



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA LLUVIA DEL PÁRAMO

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR:

RYAN SEBASTIÁN PADRÓN FLASHER

DIRECTOR:

ING. ROLANDO CÉLLERI ALVEAR., PhD

CUENCA – ECUADOR

MAYO 2013



RESUMEN

Los páramos son ecosistemas que brindan servicios ambientales extraordinarios a las comunidades andinas, siendo el principal la dotación de agua de calidad y en una cantidad considerable a lo largo del año. A pesar de su importancia, se ha investigado muy poco sobre la hidrología de estos ecosistemas. En el presente estudio se analizó la estructura de la precipitación en el páramo, basado en 14 meses de datos de lluvia correspondientes a la parte alta de la cuenca del río Zhurucay (3780 m.s.n.m.), ubicada en el sur del Ecuador. Se realizó: (i) Comparación entre las lecturas de 4 pluviógrafos de balancín y un disdrómetro laser, y (ii) Análisis de la variabilidad temporal de la precipitación. A partir de los datos del disdrómetro, se estimó que la precipitación real es superior a la medida por los pluviógrafos en un rango del 5% al 12%. Para lluvias de intensidades bajas (≤ 1 mm/h) las diferencias porcentuales entre los sensores se incrementan. El viento afecta prácticamente de la misma manera las mediciones de todos los pluviógrafos; mientras que las altas velocidades (> 4 m/s) ocasionaron una subestimación mayor al 10% en las lecturas del disdrómetro posiblemente debido a un problema de calibración en la velocidad de caída de las gotas. El patrón de precipitación es unimodal y la lluvia se encuentra bien distribuida para todos los meses del año. Se identificaron dos épocas en el año para las cuales la intensidad promedio y el patrón de precipitación intra-diario son distintos, lo que podría sugerir distintos procesos de generación de la lluvia y/o el ingreso de humedad desde dos fuentes diferentes (Pacífico y Atlántico/Amazonas). La ocurrencia de precipitación en el páramo es elevada y comúnmente se produce con intensidades bajas; se tuvo apenas un 12.5% de días secos al año y el 80% de la lluvia registrada se produjo en forma de llovizna, con una intensidad ≤ 1 mm/h, lo cual demuestra su importancia como fuente de ingreso de agua. Los resultados del estudio permiten una estimación más precisa de la precipitación en el páramo y aportan en la búsqueda de un mejor entendimiento del ecosistema y su respuesta hidrológica.

Palabras clave: Precipitación del páramo; estructura de la lluvia; disdrómetro laser; variabilidad temporal; comparación de equipos; Ecuador.



ABSTRACT

The *páramo* ecosystem is a year-round water provider for the Andean communities. Despite its importance, research of páramo hydrology is still quite scarce. The páramo precipitation structure was analyzed based on a 14 month rainfall database from a site located in the Zhurucay river basin (3780 m.a.s.l) in southern Ecuador. This study includes: (i) Comparison of rainfall measurements from 4 tipping bucket (TB) rain gauges and a laser disdrometer, and (ii) Analysis of temporal rainfall variability. Based on disdrometer data, the real precipitation amount was estimated to be between 5% and 12% higher than the amount measured by the TB rain gauges. For low intensity rainfall (≤ 1 mm/hr) there is an increase in the percent differences between sensors. Wind induced errors are essentially the same for all the TB gauges. Meanwhile, for high wind speeds (> 4 m/s), the disdrometer underestimated more than 10% of the rainfall most likely due to a calibration problem of the fall speed of precipitation particles. The rainfall regime is unimodal and precipitation is spread throughout the year. Two seasons with different average intensity and intraday rainfall patterns were identified, and may be related to different rain generation processes and/or moisture input from both the Pacific and Atlantic/Amazon regions. Rainfall frequency in the páramo is high and the intensity is usually low; there was only 12.5% of dry days throughout the year and during 80% of the time when precipitation occurred, it was as drizzle or *llovizna* (intensity ≤ 1 mm/hr), highlighting the importance of this type of precipitation as a water input source. The results of this study allow a more precise estimation of the rainfall amount in the páramo and contribute to a better understanding of the ecosystem and its hydrological response.

Keywords: Páramo precipitation; rainfall structure; laser disdrometer; temporal variability; sensor comparison; Ecuador.



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTO.....	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Justificación	10
1.3 Objetivos	11
1.4 Organización de la tesis.....	11
1.5 Zona de estudio	12
1.5.1 Ubicación	13
1.5.2 Clima	13
1.5.3 Estación meteorológica	15
CAPÍTULO 2: CONTROL DE CALIDAD DE DATOS Y ELABORACIÓN DE UNA BASE DE DATOS OPERACIONAL	17
2.1 Introducción	17
2.2 Materiales	20
2.2.1 Pluviógrafos de balancín.....	21
2.2.2 Laser Precipitation Monitor (Disdrómetro)	22
2.2.3 Met One 034B Windset (Sensor de viento).....	24
2.3 Métodos	24
2.3.1 Pluviógrafos	25
2.3.2 Disdrómetro	27
2.4 Resultados	28
2.4.1 Pluviógrafos	29
2.4.2 Disdrómetro	31
2.5 Conclusiones	34
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES SENSORES UTILIZADOS PARA MEDIR LA LLUVIA, A PARTIR DE OBSERVACIONES DE PLUVIÓGRAFOS Y UN DISDRÓMETRO LASER	37
3.1 Introducción	37
3.2 Materiales	38



3.3 Métodos	39
3.3.1 Acumulación de lluvia y cálculo de intensidades	39
3.3.2 Rangos de intensidades de precipitación y velocidades de viento	44
3.3.3 Análisis estadístico comparativo	46
3.4 Resultados	48
3.4.1 Evaluación general	48
3.4.2 Efecto de la intensidad	53
3.4.3 Efecto del viento	58
3.4.4 Efecto del método de cálculo de la intensidad.....	62
3.5 Conclusiones	63
CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN	67
4.1 Introducción	67
4.1.1 Conceptos importantes	68
4.2 Materiales	69
4.3 Métodos	70
4.4 Resultados	72
4.4.1 Variabilidad mensual	73
4.4.2 Variabilidad diaria	74
4.4.3 Variabilidad subdiaria	77
4.5 Conclusiones	83
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	86
5.1 Investigaciones futuras	88
REFERENCIAS.....	90
ANEXOS	95
Apéndice A. Disdrómetro Thies: Clases de partículas que conforman el espectro de la lluvia.....	95
Apéndice B. Velocidad y dirección del viento en el sitio de estudio	96
Apéndice C. Índices estadísticos para la evaluación general de los sensores de precipitación.....	98
Apéndice D. Variabilidad subdiaria de la intensidad de precipitación	100



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Ryan Sebastián Padrón Flasher, autor de la tesis "Análisis de la estructura de la lluvia del páramo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 20 de mayo de 2013

Ryan Padrón

Ryan Sebastián Padrón Flasher
0103154043



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Ryan Sebastián Padrón Flasher, autor de la tesis "Análisis de la estructura de la lluvia del páramo", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 20 de mayo de 2013

Ryan Sebastián Padrón Flasher
0103154043



AGRADECIMIENTO

Quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a todos quienes contribuyeron para el desarrollo del presente estudio. Mi reconocimiento especial a Rolando Céleri A. por su invaluable y continuo aporte de ideas y conocimientos. Gracias al Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente de la Universidad de Cuenca por proveer los datos empleados para la investigación. A la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENESCYT) por el financiamiento entregado para el Proyecto PIC-08-460 “Cuantificación de los servicios hidrológicos de cuencas hidrográficas alto-andinas”, el mismo que permitió la realización de la tesis. A todo el personal de campamento del Proyecto Loma Larga (INV METALS S.A.) y en especial al Ing. Vicente Jaramillo, por el valioso apoyo durante las labores de campo. Finalmente, quiero agradecer a mis colegas y amigos Mario Gualpa, Boris Ochoa, Patricio Crespo, Patricio Lazo, Alicia Correa, Daniel Mendoza, Diego Mejía, Wilson Reinoso y Javier Cuñez por los consejos y comentarios constructivos que ayudaron a mejorar el estudio realizado.

Ryan Padrón Flasher,
Cuenca, mayo 2013.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La cordillera de los Andes atraviesa la franja occidental de Sudamérica, incluyendo al Ecuador. La región Sierra en el Ecuador representa alrededor del 34% del área del país y tiene como su principal característica el estar ubicada a lo largo del callejón interandino [1]. Entre los principales ecosistemas que se pueden encontrar en la zona montañosa se tienen: bosque (hasta aproximadamente los 3500 m.s.n.m.), páramo (aproximadamente entre los 3500 y los 5000 m.s.n.m.) y glaciares o zonas de nieves permanentes (aproximadamente desde los 5000 m.s.n.m.). Estos niveles altitudinales no son constantes, sino que varían considerablemente a lo largo de la cordillera, dependiendo de la latitud en la cual se realice el estudio. El páramo cubre una superficie aproximada de 35000 km² en Sudamérica, dónde Ecuador es el país con la mayor área de este tipo de ecosistema [2].

El páramo corresponde a una pradera neotropical (zona biogeográfica correspondiente a la región del continente americano bajo el Trópico de Cáncer) de altura. El clima comúnmente es frío y húmedo. La precipitación puede ser muy variable, desde valores inferiores a 1000 mm hasta superiores a 4000 mm, dependiendo de la zona (referencias de [3]). El páramo presenta características hidrológicas únicas. La producción de agua en cuencas pequeñas puede superar la mitad del total de la precipitación. La capacidad reguladora es extraordinaria. Esto se explica por los suelos con altos contenidos de materia orgánica (gran capacidad de retención del agua), por las bajas tasas de evapotranspiración debido al clima y por la inexistencia de una estación seca marcada. Además la escorrentía superficial en el páramo resulta mucho menor que el flujo lateral subsuperficial [1].

Los ecosistemas de páramo han sido poco estudiados científicamente, por lo que aún existe mucha incertidumbre sobre varios aspectos de su funcionamiento, entre los cuales está el componente hidrológico. El monitoreo hidrológico de estos ecosistemas en nuestro país es muy escaso, a pesar de esfuerzos recientes por mejorarlo [1], [3], [4], [5]. Además, muchas de las veces el monitoreo que se realiza presenta serios problemas en la calidad de la información. Uno de los aspectos que más asombra a quienes visitan en páramo es la frecuente presencia de lluvia. Sin embargo, debido al escaso monitoreo realizado en estos sitios altos (principalmente debido a la dificultad geográfica de acceso y al clima adverso) hay muy poco conocimiento científico sobre este proceso hidrológico. Para la medición de la precipitación existen varios tipos de equipos de distinta tecnología y precisión. El pluviógrafo es el equipo mayoritariamente utilizado para el monitoreo de la lluvia. Sin embargo, no todos los pluviógrafos tienen igual mecanismo de medición, ni precisión.

Para entender a mayor detalle cómo se presenta la lluvia en el páramo y en especial cómo es la estructura de la precipitación se requiere contar con equipos de calidad y tecnología adecuada, además de otorgarles el mantenimiento necesario. Para conocer qué tan representativa de la realidad es la medición realizada por un equipo, es



necesario comparar la información obtenida con los datos de otros equipos de mayor precisión y con observaciones directas realizadas en campo. El Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (GCTA) de la Universidad de Cuenca ha implementado 3 observatorios hidrológicos, 2 en sitios de páramo y uno en bosque andino, los que cuentan con las características necesarias para el estudio de la precipitación. En el observatorio de Zhurucay se dispone de 4 pluviógrafos automáticos de distinta tecnología, precisión (error relacionado con la intensidad de la lluvia) y resolución (0.1 y 0.2 mm) y un disdrómetro laser (resolución 0.01 mm). Es importante mencionar que no se ha encontrado bibliografía sobre la utilización de un disdrómetro en ecosistemas de páramo, ni en zonas de con altitud similar.

1.2 Justificación

La Sierra es un lugar que brinda los recursos necesarios para el desarrollo sostenible de una sociedad, y en ella los páramos constituyen ecosistemas que proporcionan extraordinarios servicios ambientales. La dotación de agua de excelente calidad y en un caudal considerable a lo largo de todo el año constituye tal vez, el principal servicio. En la región Interandina el aprovechamiento del agua proveniente del páramo resulta vital. Entre los principales usos de este recurso tenemos: uso urbano (doméstico e industrial), riego para la agricultura, generación hidroeléctrica, ecoservicios, etc. Otro dato relevante es que el agua de los páramos es prácticamente la única fuente para agua de consumo para una gran parte de la región Interandina debido a la dificultad de la explotación de aguas subterráneas. Lo mencionado en este párrafo es compartido por los siguientes autores [1], [3], [5] y algunas de sus referencias.

La importancia de los usos del agua proveniente del páramo es muy grande. Según las referencias de [3], más del 90% del agua para ciudades como Quito o Bogotá se obtiene del páramo. La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito cuenta con 2 captaciones para abastecer a la ciudad. Ambas se encuentran en zonas de páramo a una altitud aproximada de 3900 m.s.n.m. [6]. Esta información corrobora que prácticamente la totalidad del agua se obtiene del páramo, mientras que el aporte del agua de glaciación no alcanza ni el 5%. El agua para la ciudad de Cuenca también se obtiene del páramo [4]. A continuación se presentan algunos datos para el Ecuador de acuerdo con [1]. El potencial hidroeléctrico del país es de 73000 MW, a pesar de que hasta la actualidad ha sido muy poco desarrollado. En el plano agrícola, para el riego se utiliza el 97% de los recursos hídricos de la Sierra y de la cuenca del río Guayas, que corresponden al 10% del agua disponible del país. Finalmente estos ecosistemas de montaña tienen una alta biodiversidad y proveen servicios como: plantas para uso directo de animales y personas, materia prima para la industria (aceites, tintes, resinas, etc.), almacenamiento de carbón orgánico, etc. Resulta clara la necesidad de estudiar los ecosistemas de páramo debido a su importancia.

El aprovechamiento y desarrollo del recurso natural que representa el páramo debe realizarse en concordancia con planes de mitigación conjuntos. Solo de esta manera se podrá evitar que los daños ambientales en los ecosistemas no superen a los beneficios



económicos de la explotación de los recursos. Los ecosistemas de alta montaña, entre los cuales se incluye a los páramos, resultan especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático (según referencias de [3]). Se menciona por ejemplo que un incremento de 0.6°C en la temperatura en el páramo provocaría que los Andosoles - suelos típicos del páramo responsables en gran parte de la regulación del agua - dejen de existir a los 3300 m.s.n.m. y existan solo desde los 3400 m.s.n.m., lo cual generaría una menor área de páramo [7]. Es importante el estudio de la hidrología del páramo y de los impactos naturales y antropogénicos para poder generar planes o estrategias de manejo, conservación y mitigación de impactos que permitan mantener las grandes cualidades del mismo. Caso contrario, puede producirse un rápido deterioro del ecosistema que conlleve a una pérdida de la capacidad reguladora de agua y de biodiversidad [1], [3]. En el presente estudio se busca determinar cuánto y cómo llueve en el páramo, para que constituya un aporte al conocimiento requerido para la correcta toma de decisiones en el manejo de estos ecosistemas.

En el país existe la concepción de que los datos hidrológicos - especialmente los datos de precipitación - están exentos de errores, lo cual no corresponde a la realidad. Además son casi inexistentes los estudios que aborden el tema de la calidad de la información con la que se trabaja. Esta situación conlleva a que muchos proyectos relacionados con el recurso hídrico terminen siendo inaplicables o ineficientes, al estar basados en información errónea. También puede provocar que se tomen malas decisiones sobre el manejo y conservación de las cuencas hidrográficas. Resulta entonces clara la necesidad de evaluar la precisión de los equipos utilizados para medir la precipitación. De esta manera se puede cuantificar el error y considerarlo durante la utilización de los datos, así mismo se puede establecer qué equipo brinda mejores resultados [8]. Por estas razones se justifica la necesidad de realizar un análisis del desempeño de varios equipos para determinar los errores de sus mediciones, así como las ventajas o desventajas que puedan presentar para las condiciones del páramo.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este estudio es analizar la estructura de la lluvia del páramo. Como caso de estudio se utilizarán los datos del páramo correspondiente a la parte alta de la microcuenca del río Zhurucay. Para lograr el objetivo principal es necesario trabajar en los siguientes objetivos específicos: (i) Realizar el control de calidad de datos de lluvia y desarrollar una base de datos operacional; (ii) Analizar las ventajas y desventajas de los diferentes sensores utilizados para medir la lluvia a partir de observaciones de pluviógrafos y un disdrómetro laser; y (iii) Conocer la variabilidad temporal de la estructura de la precipitación.

1.4 Organización de la tesis

El contenido de la presente tesis se ha dividido en los siguientes capítulos.



Capítulo 1 – Introducción - En las primeras dos secciones se enmarcan el problema y las condiciones que han motivado realizar la investigación, así como las razones de su importancia por la cuales se justifica su desarrollo. Luego se listan los objetivos planteados, seguido de la organización de la tesis. Finalmente, se describe la zona de estudio.

Capítulo 2 - Control de calidad de datos y elaboración de una base de datos operacional - Detalla las características de los equipos utilizados (pluviógrafos de balancín y disdrómetro laser). Discute los problemas que se presentaron durante la elaboración de la base de datos y las acciones que se tomaron para remediarlos. La calibración estática de los pluviógrafos y las lecturas del tipo de precipitación del disdrómetro fueron los principales puntos analizados. Como resultado de este capítulo se tiene definido para cada equipo los períodos para los cuales se cuenta con información, además de conocer la confiabilidad de los datos. Al final se presentan las conclusiones alcanzadas y algunas recomendaciones.

Capítulo 3 - Análisis de ventajas y desventajas de los diferentes sensores utilizados para medir la lluvia, a partir de observaciones de pluviógrafos y un disdrómetro laser - Presenta un estudio comparativo del funcionamiento de los distintos sensores, en el que principalmente se utilizan el error relativo y el error relativo absoluto. Se clasifica en dos análisis, uno entre equipos de una misma tecnología (pluviógrafos) y otro entre distintas tecnologías (pluviógrafo vs disdrómetro). Además se abarca el efecto de la intensidad de precipitación y de la velocidad del viento sobre las lecturas de los distintos sensores. Para ambos casos se realiza la comparación de las lecturas de los equipos correspondientes a distintos rangos de intensidad y velocidad de viento. Se incluye también el efecto del método utilizado para el cálculo de la intensidad sobre las lecturas de los pluviógrafos. La comparación de las mediciones de precipitación se las realiza para distintas escalas temporales de agregación.

Capítulo 4 - Estudio de la variabilidad temporal de la estructura de la precipitación - En este capítulo se emplea únicamente la información del pluviógrafo de mejor rendimiento para la realización de un estudio estadístico descriptivo de la precipitación en el páramo. Se analiza la variabilidad temporal de la lluvia a: (i) escala mensual para conocer cuánto llueve en el páramo y si existe o no estacionalidad; (ii) escala diaria para identificar la cantidad y cómo ocurren los días secos; y (iii) escala subdiaria para saber a qué horas del día suceden con mayor frecuencia los eventos de precipitación. Además se determina el rango de las intensidades de precipitación y su variabilidad mensual, información con la cual se puede establecer cuánto aporte tiene la llovizna en el total de lluvia y si es que varía a lo largo del año.

Capítulo 5 - Conclusiones y recomendaciones generales - Contiene un resumen de la investigación con sus resultados más relevantes. Además se presentan sugerencias para estudios similares y una sección con investigaciones futuras recomendadas.

1.5 Zona de estudio



En esta sección se aborda la ubicación de la zona de investigación, el clima del páramo y el detalle del sitio de instalación de los sensores. Una descripción mucho más completa de la microcuenca a la que corresponde el estudio puede encontrarse en [9], la misma que incluye puntos adicionales como vegetación, suelos, geología e hidrología básica.

1.5.1 Ubicación

El observatorio hidrometeorológico utilizado para la presente investigación se encuentra ubicado en la parte alta de la microcuenca del río Zhurucay. Está aproximadamente entre las coordenadas UTM 694700 m - 697700 m (X), 9658750 m - 9662500 m (Y) y su altitud varía de 3495 a 3900 m.s.n.m. En el contexto político, está situada en la República del Ecuador, provincia del Azuay, entre las jurisdicciones de los cantones San Fernando y Girón, y en las parroquias San Gerardo y Chumblín. (Ver Figuras 1.5.1 y 1.5.2 [10]). El río Zhurucay es afluente del Rircay, el mismo que aporta al río Jubones y cuyas aguas finalmente llegan al océano Pacífico. La zona de estudio tiene la peculiaridad de ser la cabecera de las cuencas hidrográficas de los ríos Tarqui, Yanuncay y Rircay, de los cuales los dos primeros desembocan en el océano Atlántico y el último en el Pacífico [11].

El observatorio de Zhurucay está aproximadamente a 85 km al sudoeste de la ciudad de Cuenca, donde se encuentra la Universidad de Cuenca y su Grupo CTA que realiza las investigaciones en este sitio. El acceso a la estación hidrometeorológica desde Cuenca se realiza en carro (2 horas) y posteriormente a pie (15 minutos). En el área donde está el observatorio existen campamentos de la empresa minera INV METALS S.A. Gracias a un acuerdo, la empresa colabora con la movilización en la zona, la seguridad de los equipos instalados y el apoyo logístico en casos puntuales de monitoreo intensivo. Estas situaciones permiten que pueda llevarse a cabo un monitoreo frecuente, lo cual resulta fundamental para las investigaciones en la zona.

1.5.2 Clima

La información presentada en este párrafo corresponde a más de 1 año de datos de sensores meteorológicos que almacenan datos promedio cada 5 minutos, colocados junto a los sensores de precipitación, en una misma estación meteorológica en el observatorio de Zhurucay. La temperatura promedio diaria para todo el período de datos es de 5.9°C, lo cual es consistente con [7], [11]. La variación estacional de la temperatura es casi inexistente, el mes con el mínimo promedio diario es julio 2011 con un valor de 4.8°C, mientras que noviembre 2011 con 6.7°C tiene el máximo promedio diario. Sin embargo, el rango de variación entre la

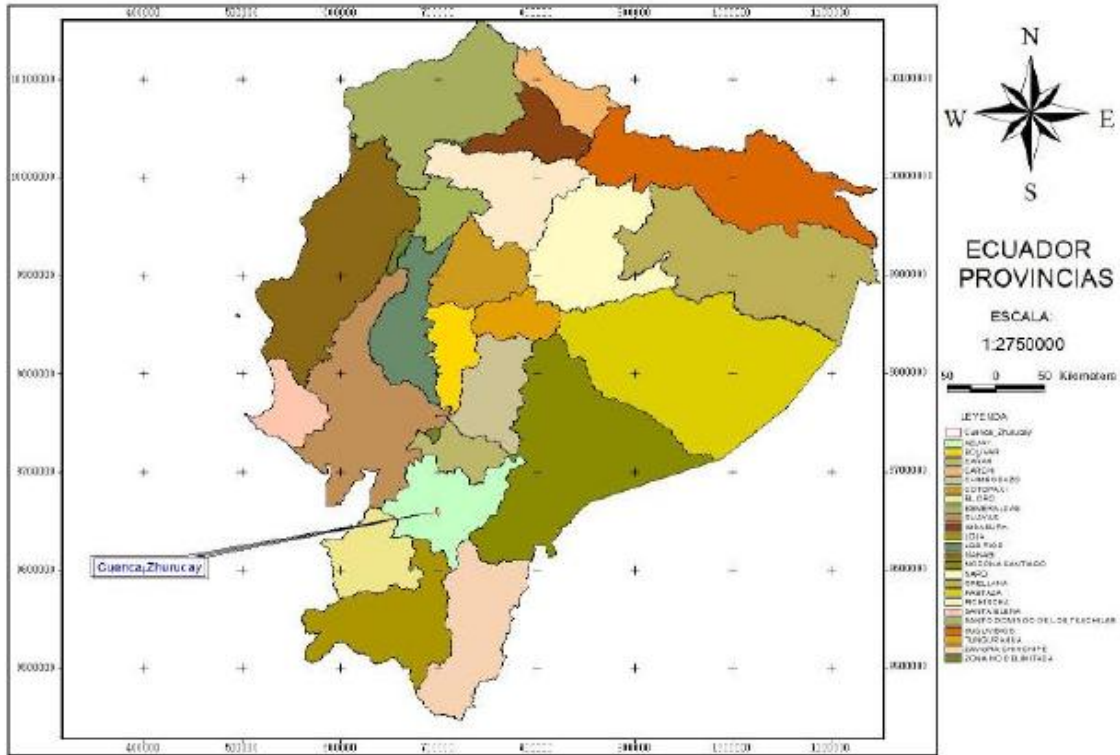


Figura 1.5.1: Ubicación de la zona de estudio en el contexto nacional. (Fuente: [20])

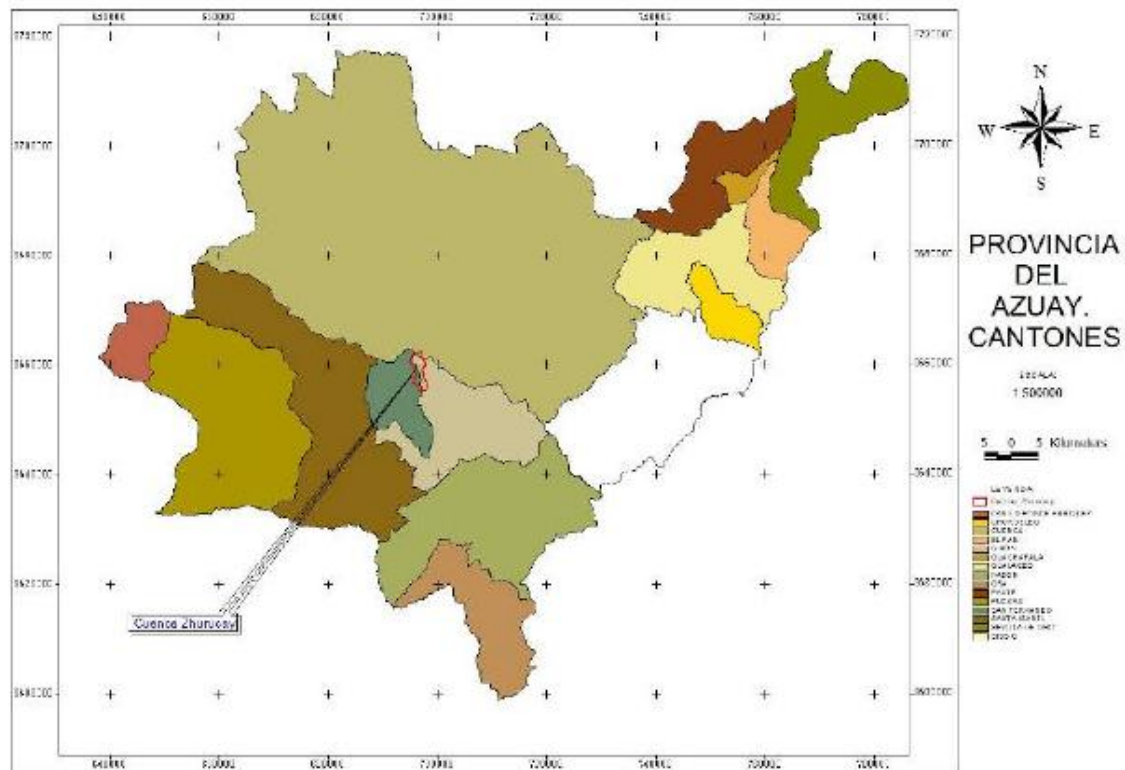


Figura 1.5.2: Ubicación de la zona de estudio en el contexto provincial. (Fuente: [20])



máxima y la mínima temperatura promedio cada 5 minutos de un mismo día puede superar los 15°C. Además se tienen días en que la mínima temperatura promedio cada 5 minutos puede llegar a valores inferiores a 1°C, pero esto ocurre esporádicamente (6.4% de todos los días del año) y en su mayoría durante los meses de julio a octubre. Esto se explica dado que en los meses de invierno (diciembre - mayo) la nubosidad es permanente y la humedad relativa es alta provocando que no se pierda el calor de la onda larga reflejada por la superficie terrestre, lo cual aumenta significativamente la temperatura durante la noche en comparación con los meses de verano [5]. La humedad relativa promedio diaria para el total de datos es de 91% y los meses con el menor promedio diario fueron octubre y noviembre de 2011 con un valor aproximado de 82%. La radiación solar en estas zonas es muy elevada debido a su latitud y altitud, alcanzando valores instantáneos de 1.4 kW/m². Finalmente, la velocidad del viento presenta un comportamiento estacional con valores superiores para los meses de mayo a septiembre (promedio = 4.4 m/s) que para el resto del año (promedio = 2.7 m/s). Se alcanzó un valor máximo para los datos promedio cada 5 minutos de aproximadamente 10 m/s. Mientras tanto la dirección predominante cambia según la época del año, aunque se distingue una tendencia general importante (aproximadamente el 45% de los datos) de vientos procedentes entre el este (E) y el noreste este (NEE). En el Apéndice B se presenta datos de velocidad y dirección del viento durante precipitación. La mayoría de la información presentada es consistente con [11].

