente cilíndrico, con dimensiones aproximadas de 20 cm de diámetro y 60 cm de alto. En la parte superior llevan un embudo receptor encargado de recolectar la lluvia y llevarla a una probeta. La medición se realiza a la altura de lluvia almacenada, donde cada centímetro de la probeta corresponde a un milímetro de altura de lluvia. La Figura 16 muestra un esquema referencial del interior de un pluviómetro.



Figura 16. Pluviómetro Estándar. Tomada de «Pluviómetro Stratus 280mm de capacidad», por Raig, 2022, p. 14.

b. Disdrómetro óptico

Según Löffler-Mang y Joss (2000) el fundamento del disdrómetro consiste en un sensor óptico, el cual produce una lámina de luz horizontal en 3 dimensiones fijas ($dx - dy - dz$). La lámina de luz es producida por un diodo láser de 780 nm con una potencia de 3 mW y el receptor se enfoca en un solo fotodiodo. La ausencia de caída de hidrometeoros produce que el receptor emita una señal de 5 voltios en la salida del sensor; cuando una partícula cruza la lámina de luz, se observa una disminución en el voltaje, que depende linealmente de la fracción de luz bloqueada (Figura 17). La amplitud de la desviación de la señal proporciona el tamaño de la partícula y la duración de la señal permite el cálculo de la velocidad de caída de las partículas.

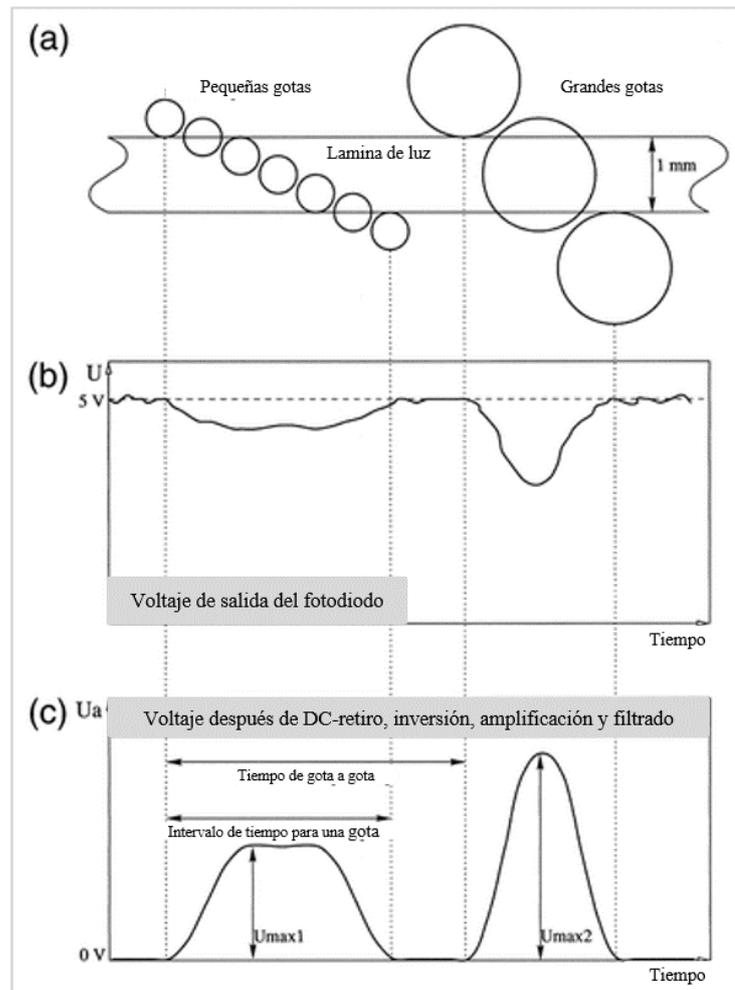


Figura 17. Señales de Partículas Cayendo a Través de la Lámina de Luz. a) Partículas pequeñas y grandes, (b) señal bruta del sensor, y (c) señal invertida y amplificada después del umbral para fines de medición. Tomada de «An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors», por Löffler-Mang, Joss 2000, p. 131.

- **OTT Parsivel²**

Es un disdrómetro óptico de medición completa y confiable para todo tipo de precipitación, elaborado por PMTech AG (Pfinztal, Alemania). El Observatorio de Huancayo, posee dos de estos instrumentos que se encuentran correctamente instalados (Figura 18), que fueron adquiridos de la empresa OTT HydroMet.

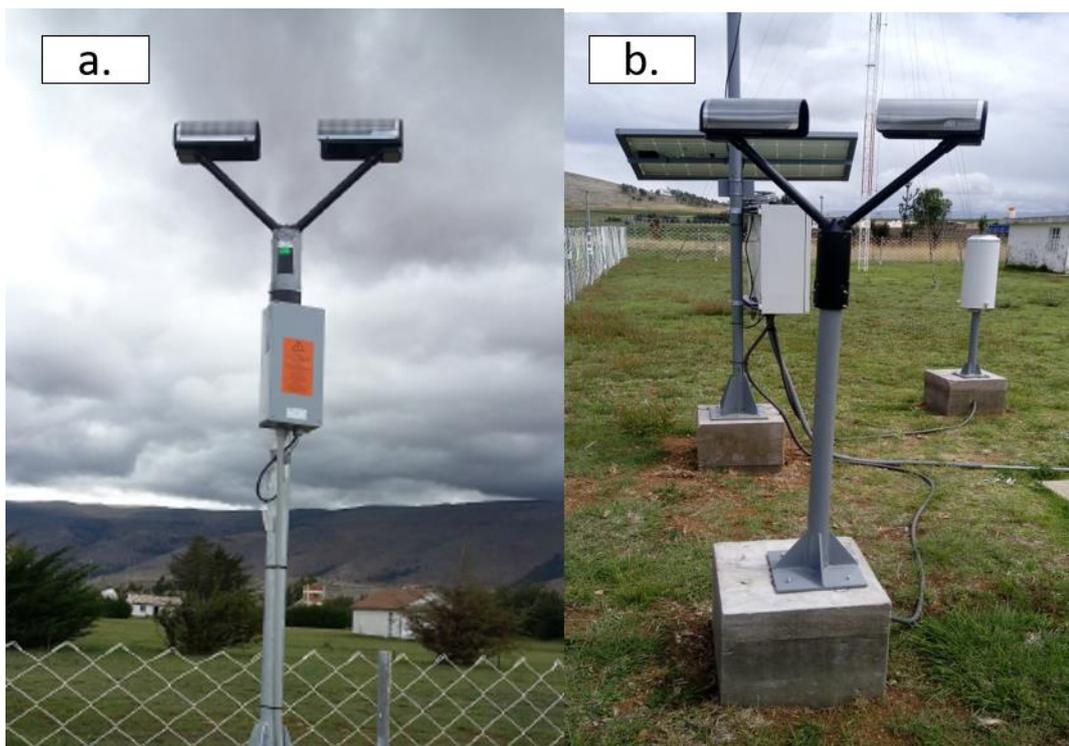


Figura 18. Disdrómetros instalados en el Observatorio Huancayo – IGP. a) Primer disdrómetro óptico instalado en el año 2017 (psv2a). b) Segundo disdrómetro instalado en el año 2018 (psv2b), 2020.

De acuerdo a las especificaciones técnicas OTT Hydromet (2016), posee un rango de medición para el tamaño de partículas líquidas entre 0.2 y 8 mm; en caso de partículas sólidas varía entre 0.2 y 25 mm; y para las velocidades de caída el rango va desde 0.2 a 20 m/s. Clasifica la precipitación en categorías (llovizna, llovizna con lluvia, lluvia, lluvia, llovizna con nieve, nieve, granos de nieve, granizo suave y granizo), de acuerdo al tipo de hidrometeoro predominante en el evento. La lamina de e luz es de 180 mm de largo, 30 mm de ancho y 1 mm de alto. Los tamaños de los hidrometeoros se estiman a partir de la atenuación de la señal, mientras que la velocidad de caída se calcula de la duración del hidrometeoro dentro del rayo láser.

Chen, et al (2013) mencionan el área nominal de muestreo del equipo es de 54 cm², con área efectiva sujeta al tipo de hidrometeoro observado, para reducir la probabilidad de que se detecten múltiples hidrometeoros al mismo tiempo. Tokay et al. (2014) refieren así mismo, a que se debe tener en cuenta la presencia de partículas secundarias producto de las salpicaduras y de la acción del viento, por

ello, se eliminan partículas sospechosas cuyas velocidades de caída fueran del $\pm 50\%$ del rango general.

Vinson et al. (2005) precisan a salida de mediciones de la DSD por este equipo, se encuentra en matriz de 32 x 32 que contiene el número de gotas caídas en comparación con la velocidad de caída; y es partir de estas observaciones e puede estimar el espectro del tamaño de gotas en el evento de lluvia.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Una vez hecha la descarga de los ficheros correspondiente a los meses de interés para el estudio; el procesamiento de estos datos es a través de los softwares MATLAB y MS Excel.

4.6.1 Análisis descriptivo de datos

La parte descriptiva corresponde a identificar y determinar los eventos de lluvia, estimar los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático gamma. Toda esta información calculada está representada en tablas y gráficos.

Una vez tabulado los valores de los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático gamma, se aplica la distribución de probabilidad y distribución acumulada, con la finalidad de observar el rango de concentración de los valores. Así mismo, se aplica el promedio y la desviación estándar a estos valores en cada equipo.

Para la clasificación se recurre a medidas estadísticas del promedio y desviación estándar de la intensidad de lluvia en cada evento. Esta clasificación se apoya en la representación gráfica de la velocidad de caída de gotas y diámetro de gotas respecto a su concentración.

4.6.2 Uso de software

a. Uso de MATLAB

El procesamiento a través de MATLAB está en base a una serie de scripts, que engloban comandos y funciones, muchos de los cuales se pueden encontrar en la librería de la plataforma web github.com (Valdivia 2022) dedicados al procesamiento de datos de disdrómetros OTT Parsivel². La secuencia de los scripts inicia con la lectura de los datos, posterior a ello se aplica un control de calidad (verificación de datos perdidos y que tengan secuencia cronológica), para luego segmentar la data en eventos de lluvia y por último realizar la tabulación de los parámetros requeridos, la clasificación y representación gráfica de los eventos. La Figura 19 esquematiza el proceso realizado por los scripts mencionados.

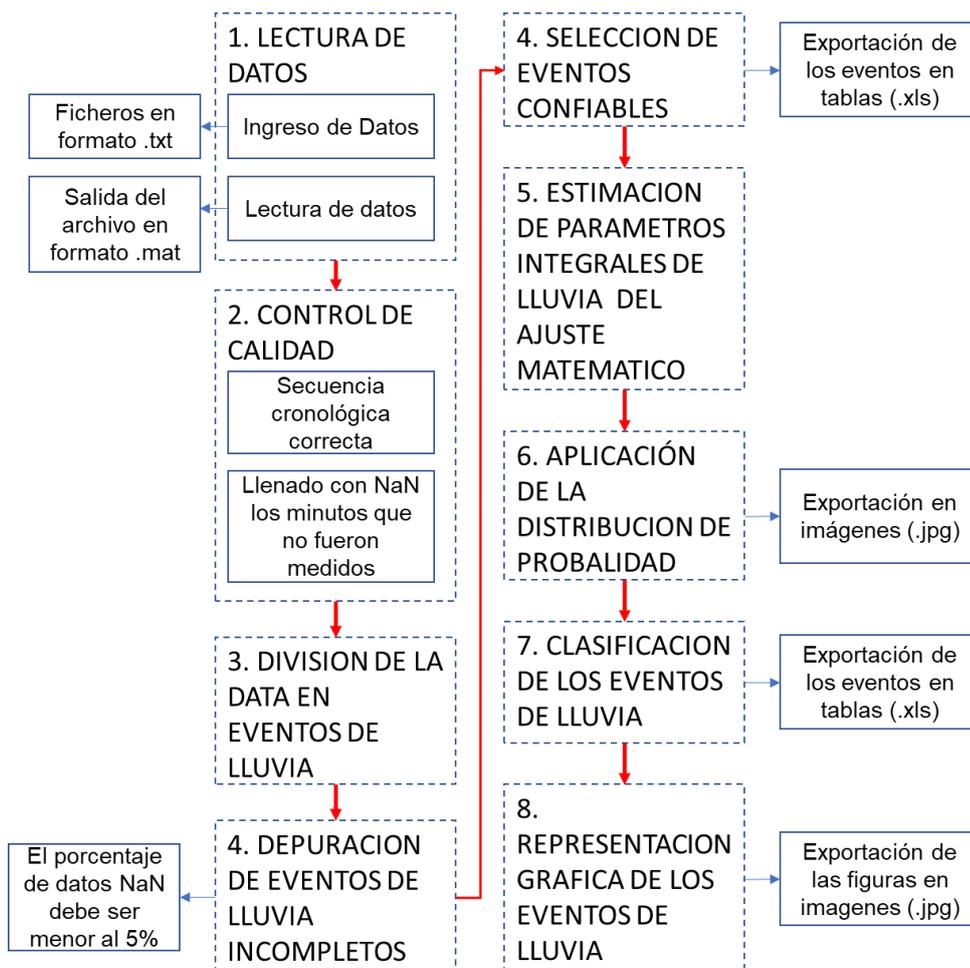


Figura 19. Esquema de procesamiento de los scripts en MATLAB.

b. Uso de MS Excel

Las hojas de cálculo de MS Excel fueron utilizadas para la exportar las tablas procesadas en MATLAB, para mejorar su edición e incorporación al informe final de la investigación.

4.7 Aspectos Éticos en Investigación

En conformidad al Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú, se toma en cuenta los aspectos detallados a continuación, con la finalidad de no incurrir en alguna falta u omisión.

1. Durante el proceso de recolección de datos no se generó un impacto ambiental negativo.
2. Los datos obtenidos no sufrieron modificación alguna, ya sea omitiendo, eliminando o modificándose con el fin de tergiversar los resultados hacia el logro de un objetivo.
3. En la redacción del informe de investigación se evitó el plagio respetando la propiedad intelectual, en consecuencia, se citó debidamente los trabajos de investigación pertenecientes a otros autores.
4. Los datos descargados, serán almacenados en el disco duro de la computadora de los autores de este trabajo, que posteriormente serán eliminados al cabo de 10 años; así mismo, el traspaso de estos datos a terceras personas, será previa coordinación con el responsable del Instituto Geofísico del Perú (IGP).
5. Los datos utilizados son de acceso libre y están disponibles en la plataforma del IGP, y en caso de acceder a los datos en bruto, será mediante autorización de un personal de dicha institución.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

5.1.1 Eventos de lluvia

Los equipos empleados en el estudio recibieron la siguiente codificación, para mejorar su especificación e identificación. El primer equipo fue denominado como psv2a, el cual corresponde al primer disdrómetro óptico instalado en el Observatorio. El segundo equipo fue denominado como psv2b, correspondiente al segundo disdrómetro óptico instalado en el Observatorio. En caso de los pluviómetros fueron codificados en base a su ubicación, siendo el pluviómetro Exp en referencia al laboratorio experimental; y el otro pluviómetro como Met, en referencia a la estación meteorológica.

En la parte del procesamiento que corresponde a la segmentación de la data en eventos de lluvia, se obtuvieron de un total de 116 eventos registrados por el psv2a y 145 eventos por el psv2b, todos ellos con una precipitación acumulada mayor e igual a 1 mm de lluvia. La variación que se observa en el número de eventos registrados entre un equipo y el otro, se debe básicamente a inconvenientes técnicos en el momento de la medición, donde se generan minutos sin mediciones, los cuales son depurados durante el proceso de control de calidad, esto lleva a que un equipo pueda registrar un evento y el otro no. La Tabla 8 y Tabla 9 describen los eventos registrados por el psv2a y psv2b respectivamente, donde se detallan el periodo horario de ocurrencia, la fecha, el total de la precipitación (mm) en todo el evento y el máximo de intensidad de lluvia (mm/h) en el evento.

