**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**



**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“MICROESTRUCTURA DE LOS EVENTOS DE LLUVIA OCURRIDOS EN EL TEMPORAL DE LLUVIAS 2018 – 2019 SOBRE EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO, JUNÍN-PERÚ”**

**CONTRERAS REYNAGA, KEVIN IRWING**

**Callao, 2020**

**PERÚ**

**INFORMACIÓN BÁSICA**

FACULTAD

Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Meteorología y Ciencias Atmosféricas

TÍTULO

Comportamiento y Microestructura de la Lluvia en el Valle del Río Mantaro

AUTOR (es)

Kevin Contreras Reynaga

ASESOR INTERNO

Mg. Ena María Jaimes Espinoza

ASESOR EXTERNO

Ph.D. Daniel Martínez Castro

LUGAR DE EJECUCIÓN

Observatorio de Huancayo – Instituto Geofísico del Perú (IGP)

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Descriptivo

UNIDADES DE ANÁLISIS

Microestructura de lluvia en el valle del río Mantaro

Comportamiento y características de la microestructura de lluvia

**ÍNDICE**

[INTRODUCCIÓN 4](#_Toc81644570)

[I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 7](#_Toc81644571)

[1.1. Descripción de la realidad problemática 7](#_Toc81644572)

[1.2. Formulación del problema 7](#_Toc81644573)

[1.2.1. Problema general 7](#_Toc81644574)

[1.2.2. Problema específico 8](#_Toc81644575)

[1.3. Objetivos 8](#_Toc81644576)

[1.3.1. Objetivo general 8](#_Toc81644577)

[1.3.2. Objetivos específicos 8](#_Toc81644578)

[1.4. Justificación 8](#_Toc81644579)

[1.4.1. Justificación Ambiental 8](#_Toc81644580)

[1.4.2. Justificación Tecnológica 9](#_Toc81644581)

[1.4.3. Justificación Socioeconómica 9](#_Toc81644582)

[1.5. Limitantes de la investigación 10](#_Toc81644583)

[1.5.1. Limitación Teórica: 10](#_Toc81644584)

[1.5.2. Limitación Temporal: 10](#_Toc81644585)

[1.5.3. Limitación Espacial: 10](#_Toc81644586)

[II. MARCO TEÓRICO 11](#_Toc81644587)

[2.1. Antecedentes 11](#_Toc81644588)

[2.2. Bases Teóricas: 13](#_Toc81644589)

[2.2.1. Precipitación 13](#_Toc81644590)

[2.2.1.1. Formación de la precipitación 14](#_Toc81644591)

[2.2.1.2. Formas de precipitación 15](#_Toc81644592)

[2.2.2. Instrumentos para la medición de la precipitación 17](#_Toc81644593)

[2.2.2.1. Pluviómetros 17](#_Toc81644594)

[2.2.2.2. Disdrómetro óptico 18](#_Toc81644595)

[2.2.3. Fuentes de error en la medición de la precipitación 21](#_Toc81644596)

[2.2.4. Características climatológicas de la zona de estudio 23](#_Toc81644597)

[2.2.4.1. Variabilidad de la Precipitación 23](#_Toc81644598)

[2.2.4.2. Variabilidad de la temperatura 24](#_Toc81644599)

[2.2.4.3. Clima 26](#_Toc81644600)

[2.2.5. Eventos de lluvia 26](#_Toc81644601)

[2.2.5.1. Clasificación de los eventos de lluvia 26](#_Toc81644602)

[2.2.6. Distribución de tamaño de gotas (DSD) 28](#_Toc81644603)

[2.2.7. Variabilidad diaria de la precipitación 28](#_Toc81644604)

[2.2.7.1. Días secos y días con lluvia 28](#_Toc81644605)

[2.2.7.2. Índice de concentración 29](#_Toc81644606)

[2.2.7.3. Umbrales de precipitación 29](#_Toc81644607)

[2.3. Conceptual 30](#_Toc81644608)

[2.3.1. Observación instrumental de la distribución del tamaño de gotas de lluvia 30](#_Toc81644609)

[2.3.2. Microestructura de los eventos de lluvias 30](#_Toc81644610)

[2.4. Definición de términos básicos 31](#_Toc81644611)

[III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 33](#_Toc81644612)

[3.1. Hipótesis de la Investigación 33](#_Toc81644613)

[3.1.1. Hipótesis general 33](#_Toc81644614)

[3.1.2. Hipótesis específicas 33](#_Toc81644615)

[3.2. Definición Conceptual de las Variables 33](#_Toc81644616)

[3.2.1. Operacionalización de las Variables 34](#_Toc81644617)

[IV. DISEÑO METODOLÓGICO 35](#_Toc81644618)

[4.1. Tipo y diseño de la investigación. 35](#_Toc81644619)

[4.2. Método de investigación. 36](#_Toc81644620)

[4.2.1. Ajuste de Distribución Exponencial 36](#_Toc81644621)

[4.2.2. Índice de percentiles de días húmedos 38](#_Toc81644622)

[4.2.3. Sesgo Porcentual 39](#_Toc81644623)

[4.2.4. Modelo de Ajuste Matemático 40](#_Toc81644624)

[4.3. Población y muestra. 41](#_Toc81644625)

[4.4. Lugar del estudio. 42](#_Toc81644626)

[4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información. 44](#_Toc81644627)

[4.6. Análisis y procedimientos de datos. 45](#_Toc81644628)

[V. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES 46](#_Toc81644629)

[VI. PRESUPUESTO 47](#_Toc81644630)

[VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 48](#_Toc81644631)

[VIII. ANEXOS 52](#_Toc81644632)

[8.1. MATRIZ DE CONSISTENCIA 52](#_Toc81644633)

# INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes más estudiados del ciclo hidrológico a nivel global, resulta ser la precipitación; debido básicamente a la importancia que tiene en los diferentes procesos climatológicos. En el Perú, este componente también es ampliamente analizado y estudiado, ya que se encuentra ligado a la gestión y manejo de los recursos hídricos. Una forma más detallada de observar las interacciones de la precipitación con las diferentes actividades en el territorio nacional, es a través del análisis del régimen de precipitación en las diferentes cuencas, subcuencas y microcuencas hidrológicas. Uno de estos escenarios es la cuenca del río Mantaro, siendo el valle del Mantaro un espacio en cual se desarrollan un gran número de actividades, resaltando la agropecuaria; estas actividades se encuentran estrechamente relacionadas con la precipitación, ya que dependen de la disponibilidad hídrica del lugar tanto en cantidad y calidad. Es por ello que, en la actualidad, el estudio de la precipitación juega un rol muy importante en diversos aspectos.

Para fines de este trabajo es necesario saber cómo funciona el fenómeno de precipitación, cuáles son los componentes y los procesos involucrados. Es fundamental comprender los mecanismos por los cuales atraviesa un hidrometeoro desde su formación hasta que llega a la superficie terrestre. Entiéndase por hidrometeoros a las formas más comunes de precipitación como son la llovizna, lluvia, escarcha, rocio, nieve y granizo (Houze, 2014).

Un enfoque más directo sobre la precipitación, es mediante el análisis de la microestructura de lluvia, que toma como punto inicial las mediciones de la distribución del tamaño de gotas (DSD – siglas en inglés). Para ello se emplea principalmente dos disdrómetros ópticos de la marca OTT Parsivel2, los cuales fueron diseñados con la finalidad medir el tamaño del hidrometeoro y su velocidad de caída (Löffler-Mang & Joss, 2000); en base a estas mediciones se puede realizar cálculos para determinar los parámetros integrales de lluvia; así mismo se pueden estimar los parámetros propios del espectro de gotas (Chen, Yang, & Pu, 2013; Tokay & Bashor, 2010). Para mejorar la información se tiene en cuenta al registro de las mediciones de dos pluviómetros convencionales instalados en el mismo lugar; de esta forma se permite realizar comparaciones cuantitativas en cuanto a los acumulados de precipitación, utilizando para ello la metodología de sesgo (Tokay, Wolff, & Petersen, 2014). Así mismo, es necesario mencionar la existencia de errores sistemáticos que pueden ocurrir durante la medición, transmisión y almacenamiento de los datos; los cuales están sujetos a las condiciones meteorológicas, ubicación de los equipos, entorno del observador, etc. (Førland et al., 1996). Estos equipos mencionados se encuentran instalados en el Observatorio de Huancayo, ubicado en el valle del río Mantaro; los cuales pertenecen al Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), bajo la Sub dirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera del Instituto Geofísico del Perú (IGP). Además, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), cuenta con una estación meteorológica ubicada en el mismo lugar, denominada “Huayao”.

Otro aspecto que influye dentro del estudio de la microestructura de lluvia, es la caracterización climática del lugar. El valle del río Mantaro se caracteriza por presentar una variabilidad estacional en la distribución temporal de la precipitación, concentrando los valores más altos entre los meses de enero y marzo (Yamina Silva et al., 2006), que representa alrededor del 48% de la precipitación anual (IGP, 2005); y en lo que respecta a la variabilidad espacial, se menciona que la regiones norte y sur oeste del valle son las que concentran las tasas de lluvias más altas (Yamina Silva et al., 2006). En lo que atañe a proyecciones de la variabilidad de la lluvia para el futuro, se pronostica reducciones de precipitación de -15% en la estación de verano (SENAMHI, 2013), y de -30% para la estación de invierno (MINAM, 2016).

La investigación de este trabajo plantea un diseño metodológico que consiste en la división de las mediciones de precipitación en días con lluvia y eventos de lluvia. La finalidad de esta segmentación es utilizar diferentes métodos estadísticos y de clasificación que permitan obtener los criterios necesarios para realizar la caracterización de una temporada de lluvias. Estos criterios consisten en métodos de cálculo como el índice de concentración (IC) mediante funciones exponenciales (Martin-Vide, 2004), elaboración de umbrales de precipitación a través de índices de percentiles de días húmedos (Alfaro, 2014; Schär et al., 2016), la estimación de los errores en el cálculo de la precipitación por cada instrumento (Tokay et al., 2014), la clasificación de los eventos de lluvia en estratiforme y convectivas, el cálculo de los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del espectro de gotas (Chen et al., 2013; Tokay & Bashor, 2010; Ulbrich, 1983).

El procesamiento de la información contempla dos bloques. El primero emplea los datos de precipitación diaria para el cálculo del IC y los umbrales de precipitación. En lo que respecta al IC, se tiene en consideración a las referencias teóricas debido a que estos trabajos contemplan un rango de datos mucho mayor a la investigación. En el caso de los umbrales de precipitación, los valores tabulados son asemejados con la información elaborada por SENAMHI (Alfaro, 2014), tomando en cuenta como eje importante al percentil 75.

El segundo bloque procesa información a nivel de eventos de lluvia, tomando para ello una serie de criterios de clasificación (Chen et al., 2013; Tokay et al., 2014). Se aplica una clasificación a los eventos en estratiformes y convectivos (Houze, 2014), esta división se da a través de imágenes de radar, o mediante el análisis del promedio de las tasas de lluvia y la deviación estándar respectiva (Bringi et al., 2003; Chen et al., 2013). Este bloque de información facilita el análisis de la microestructura de lluvia, debido a que se pueden realizar gráficas de los espectros de gotas en cada evento, permitiendo el cálculo de los parámetros integrales de lluvia (reflectividad (Z), intensidad de lluvia (RI) y contenido de agua líquida (W)) y los parámetros de la DSD, dando pase a la caracterización de la microestructura de lluvia propia del lugar de estudio.

Una visión más general de la aplicación de la investigación, responde a querer entender un poco más a detalle el proceso de precipitación, por ello la realización del análisis de la microestructura, proporciona información referente al espectro de gotas propio de cada tipo de evento de lluvia. Este análisis arroja resultados que fácilmente se pueden aplicar a una serie de investigaciones que toman como punto de partida las características de las gotas de lluvia, ya que no solo se limita al registro del acumulado de lluvia, si no que proporciona datos como la concentración, tipo y tamaño de los hidrometeoros.

# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## Descripción de la realidad problemática

Existe una serie de fenómenos meteorológicos que suceden a lo largo de la atmósfera terrestre, dentro de los cuales el ejemplo más conocido es el proceso de precipitación. Esto conlleva a que se realicen múltiples investigaciones que abarcan desde su formación hasta su acumulación en la superficie terrestre.