Lluvia:

Dentro del clima del páramo, lo relacionado a la precipitación es fundamental para el presente trabajo. La precipitación promedio anual en estos ecosistemas es muy variable, de acuerdo con las referencias de [3], [7] puede variar entre 700-4000 mm. Mucho tiene que ver en estas variaciones el efecto latitudinal con sus correspondientes corrientes oceánicas. La estacionalidad es muy poco marcada, lo que se evidencia con el dato de que todos los meses con la excepción de junio han sido alguna vez el de mayor precipitación entre 1964 y 1998 en los páramos del Machángara (sur del Ecuador) [1], [7]. Se ha reportado una alta variabilidad espacial debida al comportamiento del viento en topografías accidentadas con fuertes pendientes, según [3], [5]. Es muy común que los eventos de precipitación sean de alta frecuencia y bajas intensidades [5], [7], [11]. El patrón climático y de precipitación de la zona de estudio está influenciado por la corriente de aire proveniente del océano Pacífico, pero también por las masas de aire continentales y las tropicales del océano Atlántico [3], [11].

1.5.3 Estación meteorológica

El sitio de instalación de los sensores utilizados en el presente estudio corresponde a una área aproximada de 14 x 14 metros, la misma que se encuentra cercada con una malla metálica de más de 2m de alto por seguridad y para evitar que animales puedan dañar los equipos (ver Fig. 1.5.3). El lugar es relativamente plano y se encuentra sobre una pequeña loma. Además de los pluviógrafos y el disdrómetro laser, se tienen otros sensores en el sitio para medir: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica,



velocidad y dirección de viento, radiación solar y humedad del suelo. La colocación de los equipos dentro de la estación, al igual que las alturas de instalación fueron escogidas de acuerdo con los manuales de los equipos y las recomendaciones de [12] con el afán de evitar al máximo que existan obstáculos aledaños que afecten la medición de los sensores. Las alturas de instalación de los 4 pluviógrafos son muy similares y son de aproximadamente 1m, mientras que para el disdrómetro es de 2m. Además la mínima distancia horizontal entre dos equipos está alrededor de los 2m.



Figura 1.5.3: Estación que contiene los sensores de precipitación utilizados



CAPÍTULO 2: CONTROL DE CALIDAD DE DATOS Y ELABORACIÓN DE UNA BASE DE DATOS OPERACIONAL

2.1 Introducción

El contar con una buena base de datos es una condición fundamental para llevar a cabo de manera exitosa cualquier estudio en el campo de la hidrometeorología. De acuerdo con cada estudio particular, serán necesarias ciertas características de la base de datos para definirla como buena. Aspectos importantes son la confiabilidad, duración, continuidad, resolución (escala de tiempo) y la coincidencia de la información cuando se trabaja con más de un equipo. El mantenimiento de los equipos resulta un punto base para su correcto funcionamiento, lo cual no es una práctica común en nuestro medio. Al tratar con datos de precipitación, son varios los problemas que pueden suscitarse causando que la medición se aleje del valor real. Las causas de error más comunes son: Errores del equipo en la medición (no calibrado o por condiciones especiales de zona próximas al equipo) y errores sistemáticos (una dirección - detectables o aleatorios - no detectables) como son los inducidos por viento e intensidad y errores de muestreo (relacionado con la resolución del equipo) [13], [14], [15], [16], [17], [18] [19]. Debido a la importancia de contar con una base de datos de buena calidad, son múltiples los autores (citados anteriormente) que han destinado una sección de sus obras para abordar el tema. Asimismo, se ha creído pertinente destinar este capítulo del presente trabajo para su discusión.

El planificar globalmente, desde un inicio, el desarrollo de un proyecto de investigación resultará básico para conseguir que sea exitoso. En la hidrometeorología, dicha planificación permitirá la consecución de una base de datos con las características deseadas a través del monitoreo que se lleve a cabo. De manera previa a la toma de datos, resulta necesario escoger el tipo de ecosistema que se va a estudiar. Luego es necesario buscar la mejor opción tomando en cuenta criterios como: localización, acceso, facilidades para la instalación de equipos y comodidades. Esto permitirá un monitoreo continuo, lo que se traducirá en una pronta solución a problemas que ocurran, logrando reducir la pérdida de información así como la pérdida de calidad. Otro aspecto importante es el elegir adecuadamente los equipos a utilizarse, el método de muestreo y la resolución temporal de la toma de datos, para evitar inconvenientes futuros. Cabe mencionar que todo lo anterior está sujeto al presupuesto del que se disponga. Muchos artículos no abordan la planificación del monitoreo, sino únicamente describen la zona de estudio y los equipos utilizados (e.g. [16], [19], [20]), debido a que en países más desarrollados ya se cuenta con redes densas de monitoreo conformadas hace ya varios años. Sin embargo, en el Ecuador el monitoreo hidrometeorológico continúa siendo escaso [3] por lo que se ha creído necesario discutir brevemente su planificación. Esto con vista a la creación de nuevas redes de monitoreo.

Los datos de precipitación constituyen un requisito principal dentro de la modelación hidrológica. A su vez dicha modelación constituye una herramienta fundamental dentro del campo de la hidrología y de manera más general para el estudio de ecosistemas.



Sin embargo, para que la información obtenida mediante un modelo tenga relevancia y utilidad, los datos con los que se trabaja deben ser reales y representativos de la zona de estudio. En la actualidad continúa siendo un problema importante la dificultad técnica y económica de obtener información de calidad para el modelamiento hidrológico. El error en los datos de precipitación que se ingresan a un modelo constituye una de las principales fuentes de incertidumbre para los resultados que arroje el modelo, de acuerdo con las referencias del artículo [21]. Esta incertidumbre es un tema de gran importancia, sobre todo para la utilización de los resultados en la toma de decisiones. Según [21] la influencia que cada tipo de error tiene en la incertidumbre de los resultados de un modelo puede ser cuantificada. Esto permite que se puedan tomar medidas con un mejor criterio para disminuir la influencia del error en los resultados. Además, para un modelo particular, si se conoce el error en los datos de precipitación se puede calibrar automáticamente el modelo de manera que se minimice la influencia del error y se obtengan resultados óptimos [15].

Para el presente estudio se utiliza información recolectada por parte del equipamiento hidrometeorológico con el que cuenta el Grupo de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (GCTA) de la Universidad de Cuenca. Se cuenta con datos de precipitación de 4 pluviógrafos de distintas características y 1 disdrómetro laser, además de datos dirección y velocidad de viento de una estación meteorológica contigua. Todos los equipos se encuentran colocados en un mismo sitio. No todos los equipos fueron instalados simultáneamente. Existe información de uno de los pluviógrafos desde agosto de 2010, y de los otros pluviógrafos desde diciembre de 2010. Mientras tanto la estación meteorológica y el disdrómetro se instalaron en distintas fechas de febrero de 2011. Todos los equipos continúan tomando datos hasta la actualidad, e incluso se han adicionado sensores en el lugar de monitoreo.

Siendo el mes de marzo de 2011 el primer mes completo con información común de todos los equipos, se ha establecido para este trabajo utilizar una base de datos con información entre 01/03/2011 - 30/04/2012. Dos pluviógrafos registran la hora con minutos y segundos a la que se marcó un incremento de precipitación, mientras que los otros dos registran el incremento total de precipitación cada minuto. Para el disdrómetro se tiene información disponible cada 30 minutos, mientras que los datos de viento son cada 5 minutos. De esta manera se cuenta con información de al menos 1 año de datos, permitiendo el estudio de la variabilidad temporal de la precipitación en escala mensual, diaria y subdiaria.

El funcionamiento de los sensores, en general, fue bueno a lo largo del período establecido para el estudio. No obstante, es común que se presenten algunos inconvenientes relacionados con los datos. A continuación se describen los problemas ocurridos para los distintos equipos.

- **Pluviógrafos:** (i) Para 3 de los 4 pluviógrafos se tuvo períodos de vacíos de datos. Casos aislados de falta de memoria, mal funcionamiento de cables de descarga o problemas en los contactos eléctricos causaron la pérdida del 4% y 12% de los datos de dos pluviógrafos. Una conexión electrónica defectuosa



provocó que el pluviógrafo restante cuente con solo 6 meses de datos válidos. (ii) Todos los equipos se encontraban descalibrados. (iii) En ciertas ocasiones, debido al manipuleo de los equipos al momento de la descarga, se generaron registros que no correspondían a precipitación.

- **Disdrómetro:** (i) Se tiene un 10% de vacíos de datos ocurridos debido a ocasiones en las que la memoria se quedó sin espacio. (ii) De acuerdo con los fabricantes del equipo (comunicación personal), la clasificación del tipo de precipitación no es siempre confiable. Esto se da debido a que la altitud del sitio de instalación es 3780 m.s.n.m. y la altitud máxima especificada en el manual del sensor es de 1500 m.s.n.m. [22], lo que genera que la velocidad de caída de las partículas sea menor a la utilizada para la calibración del equipo. Se duda principalmente de los registros de nieve, ya que de una conversación con el Ing. Vicente Jaramillo, quien ha vivido por varios años en la zona de estudio como coordinador de campamento de la empresa minera INV METALS S.A., se conoce que es muy inusual la caída de nieve en el área. Esta situación constituye un problema, ya que para las lecturas de nieve se subestima la cantidad de precipitación al considerar una densidad distinta a la del agua líquida. (iii) El voltaje suministrado al equipo no es el requerido, lo que ocasionalmente provoca problemas de señal estática o de valores de la energía de salida del laser fuera del rango normal. Más adelante en el capítulo se explican estos temas con mayor detalle y se determina qué tanto afecta este problema la calidad de la base de datos. (iv) La calefacción de los lentes del sensor no funcionó durante todo el período de análisis, sin embargo este es un problema leve. (v) Se cuenta con datos de la cantidad de lluvia cada 30 minutos, pero la información del tipo de precipitación y otras variables corresponden a los últimos 5 ó 1 minutos de cada media hora.
- **Sensor de viento:** (i) Se tiene un único problema de sencilla solución. El equipo no estaba correctamente referenciado con respecto al norte, por lo que a todos los datos de dirección se les corrigió un valor determinado.

Varios estudios han abordado el tema de la calidad de los datos de precipitación registrados por los pluviógrafos, donde la calibración aparece como un tema principal [18], [19], [23]. Para disdrómetros como el utilizado en la presente investigación, la cantidad de estudios que se han llevado a cabo es menor. No obstante, existen algunos autores (i.e. [17], [24], [25]) que evalúan el funcionamiento de estos disdrómetros y analizan la precisión con la que el sensor es capaz de determinar el diámetro de las partículas que atraviesan el laser. Sin embargo, no se ha podido encontrar bibliografía en la que se abarque la confiabilidad en la determinación del *tipo de precipitación* y la frecuencia de mensajes de error o advertencia para las *variables de estado*.

El control de calidad de los datos con los que se cuenta, tiene como finalidad obtener una base con datos confiables que permita realizar exitosamente los estudios planteados en los demás capítulos de la tesis. Si no se llevara a cabo un control de

calidad de los datos, su utilización muy probablemente ocasionaría que se lleguen a conclusiones equivocadas, convirtiendo en inútil el estudio realizado. Por lo tanto, en este capítulo se identifica los problemas que presentan los datos a utilizarse y se toman medidas correctivas al respecto.

2.2 Materiales

La base de datos con la que se trabaja, cuenta principalmente con información de precipitación de los 4 pluviógrafos y el disdrómetro laser. (Ver Fig. 2.2.1). Además se cuenta con datos de velocidad y dirección del viento. Todos los pluviógrafos son de balancín (tipping bucket), por lo que inicialmente se realiza una descripción general de los pluviógrafos. Luego se detalla individualmente las características de cada pluviógrafo y el disdrómetro, y se presenta una comparación de la resolución y precisión de los equipos en la Tabla 2.2.1. Además al final de esta sección se trata sobre la veleta y el anemómetro utilizados para la medición del viento.



Figura 2.2.1: Sensores de precipitación utilizados



2.2.1 Pluviógrafos de balancín

Los pluviógrafos son equipos capaces de medir lluvia acumulada y además intensidades de precipitación. Aparte de los pluviógrafos de balancín existen otros tipos de pluviógrafos como los de pesaje, capacitancia o flotador. No obstante, el uso de los pluviógrafos de balancín es ampliamente extendido a nivel mundial [13], [16].

El equipo generalmente consiste de un cilindro con una abertura en la parte superior. Esta abertura usualmente está protegida por una malla, la misma que evita el taponamiento de un embudo por el cual el agua ingresa hacia el interior del pluviógrafo. El agua lluvia que pasa por el embudo cae en el “bucket” o pequeño reservorio, cuyo volumen varía para los modelos empleados entre 0.1 y 0.254 mm. Luego de acumular el volumen específico, el bucket se desequilibra, el sistema se balancea y drena el agua a través del fondo del equipo. El bucket al tumbarse golpea un contacto eléctrico emitiendo una señal de pulso que permite registrar en un datalogger la hora a la que se dio el golpe (tip). El datalogger es una mini computadora que controla la operación de los equipos y almacena los datos. Cuando un bucket cae provoca que el bucket del otro lado del balancín quede en posición para receptor el agua que pasa por el embudo. De esta manera, a partir del número de registros obtiene la precipitación acumulada y mediante el tiempo entre registros se obtiene la intensidad de precipitación [12], [26]. En el observatorio de Zhuruca y se tienen instalados los siguientes pluviógrafos:

1. **Davis Rain Collector II (Davis):** Es el pluviógrafo más económico de los utilizados para el presente estudio, con un costo aproximado en la ciudad de Cuenca de \$120 (no se incluye costo del datalogger). El cilindro exterior es de plástico ABS con estabilización UV. Para el registro de los tips consta con un interruptor de lámina magnético. Es muy liviano, su peso es de 2 lbs. No tiene malla de protección para el embudo por lo que es más susceptible a taponarse. El diámetro receptor es de 16.5 cm. Tiene un datalogger Pendant propio, cuyo costo aproximado es de \$180. Para funcionar el datalogger requiere una batería individual (CR2032) de 3V que debe ser reemplazada cada cierto tiempo. Este datalogger permite registrar la hora (hh:mm:ss) a la que ocurre cada tip. Al realizar la descarga el mecanismo interno queda expuesto, por lo que es común que se tenga tips debido al viento y no por la lluvia durante los minutos de la descarga.
2. **Hobo Data Logging Rain Gauge - RG3-M (Onset):** Su costo aproximado es de \$600, sin incluir el datalogger. La carcasa es de aluminio y el sistema de balancín de acero inoxidable. Tiene un peso de 2.5 lbs. Tiene malla protectora. El diámetro del orificio de captación es de 15.39 cm. Tiene datalogger Pendant propio. Al igual que el Davis, utiliza una batería individual (CR2032) de 3V que debe ser reemplazada cada cierto tiempo y almacena la información de la misma manera.
3. **Rain Gauge Tipping Bucket TE525MM Rainfall sensor (Texas1):** Es un pluviógrafo relativamente caro, con un costo de \$815. Su exterior es de aluminio



adonizado. Tiene un borde del anillo colector muy fino (filo de cuchillo). Posee interruptores magnéticos de lámina protegidos para el registro de tips. Los buckets son de plástico ABS con protección UV. El sensor pesa 2.5 lbs. Viene con malla protectora sobre el embudo. Su diámetro de recolección es de 24.5 cm, considerablemente mayor al de los otros pluviógrafos. Se encuentra conectado al datalogger de la estación meteorológica Campbell Scientific adjunta, el mismo que funciona con una batería de 12 V recargable mediante un panel solar instalado en el lugar. Por lo tanto, para su descarga no es necesario manipular el sensor, lo que evita el registro de tips que no sean efecto de la precipitación. La información almacenada corresponde al número total de tips que ocurre cada minuto.

- 4. Rain Gauge Tipping Bucket TE525MM Rainfall sensor with 260-953 Alter-Type Wind Screen (Texas2):** Este pluviógrafo posee exactamente las mismas características que el Texas1, también está conectado al datalogger de la estación meteorológica adjunta y almacena la información de la misma manera. Sin embargo, se diferencian debido a que el Texas2 tiene a su alrededor una protección tipo Alter para atenuar los efectos del viento con un costo de \$1520 en Cuenca, casi el doble que el valor del pluviógrafo Texas utilizado. Consiste en un anillo de 1.2 m de diámetro (concéntrico con el pluviógrafo) del que cuelgan 32 hojas de una aleación zinc - hierro formando un escudo alrededor del pluviógrafo. Las hojas miden 40.6 cm de largo y 7.6 cm de ancho. La forma de las hojas y su separación permite que ante la acción del viento se cierren al ser levantadas en un ángulo aproximado de 45° [27]. La altura de instalación de la pantalla protectora es de 90 cm y debe estar entre 1-3cm por sobre el pluviógrafo. Las distintas medidas del escudo protector y las medidas con respecto al pluviógrafo Texas2 son muy similares a las usadas por [27], [28].

2.2.2 Laser Precipitation Monitor (Disdrómetro)

Para la presente investigación se utilizó un disdrómetro de marca Thies clima [25]. Este sensor es bastante más costoso que los pluviógrafos (costo aproximado sin datalogger \$7500). No obstante, el disdrómetro es capaz de medir la precipitación y su estructura al detalle. El uso de estos equipos no es tan extendido como el de los pluviógrafos, pero sus aplicaciones son variadas y numerosas. Este tema se desarrolla a mayor profundidad en la sección 3.1. A continuación se describe los componentes del sensor y el principio de su funcionamiento de acuerdo con [22], [24].

El equipo está compuesto de tres partes principales. Una caja protectora de aluminio barnizado dentro de la cual se tienen todos los circuitos electrónicos. Una cabeza emisora, la misma que está constituida por: un circuito electrónico con un diodo que emite el laser, un lente y un panel de vidrio. Una cabeza receptora con: un circuito que posee un foto diodo que registra la señal del laser, un lente y un panel de vidrio. Tanto la cabeza emisora como la receptora son de aluminio anodizado y están unidas a través de unos brazos conectores. Las dimensiones del prisma rectangular que



inscriben al disdrómetro son 53.2 x 26.6 x 16.6 cm de largo, ancho y alto respectivamente. (Ver Fig. 2.2.1).

La medición se realiza cuando una partícula (gota) cae a través del rayo de luz infrarroja proveniente de la cabeza emisora (área de medición de 45.6 cm²). Una partícula al atravesar el haz laser, reduce la intensidad óptica medida en la cabeza receptora. Así, dependiendo de la magnitud de dicha reducción y del tiempo que dure se establece el diámetro de la partícula y la velocidad de caída. (Ver Fig. 2.2.2). Este tipo de disdrómetros tienen la ventaja de tener incorporado un procesador de señales que es capaz de diferenciar si una partícula medida es o no un hidrometeoro. Esto lo realizan a partir estudios que han determinado los rangos de tamaño de gotas y sus velocidades de caída terminales. Los equipos incluso tienen la capacidad de establecer el tipo de precipitación (en función de la proporción estadística de los tamaños de gotas y velocidades de caída, además de un filtro según la temperatura) y de determinar la plausibilidad de que una medida corresponda a una gota que haya atravesado el área del laser por el borde [22], [29]. El tipo de precipitación que marca el sensor puede ser: llovizna, lluvia, granizo, nieve, precipitación mixta, precipitación no identificada y error del sensor. El equipo utiliza una matriz de 22 x 20 clases (total 440 clases) según distintos rangos de tamaño y velocidad de caída de las partículas, respectivamente, para medir el espectro de la lluvia. En el Apéndice A se presenta los rangos empleados por el disdrómetro. La información entregada por el sensor es el número de total partículas correspondientes a cada clase en el intervalo de tiempo fijado. En resumen, el disdrómetro tiene la capacidad de determinar el tipo de precipitación, la intensidad y el espectro proporcionando la información cada 1 minuto.



Figura 2.2.2: Principio de medición del disdrómetro



Tabla 2.2.1: Resolución y precisión de los sensores de precipitación

Sensor	Resolución (mm)	Precisión	
		Precisión (%)	Rango de Intensidad (mm/h)
Pluviógrafo Davis	0.254	$\pm 1\%$	0 - 50 mm/h
		$\pm 5\%$	50 - 100 mm/h
Pluviógrafo Onset	0.2	$\pm 1\%$	0 - 20 mm/h
Pluviógrafo Texas 1 y 2	0.1	$\pm 1\%$	0 - 10 mm/h
		+0, -3%	10 - 20 mm/h
		+0, -5%	20 - 30 mm/h
Disdrómetro Thies*	0.01	$\leq 15\%$	0.5 - 20 mm/h

* Precisión especificada es para velocidad de viento = 0 - 3 m/s

2.2.3 Met One 034B Windset (Sensor de viento)

Se cuenta con una estación meteorológica completa adyacente a los pluviógrafos y el disdrómetro. Su datalogger utiliza como fuente de energía una batería de 12 V que se recarga mediante un panel solar instalado en el sitio. Tiene un espacio de memoria capaz de almacenar un poco más de 1 mes de datos cada 5 minutos de todos los sensores conectados. Para el presente estudio, de los datos de la estación se utilizan únicamente los de viento. Esta información sirve para analizar el efecto que el viento tiene sobre la lectura de precipitación de los pluviógrafos y el disdrómetro. A continuación se describe el sensor de acuerdo con lo indicado en su manual.

El sensor de viento utilizado es un equipo de aluminio que consta de un anemómetro de 3 copas (velocidad) y una veleta (dirección) integrados en un solo cuerpo. La velocidad horizontal del viento es proporcional a la tasa de apertura y cierre de un interruptor por efecto de la rotación de las copas, lo que básicamente equivale a un contador de pulsos. Por su parte, la dirección del viento se mide a través de un potenciómetro que indica la posición de la veleta. Se aplica un voltaje de excitación al potenciómetro y el voltaje de salida es proporcional a la posición de la veleta. La resolución del sensor es de 0.5° para dirección y 0.8 m/s para velocidad. Mientras que la precisión es de $\pm 4^\circ$ y ± 0.12 m/s para el rango de velocidades de viento registradas. Es importante mencionar que la velocidad de viento se mide a una altura de 2 m sobre la superficie.

2.3 Métodos

En esta sección se aborda las acciones tomadas para asegurar contar con una base de datos de muy buena calidad para la realización del estudio. Resulta de suma trascendencia la realización de un control de calidad de los datos, para no obtener



resultados incorrectos que lleven a conclusiones erróneas. En primera instancia se trata lo referente a los pluviógrafos, donde la calibración aparece como un punto destacado. Se culmina con el control de calidad de los datos del disdrómetro.

2.3.1 Pluviógrafos

El control de calidad de la información de los pluviógrafos requiere tanto de la revisión de los equipos en el lugar de instalación como de un análisis de los datos en oficina. El contar con información obtenida en las visitas de campo sobre las condiciones de los sensores, su funcionamiento y otras situaciones de interés, es un aspecto clave para identificar posibles problemas. Por su parte también se han desarrollado técnicas o métodos analíticos de detección de mal funcionamiento y control de calidad, de acuerdo con las referencias de [13]. Otro criterio para la identificación de errores en oficina es el de contar con al menos dos pluviógrafos por sitio [19], [20].

Con la finalidad de proteger la calidad de la base de datos, la recopilación de información se realizó de la siguiente manera. Las descargas no se hicieron siguiendo un calendario fijo. La mayoría de las veces el tiempo entre descargas fue de tres semanas, mientras que el lapso más extenso fue de 45 días. Debido a que la memoria de los dataloggers tiene capacidad para almacenar miles de registros (para la programación utilizada la memoria tiene espacio para al menos 1 año de datos) y la batería dura al menos 2 meses en el peor de los casos, así se hubiese tardado más tiempo entre descargas, no constituiría un problema bajo condiciones normales de funcionamiento. Sin embargo, pueden presentarse distintas situaciones que afecten el normal funcionamiento, por lo que se buscó que las descargas se hagan lo más continuas para revisar que todo se encuentre bien y solucionar lo más pronto posible cualquier inconveniente. Por ejemplo, uno de los casos de pérdida de datos fue debido a que se había programado el datalogger para que tome datos cada 5 segundos, lo que provocó que se llene la memoria; si se hubiese esperado más tiempo hasta la próxima visita, la pérdida de datos hubiese sido mayor. Durante las visitas a los equipos se procedió a verificar el estado de la batería, que estén nivelados, que no haya taponamiento, a limpiar del interior los insectos o arañas y a igualar los relojes de los dataloggers. Este último punto es importante ya que por ejemplo, una diferencia de 1 minuto entre equipos es de consideración si se trabaja con escalas de agregación de 5 minutos. Para las condiciones del páramo la batería de los pluviógrafos Davis y Onset (utilizan pilas individuales de 3 V) se agota en menor tiempo, comparado con otros lugares con mayores temperaturas. Se optó por cambiar la batería cuando el nivel de la misma caía por debajo del 60%, con la finalidad de asegurar el registro ininterrumpido de datos. De acuerdo con esto, las baterías se reemplazaron aproximadamente cada 2 meses, a pesar que podían durar más tiempo. Por su parte, los pluviógrafos Texas no requieren el cambio de baterías, ya que se encuentran conectados al datalogger de la estación meteorológica adyacente y su fuente de poder es una batería de 12 V que es recargada por un panel solar. Gracias a la constante revisión, ninguno de los vacíos de datos de los pluviógrafos fue debido a problemas con la fuente de poder de los equipos.



Para el control de calidad de los datos en oficina, también se tomaron algunas medidas. Un problema que ocurrió en múltiples situaciones fue el registro de tips durante la descarga, debido a situaciones ajenas a la precipitación. Este problema afectó principalmente a los pluviógrafos Davis y Onset, ya que para su descarga hay que remover el embudo dejando el mecanismo de balancín desprotegido ante la acción del viento. Además es importante notar que los tips producidos, por lo común estaban parcialmente llenos. Como solución se decidió eliminar todos los registros correspondientes a los 5 minutos anteriores y posteriores a cada descarga y en los cuales el disdrómetro no registraba lluvia. Esta decisión obviamente genera una leve subestimación de la precipitación, al descartar los tips parcialmente llenos.