Tabla 8 Eventos de lluvia registrados por el psv2a

Fecha	Inicio	Finalización	Duración (min)	Intensidad máxima (mm/h)	Total de precipitación (mm)
01-08-2018	17:38:00	18:53:00	75	2.49	6.72
05-08-2018	16:58:00	17:27:00	29	1.19	13.84
07-08-2018	14:50:00	16:11:00	81	4.04	52.58
08-08-2018	16:13:00	23:14:00	421	2.28	4.02
15-09-2018	16:08:00	17:41:00	93	24.05	96.00
24-09-2018	16:56:00	20:16:00	200	6.62	16.56

27-09-2018	16:06:00	17:08:00	62	2.67	24.01
03-10-2018	14:01:00	14:16:00	15	3.32	52.08
03-10-2018	22:08:00	23:24:00	76	2.72	12.20
04-10-2018 05-10-2018	19:59:00	01:32:00	333	1.28	1.04
07-10-2018	08:18:00	09:17:00	59	2.83	13.98
13-10-2018	15:48:00	19:09:00	201	1.47	10.77
14-10-2018	00:46:00	02:27:00	101	4.12	9.81
14-10-2018	11:59:00	19:29:00	450	1.52	3.69
15-10-2018	17:33:00	20:49:00	196	2.54	14.42
16-10-2018	17:34:00	18:17:00	43	1.09	10.81
17-10-2018 18-10-2018	18:26:00	00:06:00	340	4.20	7.57
15-11-2018	01:05:00	04:06:00	181	1.78	6.33
15-11-2018	17:58:00	21:39:00	221	11.47	90.60
19-11-2018	14:28:00	15:10:00	42	1.15	6.80
19-11-2018	18:17:00	22:55:00	278	8.27	11.45
26-11-2018	13:55:00	15:44:00	109	2.16	7.62
16-12-2018 17-12-2018	23:27:00	07:44:00	497	16.29	10.63
17-12-2018	17:26:00	19:39:00	133	1.59	1.77
18-12-2018	17:19:00	21:59:00	280	5.65	4.38
20-12-2018	15:18:00	18:21:00	183	4.85	6.86
24-12-2018	17:53:00	21:00:00	187	2.47	2.99
31-12-2018	16:21:00	18:11:00	110	2.09	13.17
15-01-2019 16-01-2019	21:21:00	04:51:00	450	4.65	6.01
16-01-2019 17-01-2019	19:17:00	08:54:00	817	8.14	4.09
18-01-2019	04:51:00	18:40:00	829	6.07	6.07
19-01-2019	20:16:00	21:28:00	72	1.79	5.71
21-01-2019	02:47:00	08:13:00	326	2.19	2.62
21-01-2019	19:21:00	23:10:00	229	1.48	3.04
22-01-2019 23-01-2019	18:21:00	01:15:00	414	3.26	7.81
23-01-2019	18:21:00	23:50:00	329	7.49	8.98
05-02-2019	11:15:00	14:35:00	200	2.60	9.02
05-02-2019	19:08:00	22:15:00	187	1.80	8.53
06-02-2019 07-02-2019	20:54:00	01:54:00	300	7.68	4.45
07-02-2019	16:08:00	18:42:00	154	1.69	2.15
09-02-2019	17:35:00	20:33:00	178	1.31	2.23
10-02-2019	17:06:00	23:02:00	356	5.87	5.63
11-02-2019	08:58:00	12:11:00	193	3.05	3.16
11-02-2019 12-02-2019	20:05:00	00:52:00	287	4.19	7.03
12-02-2019 13-02-2019	18:57:00	03:59:00	542	6.31	4.23
13-02-2019	20:16:00	23:19:00	183	1.28	2.33
14-02-2019	16:47:00	19:29:00	162	2.83	7.20
15-02-2019	14:35:00	18:23:00	228	2.11	1.93
19-02-2019 20-02-2019	19:02:00	06:01:00	659	8.89	4.50
25-02-2019	15:56:00	20:20:00	264	3.31	24.99
26-02-2019	17:04:00	19:07:00	123	1.34	3.09
04-03-2019 05-03-2019	23:10:00	03:33:00	263	4.17	5.31
06-03-2019	13:33:00	21:59:00	506	2.88	8.94

07-03-2019	00:26:00	04:11:00	225	1.60	1.39
07-03-2019	14:26:00	15:19:00	53	6.17	43.28
07-03-2019	19:44:00	21:47:00	123	2.95	14.03
08-03-2019	20:17:00	21:22:00	65	1.09	2.83
09-03-2019	04:11:00	05:44:00	93	3.00	12.20
09-03-2019 10-03-2019	20:38:00	01:24:00	286	1.10	1.29
10-03-2019 11-03-2019	18:15:00	04:44:00	629	11.78	26.51
12-03-2019	19:13:00	21:14:00	121	1.54	9.16
14-03-2019 15-03-2019	20:19:00	04:27:00	488	9.70	7.49
15-03-2019	17:04:00	19:37:00	153	1.22	2.64
18-03-2019	17:13:00	21:31:00	258	5.55	5.66
21-03-2019 22-03-2019	21:36:00	03:31:00	355	2.80	2.51
22-03-2019	18:15:00	22:03:00	228	2.12	5.46
23-03-2019 24-03-2019	21:18:00	00:33:00	195	4.46	5.62
24-03-2019	18:53:00	20:08:00	75	1.11	10.58
26-03-2019	18:30:00	18:37:00	7	1.31	24.94
27-03-2019 28-03-2019	22:49:00	07:47:00	538	2.66	5.35
28-03-2019	09:55:00	19:30:00	575	2.16	4.00
29-03-2019	07:46:00	11:21:00	215	3.09	3.97
02-04-2019	11:14:00	14:28:00	194	5.37	32.76
02-04-2019	22:16:00	23:17:00	61	1.05	4.08
03-04-2019	14:53:00	15:17:00	24	3.54	37.75
10-04-2019	14:36:00	15:11:00	35	4.29	58.07
13-04-2019	17:07:00	18:18:00	71	3.25	33.27
17-04-2019	17:02:00	20:02:00	180	5.92	52.52
29-04-2019	18:21:00	21:09:00	168	1.63	3.74
30-04-2019	17:13:00	18:55:00	102	2.49	19.56
06-10-2019	15:11:00	16:46:00	95	10.37	103.37
17-10-2019	05:42:00	10:05:00	263	1.71	2.91
17-10-2019	19:13:00	20:01:00	48	1.06	9.85
18-10-2019	18:55:00	21:45:00	170	2.23	13.87
18-11-2019	18:17:00	20:21:00	124	1.85	4.87
18-11-2019 19-11-2019	22:35:00	00:17:00	102	1.07	2.54
21-11-2019	16:52:00	17:06:00	14	1.20	47.74
10-12-2019	17:40:00	18:22:00	42	1.82	28.57
10-12-2019 11-12-2019	23:54:00	01:10:00	76	1.32	5.68
12-12-2019	13:49:00	16:35:00	166	1.45	7.08
13-12-2019 14-12-2019	17:23:00	02:11:00	528	5.01	11.43
15-12-2019	14:48:00	15:14:00	26	1.08	7.82
15-12-2019	21:13:00	23:04:00	111	2.33	6.72
02-01-2020	15:05:00	16:49:00	104	1.01	2.38
02-01-2020 03-01-2020	20:54:00	01:50:00	296	1.31	3.03
14-01-2020 15-01-2020	20:43:00	00:48:00	245	2.42	6.89
28-01-2020	15:11:00	17:56:00	165	1.38	5.50
30-01-2020	15:59:00	19:07:00	188	4.76	22.01
02-02-2020 03-02-2020	17:29:00	09:19:00	950	8.72	4.76
05-02-2020 06-02-2020	19:21:00	07:18:00	717	5.46	4.14

06-02-2020 07-02-2020	18:56:00	04:50:00	594	6.30	4.27
07-02-2020	19:32:00	22:21:00	169	4.85	31.27
08-02-2020	14:51:00	20:12:00	321	2.13	2.85
13-02-2020	20:03:00	22:01:00	118	1.82	3.22
11-03-2020	19:09:00	21:34:00	145	1.53	5.08
12-03-2020	13:18:00	16:07:00	169	2.63	16.94
13-03-2020 14-03-2020	21:25:00	06:19:00	534	8.24	12.49
18-03-2020	19:44:00	22:26:00	162	2.22	6.87
19-03-2020 20-03-2020	18:31:00	00:06:00	335	1.46	1.96
21-03-2020 22-03-2020	17:28:00	00:16:00	408	2.13	3.20
22-03-2020	11:32:00	14:14:00	162	1.75	27.32
28-03-2020	15:02:00	20:23:00	321	6.38	10.48
29-03-2020 30-03-2020	21:02:00	15:11:00	1089	10.13	3.58
01-04-2020	02:18:00	15:16:00	778	2.09	2.00
18-04-2020	00:51:00	02:28:00	97	2.64	19.90
18-04-2020	13:49:00	18:41:00	292	1.58	2.01

Tabla 9 Eventos de lluvia registrados por el psv2b

Fecha	Inicio	Finalización	Duración (min)	Intensidad máxima (mm/h)	Total de precipitación (mm)
07-08-2018	14:49:00	16:09:00	80	4.42	45.65
08-08-2018	16:12:00	23:13:00	421	1.89	2.96
15-09-2018	16:07:00	17:40:00	93	19.74	88.19
16-09-2018	15:31:00	17:40:00	129	3.08	20.68
22-09-2018	17:44:00	20:58:00	194	1.70	4.85
24-09-2018	16:54:00	20:04:00	190	2.75	9.06
29-09-2018	17:32:00	18:19:00	47	3.71	80.05
07-10-2018	15:36:00	18:05:00	149	1.10	8.96
15-11-2018	01:04:00	04:02:00	178	1.55	6.40
15-11-2018	17:56:00	21:38:00	222	11.77	72.07
19-11-2018	18:17:00	22:54:00	277	7.18	11.32
21-11-2018	18:11:00	19:28:00	77	4.58	36.91
26-11-2018	13:54:00	15:43:00	109	2.03	8.87
14-12-2018	18:34:00	20:09:00	95	3.03	29.34
16-12-2018 17-12-2018	23:26:00	07:43:00	497	13.37	12.66
17-12-2018	17:25:00	19:39:00	134	1.36	1.72
18-12-2018	17:18:00	21:58:00	280	4.66	4.80
20-12-2018	15:20:00	18:20:00	180	4.29	7.45
24-12-2018	17:52:00	20:59:00	187	2.36	3.11
31-12-2018	16:21:00	18:11:00	110	3.29	21.43
04-01-2019	16:21:00	18:42:00	141	2.07	10.71
10-01-2019 11-01-2019	21:03:00	02:29:00	326	2.52	4.25
11-01-2019	20:34:00	23:54:00	200	1.02	3.81
12-01-2019 13-01-2019	15:22:00	02:07:00	645	2.86	6.48
13-01-2019 14-01-2019	18:22:00	01:28:00	426	10.00	4.36

15-01-2019 16-01-2019	21:20:00	04:47:00	447	4.19	6.82
16-01-2019 17-01-2019	19:18:00	08:54:00	816	7.07	4.82
18-01-2019	04:50:00	18:39:00	829	5.13	5.92
19-01-2019	20:13:00	21:26:00	73	1.56	5.85
21-01-2019	02:48:00	08:12:00	324	1.75	2.20
21-01-2019	19:33:00	23:10:00	217	1.25	2.40
22-01-2019 23-01-2019	18:20:00	01:15:00	415	3.05	9.51
23-01-2019	17:56:00	23:49:00	353	6.78	8.87
24-01-2019	17:10:00	19:50:00	160	5.71	23.02
24-01-2019 25-01-2019	21:59:00	03:58:00	359	2.91	3.89
26-01-2019 27-01-2019	21:09:00	01:38:00	269	3.32	14.36
27-01-2019	12:57:00	23:59:00	662	5.65	10.48
28-01-2019	17:28:00	18:47:00	79	6.01	17.00
29-01-2019 30-01-2019	16:26:00	06:47:00	861	17.85	5.62
30-01-2019 31-01-2019	19:39:00	03:14:00	455	6.93	16.21
31-01-2019	12:20:00	20:34:00	494	1.05	4.17
01-02-2019	17:01:00	19:32:00	151	1.04	2.98
02-02-2019	17:13:00	20:58:00	225	4.98	15.19
03-02-2019 04-02-2019	18:20:00	01:49:00	449	2.34	14.68
04-02-2019	09:09:00	20:46:00	697	3.19	3.36
05-02-2019	02:49:00	06:24:00	215	1.64	2.84
05-02-2019	11:15:00	14:31:00	196	2.40	8.47
05-02-2019	19:15:00	22:15:00	180	1.68	9.35
06-02-2019 07-02-2019	20:51:00	01:52:00	301	5.83	4.23
07-02-2019	16:07:00	18:40:00	153	1.50	2.88
09-02-2019	17:34:00	20:32:00	178	1.16	2.22
10-02-2019	17:06:00	23:01:00	355	5.23	7.42
11-02-2019	09:00:00	12:11:00	191	2.58	2.77
11-02-2019 12-02-2019	19:53:00	00:50:00	297	3.76	8.04
12-02-2019 13-02-2019	18:57:00	03:58:00	541	5.14	4.03
13-02-2019	20:15:00	23:17:00	182	1.17	2.43
14-02-2019	16:47:00	19:28:00	161	4.41	18.10
15-02-2019	14:35:00	18:23:00	228	1.94	2.51
19-02-2019 20-02-2019	19:41:00	05:58:00	617	7.68	4.72
25-02-2019	15:56:00	20:20:00	264	6.03	30.63
26-02-2019	16:56:00	19:05:00	129	1.22	3.42
05-03-2019	00:48:00	03:12:00	144	2.71	6.40
06-03-2019	13:32:00	21:47:00	495	1.64	8.11
07-03-2019	00:26:00	02:42:00	136	1.17	1.32
07-03-2019	14:26:00	15:17:00	51	4.08	63.45
07-03-2019	19:44:00	21:36:00	112	2.76	11.05
09-03-2019	04:10:00	05:44:00	94	2.46	11.43
10-03-2019 11-03-2019	18:14:00	04:01:00	587	10.87	23.33
12-03-2019	19:13:00	21:13:00	120	1.34	8.61
14-03-2019 15-03-2019	20:18:00	03:20:00	422	2.81	3.65
18-03-2019	17:14:00	21:30:00	256	1.72	5.51
22-03-2019	18:28:00	21:00:00	152	1.48	5.26

23-03-2019 24-03-2019	21:17:00	00:33:00	196	4.00	6.77
24-03-2019	18:53:00	20:09:00	76	1.03	9.34
26-03-2019	18:29:00	18:37:00	8	1.04	24.89
27-03-2019 28-03-2019	22:49:00	01:45:00	176	1.13	6.33
28-03-2019	09:54:00	19:30:00	576	1.87	3.77
29-03-2019	08:01:00	11:20:00	199	2.45	3.77
02-04-2019	11:03:00	14:28:00	205	5.12	30.74
03-04-2019	14:53:00	15:17:00	24	3.16	46.68
10-04-2019	14:35:00	15:29:00	54	5.52	80.97
13-04-2019	17:08:00	18:19:00	71	2.42	43.92
17-04-2019	17:03:00	19:59:00	176	2.01	12.94
20-09-2019	16:42:00	17:59:00	77	1.00	3.46
21-09-2019	10:22:00	14:07:00	225	1.03	1.83
06-10-2019	15:12:00	16:46:00	94	14.70	148.28
17-10-2019	06:30:00	08:46:00	136	1.03	3.36
17-10-2019	19:15:00	20:03:00	48	1.47	11.07
18-10-2019	11:23:00	16:10:00	287	1.08	4.91
31-10-2019	16:55:00	18:03:00	68	1.24	13.42
03-11-2019 04-11-2019	17:55:00	01:09:00	434	4.69	4.33
07-11-2019	16:49:00	22:53:00	364	2.22	14.13
09-11-2019	19:12:00	22:59:00	227	1.09	1.90
16-11-2019	16:35:00	19:01:00	146	12.80	54.97
17-11-2019	20:23:00	22:27:00	124	1.45	3.18
18-11-2019	18:08:00	20:23:00	135	2.64	6.38
18-11-2019 19-11-2019	23:01:00	00:17:00	76	1.08	3.14
21-11-2019	16:54:00	21:02:00	248	2.80	39.31
24-11-2019	04:13:00	08:14:00	241	3.27	6.07
04-12-2019	17:56:00	21:54:00	238	4.82	5.47
05-12-2019	14:20:00	17:39:00	199	1.14	4.11
08-12-2019	16:30:00	19:16:00	166	2.94	4.00
10-12-2019	17:40:00	18:23:00	43	3.20	48.45
12-12-2019	12:15:00	16:27:00	252	1.86	5.63
13-12-2019	12:34:00	12:45:00	11	1.13	28.34
13-12-2019	17:24:00	23:03:00	339	3.61	17.47
15-12-2019	14:49:00	15:15:00	26	1.43	8.80
15-12-2019 16-12-2019	21:02:00	00:43:00	221	1.89	6.17
16-12-2019	14:27:00	19:44:00	317	1.18	3.46
17-12-2019	14:31:00	15:38:00	67	8.36	78.28
18-12-2019	16:16:00	19:33:00	197	4.01	7.66
19-12-2019 20-12-2019	21:53:00	02:04:00	251	1.73	7.84
21-12-2019 22-12-2019	17:49:00	00:19:00	390	7.71	12.07
23-12-2019	20:52:00	22:22:00	90	2.47	9.94
24-12-2019	14:01:00	20:17:00	376	1.99	2.11
26-12-2019	18:50:00	21:58:00	188	16.23	50.55
28-12-2019	16:40:00	20:34:00	234	26.59	125.88
29-12-2019	16:15:00	17:30:00	75	1.30	18.27
14-01-2020 15-01-2020	20:44:00	00:48:00	244	3.49	7.51

15-01-2020	18:13:00	19:46:00	93	2.22	4.91
18-01-2020	09:39:00	16:07:00	388	2.06	2.29
19-01-2020	11:38:00	14:44:00	186	1.36	7.04
23-01-2020	18:06:00	21:03:00	177	3.28	6.92
26-01-2020	12:40:00	15:44:00	184	1.32	10.16
28-01-2020	15:12:00	17:11:00	119	1.28	5.67
30-01-2020	16:00:00	19:08:00	188	5.98	28.70
02-02-2020 03-02-2020	17:29:00	05:20:00	711	4.92	4.34
05-02-2020 06-02-2020	19:10:00	03:38:00	508	4.77	5.43
06-02-2020 07-02-2020	18:57:00	04:52:00	595	2.79	4.73
07-02-2020	19:27:00	22:12:00	165	2.61	16.46
08-02-2020	14:52:00	20:13:00	321	3.95	3.32
13-02-2020	20:03:00	21:40:00	97	1.48	3.79
14-02-2020	17:11:00	20:25:00	194	10.58	25.88
19-02-2020	17:49:00	21:28:00	219	4.80	6.37
22-02-2020	00:02:00	14:40:00	878	3.93	2.92
04-03-2020	17:59:00	19:28:00	89	2.29	28.22
09-03-2020	17:01:00	17:37:00	36	4.47	70.22
11-03-2020	19:12:00	21:40:00	148	2.00	5.50
12-03-2020	14:31:00	15:17:00	46	3.16	20.07
13-03-2020 14-03-2020	21:27:00	03:16:00	349	5.74	13.58
18-03-2020	19:46:00	22:27:00	161	3.30	7.89
19-03-2020 20-03-2020	15:34:00	00:08:00	514	2.12	1.78
21-03-2020 22-03-2020	17:29:00	00:17:00	408	2.22	3.80
22-03-2020	11:34:00	14:14:00	160	2.73	38.03
23-03-2020	06:45:00	10:09:00	204	1.40	2.72

Se puede observar que, los registros de datos de ambos disdrómetros presentan eventos con las siguientes características: eventos de larga duración, pero con poca contribución de lluvia, y eventos donde sucede lo contrario; así mismo, también se observa la presencia de eventos peculiares donde su duración y contribución de lluvia es muy variante. A primera vista estos datos corresponden a lluvias ligeras, fuertes, y en algunos casos están en proceso de transición. Cabe señalar que existen eventos que suceden en el mismo día, pero en horarios diferentes y de acuerdo al criterio Tokay, Wolff, Petersen (2014), donde señala que un evento debe estar separado uno de otro por al menos en un lapso de 2 horas, por ello no podrían ser considerados lluvia de un mismo evento pese a estar incluidos en el mismo día de ocurrencia.

5.1.2 Estimación de la variación en las mediciones de precipitación acumulada

Para realizar esta comparación de la intensidad de lluvia, se aplicó el método de sesgo porcentual y absoluto, de forma que se pueda cuantificar la variación en la estimación del total de precipitación acumulada por cada evento de lluvia respecto a cada equipo. Empleando para ello, como medidor de referencia para la comparación al pluviómetro Exp; así mismo, también se comparó las mediciones entre ambos disdrómetros.