Una forma de estudiar la precipitación es a través de la microestructura de lluvia, mediante la observación directa de la distribución del tamaño de gotas (DSD). El nivel de análisis toma como eje central a los hidrometeoros (principalmente gotas de lluvia), proporcionando información acerca de las características de los eventos de lluvia. Así mismo, la microestructura de lluvia se encuentra relacionada con diversos aspectos ambientales como el lavado de contaminantes atmosféricos (Fonseca Duarte, Gioda, Ziolli, & Duó, 2013), la erosión del suelo (Caracciolo et al., 2012), entre otros.

Los valles interandinos peruanos no son ajenos a esta situación, ya sea por la acumulación de contaminantes atmosféricos producto de la quema de biomasa y el cambio de suelo (Estevan, Martínez-Castro, Suarez-Salas, Moya, & Silva, 2019; Fonseca Duarte et al., 2013), o por el incremento de aerosoles producto de la constante expansión urbana (Suárez-Salas, Álvarez, Bendezú, & Pomalaya, 2017); que al relacionarse con la microestructura de lluvia pueden desencadenar eventos de precipitación anómalos.

Uno de estos valles se encuentra en la cuenca del río Mantaro, donde se producen grandes cantidades de alimentos que abastecen a las principales ciudades del país. El marco nacional de estrategias para mitigar los efectos del cambio climático, propone el estudio de la precipitación en este tipo de escenarios, debido a su importancia agrícola (MINAM, 2016; SENAMHI, 2013). Es por ello la necesidad del estudio de microestructura de lluvia en este tipo localidades.

El presente estudio tiene como objetivo la caracterización de la microestructura de la lluvia en el valle del río Mantaro. Para ello, se cuenta con datos provenientes de equipos de alta resolución, de medición constante y ubicados en zona agrícola.

## **Formulación del problema**

### Problema general

* ¿Cómo se puede realizar un análisis de la microestructura de la lluvia ocurridos en el periodo lluvioso 2018 – 2019 en el Valle del Mantaro, a partir de la observación de datos in situ de la distribución del tamaño de gotas?

### Problema específico

* ¿En qué aspecto contribuye a la microestructura de lluvia, el análisis de la variabilidad temporal de la lluvia?
* ¿Cómo contribuye las características de los sensores en la estimación de la lluvia e identificación de los hidrometeoros?
* ¿Qué información proporciona el tipo de evento de lluvia, los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD respecto a la microestructura?
* ¿Cuáles son los aportes que tiene la comparación de los parámetros de la DSD estimados mediante observaciones in situ y por el método estadístico?

## Objetivos

### Objetivo general

* Analizar la microestructura de la lluvia usando datos de la distribución de del tamaño de gotas para el periodo lluvioso 2018 – 2019 en el Observatorio de Huancayo.

### Objetivos específicos

* Examinar la importancia de la variabilidad temporal de la lluvia sobre la microestructura de los eventos de lluvia, a través de los índices de concentración y los umbrales de precipitación.
* Efectuar un análisis instrumental, basado en la sensibilidad para la estimación de precipitación, teniendo en cuenta el porcentaje de variación.
* Interpretar la información proporcionada por el tipo de evento de lluvia, los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD.
* Comprar los parámetros de la DSD tabulados por observaciones in situ y por el método estadístico.

## Justificación

### Justificación Ambiental

La microestructura de lluvia se encuentra ligada a diversos aspectos ambientales, dentro los cuales los más resaltantes son el lavado de contaminantes atmosféricos por acción de la lluvia y la erosión hídrica. Así mismo, es necesario mencionar que estos aspectos en su mayoría se encuentran relacionados con las actividades antropogénicas.

En el caso del lavado de contaminantes atmosféricos, múltiples estudios demuestran que existen relaciones de interacción entre los contaminantes atmosféricos (aerosoles) y la formación de la precipitación. Se evidencia que la concentración de estos contaminantes disminuye durante y después de un evento de precipitación (Fonseca Duarte et al., 2013). Este fenómeno se atribuye a que, durante la formación de gotas de lluvia, muchos de los aerosoles son tomados como núcleos de formación, y en algunos casos cuando las gotas son de gran tamaño sirven como medio de disolución; un claro ejemplo son los reportes de presencia de metales pesados en gotas de lluvia, en las zonas dedicadas a la minería (Argumedo, 2017). Es por ello que la información proporcionada por la microestructura acerca de las características de las gotas de lluvia, facilita el análisis de estas interacciones.

En lo que respecta a la erosión hídrica, la microestructura de lluvia a través de las observaciones de la DSD, facilita el cálculo de la energía cinética de las gotas. Es a partir de estos datos, que los estudios de erosión pueden determinar la perdida de sustrato. Es preciso mencionar que la energía cinética de las gotas se encuentra directamente relacionada al tipo de evento de lluvia.

La zona de estudio representa un sector de agrícola de todo el valle del Mantaro, es por ello que el estudio de la microestructura sirve como punto apoyo para los aspectos ya mencionados, ya que los cultivos se ven afectados por la calidad de lluvia y por las condiciones del suelo.

### Justificación Tecnológica

En el Marco de la Gestión de riesgos de desastres, se plantean una serie de estrategias, dentro de las cuales se menciona la implementación de tecnología para tal fin (SGRD et al., 2014). Uno de estos proyectos tecnológicos corresponde a la estimación de lluvias para la identificación temprana de inundaciones; los datos empleados son mediciones de radar, que son conocidos como reflectividad, estas observaciones a través de algoritmos estiman la intensidad de lluvia y por ende la cantidad. Es aquí donde entra el estudio de la microestructura de lluvia, ya que las observaciones de la DSD provenientes de los disdrómetros ópticos, permiten calcular los parámetros integrales de lluvia, calculando así la intensidad de lluvia y la reflectividad. De este modo se puede validar y ajustar el algoritmo empleado por los radares con los datos de los disdrómetros, los cuales tienen una medición mas exacta.

### Justificación Socioeconómica

El valle del río Mantaro se caracteriza básicamente por tener una población dedicada a la agricultura. Esta actividad se encuentra estrechamente relacionada con la precipitación, por tal motivo uno de los compromisos dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, menciona que los gobiernos deben formular, aplicar y publicar programas enfocados a la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático. Dentro de estas medidas se resaltan los planes de ordenamiento territorial, gestión de recursos hídricos y desarrollo económico (UNFCC, 1992). Así mismo, uno de los objetivos del Plan de Gestión de Riesgo y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario (PLANGRACC-A) plantea la necesidad de que se debe contar información agrometeorológica, que debe ser generada y difundida adecuadamente para el monitoreo de fenómenos hidrometeorológicos recurrentes en el sector agrario (MINAGRI, 2012). De acuerdo a lo mencionado, se puede recalcar que la microestructura al contemplar las características de los hidrometeoros, puede ser utilizado como herramienta para identificar eventos de precipitación extremos (granizadas y fuertes lluvias), que resulten perjudiciales a los cultivos.

## Limitantes de la investigación

### Limitación Teórica:

Para efectos del presente estudio se busca realizar un análisis de la microestructura de los eventos de lluvia ocurridos en el Observatorio de Huancayo para el temporal de lluvias 2018 – 2019; el cual enfoca principalmente las características propias de cada tipo de evento. De acuerdo a la disponibilidad de los equipos (disdrómetros ópticos), realizar un estudio a nivel de toda la cuenca incurre en un proyecto de mayor envergadura, tanto en costo como logística. Por ende, se presenta la dificultad de contar con estudios presentes de microestructura de lluvia en otras partes de la cuenca. Además, los equipos empleados se encuentran recientemente en funcionamiento, por lo cual no se cuenta con información respecto a los inconvenientes técnicos que tendrían en las condiciones de la zona de estudio.

### Limitación Temporal:

La información meteorológica disponible para esta investigación corresponde a periodo de 1 a 4 años de antigüedad, dependiendo del instrumento empleado; debido a fueron recientemente instalados en el Observatorio. Por ello, que la información obtenida no debería ser empleada como índices estándar para estudios con periodos de datos más largos.

### Limitación Espacial:

En lo referente a la disponibilidad de información espacial, se cuenta con una sola estación meteorológica que se encuentra en el 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.

# MARCO TEÓRICO

## **Antecedentes**

### Estudios Nacionales

(Valdivia, Scipión, Milla, & Silva, 2020) en su artículo de investigación: “Estimación de la tasa de precipitación con múltiples instrumentos en los Andes centrales peruanos”, este trabajo emplea diferentes medidores de precipitación para estimar la tasa de lluvia diferentes condiciones. Los equipos utilizados son un conjunto de radares: un perfilador de nubes en banda Ka (perfilador de nubes y precipitaciones (MIRA-35c)), un perfilador de viento UHF (Clear-Air and Rainfall Estimation (CLAIRE)) y un perfilador de viento VHF (Boundary Layer and Tropospheric Radar (BLTR)), los cuales proporcionaron información sobre la relación de la altitud respecto al diámetro del tamaño de la gota versus la velocidad terminal. Las estimaciones de la tasa de lluvia por radares se validan para mediciones terrestres mediante un 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 en el suelo.

(Flores-rojas, Silva, Suárez-salas, Estevan, & Valdivia-prado, 2021) en su artículo de investigación: “Análisis de eventos meteorológicos extremos en los Andes centrales del Perú utilizando un conjunto de instrumentos especializados”, emplean un conjunto de instrumentos (PARSIVEL2 entre otros) para medir varias propiedades físicas, microfísicas y radiactivas de la atmósfera y de las nubes, que permitan para identificar, comprender y, posteriormente, pronosticar y prevenir los efectos de eventos meteorológicos extremos. Estos sensores especializados se encuentran instalados en el observatorio de Huancayo, ubicado en la cuenca del río Mantaro, que forma parte de los Andes centrales del Perú, especialmente en áreas agrícolas. 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.

### Estudios Internacionales

(Chen et al., 2013) en su artículo de investigación: “Características estadísticas de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia en la temporada de Meiyu observadas en el este de China”, se presenta una serie de análisis de las mediciones realizadas por los disdrómetros ópticos instalados en esta región, para el periodo 2009 a 2011. Los datos son clasificados por eventos de lluvia en base al total de precipitación y a la desviación estándar de las muestras. Los resultados muestran que a partir de la estimación de la concentración logarítmica de gotas y el diámetro medio ponderado en masa de las gotas de lluvia se establecen valores para la clasificación de la lluvia en estratiformes y convectivas. Se emplea el modelo matemático de ajuste gamma para el cálculo de los parámetros integrales de la distribución del tamaño de gota. La información recabada en este informe ofrece un punto de apoyo para la discusión de similitudes o diferencias de los parámetros integrales calculados en estudios anteriores.

(Tokay et al., 2014) en su artículo de investigación: “Evaluación de la nueva versión del disdrómetro láser-óptico, OTT Parsivel2”, el estudio emplea información recolectada por pluviómetros y disdrómetro ópticos (2 equipos OTT Parsivel y un Joss-Waldvogel). La metodología consiste en separar los datos meteorológicos en eventos de lluvia y a través de ello cuantificar la precipitación total, para estimar la variación en entre las medidas de los equipos; para ello se empleó el sesgo porcentual (bias) y el sesgo porcentual absoluto (absolute bias). El proyecto fue realizado en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA, durante el período del 28 de febrero al 2 de agosto del 2011; registrando un total de 36 eventos de lluvia con una tasa superior a 1 mm de lluvia. Los resultados muestran que la comparación de la variación en las mediciones entre la última versión del disdrómetro Parsivel respecto al medidor de referencia, es considerablemente más frente a otros equipos (6%). Así mismo, se observa en las mediciones de los disdrómetros para espectros de gotas de lluvia en diámetros de caída de 0.5 y 4 mm.

(Ladino, 2017) en su trabajo de investigación: “Caracterización de la microfísica de la precipitación mediante información de disdrómetros y radar polarimétrico para la estimación cuantitativa de lluvia en el área metropolitana del Valle de Aburrá”, se centra en la comparación de 3 modelos matemáticos de ajuste (gamma, exponencial, Marshall & Palmer) para la distribución del tamaño de gotas. La información corresponde a 3 disdrómetro ópticos y un radar polarimétrico instalados en el valle de Aburrá, recolectados en el periodo de 18 meses (2016 - 2017). Los cálculos se realizaron para 3 eventos de precipitación diferentes (estratiforme, convectiva y mixto), siendo el modelo Gamma el que mejor se ajusta a las observaciones en el caso de los disdrómetros. Como medida complementaria se comparó el modelo Gamma restringido con otras técnicas empleadas en la zona de estudio, obteniendo como resultado que el modelo aplicado es que el mejor se ajusta a las variables de microfísica de la precipitación.