Otra medida tomada para la detección de errores fue el graficar el incremento de la precipitación acumulada de los 4 pluviógrafos en el tiempo. Este tipo de gráficas se las hizo para cada mes permitiendo distinguir períodos de inoperancia en alguno de los equipos [19]. Con respecto a los períodos de datos faltantes, se optó por no realizar ningún relleno. Se tomó esta decisión para no afectar las diferencias entre las lecturas efectivamente realizadas por cada equipo, y además debido a que el pluviógrafo Texas1 no presenta vacíos de información, siendo útil para el análisis de variabilidad temporal.

Calibración:

Está muy claro que para los pluviógrafos existe la necesidad de constatar que efectivamente el volumen de agua necesario para generar un tip, sea el indicado en la especificación como la resolución del equipo (calibración estática). Si no fuese este el caso y no se corregiría el error, implicaría una sub o sobre estimación de la precipitación que conllevaría a conclusiones erróneas. Los pluviógrafos de balancín, debido a su mecanismo de medición, están sujetos a sufrir pérdidas por efecto de la intensidad. La relación entre la intensidad real y la medida por un pluviógrafo es no lineal y se incrementa para intensidades mayores por efecto del agua que cae mientras el balancín se voltea [18], [23]. Entonces es necesaria también una calibración dinámica para determinar un factor de corrección en función de la intensidad.

De acuerdo con los resultados de [18] se observa que la subestimación de la lluvia por efecto de la intensidad es prácticamente insignificante para valores menores a 30 mm/h. En el manual del pluviógrafo Onset también se indica que no se requiere de corrección por intensidad para lluvias de menos de 20 mm/h. De acuerdo con esto y conociendo que para la zona de estudio menos que el 1% de los datos excede la intensidad de 20 mm/h y el más del 95% está por debajo de los 5 mm/h (Capítulo 4), se optó por realizar solamente la calibración estática de los pluviógrafos utilizados.

Para la realización de la calibración estática es necesario conocer el volumen nominal de carga del bucket del balancín. Es decir, se debe saber con cuántos mililitros se debería desequilibrar el balancín de modo que un tip corresponda a la cantidad de precipitación dada por la resolución del pluviógrafo. Conocido el volumen nominal, se mide el volumen real de carga y la diferencia será el error a corregir. Se conoce que 1



mm de lluvia corresponde al volumen de 1 lt recolectado en una área horizontal de 1 m², según [12]. Entonces para el pluviógrafo Onset, como la resolución es 0.2 mm correspondería a 200 ml si el área de recolección fuese 1 m². Ahora bien, el área no es 1 m² sino es el área del orificio circular de la boca del pluviógrafo, por lo que mediante una simple proporción se puede determinar a qué volumen corresponde la resolución del equipo.

$$\text{Vol nominal de carga (ml)} = \frac{\text{Área de recolección del pluviógrafo(cm}^2\text{)} * \text{Resolución(ml)}}{10\,000\text{ cm}^2} \quad (2.1)$$

Para la determinación del volumen real de carga se empleó una micropipeta de marca Thermo scientific. Con esta micropipeta es posible medir el volumen de agua con una resolución de 0.001 ml para el rango de 0.1-1 ml. El procedimiento realizado fue el siguiente. Se retira la malla protectora, pero no se remueve el embudo de los pluviógrafos con la finalidad de que el balancín esté protegido y no se desequilibre por efecto del viento. Se humedece (no se deja gotas) con una franela mojada el área del embudo, para simular las condiciones de lluvia. Se procede a verter agua por el embudo con la micropipeta hasta que se produzca el tip y se registra el volumen marcado. Se repite este proceso varias veces (aproximadamente 5) para cada bucket y se obtiene el volumen promedio de carga de cada uno de los dos buckets. Finalmente se calcula el volumen real de carga para el pluviógrafo como el promedio de los volúmenes de carga de ambos buckets.

El factor de corrección (fc) es:

$$fc = \frac{\text{Vol real (ml)} - \text{Vol nominal (ml)}}{\text{Vol nominal (ml)}} \quad (2.2)$$

El fc puede ser negativo o positivo. La corrección se aplica a todos los registros de tips. Así, el volumen real del tip en (mm) es:

$$\text{Vol real tip (mm)} = \text{Resolución(mm)} * (1 + fc) \quad (2.3)$$

La prueba de calibración se realizó en noviembre de 2012 y se determinó un fc para cada pluviógrafo. Con esta información se realizó la corrección de los registros para toda la base de datos. Se tomó esta decisión dado que los equipos no fueron calibrados al momento de su adquisición e instalación en campo. Además ninguno de los pluviógrafos presenta daños en la superficie de los buckets que puedan haber alterado el volumen de desequilibrio del balancín tiempo después de su instalación.

2.3.2 Disdrómetro

La información recolectada por el disdrómetro se vio afectada por los problemas mencionados en la sección 2.1. Sin embargo, con el propósito de obtener datos de buena calidad se realizaron las actividades descritas en esta sección. Se intentó que



las visitas a campo para la descarga sean con frecuencia semanal, debido a que la memoria del equipo tenía capacidad para almacenar únicamente 9 días de información para la frecuencia de registro de datos programada para la investigación. Durante las descargas se chequeaba que las lecturas del sensor correspondientes a ese momento estén correctas, se igualaba el reloj del datalogger con el de los demás equipos, se removía telarañas y se verificaba que los lentes estén limpios.

Además de los registros de alguna forma de nieve, también se analizan dentro del control de calidad los casos para los cuales el *tipo de precipitación* registra *error del sensor* o *precipitación no identificada*. Para afrontar este problema se optó únicamente por identificar todos los casos en los que se tienen dichos registros para la variable de *tipo de precipitación*, dado que no se tiene conocimiento de la magnitud a corregir en la cantidad de precipitación debido a esta situación. Cuando se tiene registros de *precipitación no identificada* el sensor sí registra un incremento en la lluvia acumulada, el mismo que debería eliminarse ya que puede corresponder a mosquitos u otro tipo de partículas que se han confundido con precipitación.

Entre las variables que mide el disdrómetro se tiene el número de partículas clasificadas como *no hidrometeoros* o con velocidades de caída o diámetros inferiores a los del primer intervalo del espectro, las mismas que pueden aportar información sobre la incongruencia entre las velocidades de caída de las partículas en la zona de estudio y las utilizadas por el fabricante para la calibración del sensor. Estas partículas no son consideradas para el cálculo del volumen de precipitación, por lo que se realiza un análisis de la variación de su porcentaje (con respecto al total de partículas medidas) en el tiempo para establecer en qué fechas pudo haber una mayor subestimación de la precipitación.

Los errores de señal estática o de valores de la energía de salida del laser fuera del rango normal afectan la calidad de los datos. Se identifica todos los casos en los que estos errores ocurren. De esta manera se establece el porcentaje de datos afectados y en qué meses suceden con mayor frecuencia los errores. Finalmente, no se realiza ninguna consideración en lo que respecta a que la calefacción de los lentes del sensor no haya funcionado.

2.4 Resultados

A partir de la labor de campo de instalación, descarga y mantenimiento de los equipos instalados, se elaboró la base de datos a utilizarse en la presente investigación. En la Figura 2.4.1, las discontinuidades corresponden a los períodos sin información y los valores mostrados en la leyenda son los porcentajes de vacíos de datos para cada equipo.

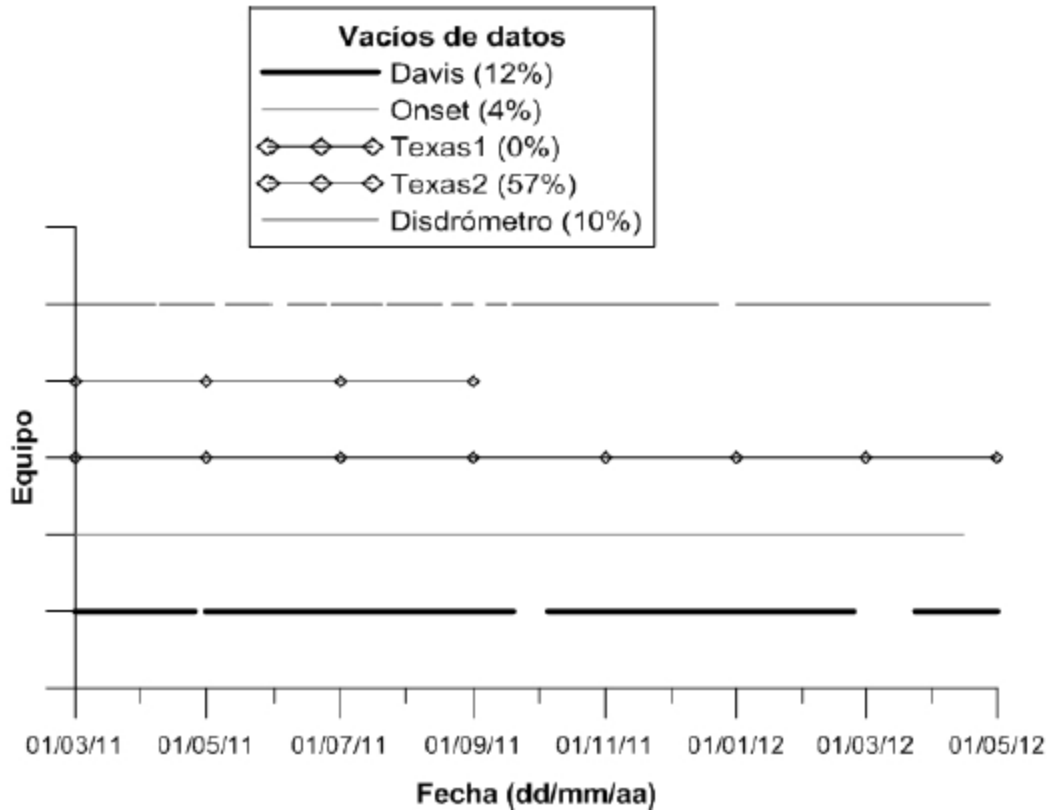


Figura 2.4.1: Períodos de datos útiles de los sensores de precipitación utilizados

El primer salto o discontinuidad en los datos para el Davis se debió a problemas en el contacto eléctrico del tip, mientras que el segundo vacío se produjo porque la memoria del datalogger se llenó (estaba tomando datos cada 5 segundos). El malfuncionamiento del cable durante la descarga ocasionó la pérdida de datos en el Onset y el restante vacío para el Davis. Para el pluviógrafo Texas2 se descartó toda la información entre 01/09/2011 - 30/04/2012, debido a que se identificó un registro esporádico e intermitente de tips a causa de un problema en la conexión del cableado con el datalogger. Este error se identificó con las gráficas mensuales de incremento de la precipitación acumulada. El disdrómetro fue el sensor con el mayor número de saltos de información, la mayoría de los cuales se dieron por la falta de memoria para el almacenamiento. La información sobre velocidad y dirección del viento (cada 5 minutos) de la que se dispone corresponde a todo el período de la base de datos y no presenta vacíos.

2.4.1 Pluviógrafos

Del control de calidad de la información de los pluviógrafos se obtuvieron los siguientes resultados: (i) La eliminación de los todos los tips causados por efecto del viento y el manipuleo de los equipos durante cada una de las descargas, y (ii) La obtención del factor de corrección (fc) para la carga del tip correspondiente a cada pluviógrafo.



Conociendo el valor de f_c se calculó el volumen real de carga del tipo de cada equipo. (Ver Tabla 2.4.1).

Tabla 2.4.1: Resultados de la prueba de calibración

Sensor	Davis	Onset	Texas 1	Texas 2
Resolución (mm) =	0.254	0.2	0.1	0.1
Resolución (ml) =	254	200	100	100
Área de recolección (cm^2) =	213.82	186.02	471.44	471.44
Vol nominal (ml) =	5.431	3.720	4.714	4.714
Vol real (ml) =	5.075	3.675	4.850	4.917
f_c (%) =	-6.56 %	-1.22 %	2.88 %	4.29 %
Vol real (mm) =	0.237	0.198	0.103	0.104

Es importante notar que el error determinado para cada pluviógrafo es mayor para todos los casos que el error indicado en las especificaciones como la precisión de los equipos (ver la Tabla 2.2.1). Debe observarse además que al utilizar la micropipeta no va a existir un error por intensidades altas que explique que la intensidad medida sea menor a la real. Los manuales de los pluviógrafos Texas y Onset recomiendan que se realice una prueba de calibración del volumen de carga del bucket anualmente. Hasta la fecha de la prueba de calibración, el equipo que por mayor tiempo ha estado en funcionamiento es el Davis con aproximadamente 28 meses. Mientras tanto los demás equipos han estado en funcionamiento por 2 años. La prueba llevada a cabo para determinar f_c fue la primera para los equipos utilizados. No obstante, la condición de los buckets aún es buena y no se observa oxidación o desgaste en su superficie que puedan haber ocasionado que la diferencia obtenida entre el volumen nominal de carga y el real haya cambiado durante el funcionamiento de los equipos [18]. Al no haber calibrado los equipos cuando fueron instalados lo más probable es que toda la serie de datos presente el error determinado, por lo tanto se realiza la corrección a todos los registros de la base de datos.

A pesar de que el error determinado para los pluviógrafos es mayor al indicado en la especificación, no resulta tan considerable como otros casos que se han presentado. Para los resultados del estudio de [23] se obtuvo un error aproximado del 12% por calibración estática en pluviógrafos Rimco de 0.1mm de resolución. En el artículo [18] también se presentan errores, en la rango de intensidades bajas (error por carga del bucket), superiores a los obtenidos. De los 4 pluviógrafos, el Davis presentó el mayor error absoluto. Se considera que se debe a que por ser el más económico es el más endeble y su mecanismo de balancín no es tan preciso. Según el artículo [18] y sus referencias, un f_c negativo puede deberse a que el balancín está descalibrado y el volumen de carga real es menor al nominal, o a que al producirse un tip exista agua remanente en el bucket. La segunda opción puede darse debido a la tensión superficial



y a que el material del bucket no sea lo suficientemente antiadherente. Para los casos del Davis y el Onset se observó durante las pruebas de calibración que sí se tiene agua remanente en el bucket luego de un tip, aunque en muy poca cantidad, por lo que no se puede atribuir a esta situación el total de la diferencia medida entre el volumen de carga real y el nominal. Por lo tanto el error determinado para el Davis y el Onset se adjudica también a una descalibración del balancín.

La información final de los pluviógrafos contenida en la base de datos consta del volumen real de carga del tip, de la fecha y hora a la que sucedió cada tip (Davis y Onset) y del número de tips ocurridos cada minuto (Texas1 y Texas2). A partir de estos datos se realizan acumulaciones para distintas escalas de tiempo, las mismas que se utilizan en los capítulos 3 y 4.

2.4.2 Disdrómetro

La información de las lecturas del disdrómetro utilizadas en esta sección corresponden a una muestra de los últimos 1 o 5 minutos de cada media hora, por lo que los resultados obtenidos no tienen la garantía de ser completamente ciertos, pero no por ello dejan de ser útiles.

Para el control de calidad se realizó la identificación y cuantificación de los distintos tipos de precipitación de manera mensual para todo el período de la base de datos (ver Fig. 2.4.2). No se registró ningún caso de caída de granizo y los datos de *precipitación no identificada* corresponden solamente a un 0.06% del total de los datos por lo que no se tomó ninguna medida al respecto. Para la gráfica se agrupa la información en 3 categorías distintas. Todos los datos para los cuales el *tipo de precipitación* incluye cualquier forma de nieve, se agrupan en la categoría *Lluvia con nieve*. Otra categoría para la cual se cuestiona la calidad de los datos es aquella en la que el *tipo de precipitación* corresponde a *Error del sensor*. Los datos de la categoría *Lluvia/Llovizna* se aceptan como correctos. Es importante destacar que los porcentajes que se muestran en la figura son con respecto al total de datos para los cuales se tuvo precipitación o se produjo un *error del sensor*.

En promedio para los 14 meses de datos se tiene un 21% de los datos de tipo de precipitación cuya calidad es cuestionable (*Lluvia con nieve* y *Error del sensor*). La considerable cantidad de datos de lluvia con nieve se deben al sitio de instalación del sensor (3780 m.s.n.m.), de acuerdo con una conversación mantenida con técnicos de la casa fabricante del disdrómetro. A dicha altitud y en el ecosistema de páramo, pueden presentarse eventos de precipitación de gotas de agua con velocidades de caída bajas y temperaturas cercanas a los 0°C, condiciones para las cuales el sensor asume que se trata de nieve. Es notorio un comportamiento estacional en el porcentaje de datos de nieve. Para los meses de junio a septiembre se tiene un marcado incremento de los datos registrados como nieve, alcanzando prácticamente un 40% en agosto de 2011. Este período corresponde a la época de verano en la región, la misma que se caracteriza por vientos fuertes (ver Apéndice B) y temperaturas muy bajas durante la noche (datos de la estación meteorológica adyacente).

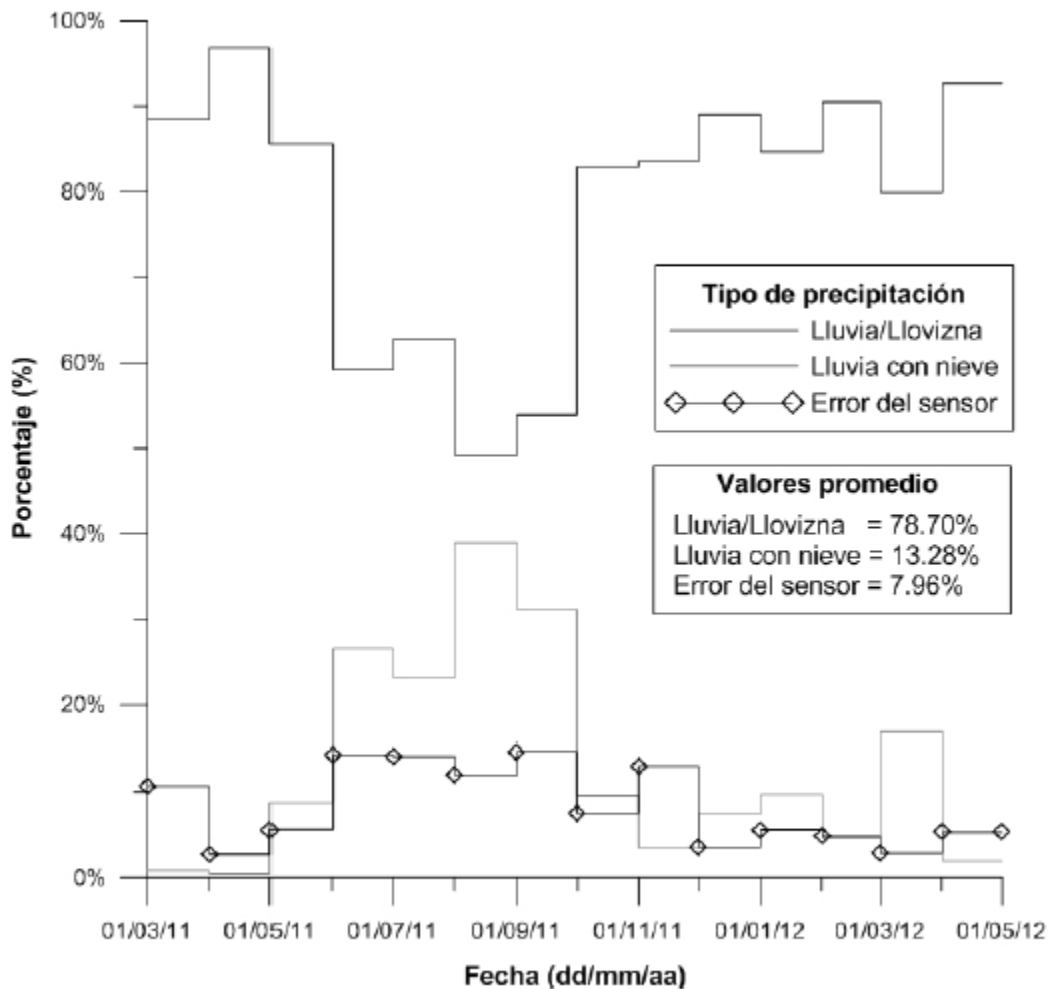


Figura 2.4.2: Porcentajes de tipo de precipitación registrados por el disdrómetro

Los datos de *tipo de precipitación* correspondientes a *Error del sensor* se deben a una lectura incorrecta ocasionada por señal estática. De la conversación mantenida con los fabricantes del disdrómetro, se cree que este fenómeno podría estar potenciado por el incorrecto suministro del voltaje requerido. No obstante, también se puede distinguir un patrón de estacionalidad similar al de lluvia con nieve.

En los datos del disdrómetro se tiene información sobre el estado del funcionamiento de ciertos componentes. Se analizaron los mensajes de advertencia o error encontrando lo siguiente.

1. Para todo el período de análisis la calefacción del vidrio de las cabezas emisora y receptora no funcionó por un problema en la conexión. Esta situación pudo disminuir la calidad de la lectura si es que el vidrio se hubiese empañado. De lo observado en el lugar de instalación, durante eventos de lluvia esto no ocurre,



por lo que se descarta que el problema de calefacción afecte significativamente la calidad de los datos.

2. Un error por señal estática y una advertencia de que la energía de salida del laser estaba fuera del rango normal se presentaron intermitentemente durante el período de análisis. Casi siempre que se presentó el mensaje de error por señal estática, también hubo la advertencia de la energía del laser y en el *tipo de precipitación* se registró *error del sensor*. Para los datos en los que hubo precipitación o algún mensaje de error, el problema de señal estática ocurrió en un 7.5%. Además su distribución en el tiempo es la misma que presenta la del *error del sensor* en la Figura 2.4.2. Mientras tanto la advertencia por la energía del laser fuera del rango normal corresponde a un 13.6% y es aún mayor para los meses de junio a noviembre donde alcanza un promedio del 20%. Como ya se mencionó, según la conversación con los fabricantes del disdrómetro, la razón para la ocurrencia de estos errores y en los porcentajes detallados sería el suministro de un voltaje distinto al requerido por el sensor.

De la conversación mantenida con los fabricantes del equipo se conoce que las partículas clasificadas como no hidrometeoros y con velocidad de caída < 0.15 m/s no son consideradas para el cálculo de la cantidad de precipitación. Como ya se ha discutido, para la altitud del sitio de instalación se puede tener eventos de precipitación con condiciones distintas a las utilizadas para la calibración del disdrómetro. Por esta razón se analiza la cantidad del tipo partículas mencionadas (Fig. 2.4.3), dado que podrían corresponder a gotas de agua. De ser ese el caso, se estaría produciendo una subestimación de la precipitación.

Las partículas clasificadas como no hidrometeoros representan aproximadamente un tercio del total de partículas medidas por el sensor. En el presente estudio no se cuenta con más información para analizar las implicaciones de este resultado. Por su parte las partículas con velocidad de caída inferior al rango mínimo considerado para el espectro, en general no representan un porcentaje que pueda influir fuertemente en una subestimación del total de lluvia. No obstante, en los meses de agosto y septiembre de 2011 superan el 15%. La distribución temporal de los porcentajes de estas partículas no consideradas en el espectro de la precipitación, contribuye a establecer a los meses de verano (junio-septiembre) como aquellos con la calidad de datos más cuestionable.

La información final del disdrómetro contenida en la base de datos consta de la cantidad de precipitación cada 30 minutos. Además se tiene información de los porcentajes de cada tipo de precipitación, de datos con mensajes de error o advertencia, de partículas que no corresponden a ninguna de las clases del espectro, y su distribución en el tiempo.

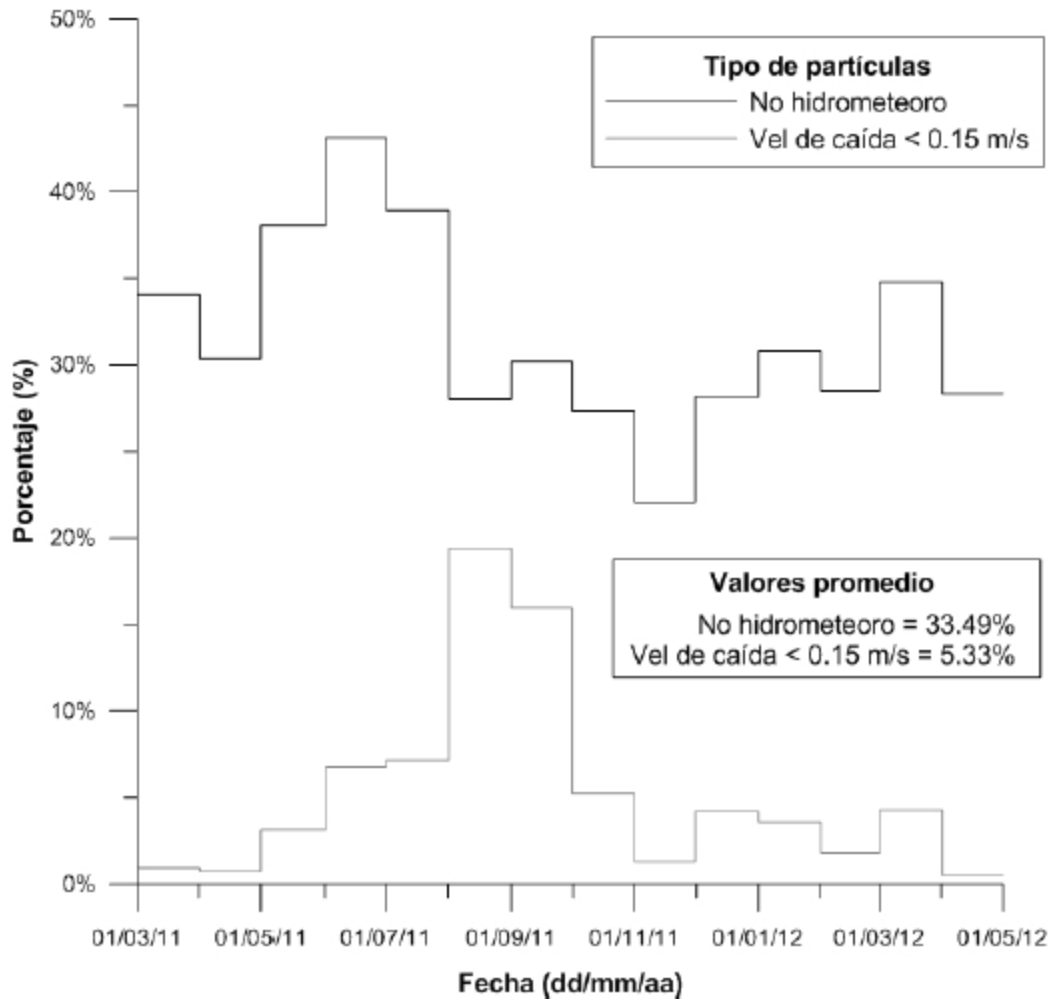


Figura 2.4.3: Porcentaje de partículas no consideradas como precipitación

2.5 Conclusiones

Con base en las experiencias propias y de otros autores citados en este capítulo respecto al trabajo con pluviógrafos de balancín y disdrómetros laser, se han identificado una serie de factores que afectan la calidad de la información proporcionada por los sensores. Para las condiciones de este caso particular se presentaron los siguientes inconvenientes de mayor relevancia: (i) La necesidad de visitas con una frecuencia mínima mensual para igualar la hora de los dataloggers (4 dataloggers distintos para 5 sensores de precipitación) y para el chequeo de las baterías individuales de los pluviógrafos Davis y Onset debido a su corta vida útil, (ii) la ocurrencia de tips no relacionados con la precipitación durante las descargas, aunque es un problema de fácil solución hay que estar pendientes del tema, (iii) la descalibración de la carga requerida para que se produzca un tip en los pluviógrafos, (iv) conexiones electrónicas defectuosas, (v) falta de memoria para el almacenamiento (disdrómetro), (vi) método de muestreo incorrecto (e.g. muestra en lugar de promedio)



para los datos del disdrómetro, y (vii) la no calibración del disdrómetro para zonas con la altitudes como las del sitio de instalación.