Debido a aspectos técnicos al momento de recolección de datos solo se emplearon 8 eventos de lluvia, los cuales fueron registrados por los 4 equipos. La Figura 20 muestra el sesgo realizado en los totales de precipitación, donde se observa un buen acuerdo en las mediciones entre pluviómetros (Figura 20a), con una ligera sobrestimación de lluvia equivalente al 0.98 % del Exp sobre el Met, no obstante, existen pequeñas diferencias en el análisis propio en cada evento. En la comparación del Exp frente a los 2 disdrómetros ópticos (Figura 20b y 20c), se evidencia una sobrestimación de lluvia de 15 % respecto al psv2a y de 17 % respecto a psv2b. Esta discrepancia se debe principalmente a que los eventos seleccionados presentan totales de lluvia con valores muy bajos, y debido a la resolución de medición de los disdrómetros se pueden registrar valores más exactos en pequeñas tasas de lluvia, lo que no sucede con los pluviómetros que no miden menos de su umbral (aproximado de 0.254 mm). En lo referente a la comparación entre las mediciones de los disdrómetros (Figura 20d), se evidencia una pequeña sobreestimación por parte del psv2b, pese a ello, presentan un mejor acuerdo en sus mediciones respecto a la comparación con el pluviómetro.

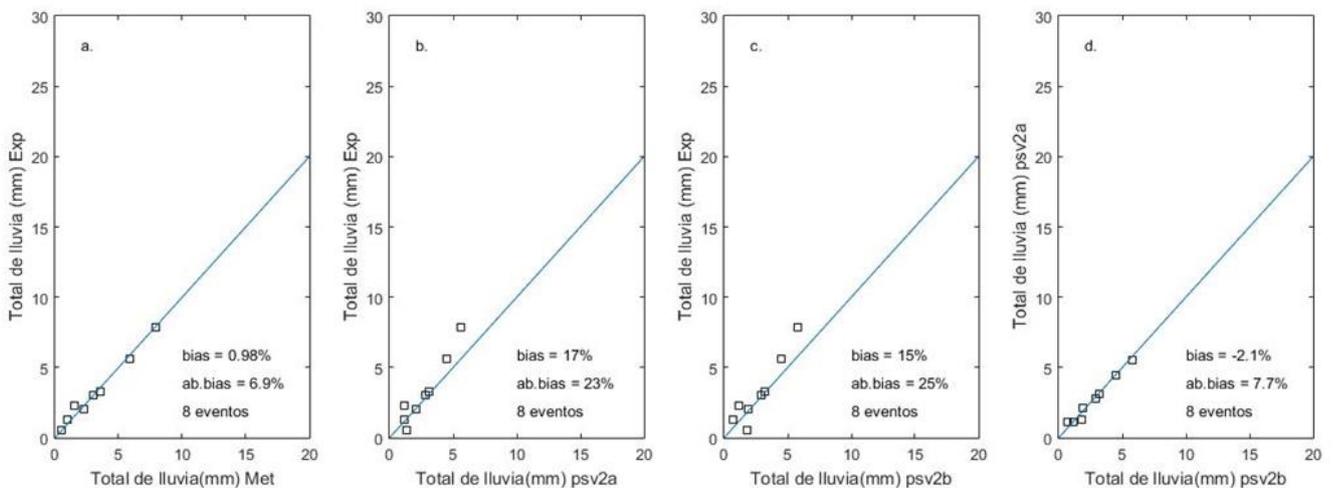


Figura 20. Comparación de los totales de lluvia de los 8 eventos seleccionados. a) Entre los dos pluviómetros convencionales (Met y Exp). b) Entre el medidor de referencia y el primer disdrómetro óptico (psv2a). c) Entre el medidor de referencia y el segundo disdrómetro óptico (psv2b). d) Entre los dos disdrómetros ópticos. Así mismo, están presentes los valores del sesgo porcentual (bias), sesgo porcentual absoluto (ab.bias) y la cantidad de eventos de lluvia.

5.1.3 Clasificación de los eventos de lluvia

La clasificación de los eventos de lluvia se da a través de los criterios de estratiformes (S) y convectivos (C), de acuerdo al promedio de la intensidad de lluvia y su desviación estándar, de acuerdo a lo descrito por Bringi et al. (2003). Así mismo, se añaden dos categorías más a la clasificación, una corresponde a eventos donde la tasa promedio de lluvia corresponda a eventos estratiformes pero la desviación estándar sea superior, en este caso se consideran como eventos mixtos o de transición de acuerdo a lo mencionado por Chen, Yang, Pu (2013); la otra categoría corresponde a eventos que no cumplen ninguna criterio de clasificación, lo que indica que se trata de un evento de precipitación diferente a la lluvia, posiblemente lloviznas, pese a que presentan acumulación de lluvia superior a 1 mm, y en algunos casos alcanzan los 5 mm, pero esto se influenciado por el tiempo de duración del evento.

Los valores del promedio de la intensidad de lluvia y su desviación estándar para cada evento por cada instrumento se encuentran en el Anexo V, donde se detalla la clasificación que recibió cada evento. La Tabla 10 presenta el resumen de la cantidad total de eventos de lluvia por cada tipo; donde pese a que el número de

eventos no es el mismo en cada equipo, las cantidades no se ven alteradas en cada categoría, indicando un buen arreglo en las mediciones.

Tabla 10 Resumen de la cantidad de eventos de lluvia por cada tipo

Tipo de lluvia	Psv2a	Psv2b
Estratiforme (S)	48	55
Mixta o de Transición (S - C)	39	49
Convectiva (C)	8	16
Precipitación diferente a la lluvia	21	25
Total	116	145

De los resultados mostrados en la Tabla 10, se observa que la mayor cantidad de la lluvia corresponden a eventos estratiformes y mixtos, y la cantidad de eventos convectivos es muy reducida, inclusive menor a de los eventos que se sospecha que son lloviznas. Cabe resaltar que los eventos mixtos presentan la posibilidad de que en algún punto se hallan llegado a convertir en convectivos, o en todo caso transformase en estratiformes, para confirmar ello sería necesario aplicar mediciones de DSD en espacios grandes como lo proporcionado por los radares o imágenes satelitales (Del Castillo 2019).

5.1.4 Selección de eventos de lluvias representativos de acuerdo a su clasificación

La selección se realizó en base a 4 eventos por cada categoría, teniendo en cuenta el periodo de duración (eventos cortos y largos), que el tiempo de ocurrencia sea igual o aproximado por lo registrado por cada instrumento. La Tabla 11 muestra los eventos seleccionados, ordenados por categorías y en función al tiempo de duración (de menor a mayor).

Tabla 11 Eventos seleccionados en las 4 categorías.

Fecha	Psv2a			Psv2b		
	Duración (min)	PPT (mm)	Cat.	Duración (min)	PPT (mm)	Cat.
17-12-2018	133	1.77	S	134	1.72	S
18-12-2018	280	4.38	S	280	4.80	S
12-02-2019 13-02-2019	542	4.23	S	541	4.03	S
16-01-2019 17-01-2019	817	4.09	S	816	4.82	S
13-04-2019	71	33.27	S-C	71	43.92	S-C
26-11-2018	109	7.62	S-C	109	8.87	S-C
15-11-2018	221	90.60	S-C	222	72.07	S-C
16-12-2018 17-12-2018	497	10.63	S-C	497	12.66	S-C
26-03-2019	7	24.94	C	8	24.89	C
03-04-2019	24	37.75	C	24	46.68	C
07-03-2019	53	43.28	C	51	63.45	C
06-10-2019	95	103.37	C	94	148.28	C
09-02-2019	178	2.23	NO	178	2.22	NO
21-01-2019	229	3.04	NO	217	2.40	NO
08-08-2018	421	4.02	NO	421	2.96	NO
18-01-2019	829	6.07	NO	829	5.92	NO

Nota: PPT: precipitación total acumulada, Cat: Categoría de lluvia, S = estratiforme, S-C = mixta o de transición, C = convectiva y NO = precipitación diferente a la lluvia.

5.1.5 Comparación de las intensidades de lluvia

La representación gráfica de la intensidad de lluvias por cada evento, se encuentra de acuerdo al orden considerado en la Tabla 11.

- **Eventos estratiformes**

Los eventos estratiformes seleccionados se encuentran representados en la Figura 21, donde se puede observar que las mediciones de intensidad de lluvia en cada equipo, siguen un acuerdo en el desarrollo cronológico del evento y los valores de las mediciones no presentan fluctuaciones muy abruptas. Estas variaciones se deben a como están instalados los equipos, uno se encuentra de forma perpendicular al otro y el psv2a está sobre una plataforma de altura

aproximada de unos 50 cm dándole mayor altura respecto al otro instrumento, es por ello que la injerencia del viento es un tanto diferente en las mediciones de cada equipo (Førland et al. 1996). Además, los valores pico pueden estar afectados por el registro parcial del tamaño real de la gota en el haz de luz del disdrómetro, cuando se presentan gotas de gran volumen (Yuter et al. 2006).

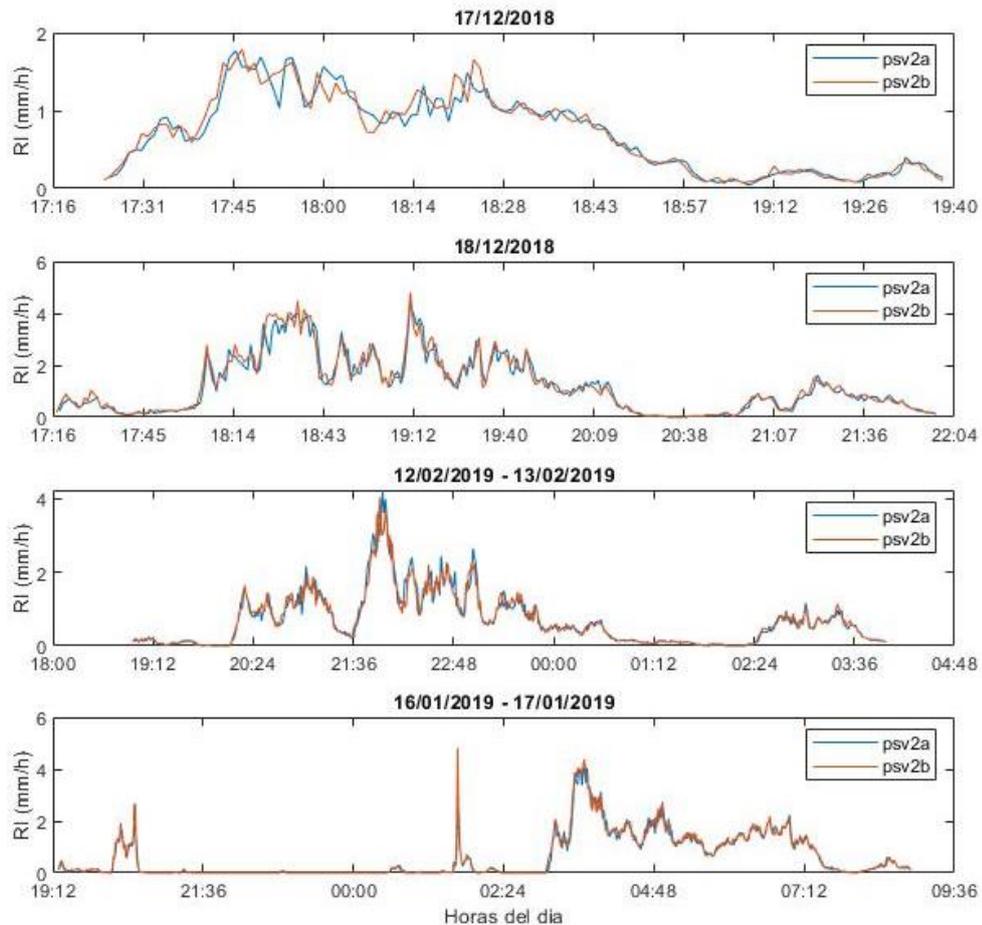


Figura 21. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos estratiformes. Donde RI: intensidad de lluvia.

De acuerdo a las mediciones de psv2b que presenta datos más completos, se observa que el evento ocurrido entre los días 16/01/2019-17/01/2019, acumuló 4.82 mm de lluvia en 13 horas y 37 minutos, lo cual indica que se tratan de gotas muy pequeñas que se caracterizan por su baja contribución a la lluvia. Sin embargo, el evento del día 18/12/2018 para el mismo equipo, muestra un acumulado de 4.8 mm en 9 horas y 2 minutos, que es casi igual al evento mencionado anteriormente, pero con un tiempo de ocurrencia de más corto, lo

cual indica que las gotas son un poco más grandes o hay mayor concentración de ellas.

- **Eventos mixtos o de transición**

La Figura 22, muestra la representación de las mediciones de intensidad de lluvia a lo largo del periodo de ocurrencia de eventos mixtos o de transición, donde observa un buen acuerdo de las mediciones de ambos equipos respecto al horario de medición, pero similar que en el caso anterior existe la variación en los valores de los picos de intensidad de lluvia.

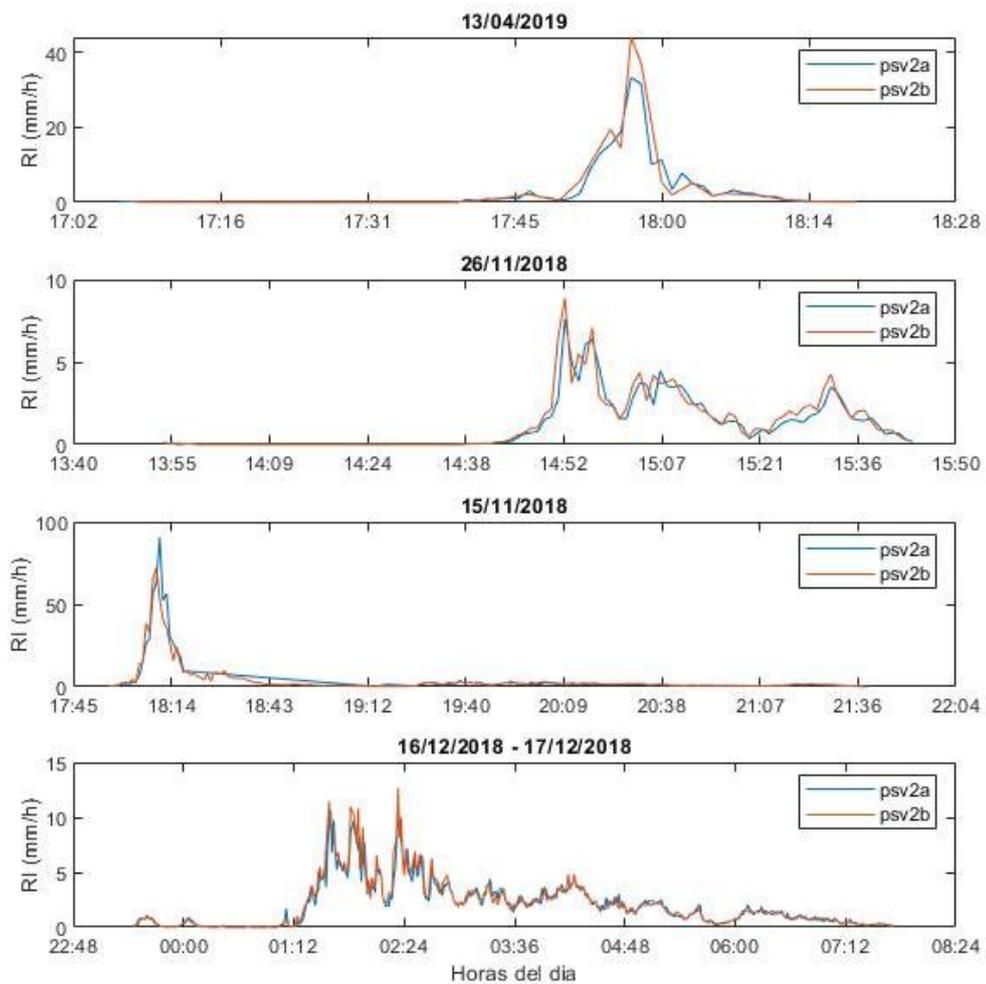


Figura 22. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos mixtos o de transición. Donde RI: intensidad de lluvia.

A comparación de los eventos estratiformes registrados por el psv2b, estos eventos empiezan a presentar periodos de ocurrencia más cortos, como el del

día 13/04/2019 que tiene una duración de 1 hora y 11 minutos, que es aproximadamente 1 hora más corto del evento estratiforme más pequeño registrado en la campaña; del mismo modo se ve esta misma diferencia en eventos de mayor duración, donde la variación en el número de horas va aumentando.

En caso de los totales de precipitación por cada evento registrado por el psv2b, se observa variaciones muy marcadas, esto en base a que categoría se inclina más el evento. Los eventos de los días 26/11/2018 y 16/12/2018 - 17/12/2018 presentan totales de lluvia reducidos de 8.87 mm y 12.66 mm respectivamente, indicando que son eventos en transición a la categoría estratiforme. En caso de los eventos de los días 13/04/2019 y 15/11/2018 el total de lluvia se incrementa considerablemente, indicando que la transición de estos eventos se da para la categoría convectiva, indicando presencia de gotas más grandes.

Algo que recalcar es que los periodos de ocurrencia no están vinculados directamente a la cantidad total de lluvia, debido a que estos eventos presentan transición a dos categorías y resulta complicado englobarlos de acuerdo a una tendencia.

- **Eventos convectivos**

Las mediciones de intensidad de lluvia para eventos convectivos se encuentran representadas en la Figura 23, e igual a que los eventos anteriores los valores medidos por cada equipo guardan relación con el horario de ocurrencia, con variaciones en los valores de los picos de la intensidad de lluvia, los cuales se observan más notorios debido a que la dispersión de los datos es mayor, producto de la duración de los eventos se caracteriza por ser más corta en comparación a las otras categorías.