ZUBIETA, SAAVEDRA, SILVA, GIRÁLDEZ, (2017) *Análisis espacial y tendencias temporales de la concentración diaria de precipitación en la cuenca del río Mantaro: Andes centrales del Perú*. Artículo Científico publicado en: Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. Este trabajo de investigación presenta un análisis espacio temporal del índice de concentración (IC) de la precipitación diaria para la cuenca del río Mantaro. La información empleada corresponde a 46 estaciones meteorológicas entre 1974 y 2004. Dentro de sus resultados se resalta el análisis de la precipitación diaria, que indica la existencia de eventos de baja intensidad correspondientes al 38% de los días con lluvia, pero solo representan el 9% de la cantidad de lluvia total. En contraste, se tiene que los eventos de alta y muy alta intensidad representan el 35% de los días con lluvia y aproximadamente el 71% de la cantidad total de lluvia. Así mismo, se menciona que existe una mayor concentración de la intensidad para las regiones Norte y Central de la cuenca. Esto evidencia que algunos lugares tienen más probabilidades de verse afectados por eventos climáticos extremos.

VILLALOBOS, MARTINEZ-CASTRO, KUMAR, SILVA, FASHE, (2019). *Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM*. Artículo Científico publicado en: Revista Cubana de Meteorología. Con la finalidad de lograr el estudio de las tormentas en los Andes Centrales del Perú se empleó estimadores estadísticos de la reflectividad tridimensional, intensidad de la lluvia y parámetros microfísicos; utilizando para ello información de radares a bordo en 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 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. Por tanto, la conclusión de la investigación menciona que las precipitaciones convectivas en las áreas de los Andes se intensifican con el mecanismo de forzamiento orográfico.

## Bases Teóricas:

### Precipitación

Se entiende por precipitación al proceso por el cual toda forma de humedad cae a la superficie terrestre, producto de la condensación del vapor de agua en gotas y partículas de hielo en la atmósfera; las formas de precipitación pueden encontrarse en estados líquidos, sólidos o una mezcla de ambos.

El sistema de medición que se utiliza para cuantificar la precipitación se encuentra en base a la cantidad total que llega al suelo en un periodo establecido, expresado en términos de profundidad vertical de agua (o el equivalente de agua en formas sólidas) respecto a una proyección horizontal uniforme de la Tierra (WMO, 2014). Mientras tanto para la intensidad de precipitación se define como la cantidad de precipitación recogida en un intervalo de tiempo. Según esta definición la intensidad de precipitación se puede considerar un parámetro secundario debido a que se puede obtener a partir de las mediciones de cantidad de precipitación, sin embargo existen equipos que miden directamente la intensidad de precipitación (Lanza, Leroy, Alexandropoulos, & Wauben, 2005).

#### Formación de la precipitación

La principal fuente para la formación de la precipitación es la humedad presente en la atmósfera, que es el resultado de la constante evaporación de agua tanto en superficie marina como continental. Para la ocurrencia del fenómeno de la precipitación es necesario que estas masas de vapor de agua se enfríen hasta llegar al punto de saturación y precipiten en forma de hidrometeoros, este enfriamiento se logra por la convección de masas de aire caliente producto de la variación en la irradiancia terrestre (Chereque, 1985).

##### Núcleos de condensación

En el proceso de saturación del vapor de agua en la atmósfera es fundamental la presencia de los núcleos de condensación y partículas de hielo que servirán de base para la formación de gotas de agua o cristales de hielo más grandes. Estos núcleos normalmente son partículas muy pequeñas de diferentes sustancias, que se encuentran suspendidas en la atmósfera; su tamaño oscila entre 0.1 y 10 µm de diámetros (Linsley, Kohler, & Paulus, 1977).

##### Crecimiento de las gotas y cristales de hielo

Seguidamente del proceso de nucleación las gotas de agua pueden llegar a crecer hasta 6 mm de diámetro. Generalmente las diferencias en los tamaños de gotas dependen del tamaño de los núcleos de condensación. Las gotas no precipitables tienen diámetros menores a 10 µm con pesos tan pequeños que una corriente ligera de aire ascendente (0.5 cm/s) evita que caigan manteniéndolos en suspensión.

##### Caída de gotas de las gotas

Para que los hidrometeoros puedan precipitarse su peso debe generar una velocidad de caída mayor a la tasa ascensional del aire. También es necesario que los hidrometeoros sean lo suficientemente grandes para atravesar el aire no saturado que se encuentra debajo de la base de la nube, sin que se evaporen completamente antes de llegar al suelo.

Existen una serie de factores que inciden en la distribución de los tamaños de gota, como son: las 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 entre gotas al momento de la precipitación.

#### Formas de precipitación

La forma en la que caen los hidrometeoros está sujeta a sus características físicas y a las condiciones atmosféricas donde se originó; a partir de estas particularidades se pueden distinguir una serie de tipos de precipitación, entre los cuales los más comunes son:

* **Llovizna**: Son pequeñas gotas de agua con un diámetro que oscila entre 0.1 y 0.5 mm, con una velocidad de caída muy baja (Villón, 2009). En su mayoría son de tamaño uniforme, distribuidas dispersamente, y aparentemente suspendidas en el aire. Normalmente proceden de nubes estratos a baja altura, y en otras ocasiones constituyen la niebla.
* **Lluvia:** Es la forma de precipitación más conocida, consiste en gotas de agua líquida que pueden tener un diámetro mayor a 0.5 mm y caen con una velocidad alrededor de 2 m/s (Segerer & Villodas, 2006). Se le puede dar una clasificación básica, conforme a la intensidad de lluvia como se detalla en la Tabla 1:

**Tabla 1**   
Clasificación de Lluvia Según su Intensidad

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Intensidad de lluvia** | **mm/h** | **Observaciones** |
| Ligera | < 2.5 | Las gotas son de fácil identificación. Cuando existe una superficie expuesta seca, ésta tarda más de dos minutos en mojarse completamente. |
| Moderada | 2.5 – 7.5 | No se pueden identificar gotas individuales, se forman charcos con gran rapidez. Las salpicaduras de la precipitación se observan hasta cierta altura del suelo. |
| Fuerte | > 7.5 | La visibilidad es escasa y las gotas que salpican sobre la superficie se levantan varios centímetros. |

*Nota:*  Extraído de Segerer y Villodas, 2006. Hidrología I.

* **Escarcha**: Se refiere a una delgada capa de hielo formada por cristales diminutos, en forma de escamas o agujas; se forman a partir del vapor de agua en el aire, que durante la noche pasa directamente a estado sólido sobre las superficies muy enfriadas. Generalmente su densidad puede llegar a ser de 0.8 a 0.9 g/ m3 (Segerer & Villodas, 2006).
* **Rocío:** Son gotas de agua producto de la condensación directa del vapor contenido en el aire adyacente a superficies enfriadas por radiación nocturna.
* **Nieve**: Son formaciones por agrupaciones cristalinas de hielo translúcidos en estrellas hexagonales, ramificadas (Figura 1) y con frecuencia mezcla de cristales simples. Los copos de nieve pueden llegar a tener grandes tamaños cuando la temperatura del aire supera los -10 °C. La densidad de la nieve en promedio es de 0.1 g/m³.

**Figura 1**   
Cristales de Hielo



*Nota:* Adaptado de el «copo de nieve de seis puntas» de kepler, por el Portal Astronómico, 2014, Kaulen (https://www.portalastronomico.com/el-copo-de-nieve-de-seis-puntas-de-kepler/).

* **Granizo**: Son granos de hielo que son originan en nubes convectivas. En general su forma es esférica, pero también se observan cónicas o irregulares. Su consistencia se basa en un núcleo de granizo blando que está rodeado por una fina capa de hielo. La densidad en promedio es de 0.8 g/m3 y el diámetro varía entre 5 y 50 mm (Segerer & Villodas, 2006).

##### Unidades y escalas

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 / m2 (masa / área), sea el caso para precipitación líquida (WMO, 2014). Estas mediciones son recogidas en intervalos de tiempos fijos, comunes para toda una red de estaciones que sean de interés. Añadir que en algunos casos las mediciones que tengan valores inferiores a 0.1 mm son considerados como trazas.

La unidad de medida en el caso de intensidad de precipitación está representada por la profundidad lineal por unidad de tiempo, generalmente en milímetros por hora (mm / h), regularmente estas mediciones son derivadas del registro de precipitación total en intervalos de un minuto, debido a que existe variabilidad en la medición de un minuto a otro. El rango de medición y las incertidumbres para la intensidad de lluvia se detallan a continuación en la Tabla 2:

**Tabla 2**   
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:* Extraído de Lanza et al., 2005. WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges. World Meteorological Organization - WMO.

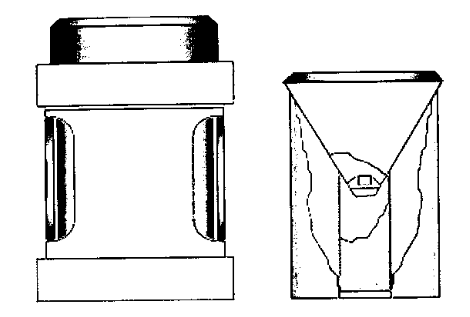
### Instrumentos para la medición de la precipitación

Los instrumentos para la medición de precipitación generalmente usan un recipiente abierto en la parte superior, en forma de cilindro recto con un embudo. Existe una amplia gama de tamaños y formas respecto a la altura de los recipientes que se encuentran calibrados conforme a los estándares del lugar de medición. Principalmente se mide el volumen o peso de la captura. Cabe señalar que el recipiente debe colocarse por encima de la profundidad máxima esperada de la capa de nieve y por encima de la altura potencial de salpicadura del suelo para el caso de lluvias (WMO, 2014). A continuación, se describen los equipos de medición utilizados en el presente estudio los cuales están ubicados en el Observatorio de Huancayo – IGP.

#### Pluviómetros

En general estos instrumentos contienen un recipiente cilíndrico de lámina, aproximadamente con dimensiones de 20 cm de diámetro y 60 cm de alto (Villón, 2009). En la parte superior llevan un embudo receptor encargado de recolectar la lluvia y llevarla a una probeta (Figura 2). La medición se realiza a la altura de lluvia almacenada, donde cada centímetro de la probeta corresponde a un milímetro de altura de lluvia.

**Figura 2**   
Estructura de un Pluviómetro Estándar



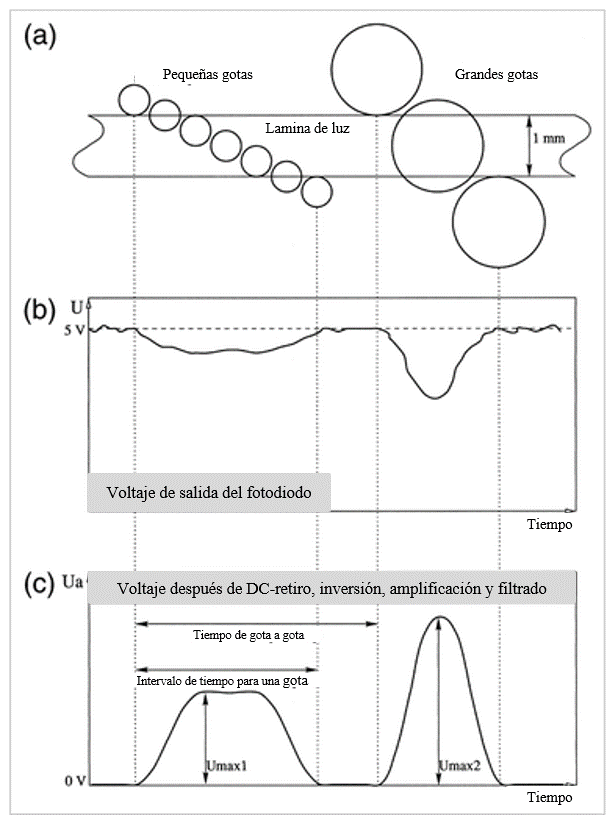
*Nota:* Extraído de Villón, 2009. Hidrología.