Los resultados obtenidos de la calibración de los pluviógrafos evidencian la necesidad de su realización. Una diferencia de alrededor de $\pm 5\%$ en el total de precipitación medido puede ser admisible en ciertas aplicaciones. Sin embargo, para un estudio de comparación de sensores como el que se realiza en el capítulo 3 puede representar el llegar a conclusiones completamente equivocadas. Por ejemplo si no se hubiese determinado el volumen real de carga del bucket y se comparara el total de precipitación de los pluviógrafos Davis y Texas2, existiría un error cercano al 11%. Es importante notar que para otros casos el error que un pluviógrafo pueda tener por diferencias entre el volumen nominal de carga y el real podría ser superior o inferior a los valores obtenidos, pero resulta altamente recomendable calcular dicho error.

Podría pensarse que debido al elevado costo del disdrómetro o a la tecnología avanzada de su funcionamiento, los datos del mismo son perfectos o al menos están exentos de problemas. Esta concepción errónea puede generar que se descuide el control necesario para garantizar la calidad de los datos, lo que de alguna manera pudo haber magnificado los problemas que se presentaron con el disdrómetro. Esta situación ocurrió de manera especial en la programación de las variables a almacenar y su método de muestreo, tal es así que se escogió para todos los casos que se grabe solo la información correspondiente a una muestra de los últimos 1 ó 5 minutos de cada media hora; cuando era evidente que por ejemplo para variables como el número total de partículas medidas correspondía almacenar el total acumulado de la media hora.

El disdrómetro fue calibrado por los fabricantes para ser instalado a una altitud máxima de 1500 m.s.n.m. En el presente estudio se evalúa su funcionamiento a una altitud de 3780 m.s.n.m. Se identificó a esta diferencia de altitudes como la causa por la que el sensor registra un 13% de lecturas de lluvia con nieve, lo cual afecta la confiabilidad de la medida de precipitación. De la información analizada sobre tipo de precipitación, mensajes de error y partículas que no son consideradas como precipitación se concluye que los meses de junio a septiembre de 2011 son aquellos cuya información es menos confiable. Es importante destacar que estos meses no corresponden a la época más lluviosa y que durante los mismos se registra aproximadamente un 25% de la precipitación anual, por lo que la calidad de toda la base de datos del disdrómetro no se encuentra tan afectada como podría pensarse. La magnitud en la que se ve afectada la calidad de la medición no se pudo determinar, porque no se cuenta con la información necesaria.

Las visitas frecuentes a los sensores para descargar datos, verificar su funcionamiento y realizar mantenimiento oportuno resultaron un aporte fundamental, que conjuntamente con las demás acciones descritas en este capítulo permitieron la consecución de una base de datos de calidad y con porcentajes de vacíos de información menores o semejantes al 10% para la mayoría de los equipos (Fig. 2.4.1). La base de datos obtenida posee 14 meses de información de precipitación cada minuto para los pluviógrafos y cada 30 minutos para el disdrómetro, además de datos



UNIVERSIDAD DE CUENCA

de viento cada 5 minutos. El equipamiento utilizado y el detalle de las mediciones le otorgan un realce a los análisis de los capítulos siguientes.

Se recomienda que se consideren los siguientes aspectos en todos los estudios de precipitación para poder llevar un control de calidad satisfactorio de los datos. Las visitas de campo para la descarga y mantenimiento deben realizarse con la mayor frecuencia posible, aunque sin caer en gastos innecesarios de recursos. Una frecuencia mensual resulta muy satisfactoria de existir la disponibilidad económica y de personal. La posibilidad de la transmisión a tiempo real de las lecturas de los equipos instalados en campo resultaría muy útil para identificar con prontitud cualquier inconveniente en los datos, pero esto no implicaría que se suspendan las visitas de mantenimiento a los sensores o se posterguen de manera exagerada. Es fundamental seguir todas las indicaciones de los manuales de los equipos. El control de calidad de los datos debe realizarse con prontitud luego de cada descarga de datos para solucionar rápidamente los problemas que se encuentren. Se concuerda con [19], [20] en contar con al menos dos sensores en un mismo sitio para posibilitar la identificación de períodos de mal funcionamiento. Para el disdrómetro, el almacenar toda la información disponible y con el mayor detalle posible siempre podrá ser de utilidad para el futuro, por lo que se sugiere hacerlo si el esfuerzo adicional es pequeño aun así se requiera solo una parte para el estudio planificado.



CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES SENSORES UTILIZADOS PARA MEDIR LA LLUVIA, A PARTIR DE OBSERVACIONES DE PLUVIÓGRAFOS Y UN DISDRÓMETRO LASER

3.1 Introducción

Existen en la actualidad una cantidad considerable de distintos tipos de equipos para la medición puntual y espacial de la precipitación, los mismos que tienen distintas tecnologías y métodos para obtener la información deseada. Entre los sensores para medir la precipitación de forma puntual se distinguen dos grupos: pluviógrafos y disdrómetros. Los pluviógrafos miden la intensidad de la precipitación a partir del tiempo transcurrido entre dos lecturas de precipitación acumulada. Los tipos más comunes de pluviógrafos son de balancín, de pesaje, de capacitancia y de flotador [26]. Los disdrómetros son sensores capaces de medir la distribución de las gotas según su tamaño y velocidad de caída, a partir de lo cual establecen la precipitación acumulada y la intensidad entre otros parámetros. Estos equipos nos ayudan a comprender mejor las propiedades fundamentales de la lluvia y brindan información de relevancia para estudios meteorológicos, oceanográficos y climáticos entre otros [24], [26]. Entre las aplicaciones de la distribución del tamaño de gotas, así como de su variabilidad espacial y temporal se tiene: Predicción de procesos hidrológicos, modelamiento numérico del tiempo (clima), interpretación de teledetección de radares o satélites y consideraciones para la agricultura como infiltración y erosión del suelo [30]. El disdrómetro de impacto desarrollado por Joss y Waldvogel en 1967 ha sido ampliamente utilizado y acentuó el desarrollo de este tipo de equipos [31], [32]. Otros tipos de disdrómetros son los de video, los acústicos y los ópticos [26], [30], [31].

En la presente investigación se trabaja con pluviógrafos de balancín y un disdrómetro óptico. Los pluviógrafos de balancín son los más comunes a nivel mundial [13], [16], mientras que el disdrómetro Thies utilizado es de última tecnología y su uso se está difundiendo rápidamente [24], [25], [31]. El contar con un disdrómetro resulta sumamente atractivo, ya que luego de evaluar su funcionamiento para las condiciones de la zona de estudio permitirá la obtención de información sumamente valiosa.

Son múltiples los estudios de comparación de medidores de precipitación con distintas tecnologías, precisión y resolución (e.g. [8], [20], [25], [26], [30]). Mediante estas investigaciones es posible alcanzar una estimación bastante realista de la precipitación, además de determinar las diferencias entre las lecturas de los equipos. Esto permite establecer errores en la medición y factores de corrección (en el equipo o en el modelo) para acercar más las mediciones a la realidad. Este aspecto es de alta importancia para evitar que la aplicación de la información obtenida a partir de los datos de precipitación se encuentre mal fundamentada, lo cual podría ocasionar graves problemas como sobre estimación o subestimación en diseños de obras civiles que se lleven a cabo o el llegar a conclusiones erróneas en trabajos de investigación (por ejemplo balances hídricos).



Las diferencias entre las lecturas de los distintos sensores para medir la precipitación son altamente dependientes de las características de la lluvia. Por ejemplo, las lecturas de dos sensores pueden coincidir muy bien para un evento de lluvia de intensidad moderada, sin viento y con una cierta distribución de los tamaños de gotas; pero a su vez pueden diferir mucho si la intensidad y el viento aumentan. Resulta entonces de interés la evaluación de los sensores ante eventos de precipitación de distintas características. Muchas de las referencias mencionadas en el párrafo anterior y otras abarcan un análisis de la influencia de factores como el viento, la intensidad y la distribución del tamaño de gotas en las mediciones de precipitación [33], [34]. Sin embargo, solamente se ha encontrado un estudio [8] de comparación entre sensores de precipitación desarrollado en los Andes. Dicho estudio se llevó a cabo en la Reserva Biológica de San Francisco, cercana a la ciudad de Loja en el sur del Ecuador, que corresponde a un ecosistema de bosque húmedo. Esta situación evidencia que existe un vacío en el conocimiento del desempeño de los sensores de precipitación para las condiciones en las que se presenta la lluvia en la región Andina y en especial para ecosistemas de páramo, para los cuales no se ha desarrollado ningún estudio.

En este contexto, se analiza el efecto del viento y la intensidad sobre los registros de precipitación medidos en alta montaña. El objetivo general es establecer las principales ventajas y desventajas que los pluviógrafos y el disdrómetro laser presentan para medir las características de la precipitación en un **ecosistema de páramo**. La realización del estudio en este tipo de ecosistema lo diferencia de investigaciones previas ya que las características de la precipitación son distintas. Los resultados que se obtengan servirán de guía para las personas encargadas de decidir en qué equipos invertir para la implementación de nuevas redes de monitoreo en la región, así también como para la mejor interpretación de información existente. Además será posible una mejor estimación de la precipitación en el sitio investigado, lo cual es un dato fundamental para otras investigaciones en hidrología, hidrogeología y ecología acuática que se desarrollan en la zona.

Cada uno de los equipos utilizados tiene sus ventajas y desventajas. Se busca el equipo capaz de medir la precipitación y otros parámetros importantes como la intensidad con la mayor precisión, pero que a su vez no sea excesivamente costoso y que brinde la facilidad para su instalación y puesta en servicio requiriendo de un mínimo mantenimiento. Dependiendo de la finalidad que se persiga con la medición de la precipitación, uno u otro equipo puede resultar más conveniente.

3.2 Materiales

Para el desarrollo de este capítulo se utiliza los datos de 4 pluviógrafos, un disdrómetro laser y un sensor de dirección y velocidad de viento. La descripción de todos los equipos, al igual que el control de calidad de los datos realizado, se encuentra en el Capítulo 2. Dentro de esta sección se abarca únicamente las características de los datos empleados para analizar las ventajas y desventajas de los diferentes sensores utilizados para medir la lluvia.



Para la comparación entre las mediciones de los distintos sensores se requiere trabajar con períodos de datos coincidentes. Cabe mencionar que se realizaron múltiples comparaciones, pero siempre entre dos sensores, por lo que cada comparación tiene un distinto período con información coincidente. A partir de la base de datos con información entre 01/03/2011 - 30/04/2012 y con los vacíos de datos indicados en la Figura 2.4.1, se determina para cada pluviógrafo los valores de lluvia acumulada para escalas de agregación de 5 min, 10 min, 30 min, horaria y diaria. Se optó por las escalas de agregación mencionadas para mantener una relación con estudios similares (e.g. [8], [35]) y con la finalidad de incluir las principales escalas de datos de precipitación, utilizadas en otras aplicaciones hidrológicas. Para el disdrómetro se establecieron escalas de agregación de la lluvia acumulada de 30 min, horaria y diaria, dado que el detalle de la información proporcionada por el sensor fue de 30 minutos. El contar con información en intervalos de tiempo definidos facilitó la selección de períodos con datos coincidentes para los equipos, además permitió la eliminación de los datos correspondientes a los períodos en los cuales los equipos no registran precipitación. Los datos no se traslapan para los intervalos empleados, por ejemplo, si un intervalo va entre los minutos 0-5, el siguiente intervalo de 5 minutos es entre 5-10 y no entre 1-6.

En resumen, en este capítulo se utilizan datos de lluvia acumulada con escalas de agregación de: 5 min, 10 min, 30 min, horaria y diaria para los pluviógrafos y de 30 min, horaria y diaria para el disdrómetro. Finalmente, en el Apéndice B se presenta información sobre la dirección y velocidad del viento, la misma que se utiliza para la interpretación de ciertos resultados del capítulo.

3.3 Métodos

Antes de realizar la comparación entre las lecturas de los distintos equipos y analizar el efecto de la intensidad y el viento, se requiere llevar a cabo algunos pasos previos. En primera instancia se abarca los métodos utilizados para agregar la precipitación en las distintas escalas temporales a utilizarse y para calcular las intensidades. Luego se definen los distintos rangos de intensidad y velocidad de viento que van a servir para estudiar el efecto de estas variables sobre las mediciones de los sensores. Finalmente, se presentan los criterios estadísticos que se aplican para el análisis comparativo de los pluviógrafos y el disdrómetro.

3.3.1 Acumulación de lluvia y cálculo de intensidades

a) Método de conteo de tips

Para acumular la lluvia en las escalas de tiempo deseadas se utiliza el software hidrológico “Hydraccess”. Este software es una aplicación que permite el almacenamiento de varios tipos de datos hidrometeorológicos en una base de datos de Microsoft Access, así también como su manejo. El criterio empleado por el programa para realizar la acumulación es el siguiente: (i) Se elige una escala temporal de agregación (por ejemplo 60 min). (ii) El Hydraccess crea una serie de tiempo con todos



los intervalos de 1 hora posibles entre la fecha de inicio y fin de la base de datos. Los intervalos no se traslapan y sus límites son horas pico (sin minutos ni segundos), es decir para cada día se tiene los siguientes 24 intervalos: 00:00 - 01:00, 01:00 - 02:00, ..., 22:00 - 23:00 y 23:00 - 24:00. (iii) La cantidad de lluvia asignada a cada intervalo corresponde a la suma de todos los tips existentes que se hayan registrado entre los límites de la hora de cada intervalo. (iv) Sin embargo, en el caso de no tener intervalos consecutivos con registros de lluvia, el programa realiza una interpolación mediante la cual resta el valor de un tip al último intervalo con lluvia antes del período sin registros y/o al primer intervalo con lluvia luego del período sin registros, y asigna el valor restado a uno de los intervalos intermedios del período sin registros. Esta interpolación podría ayudar a representar como sucedió la lluvia de una manera más acorde a la realidad, pero solo para el caso de datos correspondientes a un mismo evento de precipitación. Si la interpolación se realiza entre registros de eventos independientes, obviamente se comete un error.

En líneas generales el Hydraccess nos permite realizar la acumulación de una manera fácil y rápida para toda la serie de datos de cada equipo. Por esta razón se opta por Hydraccess para los cálculos que permitan una comparación general de los sensores. Sin embargo, hay que entender cómo funcionan sus herramientas para no incurrir en errores. Por ejemplo, si se hiciera la acumulación diaria con el Hydraccess para contabilizar el número de días secos, la cantidad de días sin lluvia obtenidos será mucho menor a la real debido a la interpolación entre eventos de lluvia independientes.

Para el cálculo de la intensidad se acumulan todos los tips correspondientes a un intervalo de tiempo (t), es decir, se obtiene el volumen de lluvia acumulado para el intervalo definido. No se requiere de una separación previa de los datos en eventos de precipitación. Así, la intensidad se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I = \frac{\text{Volumen acumulado de lluvia}}{t} \quad (3.1)$$

El cálculo de intensidades mediante este método se realiza para dos casos: cuando el volumen acumulado de lluvia se calcula con Hydraccess y cuando se calcula mediante un código propio desarrollado en Matlab. El programa escrito en Matlab realiza, para cada intervalo, la acumulación de todos los tips cuya hora de registro esté dentro del rango del intervalo. Se diferencia de Hydraccess porque no se realiza ninguna interpolación.

De acuerdo con [35], [36] el error en la estimación de la intensidad con este método es considerable, especialmente para intensidades bajas y escalas temporales pequeñas (5 o 10 min). Esto sucede ya que para las condiciones mencionadas serán pocos los tips registrados en un intervalo, entonces si parte de la lluvia que causó el primer tip para un intervalo correspondía en realidad al intervalo inmediato anterior, la precisión de la intensidad calculada se ve significativamente afectada. De la revisión bibliográfica realizada se ha encontrado que el método de cálculo de intensidades que obtiene los mejores resultados es el denominado "Método de polilínea cúbica" (PC) (Cubic spline



method) [36]. Por esta razón, el cálculo de intensidades con el método de conteo de tips se utiliza solo para comparar los resultados con los obtenidos mediante la PC. Por lo tanto se requiere calcular las intensidades mediante el método de conteo de tips para un solo pluviógrafo. Se opta por el Texas1, dado que no presenta vacíos de datos.

b) Método de polilínea cúbica (PC)

Este método nos permite determinar la intensidad pero se debe aplicar individualmente a cada evento de lluvia [16], [36]. Por esta razón, previo al cálculo de intensidades se requiere dividir la información de la base de datos en eventos de precipitación para cada pluviógrafo. La PC se utiliza para calcular las intensidades a partir de los datos de cada uno de los pluviógrafos. Para el disdrómetro no se calcularon intensidades con este método debido a que hubiese sido una aproximación muy tosca al contar solo con la cantidad de lluvia cada 30 minutos.

- **Eventos de precipitación**

No existe un criterio estandarizado sobre cómo definir un evento de precipitación [16]. No obstante, varios autores (e.g. [16], [26], [36] y algunas de sus referencias) coinciden en utilizar: un tiempo máximo entre dos tips consecutivos, una intensidad mínima, una duración mínima o un valor mínimo de precipitación acumulada, para la separación de los datos de una serie de tiempo en eventos. El criterio más usado es el establecer un tiempo máximo entre dos tips consecutivos para que dichos tips pertenezcan al mismo evento. Los autores mencionados en este párrafo generalmente han establecido para sus estudios tiempos máximos de 15 min, pero también han utilizado tiempos de 30 min y 60 min.

Para este estudio primero se realizó la separación en eventos de los datos de los pluviógrafos Texas1 y Texas2, para los cuales un evento debía cumplir con un tiempo máximo de 30 min entre 2 tips consecutivos y una lluvia acumulada mínima de 1 mm. El tiempo escogido es mayor a lo común de otros estudios, pero se optó por los 30 min ya que en general se espera que la mayoría de eventos en el páramo sean de intensidades bajas. Los pluviógrafos Onset y Davis tienen, respectivamente, una resolución de 0.2 y 0.254 mm, mientras que la de los Texas es de 0.1 mm. Por lo tanto, es lógico que el tiempo máximo entre tips consecutivos de un mismo evento para el Onset sea del doble del escogido para los Texas. Entonces en la definición de evento para los datos de los pluviógrafos Davis y Onset se mantuvo la condición de mínimo 1 mm de lluvia acumulada, pero no la de 30 min entre tips consecutivos. En su lugar, la separación de eventos para los pluviógrafos Onset y Davis se hizo tomando de referencia la horas de inicio y fin de los eventos del Texas1.

- **Introducción**

Si se conoce la hora (hh:mm) a la que sucede cada tip o incremento constante de la cantidad de lluvia, la intensidad promedio para el intervalo de tiempo entre tips consecutivos de un mismo evento de precipitación está dada por la ecuación 3.2,



dónde t y t_{+1} son las horas correspondientes al registro de dos tips consecutivos [35]. Sin embargo, si se considera la intensidad promedio como una intensidad constante para el tiempo entre los 2 tips, la función de ajuste de la curva de precipitación acumulada versus el tiempo estará conformada por varios segmentos de líneas rectas, mientras que en la realidad no se presentan estos cambios bruscos de intensidad. Además cuando el tiempo transcurrido entre tips consecutivos es largo (por ejemplo de 15 min o más) la intensidad en ese intervalo generalmente no es constante, por lo que se pierde mucha precisión si la escala temporal utilizada para la intensidad es menor al tiempo entre los tips consecutivos [35], [36]. Por estas razones, en lugar de emplear una interpolación lineal para el cálculo de la intensidad, se utiliza la polilínea cúbica.

$$I = \frac{\text{Volumen del tip}}{t_{+1} - t} \quad (3.2)$$

Con el método de la PC se obtiene cómo resultado una función de ajuste a la curva de precipitación acumulada durante el tiempo de un evento de precipitación. La función $P=f(t)$ obtenida es continua y suavizada, representando adecuadamente las características de la curva de lluvia acumulada. Entonces para cualquier tiempo (t) luego de iniciado el evento se puede obtener el valor de lluvia acumulada (P). Según esto, se obtiene los valores (P) para cada minuto del evento, con lo cual al realizar la resta entre valores consecutivos se tiene como resultado la intensidad promedio cada 1 minuto en mm/min para los datos del evento. Se multiplica por 60 para transformar las intensidades a mm/h. Finalmente a partir de los datos de intensidad promedio cada 1 min se puede obtener intensidades promedio para cualquier otra escala de tiempo mayor.

- **Descripción matemática**

El método de la PC requiere como información de partida puntos de la curva de lluvia acumulada para la cual se desea ajustar una función. Estos puntos corresponden a las horas en que el pluviógrafo registra los tips. Se tiene para cada evento un determinado número de puntos conocidos (x,y) , donde x es el número de minutos transcurridos desde el inicio del evento y y es el valor de lluvia acumulada (mm) correspondiente. El primer tip de un evento corresponde al minuto 0. Así, para el evento registrado por el pluviógrafo Texas1 entre las 15:19 y 19:15 del 07/04/2011 se tuvieron un total de 115 tips a lo largo de los 236 minutos. Existieron casos en los que en un mismo minuto se registraron más de 1 tip, teniendo para todo el evento 105 minutos en los que hubo tips. Se dieron tips en los minutos 15:19, 15:22, 15:24,..., 19:15, por lo tanto para este caso $x_i = 0, 3, 5, \dots, 236$ con $i = 1, 2, 3, \dots, 105$. Se cuenta entonces con la función tabulada $y_i = y(x_i)$, $i = 1 \dots N$, a partir de la cual se puede obtener la función de ajuste deseada según la explicación de [37]. Se recomienda revisar esta fuente para una descripción matemática detallada del método.

La función de ajuste es una función por partes, constituida por un polinomio diferente para cada intervalo entre x_j y x_{j+1} . Se requiere que dicha función de ajuste cumpla con las siguientes condiciones:



- Su gráfica pase por todos los puntos de la función tabulada de entrada.
- Su primera derivada tenga una forma suave y que sea continua a través de los límites de los intervalos.
- Su segunda derivada sea continua dentro de cada intervalo y en los límites también.

Para cumplir con la suavidad de la primera derivada y la continuidad de la segunda es necesario que los polinomios de la función de ajuste sean mínimo de tercer grado. Con el cumplimiento de todas las condiciones anteriores se puede obtener la función de ajuste para cada intervalo de acuerdo con la ecuación 3.3.

$$y = Ay_j + By_{j+1} + C\ddot{y}_j + D\ddot{y}_{j+1} \quad (3.3)$$

donde:

$$A = \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \quad (3.4)$$

$$B = 1 - A = \frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{1}{6}(A^3 - A)(x_{j+1} - x_j)^2 \quad (3.6)$$

$$D = \frac{1}{6}(B^3 - B)(x_{j+1} - x_j)^2 \quad (3.7)$$

Para la ecuación 3.3 aún no se ha indicado como obtener los valores de \ddot{y} . Para cumplir con la condición de continuidad de la primera derivada a través de los límites de los intervalos se tiene que para $j = 2, \dots, N-1$:

$$\frac{x_j - x_{j-1}}{6}\ddot{y}_{j-1} + \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{3}\ddot{y}_j + \frac{x_{j+1} - x_j}{6}\ddot{y}_{j+1} = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \quad (3.8)$$

Entonces se cuenta con $N-2$ ecuaciones y N incógnitas (\ddot{y}_i con $i = 1, \dots, N$). Las dos ecuaciones faltantes para resolver el sistema se obtienen de las condiciones de frontera. Se escogen $\ddot{y}_1 = 0$ y $\ddot{y}_N = 0$ para obtener la llamada polilínea cúbica natural, que es la comúnmente utilizada [36]. Queda de esta manera establecido cómo determinar la función de ajuste. Para el evento mencionado al inicio se este punto, con la función de ajuste se encontró que la precipitación acumulada para los minutos 1, 2 y 4 es de 0.128, 0.160 y 0.250 mm respectivamente.



- **Problemas y soluciones**

La información de los pluviógrafos no permite conocer con certeza las horas de inicio y fin de un evento, debido a que por lo general un evento comienza antes de que suceda el primer tip y termina luego del último tip, quedando el bucket parcialmente lleno. Esto evita que se pueda calcular directamente la intensidad antes del primer tip y luego del último con la PC. Con este método no resulta posible determinar la intensidad para eventos que cuenten con solo 1 minuto que haya registrado tips. De contar solo con 2 minutos en los que se hayan registrado tips, el método se convierte en una interpolación lineal. Para no lidiar con estos problemas se optó por no calcular la intensidad previo al primer tip y posterior al último de todos los eventos, tampoco se utilizaron los datos que no cumplían con las condiciones establecidas para clasificarlos como un evento. Luego de estas consideraciones se cuenta con 441 eventos para el pluviógrafo Texas1 en los que se representa aproximadamente un 96% del total de la lluvia del período de la base de datos.

El principal problema del método de la PC es que las intensidades calculadas ocasionalmente pueden ser negativas, lo cual no tiene significado físico. Este problema sucede con mayor frecuencia cuando las intensidades son bajas. Aproximadamente en un 50% de los eventos se obtuvo al menos 1 minuto para el cual la intensidad promedio es negativa. Para solucionar este inconveniente se adopta una intensidad de 0 para todos los casos que sean negativos. Esto genera una diferencia entre la cantidad de lluvia total real y la calculada, la misma que es baja (el promedio es menor a 5%). Se resuelve esta situación ajustando el resto de intensidades del intervalo de modo que se elimine la diferencia.

3.3.2 Rangos de intensidades de precipitación y velocidades de viento

Con la finalidad de estudiar el efecto que la intensidad y el viento tienen sobre las lecturas de los sensores de precipitación, se realizan comparaciones entre los equipos utilizando solo datos de lluvia correspondientes a determinados rangos de valores de intensidad o de velocidad de viento. Para establecer las distintas categorías de intensidad y velocidad de viento a emplearse, se realizaron gráficas que permitan identificar entre qué valores oscilan estas variables y cuál es su distribución. (Ver Fig. 3.3.1 y Fig. 3.3.2). Los datos de las gráficas corresponden a valores promedios en una escala de tiempo de 5 minutos. Los datos de velocidad de viento utilizados son únicamente aquellos durante los cuales hubo precipitación.

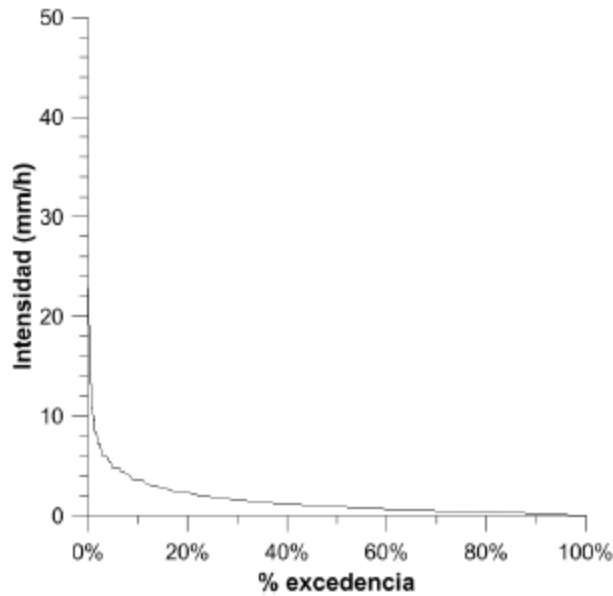


Figura 3.3.1: Porcentaje de excedencia de intensidades (Texas1). Escala temporal: 5 min.