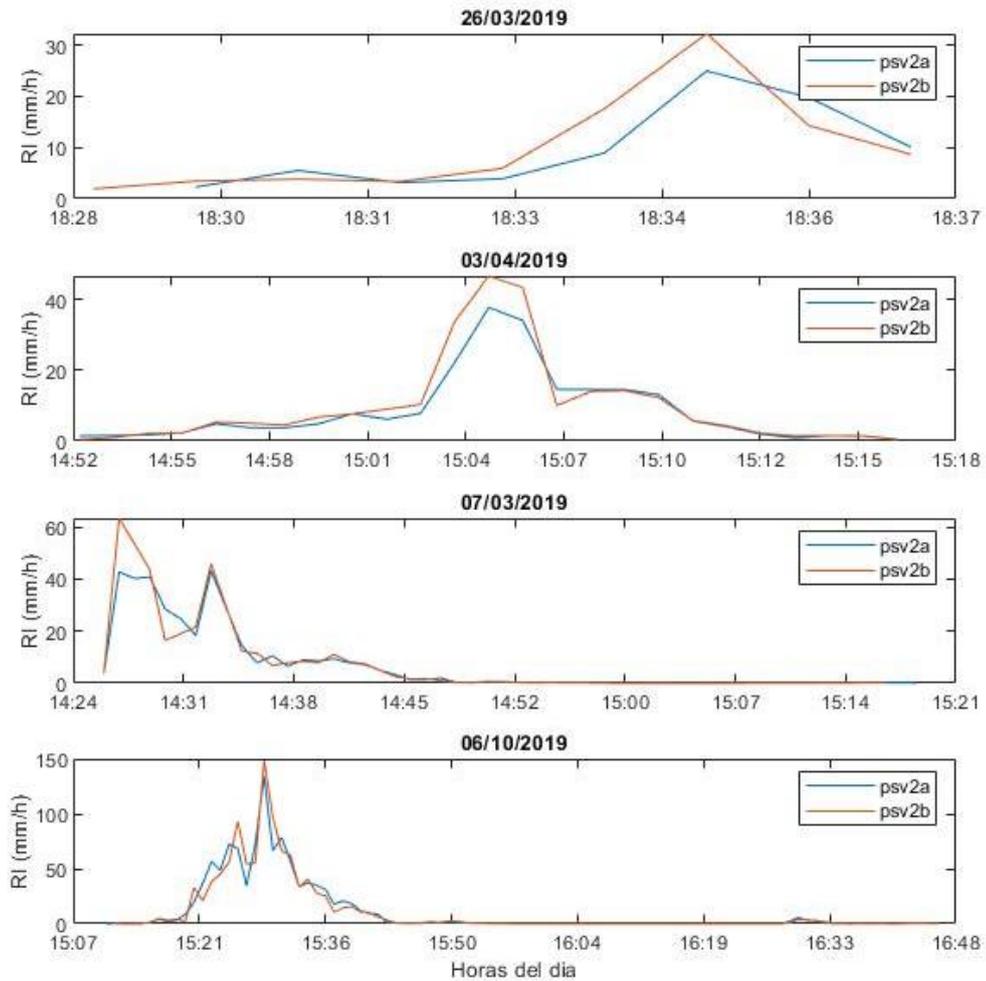


Figura 23. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos convectivos. Donde RI: intensidad de lluvia.

Este tipo de eventos se caracterizan básicamente por ser de periodos cortos, como es el caso del evento del día 26/03/2019 con una duración entre 7 y 8 minutos, y con la duración más de larga de aproximadamente 1 hora y 35 minutos, de todos los eventos registrados en la campaña.

Los totales de lluvia para estos eventos son los más alto respecto a todas las categorías, inclusive se muestran altos picos en la intensidad de lluvia alrededor de los 100 mm/h (evento del día 06/10/2019). Esto indica que estos eventos se caracterizan por ser de corta duración y de gran contribución de lluvia, por tanto, se intuye la presencia de gotas de gran volumen y en altas concentraciones. Inclusive muchos de estos eventos pueden ser el inicio de eventos extremos de lluvia.

Dentro de estos eventos, se observa un caso peculiar en el día 07/03/2019, donde el evento muestra fluctuaciones notorias en los picos de intensidad de lluvia, que se pueden evidenciar en que el registro del total de lluvia entre un equipo y otro varía alrededor de 20 mm. Se sospecha que esta alteración es producto del viento, que combinado con la ubicación de los equipos como se mencionó anteriormente, influye en las mediciones; así mismo, es necesario descartar la existencia de inconvenientes técnicos que estén influyendo en este aspecto. Estas mismas alteraciones suceden en los otros eventos justamente en los máximos de intensidad de lluvia, pero con menor intensidad o no son tan notorio, de manera que influyen drásticamente en el total de lluvia acumulado durante el evento.

- **Eventos de precipitación diferentes a la lluvia**

En la clasificación de eventos se observaron varios de ellos que no cumplen con los rangos o criterios establecidos por Bringi et al. (2003) y Chen, Yang, Pu (2013), por ello se sospecha que se tratan de eventos de llovizna, y como se observan en la Tabla 11 y el Anexo IV, estos eventos son de la larga duración que van aproximadamente desde las 3 horas hasta las 14 horas, con acumulados de lluvia muy pequeños y que están ligados al tiempo de duración del evento, casi similar a la lluvia estratiforme, pero con diferencias en la intensidad de lluvia y el tamaño de las gotas. La Figura 24 muestra la representación de la intensidad de lluvia para estos, donde se observa que el pico máximo a lo mucho llega a los 6 mm/h (evento del día 18/01/019), indicando que posiblemente hay injerencia de lluvia estratiforme en ese momento.

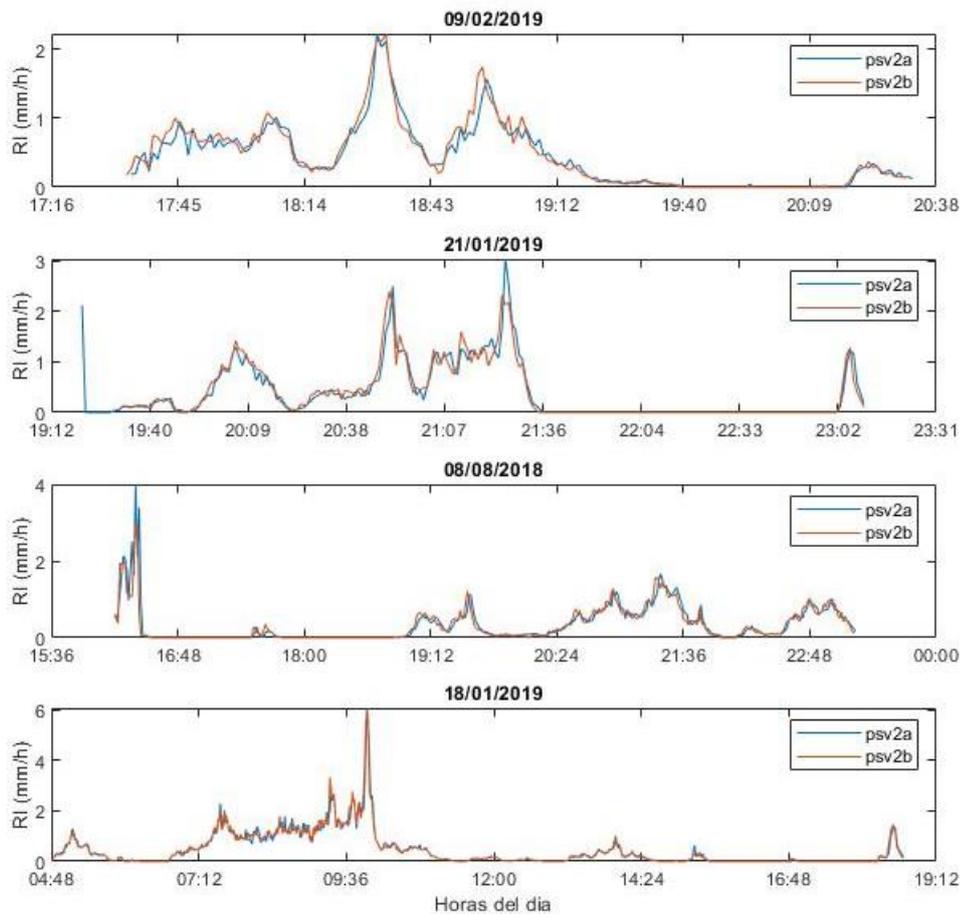


Figura 24. Mediciones de intensidad de lluvia (mm/h) por los disdrómetros para eventos convectivos. Donde RI: intensidad de lluvia.

5.1.6 Parámetros integrales de lluvia y parámetros del ajuste matemático gamma

El cálculo parámetros integrales de lluvia (concentración numérica de gotas de lluvia (N), reflectividad (Z), intensidad de lluvia (RI) y contenido de agua líquida (W)), se efectuaron para los eventos seleccionados de acuerdo a su categoría, empleando la información recolectada por el psv2b, ya que es el instrumento con más eventos y datos completos. Las ecuaciones para la estimación de los parámetros de integrales están descritas en el marco conceptual (ecuaciones 3, 4, 5 y 6) de acuerdo a lo empleado por Chen, Yang, Pu (2013).

En el caso de los parámetros del ajuste matemático gamma, se emplearon el método estadístico del momento descritos por Ladino (2017), y de acuerdo a la recomendación de Chen, Yang, Pu (2013) se emplearon el segundo, tercer y cuarto momento.

Los valores tabulados para los parámetros integrales de reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida, y en el caso del ajuste matemático gamma sobre parámetro de forma, fueron utilizados para realizar la distribución de probabilidad, con la finalidad de observar donde se concentran estos valores.

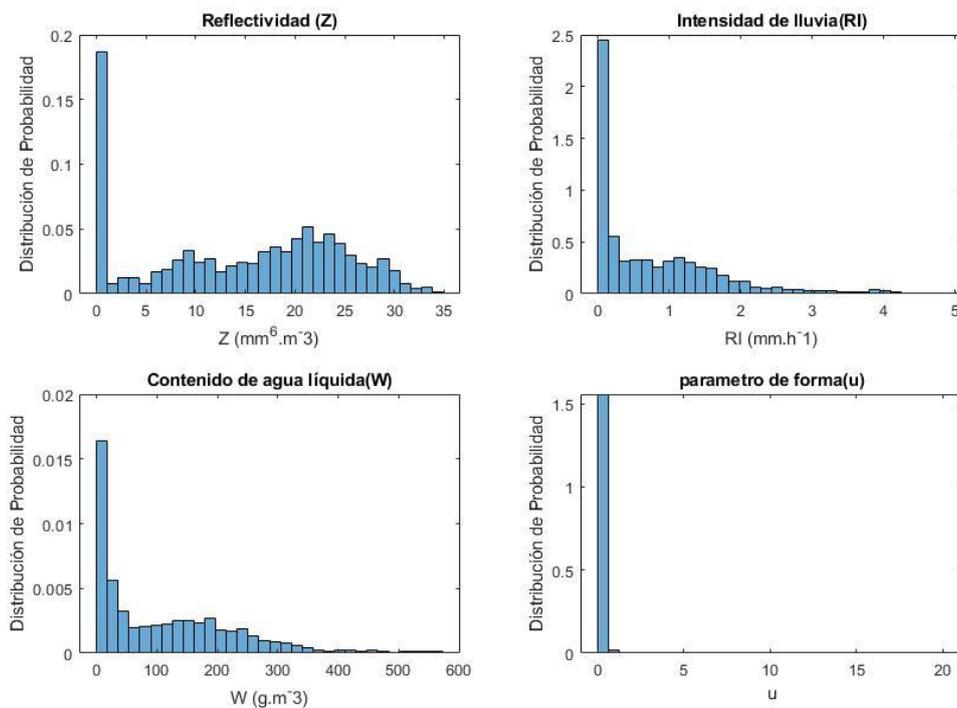


Figura 25. Distribución de probabilidad para eventos estratiformes de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.

La Figura 25 muestra la distribución de probabilidad para eventos estratiformes, donde se observa que, en caso de la reflectividad, la intensidad de lluvia y contenido de agua líquida hay gran presencia de valores igual a cero, producto de los que dentro de los eventos concentran minutos sin lluvia de forma dispersa en todo el evento. La intensidad de concentra valores muy bajos inferiores a 2 mm/h, lo cual le da la característica de que estos eventos no contribuyen mucho al total de lluvia, esto mismo se refleja en el contenido de agua líquida que

mantiene el mismo comportamiento de la intensidad. En caso del parámetro de forma (μ) observamos que el grueso es para $\mu=0$, con una ligera inclinación hacia valores positivos, indicando una concavidad hacia abajo al momento de la representación gráfica del espectro de gotas.

La distribución de probabilidad para los mismos parámetros ya mencionados, pero para eventos mixtos, se encuentran representados en la Figura 26. Se puede observar que los valores de reflectividad van incrementándose (centrándose alrededor de 30), así mismo la intensidad de lluvia presenta picos más altos, aunque sean solo unos pocos, y el contenido de agua líquida va en aumento. Todo ello indica que existe una relación directamente entre el aumento de los valores y el aumento del total de lluvia. En caso de u se sigue manteniendo la postura de los eventos estratiformes, con la diferencia de la aparición de valores de 20 que indicarían la presencia de partículas ajenas a la lluvia.

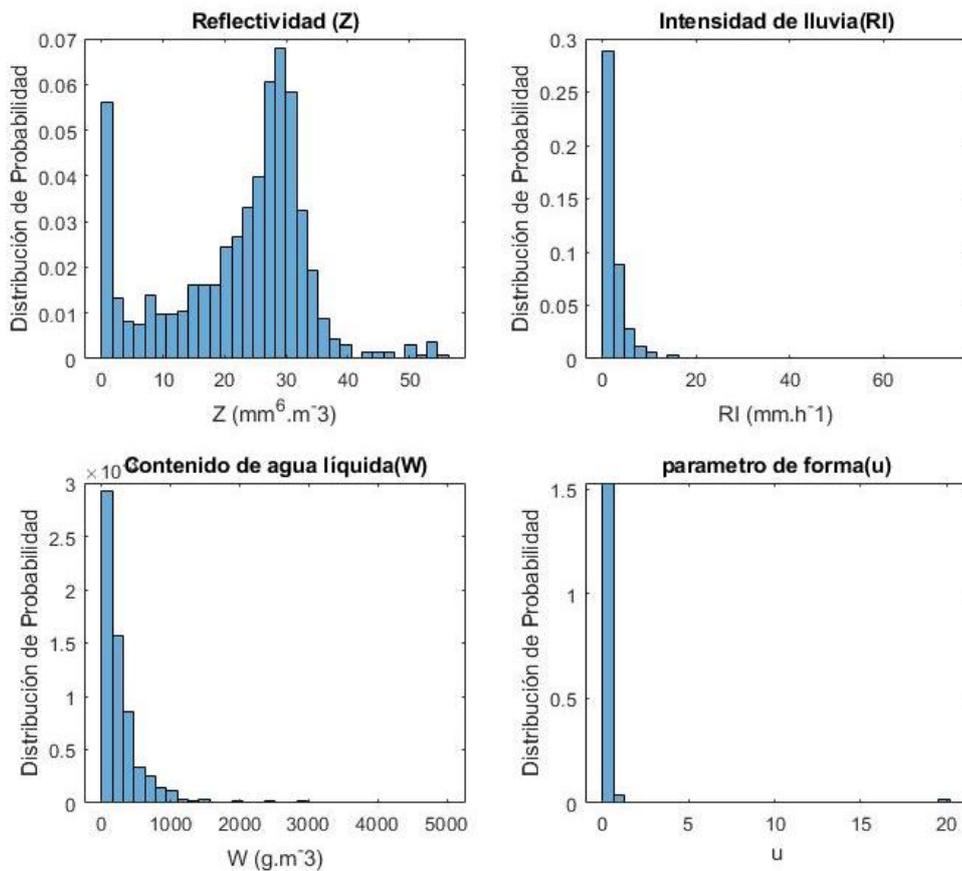


Figura 26. Distribución de probabilidad para eventos mixtos de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.

Para los eventos convectivos, la Figura 27 muestra distribuciones de los valores diferentes a los otros eventos, se observa que la reflectividad presenta datos muy variantes, sin embargo, es en estos eventos donde se alcanza los valores más altos, para el caso del contenido de agua líquida también los valores se incrementan. Respecto al parámetro de forma se evidencia que las estimaciones tienen una tendencia a valores positivos, indicando mayor acción de la evaporación en las gotas más pequeñas.

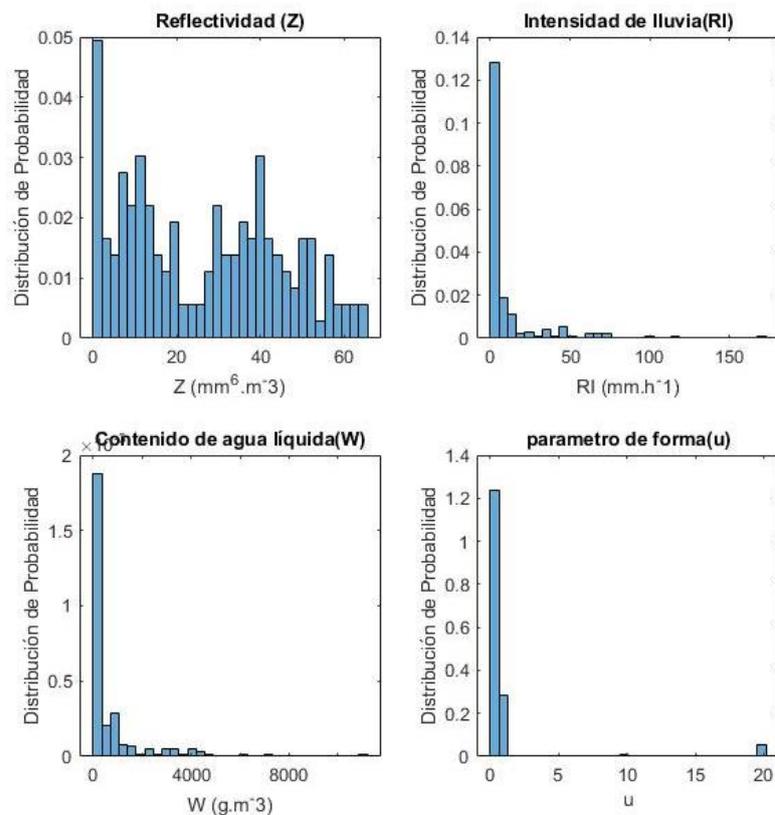


Figura 27. Distribución de probabilidad para eventos convectivos de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida) y del parámetro de forma gamma.