#### Disdrómetro óptico

Es un sensor que permite medir la precipitación y su composición a detalle. El uso de este equipo no es muy difundido frente a los instrumentos antes señalados, pero cuenta con una numerosa cantidad de productos y aplicaciones. Los datos obtenidos de estos instrumentos reflejan una alta sensibilidad gracias al amplio rango de medición.

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 3). 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 la partícula (Löffler-Mang & Joss, 2000).

**Figura 3**   
Señales de Partículas Cayendo a Través de la Lámina de Luz



*Nota:* a) Partículas pequeñas y grandes, (b) señal bruta del sensor, y (c) señal invertida y amplificada después del umbral para fines de medición. Adaptado de “An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors” (p. 131 ), por Löffler-Mang & Joss, 2000, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17(2).

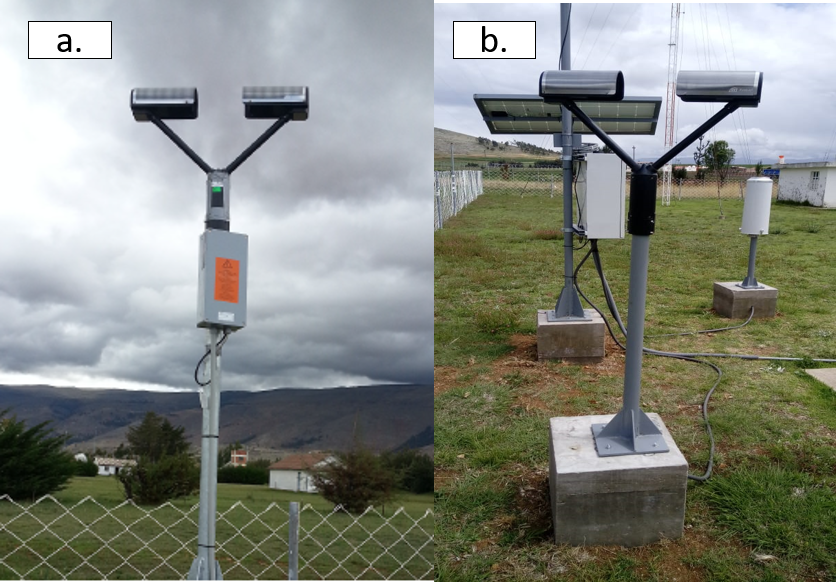
* **OTT Parsivel2**

Es un equipo 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 4), que fueron adquiridos de la empresa OTT HydroMet.

El equipo posee un rango de medición para el tamaño de las partículas líquidas entre 0.2 y 8 mm; para el caso 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. Realiza una clasificación de la precipitación de acuerdo al tipo de hidrometeoro predominante en el evento, de acuerdo a las siguientes categorías:

* Llovizna
* llovizna con lluvia
* lluvia
* lluvia, llovizna con nieve
* nieve
* Granos de nieve
* Granizo suave
* Granizo

**Figura 4**   
Disdrómetros Ubicados en Observatorio Huancayo - IGP



*Nota:* a) Primer disdrómetro óptico instalado en el año 2017 (psv2a). b) Segundo disdrómetro instalado en el año 2018 (psv2b). Elaboración propia.

El equipo emite una lámina de luz con dimensiones 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.

El equipo cuenta con área nominal de 54 cm2, pero el área efectiva de muestreo está sujeta al tipo de hidrometeoro observado. Este ajuste trata de reducir la probabilidad de que se detecten múltiples hidrometeoros al mismo tiempo (Chen et al., 2013); Además, hay que tener en cuenta la presencia de partículas secundarias producto de las salpicaduras y de acción del viento sobre las gotas. Para ello en el análisis de las gotas, se eliminan partículas sospechosas cuyas velocidades de caída fueran del ± 50% del rango general (Tokay et al., 2014).

El producto de salida del equipo Parsivel para la DSD, proporciona una matriz de 32 x 32 que contiene el número de gotas caídas en comparación con la velocidad de caída, a partir de estos resultados se puede estimar la espectro del tamaño de gotas en el evento de lluvia (Vinson et al., 2005).

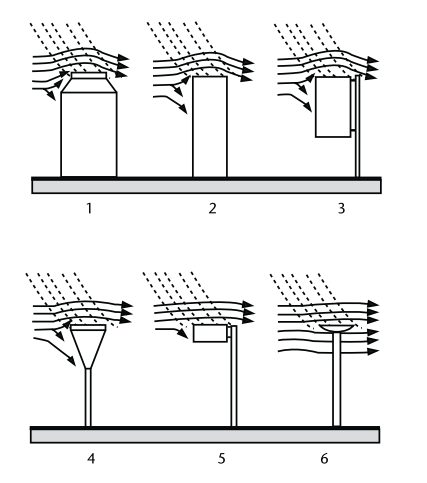
### Fuentes de error en la medición de la precipitación

Los medidores de precipitación presentan una fuente de datos puntuales y precisos. Sin embargo, existe una serie de errores que pueden influir en la precisión de las mediciones. De acuerdo a Førland et al. (1996) 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.

Dentro de estas fuentes de error, el más frecuente es el producido por la distorsión del flujo de viento (Figura 5), donde los datos suelen ser distorsionados pese de que los sensores cuenten con un sistema de protección (Michelson, 2004). A esto se añade la aparición de los errores de evaporación y humectación, agravando más la ocurrencia de errores sistemáticos.

**Figura 5**   
Interacción de la Distorsión del Campo del Viento con las Formas de los Medidores de Precipitación Estándar



*Nota:* Las líneas continuas muestran la corriente de aire y las líneas discontinuas muestran las trayectorias de las partículas de precipitación. Extraído de *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (p. 190), por WMO, 2014.

Es necesario que los errores presentes se corrijan antes del tratamiento cuantitativo de las mediciones, de lo contrario se corre el riesgo de que los errores se propaguen a lo largo del estudio, generando resultados erróneos.

Yuter, Kingsmill, Nance, & Löffler-Mang (2006) mencionan una serie de inconvenientes para el disdrómetro óptico OTT Parsivel 2 durante la medición, como se detalla a continuación:

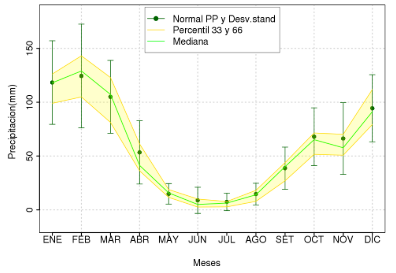
* Cuando sólo una porción del hidrometeoro cruza el haz, el sensor tiende a registrar la partícula como una de menor tamaño y con mayor velocidad de caída. Este error se incrementa cuando el tipo de hidrometeoro se encuentra en estado sólido (principalmente nieve) ya el tamaño de las partículas y el 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.
* 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.

### Características climatológicas de la zona de estudio

#### 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 (Yamina 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). Para un mejor detalle de la información respecto a la distribución mensual de la precipitación (Figura 6) se tiene el registro de datos en la Tabla 3 recogidos y procesados por SENAMHI en la estación Huayao.

**Figura 6**   
Promedio de la Precipitación 1981 - 2010



*Nota:* Evolución del promedio de la precipitación mensual a lo largo de un año. Extraído de *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire* (p. 158), por SENAMHI, 2010.

**Tabla 3**   
Promedio de la Precipitación 1981 - 2010

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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. Extraído de *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire* (p. 158), por SENAMHI, 2010.

Respecto a cantidad de precipitación anual registrada por las diferentes estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca, se evidencia variabilidad entre sus reportes, debido a que existe una dependencia entre la medición y la altitud, teniendo un mayor registro de lluvias en las partes altas de la cuenca que dentro del valle. 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 la contenido de humedad (IGP, 2005).

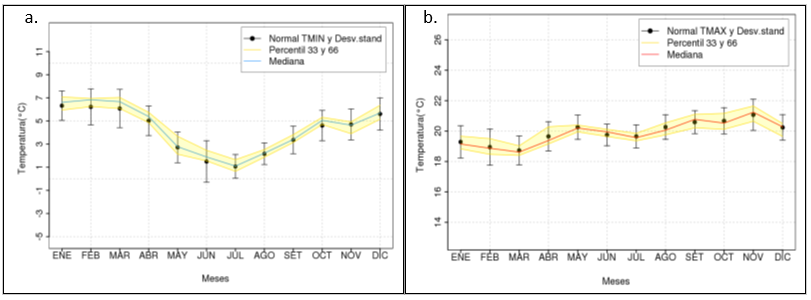
La variabilidad espacial está representada por los valores máximos de 1000 mm/año en las regiones norte y sur oeste, y mínimos de 550 mm/año en la parte central y sureste de la cuenca (Yamina Silva et al., 2006). El Observatorio de Huancayo se encuentra en la región centro-occidental de la cuenca donde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

En la comparación de la variabilidad interanual de la precipitación, se ha observado 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 (Y. Silva, Takahashi, & Chávez, 2008). Esta tendencia se centra principalmente en las regiones del norte y centro de la cuenca; basados en el periodo de 1971 al 2000 la reducción de lluvias es de orden 3% por década (Yamina Silva et al., 2006). Sin embargo, en un periodo más largo (1922 -2009) la tendencia es de + 0.74% por década y para el periodo 1977 al 2009 la tendencia es -7.2% por década (Yamina Silva, Transmote, & Giráldez, 2010), esto sugiere que existe una variabilidad negativa en las últimas décadas.

#### 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 7a), cómo se puede observar en el cálculo del promedio mensual de la temperatura mínima en la Tabla 4. En el caso del promedio de la temperatura máxima la estacionalidad es débil (Figura 7b), con valores máximos en noviembre y los mínimos en febrero, con una variación muy poco significativa (Yamina Silva et al., 2006). Si nos enfocamos en el promedio mensual de la temperatura máxima en la Tabla 5; los valores se mantienen casi constantes a lo largo de todo el año.

**Figura 7**   
Promedio de la Temperatura 1981 -2010



*Nota:* a) Promedio de la temperatura mínima. b) promedio de la temperatura máxima. Extraído de *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire* (p. 158), por SENAMHI, 2010.

**Tabla 4**   
Promedio de la Temperatura Mínima 1981 - 2010

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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:* Promedios de la temperatura mínima mensual, teniendo en cuenta la distribución por percentiles y la desviación estándar. Extraído de *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire* (p. 158), por SENAMHI, 2010.

**Tabla 5**   
Promedio de la Temperatura Máxima 1981 - 2010

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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:* Promedios de la temperatura máxima mensual, teniendo en cuenta la distribución por percentiles y la desviación estándar. Extraído de *Normales Climatológicas 1981 -2010 de la Precipitación, Temperatura Máxima y Temperatura Mínima del Aire* (p. 158), por SENAMHI, 2010.

En base a la distribución espacial de la temperatura se tiene que el promedio anual de la temperatura máxima del aire presenta valores de 12 °C en la parte oeste y centro oriental de la cuenca. Mientras que para el valle del Mantaro la temperatura máxima alcanza valores entre los 16 °C y 18 °C; y para la zona sureste de la cuenca los valores oscilan entre los 22 °C y 28 °C en el extremo más oriental (Yamina Silva et al., 2006).

#### 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, el clima varía desde la tundra en las partes altas hasta un clima semi frío en la zona del valle del río Mantaro (Yamina Silva et al., 2006).

### Eventos de lluvia

La determinación de un evento de lluvia es muy variable y depende básicamente de las condiciones que el autor toma en consideración. Entre las definiciones más utilizadas se encuentra un estudio de Chen, Yang, & PU, (2013) que establece un evento de lluvia en base a 2 minutos lluviosos consecutivos y con un periodo de duración mayor a 30 minutos. Tokay, Wolff, & Petersen, (2014) añaden que para diferenciar un evento de otro sucedido en el mismo día, el intervalo de datos sin registro de lluvias debe ser mayor a 2 horas, en caso contrario se consideran un solo evento de lluvia. Así mismo, ambos trabajos coinciden en establecer medidas complementarias para la identificación de los eventos, como son: un umbral mínimo de 10 gotas de lluvia y una tasa de lluvia mayor de 0.1 mm/ h; en caso de no cumplir con estas condiciones se considera como ruido o traza.