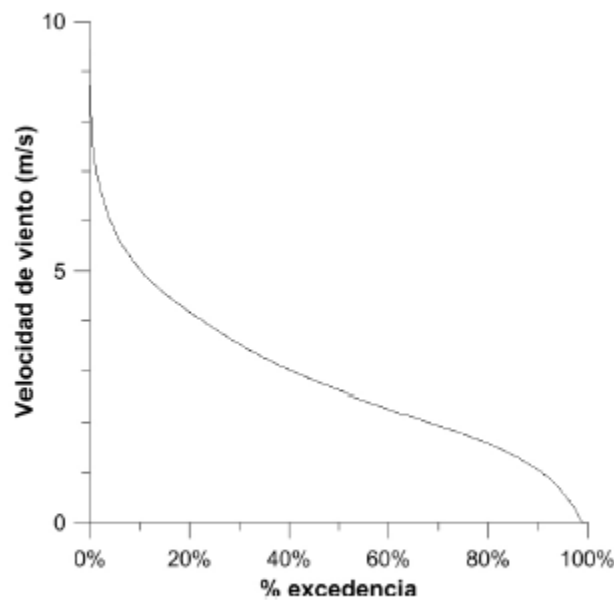


Figura 3.3.2: Porcentaje de excedencia de velocidad de viento. Escala temporal: 5 min.

Los datos de la Figura 3.3.1 corresponden al pluviógrafo Texas1. En las Tabla 3.3.1 se presentan los distintos rangos de intensidades de precipitación y velocidades de viento establecidos para el análisis. Tanto para la intensidad como para la velocidad de viento, se buscó que: (i) A cada categoría corresponda un porcentaje representativo del total datos y (ii) los datos de cada categoría estén lo más equitativamente distribuidos dentro del intervalo (requiere que la pendiente de la curva sea casi constante para todo el intervalo de cada categoría). De acuerdo con esto puede observarse que, por ejemplo,



el límite de 5 mm/h de intensidad utilizado para una de las categorías corresponde al cambio en la curvatura de la gráfica 3.3.1, o que las categorías para la velocidad de viento, en orden ascendente, incluyen de forma aproximada un 25%, 50% y 25% del total de los datos, respectivamente.

Tabla 3.3.1: Rangos de intensidad de lluvia y velocidad de viento utilizados para el análisis

Intensidad	Velocidad de viento
0 - 1 mm/h	0 - 2 m/s
1 - 2 mm/h	2 - 4 m/s
2 - 5 mm/h	> 4 m/s
5 - 10 mm/h	
> 10 mm/h	

3.3.3 Análisis estadístico comparativo

En el presente estudio se realiza una comparación relativa entre los sensores. Es decir, no se compara las lecturas de los equipos versus un valor real de la cantidad de lluvia, sino que se comparan las lecturas de los equipos entre ellas. De los pluviógrafos utilizados, el Texas es el de mejores características técnicas, por lo cual se emplea el Texas1 como el pluviógrafo de referencia contra el cual se comparan los demás sensores.

La evaluación general de los sensores se realiza mediante la aplicación de un paquete de índices estadísticos a los datos de lluvia para las distintas escalas temporales de agregación, muy similar a lo realizado por [38]. Los índices que se incluyen en el paquete son: coeficiente de determinación (R^2), correlación no paramétrica de Spearman (ρ), desviación estándar (σ), sesgo (*bias*), sesgo absoluto, sesgo ponderado, sesgo absoluto ponderado, sesgo porcentual y sesgo absoluto porcentual. Se opta por incluir un coeficiente de correlación no paramétrico ya que los datos de precipitación no poseen una distribución normal, lo cual resta validez a R^2 . A pesar de ello se calcula R^2 para comparar los resultados con los de otros estudios, mientras que la diferencia entre ρ y R^2 es un indicador de qué tan afectado está el coeficiente de determinación a causa de valores extremos. Para la evaluación específica del efecto de la intensidad y el viento sobre las lecturas de los sensores ya no se aplican todos los índices mencionados, debido a que el interés principal es conocer cómo varía el sesgo o diferencia entre las lecturas. Entonces en este caso se utilizan solo el sesgo y el sesgo absoluto como valor y en porcentaje, para comparar las mediciones de los equipos correspondientes a cada categoría de las indicadas en la Tabla 3.3.1.

Los índices R^2 , ρ y σ pueden calcularse directamente con las herramientas de un software como “Statística”, por lo que no se describe sus fórmulas en este documento.



Es importante indicar que la desviación estándar calculada es de la diferencia entre las lecturas de los sensores que se comparan (σ_{x-y}). Para los demás índices, si definimos x y y como la cantidad de lluvia registrada por un sensor cualquiera y el Texas1 (respectivamente) en una escala temporal definida, n como el número de datos o intervalos para los cuales al menos uno de los sensores registra precipitación y \bar{y} como el promedio de la lluvia del Texas1, tenemos:

$$\text{sesgo} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3.9)$$

$$\text{sesgo absoluto} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3.10)$$

Para el sesgo ponderado se le otorga una mayor influencia a las diferencias correspondientes a los datos de intervalos con mayor cantidad de lluvia. Para la función de ponderación (w) se adopta la cantidad de lluvia como el promedio de las lecturas de los dos sensores, debido a que si se utilizara solo la lluvia del Texas1 habría casos en los que $w = 0$.

$$\text{sesgo ponderado} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (x_i - y_i) \quad (3.11)$$

$$\text{sesgo absoluto ponderado} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i |x_i - y_i| \quad (3.12)$$

donde:

$$w_i = \frac{(x_i + y_i)/2}{\bar{y}} \quad (3.13)$$

Para el sesgo porcentual se obtiene la relación del sesgo respecto a la lluvia promedio del pluviógrafo Texas1, debido a que se ha adoptado el mismo como el sensor de referencia.

$$\text{sesgo porcentual} = \frac{\text{sesgo}}{\bar{y}} \quad (3.14)$$

$$\text{sesgo absoluto porcentual} = \frac{\text{sesgo absoluto}}{\bar{y}} \quad (3.15)$$

Cada uno de los índices utilizados tiene su propia importancia y nos proporciona información valiosa sobre los sensores. No obstante, se emplea el sesgo porcentual



para la calificación de la evaluación de los sensores. Se escoge este índice debido a que así viene indicada la precisión de los equipos en las especificaciones (ver Tabla 2.2.1). Con el afán de calificar el rendimiento de los equipos que se espera tengan resultados similares (todos los pluviógrafos de balancín), aunque sea de manera subjetiva, se establecen rangos para el sesgo. Así, si el sesgo porcentual es $\leq 2\%$ se evalúa como *excelente*, entre $2\% - 5\%$ *bueno*, entre $5\% - 10\%$ *regular* y $> 10\%$ *malo*. Es importante notar que el sesgo es respecto a las medidas del pluviógrafo Texas1 y no respecto al valor real de precipitación. Para la evaluación del disdrómetro no se utiliza los criterios de calificación descritos, debido a que para este caso se espera una diferencia en las mediciones a causa de las características distintas de los equipos. En su lugar, únicamente se compara los resultados con las diferencias entre disdrómetros y pluviógrafos obtenidas en estudios previos.

3.4 Resultados

El estudio realizado en este capítulo abarca: comparación general de las mediciones de los sensores, análisis del efecto de la intensidad sobre las mediciones, análisis del efecto del viento y comparación entre las intensidades de un mismo pluviógrafo calculadas con distintos métodos. Todos los análisis se desarrollan para varias escalas temporales. El pluviógrafo Texas1 es el sensor contra el cual se comparan los demás.

3.4.1 Evaluación general

Los resultados más relevantes se presentan en las Tablas 3.4.1 y 3.4.2 y en las Figuras 3.4.1 y 3.4.2, mientras que en el Apéndice C se presentan tablas con los valores de los índices estadísticos calculados para cada caso. Inicialmente se discuten los resultados de los pluviógrafos para escalas temporales de 5 min, 10 min, 30 min, horaria y diaria. En segunda instancia se trata la comparación del Texas1 con el disdrómetro para escalas temporales de 30 min, horaria y diaria.

Pluviógrafos

La correlación de todos los pluviógrafos con respecto al Texas1 es estadísticamente significativa. Los resultados del coeficiente de determinación (R^2) y la correlación de Spearman (ρ) se presentan en la Tabla 3.4.1. El coeficiente R^2 obtenido es prácticamente igual para todos los pluviógrafos. Los datos de lluvia comparados no tienen una distribución normal, por lo que el valor de R^2 puede ser muy afectado por puntos extremos. Por lo tanto se emplea la correlación de Spearman que trabaja con el ranking en lugar de los valores observados. Los resultados obtenidos para ρ también indican que la correlación es estadísticamente significativa, la probabilidad de que las variables no estén correlacionadas es menor a 1% para todos los casos ($p < 0.01$). Mediante Spearman se establece que la correlación del Texas2 con el Texas1 es levemente mayor a la del Onset y Davis con el Texas1, lo que es de esperarse debido a que los Texas tienen la misma resolución. Es notorio cómo el nivel de correlación se incrementa para escalas de agregación mayores, lo cual se explica debido a que mientras más grande largo es el intervalo, menos relevante es el detalle de cómo cae la



lluvia (resolución de los equipos) [26]. A partir de los valores de R^2 , se encuentra que la correlación es bastante más sensible a cambios en la escala de agregación para valores menores a 30 minutos que para valores mayores. Las altas correlaciones nos indican que los equipos estuvieron operando adecuadamente, lo que se logró gracias al trabajo hecho en el control de calidad. Otros estudios ([8], [16], [38]) generalmente han obtenido resultados de correlaciones altas ($R^2 > 0.95$) entre la cantidad de lluvia horaria o diaria de pluviógrafos colocados en un mismo sitio, lo cual está de acuerdo con lo determinado en la presente investigación.

El sesgo porcentual es un índice prácticamente invariable con la escala temporal. Los resultados son muy similares, incluso entre la escala de 5 min y la diaria. Por esta razón, en la Tabla 3.4.2 se presenta un único valor por cada equipo para cuantificar el sesgo porcentual respecto al pluviógrafo Texas1. Dichos valores indican el porcentaje promedio de subestimación (-) o sobrestimación (+) de la cantidad total de lluvia que registra cada sensor en comparación con el Texas1. De acuerdo al criterio de evaluación establecido al final de la sección 3.3, los pluviógrafos Davis y Onset tienen un desempeño regular. No se han encontrado estudios publicados en los que se cuantifique el error para los modelos de pluviógrafos utilizados. Sin embargo, los siguientes autores [16], [38] y algunas de sus referencias han realizado comparaciones entre pluviógrafos de un mismo modelo colocados en el mismo lugar; usualmente las diferencias son inferiores al 2% y en ningún caso mayores a 5%. Por otra parte [8] encontró una diferencia de aproximadamente 13% entre dos pluviógrafos de balancín de distinta marca. La diferencia de aproximadamente 6.5% del Texas1 versus el Davis y Onset es un valor lógico dentro del marco referencial de los estudios citados. Por su parte el Texas2 presenta una subestimación menor al 1.5% (excelente), lo cual está de acuerdo con los resultados de los autores mencionados para pluviógrafos de un mismo modelo. El efecto que la protección Alter (Texas2) pueda tener se analiza posteriormente a detalle en el estudio del efecto del viento (sección 3.4.3).

Para cada dato o intervalo de tiempo con registro de precipitación, se calcula la diferencia entre la cantidad de lluvia medida por cada pluviógrafo y el Texas1. En la Figura 3.4.1 se presenta, para todos los sensores, entre qué valores oscila este error con respecto al Texas1, las líneas de la gráfica corresponden a los valores mínimo, máximo y a los cuartiles. Para una escala de agregación horaria, los datos del Davis alcanzan la mayor dispersión con respecto a los del Texas1 ($\pm 1 \text{ mm}$), seguido por el Onset y luego el Texas2, lo cual se mantiene para las otras escalas temporales. No obstante, de la gráfica se observa que para los tres pluviógrafos en el 50% de los intervalos analizados la diferencia con el Texas1 no supera la resolución de los mismos (es decir, 0.2 mm aproximadamente). El valor de la diferencia entre la lluvia medida obviamente depende de la cantidad registrada de lluvia, lo que indica que mientras mayor sea la escala de agregación, mayores serán las diferencias en magnitud, mas no en porcentaje. Al calcular el error como un porcentaje con respecto a la lluvia medida por el Texas1, se encuentra que éste varía para todos los equipos entre aproximadamente -100% y +200% para cada intervalo de tiempo, alcanzando incluso valores mayores. Esta situación puede generar que se tenga la percepción de que las lecturas de los demás pluviógrafos son muy diferentes a las del Texas1. Sin embargo,



estos porcentajes tan elevados en comparación al sesgo porcentual promedio (ver Tabla 3.4.2) se obtienen cuando la cantidad de lluvia medida es muy baja (≤ 0.3 mm para la escala temporal horaria). Por lo tanto, la diferencia de alturas de lluvia registradas entre los sensores brinda una mejor comprensión de la variabilidad del sesgo.

En la Figura 3.4.2 se presentan los valores del sesgo absoluto porcentual obtenidos para los distintos equipos y escalas temporales. Entre los pluviógrafos, el Davis es el que presenta el mayor sesgo absoluto porcentual, seguido del Onset y luego el Texas2, lo cual ya se identificó mediante el sesgo porcentual y es explicable por las características propias de cada equipo. Resulta interesante el efecto que la escala temporal tiene sobre el error absoluto. Las bajas intensidades en conjunto con las distintas resoluciones de los pluviógrafos generan muchos casos en los que en un intervalo un sensor registra menos lluvia que el otro y en el siguiente intervalo sucede lo opuesto, lo cual magnifica el error absoluto. Esta situación sucede con mucha mayor frecuencia para las escalas temporales menores, tanto así que para la escala de 5 minutos en alrededor del 50% de los intervalos uno de los pluviógrafos registra lluvia y el otro no. Estos resultados corroboran lo expresado por [26], [29], [35], quienes indican los problemas de precisión en la estimación de la cantidad de lluvia para escalas temporales pequeñas, sobre todo si las intensidades son bajas.

Los resultados obtenidos para el sesgo ponderado y absoluto ponderado para todos los pluviógrafos son superiores a los no ponderados. Esto nos indica que el error es mayor para los datos con intensidades superiores a la promedio que para los datos con intensidades menores a la promedio. El detalle del efecto de la intensidad se aborda en la próxima sección.

Tabla 3.4.1: Coeficientes de determinación (R^2) y correlación de Spearman (ρ) de los equipos con respecto a Texas1

Equipo	Davis	Onset	Texas2	Disdrómetro	Davis	Onset	Texas2	Disdrómetro	
Escala temporal		5 min				10 min			
R^2	0.731	0.756	0.713		0.882	0.898	0.892		
ρ	0.301	0.319	0.344		0.500	0.523	0.605		
Escala temporal		30 min				horaria			
R^2	0.965	0.971	0.976	0.922	0.981	0.984	0.988	0.937	
ρ	0.669	0.686	0.799	0.756	0.728	0.739	0.842	0.799	
Escala temporal		diaria							
R^2	0.993	0.997	0.997	0.958					
ρ	0.989	0.991	0.991	0.983					



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tabla 3.4.2: Sesgo porcentual con respecto al pluviógrafo Texas1

Equipo	Davis	Onset	Texas2	Disdrómetro
Sesgo porcentual	-6.9%	-6.3%	-1.4%	5.6%

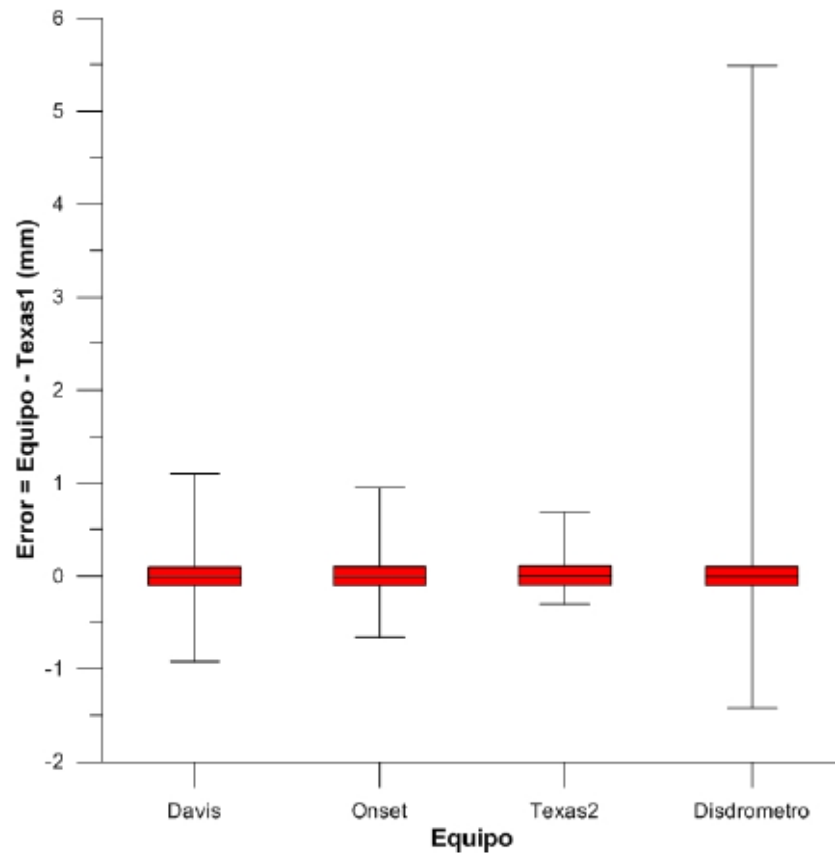


Figura 3.4.1: Distribución del error con respecto al pluviógrafo Texas1. Escala temporal horaria.

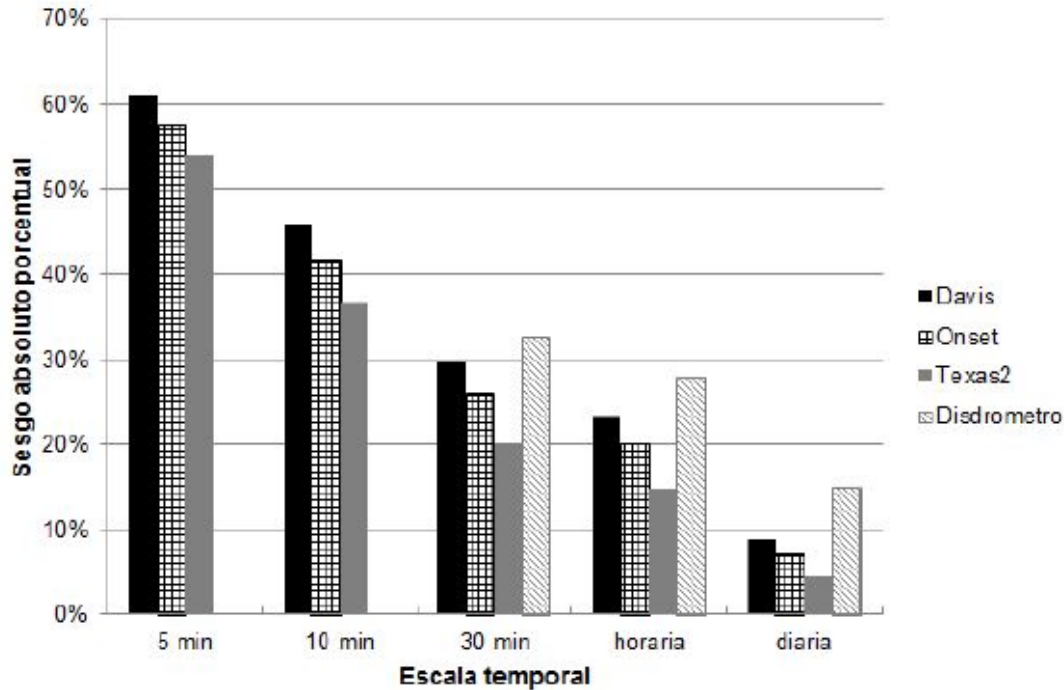


Figura 3.4.2: Sesgo absoluto porcentual con respecto al pluviógrafo Texas1 para distintas escalas temporales

Disdrómetro

Los datos del disdrómetro presentan una alta correlación con los del pluviógrafo Texas1, aunque lógicamente menor a la de los otros pluviógrafos de balancín al tratarse de un principio de medición diferente. El sesgo porcentual nos indica que en promedio el disdrómetro registra un 5.6% más de lluvia que el Texas1 y su diferencia con el Davis y Onset es de alrededor del 12%. Las diferencias de registro encontradas entre el disdrómetro y los pluviógrafos en el presente estudio son un tanto bajas en comparación con las experiencias de otros autores. Por ejemplo, los estudios realizados por [24] y [25] determinaron generalmente diferencias de entre 15% - 25% entre disdrómetros Thies (igual al utilizado) y pluviógrafos de balancín. No obstante, hubieron casos de diferencias de 5% y otros de más de 30%. Estos autores emplearon múltiples disdrómetros y en sus investigaciones encontraron una variabilidad importante entre las mediciones de los mismos disdrómetros, a pesar de estar colocados conjuntamente. El estudio de [24] explica estas diferencias debido a que cada uno de tres disdrómetros registra una medida diferente del diámetro, para partículas de un mismo tamaño. En el Capítulo 2 se identificó que el disdrómetro ciertas veces clasifica incorrectamente como nieve a la precipitación líquida, lo que conlleva a una subestimación de la cantidad de lluvia. Este problema constituye una razón por la cual las diferencias entre el disdrómetro y los pluviógrafos son menores para el presente estudio que para investigaciones previas. La incorrecta determinación del tipo de precipitación ocurre para las condiciones del páramo, cuando se tienen temperaturas cercanas a 0°C y bajas velocidades de caída de las gotas, según una conversación con los fabricantes del sensor. Un día particular en el que se clasificó a



una cantidad considerable de la lluvia como nieve fue el 14/06/2011. La cantidad de lluvia registrada en aquel día por el disdrómetro fue de 14.5 mm, mientras que el Texas1 marcó 20 mm. Otra situación que evidencia la subestimación por clasificación como nieve es que el sesgo porcentual se reduce a 3.3% si se considera solo los datos de los meses de junio a septiembre de 2011, que corresponden a los de mayor cantidad de registros identificados - erróneamente - como de nieve (ver Fig. 2.4.2).

En la Figura 3.4.1 se puede apreciar que las diferencias entre los registros del disdrómetro y el Texas1 alcanzan valores extremos muy superiores a los de las diferencias de los demás pluviógrafos con el Texas1. Esto nos deja entender que las lecturas entre el disdrómetro y el Texas1 pueden variar mucho más que el valor promedio de 5.6%. La resolución del disdrómetro hace suponer que su medición de la intensidad es mucho más precisa que la de los pluviógrafos. Debido a la diferencia de resoluciones con el Texas1 se magnifica el sesgo absoluto porcentual. Al igual que lo determinado para los pluviógrafos, mientras mayor es la escala temporal, la resolución o el detalle con el cual los equipos miden la lluvia pierde relevancia. Esto se evidencia en el incremento de la correlación y la disminución del sesgo absoluto porcentual a medida que la escala de tiempo utilizada sea más grande.

3.4.2 Efecto de la intensidad

Para las comparaciones entre los sensores realizadas en esta sección se emplean las intensidades calculadas mediante el método de la Polilínea cúbica para los pluviógrafos y mediante la división de la cantidad de lluvia registrada entre la duración del intervalo de tiempo correspondiente, en el caso del disdrómetro. Se calcularon intensidades para escalas temporales de 5, 10, 30 y 60 minutos para los pluviógrafos y de 30 y 60 minutos para el disdrómetro. Las intensidades empleadas corresponden a intervalos entre horas cerradas, sin información traslapada y con lluvia durante todo el lapso del intervalo. Por ejemplo, para un evento cuyo primer tip se registra a las 19:08 y el último a las 20:17 del mismo día, los datos de intensidad promedio utilizados para la escala de 15 minutos corresponden a los siguientes intervalos: 19:15-19:30, 19:30-19:45, 19:45-20:00 y 20:00-20:15. No se utiliza los datos de los intervalos 19:00-19:15 y 20:15-20:30 porque no hubo lluvia durante todo el lapso del intervalo. Esta situación, sumada a que para la comparación entre sensores se requiere de períodos de información coincidente, provoca que la cantidad de información empleada se reduzca. Sin embargo, la muestra utilizada es bastante representativa de la totalidad de los datos. Para la escala temporal de 5 minutos, la cantidad de datos empleados abarca aproximadamente un 85% de la cantidad total de lluvia registrada para todo el período de la base de datos.

Se busca analizar el efecto de la intensidad *real* de la precipitación sobre las lecturas de la cantidad de lluvia de los sensores. Para ello se determina la diferencia entre las lecturas de los sensores utilizando separadamente los datos correspondientes a cada uno de los rangos de intensidad establecidos en la Tabla 3.3.1. Si se emplean escalas temporales pequeñas como las de 5 min y 10 min el cálculo de la intensidad pierde mucha precisión porque la cantidad de lluvia es menor que para escalas de 30 min o



superiores, lo que genera que la resolución de los pluviógrafos incremente el error entre la intensidad calculada y la real. Esto es aún mucho más notorio cuando las intensidades son bajas, debido a que para estos casos la cantidad de lluvia es más pequeña, por lo que el efecto de la resolución se incrementa [26], [29], [35]. Al trabajar con rangos de intensidades, el que las intensidades calculadas para los equipos a compararse sean considerablemente distintas de la intensidad real afecta a las diferencias promedio entre la cantidad de lluvia medida por los sensores. Por lo tanto, se emplea la escala de 30 min para el estudio. Al utilizar la escala de 30 min, se tienen muy pocos registros para los rangos $5-10$ y > 10 mm/h. Cuando se presenta esta situación, se emplean los registros con una escala temporal de 10 min (disponible solo para los pluviógrafos) para los dos rangos de mayores intensidades, recordando además que la pérdida de precisión en el cálculo de la intensidad para escalas temporales pequeñas sucede principalmente para intensidades bajas.

Pluviógrafos

En la Figura 3.4.3 se observa el sesgo porcentual, respecto al Texas1, de los demás pluviógrafos para los distintos rangos de intensidades. No se han encontrado estudios publicados en los que se hayan utilizado los modelos de pluviógrafos empleados en este estudio. Todos los sensores presentan una variación en el sesgo porcentual para al menos uno de los rangos de intensidad. Los resultados del Davis muestran para todos los rangos una relación inversa entre la intensidad y el error. Para intensidades ≤ 1 mm/h el error (12.6%) es considerablemente mayor que para las otras categorías y se evalúa como malo el desempeño del sensor. Para intensidades entre 1-10 mm/h la calificación es regular y el error o sesgo porcentual es muy similar al obtenido en la evaluación general del sensor (sección 3.4.1). Sólo para intensidades > 10 mm/h el rendimiento es bueno. En el Onset se nota una diferencia en el valor del sesgo porcentual entre los datos con intensidades bajo y sobre los 5 mm/h, la calificación del equipo cambia de regular para las intensidades bajas a buena y excelente para los rangos más altos. El Texas2 y Texas1 registran lecturas muy similares para todos los rangos de intensidades (excelente desempeño), con excepción de los datos > 10 mm/h. Sin embargo, para dicha categoría se cuenta solo con información de 11 intervalos coincidentes por lo que no se puede afirmar con confiabilidad el resultado encontrado.