5.1.7 Espectro de gotas de lluvia

Para evidenciar los detalles ya mencionados acerca de los diferentes tipos de eventos de lluvia, se procedió con las representaciones gráficas de la DSD, en función a la velocidad de caída y concentración logarítmica de las gotas respecto a su diámetro.

La Figura 28 muestra las velocidades de caídas de las gotas de eventos estratiformes, donde se pueden observar que existe una alta concentración de gotas con diámetros inferiores a los 2 mm y velocidades de caída inferiores a 7 m/s, debido básicamente a que al ser gotas pequeñas encuentran más oposición de la tasa ascensional del viento, todo ello de acuerdo a lo descrito por Houze (2014) para lluvias estratiformes. Otro aspecto a analizar es casi no hay gotas con velocidades de caída de 10 m/s, reduciendo la posibilidad de encontrar gotas de gran volumen. Así mismo la concentración de estos valores presentan un buen acuerdo a lo estimado por Beard (1976).

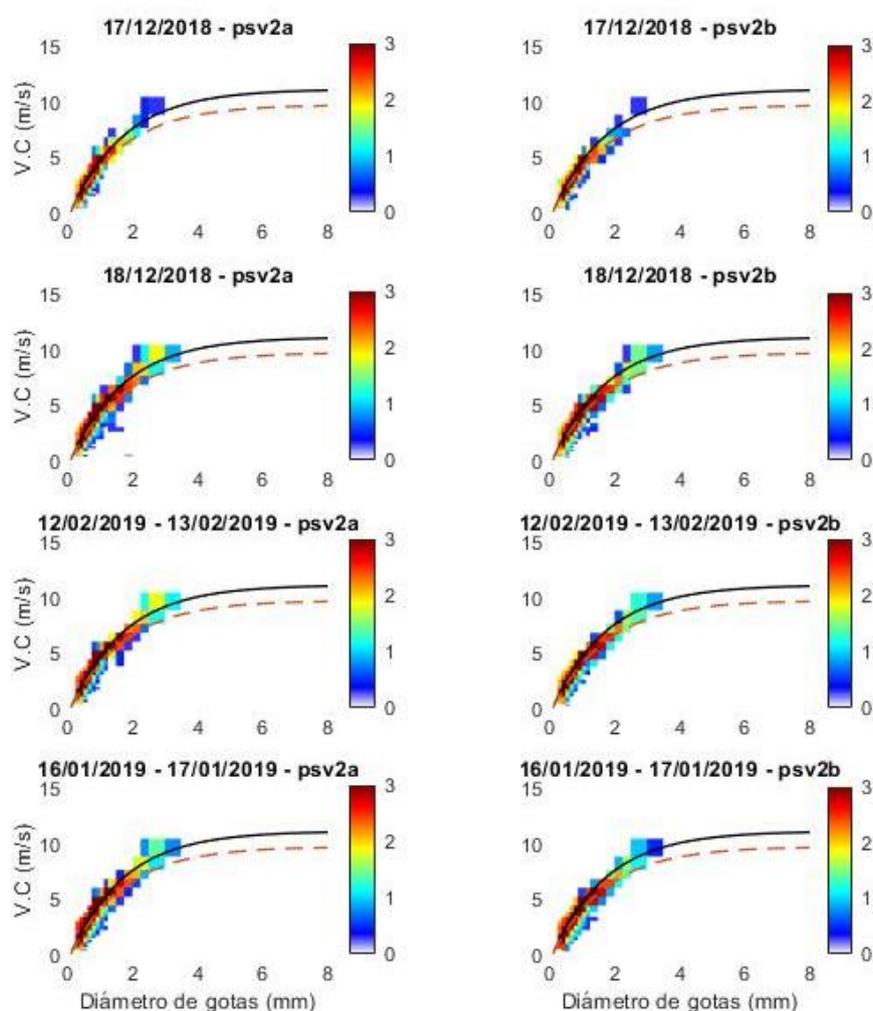


Figura 28. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos estratiformes. Donde V.C: velocidad de caída. Los espectros están expresados en escala de color, donde la barra de colores indica la concentración de los valores de las velocidades de caída de las gotas, respecto intervalos de diámetro. Para todos los gráficos se tiene en cuenta a la curva promedio (Beard 1976) expresada por una línea de color negro y la curva promedio esperado para la costa del Perú (línea punteada de color rojo).

En caso de eventos mixtos, representados en la Figura 29, se evidencian peculiaridades, y como ya se había señalado anteriormente los eventos con mayor lluvia acumulada (eventos de los días 13/04/2019 y 15/11/2018), presentan gotas sobre los 4 mm de diámetro y con velocidades de caída de aproximadamente 10 m/s, reforzando lo que se mencionó de que estos eventos se encuentran en proceso de transición a ser eventos convectivos, y lo mismo con los 2 eventos restantes que ligeramente las superan los 2 mm de diámetro indicando que están más apegados a lluvia estratiforme.

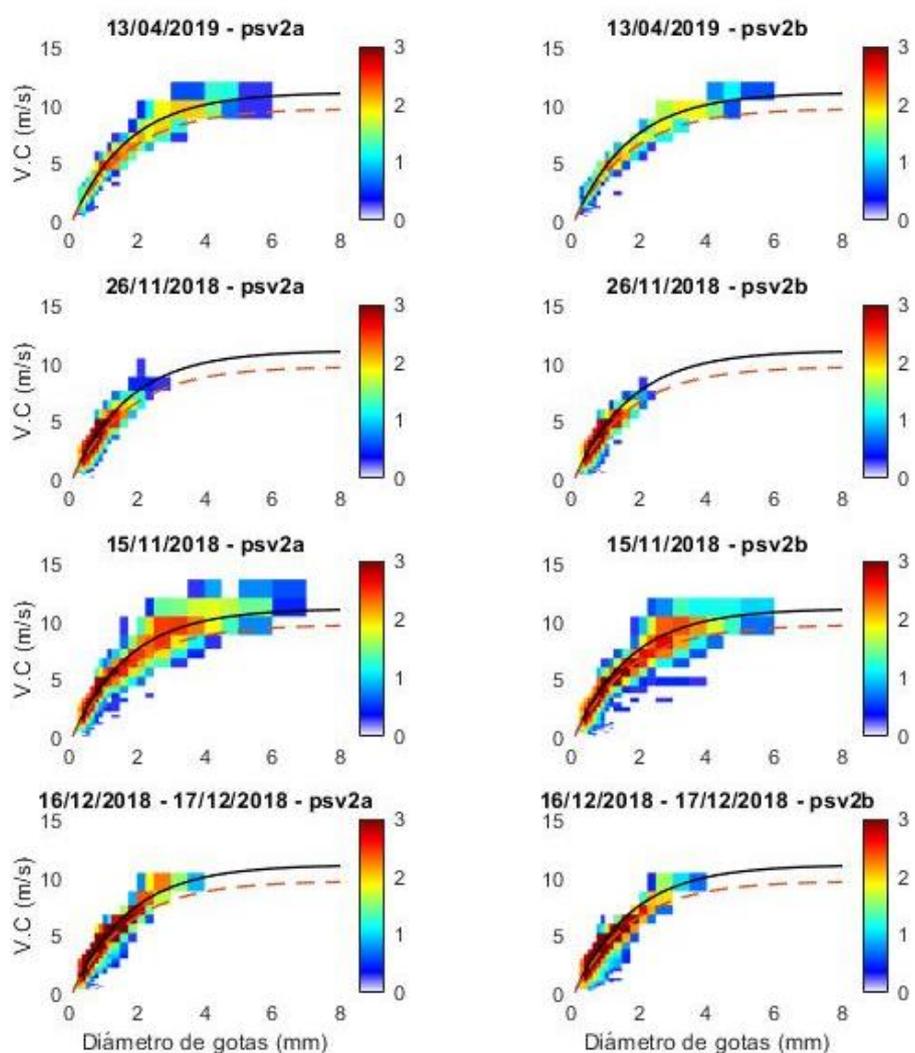


Figura 29. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos Mixtos. Donde V.C: velocidad de caída. Los espectros están expresados en escala de color, donde la barra de colores indica la concentración de los valores de las velocidades de caída de las gotas, respecto intervalos de diámetro. Para todos los gráficos se tiene en cuenta a la curva promedio (Beard 1976) expresada por una línea de color negro y la curva promedio esperado para la costa del Perú (línea punteada de color rojo).

Para los eventos convectivos la Figura 30, permite observar que las gotas no se encuentran concentradas en bajas velocidades de caída, si no están dispersas a lo largo del espectro, indicando que en estos eventos el tamaño de las gotas es muy variable, donde se supera los 4 mm de diámetro e inclusive se registran gotas muy grandes (diámetro alrededor de 8 mm). Cabe señalar que se tiene el indicio que las gotas pequeñas serian producto de la ruptura de las gotas grandes producto de la acción del viento; así mismo, también existe la posibilidad de que las gotas medianas crecen mediante la absorción de gotas pequeñas.

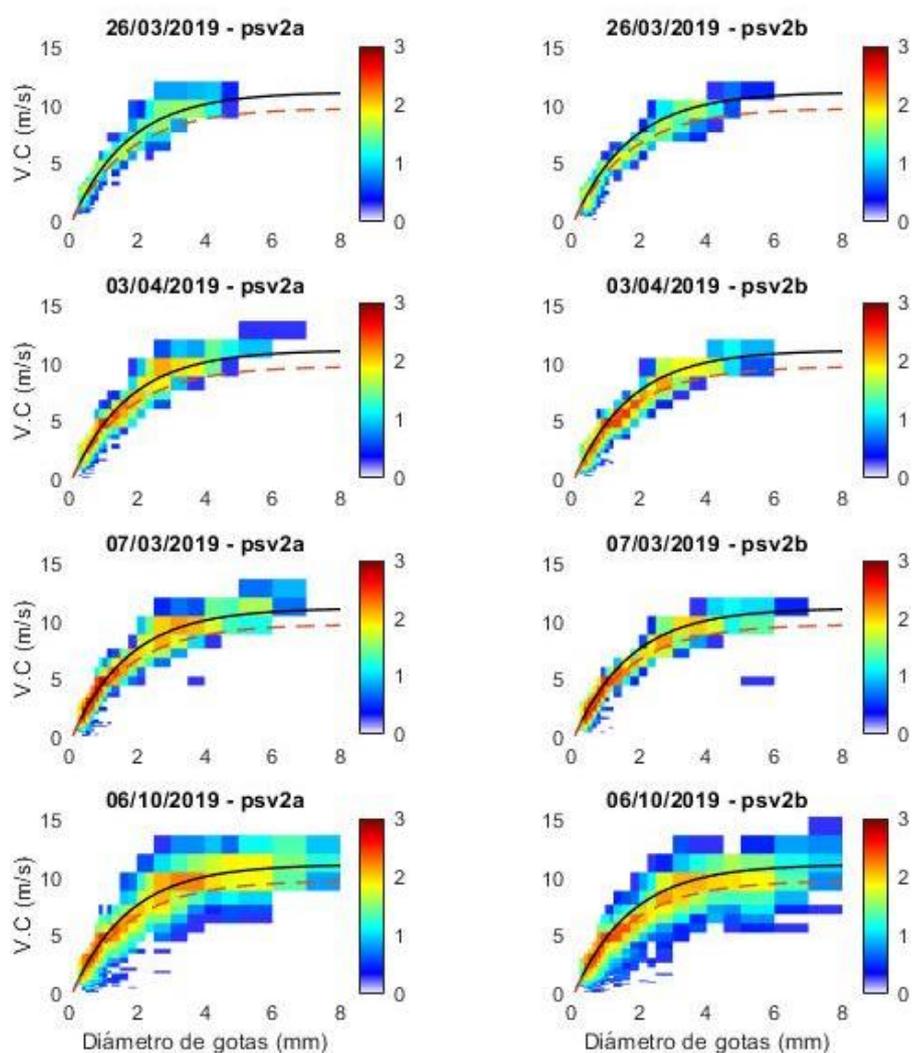


Figura 30. Relación entre la velocidad de caída y el diámetro de las gotas de lluvia para eventos convectivos. Donde V.C: velocidad de caída. Los espectros están expresados en escala de color, donde la barra de colores indica la concentración de los valores de las velocidades de caída de las gotas, respecto intervalos de diámetro. Para todos los gráficos se tiene en cuenta a la curva promedio (Beard 1976) expresada por una línea de color negro y la curva promedio esperado para la costa del Perú (línea punteada de color rojo).

En base al análisis del total de lluvia, podemos observar que el evento del día 06/10/2019, presenta el mayor valor de lluvia acumulada de toda la campaña. Donde existen presencia de gotas muy grandes con diámetros alrededor de 8 mm y velocidades de caídas que llegan a los 15 m/s. Sin embargo, la composición del tamaño de gotas es muy variable. En base a que en este evento se presentaron las características mencionadas, se contempla la posibilidad de que exista una combinación de hidrometeoros, entre gotas de lluvia y granizo, así mismo, puede ser considerado como parte o inicio de un evento extremo de lluvia.

Para reforzar lo mencionado se procedió a elaborar las representaciones graficas de los espectros de DSD, en función a la concentración del promedio logarítmico de las gotas respecto a su diámetro.

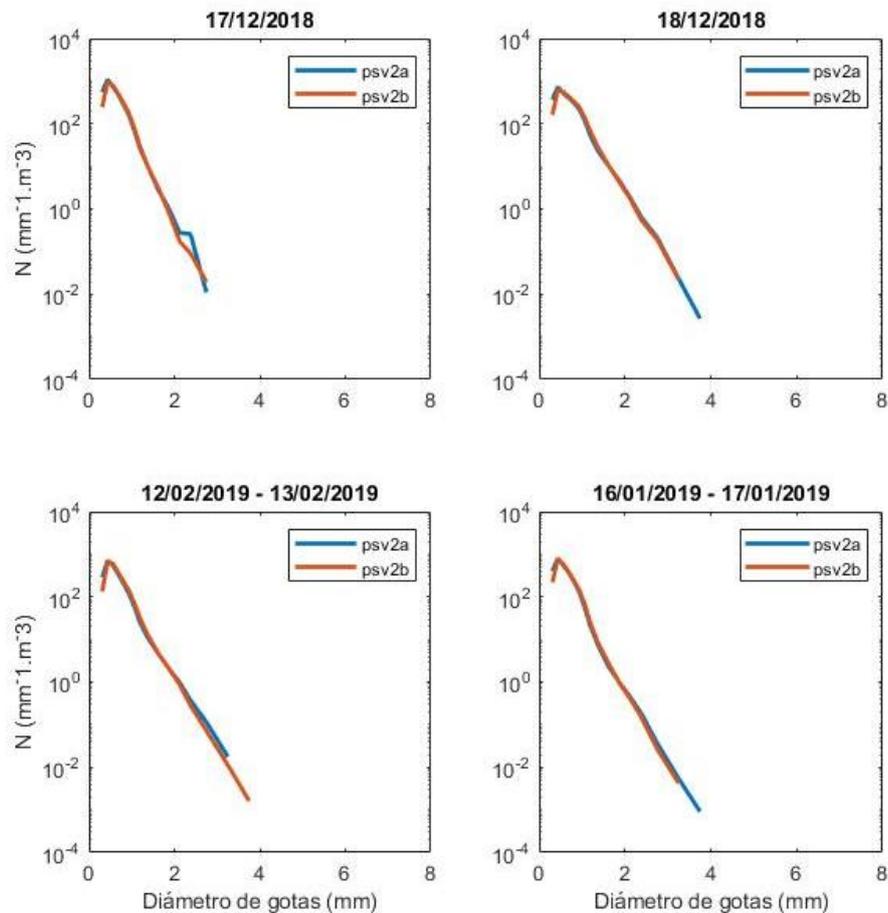


Figura 31. Comparación de los espectros de gotas de eventos estratiformes, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas. La línea solida de color azul corresponde al psv2a y la de color rojo corresponde al psv2b.

La Figura 31 muestra que en estos eventos el tamaño de gotas se concentra en diámetros alrededor de 1 mm, y que no supera los 4 mm, es por ello que este puede ser considerado como un umbral para diferenciar los tipos principales de lluvia (estratiformes y convectivos). Así mismo, se corrobora sobre la concavidad hacia abajo del espectro de gotas, señalado al momento de la distribución de los valores del parámetro de forma.

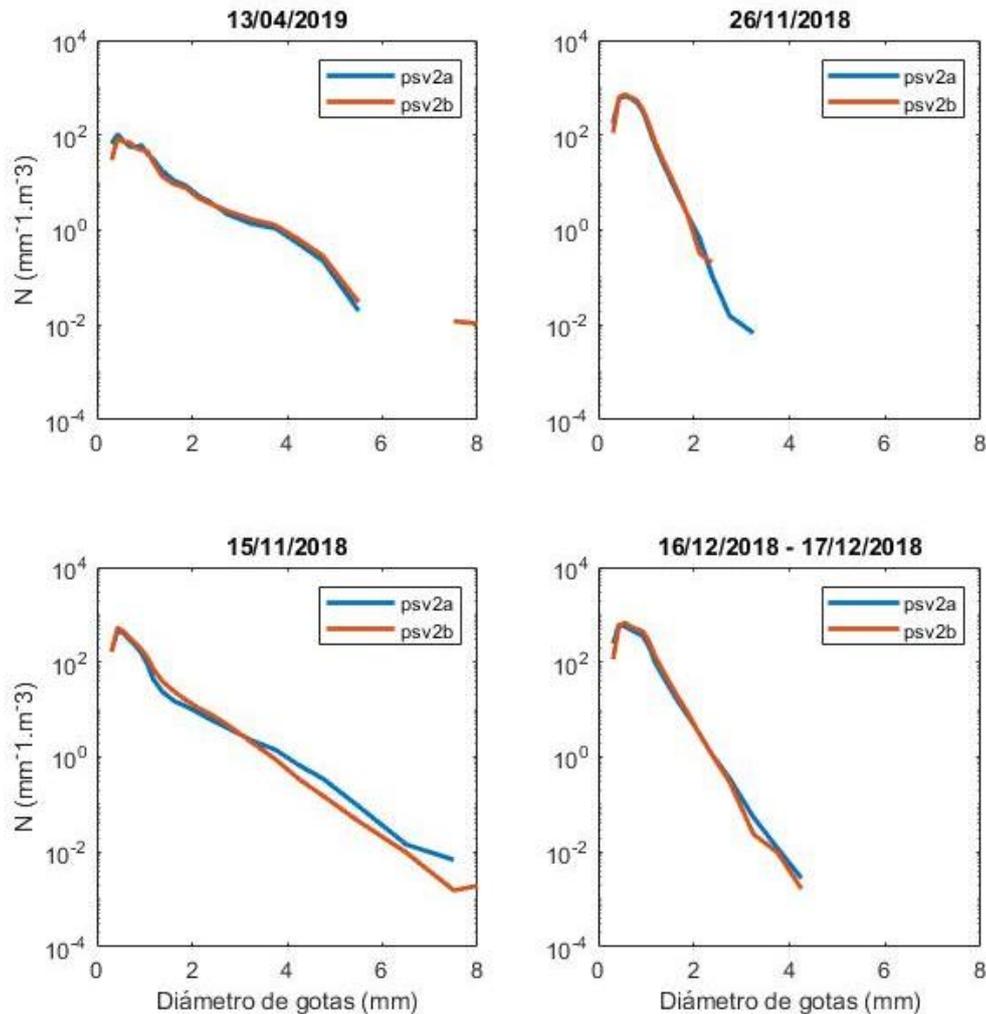


Figura 32. Comparación de los espectros de gotas de eventos mixtos, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas. La línea sólida de color azul corresponde al psv2a y la de color rojo corresponde al psv2b.