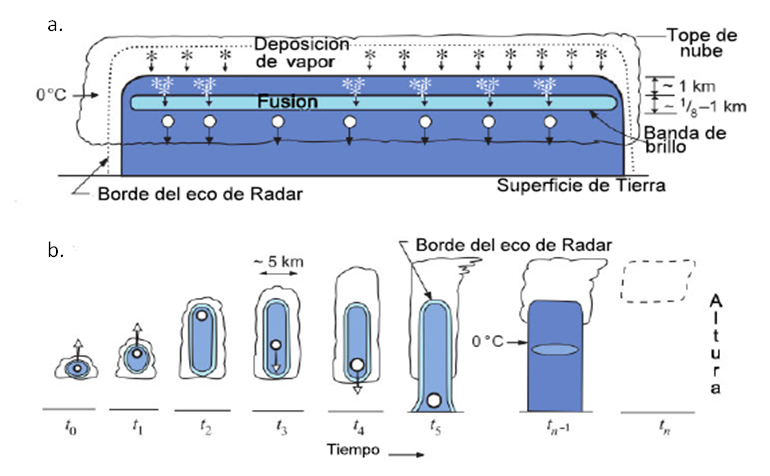
#### Clasificación de los eventos de lluvia

Los eventos de lluvias se pueden distinguir claramente en dos tipos: lluvias estratiformes (S) y convectivas (C). En principio esta clasificación basó su análisis de acuerdo al tipo de nube del cual provenían las precipitaciones, siendo la lluvia estratiforme procedente generalmente de nubes nimboestrato y la lluvia convectiva procedente de nubes cúmulos y 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 Houze (2014) menciona que resulta ser más conveniente definir precipitación estratiforme y convectivas, en función a la relación entre el movimiento vertical del aire y la velocidad de caída de las partículas de hielo. Por lo tanto, se puede precisar como precipitación estratiforme, 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 el caso de la 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, que resulta ser igual o exceder a las velocidades típicas de caída de los cristales de hielo y nieve. Así mismo, las observaciones muestran que el tiempo de crecimiento de los hidrometeoros convectivos es limitado, siendo a menudo media hora el intervalo en el cual la lluvia cae al suelo desde la formación de nubes; este tiempo resulta ser más corto a comparación de las 1 – 3 horas disponibles para el crecimiento de hidrometeoros estratiformes.

En el caso del patrón de eco de radar (Figura 8) existe un fuerte contraste entre ambos tipos de precipitación. Para los 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 8**   
Clasificación de los Tipos de Eventos de Precipitación



*Nota:* (a) Precipitación estratiforme (S), (b) Precipitación convectiva (C). Adaptado de *Cloud Dynamics* (p. 142), por Houze, 2014.

Otro método para clasificar las lluvias en S y C, es la establecida por Bringi, Chandrasekar, Hubbert, et al. (2003), que a través de la tasa promedio de la intensidad de lluvia (R) y la desviación estándar (σ) del periodo de datos analizados, se definen los siguientes valores en la Tabla 6 empleados para la clasificación.

**Tabla 6**   
Clasificación de Eventos de Lluvias de Acuerdo a la Intensidad de Lluvia

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tipo de Evento** | Umbral de Intensidad de lluvia (mm/h) | Desviación estándar |
| Estratiforme | R ≥ 0.5 | σ ≤ 1.5 |
| Convectiva | R ≥ 5.0 | σ > 1.5 |

*Nota:* Extraído de “Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis”, por Bringi et al., 2003, Journal of the Atmospheric Sciences, 60(2).

### Distribución de tamaño de gotas (DSD)

Se comprende como distribución de tamaño de gotas - DSD (sus siglas en inglés de Drop Size Distribution) a la disposición de las frecuencias de los tamaños de gotas (diámetro, volumen y número), característico en una nube o evento de lluvia. En términos generales se puede decir 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 (Ladino, 2017).

El estudio sobre la DSD se ha convertido en un eje esencial en el desarrollo de una amplia variedad de aplicaciones con carácter hidrológico y climatológico. Para lograr tal objetivo, se han empleado una serie de modelos de ajuste matemático a la DSD, como son las funciones exponenciales, Gaussiana, lognormal y gamma (Testik & Pei, 2017). Siendo el modelo de ajuste Gamma el mayor empleado por la descripción de los parámetros de forma (Ulbrich, 1983); así mismo, Ladino ( 2017) menciona que este modelo se ajusta de mejor manera a datos de DSD provenientes de disdrómetros Parsivel.

### Variabilidad diaria de la precipitación

#### Días secos y días con lluvia

La definición de un día seco está ligada a la cantidad de precipitación acumulada durante el día y si este valor resulta ser significativo. Algunas fuentes establecen al día seco como aquel donde no se registró ni un solo minuto lluvioso en los equipos de medición; mientras otras referencias lo establecen a aquel día donde no se supere el milímetro de precipitación durante las 24 horas del día (Padrón, 2013). Para efectos de este estudio se considerará como día seco a aquel que no supere el umbral de 0.1 mm de precipitación por día, en caso contrario se le denominará día con lluvia.

Este análisis permite determinar patrones de comportamiento en las series de tiempo, mediante la descripción de 2 componentes fundamentales: tendencia y estacionalidad. La tendencia está sujeta al cambio sistemático en función al transcurso de las horas. Mientras que la estacionalidad es básicamente la manera en la que se repite el evento cada cierto tiempo. Otro componente importante en el análisis de las características es la persistencia; es decir, la tendencia que existe de que se conserve el mismo valor entre un dato y el otro.

#### Índice de concentración

El índice de concentración (IC) se refiere a la igualdad existente entre los valores de la medición de precipitación diaria, para ello se emplea el criterio de clasificación de días con lluvias. Este análisis se realiza mediante el índice de Gini (Martin-Vide, 2004) que establece un rango de valores entre 0 y 1, donde cero representa la igualdad perfecta (todos los días contienen el mismo valor) y uno representa a la perfecta desigualdad.

El IC refleja la distribución estadística de la precipitación diaria a través de frecuencias de cantidad de lluvia. Estas distribuciones son ajustadas a ecuaciones de carácter exponencial, con la finalidad de estimar los impactos relativos o porcentuales de las diferentes clases de precipitación diaria y evaluar el peso de grandes cantidades respecto a la cantidad total. Para ello se establece una relación entre los porcentajes acumulados de precipitación aportados (Y), y el porcentaje acumulados de días (X). Estos porcentajes se encuentran relacionados a curvas de lluvia normalizadas ya establecidas, que demuestran que tales funciones son de tipo exponencial (Martin-Vide, 2004); cómo se puede apreciar en el estudio de Zubieta & Saavedra, (2009), donde se estima la curva porcentual (a partir de datos empíricos) y la curva exponencial (ajuste de la curva exponencial), obteniendo un IC de 0.55 para la estación meteorológica de Huayao; otros estudios similares amplían los resultados mencionados anteriormente (Zubieta, Saavedra, Silva, & Giráldez, 2016).

#### Umbrales de precipitación

Otra forma de caracterizar los eventos de lluvia es a través de la clasificación de la lluvia mediante la estimación de umbrales de precipitación, por medio de los índices de percentiles para días con lluvia. De acuerdo con este método SENAMHI establece umbrales para el acumulado de precipitación en 24 horas, con la finalidad de la identificación de lluvias extremas para todas las estaciones meteorológicas, en el caso de la estación de Huayao los datos se reflejan en la Tabla 7. La metodología para estos índices se encuentra descrita en la Nota Técnica 001-SENAMHI-DGM-2014. Debido a que el estudio es para eventos extremos, se priorizan las 4 categorías ubicadas sobre el percentil 75; considerando a los eventos de lluvia por debajo de este percentil como lluvias usuales y ligeras.

**Tabla 7**   
Caracterización de Eventos de Precipitación Extremos

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Umbrales de Precipitación** | **Caracterización de lluvias extremas** | **Umbrales Calculados para la Estación: Huayao** |
| R/día > 99p | Extremadamente lluvioso | R > 26.2 mm |
| 95p < R/día ≤ 99p | Muy lluvioso | 16.2 mm< R ≤ 26.2 mm |
| 90p < R/día ≤ 95p | Lluvioso | 11.9 mm< R ≤ 16.2 mm |
| 75p < R/día ≤ 90p | Moderadamente lluvioso | 6.2 mm< R ≤ 11.9 mm |

*Nota:* Extraído de *Umbrales y Precipitaciones Absolutas* (p. 66), por la Subdirección de Predicción Climática, 2014.

## Conceptual

### Observación instrumental de la distribución del tamaño de gotas de lluvia

Se entiende por observación instrumental al proceso que engloba la recolección, transmisión y procesamiento de datos provenientes del estudio de un fenómeno natural. Sea el caso de la microestructura de lluvia, donde la recolección de información contempla a las mediciones de las variables como son la intensidad de lluvia, la concentración del número de gotas, el diámetro de las gotas, entre otros. Posterior a la recolección se da la transmisión desde la zona de medición a la base de datos; para ser procesados y expresados en un formato de fácil acceso y manipulación para otros usuarios. Así mismo, la observación instrumental contempla las comparaciones entre las mediciones de los equipos, basadas en el grado de sensibilidad y resolución de los medidores, esto permite analizar la variación existente en sus reportes y que tan alejados se encuentran los valores unos de otros para la misma variable.

El objetivo fundamental de la observación instrumental es identificar las posibles causas que alteren la correcta recolección de los datos, señalando los segmentos problemáticos y brindando soluciones oportunas, para de esta forma mejorar la representatividad de la información obtenida.

### Microestructura de los eventos de lluvias

El comportamiento de la lluvia comprende al análisis de las precipitaciones tanto en la distribución de la cantidad lluvia, frecuencia de ocurrencia y variabilidad temporal y espacial. Así mismo, este concepto se apoya en el estudio de las características de los eventos como son: el grado de contribución, el tipo de evento, la composición del espectro de la DSD y los tipos de hidrometeoros presentes

Por tanto, el estudio de las características de la microestructura de los eventos de lluvia resultan ser una fuente de información útil, para la estimación de la disponibilidad hídrica y los efectos del cambio climático en la precipitación.

## Definición de términos básicos

* **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. Las mediciones se realizan en base a la cantidad total que llega al suelo respecto a una proyección horizontal en un periodo establecido

* **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.

* **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.

* **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.

* **Días con lluvia**

Se entiende como día con lluvia a aquel donde la precipitación total acumulada durante 24 horas no llega a superar los 0.1 mm de lluvia, en caso contrario es considerado como día seco.

* **Variabilidad diaria de la lluvia**

Es el análisis de la distribución de lluvia en función al tiempo (días). Establece las frecuencias de distribución y acumulación a nivel diario; así como el tipo de evento predominante y con mayor contribución al acumulado total de lluvia.

* **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.

# HIPÓTESIS Y VARIABLES

## Hipótesis de la Investigación

### Hipótesis general

El análisis de la microestructura de los eventos de lluvia acontecidos en el Observatorio de Huancayo, para el temporal de lluvias 2018 – 2019; se encuentra en función al estudio de la distribución del tamaño de las gotas, la caracterización del tipo de evento y la estimación tanto de los parámetros integrales de lluvia como de los parámetros del ajuste matemático empleado para el espectro de gotas. Este análisis proporciona información a un nivel detallado respecto a las características de los eventos y de los hidrómetros.

### Hipótesis específicas

* La variabilidad temporal de la lluvia juega un rol importante en el análisis de la microestructura, debido a que brinda información referente a los eventos extremos. Así mismo, proporciona alcances sobre el común de las precipitaciones.
* El análisis de la sensibilidad, resolución y limitaciones de los medidores de precipitación resulta ser útil para la identificación de las discrepancias entre las mediciones realizadas.
* Los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD, facilita el análisis de los espectros de gotas de cada evento de lluvia.
* La comparación de datos del espectro de gotas obtenidos por observación directa referente a los calculados por el método estadístico del momento, permite visualizar ciertas discrepancias y como estas afectan al análisis de la microestructura.

## Definición Conceptual de las Variables

**Variable Independiente**

* **Observación instrumental de la distribución del tamaño de gotas**: Comprende al proceso que engloba la recolección, transmisión y procesamiento de datos provenientes de la medición de la DSD.

**Variable Dependiente**

* **Microestructura de los eventos de lluvia**: Comprende el análisis de las características de los eventos de precipitación, como son la cantidad de lluvia aportada, frecuencia de ocurrencia, el tipo de evento, los tipos de hidrometeoros presentes y el espectro de gotas.