Se atribuye a las características propias de cada sensor el que las diferencias encontradas entre los pluviógrafos sean mayores para las intensidades bajas. Una posible razón sería que las gotas no caen rápidamente por el embudo y son evaporadas. Esta explicación se justifica en que el Davis es el que mayores diferencias presenta y que seguramente para este sensor el efecto de la evaporación se potencia, debido a que por su color negro la temperatura de la superficie del embudo es mayor. Un punto importante de los resultados es que para intensidades superiores a 5 mm/h (y menores a 33 mm/h -intensidad máxima registrada para una duración de 10 minutos-) las diferencias entre los equipos disminuyen. Entonces si se comparara la cantidad de lluvia medida por los sensores en un sitio distinto al páramo, donde los eventos de precipitación sean de mayor intensidad, seguramente los porcentajes de subestimación de la Tabla 3.4.2 serían menores. Aunque si se tuviesen intensidades superiores a los



30 mm/h ya no se podría predecir el comportamiento de los sensores, a partir de los resultados de este estudio.

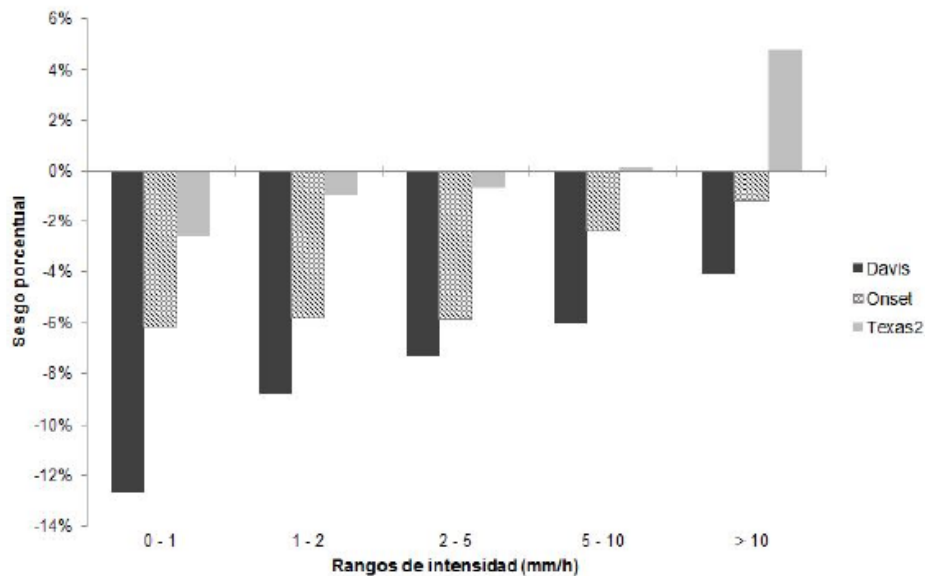


Figura 3.4.3: Sesgo porcentual de los pluviógrafos respecto al Texas1 para rangos de intensidad. Escala temporal de 30 min para intensidades ≤ 5 mm/h y de 10 min para > 5 mm/h

Los estudios de [13], [35], [36] encontraron que el error absoluto en el cálculo de la intensidad es mucho mayor para los casos con valores menores a 5 mm/h, lo que coincide con los resultados encontrados en la presente investigación. En la Figura 3.4.4 se observa cómo el error relativo del Onset con respecto al Texas1 decrece con la intensidad. Se muestra además cómo para una escala temporal mayor también disminuye el error. El que se tenga múltiples datos tanto con errores relativos positivos como negativos, indica que el sesgo absoluto será mucho mayor al sesgo simple, lo cual sucede especialmente para los rangos de intensidad bajos. Los demás pluviógrafos tienen un comportamiento similar a lo graficado para el Onset. Este error en la intensidad calculada debido a un registro impreciso de la cantidad de lluvia (resolución), puede contribuir a las diferencias encontradas en los resultados de la Fig. 3.4.3, pero no de manera definitiva porque para ese caso el error calculado no es de valor absoluto.

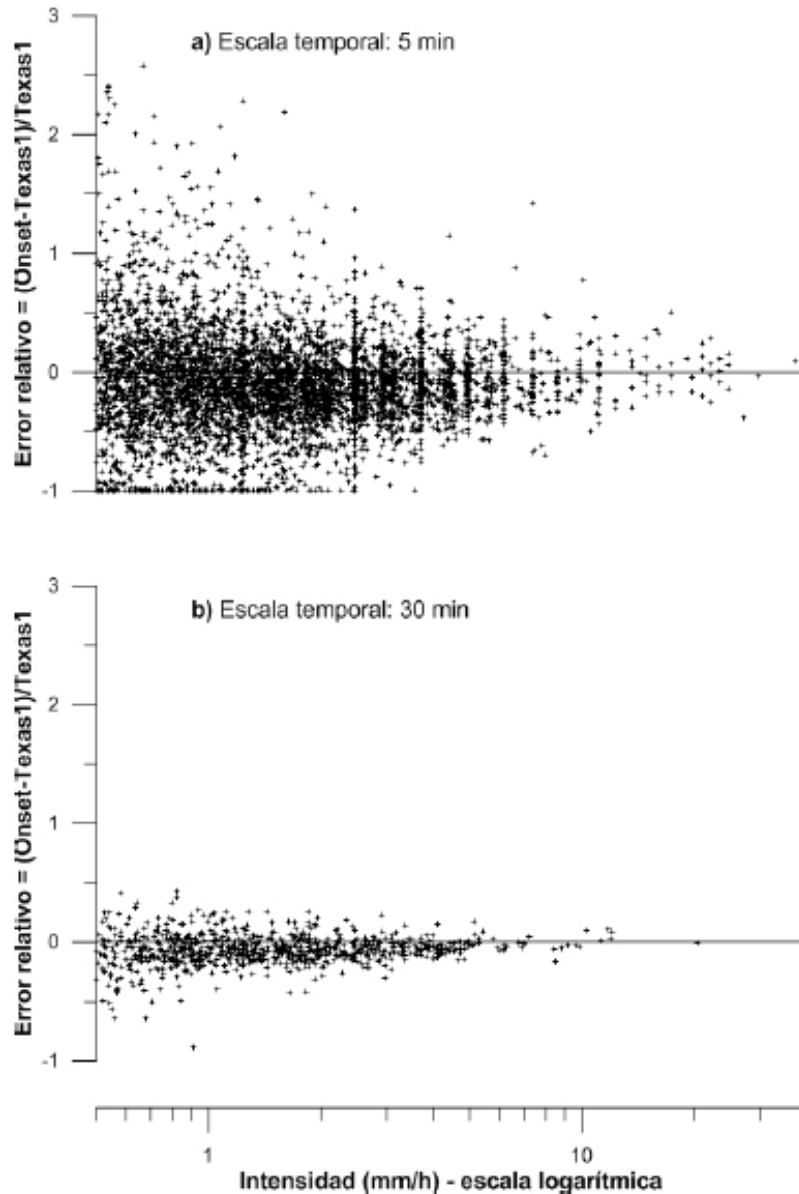


Figura 3.4.4: Error relativo según intensidad de lluvia: Onset vs Texas1

Disdrómetro

Al comparar el disdrómetro con el pluviógrafo Texas1 se encuentra que las diferencias promedio entre los sensores varían para lluvias de distinta intensidad, de acuerdo con la Figura 3.4.5. Para intensidades ≤ 1 mm/h se explica que el disdrómetro lea mayor cantidad de lluvia debido a que su resolución es muy superior a la del Texas1 y a su capacidad para identificar partículas muy pequeñas, como por ejemplo las correspondientes a neblina. Mientras tanto los pluviógrafos suelen subestimar la lluvia para intensidades tan bajas a causa de problemas como evaporación, taponamientos, viento, etc [36]. Además se ha constatado personalmente en el lugar de instalación de los equipos que el disdrómetro registra un incremento en la precipitación acumulada



cuando se tiene presencia de neblina, mientras que para los pluviógrafos es prácticamente nula la medida debido a que el ángulo de caída de las gotas con respecto a la horizontal es bastante bajo, por lo cual a este tipo de precipitación se le denomina como lluvia horizontal. Este comportamiento está de acuerdo con [25], que obtuvo lecturas de días con cantidades de lluvia tan bajas como 0.2 mm para el disdrómetro Thies y en los cuales un pluviógrafo de balancín adjunto no registró precipitación. En el estudio [8] también se encontró una sobrestimación considerable de la lluvia por parte de un sensor óptico con respecto a un pluviógrafo de balancín para intensidades bajas. Para el caso de las intensidades entre 1-5 mm/h el sesgo entre los equipos es casi despreciable. Esto nos indica que en el rango mencionado ambos sensores tienen una precisión similar.

El problema de las lecturas de nieve para el disdrómetro sucede mayoritariamente cuando las intensidades son inferiores a los 2 mm/h, debido a que en estos casos las partículas son de menor tamaño y su velocidad de caída es menor, lo que conlleva una mayor probabilidad para la determinación incorrecta del tipo de precipitación por parte del sensor. Por consiguiente, la subestimación real de la cantidad de lluvia por parte del Texas1 para intensidades menores a los 5 mm/h es superior a las diferencias encontradas en la Figura 3.4.5. Ejemplos específicos que avalan lo expuesto suceden en los días 14 de junio, 25 de julio y 10 de agosto de 2011, para los cuales se tuvo eventos de lluvia con intensidades promedio menores a 2 mm/h y en los cuales el disdrómetro tuvo un porcentaje elevado de lecturas de nieve. Para dichos días el disdrómetro registró 14.5, 0.1 y 0.7 mm, mientras el Texas1 leyó 20, 1.3 y 1.9 mm respectivamente.

Para los rangos de intensidad superiores a 5 mm/h se puede apreciar un incremento considerable de la cantidad de lluvia leída por el disdrómetro en comparación a la del Texas1. En este caso se cree que las mediciones de los pluviógrafos están más de acuerdo con la realidad. Los autores [24] y [25] determinaron que los disdrómetros Thies tienen una sobrestimación exagerada de la lluvia para intensidades altas, al compararlos con el promedio de varios otros sensores muy buenos como por ejemplo pluviógrafos de pesaje. Incluso el segundo de ellos plantea que el problema puede deberse a que el sensor clasifica como una gota de diámetro grande a dos o más gotas pequeñas que caen muy juntas, lo cual produce que el volumen calculado sea mayor al real, y sugiere un estudio detallado del espectro de gotas para llegar a conclusiones definitivas. Incluso el límite de la precisión del disdrómetro especificada por los fabricantes es de 15%.

La distribución del error es semejante a lo que sucede entre el Texas1 y los demás pluviógrafos. Para los rangos de intensidades utilizados, desde el menor al mayor, se tiene que la diferencia entre el sesgo absoluto porcentual y el sesgo porcentual es de 22%, 19%, 14%, 10% y 4%. Ésto se debe a lo explicado anteriormente sobre la resolución del pluviógrafo cuando se tienen intensidades bajas. Además nos indica que para el último rango de intensidades > 10 mm/h, en la inmensa mayoría de los casos el disdrómetro marcará una mayor intensidad que los pluviógrafos.

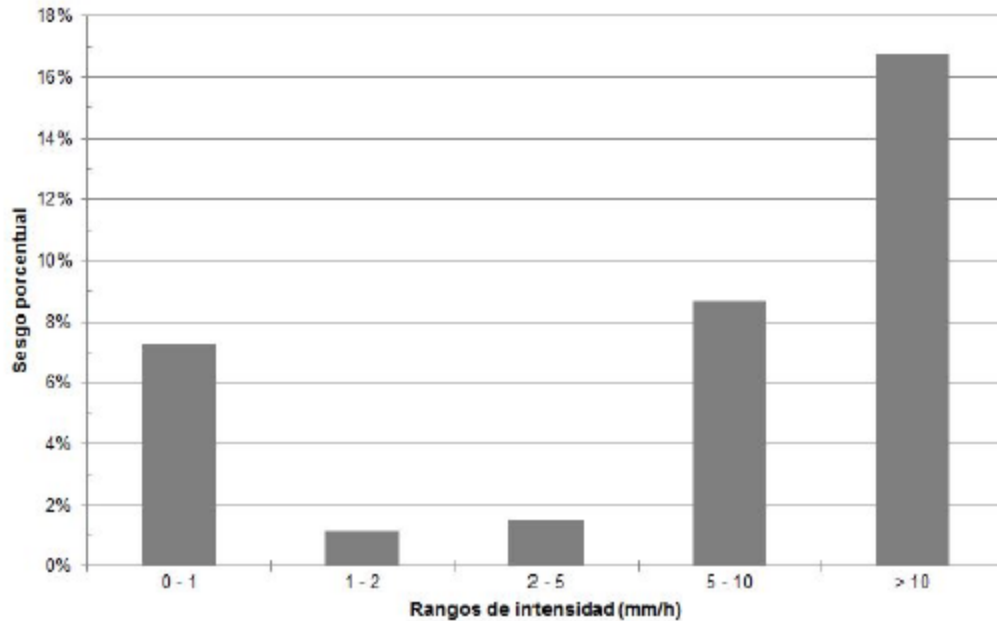


Figura 3.4.5: Sesgo porcentual del disdrómetro respecto al Texas1 para rangos de intensidad

3.4.3 Efecto del viento

En este estudio se emplearon las cantidades de lluvia calculadas mediante el método de la Polilínea cúbica, los datos del disdrómetro y los datos de viento. Se cuenta con la serie completa de datos de viento, por lo que la cantidad de información utilizada para el estudio de esta sección es la misma que para la sección previa, y resulta muy representativa.

Para esta sección se utilizan los datos correspondientes a la escala temporal de 30 minutos. De esta manera se mantiene una congruencia con el estudio del efecto de la intensidad y se minimiza el error en el cálculo de las cantidades de lluvia. Además el uso de esta escala temporal brinda un número adecuado de datos para cada categoría de velocidad de viento (ver Tabla 3.3.1) y no disminuye significativamente los valores máximos de velocidad promedio registrados para escalas menores. La máxima velocidad promedio para la escala de 30 min es de 8.2 m/s, mientras que para la escala de 5 min es de 9.7 m/s. Cada 10 segundos se registra un valor de velocidad de viento y cada 5 o 30 minutos se obtiene un valor promedio de todos los registros del intervalo. Entonces cuando se hace referencia a máxima velocidad promedio, se trata del intervalo cuyo promedio de los registros cada 10 segundos alcanza el valor más alto para toda la base de datos.

En la Tabla 3.4.3 se presentan el sesgo y sesgo absoluto de los sensores con respecto al Texas1 para las categorías de velocidad de viento establecidas. Con el fin de separar el efecto de la intensidad para el estudio del efecto viento y además alcanzar un mejor entendimiento del efecto conjunto de estas variables sobre las lecturas de los sensores, se calcula la distribución de los datos de intensidad correspondientes a cada



rango de velocidad de viento. Estos resultados se presentan en la Figura 3.4.6 y corresponden a las intensidades calculadas para el pluviógrafo Texas1. Las líneas de la gráfica corresponden a los valores mínimo, máximo y a los cuartiles. A continuación se realiza la discusión de los resultados para los pluviógrafos y luego para el disdrómetro.

Tabla 3.4.3: Sesgo y sesgo absoluto porcentuales de los sensores respecto al Texas1 para rangos de velocidad de viento

Vel viento (m/s)	Sesgo porcentual				Sesgo absoluto porcentual			
	Davis	Onset	Texas2	Disdrómetro	Davis	Onset	Texas2	Disdrómetro
0 - 2	-8.5%	-5.3%	1.5%	5.9%	11.8%	9.1%	4.6%	20.4%
2 - 4	-8.0%	-5.4%	0.6%	7.7%	11.7%	8.8%	4.8%	18.7%
> 4	-8.2%	-3.2%	-6.3%	-13.3%	15.3%	11.2%	8.5%	21.5%

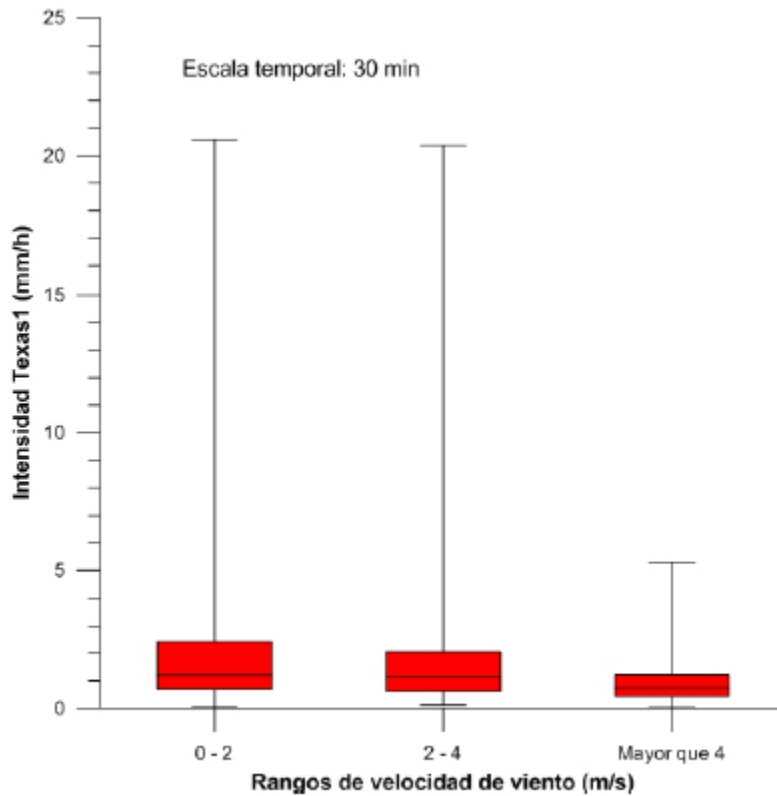


Figura 3.4.6: Distribución de la intensidad (Texas1) para rangos de velocidad de viento

Pluviógrafos

Los pluviógrafos Davis y Onset no muestran una diferencia significativa en el sesgo porcentual con respecto al Texas1 para los distintos rangos de velocidad de viento. Esto no quiere decir que dichos pluviógrafos no estén sujetos a errores por efecto del viento, sino que el error debido al viento resulta prácticamente el mismo para los tres



sensores. Este resultado se explica debido a que las dimensiones y la forma de los equipos son similares, al igual que las alturas de instalación. Por lo tanto el flujo de aire alrededor de los mismos será similar, y en consecuencia no se producen diferencias entre las lecturas de los equipos por efecto del viento [33]. En lo concerniente al sesgo absoluto porcentual, para todos los equipos existe un incremento del valor para el caso con velocidades superiores a los 4 m/s. Esto sucede no por efecto del viento sino debido a que para las altas velocidades de viento se tiene un menor promedio de intensidad (ver Fig. 3.4.6) y cómo ya se ha explicado el error absoluto es mayor para intensidades bajas.

Al comparar los pluviógrafos Texas1 y Texas2 se esperaría encontrar diferencias por efecto del viento, dado a la utilización de la pantalla Alter de protección contra el viento en el segundo pluviógrafo. En el presente estudio, se ha encontrado que el sesgo porcentual está alrededor del 1% para cuando se tienen velocidades de viento ≤ 4 m/s. Este resultado está de acuerdo con [28], quienes determinaron que la protección de tipo Alter reduce las pérdidas por viento en menos de 1%. En otro estudio ([34]) se concluye que este tipo de pantalla no aporta significativamente a la reducción del error por efecto del viento al compararlo con un pluviógrafo a nivel del suelo. No obstante para el rango de velocidades más alto se tiene que el Texas2 (con protección de viento) subestima la lluvia en un porcentaje considerable con respecto al Texas1 (sin protección de viento). Si se considera solo los datos > 6 m/s el porcentaje de la subestimación se incrementa por sobre el 10% (malo). Esta situación carece de lógica y no ha sido posible establecer una razón con certeza para explicar el fenómeno. Una probable explicación es que los fuertes vientos (> 4 m/s) hacen que los pluviógrafos sin protección vibren levemente provocando que la carga requerida para desequilibrar el balancín disminuya, mientras que la pantalla Alter atenúa el viento y evita dicha vibración. Ésto significaría que los pluviógrafos sin protección sobrestiman la cantidad de lluvia y que las lecturas del pluviógrafo con protección estarían más acordes a la realidad. Resulta necesaria la realización de un estudio más detallado sobre el tema para alcanzar una conclusión definitiva.

Disdrómetro

Para las velocidades de viento entre 0-4 m/s el sesgo porcentual del disdrómetro respecto al Texas1 es 6.9% similar al valor determinado en la evaluación general. La pequeña diferencia entre los resultados para los dos primeros rangos de velocidad de viento se atribuye a las variaciones de la distribución de los datos de intensidad correspondientes a cada caso, más que a un efecto de la velocidad del viento. El estudio de [24] tampoco pudo atribuir las diferencias entre el disdrómetro y el pluviógrafo a un efecto de la velocidad de viento.

En el rango de velocidades de viento > 4 m/s el cambio de la tendencia entre los equipos es evidente. En lugar de sobrestimar la lluvia, el disdrómetro registra un 13% menos que el Texas1. En artículos como los de [17], [39] se ha encontrado que los disdrómetros también están sujetos a una subestimación de la lluvia real debido a la velocidad del viento y que el error es más notorio para los rangos de tamaño pequeños



de las gotas y velocidades de viento altas. El error por viento está caracterizado por un comportamiento no lineal complejo que depende de la velocidad de viento, la intensidad y la distribución del tamaño de las gotas [40]. El error se produce debido a que el ángulo de inclinación con el que cae la lluvia genera una disminución del área efectiva de medición del laser y además el cuerpo del sensor puede constituir un obstáculo para las gotas. Es importante recordar que en las especificaciones del sensor se indica que la precisión es $\leq 15\%$ pero para velocidades de viento entre 0-3 m/s. Al analizar la Figura 3.4.6 se tiene que para velocidades altas de viento el promedio de intensidad es menor y por consiguiente seguramente el porcentaje de partículas de pequeño tamaño será considerable. Esta situación podría generar que el disdrómetro subestime un poco la lluvia en relación a la precipitación real para las condiciones mencionadas, pero no explica que lo haga con respecto al Texas1 ya que en la sección 3.4.2 se determinó que el disdrómetro registra una mayor cantidad de lluvia que el Texas1 para los rangos de intensidades bajas.

Las altas velocidades de viento combinadas con intensidades bajas (partículas de pequeño tamaño) generan que las velocidades de caída disminuyan. Además de una conversación con los fabricantes del disdrómetro se conoce que para el sitio de instalación (3780 m.s.n.m.) las velocidades de caída son menores a las utilizadas para la calibración del sensor. Por lo tanto para las condiciones indicadas el equipo tiende a clasificar incorrectamente el tipo de precipitación como nieve en un porcentaje mayor que para otras condiciones (ver Fig. 2.4.2 y Apéndice B), lo que genera una subestimación de la lluvia. Esta situación constituye la principal explicación del resultado de sesgo porcentual obtenido. Para el caso de los días 14 de junio, 25 de julio y 10 de agosto de 2011 mencionados anteriormente por tener un elevado número de lecturas de nieve, las velocidades de viento promedio son de 5.6, 5.5 y 4.7 m/s respectivamente, todas pertenecientes a la categoría de velocidades más altas. En un tema relacionado, el autor de [17] encontró que los registros de velocidades de caída, especialmente para gotas de tamaño pequeño, tienen una variación apreciable entre disdrómetros Thies colocados uno junto al otro.

La dirección del viento también constituye un factor que puede afectar las medidas del disdrómetro, dado que el área de medición del laser y el sensor tienen características prismáticas. En el presente estudio el ángulo de instalación del equipo estaba de tal manera que el laser tenía una dirección este - oeste. De los datos de la veleta instalada junto al sensor se observa que la dirección predominante (45% del tiempo) de donde viene el viento está entre el este (E) y el noreste este (NEE) (Apéndice B), lo cual fue lo menos esperado al momento de instalar el disdrómetro. Por lo tanto es probable que el cuerpo del sensor haya constituido un obstáculo que bloqueó un porcentaje de las gotas que debían ser medidas, sobre todo para velocidades de viento altas y tamaños de gota pequeños [17]. Esta es otra razón que se suma a la explicación de por qué el disdrómetro lee menos lluvia que el Texas1 para velocidades de viento superiores a 4 m/s.

Si consideramos solo las velocidades de viento entre 0-4 m/s, el sesgo porcentual del disdrómetro respecto al Texas1 es 6.9%, produciéndose un incremento de 1.3%



comparado al valor determinado en la evaluación general. Además si volvemos a evaluar el sesgo porcentual entre el disdrómetro y el Texas1 para los rangos de intensidad, pero sin considerar los datos con velocidades de viento > 4 m/s, se determina que la sobrestimación del disdrómetro es considerablemente mayor a la previamente determinada en la Figura 3.4.5. Lo indicado ocurre especialmente para los rangos menores de intensidad. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.4.4: Sesgo porcentual del disdrómetro respecto al Texas1 para rangos de intensidad. Escala temporal: 30 min.

Intensidad (mm/h)	0 - 1	1 - 2	2 - 5	5 - 10	> 10
Evaluación general	7.3 %	1.1 %	1.5 %	8.7 %	16.8 %
Velocidad de viento ≤ 4 m/s	18.1 %	5.4 %	2.0 %	9.2 %	16.8 %

3.4.4 Efecto del método de cálculo de la intensidad

En esta sección se comparan los datos de intensidad del pluviógrafo Texas1 calculados mediante los distintos métodos descritos en la sección 3.3. Se emplean escalas temporales de 5, 10, 30 y 60 minutos y los rangos de intensidad establecidos en la Tabla 3.3.1. En este caso, el valor del sesgo será cero debido a que al trabajar solo con datos de un equipo los errores para cada intervalo se terminan compensando. Para el análisis se utiliza solamente el sesgo absoluto porcentual. En la Tabla 3.4.5 se muestran las diferencias de las intensidades calculadas con el método de Conteo de tips: acumulación con Hydraccess y Matlab, con los valores determinados mediante el método de la Polilínea cúbica (PC).

Tabla 3.4.5: Sesgo absoluto porcentual respecto a intensidades calculadas con el método de la PC para distintas escalas temporales

Escala temporal	5 min	10 min	30 min	60 min
Conteo de tips: Hydraccess	32.5 %	18.8 %	5.0 %	2.3 %
Conteo de tips: Matlab	29.1 %	17.5 %	4.9 %	2.3 %

Las diferencias entre las intensidades determinadas con la utilización de Hydraccess y el código de Matlab para la acumulación de la lluvia, mediante el método de conteo de tips, son casi inexistentes para escalas de tiempo mayores o iguales a 30 minutos. Sí existe un error, aunque pequeño, para escalas temporales menores e intensidades bajas. En la Figura 3.4.7 se grafica el sesgo absoluto porcentual para las intensidades calculadas con Hydraccess y Matlab con respecto a las determinadas con el método de la PC, cómo una función de la intensidad y para la escala temporal de 5 minutos. Las diferencias entre el tamaño de las columnas representa las diferencias producidas en el cálculo de la intensidad si se usa Hydraccess en lugar de Matlab.