En torno a los eventos mixtos, la Figura 32 resalta e indica el destino final de la transición del evento, todo en base al tamaño de las gotas y su concentración. Analizando este aspecto, se observa que el evento del día 13/04/2019 presenta una transición a lluvia convectiva, donde se observa un grupo pequeño de gotas

por encima de los 4 mm de diámetro, pero a comparación del evento del día 26/11/2018 donde la transición es para lluvia estratiforme, no hay gotas por encima de ese valor, sin embargo, existe un incremento en la concentración de gotas inferiores a los 2 mm. Dando a entender que un evento estratiforme en su mayoría está conformado por gotas pequeñas, y los eventos convectivos por gotas grandes, y es por ello que tienen una mayor contribución en el aporte de agua a la superficie terrestre.

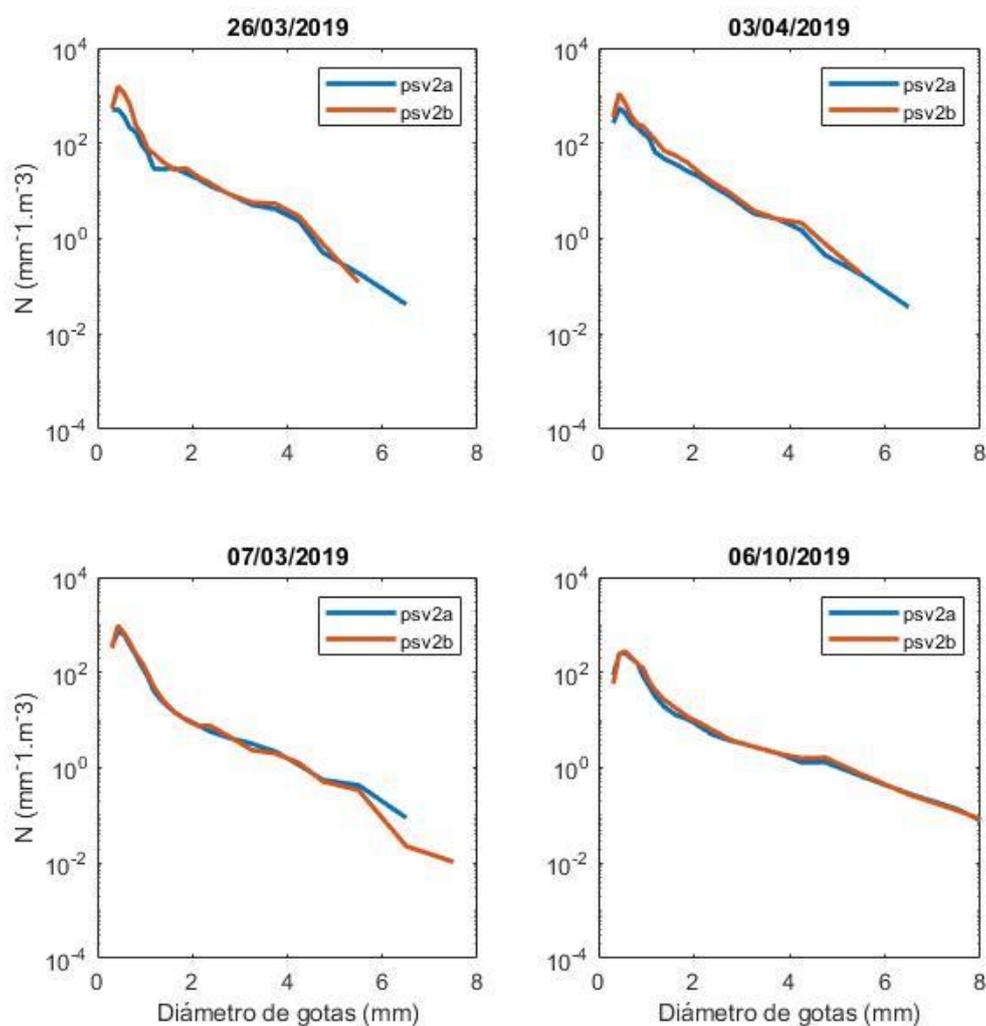


Figura 33. Comparación de los espectros de gotas de eventos convectivos, en función al promedio logarítmico de la concentración de gotas. La línea sólida de color azul corresponde al psv2a y la de color rojo corresponde al psv2b.

Por último, la Figura 33 muestra los espectros de gotas de eventos convectivos, donde se aprecia que mientras el acumulado de lluvia y el tiempo de duración sea mayor, la concentración de gotas pequeñas y grandes se van asemejando,

ocasionando que los valores del parámetro de pendiente se reduzcan. Así mismo, también se influenciado los valores del parámetro de forma, acercándose a cero e influyendo en la tasa de evaporación de las gotas.

Es necesario resaltar que las mediciones registradas por ambos equipos respecto a la velocidad de caída y tamaño de gotas, mantiene un buen arreglo en valores. Facilitando la descripción e interpretación de los resultados.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

La selección de solo 12 eventos de lluvia para el estudio, 4 eventos estratiformes, 4 mixtos y 4 convectivos, debido a que respecto de la cantidad de meses evaluados el número de eventos seleccionado es reducido. Sin embargo, Ladino (2017), en su estudio solo emplea de 3 eventos de lluvia donde calcula los parámetros integrales de lluvia y del ajuste matemático, obteniendo muy buenos resultados. Además, es necesario mencionar que los eventos seleccionados cumplen con un control de calidad.

En el caso de la comparación de las tasas de lluvia tanto en intensidad como en precipitación acumulada, se observa que existe una gran diferencia en entre los disdrómetros y pluviómetros. Tokay et al. (2014), hacen referencia a este aspecto, donde resalta que los disdrómetros versión Parsivel2, poseían una precisión mucho más alta frente a otros medidores; así mismo, Löffler-Mang, Joss (2000) resaltan que la tecnología que emplean los disdrómetros ópticos mejora su resolución de medición.

Enfocándonos en la hipótesis específica referente a los parámetros integrales de lluvia, los valores tabulados para los 12 eventos, proporcionan información relevante acerca de las propiedades microfísicas del tipo lluvia, permitiendo evaluar cómo interactúan entre ellas. La distribución de probabilidad aplicada en estos parámetros, muestran que los valores obtenidos para los parámetros se asemejan estimado por Tokay et al. (2014), tomando en cuenta la metodología descrita en Tokay y Bashor (2010), que es la misma que se aplicó en investigaciones anteriores, así mismo, esta distribución permite observar y evaluar la concentración de los valores de estos parámetros, de modo que mejore la comprensión acerca de cómo se desarrollan y caracterizan.

En caso de la segunda hipótesis respecto a los parámetros del ajuste matemático gamma, se trabajó con el parámetro de forma, debido a su relación con la evaporación atmosférica, donde se obtuvieron valores cercanos al cero, lo cual indica que la presencia de evaporación no es tan intensa, a diferencia de lo

señalado por Kumar et al. (2020), esta diferencia es debido básicamente a el análisis del trabajo es a nivel superficial donde la acción del viento es menos intensa. Analizando la concentración de los valores del parámetro de forma, se observan valores de acuerdo a lo establecido por Ulbrich (1983).

Para la tercera hipótesis específica referente a la clasificación de lluvia. A partir de estos resultados se evidencia la existencia de eventos que no cumplen con alguno o ninguno de los requisitos para ser clasificados. De acuerdo a Chen, Yang, Pu (2013), se puede catalogar como eventos mixtos o de transición, a aquellos que cumplan un requisito de una categoría y cumplan el otro de la otra categoría. Respecto al caso de no cumplir ninguno de los requisitos, no entran en ninguna clasificación; ya que lo más probable se trate de un evento de precipitación diferente a la lluvia.

La zona de estudio presenta gran número de eventos estratiformes y mixtos, sin embargo, los eventos convectivos tienen mayor contribución al total de agua que llega a la superficie de discrepa a lo mencionado por Villalobos et al. (2019), donde señala una fuerte presencia de eventos convectivos típico de esta zona de los Andes. Esta diferencia es a causa de que existe una pérdida en la cantidad de lluvia (Silva et al. 2006).

La última hipótesis específica hace referencia a como los espectros de gotas cambian de acuerdo al tipo de evento de lluvia. La representación gráfica es a través del ajuste matemático gamma, de acuerdo a lo recomendado por Ulbrich (1983) y Ladino (2017).

Es a partir de estas representaciones gráficas, que se observa que, en muchos de los eventos observados, el límite del tamaño más grande para las concentraciones de gotas, se encuentra alrededor de los 4 mm de diámetro y velocidades de caída por debajo de los 5 m/s; lo cual indica que se encuentran dentro del rango normal en lo referente a que se trata de lluvias estratiformes conforme a lo mencionado por Houze (2014). Sin embargo, existen eventos donde se registraron gotas más grandes (alrededor de 4 a 6 mm de diámetro), de acuerdo a Bringi et al. (2003), en base a su tasa de lluvia son catalogados

como convectivas, esta idea es reforzada por lo estimado por Chen et al., (2013), que propone esquemas del espectro de gotas para estratiforme y convectivas, basadas en observaciones. Mientras que Kumar et al. (2020) indica que este crecimiento de gotas para la zona de estudio es afectado por el proceso de colisión-coalescencia, que es propio de eventos convectivos.

Es necesario resaltar que la mayoría de eventos son estratiformes; por ende, las gotas de lluvia no son de gran tamaño; a esto se añade la presencia del proceso de ruptura que reduce el volumen de la gota durante su caída y que tienen una fuerte incidencia en las lluvias propias del valle del río Mantaro señalado por Kumar et al. (2020). Todos estos factores hacen que la mayor parte de gotas a nivel superficial se encuentren por debajo de los 4 mm de diámetro, y que caracteriza a las lluvias estratiformes.

Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García (2021), hace hincapié en este tema del tamaño de gotas relacionándolo con los parámetros del ajuste gamma, así mismo, señala que en eventos de gotas pequeñas las tasas de lluvia son bajas propias de eventos estratiformes y para convectivas es caso contrario. Todo se refleja en los resultados obtenidos de la presente investigación.

En base a todo lo mencionado, se ha comprobado que lo planteado en la hipótesis específicas se ha cumplido, y para el caso de la hipótesis general se observa que lo descrito conforma la caracterización de los eventos de lluvia a través del análisis de sus propiedades microfísicas, proporcionando información detallada del evento de lluvia.

6.2 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Se consideró el código de ética en investigación RDU N° 210-2017-CU de la Universidad Nacional del Callao.

En el presente trabajo se toma los siguientes puntos:

- No se falsificó ni inventó datos o resultados total o parcialmente.
- Se respetó los derechos de autoría y propiedad intelectual.
- Se usó procedimientos e instrumentos estandarizados.

- Se redactó claramente y entendible.

VII. CONCLUSIONES

La investigación comienza con el análisis de los parámetros integrales de lluvia, donde se observa que la intensidad de lluvia, la reflectividad y el contenido de agua líquida está sujeta al tipo de lluvia y a la variación del total de lluvia acumulada, observándose eventos con diversas tasas de lluvia, tanto inferiores a los 2 mm/h hasta valores cercanos a los 20 mm/h, lo cual influye en los valores de los parámetros de reflectividad y contenido de agua líquida. Así mismo, se refleja que, en gran parte de los eventos, la cantidad de lluvia acumulada presenta una relación proporcionalmente directa respecto al tiempo de ocurrencia del evento, salvo ciertos casos que no obedecen esta relación, dando a entender que existe varios tipos de lluvia en el periodo evaluado.

En relación a los parámetros del ajuste matemático gamma empleado, el análisis respecto al parámetro de forma (μ), muestra valores en su mayoría igual a cero, con ciertos casos donde el valor es positivo, indicando que existe una tendencia a la evaporación de gotas pero que no es muy marcada, lo cual se refleja en todos los eventos analizados.

En lo concerniente a la clasificación de la lluvia, se observó que existe una predominancia de eventos estratiformes, seguido por los mixtos y muy pocos eventos convectivos. Sin embargo, los eventos convectivos son los que más aportan lluvia pese a tener un tiempo de duración corto, en comparación con los eventos estratiformes que presentan tiempos de duración largos (13 horas aproximadamente) para presentar un acumulado de lluvia representativo, pero pese a ello no igual a los eventos convectivos. Así mismo, se observó la presencia de un grupo de eventos que no entraban dentro de las categorías empleadas, los cuales fueron catalogados como llovizna, debido a que el total de lluvia y la intensidad de lluvia eran muy baja.

La representación gráfica de la distribución del tamaño de gota, refuerza la clasificación realizada en base a la intensidad de lluvia, así mismo, permite identificar los umbrales respecto al tamaño de gotas, señalando que en eventos estratiformes predominan gotas por debajo de los 2 mm de diámetro y con una

velocidad inferior a los 5 m/s. Estos valores se incrementan en eventos mixtos, donde se evidencia aumento gotas con diámetros por debajo de los 4 mm y la velocidad se incrementa hasta alrededor de los 7 m/s. En el caso de los eventos convectivos se observa gotas con tamaños que pueden llegar entre 6 y 8 mm de diámetro y velocidades en torno a los 10 m/s.

En base a todo lo mencionado, se puede concluir que el estudio ofrece una descripción acerca de las propiedades microfísicas de la lluvia, que permiten entender y caracterizar los eventos de lluvia, con la finalidad de ampliar los conocimientos acerca de del proceso de ocurrencia de la lluvia.

VIII. RECOMENDACIONES

Una forma de ampliar la información de los parámetros integrales de lluvia, es mediante el cálculo de los promedios ponderados del diámetro tanto de volumen y de masa de las gotas de lluvia. Con la finalidad de mejorar la precisión de los umbrales que segmentan los tipos de lluvia.

Respecto al ajuste matemático, resultaría de utilidad emplear otro tipo de ajuste como es el caso de gamma normalizado, y poder evidenciar si existe cambio en la tabulación de los parámetros.

En lo concerniente a la caracterización de los eventos de lluvias, se observan pocos eventos convectivos, por ello sería necesario ampliar la delimitación temporal con el fin de registrar y caracterizar más eventos, inclusive se podría enfocar espacios de tiempo relacionados a la ocurrencia de fenómenos como el niño, la niña, entre otros.

En caso de la representación gráfica de los espectros de gotas, se recomienda hacer una evaluación durante todo el evento y evidenciar como el espectro va cambiando conforme la intensidad de lluvia varia, de tal forma se pueda observar otras peculiaridades.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ADIROSI, Elisa, BALDINI, Luca and TOKAY, A. L.I., 2020. Rainfall and DSD parameters comparison between micro rain radar, two-dimensional video and parsivel2 disdrometers, and S-band dual-polarization radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. Vol. 37, no. 4, pp. 621–640. DOI 10.1175/JTECH-D-19-0085.1.

ATLAS, David and ULBRICH, Carlton, 2006. Drop size spectra and integral remote sensing parameters in the transition from convective to stratiform rain. *Geophysical Research Letters*. 1 August 2006. Vol. 33, no. 16. DOI 10.1029/2006GL026824.

BEARD, K. V., 1976. Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1976. Vol. 33, pp. 851–864.

BRINGI, V. N., CHANDRASEKAR, V., HUBBERT, J., GORGUCCI, E., RANDEU, W. L. and SCHOENHUBER, M., 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2003. Vol. 60, no. 2, pp. 354–365. DOI 10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2.

CHEN, Baojun, YANG, Jun and PU, Jiangping, 2013. Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution in the Meiyu Season Observed in Eastern China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Online. 2013. Vol. 91, no. 2, pp. 215–227. DOI 10.2151/jmsj.2013-208.

CHEN, Fengjiao, ZHENG, Xiaoyi, WEN, Huayang and YUAN, Ye, 2022. Microphysics of Convective and Stratiform Precipitation during the Summer Monsoon Season over the Yangtze–Huaihe River Valley, China. *Journal of Hydrometeorology*. 2022. Vol. 23, no. 2, pp. 239–252. DOI 10.1175/JHM-D-21-0078.1.

DEL CASTILLO, Carlos Manuel, 2019. *Evaluación de los algoritmos del GPM para estimar los parámetros DSD usando múltiples observaciones in situ sobre el Observatorio de Huancayo , Junín-Perú*. Online. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Retrieved from: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4778>

FLORES-ROJAS, José Luis, SILVA, Yamina, SUÁREZ-SALAS, Luis, ESTEVAN, René and VALDIVIA-PRADO, Jairo, 2021. Analysis of Extreme Meteorological Events in the Central Andes of Peru Using a Set of Specialized Instruments. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, pp. 1–29. DOI <https://doi.org/10.3390/atmos12030408>.

FØRLAND, E.J., ALLERUP, P., DAHLSTRÖM, B., ELOMAA, E., JONSSON, T., MADSEN, H., PERÄLÄ, J., RISSANEN, P., VEDIN, H. and VEJEN, F., 1996. *Manual for operational correction of Nordic precipitation data*. . 1996. ISBN 24/96.

HOUZE, Robert A., 2014. *Cloud Dynamics*. ISBN 9788578110796.

IGP, 2005. *Atlas Climático de Precipitación y Temperatura del Aire en la Cuenca del Río Mantaro*. . 2005. Lima, Perú: Instituto geofísico del Perú - IGP. ISBN 9972824136.