### Operacionalización de las Variables

**Tabla 8**   
Operacionalización de Variables

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **variables** | | **Definición** | **Dimensiones** | **Indicadores** | **Instrumentos o técnicas** | **Escala de medición** |
| **Variable Independiente** | Observación instrumental de la distribución del tamaño de gotas | Comprende al proceso que engloba la recolección, transmisión y procesamiento de datos provenientes de la medición de la DSD. | Recolección y calidad de los datos | Periodo de datos disponible | Observación de campo | Meses y días |
| Datos perdidos | Observación de campo | Porcentaje |
| Equipos de medición | Sensibilidad de los equipos | Análisis documental | Resolución del equipo |
| Principios de medición | Análisis documental | Grado de tecnología |
| Fuentes de error en la lectura y transmisión de datos | Tipo de errores más frecuentes | Análisis documental - Observaciones | Frecuencia de ocurrencia |
| Influencia de los errores | Observaciones | Porcentaje |
| **Variable Dependiente** | Microestructura de los eventos de lluvia | Comprende el análisis de las características de los eventos de precipitación, como son la cantidad de lluvia aportada, frecuencia de ocurrencia, el tipo de evento, los tipos de hidrometeoros presentes y el espectro de gotas. | Características de los eventos de precipitación | Umbrales de acumulado de lluvia | Procesamiento y análisis estadístico | Percentiles de intensidad de lluvia |
| Formas de hidrometeoros predominantes | Procesamiento y análisis estadístico | Llovizna, lluvia y granizo |
| Clasificación de lluvia | Procesamiento y análisis estadístico | Estratiforme y Convectiva |
| Variabilidad diaria de la precipitación | Umbrales de precipitación total de lluvia diaria | Procesamiento y análisis estadístico | Percentiles de acumulado de lluvia |
| Índice de concentración | Procesamiento y análisis estadístico | Porcentaje de precipitación |

*Nota:* Elaboración propia.

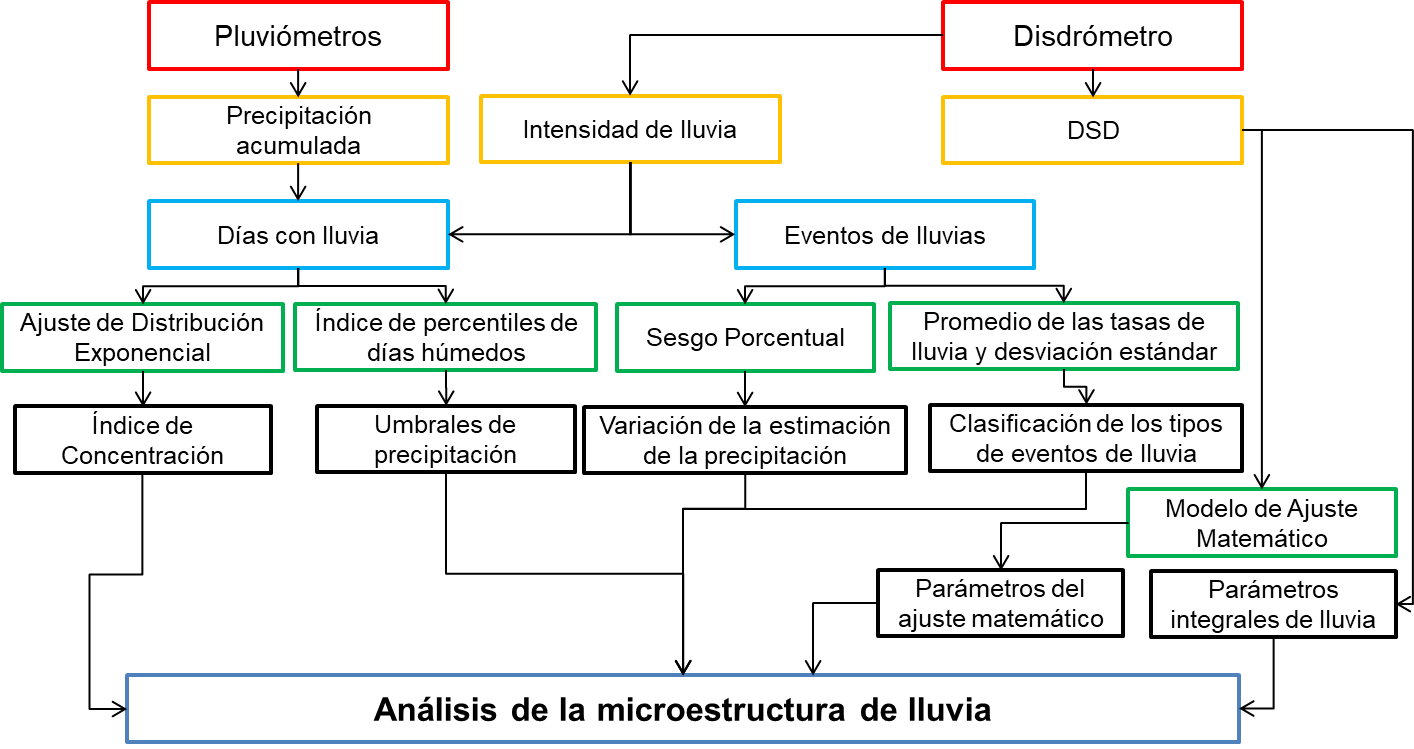
# DISEÑO METODOLÓGICO

## Tipo y diseño de la investigación.

El tipo de investigación se desarrolla a nivel descriptivo, que tiene como meta especificar las propiedades, las características y los perfiles de las variables de estudios. Se fundamenta en el recojo de mediciones e información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

El diseño de la investigación se detalla en la Figura 9; el cual plantea un esquema que tiene como objetivo el análisis de la microestructura de lluvia. Para ello las actividades a realizar dan comienzo con la recolección de las mediciones provenientes de dos tipos de equipos (pluviómetros convencionales y disdrómetros ópticos); las variables medidas son la precipitación acumulada y la DSD, recolectadas en un intervalo de 1 minuto. El siguiente procesamiento corresponde a agrupar los datos en 2 bloques de información (días con lluvia y eventos de lluvia). Una vez realizada la clasificación se aplica los diferentes métodos estadísticos que serán explicados más adelante. Los resultados de estos métodos proporcionan información sobre los criterios de evaluación que son empleados para el análisis de la microestructura de lluvia.

**Figura 9**Diseño de la Investigación para el Análisis de la Microestructura de Lluvia



*Nota:* Los cuadros de color rojo corresponden a los medidores, los de amarillo a las mediciones, los de celeste a la separación de los datos, los de verde a los métodos estadísticos, los de negro son los criterios de evaluación y el cuadro de color azul es el objetivo final de la investigación. Elaboración propia.

## Método de investigación.

A continuación, se explica detalladamente los diferentes métodos empleados para la caracterización de las lluvias, así como los criterios obtenidos para este fin.

### Ajuste de Distribución Exponencial

Para obtener el Índice de Concentración (IC), se emplea la metodología descrita en Martin-Vide (2004), que establece una serie de ajustes de distribuciones exponenciales negativas para la estructura estadística de la precipitación diaria. Con el fin de determinar los impactos relativos o porcentuales de las diferentes clases de precipitación diaria y evaluar el peso de grandes cantidades respecto a la cantidad total. Esta relación se establece como una función exponencial (ecuación 1) entre los porcentajes acumulados de precipitación aportados (Y), el porcentaje acumulados de días (X) y las constantes (a y b). Estos porcentajes se encuentran relacionados a curvas de lluvia normaliza ya establecidas, que demuestran que tales funciones son de tipo exponencial (Zubieta et al., 2016).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

Para el cálculo concentración de precipitación diaria y cálculo del índice de concentración (IC), la metodología permite la evaluación de la concentración de lluvia diaria a través del IC, mediante la elaboración de la Tabla 8 (Martin-Vide, 2004).

**Tabla 9**   
Distribución de frecuencias en clases de 1 mm

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Clase** | **Punto medio** | **n** | **∑ ni** | **Pi** | **∑ pi** | **∑ ni (%) = X** | **∑ pi (%) = Y** |
| 0.1 - 0.9 | 0.5 |  |  |  |  |  |  |
| 1.0 – 1.9 | 1.5 |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |  |
| 46.0 - 46.9 | 46.5 |  |  |  |  |  |  |
| 47.0 - 47.9 | 47.5 |  |  |  |  |  |  |
| Total |  |  |  |  |  |  |  |

*Nota:* Se tiene frecuencias acumulativas relativas (X) y los porcentajes correspondientes de la precipitación total (Y). Extraído de “Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain” (p. 962), por Martin-Vide, 2004, International Journal of Climatology, 24(8).

Los datos para el rango de clases son los empleados para la estación meteorológica de Huayao. Extraído de “Distribución Espacial del Indice De Coventracion De Precipitación Diaria En Los Andes Centrales Peruanos : Valle Del Rio Mantaro” (p. 17), por Zubieta & Saavedra, 2009, TECNIA, 19(2).

El resultado de la representación gráfica de las dos últimas columnas denota una línea poligonal marcadamente exponencial, como se observa en la Figura 10. (Zubieta & Saavedra, 2009); cuyos valores expresan la concentración de la lluvia. Donde el bisector del cuadrante es la línea de equidistribución (caso ideal en el tiempo) y presenta una distribución de la precipitación diaria perfecta. Esta línea poligonal es denominada curva de concentración o curva de Lorenz.

El área S encerrada por el Bisector del cuadrante y la curva de concentración, proporciona la medida de concentración, que servirá para calcular el IC mediante el Índice de Gini (Martin-Vide, 2004) descrita en la ecuación (2); el cual se encuentra en el rango de 0 y 1, en donde 0 corresponde a la perfecta igualdad (todos los días contienen el mismo valor) y 1 representa a la perfecta desigualdad.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

Para mejorar el método mencionado, la curva de concentración puede ser sustituida por la curva exponencial del tipo de la ecuación (1). Donde se determinan las constantes a y b por medio del método de mínimos cuadrados (ecuación 3 y 4):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

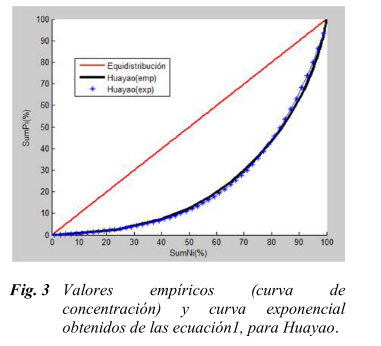
Una vez determinado los valores de ambas constantes, se define la integral de la curva exponencial entre 0 y 100 en la ecuación (5), que representa el área (A) bajo la curva exponencial.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

El área A’ comprimida por la curva, la línea de equidistribución y x=100 es la diferencia entre 5000 y el valor de la ecuación (5). De este resultado se obtiene el siguiente valor del IC de la precipitación diaria, semejante al índice de Gini, que puede ser definido por:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

**Figura 10**   
Curva de Concentración y Curva Exponencial para la Estación Meteorológica de Huayao



*Nota:*  Representación gráfica de las curvas de concentración y exponencial para la estación meteorológica de Huayao. Extraído de “Distribución Espacial del Indice De Coventracion De Precipitación Diaria En Los Andes Centrales Peruanos : Valle Del Rio Mantaro” (p. 19), por Zubieta & Saavedra, 2009, TECNIA, 19(2).

### Índice de percentiles de días húmedos

De acuerdo a Schär et al. (2016), los índices de percentil de precipitación generalmente se calculan a partir de largas series de datos de precipitación; los cuales se encuentran ordenados en forma ascendente y donde la distribución resultante representa la relación existente entre la frecuencia e intensidad de la precipitación. Existen 3 categorías de índices de percentiles que usan acumulaciones diarias de precipitación; para efectos de este estudio se emplea el Índice de percentiles de días húmedos

Respecto a la elaboración de los percentiles de días húmedos, se recurre a la aplicación de datos del tipo día con lluvia, con la finalidad de coincidir a la información empleada por SENAMHI, donde utilizan precipitaciones acumuladas en 24 horas mayores a 0.1 mm (Alfaro, 2014), considerando días secos a todos aquellos que no superen este umbral.