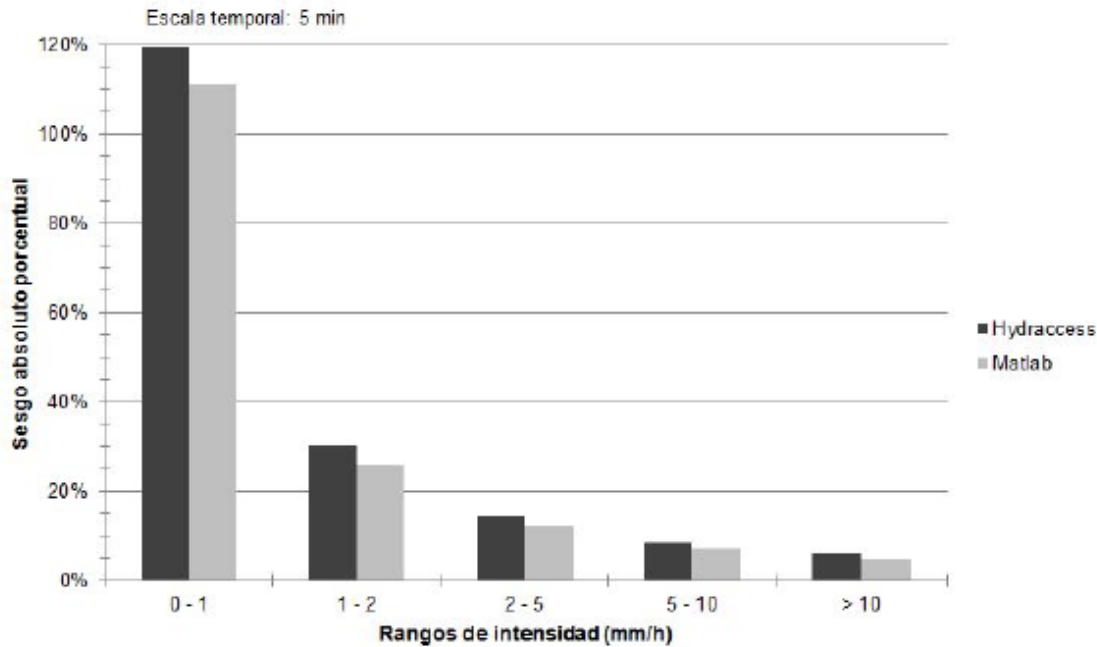


Figura 3.4.7: Sesgo absoluto porcentual respecto a PC para rangos de intensidad. Escala temporal: 5 min.

Los resultados presentan un error considerable entre el método de la PC y el de Conteo de tips para escalas de tiempo pequeñas (5 min y 10 min) e intensidades bajas principalmente. Para una escala temporal de 30 minutos las diferencias entre los métodos se reducen a menos de 5%. Con el siguiente ejemplo se explica por qué los errores son mayores para escalas de tiempo pequeñas e intensidades bajas: Para una intensidad de 0.6 mm/h el Texas1 (resolución = 0.1 mm) registraría un tip cada 10 minutos. Entonces, si se acumula la lluvia cada 5 minutos, se tendrá dos intervalos correspondientes: uno sin lluvia y otro con 0.1 mm; lo que conllevaría a intensidades de 0 y 1.2 mm/h calculadas con el método de Conteo de tips, diferentes del valor real. Mientras que con el método de la PC, la interpolación realizada generaría que las intensidades calculadas para ambos intervalos de 5 min sean más similares a los 0.6 mm/h reales. En el artículo [35] se encontraron diferencias de similar magnitud entre las intensidades calculadas con el método de conteo de tips y un método de interpolación. Los resultados de [36] muestran que las intensidades obtenidas mediante el método de la PC se ajustan de muy buena manera a las medidas por un disdrómetro de impacto, lo que significa que son una buena estimación de las intensidades reales. Es importante notar que de no haberse utilizado el método de la PC, los resultados de este capítulo se hubiesen visto afectados.

3.5 Conclusiones

La comparación de datos de precipitación obtenidos mediante el disdrómetro laser y los distintos pluviógrafos durante 14 meses revela algunos resultados importantes sobre las mediciones de lluvia en el páramo. Los eventos de precipitación en estos ecosistemas son mayoritariamente de intensidades bajas. El 95% de los datos de intensidad promedio para la escala de 5 minutos no superan los 5 mm/h y el 50% no



pasa de 1 mm/h. Además se ha encontrado que se tiene presencia de vientos fuertes (> 4 m/s) en alrededor de un 25% de los datos de lluvia y cuando esto ocurre las intensidades son más bajas que el promedio. Por esta razón, en la evaluación de los equipos se pone mayor énfasis en su desempeño para las condiciones típicas de lluvia en el páramo. Las comparaciones se realizaron con respecto a un pluviógrafo denominado Texas1. El análisis de la dispersión entre las lecturas de los equipos nos permite obtener una mejor estimación de la realidad.

Los índices estadísticos a utilizarse para la evaluación de los sensores es un tema muy importante para este tipo de estudios. Cada índice sirve para representar un aspecto particular de los datos de un sensor o de la relación entre dos equipos. Resulta muy complicado comprender todas las características de las diferencias entre dos equipos a partir de un único índice estadístico, por lo que se sugiere la utilización de un paquete de índices similar al empleado en este estudio. Por ejemplo, en el presente estudio las diferencias entre las lecturas de los equipos medidas con el sesgo absoluto porcentual son mucho mayores (aproximadamente 10 veces mayores para la escala temporal de 5 min) que la diferencia real en la cantidad de lluvia registrada, por lo que se hubiese llegado a conclusiones erróneas de no haberse determinado el sesgo porcentual sin valor absoluto. No obstante, de no haberse calculado el sesgo porcentual absoluto, no hubiese sido posible identificar la poca precisión de los pluviógrafos para el cálculo de intensidades, especialmente para escalas temporales de 5 o 10 min y para las bajas intensidades típicas del páramo. Las características de los datos es un punto fundamental para la selección adecuada de los índices estadísticos. Los datos de cantidad de lluvia a escala diaria o subdiaria no tienen una distribución normal. La presencia de valores extremos repercute en el resultado del coeficiente de determinación (R^2), por lo que se debe tener precaución al utilizarlo. Si se trabaja con R^2 , se recomienda utilizar adicionalmente un coeficiente de correlación no paramétrico, como por ejemplo el de Spearman (ρ), para estimar qué tan afectado está R^2 a causa de los valores extremos. Al no tener una distribución normal y contar con valores extremos, el cálculo de la mediana o curvas de porcentaje de excedencia en lugar del promedio, brinda un panorama mucho más claro de la realidad.

El pluviógrafo Davis es el que mayores errores presentó. Si se analiza solo la cantidad total de lluvia medida en todo el período sus resultados son muy similares a los del Onset (0.6% de diferencia). A pesar de que sus componentes son de menor calidad que los del Onset, el pluviógrafo continúa funcionando adecuadamente - para las condiciones del páramo - luego de más de 2 años de ser instalado y se encuentra en buen estado, debido al permanente mantenimiento efectuado (generalmente visitas cada 3 semanas durante el primer año y cada 2 semanas en el segundo año). Esto nos indica que si el interés de la medición es contar únicamente con acumulados diarios o mensuales, el Davis resulta mucho más atractivo que el Onset debido a que su costo es de aproximadamente \$480 menos. Al comparar el desempeño del Davis con el del Texas1 para todo el período de datos, se tiene una subestimación de aproximadamente 7%. Si se requiere de datos en escalas temporales menores o información de intensidades, el Davis no resulta una buena opción. Los resultados muestran que la subestimación se incrementa hasta por sobre el 10% para las condiciones de



intensidad típicas del páramo. Además su precisión para estimar adecuadamente las intensidades es muy pobre. En lo referente al efecto del viento el error no crece con respecto al Texas1, lo que no quiere decir que los pluviógrafos no sufran de una subestimación de la lluvia a causa del viento. El Davis no parece ser una tan buena opción por sobre el Texas, a pesar de costar aproximadamente \$700 menos y aun si la finalidad es contar con una base de datos de lluvia acumulada diaria.

El Onset tiene un buen desempeño comparado al Texas1 para intensidades mayores a 5 mm/h y con escalas temporales de 30 minutos o superiores, condiciones para las cuales la diferencia promedio entre la cantidad de lluvia medida para los sensores es del 2% y la estimación de la intensidad es muy aceptable (error absoluto $\leq 5\%$). No obstante, las condiciones de lluvia en el páramo merman significativamente las ventajas del Onset. Para intensidades bajas la subestimación es mayor y debido a su resolución pierde mucha precisión en la estimación para escalas temporales menores a 30 minutos. En los Texas se destaca su capacidad para capturar lluvias de intensidades bajas en comparación a los otros pluviógrafos. El tener una menor resolución es clave para estimar mejor las intensidades, sobre todo para las condiciones del páramo. Se recomendaría invertir en pluviógrafos Texas en lugar del Onset, teniendo en cuenta que su costo (\$815) es \$215 superior.

La protección de viento Alter ayudó a reducir el error por este factor en un 1%, considerando solo datos con velocidades ≤ 4 m/s. Este resultado coincide con lo obtenido por [28]. Para velocidades de viento mayores el pluviógrafo con la protección registró menos lluvia que aquel sin protección. Podría ser que ante la acción de fuertes vientos los equipos vibren provocando que la carga para el desequilibrio del balancín disminuya; de ser así la pantalla Alter evitaría que el pluviógrafo vibre y que se produzca una sobrestimación de la cantidad real de lluvia. Se recomienda realizar un estudio específico sobre este tema. Los resultados indican que para las condiciones del páramo el gasto en una pantalla Alter no se justificaría para hidrología operativa. Probablemente, para abordar el error debido al viento resultaría más conveniente la instalación de un pluviógrafo a nivel del suelo.

Los resultados sobre el disdrómetro muestran grandes ventajas y algunas desventajas. Su capacidad para detectar gotas de tamaños muy pequeños permite calcular el volumen de agua debido a lluvia horizontal o neblina. Además la estimación de intensidades bajas es mucho más precisa que lo que se puede alcanzar con los pluviógrafos, debido a que su resolución es 10 veces mejor que la del Texas. Estas capacidades del sensor constituyen una gran ventaja respecto de los pluviógrafos, sobre todo para las características del páramo. Las principales desventajas encontradas fueron los errores a causa de la altitud del sitio de instalación y de las altas velocidades de viento. Estas condiciones algunas veces generan una baja velocidad de caída de las gotas que resulta en una subestimación de la lluvia por parte del disdrómetro, debido a que identifica el tipo de precipitación como nieve. Es probable que se produzca una subestimación de la precipitación por la disminución del área efectiva de medición o el bloqueo de gotas por parte del cuerpo del equipo bajo velocidades de viento altas y con una dirección paralela al laser [17], pero en el



presente estudio no se pudo establecer a causa de las lecturas de nieve. Para los rangos de intensidades altas el disdrómetro registra más lluvia que los pluviógrafos. Por el momento se cree que para estos casos las mediciones de los pluviógrafos están más de acuerdo a la realidad [24], [25]. En la actualidad se reprogramó el disdrómetro para contar con datos promedio en una escala temporal de 5 minutos. Esto permitirá obtener intensidades muchas más precisas que con los pluviógrafos y permitirán la comparación con el método de la polilínea cúbica. Además será posible una identificación a mayor detalle de los registros de nieve que permita intentar la cuantificación de la subestimación debido a este problema y la calibración del sensor para las condiciones del páramo.

Si no se considera los datos con velocidades de viento > 4 m/s, se minimiza los registros de nieve pero no se soluciona por completo el problema. Al comparar en estas condiciones el disdrómetro con el Texas1, se tiene que para intensidades ≤ 1 mm/h el disdrómetro lee un 18% más de lluvia. Esta diferencia podría ser incluso mayor debido a que para la comparación en rangos de intensidad se tomaron solo los datos en los que ambos equipos marcan lluvia, por lo que puede haber casos que no se han tomado en consideración (intensidades muy bajas) en los que el Texas1 no registre precipitación, mientras el disdrómetro sí lo haga. Entonces si para condiciones de viento entre 0-4 m/s, se utiliza la información del disdrómetro para intensidades inferiores a 5 mm/h y la del pluviógrafo Texas1 para intensidades mayores, se puede establecer una buena estimación de la cantidad real de lluvia. De acuerdo con lo anterior, los resultados del presente estudio nos permiten concluir que la cantidad real de lluvia es aproximadamente superior en un 4.6% a la lluvia medida por el Texas1 y en un 11% a lo registrado por el Davis y el Onset. Este último resultado es de fundamental importancia para todo estudio en el que se utilice datos de precipitación en el páramo.



CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN

4.1 Introducción

Al inicio de este estudio se describió la gran importancia socio económica de los ecosistemas de páramo y por ende la necesidad de contar con estrategias de manejo, conservación y mitigación de impactos. Para que dichas estrategias tengan éxito, se requiere que tengan un fundamento científico. Los autores de [1] llegan a la conclusión de que no existe el suficiente conocimiento sobre la hidrología del páramo para la elaboración de planes de manejo apropiados.

De la revisión bibliográfica realizada se evidencia que existen pocos estudios sobre el páramo y menos aún sobre el componente hidrológico. De acuerdo con [41], las primeras iniciativas científicas en torno a la hidrología del páramo datan de finales de la década de 1990 y la mayoría de los estudios son de carácter descriptivo. Sobre investigaciones de la variabilidad temporal de la precipitación en el páramo se encontraron solo tres referencias [3], [4], [42]. Estos estudios se desarrollan para la cuenca del río Paute, tienen varias estaciones que cuentan con un solo sensor por sitio y para los análisis utilizan series de tiempo de lluvia diaria y mensual. En el artículo [3] se realiza además un análisis de la variación intra-diaria de la precipitación con la información de un pluviógrafo de balancín (resolución 0.2 mm) de una de las estaciones.

El conocer la variabilidad temporal de la precipitación es de gran importancia. Contar con información sobre las temporadas secas y lluviosas permite planificar la regulación del agua. Por ejemplo, para el caso de una central hidroeléctrica resulta clave saber si podrá funcionar a lo largo de todo el año o si no podrá almacenar la suficiente cantidad de agua en la represa para afrontar la época de verano. Por su parte la variabilidad a escala diaria y subdiaria brindará información sobre los días secos y cómo es la distribución de los registros de cantidad de lluvia, lo que es de utilidad para entender las respuestas hidrológicas de la cuenca y para el manejo del recurso hídrico [4]. Un ejemplo de aplicación puede ser el establecer las necesidades de riego de una zona. El desconocimiento de estos procesos ambientales puede poner en riesgo el abastecimiento de agua potable a pequeñas comunidades andinas que captan el agua directamente de micro cuencas de páramo y en los cuales por lo general no existen embalses de regulación.

Existe la necesidad de dar un paso hacia adelante en los estudios del páramo. Se requiere que las investigaciones no solo sean descriptivas, sino que se enfoquen en esclarecer aspectos del funcionamiento del ecosistema y sus procesos. Solo de esta manera será posible administrar apropiadamente los servicios ambientales que proporcionan los páramos, realizar estudios del potencial erosivo de la lluvia, identificar medidas para reducir la vulnerabilidad de los pequeños sistemas de agua potable, entre otros. Además, el alcanzar una mejor concepción de la hidrología de una cuenca es fundamental para aplicaciones de modelación, como por ejemplo para escoger el



tipo de modelo más adecuado [4]. Con éste fin, en el presente capítulo se estudia la variabilidad temporal de la lluvia pero en mucho mayor detalle comparado con investigaciones previas del tema, por lo que se destaca su importancia. Para ello se cuenta con varios equipos de mejores características y se trabaja a partir de una serie de tiempo de datos de lluvia cada 5 minutos. La variación mes a mes de los patrones subdiarios de precipitación e intensidades y de la cuantificación del aporte de la llovizna como fuente de ingreso de agua son temas novedosos que no han sido analizados en ningún otro estudio de ecosistemas de páramo.

La investigación del presente capítulo se la desarrolla con el afán de contribuir a un mejor entendimiento de la hidrología del páramo y el funcionamiento de estos ecosistemas, teniendo en cuenta que la lluvia es el principal componente generador de procesos hidrológicos. Al final del estudio se espera responder las siguientes interrogantes:

- ¿Cuánto llueve en el páramo, con qué intensidad? ¿Cuál es el porcentaje de días secos? ¿Cómo ocurren los días secos? ¿Cada cuánto tiempo ocurre un día seco? ¿Cuál es el período más extenso de días secos?
- ¿Hay una clara variación estacional (mensual) en la lluvia y su intensidad y duración?
- ¿Cuándo llueve: En las mañanas, en las tardes, todo el día, ésto cambia significativamente mes a mes?
- ¿Cómo es la variabilidad subdiaria de las intensidades y cómo cambia mes a mes? ¿Qué tan importante es la llovizna como fuente de ingreso de agua y cómo varía mes a mes?

4.1.1 Conceptos importantes

- **Día seco**

No es posible definir de manera estricta lo que es una sequía. Existen varias definiciones que se diferencian de acuerdo a la región, necesidades y campos de estudio. Por ejemplo, se puede hablar de sequía meteorológica, agrícola o hidrológica. En [43] se indican definiciones generales de los tipos de sequías mencionados.

En la revisión bibliográfica se han encontrado las siguientes fuentes que estudian días secos [3], [4], [44], [45]. Para la primera referencia se considera como día seco a aquel que no registra ni un solo tip del pluviógrafo. Otras dos de las fuentes establecen un máximo de 1 mm de precipitación entre las 0 y 24 horas para que un día sea considerado seco, mientras que la restante fija el umbral en 2.54 mm.



- **Llovizna**

Cuando se habla de precipitación, pueden distinguirse varios tipos, por ejemplo: llovizna, lluvia, granizo, nieve y precipitación mixta. La llovizna y la lluvia corresponden a precipitación líquida, y se diferencian básicamente por el tamaño y velocidad de caída de las gotas, al igual que por la intensidad [22]. De acuerdo con [46] “*la llovizna consiste en pequeñas gotas de agua, con diámetro variable entre 0.1 y 0.5 mm, con velocidad de caída muy baja. Por lo general, la llovizna precipita de los estratos bajos de la atmósfera y muy rara vez sobrepasa el valor de 1mm/h de intensidad*”

- **Análisis de series de tiempo**

El determinar patrones de comportamiento es el punto principal en el análisis de series de tiempo. Un patrón se puede describir mediante dos componentes fundamentales: tendencia y estacionalidad. Una *tendencia* significa en general un comportamiento sistemático que cambia con el tiempo y no se repite para la serie de datos. La *estacionalidad* es básicamente una tendencia que se repite de manera sistemática cada cierto intervalo de tiempo.

Para una serie de tiempo de un año de datos de lluvia no se va a producir una tendencia general, debido a las características propias del clima. Sin embargo, puede ser común que la serie presente *persistencia*. Es decir, que exista una tendencia a mantenerse en el mismo estado entre un dato y el siguiente. Por ejemplo, lo anterior significaría que si hoy llueve es más probable que mañana llueva a que sea un día seco. La persistencia de una serie comúnmente se evalúa mediante la autocorrelación. Se trata de una correlación entre los datos de la serie de tiempo y sus propios valores pasados o futuros desfasados un intervalo definido [47], [48].

4.2 Materiales

Para el desarrollo de este capítulo se utilizan los datos del pluviógrafo Texas1 y el disdrómetro laser. La descripción de los equipos, al igual que el control de calidad de los datos realizado, se encuentra detallado en el Capítulo 2. Dentro de esta sección se abarca únicamente las características de los datos empleados para el estudio de la variabilidad temporal de la precipitación. La información de partida del Texas1 consiste en la serie de tiempo de cantidad de lluvia cada 1 minuto. Por su parte la del disdrómetro contiene la cantidad de lluvia cada 30 minutos. Las series de tiempo son de 14 meses comprendidos entre el 01/03/2011 y el 30/04/2012, sin vacíos de datos para el Texas1 y con un 10% para el disdrómetro. Es importante destacar la excelente calidad de la base de datos.

En este capítulo se estudia la variabilidad temporal a escala mensual, diaria y subdiaria. Se utilizan los datos de partida para generar series de tiempo con la cantidad de lluvia mensual y diaria. Para el análisis de la variabilidad subdiaria se emplean datos en escala horaria. En lo que respecta a las intensidades, se trabaja con valores promedio para escalas de agregación de 5, 10, 30, 60, 180, 360 y 720 minutos para el



Texas1 y de 30 y 60 minutos para el disdrómetro. Los datos de intensidad son prácticamente los mismos que los utilizados en el capítulo anterior, la diferencia es que en este caso se cuenta con más información porque ya no se requiere de intervalos de tiempo coincidente para todos los pluviógrafos y el disdrómetro. Se mantiene el criterio del Capítulo 3 de que las intensidades empleadas corresponden a intervalos entre horas cerradas, sin información traslapada y con lluvia durante todo el lapso del intervalo. Por ejemplo, para un evento cuyo primer tip se registra a las 14:17 y el último a las 16:08 del mismo día, los datos de intensidad promedio utilizados para la escala de 60 minutos corresponden al único intervalo de 15:00 a 16:00. No se utiliza los datos de los intervalos de 14:00 a 15:00 y de 16:00 a 17:00 porque no hubo lluvia durante todo el lapso del intervalo. Solamente para determinar las intensidades máximas se trabaja con intervalos de datos traslapados, por ejemplo, para la escala temporal de 5 minutos los intervalos utilizados serían 0-5, 1-6, 2-7,...etc.

En resumen, en este capítulo se utilizan datos del Texas1 de series de tiempo con lluvia acumulada horaria, diaria y mensual; además datos de intensidad promedio para escalas de 5, 10, y 30 minutos, y 1, 3, 6 y 12 horas. Los datos empleados del disdrómetro corresponden a la serie de tiempo de lluvia acumulada diaria y a intensidades promedio para escalas de 30 y 60 minutos. La información del pluviógrafo Texas1 constituye la base para el estudio, mientras que la del disdrómetro se utiliza para complementar información sobre días secos e intensidades debido a su mejor resolución.

4.3 Métodos

Inicialmente se realiza las acumulaciones de la cantidad de lluvia para obtener las series de tiempo con datos horarios, diarios y mensuales. Este pre-procesamiento se lo lleva a cabo de una manera directa sumando todos los registros que estén dentro del intervalo determinado. No se realiza ninguna interpolación para intentar corregir los problemas debidos a la resolución del pluviógrafo. Es decir, si a las 6:01 se registró un tip o incremento de lluvia, todo el volumen correspondiente se acumula para el intervalo de 6:00-7:00, aun cuando la lluvia pudo haber iniciado en el intervalo de 5:00-6:00.

Para la serie de tiempo con datos mensuales de lluvia se analiza la estacionalidad intra-anual mediante la distribución de volúmenes. Varios autores han desarrollado y propuesto índices que permitan cuantificar la estacionalidad de la lluvia (referencias de [42]). Para el presente estudio se utiliza el “Seasonality Index” (SI) de Walsh y Lawler [49], debido a que ha sido empleado satisfactoriamente en un estudio previo de precipitación en el páramo [42]. El SI indica qué tan uniformemente está repartida la cantidad de lluvia mensual en el año. El cálculo del índice se lo realiza de acuerdo con la ecuación 4.1.

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^{12} \left| M_i - \frac{R}{12} \right| \quad (4.1)$$



Donde R es la precipitación anual y M_i es la precipitación total correspondiente al mes i . Los creadores del índice establecieron una clasificación de distintos regímenes de precipitación en función del valor de SI (ver Tabla 4.3.1). Para calcular el SI en el presente estudio se utiliza datos de los 12 meses comprendidos entre marzo de 2011 y febrero de 2012.

Tabla 4.3.1: Regímenes estacionales clasificados según el *Seasonality Index*. Traducción de la tabla de [45]

SI	Régimen de precipitación
< 0.19	Precipitación repartida en cantidades similares para todos los meses del año
0.20 - 0.39	Precipitación repartida en cantidades similares para todos los meses del año, pero con una estación lluviosa definida
0.40 - 0.59	Algo estacional con una estación seca corta
0.60 - 0.79	Estacional
0.80 - 0.99	Marcadamente estacional con una estación seca larga
1.00 - 1.19	La mayoría de la precipitación anual repartida en menos de 3 meses
> 1.20	Estacionalidad extrema, con casi toda la precipitación anual entre 1 y 2 meses

En el estudio de la variabilidad temporal de la precipitación a escala diaria se realiza lo siguiente: (i) Análisis de la distribución de los datos diarios de cantidad de lluvia mediante una curva de porcentaje de excedencia, (ii) Análisis de persistencia de la serie mediante autocorrelación y (iii) Estudio de los días secos mediante observación directa de los datos: cantidad, duración y ocurrencia de días secos, y su distribución en el tiempo. En lo referente a la autocorrelación, dentro de este documento no se desarrolla sobre la formulación y consideraciones para el cálculo; para detalles del tema puede revisarse [47] o cualquier texto de estadística. Se realizan múltiples autocorrelaciones considerando desfases de un distinto número de días. Se establece el desfase de tiempo que genere una autocorrelación significativa estadísticamente (intervalo de confianza del 95%). Un día se establece como seco si no hubo lluvia, a diferencia de las definiciones de otros autores indicadas al inicio del capítulo. Si se utiliza el pluviógrafo Texas1, la definición se ajustaría a que un día seco es aquel con menos de 0.1 mm de lluvia (resolución del equipo). En este caso se emplea adicionalmente la información del disdrómetro, dado que por su resolución de 0.01 mm los resultados pueden variar con respecto a los obtenidos mediante el pluviógrafo.

Para el estudio de la variabilidad subdiaria se calcula la distribución de la cantidad de lluvia con respecto a las horas del día y la variación mensual de dicha distribución. Adicionalmente se analizan las intensidades de precipitación y la duración de los eventos, así como su variación mes a mes. Para ello se calculan valores máximos, promedios y porcentajes de excedencia de determinados valores. Se realiza un enfoque especial en los datos de llovizna.

Las intensidades para el pluviógrafo Texas1 fueron calculadas mediante el método de la Polilínea cúbica (PC), de acuerdo a lo explicado en el Capítulo 3. La definición de evento se disminuyó de mínimo 1 mm a 3 tips (0.3 mm), que es el mínimo número de



tips requerido por el método de la PC para el cálculo de intensidades. Ésto se hizo con el afán de incluir mayor información para el presente estudio. No obstante, no se calcularon intensidades previas al primer tip, ni posteriores al último tip de cada evento; ni tampoco para los casos de registros aislados. Se decidió no calcular las intensidades para dichos casos para no incurrir en estimaciones equivocadas, ya que no es posible hacerlo a partir de la información de los pluviógrafos si es que no se asume, por ejemplo, durante cuántos minutos ha estado lloviendo previo a que ocurra el primer tip de un evento o si es que el bucket estaba parcialmente lleno al momento que empezó a llover. Por lo que se ha constatado en persona en el páramo, se puede decir que: (i) Las intensidades generalmente son menores en el inicio y final de un evento que durante el mismo y (ii) Los registros (tips) aislados se deben a lluvias de muy baja intensidad (llovizna) y no a un evento de mayor intensidad y muy corta duración. Según lo anterior, seguramente el porcentaje de intensidades bajas (menores a 1 o 2 mm/h) en el total de la precipitación, será en realidad mayor que lo obtenido con los datos utilizados del Texas1.

Para el disdrómetro se calcula la intensidad directamente a partir de la cantidad de lluvia registrada para cada intervalo de 30 minutos. Se define como evento los casos en los que se tenga mínimo 3 registros consecutivos con incremento en la precipitación. Al inicio y fin de un evento pueden existir intervalos de 30 minutos en los que, por ejemplo, haya llovido solo durante 10 minutos. Se opta por no utilizar los datos del primer y último intervalo de cada evento para no usar intensidades que puedan estar mal estimadas. Para el disdrómetro sí se calcula la intensidad para los casos con 1 o 2 registros aislados en los que se tenga precipitación con el afán de representar mejor la cantidad real de datos con intensidades bajas.

Se asume como la duración al tiempo transcurrido entre el primer y último tip de un evento. Se mantiene la definición de que si dos tips consecutivos están separados por más de 30 minutos, entonces pertenecen a distintos eventos.

Para este estudio se considera como *llovizna* todos los datos con una intensidad ≤ 1 mm/h, de acuerdo con [46]. Adicionalmente se emplea como una referencia los datos del disdrómetro para los cuales se clasifica el tipo de precipitación como llovizna.