IPCC, 2022. *Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability*.

JWA, Minchae, JIN, Han Gyul, LEE, Joohyun, MOON, Sungju and BAIK, Jong Jin, 2021. Characteristics of Raindrop Size Distribution in Seoul, South Korea According to Rain and Weather Types. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2021. Vol. 57, no. 3, pp. 605–617. DOI 10.1007/s13143-020-00219-w.

KUMAR, Shailendra, DEL CASTILLO, Carlos, VALDIVIA, Jairo, FLORES, José, CALLAÑAUPA, Stephany, MOYA, Aldo, VILLALOBOS, Elver, MARTINEZ, Daniel and SILVA, Yamina, 2020. Rainfall characteristics in the central Andes of Peru from a vertically pointed profile rain radar and in- situ field campaign. *Atmosphere*. 2020. pp. 1–39.

LADINO, Alfonso, 2017. *Caracterización de la microfísica de la precipitación mediante información de disdrómetros y radar polarimétrico para las estimación cuantitativa de lluvia en el área metropolitana del valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.

LANZA, L., LEROY, M., ALEXANDROPOULOS, C. and WAUBEN, W., 2005. *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges*. . 2005. World Meteorological Organization - WMO.

LIANG, Shunlin and WANG, Jindi, 2019. *Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications*. Second. Elsevier. ISBN 9780128158265.

LÖFFLER-MANG, Martin and JOSS, Jürg, 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2000. Vol. 17, no. 2, pp. 130–139. DOI 10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2.

MICHAELIDES, S., LEVIZZANI, V., ANAGNOSTOU, E., BAUER, P., KASPARIS, T. and LANE, J. E., 2009. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*. Online. 2009. Vol. 94, no. 4, pp. 512–533. DOI 10.1016/j.atmosres.2009.08.017.

MICHELSON, Daniel B., 2004. Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. *Journal of Hydrology*. 2004. Vol. 290, no. 3–4, pp. 161–177. DOI 10.1016/j.jhydrol.2003.10.005.

MINAGRI, 2012. *Plan de Gestión de Riesgo y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario, Período 2012-2021*. Lima, Perú.

MINAM, 2016. El Perú y el Cambio Climático Cambio Climático El Perú y el Cambio Climático Tercera Comunicación. *Ministerio del Ambiente*. 2016. pp. 329.

MONTERO-MARTÍNEZ, Guillermo, GÓMEZ-BALVÁS, Sheccid Sarai and GARCÍA-GARCÍA, Fernando, 2021. Study of rain classification and the tendency of gamma DSD parameterizations in Mexico. *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 252, no. October 2020. DOI 10.1016/j.atmosres.2020.105431.

ORESQUES, Naomi, 2004. The scientific consensus on climate change. *Science*. 2004. Vol. 306, no. 5702, pp. 1686.

OTT HYDROMET, 2016. *Operating instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2* Online. [Accessed 21 July 2022]. Retrieved from: www.ott.com/resources

RAIG, 2022. Pluviómetro Stratus 280mm de capacidad. Online. 2022. [Accessed 23 July 2022]. Retrieved from: <https://www.raig.com/pluviometro-stratus-280mm-de-capacidad-b31c/>

SENAMHI, 2010. *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire*. . 2010. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

SENAMHI, 2013. *Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro, Junín*. . 2013. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales - PRAAPERÚ.

SILVA, Y., TAKAHASHI, K. and CHÁVEZ, R., 2008. Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 14, pp. 261–264. DOI 10.5194/adgeo-14-261-2008.

SILVA, Yamina, TAKAHASHI, Ken, CRUZ, Nicolas, TRASMONTÉ, Grace, MOSQUERA, Kobi, NICKL, Elsa, CHAVEZ, Raul, SEGURA, Berlin and LAGOS, Pablo, 2006. Variability and Climate Change in the Mantaro River Basin, Central Peruvian Andes. *Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil*. 2006. No. INPE, pp. 407–419.

SILVA, Yamina, TRANSMOTE, Grace and GIRÁLDEZ, Lucy, 2010. Variabilidad de las Precipitaciones en el Valle del Río Mantaro. *Instituto Geofísico del Perú*. 2010. pp. 54–58.

SUN, Jiming and ARIYA, Parisa A., 2006. Atmospheric organic and bio-aerosols as cloud condensation nuclei (CCN): A review. *Atmospheric Environment*. 1 February 2006. Vol. 40, no. 5, pp. 795–820. DOI 10.1016/J.ATMOSENV.2005.05.052.

THORNTON, 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*. 1948. Vol. 38, no. 1, pp. 55–94. DOI 10.1016/0022-3115(71)90076-6.

TOKAY, Ali and BASHOR, Paul G., 2010. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. Vol. 49, no. 11, pp. 2348–2365.

DOI 10.1175/2010JAMC2269.1.

TOKAY, Ali, WOLFF, David B. and PETERSEN, Walter A., 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. Vol. 31, no. 6, pp. 1276–1288. DOI 10.1175/JTECH-D-13-00174.1.

ULBRICH, Carlton, 1983. Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1983. Vol. 22, pp. 1764–1775.

VALDIVIA, Jairo M., 2022. parsivel2/find_events.m at master · JValdivia23/parsivel2 · GitHub. Online. 2022. [Accessed 8 October 2022]. Retrieved from: https://github.com/JValdivia23/parsivel2/blob/master/find_events.m

VALDIVIA, Jairo M., CONTRERAS, Kevin, MARTINEZ-CASTRO, Daniel, VILLALOBOS, Elver, CHAVEZ, Steven, SUAREZ, Luis F. and SILVA, Yamina, 2020. Dataset on raindrop size distribution, raindrop fall velocity and precipitation data measured by disdrometers and rain gauges over Peruvian central Andes (12.0°S). *Data in Brief*. Online. 2020. Vol. 29, pp. 105215. DOI 10.1016/j.dib.2020.105215.

VALDIVIA, Jairo M., SCIPIÓN, Danny E., MILLA, Marco and SILVA, Yamina, 2020. Multi-Instrument Rainfall-Rate Estimation in the Peruvian Central Andes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. Vol. 37, pp. 1811–1826. DOI 10.1175/JTECH-D-19-0105.1.

VALENCIA LEGUIZAMON, Juliana and TOBÓN MARÍN, Conrado, 2017. Influence of vegetation on the hydrological functioning of tropical high mountain wetlands basins. *Ecosistemas*. 2017. Vol. 26, no. 2, pp. 10–17. DOI 10.7818/ecos.2017.26-2.02.

VILLALOBOS, Elver E, MARTINEZ-CASTRO, Daniel, KUMAR, Shailandra, SILVA, Yamina and FASHE, Octavio, 2019. Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM. *Revista Cubana de Meteorología*. Online. 2019. Vol. 25, no. 1, pp. 59–75. Retrieved from: <http://opn.to/a/tG8c1>

VILLÓN, Máximo, 2009. *Hidrología*. Segunda Ed. Lima, Perú. ISBN 958-95741-1-1.

VINSON, Jean-paul, BARTHES, Laurent, OGDEN, Fred, CREUTIN, Jean-dominique, GOLÉ, Peter, KRUGER, Anton, DELAHAYE, Jean-yves, CARACCILO, Clelia, NIKOLOPOULOS, Efthymios I and KRAJEWSKI, Witold F., 2005. DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basic results and implications for hydrologic studies. *Advances in Water Resources*. 2005. Vol. 29, no. 2, pp. 311–325. DOI 10.1016/j.advwatres.2005.03.018.

WEN, Long, ZHAO, Kun, ZHANG, Guifu, XUE, Ming, ZHOU, Bowen, LIU, Su and CHEN, Xingchao, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions

observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Online. 16 March 2016. Vol. 121, no. 5, pp. 2265–2282. [Accessed 21 July 2022]. DOI 10.1002/2015JD024160.

WMO, 2014. Measurement of Precipitation. In: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 8a Ed. World Meteorological Organization - WMO. pp. 185–219.

YUTER, Sandra E., KINGSMILL, David E., NANCE, Louisa B. and LÖFFLER-MANG, Martin, 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45, no. 10, pp. 1450–1464. DOI 10.1175/JAM2406.1.

VIII ANEXOS

ANEXO I

Tabla 12. Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES
¿Cómo se caracteriza los eventos de lluvia a partir del análisis de la microestructura de gotas, ocurridos en el Observatorio de Huancayo?	Caracterizar los eventos de lluvia a partir el análisis de la microestructura de gotas, ocurridos en el Observatorio de Huancayo.	Los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo, se caracterizan mediante el análisis de la microestructura de gotas.	Eventos de lluvia	Análisis de las mediciones de distribución de tamaño de gotas, a través de los parámetros integrales de lluvia y el espectro de gotas (Chen, Yang, Pu 2013; Wen et al. 2016; Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021)	Ajuste matemático de la DSD	Parámetro de forma y pendiente
PROBLEMA ESPECIFICO	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS			Parámetros integrales de lluvia	Reflectividad
¿Cómo se estiman los parámetros integrales de la lluvia a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia?	Estimar los parámetros integrales de lluvia a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia	Los parámetros integrales de lluvias se calculan a partir de mediciones de distribución de tamaño de gotas de lluvia.				Intensidad de lluvia
¿Qué información proporciona los parámetros del ajuste matemático aplicados a la distribución de tamaño de gotas de lluvia acerca de la evaporación, de la	Determinar los valores de los parámetros del ajuste matemático aplicado a la distribución de tamaño de gotas de lluvia, para obtener información acerca d	Los parámetros del ajuste matemático aplicado a la distribución de tamaño de gotas de lluvia, proporciona información acerca de la evaporación, de la concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro.		Concentración de gotas		
					Contenido de agua líquida	

concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro?	de la evaporación, de la concentración, tamaño y tipo de hidrometeoro.					
¿Cómo se clasifican los eventos de lluvia en base a la intensidad de lluvia y desviación estándar?	Clasificar los eventos de lluvia, por medio de la intensidad de lluvia y desviación estándar	Las lluvias se clasifican en estratiforme, convectiva y mixta, utilizando la intensidad de lluvia y desviación estándar.	Microestructura de los eventos de lluvia	Proceso que busca clasificar y comprender los eventos de lluvia; así mismo, permite la identificación los tipos de hidrometeoro presentes (Bringi et al. 2003; Houze 2014; Montero-Martínez, Gómez-Balvás, García-García 2021).	Clasificación de los eventos de lluvia	Tasa de lluvia y desviación estándar
						Mediciones de DSD
¿Cómo cambian los espectros de gotas de lluvia de acuerdo al tipo de lluvia?	Determinar el cambio del espectro de gotas de lluvia de acuerdo al tipo de lluvia.	Los espectros de gotas cambian de acuerdo al tipo de evento de lluvia.			Espectro de gotas	Diámetro
						Velocidad de caída
						Concentración de gotas

ANEXO II

Instrumento de recolección de datos: Reporte de Datos

Tabla 13. Reporte de Datos Pluviómetros

Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	Precipitación (mm)
2018	08	01	00	00	00	
2018	08	01	00	01	00	
2018	08	01	00	02	00	
.	
.	
.	
2020	04	30	23	57	00	
2020	04	30	23	58	00	
2020	04	30	23	59	00	

Tabla 14. Reporte de Datos Disdrómetros ópticos

Fecha	Hora	Intensidad de lluvia (mm/h)	Velocidad de Caída (m/s)	Diámetro de gota (mm)
2018/08/01	00:00:00			
2018/08/01	00:01:00			
2018/08/01	00:02:00			
.	.			
.	.			
.	.			
2020/04/30	23:57:00			
2020/04/30	23:58:00			
2020/04/30	23:59:00			

ANEXO III

Constancia de mantenimiento, calibración y buen estado de los equipos de medición.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Subdirección de Ciencias
de la Atmósfera e Hidrósfera

CONSTANCIA

Por la presente dejamos constancia que nuestros equipos instalados en el Observatorio de Huancayo: **Pluviómetros y Disdrómetros ópticos (OTT Parsivel²)**, se encuentran bajo un **programa de mantenimiento** a cargo del personal de investigación del Instituto Geofísico del Perú.

Se emite el siguiente documento con fines académicos que acredite el **buen funcionamiento y óptimo estado** de los equipos, y que los datos recogidos siguen los estándares de medición.

Lima, 22 de agosto del 2022

Ing. Jairo Michael Valdivia Prado
Investigador - IGP



Firmado digitalmente por:
VALDIVIA PRADO Jairo
Michael FAU 20131387008 soft
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 23/08/2022 10:54:00 AM



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

ANEXO IV

Artículo de la validación y publicación de los datos de los disdrómetros pertenecientes a LAMAR

Data in brief 29 (2020) 105215



Contents lists available at ScienceDirect

Data in brief

journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib



Data Article

Dataset on raindrop size distribution, raindrop fall velocity and precipitation data measured by disdrometers and rain gauges over Peruvian central Andes (12.0°S)



Jairo M. Valdivia*, Kevin Contreras, Daniel Martinez-Castro, Elver Villalobos-Puma, Luis F. Suarez-Salas, Yamina Silva

Instituto Geofísico del Perú, Peru

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 November 2019
Received in revised form 21 January 2020
Accepted 23 January 2020
Available online 31 January 2020

Keywords:

DSD
Disdrometer
In situ atmospheric observations
Huancayo observatory

ABSTRACT

This dataset includes data obtained at the Atmospheric Microphysics and Radiation Laboratory (LAMAR) of the Huancayo Observatory (12.04° S, 75.32° W, 3313 m ASL). Two Parsivel2 and two tipping bucket rain gauges are used in this dataset which are operating together since 2018. Data is given in NetCDF format, including two types of files, one NetCDF for precipitation totals and another which contains Parsivel2 data. This data set was collected in the complex topography conditions of the tropical Andes, and its potential use is to study the microphysics of orographic rainfall, atmospheric models and rainfall estimation algorithms.

© 2020 Geophysical Institute of Peru. Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Data

All the data was automatically collected by the disdrometers and rain gauges. Two optical disdrometers Parsivel2 and two tipping-bucket rain gauges are used. The Parsivel2, manufactured by OTT, measured the size and velocity of hydrometeors [1]. The sampling output interval is 1 min, it is recorded as a plain text and then are converted to NetCDF. Parsivel2 outputs the drops data in a 32 × 32

* Corresponding author.
E-mail address: jvaldivia@igpp.gob.pe (J.M. Valdivia).

Specifications Table

Subject	Atmospheric Science, Meteorology
Specific subject area	Rainfall microphysics, raindrop sizes and fall velocities
Type of data	Numerical matrix (NetCDF)
How data were acquired	Table Laser-Optical Disdrometer, OTT Parsivel2
Data format	Tipping-bucket rain gauge, Texas Electronics, Model No.: TE525 Tipping-bucket rain gauge, Hyquest Solutions, Model No.: CS700 Raw
Parameters for data collection	The instruments were installed in an open field between 1 and 2 m of distance above the ground.
Description of data collection	The instruments are automatic and operates full time. The data collection only stops when there are electrical problems in the observatory.
Data source location	Huancayo Observatory - Instituto Geofísico del Perú Mantaro river valley, Junín Perú
Data accessibility	Latitude and longitude: 12°02'18"S, 75°19'22"W Raindrop size distribution and precipitation over Peruvian central Andes (12.0°S) 10.5281/zenodo.3497564 : https://sciah.igp.gob.pe/sites/datos/PP_prods/

Value of the Data

- It is the only in situ dataset of drop size distribution over the tropical central Andes. Precipitation measurements over the Andes are scarce, particularly at high time resolution.
- These data can be used by scientists and academic community interested in studying rain microstructure, atmospheric models and rainfall estimation algorithms.
- This data is useful to evaluate the performance of high resolution atmospheric models, and to evaluate quantitative precipitation estimation algorithms.

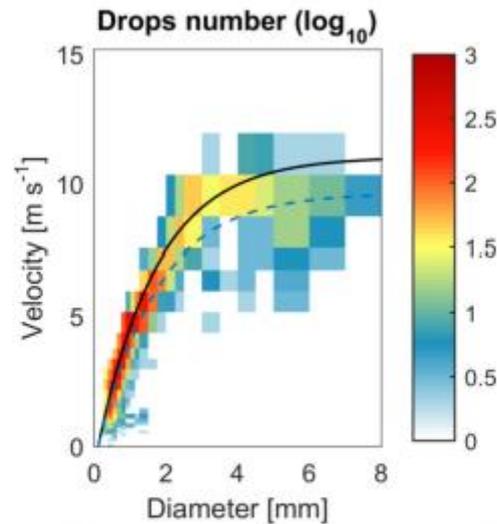


Fig. 1. Example of Parsivel2 raw output. Drops number in a matrix of diameter versus velocity. The black line indicates the theoretical relationship based on [4] data and the blue dashed line same as black but the air dependence is corrected for 3300 m ASL following [5,6].

Table 1
Parsivel2's NetCDF structure. (view from the terminal and ncdump tool).

```
jvaldivia@IGPmaster2:/data/datos/LAMAR/PP_prods/PSV_nc/PSVa > ncdump -h PARSIVEL_20190301.nc
netcdf PARSIVEL_20190301 {
  dimensions:
    time = UNLIMITED; //(1440 currently)
    D = 32; vel = 32;
  variables:
    double time(time);
      time:long_name = "Days since 01.01.0000 00:00 UTC (MatLab format)";
      time:units = "days";
    float D(D);
      D:long_name = "Drop diameter bin centered";
      D:units = "mm";
    float vel(vel);
      vel:long_name = "Drop velocity";
      vel:units = "m/s";
    float RR(time);
      RR:long_name = "Rain Rate";
      RR:units = "mm/h";
    float Z(time);
      Z:long_name = "Radar Reflectivity Factor Z";
      Z:units = "dBZ";
    float SYNOP4680(time);
      SYNOP4680:long_name = "Weather code acc. to SYNOP; Table 4680";
      SYNOP4680:units = " ";
    float SYNOP4677(time);
      SYNOP4677:long_name = "Weather code acc. to SYNOP; Table 4677";
      SYNOP4677:units = " ";
    float Nd(time, D);
      Nd:long_name = "Drop density";
      Nd:units = "log 1/m3 mm";
    float raw(time, D, vel);
      raw:long_name = "Raw data";
      raw:units = "1";
    float dsread(D);
      dsread:long_name = "Bin class spread diameter";
      dsread:units = "mm";
    float vsread(vel);
      vsread:long_name = "Bin class spread velocity";
      vsread:units = "mm";
}
```

matrix of size versus velocity (see Fig. 1). Additionally, rainfall rate, radar reflectivity and others rain parameters are computed from drop size distribution by the Parsivel2 internal software. Each Parsivel2's NetCDF has the structure as is shown in Table 1. The time in this dataset is in the Matlab format (i.e. number of days since 01-01-0000 UTC), the bin class diameter D and bin class velocity vel of the raw data matrix are in mm and ms^{-1} , respectively. The rain rate and the radar reflectivity factor are mmh^{-1} and dBZ (or $10 \times \log_{10}[mm^6 m^{-3}]$), respectively. The SYNOP4680 and SYNOP4677 are weather code according to tables 4680 and 4677 of World Meteorological Organization (WMO). The Drop density N_d of the drop size distribution (i.e. number of drops per meter cube and class spread) is in $\log m^{-3} mm^{-1}$. The bin class spread diameter $dsread$ and bin class spread velocity $vsread$ are in mm and ms^{-1} , respectively.