El método para realizar la distribución de la precipitación diaria, es mediante el empleo de la función empírica de probabilidad y estimación de percentiles. Si bien el cálculo de los percentiles resulta ser un procedimiento estándar, es necesario tener en consideración lo siguiente:

* Excluir del cálculo el valor más alto de la serie.
* Cuando en la serie se observan valores atípicos, es necesario verificar el impacto en los parámetros estadísticos de la serie.
* Excluir del cálculo todos los días con trazas.
* Considerar como día con lluvia a uno que contenga una precipitación total mayor a 0.1 mm.
* Si el cálculo se realiza a través del software Microsoft Excel, se recomienda utilizar la función PERCENTIL.INC.
* Tener en cuenta la longitud de la serie de datos, ya que ello afecta la determinación de umbrales. Mientras más larga sea la serie más representativos son los umbrales.
* Es necesario mencionar la longitud de la serie, para evitar que sean considerados como umbrales climáticos, sino umbrales deducidos de la muestra utilizada.

Una de las ventajas de este método es la identificación de eventos inusuales, por ello su aplicación en la estimación de umbrales de eventos extremos de lluvias (Alfaro, 2014), como se detalla en la Tabla 7.

Cabe señalar que en cuanto al uso del percentil 75, los valores de precipitación por debajo de este umbral son considerados como eventos de lluvias usuales o ligeras, por ello los valores por debajo de este rango no son consideradas en la Tabla 7.

### Sesgo Porcentual

Para la comparación del total de lluvia estimada entre los pluviómetros y disdrómetros, se emplea el método de sesgo porcentual y sesgo porcentual absoluto. Para ello se trabaja con eventos de lluvia, los cuales están definidos de acuerdo a Tokay et al. (2014) y Chen et al. (2013). Así mismo, en el caso de los disdrómetros se compara los espectros de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia y los parámetros integrales 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.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

### Modelo de Ajuste Matemático

La distribución del tamaño de gotas de lluvias se encuentra expresada como el número de gotas por volumen de aire para un intervalo de tamaño de gota dado. De acuerdo a los datos del disdrómetro Parsivel, se cuenta con una matriz de 32x32 que relaciona el tamaño de caída (*i* enésima) y la velocidad de la gota (*j* enésima. La DSD se calcula de la siguiente manera (Chen et al., 2013):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

Donde es la es la cantidad de gotas dentro del contenedor de tamaño *i* y el contenedor de velocidad *j*, el A(D*i*) el área de muestreo efectiva del disdrómetro expresada en m2, es el periodo de observación que corresponde a 60 segundos para este estudio, (m.s-1) es la velocidad de caída en el contenedor j y corresponde al intervalo de diámetro (mm) en el contenedor *i*. El (mm-1.m-3) representa la concentración numérica de las gotas con diámetros dentro del intervalo que va desde a . A partir de la se puede calcular los otros parámetros integrales de la DSD (reflectividad, intensidad de lluvia y contenido de agua líquida).

En este estudio se emplea el modelo de ajuste gamma (Ulbrich, 1983) expresada en la ecuación (10). Donde D (mm) es el diámetro de la gota de lluvia, (mm-1-μ.m-3) es el parámetro de intercepción, es el parámetro de forma y (mm-1) es el parámetro de pendiente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10) |

Estos tres parámetros (, y ) son calculados a partir del segundo, cuarto y sexto momento de las distribuciones observadas utilizando el método de momento (Ulbrich, 1983).

La representación gráfica del espectro de la DSD para el modelo de ajuste gamma corresponde a la Figura 11. Donde se detallan diferentes curvas de concentración de gotas para 3 tipos de valores en el parámetro de forma (). Las curvas están expresadas en concentración logarítmica de las gotas y el diámetro de las gotas.

**Figura 11**   
Ejemplos de 3 Diferentes Distribuciones Gamma



*Nota:* Se realizaron 3 simulaciones para la distribución Gamma con diferentes valores del parámetro de forma. Extraído de “Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution” (p. 1766), por Ulbrich, 1983, Journal of Climate and Applied Meteorology, 22*.*

Respecto a la clasificación de la lluvia en estratiforme (S), mixtas (S - C) y convectivas (C) se emplearán los criterios especificados en la Tabla 6 que establece la categorización a partir de la intensidad de lluvia y la desviación estándar de las muestras.

## Población y muestra.

* **Población**

El total de eventos de lluvias acontecidos en el temporal de lluvias 2018 – 2019 para la ubicación del Observatorio de Huancayo, que se encuentra en la parte central del valle del río Mantaro, dentro de la parte baja de las subcuencas de los ríos Shullcas, Cunas y Achamayo.

* **Muestra**

Se propone un muestreo estratifico, para dividir la población en conjuntos cuyos elementos posean características comunes. En lo que respecta a este trabajo, la condición de selección para los eventos de lluvia consiste en que la pérdida de datos (minutos con lluvia) sea inferior al 5%. Así mismo, se considera aquel que supera la tasa de lluvia de 0.1 mm/h o en los casos de los pluviómetros sea menor valor registrado.

## Lugar del estudio.

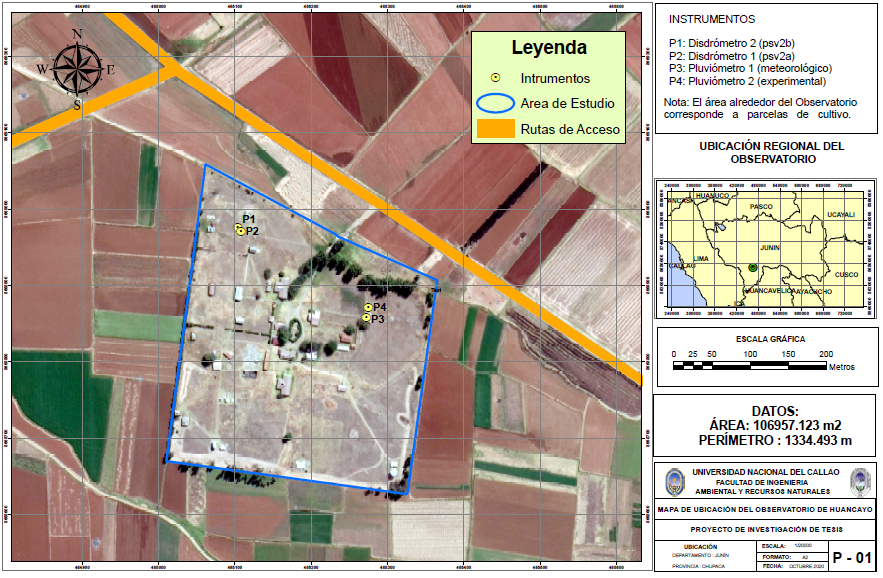
El área de estudio del proyecto corresponde a las instalaciones del Observatorio de Huancayo (Figura 12), en las coordenadas geográficas 12°02'18''S y 75°19'22''W, a una altitud de 3350 m.s.n.m. Con un área de 106957.123 m2. Se encuentra en la parte central de la cuenca del río Mantaro, en la parte baja de las subcuencas de los ríos Shullcas, Cunas y Achamayo. Estas características lo convierten en un territorio estratégico para el desarrollo de estudios ambientales, debido a que existe la presencia de eventos meteorológicos extremos como son las heladas, lluvias intensas, granizadas, etc.

Dentro de las instalaciones del Observatorio se encuentra el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), que tiene como objetivo mejorar la comprensión de los procesos físicos que afectan el clima de los Andes. Así mismo SENAMHI en esta misma ubicación, cuenta con una estación meteorológica denominada “Huayao”.

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 área circundante al Observatorio es netamente agrícola, conformada por parcelas de papa, maíz, hortalizas, entre otras. La zona urbana más cercana se encuentra entre 10 a 15 minutos en automóvil.

**Figura 12**   
Mapa de Localización del Observatorio de Huancayo



*Nota:* Elaboración propia.

## Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

**Instrumentos:**

Se plantea la utilización de 4 equipos (2 disdrómetros ópticos y 2 pluviómetros convencionales). Los disdrómetros ópticos corresponden a la marca OTT Parsivel2, los cuales son de nominados como psv2a (primero en ser instalado) y psv2b (segundo en ser instalado). En el caso de los pluviómetros las denominaciones son de acuerdo al lugar donde se encuentran instalados, teniendo los nombres de experimental y meteorológico.

La selección de estos equipos corresponde a que las mediciones se efectúan en un mismo intervalo de tiempo (1 minuto); así mismo la perdida de datos es reducida (caso de los pluviómetros).

**Técnicas:**

* **Observación de campo**

Corresponde al análisis del registro de datos de precipitación que se emplea, esta información se encuentra almacenada en la base de datos del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), perteneciente a Instituto Geofísico del Perú (IGP). La frecuencia de recolección de datos es realizada cada minuto; en el caso de los pluviómetros la información se encuentra en solo fichero \*.txt que contiene que contiene todo el registro de medición desde su instalación hasta la actualidad; mientras que para los disdrómetros Parsivel se genera un fichero \*.txt cada minuto con pesos de 5,208 bytes y 5,209 bytes para el psv2a y psv2b respectivamente.

* **Análisis Documental**

Es aplicado en el análisis comparativo de la sensibilidad y limitación presente en los equipos empleados, para ello se utilizará los manuales de instrucciones de funcionamiento de los sensores; así mismo, se emplea información bibliográfica referente a trabajos de investigación similares y/o aplicación de estos instrumentos en otras actividades.

Otro aspecto que contempla esta técnica, es la búsqueda de información respecto a la ocurrencia de errores en el momento de la recolección, transmisión y procesamiento de los datos. El estudio de trabajos similares, proporcionará información acerca de cómo identificar estas fuentes de error y de cómo solucionar estos obstáculos. Además, brindará recomendaciones respecto a la manipulación de datos para obtener resultados más eficaces y representativos.

* **Procesamiento y análisis estadístico**

Una vez recolectada la información tanto de campo como bibliográfica, se procederá con la aplicación de los métodos estadísticos descritos anteriormente. Para su posterior comparación en lo referente a lo documental e instrumental, y de este modo observar la representatividad del trabajo de investigación. Respecto al procesamiento estadístico y representaciones gráficas de la información obtenida en campo, se aplica las herramientas disponibles en los softwares de Matlab y Microsoft Excel.

## Análisis y procedimientos de datos.

El manejo de la información inicia con el control de los datos de precipitación medidos en campo, a través de un sistema operacional, que engloba la recolección, transmisión y manipulación de la información recolectada. Las medidas correctivas aplicadas en el bloque de datos corresponden a eliminar datos fuera de serie (valores muy anómalos), verificación de la secuencia cronológica de los datos y llenado de los datos vacíos con el formato no numérico (NaN). Una vez concluida las medidas correctivas, se procederá con la manipulación de los datos de acuerdo al método estadístico a utilizar. Por ello la división de los datos en dos formatos; el primero consta de archivos NetCDF creados diariamente, que contiene información de precipitación total (mm) de los 4 medidores registrada en 24 horas; el segundo formato está agrupado en función al criterio de evento de lluvia, teniendo límites en los horarios de inicio y final del evento, estos datos se encuentran almacenados en una estructura de acuerdo al número de evento, en formato \*.mat.

Posterior a la manipulación de los datos en productos que facilitan el trabajo de investigación se aplican los datos estadísticos especificados anteriormente. Teniendo como primer cálculo al IC, que permite observa la distribución de la precipitación tanto en cantidad como en frecuencia de ocurrencia. El segundo cálculo se realiza respecto a la necesidad de categorizar las lluvias en función al total de lluvia acumula, para ello la elaboración de los índices de percentiles de distribución, como umbrales de precipitación. El tercer método busca describir las diferencias de las mediciones existentes entre los equipos empleados para el estudio, a través de la estimación del sesgo porcentual. Por ultimo y para tener una visión más detallada de los eventos de lluvia, se emplea la información de la DSD, para obtener resultados a nivel de la microestructura de lluvia; contando para ello el modelo de ajuste que permite observar el espectro de gotas y la clasificación de lluvias en estratiformes, convectivas o mixtas.

Debido a que las mediciones corresponden a un lugar en específico, la forma de enriquecer el trabajo es a través del análisis documental de los estudios de las precipitaciones para el valle del Mantaro, elaboradas a partir de datos obtenidos por radar.

# CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Tabla 10**   
Cronograma de Actividades

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Actividades** | **Mes 1** | | | | **Mes 2** | | | | **Mes 3** | | | | **Mes 4** | | | | **Mes 5** | | | |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **1** | **2** | **3** | **4** |
| Búsqueda Bibliográfica |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Control de calidad y operacional de los datos |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ejecución de los análisis estadísticos comparativos |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Reformulación de algunos aspectos sobre el diseño experimental |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Análisis y discusión de resultados |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Redacción del informe final de tesis |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

# PRESUPUESTO

**Tabla 11**   
Presupuesto

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Gastos de Materiales de Escritorio** | **Costo por unidad** | **Costo** |
| Disdrómetro óptico OTT Parsivel 2 | S/. 15,000 | S/. 30,000 |
| Pluviómetros convencionales | S/. 6,000 | S/. 12,000 |
| Estación autónoma de energía solar | S/. 5,000 | S/. 5,000 |
| Antena wifi | S/. 100 | S/. 100 |
| Servicio de Internet | S/. 80 | S/. 320 |
| Batería de respaldo | S/. 150 | S/. 150 |
| Data Logger | S/. 50 | S/. 50 |
| Laptop | S/. 2,500 | S/. 2,500 |
| Software Matlab | S/. 150 | S/. 150 |
| Software Microsoft Excel | S/. 150 | S/. 150 |
| Utilería de escritorio (lapiceros, papel, fotocopias, etc.) | S/. 300 | S/. 300 |
| USB | S/. 40 | S/. 80 |
| **Subtotal** | | S/. 50,800 |
| **Gastos directos de la Investigación** | **Costo por unidad** | **Costo** |
| Ingeniero Ambiental | S/. 10,000 | S/. 10,000 |
| Calibración de equipos | S/. 10,000 | S/. 10,000 |
| Repuestos | S/. 8,000 | S/. 8,000 |
| Personal de mantenimiento | S/. 3,000 | S/. 6,000 |
| Procesador de datos | S/. 6,000 | S/. 6,000 |
| Personal para la redacción del informe | S/. 6,000 | S/. 6,000 |
| **Subtotal** | | S/. 46,000 |
| **Gastos propios** | **Costo por unidad** | **Costo** |
| Movilidad | S/. 500 | S/. 4,000 |
| Transporte de equipos | S/. 2,500 | S/. 5,000 |
| Alimentación | S/. 400 | S/. 3,200 |
| Viáticos | S/. 500 | S/. 4,000 |
| **Subtotal** | | S/. 16,200 |
| **Total** | | S/. 113,000 |

# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfaro, L. (2014). *Precipitaciones Extremas Para la Emisión de Avisos Meteorológicos*. Lima, Perú.

Argumedo, C. D. (2017). Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Quimica*, *46*(2), 37–44. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n2.60533

Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Hubbert, J., Gorgucci, E., Randeu, W. L., & Schoenhuber, M. (2003). Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *60*(2), 354–365. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2

Caracciolo, C., Napoli, M., Porcù, F., Prodi, F., Dietrich, S., Zanchi, C., & Orlandini, S. (2012). Raindrop Size Distribution and Soil Erosion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *138*(5), 461–469. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000412

Chen, B., Yang, J., & Pu, J. (2013). Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution in the Meiyu Season Observed in Eastern China. *Journal of the Meteorological Society of Japan.*, *91*(2), 215–227. https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-208

Chereque, W. (1985). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil* (1a Ed.). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X*, *3*(June), 100037. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037

Flores-rojas, J. L., Silva, Y., Suárez-salas, L., Estevan, R., & Valdivia-prado, J. (2021). Analysis of Extreme Meteorological Events in the Central Andes of Peru Using a Set of Specialized Instruments. *Atmosphere*, *12*, 1–29. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/atmos12030408

Fonseca Duarte, A., Gioda, A., Ziolli, R., & Duó, D. (2013). Contaminación atmosférica y deposición húmeda en la Amazonia Brasileña. *Revista Cubana de Salud Publica*, *39*(4), 627–639.

Førland, E. J., Allerup, P., Dahlström, B., Elomaa, E., Jónsson, T., Madsen, H., … Vejen, F. (1996). *Manual For Operational Correction of Nordic Precipitation Data* (1a Ed.). Oslo, Noruega.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. (M. G. H. Education, Ed.) (Sexta Edic). Mexico.

Houze, R. A. (2014). *Cloud Dynamics* (2a Ed., Vol. 104). International Geophysics. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

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

Ladino, A. (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., & Wauben, W. (2005). WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges. World Meteorological Organization - WMO.

Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1977). *Hidrología Para Ingenieros*. (M. GRAW-HILL, Ed.) (2a Ed.). Bogotá, Colombia.

Löffler-Mang, M., & Joss, J. (2000). An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *17*(2), 130–139. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2

Martin-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, *24*(8), 959–971. https://doi.org/10.1002/joc.1030

Michelson, D. B. (2004). Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. *Journal of Hydrology*, *290*(3–4), 161–177. https://doi.org/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. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.

Padrón, R. sebastián. (2013). *Análisis de la estructura de la lluvia del páramo*. Universidad de Cuenca.

Schär, C., Ban, N., Fischer, E. M., Rajczak, J., Schmidli, J., Frei, C., … Zwiers, F. W. (2016). Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. *Climatic Change*, *137*(1–2), 201–216. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1669-2

Segerer, C., & Villodas, R. (2006). Las Precipitaciones. En *HIDROLOGIA I* (p. 22). Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ingeniería Civil.

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

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

SGRD, CENEPRED, INDECI, MEF, CEPLAN, & RREEE. (2014). Plan nacional de gestión del riesgo de desastres - PLANAGERD 2014 - 2021. Lima, Perú.

Silva, Y., Takahashi, K., & Chávez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*, *14*, 261–264. https://doi.org/10.5194/adgeo-14-261-2008

Silva, Yamina, Takahashi, K., Cruz, N., Trasmonte, G., Mosquera, K., Nickl, E., … Lagos, P. (2006). Variability and Climate Change in the Mantaro River Basin, Central Peruvian Andes. En *Proceedings of 8th ICSHMO* (pp. 407–419). Foz do Iguaçu, Brasil: Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil - INPE. https://doi.org/10.1021/es960988q

Silva, Yamina, Transmote, G., & Giráldez, L. (2010). Variabilidad de las Precipitaciones en el Valle del Río Mantaro. *Instituto Geofísico del Perú*, 54–58.

Suárez-Salas, L., Álvarez, D., Bendezú, Y., & Pomalaya, J. (2017). Caracterización Química Del Material Particulado Atmosférico Del Centro Urbano De Huancayo, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *83*(2), 187–199.

Subdirección de Predicción Climática - SENAMHI. (2014). Umbrales y Precipitaciones Absolutas. Lima, Perú. Recuperado de https://www.senamhi.gob.pe/pdf/clim/umbrales-recipitaciones-absol.pdf

Testik, F. Y., & Pei, B. (2017). Wind Effects on the Shape of Raindrop Size Distribution. *Journal of Hydrometeorology*, *18*(5), 1285–1303. https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0211.1

Thornthwaite. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, *38*(1), 55–94. https://doi.org/10.1016/0022-3115(71)90076-6

Tokay, A., & Bashor, P. G. (2010). An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(11), 2348–2365. https://doi.org/10.1175/2010JAMC2269.1

Tokay, A., Wolff, D. B., & Petersen, W. A. (2014). Evaluation of the New Version of the Laser-Optical Disdrometer , OTT Parsivel 2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *31*(2006), 1276–1288. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1

Ulbrich, C. (1983). Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, *22*, 1764–1775.

UNFCC. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Nueva York, E.E.U.U.: Organización de las Naciones Unidas.

Valdivia, J. M., Scipión, D. E., Milla, M., & Silva, Y. (2020). Multi-Instrument Rainfall-Rate Estimation in the Peruvian Central Andes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *37*, 1811–1826. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0105.1

Villón, M. (2009). *Hidrología*. (Editorial Villón, Ed.) (2a Ed.). Lima, Perú.

Vinson, J., Barthes, L., Ogden, F., Creutin, J., Golé, P., Kruger, A., … Krajewski, W. F. (2005). DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basic results and implications for hydrologic studies. *Advances in Water Resources*, *29*(2), 311–325. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.03.018

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

Yuter, S. E., Kingsmill, D. E., Nance, L. B., & Löffler-Mang, M. (2006). Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *45*(10), 1450–1464. https://doi.org/10.1175/JAM2406.1

Zubieta, R., & Saavedra, M. (2009). Distribucion Espacial del Indice De Coventracion De Precipitación Diaria En Los Andes Centrales Peruanos : Valle Del Rio Mantaro. *TECNIA*, *19*(2).

Zubieta, R., Saavedra, M., Silva, Y., & Giráldez, L. (2016). Spatial analysis and temporal trends of daily precipitation concentration in the mantaro river basin: Central andes of peru. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *31*(6), 1305–1318. https://doi.org/10.1007/s00477-016-1235-5

# ANEXOS

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPOTESIS GENERAL | VARIABLES | DEFINICIÓN | DIMENSIONES | INDICADORES |
| ¿Cómo se puede realizar un análisis de la microestructura de los eventos de lluvia ocurridos en el temporal de lluvias 2018 – 2019 en el Observatorio de Huancayo, a partir de la observación de datos in situ de la distribución del tamaño de gotas? | Examinar la importancia de la variabilidad temporal de la lluvia sobre la microestructura de los eventos de lluvia, a través de los índices de concentración y los umbrales de precipitación. | El análisis de la microestructura de los eventos de lluvia acontecidos en el Observatorio de Huancayo, para el temporal de lluvias 2018 – 2019; se encuentra en función al estudio de la distribución del tamaño de las gotas, la caracterización del tipo de evento y la estimación tanto de los parámetros integrales de lluvia como de los parámetros del ajuste matemático empleado para el espectro de gotas. Este análisis proporciona información a un nivel detallado respecto a las características de los eventos y de los hidrómetros. | Variable independiente: Observación instrumental de la distribución del tamaño de gotas | Comprende al proceso que engloba la recolección, transmisión y procesamiento de datos provenientes de la medición de la DSD. | Recolección y calidad de los datos | Datos perdidos |
| Periodo de datos disponible |
| Equipos de medición | Principios de medición |
| PROBLEMA ESPECIFICO | OBJETIVOS ESPECIFICOS | HIPOTESIS ESPECIFICAS | Sensibilidad de los equipos |
| ¿En qué aspecto contribuye a la microestructura de lluvia, el análisis de la variabilidad temporal de la lluvia? | Examinar la importancia de la variabilidad temporal de la lluvia sobre la microestructura de los eventos de lluvia, a través de los índices de concentración y los umbrales de precipitación. | La variabilidad temporal de la lluvia juega un rol importante en el análisis de la microestructura, debido a que brinda información referente a los eventos extremos. Así mismo, proporciona alcances sobre el común de las precipitaciones. | Fuentes de error en la lectura y transmisión de datos | Tipo de errores más frecuentes |
| Influencia de los errores |
| ¿Cómo contribuye las características de los sensores en la estimación de la lluvia e identificación de los hidrometeoros? | Efectuar un análisis instrumental, basado en la sensibilidad para la estimación de precipitación, teniendo en cuenta el porcentaje de variación. | Los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD, facilita el análisis de los espectros de gotas de cada evento de lluvia. | Variable dependiente: Microestructura de los eventos de lluvia | Comprende el análisis de las características de los eventos de precipitación, como son la cantidad de lluvia aportada, frecuencia de ocurrencia, el tipo de evento, los tipos de hidrometeoros presentes y el espectro de gotas | Características de los eventos de precipitación | Umbrales de acumulado de lluvia |
| Formas de hidrometeoros predominantes |
| ¿Qué información proporciona el tipo de evento de lluvia, los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD respecto a la microestructura? | Interpretar la información proporcionada por el tipo de evento de lluvia, los parámetros integrales de lluvia y los parámetros del ajuste matemático aplicado a la DSD. | La presencia de agentes externos al instrumento de medición, generan fuentes de error que perjudican el registro real de los datos. | Clasificación de lluvia |
| ¿Cuáles son los aportes que tiene la comparación de los parámetros de la DSD estimados mediante observaciones in situ y por el método estadístico? | Comprar los parámetros de la DSD tabulados por observaciones in situ y por el método estadístico. | La comparación de datos del espectro de gotas obtenidos por observación directa referente a los calculados por el método estadístico del momento, permite visualizar ciertas discrepancias y como estas afectan al análisis de la microestructura. | Variabilidad diaria de la precipitación | Umbrales de precipitación total de lluvia diaria |
| Índice de concentración |