The total rainfall registered by all the instruments (i.e., both Parsivel2 and both rain gauges) are given in another NetCDF which his structure is shown in Table 2. In the same way, the time in these files is in the Matlab format. The precipitation measured by the rain gauges, pp_pluv_meteo and pp_pluv_exper , are in mm (which represent the precipitation measured in each minute). The precipitation measured by both Parisvel2, $pp_parsivel2_a$ and $pp_parsivel2_b$, are in mm as well.

All the NetCDF in this database contains a day of data.

Table 2
Total rainfall NetCDF structure.

```

jvaldivia@IGPmaster2:/data/datos/LAMAR/PP_prods/PP_dia > ncdump -h PP20180805.nc netcdf PP20180805 {
dimensions:
time = 1440;
variables:
double time(time);
time:units = "formato numerico";
double pp_pluv_meteo(time);
pp_pluv_meteo:long_name = "Total de precipitacion - Pluviometro Meteorologico";
pp_pluv_meteo:units = "mm";
double pp_pluv_exper(time);
pp_pluv_exper:long_name = "Total de precipitacion - Pluviometro Experimental";
pp_pluv_exper:units = "mm";
double pp_parsivel2_a(time);
pp_parsivel2_a:long_name = "Total de precipitacion - Parsivel2 - a";
pp_parsivel2_a:units = "mm";
double pp_parsivel2_b(time);
pp_parsivel2_b:long_name = "Total de precipitacion - Parsivel2 - b";
pp_parsivel2_b:units = "mm";
}

```

2. Experimental design, materials, and methods

Both Parsivel2 and both rain gauges used in this database are installed in the Huancayo Observatory of the Instituto Geofísico del Perú (12.04° S, 75.32° W, 3313 m ASL), located in the Mantaro valley, in the central Andes of Peru at 12 km from Huancayo city, between the western Andean Cordillera and the Huaytapallana Cordillera to the east. Annual rainfall climatology at this location is 700 mm and it is characterized as being dry in winter (austral) and rainy in summer. According to Köppen-Geimer classification [2], Mantaro valley has an arid cold steppe climate.

The retrieval of drop size distribution (DSD) of Parsivel2 has been evaluated by Ref. [3]. The raw output is the number of drops at the i^{th} size and j^{th} velocity bin (C_{ij}), and DSD is calculated as

$$N(D) = \frac{1}{\text{Time}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{ij}}{v_t \text{Area}(D_i) \Delta D_i},$$

where, ΔD_i is the width of the i^{th} size bin; and n and m are the size and velocity bins, respectively, and both are equal to 32. $\text{Area}(D_i)$, the effective sampling area is calculating considering partially detected drops across Parsivel2's laser sheet and is equal to $180\text{mm} \times (130\text{mm} - D_i/2)$. v_t is the measured raindrop fall speed at the j^{th} velocity bin. Fig. 1 shows how the Parsivel2 raw output data looks like. A MATLAB toolbox to manipulate the Parsivel2 data is available at <https://github.com/JValdivia23/parsivel2> [7].

Acknowledgments

Thanks to Instituto Geofísico del Perú staff for their help with instruments maintenance. Present dataset comes under the project "Magnet-IGP: Strengthening the research line in physics and micro-physics of the atmosphere (Agreement N 010-2017-FONDECYT)". This work was done using the computational resources, HPC-Linux Cluster, from the Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacionales at Instituto Geofísico del Perú (grants 101-2014-FONDECYT, SPIRALES2012 IRD-IGP, Manglares IGP-IDRC, PPO68 program).

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105215>.

References

- [1] M. Löffler-Mang, J. Joss, An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 17 (2000) 130–139, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2).
- [2] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (2007) 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [3] A. Tokay, D.B. Wolff, W.A. Petersen, Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 31 (2014) 1276–1288, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1>.
- [4] R. Gunn, G.D. Kinzer, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *J. Meteorol.* 6 (2002) 243–248, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0243:ttvoff>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0243:ttvoff>2.0.co;2).
- [5] G.B. Foote, P.S. Du Toit, Terminal velocity of raindrops Aloft, *J. Appl. Meteorol.* 8 (1969) 249–253, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0249:TVORA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0249:TVORA>2.0.CO;2).
- [6] D. Atlas, R.C. Srivastava, R.S. Sekhon, Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Rev. Geophys.* 11 (1973) 1, <https://doi.org/10.1029/RG011i001p00001>.
- [7] J.M. Valdivia, *JValdivia23/parsivel2: OTT Parsivel2 toolbox*, 2019, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3471885>.

ANEXO V

Valores del promedio de la intensidad de lluvia y desviación estándar por cada evento de lluvia, para su clasificación

Tabla 15 Eventos registrados por el psv2a

Fecha	Promedio de intensidad de lluvia	Desviación estándar	Clasificación
01-08-2018	2.49	1.87	S-C
05-08-2018	2.38	3.82	S-C
07-08-2018	3.15	8.06	S-C
08-08-2018	0.34	0.48	NO
15-09-2018	15.51	23.83	C
24-09-2018	2.15	2.71	S-C
27-09-2018	2.67	4.85	S-C
03-10-2018	12.45	17.37	C
03-10-2018	2.12	2.53	S-C
04-10-2018 05-10-2018	0.23	0.26	NO
07-10-2018	2.83	4.15	S-C
13-10-2018	0.45	1.26	NO
14-10-2018	2.42	2.45	S-C
14-10-2018	0.23	0.54	NO
15-10-2018	1.23	1.94	S-C
16-10-2018	1.49	2.69	S-C
17-10-2018 18-10-2018	0.74	1.29	S
15-11-2018	0.59	1.13	S
15-11-2018	4.59	12.38	S-C
19-11-2018	1.60	1.70	S-C
19-11-2018	1.78	1.32	S
26-11-2018	1.18	1.58	S-C
16-12-2018 17-12-2018	1.96	2.01	S-C
17-12-2018	0.71	0.49	S
18-12-2018	1.21	1.06	S
20-12-2018	1.58	1.58	S-C
24-12-2018	0.79	0.71	S
31-12-2018	1.13	2.24	S-C
15-01-2019 16-01-2019	0.62	1.03	S
16-01-2019 17-01-2019	0.60	0.84	S
18-01-2019	0.44	0.66	NO
19-01-2019	1.47	1.44	S
21-01-2019	0.40	0.48	NO
21-01-2019	0.38	0.54	NO
22-01-2019 23-01-2019	0.47	1.19	NO
23-01-2019	1.36	2.07	S-C
05-02-2019	0.78	1.37	S
05-02-2019	0.57	1.34	S
06-02-2019 07-02-2019	1.54	1.04	S

07-02-2019	0.65	0.53	S
09-02-2019	0.44	0.45	NO
10-02-2019	0.99	1.18	S
11-02-2019	0.94	0.68	S
11-02-2019 12-02-2019	0.87	1.02	S
12-02-2019 13-02-2019	0.70	0.72	S
13-02-2019	0.42	0.35	NO
14-02-2019	1.41	1.47	S
15-02-2019	0.55	0.45	S
19-02-2019 20-02-2019	0.81	0.83	S
25-02-2019	0.85	3.31	S-C
26-02-2019	0.65	0.71	S
04-03-2019 05-03-2019	0.95	1.16	S
06-03-2019	0.34	0.79	NO
07-03-2019	0.43	0.33	NO
07-03-2019	6.85	12.19	C
07-03-2019	1.43	2.30	S-C
08-03-2019	0.99	0.83	S
09-03-2019	1.91	2.74	S-C
09-03-2019 10-03-2019	0.23	0.31	NO
10-03-2019 11-03-2019	1.12	2.10	S-C
12-03-2019	0.76	1.15	S
14-03-2019 15-03-2019	1.19	0.98	S
15-03-2019	0.47	0.66	NO
18-03-2019	1.29	1.29	S
21-03-2019 22-03-2019	0.47	0.57	NO
22-03-2019	0.55	0.94	S
23-03-2019 24-03-2019	1.37	1.23	S
24-03-2019	0.88	2.08	S-C
26-03-2019	9.81	8.31	C
27-03-2019 28-03-2019	0.30	0.67	NO
28-03-2019	0.25	0.45	NO
29-03-2019	0.86	0.87	S
02-04-2019	1.65	4.49	S-C
02-04-2019	1.02	1.04	S
03-04-2019	8.49	9.97	C
10-04-2019	7.14	12.55	C
13-04-2019	2.71	6.29	S-C
17-04-2019	2.23	7.24	S-C
29-04-2019	0.58	0.87	S
30-04-2019	1.45	3.75	S-C
06-10-2019	10.60	23.15	C
17-10-2019	0.61	0.52	S
17-10-2019	2.03	3.07	S-C
18-10-2019	1.23	2.95	S-C
18-11-2019	1.38	1.13	S
18-11-2019 19-11-2019	0.98	0.67	S
21-11-2019	8.84	17.16	C
10-12-2019	4.00	7.91	S-C
10-12-2019 11-12-2019	1.53	1.81	S-C

12-12-2019	0.78	1.25	S
13-12-2019 14-12-2019	0.89	1.72	S-C
15-12-2019	3.62	2.77	S-C
15-12-2019	1.91	1.81	S-C
02-01-2020	0.89	0.57	S
02-01-2020 03-01-2020	0.41	0.60	NO
14-01-2020 15-01-2020	0.94	1.08	S
28-01-2020	0.78	0.97	S
30-01-2020	2.42	3.96	S-C
02-02-2020 03-02-2020	0.85	0.83	S
05-02-2020 06-02-2020	0.81	0.91	S
06-02-2020 07-02-2020	0.98	1.04	S
07-02-2020	2.70	4.27	S-C
08-02-2020	0.68	0.71	S
13-02-2020	1.42	0.76	S
11-03-2020	0.97	1.16	S
12-03-2020	1.44	3.01	S-C
13-03-2020 14-03-2020	1.44	1.79	S-C
18-03-2020	1.27	1.16	S
19-03-2020 20-03-2020	0.40	0.39	NO
21-03-2020 22-03-2020	0.48	0.49	NO
22-03-2020	1.02	4.22	S-C
28-03-2020	1.85	1.44	S
29-03-2020 30-03-2020	0.87	0.75	S
01-04-2020	0.25	0.39	NO
18-04-2020	2.43	3.51	S-C
18-04-2020	0.51	0.54	S

Nota: S = estratiforme, S – C = mixta o de transición, C = convectiva y NO = precipitación diferente a la lluvia.

Tabla 16 Eventos registrados por el psv2b

Fecha	Promedio de intensidad de lluvia	Desviación estándar	Clasificación
07-08-2018	3.67	8.04	S-C
08-08-2018	0.32	0.43	NO
15-09-2018	15.18	22.27	C
16-09-2018	2.81	3.06	S-C
22-09-2018	1.04	1.11	S
24-09-2018	1.74	1.61	S-C
29-09-2018	6.46	19.30	C
07-10-2018	0.73	1.51	S-C
15-11-2018	0.64	1.29	S
15-11-2018	4.21	9.82	S-C
19-11-2018	1.84	1.37	S
21-11-2018	6.45	9.38	C
26-11-2018	1.29	1.72	S-C
14-12-2018	3.42	6.89	S-C
16-12-2018 17-12-2018	2.21	2.32	S-C

17-12-2018	0.72	0.49	S
18-12-2018	1.25	1.13	S
20-12-2018	1.70	1.64	S-C
24-12-2018	0.91	0.84	S
31-12-2018	2.13	4.56	S-C
04-01-2019	1.05	1.66	S-C
10-01-2019 11-01-2019	0.56	0.86	S
11-01-2019	0.36	0.64	NO
12-01-2019 13-01-2019	0.33	0.67	NO
13-01-2019 14-01-2019	1.65	0.92	S
15-01-2019 16-01-2019	0.69	1.17	S
16-01-2019 17-01-2019	0.62	0.87	S
18-01-2019	0.44	0.69	NO
19-01-2019	1.60	1.63	S-C
21-01-2019	0.45	0.52	NO
21-01-2019	0.40	0.54	NO
22-01-2019 23-01-2019	0.51	1.42	S
23-01-2019	1.39	2.16	S-C
24-01-2019	2.54	3.74	S-C
24-01-2019 25-01-2019	0.62	0.89	S
26-01-2019 27-01-2019	0.88	1.82	S-C
27-01-2019	0.62	1.25	S
28-01-2019	5.30	4.57	C
29-01-2019 30-01-2019	1.58	1.03	S
30-01-2019 31-01-2019	1.11	1.62	S-C
31-01-2019	0.16	0.39	NO
01-02-2019	0.49	0.62	NO
02-02-2019	1.90	2.44	S-C
03-02-2019 04-02-2019	0.35	1.22	NO
04-02-2019	0.32	0.58	NO
05-02-2019	0.55	0.76	S
05-02-2019	0.87	1.53	S-C
05-02-2019	0.64	1.46	S
06-02-2019 07-02-2019	1.61	1.04	S
07-02-2019	0.70	0.60	S
09-02-2019	0.46	0.47	NO
10-02-2019	1.04	1.27	S
11-02-2019	0.99	0.68	S
11-02-2019 12-02-2019	0.89	1.14	S
12-02-2019 13-02-2019	0.72	0.70	S
13-02-2019	0.45	0.41	NO
14-02-2019	2.07	2.76	S-C
15-02-2019	0.60	0.53	S
19-02-2019 20-02-2019	0.91	0.88	S
25-02-2019	1.69	5.16	S-C
26-02-2019	0.69	0.79	S
05-03-2019	1.35	1.61	S-C
06-03-2019	0.30	0.90	NO
07-03-2019	0.63	0.23	S
07-03-2019	5.96	12.79	C

07-03-2019	1.75	2.65	S-C
09-03-2019	1.87	2.69	S-C
10-03-2019 11-03-2019	1.28	2.33	S-C
12-03-2019	0.80	1.07	S
14-03-2019 15-03-2019	1.19	0.83	S
18-03-2019	1.23	1.69	S-C
22-03-2019	0.70	1.15	S
23-03-2019 24-03-2019	1.46	1.41	S
24-03-2019	0.83	1.90	S-C
26-03-2019	10.13	9.86	C
27-03-2019 28-03-2019	0.53	1.21	S
28-03-2019	0.25	0.47	NO
29-03-2019	0.90	0.95	S
02-04-2019	2.33	5.46	S-C
03-04-2019	9.82	12.72	C
10-04-2019	6.23	15.88	C
13-04-2019	3.12	8.66	S-C
17-04-2019	2.00	3.15	S-C
20-09-2019	0.93	0.84	S
21-09-2019	0.33	0.41	NO
06-10-2019	10.63	24.55	C
17-10-2019	0.95	0.74	S
17-10-2019	2.05	3.09	S-C
18-10-2019	0.28	0.72	NO
31-10-2019	1.42	2.91	S-C
03-11-2019 04-11-2019	0.78	0.88	S
07-11-2019	0.41	1.36	NO
09-11-2019	0.35	0.43	NO
16-11-2019	9.85	11.18	C
17-11-2019	0.81	0.93	S
18-11-2019	1.39	1.28	S
18-11-2019 19-11-2019	1.07	0.75	S
21-11-2019	1.41	4.80	S-C
24-11-2019	0.97	1.51	S-C
04-12-2019	1.58	1.33	S
05-12-2019	0.40	0.87	NO
08-12-2019	1.74	1.25	S
10-12-2019	4.81	9.28	S-C
12-12-2019	0.52	1.05	S
13-12-2019	5.88	9.17	C
13-12-2019	1.41	2.21	S-C
15-12-2019	3.82	3.02	S-C
15-12-2019 16-12-2019	1.49	1.00	S
16-12-2019	0.43	0.68	NO
17-12-2019	9.67	17.13	C
18-12-2019	2.81	1.90	S-C
19-12-2019 20-12-2019	0.78	1.26	S
21-12-2019 22-12-2019	3.06	2.84	S-C
23-12-2019	3.19	2.97	S-C
24-12-2019	0.49	0.54	NO

26-12-2019	6.29	9.26	C
28-12-2019	14.61	28.03	C
29-12-2019	2.68	4.66	S-C
14-01-2020 15-01-2020	0.99	1.09	S
15-01-2020	1.65	0.84	S
18-01-2020	0.41	0.49	NO
19-01-2020	0.55	1.36	S
23-01-2020	1.94	1.52	S-C
26-01-2020	0.50	1.57	S-C
28-01-2020	0.77	1.08	S
30-01-2020	3.12	4.59	S-C
02-02-2020 03-02-2020	0.90	0.98	S
05-02-2020 06-02-2020	0.91	1.19	S
06-02-2020 07-02-2020	1.06	1.09	S
07-02-2020	2.30	2.89	S-C
08-02-2020	0.87	0.90	S
13-02-2020	1.54	0.89	S
14-02-2020	5.95	7.49	C
19-02-2020	1.89	1.59	S-C
22-02-2020	0.37	0.62	NO
04-03-2020	2.13	6.25	S-C
09-03-2020	7.90	16.48	C
11-03-2020	0.97	1.19	S
12-03-2020	4.37	4.42	S-C
13-03-2020 14-03-2020	2.86	2.57	S-C
18-03-2020	1.40	1.40	S
19-03-2020 20-03-2020	0.29	0.37	NO
21-03-2020 22-03-2020	0.57	0.57	S
22-03-2020	1.05	4.70	S-C
23-03-2020	0.49	0.67	NO

Nota: S = estratiforme, S – C = mixta o de transición, C = convectiva y NO = precipitación diferente a la lluvia.