4.4 Resultados

En esta sección se presenta y discute los resultados obtenidos del análisis de la variabilidad temporal. Se inicia con la variabilidad a escala mensual, luego se trata a escala diaria y se culmina con la escala temporal subdiaria. Dentro del análisis de la variabilidad diaria, los *días secos* aparecen como un tema destacado. Las *intensidades* y la *duración* de los eventos de precipitación, al igual que la *llovizna* son puntos de interés en el estudio de la variabilidad subdiaria.



4.4.1 Variabilidad mensual

El contar con la distribución de los volúmenes de lluvia correspondientes a cada mes por al menos un año, nos permite obtener información sobre el régimen de precipitación en la zona de estudio. En la Figura 4.4.1 se presenta los datos obtenidos en el presente estudio, correspondientes al pluviógrafo Texas1. Si se considera solo los 12 primeros meses, la precipitación anual medida por el Texas1 es de 1527.7 mm y el SI es de 0.29. De acuerdo con las conclusiones del Capítulo 3, se estima que la cantidad real de precipitación es aproximadamente un 4.6% mayor a la medida por el Texas1, lo que equivaldría a una precipitación anual de alrededor de 1600 mm. Estos resultados son similares a los de otros páramos cercanos. Por ejemplo, se tiene una precipitación anual aproximada de 1230 mm para los páramos del río Tomebamba [4] y de 1490 mm en Chanlud (río Machángara) [7]. En el estudio de [42] se encontró que el SI promedio de varios años de datos de precipitación está entre 0.31 y 0.40, para las zonas de páramo de las cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara. La temporada seca se produce entre agosto y octubre, aunque no es fuertemente marcada. Para el resto de los meses la precipitación supera los 100 mm en cada uno de ellos. El régimen parece ser unimodal, siendo enero y febrero la temporada más lluviosa. En estos meses, se distinguen dos tendencias importantes de la dirección del viento durante la precipitación: (i) Entre el este (E) y noreste este (NEE) con un 35% de los datos y (ii) Entre el sur (S) y sur suroeste (SSO) con un 25% de los datos. (Ver Apéndice B). De los resultados se desprende la baja estacionalidad de la precipitación, pero con una estación lluviosa definida, lo que coincide con las observaciones de estudios previos [3], [4], [5], [42]. Esta es una de las características que permite la dotación de agua en una cantidad considerable a lo largo del año, por parte de los páramos. No obstante, se ha encontrado para el páramo de Zhurucay una diferencia de 175 mm entre el mes más lluvioso y el más seco, la cual resulta superior al valor aproximado de 100 mm para los páramos de la cuenca del río Paute [3] y del Tomebamba [4]. Es importante notar que para llegar a conclusiones definitivas sobre la variabilidad mensual se requiere contar con varios años de datos, pero de todas maneras los resultados del presente estudio brindan una muy buena idea del patrón de precipitación de la zona.

Las referencias de [3] indican que la precipitación en los Andes occidentales del sur del Ecuador, donde se encuentra la zona de estudio, tiene un comportamiento bimodal, con la temporada seca principal entre agosto - septiembre y otra entre diciembre - febrero. Los autores [3], [4] han determinado un régimen entre mono y bimodal para los páramos de la cordillera occidental de la cuenca del río Paute, sub cuencas de los ríos Tomebamba y Machángara, en donde se tiene la presencia de un segundo período relativamente seco en diciembre y enero. Los resultados obtenidos son contradictorios a los de los estudios mencionados, especialmente en lo referente a una etapa menos húmeda entre diciembre y febrero. No obstante, en la misma investigación de [3] se menciona que la acción de las masas de aire de ambos océanos, en combinación con una topografía con fuertes cambios de pendiente y altitud, pueden generar grandes variaciones de los patrones de precipitación a nivel local. Éste sería el motivo para las diferencias encontradas con respecto a los otros estudios.

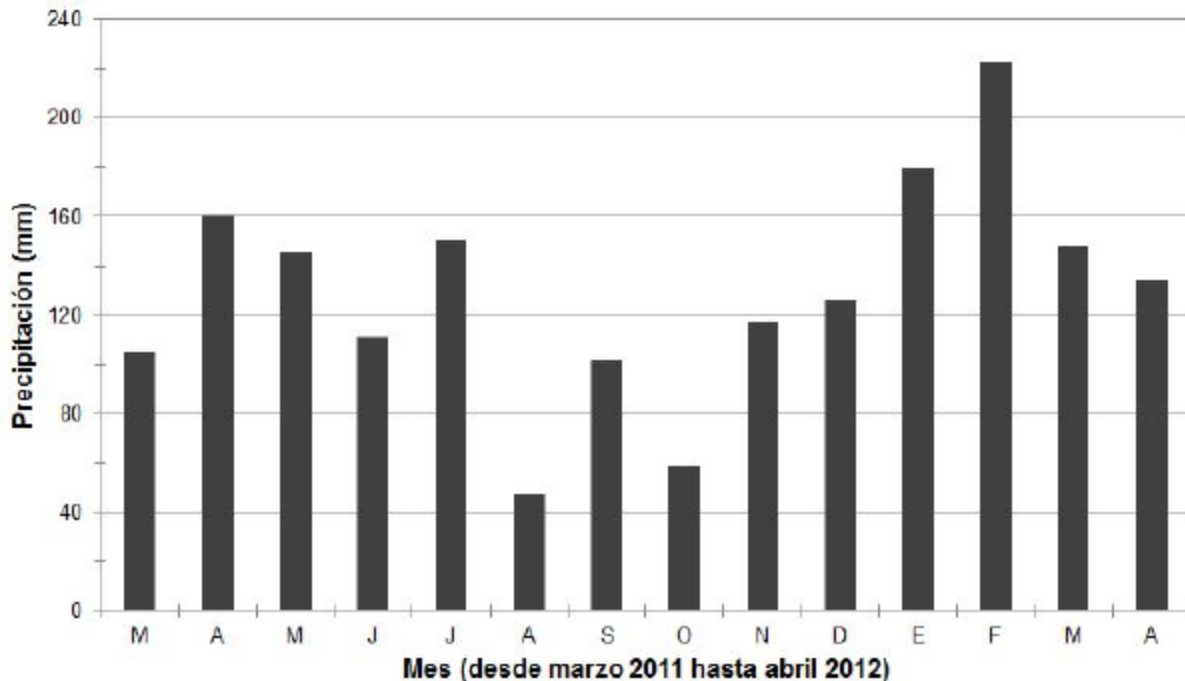


Figura 4.4.1: Precipitación mensual correspondiente al pluviógrafo Texas1

4.4.2 Variabilidad diaria

Para el análisis de la distribución de los datos diarios de lluvia en el tiempo, suele ser necesario separar los días secos de los días con lluvia. Sin embargo, para el caso del páramo es posible no hacer dicha separación debido a que el porcentaje de días secos no es tan alto [3]. En el presente trabajo no se tiene como finalidad determinar estadísticamente la distribución que mejor se ajusta a los datos obtenidos, sino brindar información sobre la probabilidad de excedencia de cualquier umbral en la cantidad de precipitación (ver Fig. 4.4.2). Para la gráfica se utilizó un año de datos, por lo que no se incluyó la información de los meses de marzo y abril de 2012. Al comparar los resultados con los correspondientes a otra cuenca de páramo (Chirimachay) analizada por [4], se observan resultados prácticamente idénticos para el número de días en los que se supera los 5 o los 10 mm. La forma de la gráfica sugiere que una distribución exponencial representaría adecuadamente la distribución de los datos de precipitación diaria, lo cual también fue determinado por [3].

Al determinar la autocorrelación entre los valores de la serie de tiempo se determina que la persistencia es casi inexistente. Para un lapso de desfase de 1 día se tiene un coeficiente de correlación (R) de 0.23. Para 2 días el valor de R es prácticamente 0.1, que corresponde además al límite para que la correlación tenga significancia estadística con un 95% de confianza. Otro estudio había determinado un lapso de desfase de 3 días con una correlación estadísticamente significativa [3]. El resultado nos indica que si hoy llueve cierta cantidad, la probabilidad de que en los siguientes días también llueva de manera similar es prácticamente la misma de que esto no



suceda. Esta situación vuelve difícil el pronóstico del tiempo para los páramos, en lo referente a la cantidad de lluvia diaria.

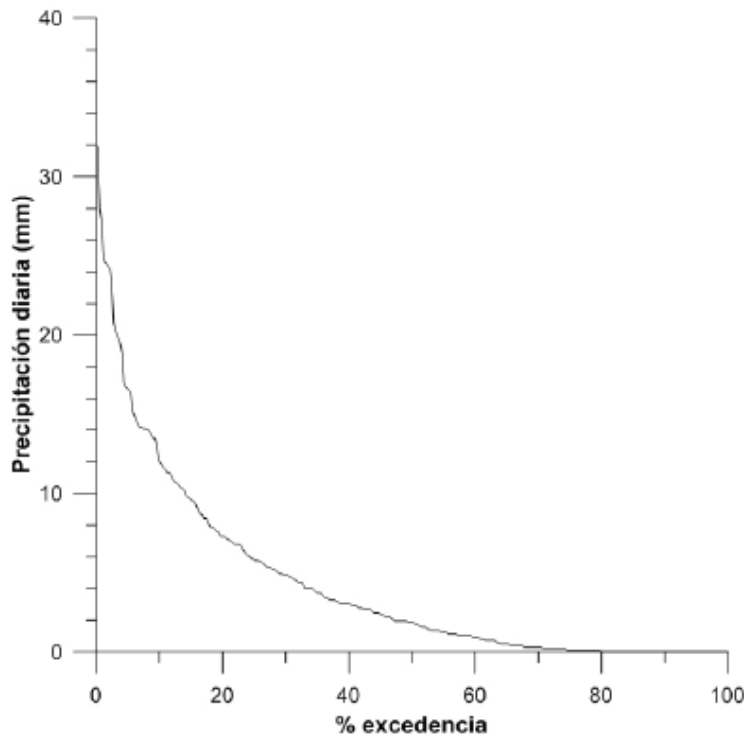


Figura 4.4.2: Porcentaje de excedencia de precipitación diaria. Datos del Texas1, marzo 2011 - febrero 2012.

Días secos

Si no se indica lo contrario, en este estudio un día seco es aquél con 0 mm de precipitación o sin registro por parte de los sensores. Los resultados evidencian que el porcentaje de días secos en el año es bajo, por ende la mayor parte del tiempo se tiene lluvia en el páramo. No obstante, dicho porcentaje varía considerablemente si se considera como día seco a aquél en el que no hubo lluvia o al día con menos de 1 mm de precipitación. En la Tabla 4.4.1 se muestra la cantidad de días secos ocurridos en el lapso de 12 meses (marzo 2011 - febrero 2012). Se incluye también en la tabla los resultados obtenidos para el disdrómetro. En los períodos con vacíos de datos para el disdrómetro (ver Fig. 2.4.1) se utiliza la misma información del Texas1. La excelente resolución con la que cuenta el disdrómetro permite identificar precipitación en días para los cuales el Texas1 no lo hace, por esta razón el porcentaje de días secos baja hasta aproximadamente 13% en el año de acuerdo con los datos del disdrómetro. Para los umbrales de 0.5 y 1 mm las diferencias entre el número de días secos determinados con el Texas1 o el disdrómetro son casi inexistentes. Con la utilización de pluviógrafos de balancín de resolución 0.2 mm, el estudio de [3] encontró aproximadamente un 20% de días secos (0 mm), similar a lo obtenido con el Texas1. Otro caso en el páramo [4] reporta un 35% de días secos, pero esta estación (Chirimachay) se ubica a 3300 m.s.n.m. y la precipitación es medida con un pluviómetro manual, razones que pueden haber sido la causa del incremento. La



utilización del disdrómetro en este estudio ha permitido comprobar que la cantidad de días sin lluvia en el páramo es muy baja e incluso menor a lo que se creía. Esta es una característica muy importante y propia de estos tipos de ecosistemas, la misma que tiene mucho que ver en los servicios ambientales que provee.

Tabla 4.4.1: Cantidad de días secos en el año (marzo 2011 - febrero 2012)

Umbral	Texas1		Disdrómetro	
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
0 mm	74	20.2 %	46	12.6 %
< 0.5 mm	127	34.7 %	122	33.3 %
< 1 mm	149	40.7 %	148	40.4 %

Además del número de días secos, es de interés conocer cómo están distribuidos, ya que no tiene las mismas implicaciones sobre la hidrología y el ecosistema un total de 30 días secos bien distribuidos a lo largo del año que una sequía de 30 días consecutivos. A continuación se describen algunos datos de interés respecto de las sequías.

- Los datos de los sensores muestran un total de 11 (7) ocasiones en las que se han registrado días secos consecutivos a lo largo de marzo 2011 - abril 2012, y de las cuáles solo en 4 (3) el número de días fue mayor a 3. Los datos entre paréntesis corresponden al disdrómetro. Para el páramo de Chirimachay se han obtenido resultados similares [4].
- El período más extenso es de 13 días secos y sucedió del 10 al 22 de octubre. Si se toma como umbral 0.5 mm o 1 mm, el período se amplía a 18 días entre el 9 y el 26 de octubre. Esta información se cumple tanto para los datos del Texas1 como del disdrómetro.
- En marzo 2011 se tiene un período de 10 días secos consecutivos para el Texas1, pero para el cual el disdrómetro registra solo 4 días y 2 de los cuales son consecutivos. En los días sobrantes el disdrómetro registra por lo común menos de 0.1 mm de precipitación, probablemente correspondiente a neblina. Esta situación ayuda a minimizar los efectos de una sequía marcada.
- Los meses con mayor número de días secos son de mayo a noviembre. Agosto y octubre alcanzaron cada uno 23 días sin precipitaciones superiores a 1 mm.
- Entre diciembre 2011 - abril 2012 se registraron apenas 5 días secos para el Texas1, de los cuales 4 fueron en abril y 1 en diciembre. Del 4 de diciembre al 9 de abril no se registró ningún día seco. Esto no quiere decir, que no puedan



producirse una especie de mini veranillos en estos meses, como por ejemplo el de marzo 2011, lo cual resalta nuevamente la gran variabilidad del clima.

- Entre mayo y noviembre 2011 se tiene que en promedio dos períodos de días secos (así sean de 1 día) están separados por 6 días con lluvia.

4.4.3 Variabilidad subdiaria

Al analizar los datos de precipitación horarios, se identifica claramente que la mayor parte de la precipitación se produce durante horas de la tarde (ver Fig. 4.4.3). La hora indicada en la gráfica representa la lluvia de los 60 minutos previos; por ejemplo, la hora 14 corresponde al total de lluvia ocurrido entre las 13:00 y las 14:00. Un 47% del total de la lluvia sucede entre las 13:00 - 19:00. Por otra parte apenas el 7% corresponde al intervalo de 07:00 - 11:00. Los resultados son muy similares a los de [3]. La alta variación de la temperatura durante el día contribuye a este comportamiento de la precipitación. Es común que en la mañana esté soleado y la radiación caliente el ambiente (aproximadamente en el 70% de los días del año el Texas1 no registra precipitación entre las 07:00 y las 11:00), lo cual provoca un proceso de convección que junto al efecto orográfico generan que para la tarde el cielo se nuble y llueva (referencias de [3]).

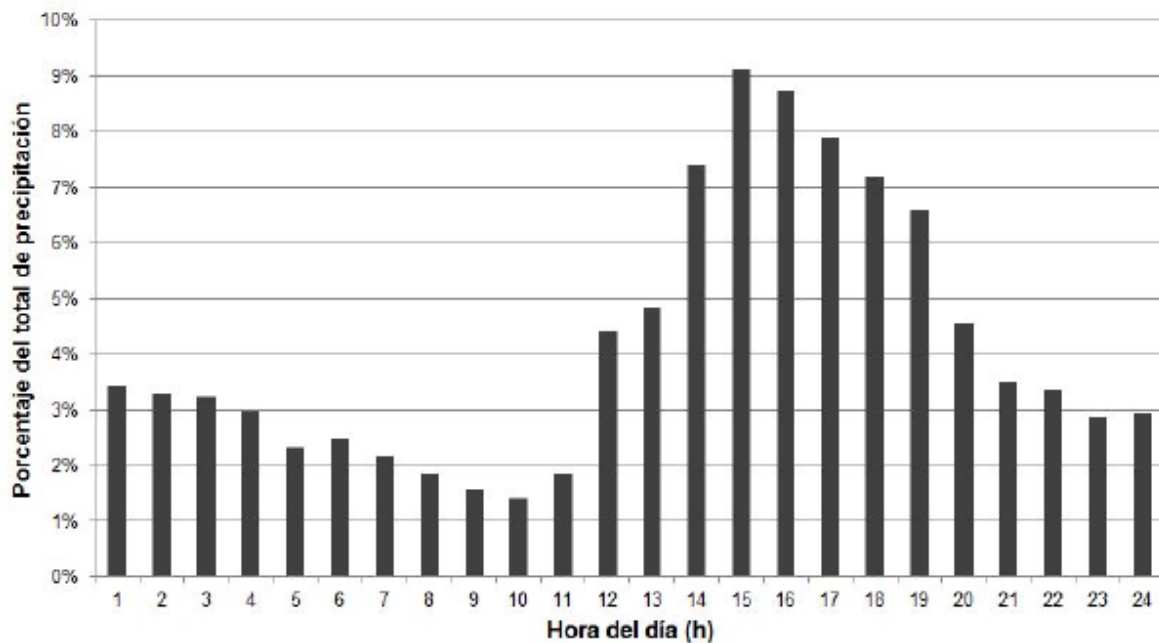


Figura 4.4.3: Porcentaje de la precipitación total correspondiente a cada hora del día para datos del Texas1

En la Figura 4.4.4 se muestra cómo varía mes a mes el patrón de precipitación subdiario. La escala de colores de la gráfica representa el porcentaje de la precipitación mensual que corresponde a la cantidad de lluvia registrada durante todos los días del mes para una hora determinada. Este es un tema que no se ha analizado en ningún



otro estudio. Los resultados son llamativos, se observa que el patrón de la Fig. 4.4.3 no es constante a lo largo de todo el año. Se tiene las siguientes características destacadas: (i) Para el período mayo-agosto, pero especialmente en junio, el porcentaje de lluvia en horas de la tarde es bastante menor en comparación a los demás meses del año. Además, en esta época del año se tiene un mayor porcentaje de precipitación en horas de la madrugada. (ii) Entre enero y abril es muy poca la lluvia de 0:00-11:00. (iii) Los porcentajes en el lapso septiembre - abril son los que sustentan el patrón general de mayor cantidad de lluvia por las tardes.

No se puede explicar con certeza el proceso que ocasiona el comportamiento descrito en (i) en el párrafo previo. No obstante, lo indicado sobre la generación de mayor lluvia por la tarde debido a la convección y el efecto orográfico, ya no resulta satisfactorio para este caso. Menores temperaturas durante la noche y velocidades de viento mayores entre mayo y agosto, pueden ser factores relacionados con el distinto patrón de precipitación subdiaria para dichos meses. La existencia de estos 2 patrones de precipitación diferentes en el año podría sugerir la entrada de humedad de 2 fuentes distintas (Pacífico y Atlántico/Amazonas).

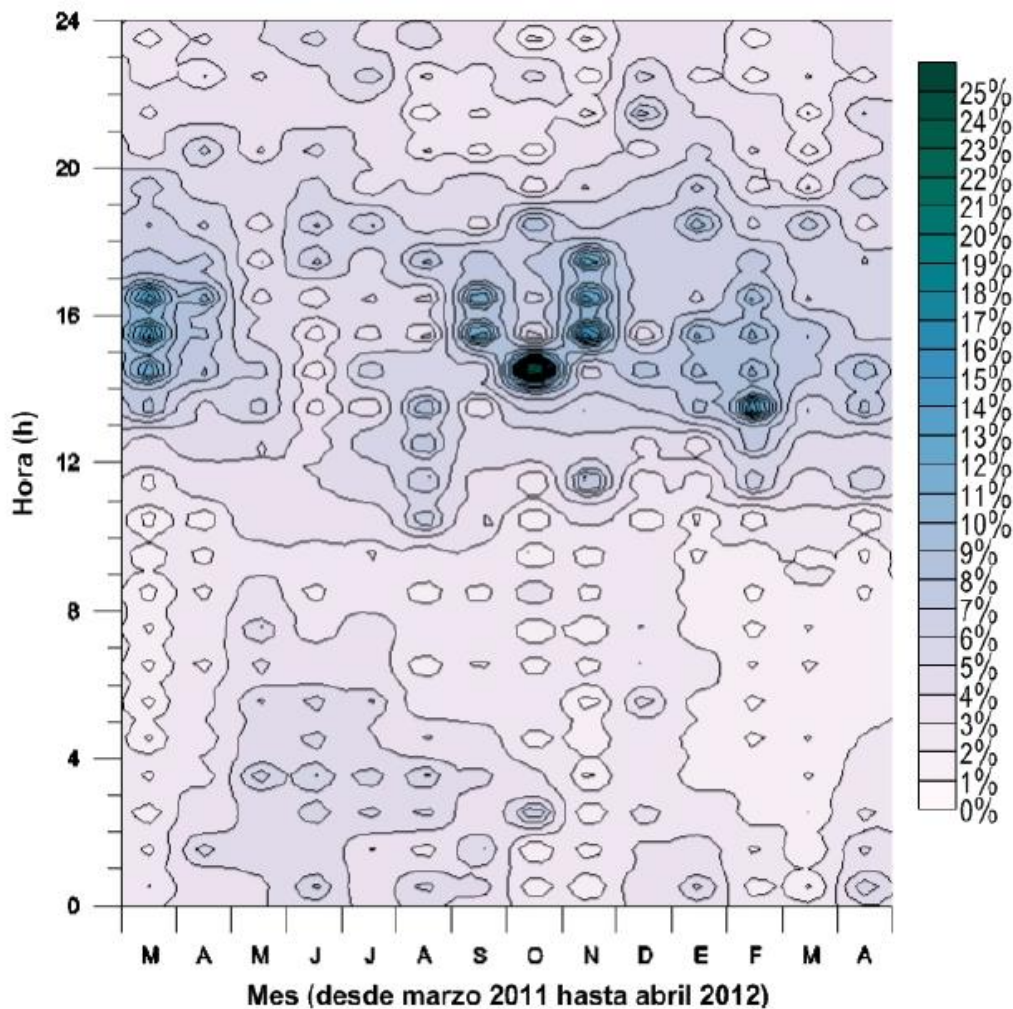


Figura 4.4.4: Porcentaje de la precipitación mensual correspondiente a cada hora del día para datos del Texas1



Intensidades y duración

Todos los análisis, dentro de este punto, en los que se utilice la intensidad se refieren a valores de intensidad promedio para una escala temporal de 30 minutos, si es que no se especifica lo contrario. El total de datos de intensidad utilizados no abarca toda la lluvia que se tuvo durante el período de análisis. Esto se debe a que se utilizaron solo los datos de intensidad que cumplan con las consideraciones indicadas en la sección 4.3. Además, para el Texas1 al utilizar intervalos no traslapados (sección 4.2) la cantidad de datos disminuye. No obstante, se tiene que los datos utilizados para la escala temporal de 30 min abarcan un 65% (Texas1) y 80% (disdrómetro) de la precipitación total ocurrida para el período de análisis. Por lo tanto los resultados obtenidos con estos datos de intensidad representan una adecuada estimación de la realidad. Es importante tener presente que de acuerdo con los métodos empleados, la información del Texas1 seguramente cuenta con un porcentaje de datos de intensidades bajas (≤ 1 o 2 mm/h) menor al real.

En la sección 3.3.2 del capítulo anterior, se presentó la distribución de los valores de intensidad promedio medidos por el Texas1 para una escala de agregación de 5 minutos (ver Fig. 3.3.1). Según estos datos la lluvia en el páramo sucede generalmente con intensidades bajas, menores a 4 mm/h en un 90% de los casos. Con la escala temporal de 30 minutos se obtiene una intensidad promedio de 1.5 mm/h y 0.76 mm/h para el Texas1 y el disdrómetro, respectivamente. Esta diferencia se produce porque el disdrómetro tiene un mayor número de registros para intensidades muy bajas, debido a su resolución y a que para el Texas1 no se calcularon las intensidades para los grupos aislados de 1 o 2 tips, que se cree son debidos a lluvias de baja intensidad por las características del páramo. Este resultado evidencia que el porcentaje de datos con intensidades bajas es incluso mayor a lo presentado en la Fig. 3.3.1.

Las intensidades máximas, en conjunto con su duración, resultan de gran interés para el estudio de crecidas e inundaciones (ver Fig. 4.4.5). Los resultados obtenidos son muy similares a los de otra cuenca de páramo analizada por [7], quien además muestra que las intensidades (para una misma duración) son mucho menores en comparación a otras zonas cercanas pero de menor altitud y que no son páramo.

La intensidad no presenta una variación mensual considerable. Sin embargo, en la Figura 4.4.6 es posible identificar ciertas características importantes. (i) El período mayo-agosto en general tiene menores intensidades que para los demás meses, aunque en marzo de 2012 y diciembre de 2011 se tiene intensidades similares. La intensidad promedio para una duración de 30 min para estos meses es de 1.1 mm/h. (ii) Octubre es el mes con la mayor intensidad promedio, aunque febrero, marzo (2011) y noviembre también son meses con intensidades relativamente altas (comparado con los demás meses). Esto resulta interesante ya que la precipitación total de octubre es muy baja en relación a la de los otros meses mencionados, lo que permite inferir que durante este mes son muy escasos los eventos de precipitación, pero cuando ocurren se trata de eventos con intensidades relativamente altas.

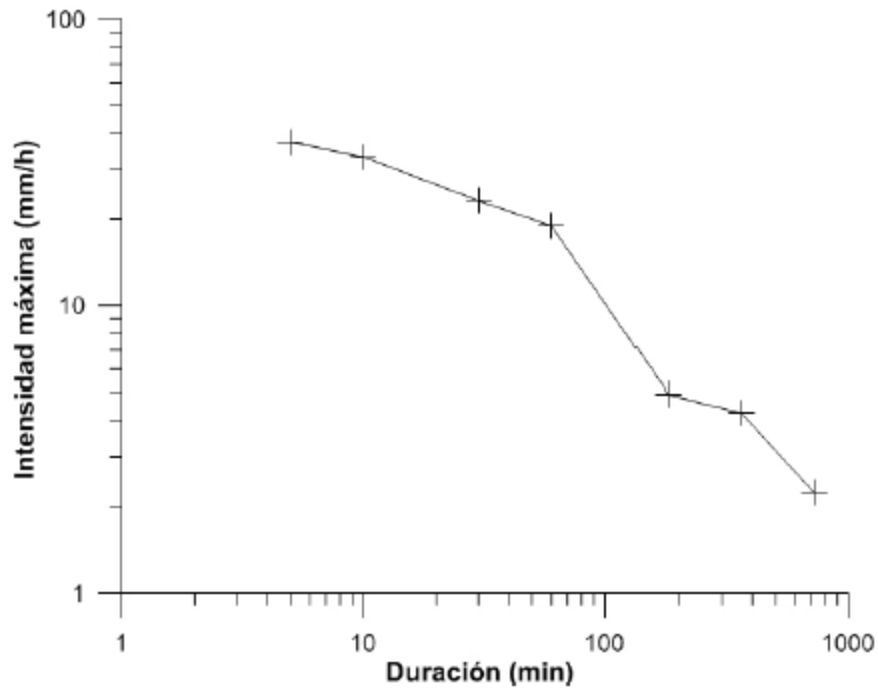


Figura 4.4.5: Intensidad máxima vs duración para datos del Texas1

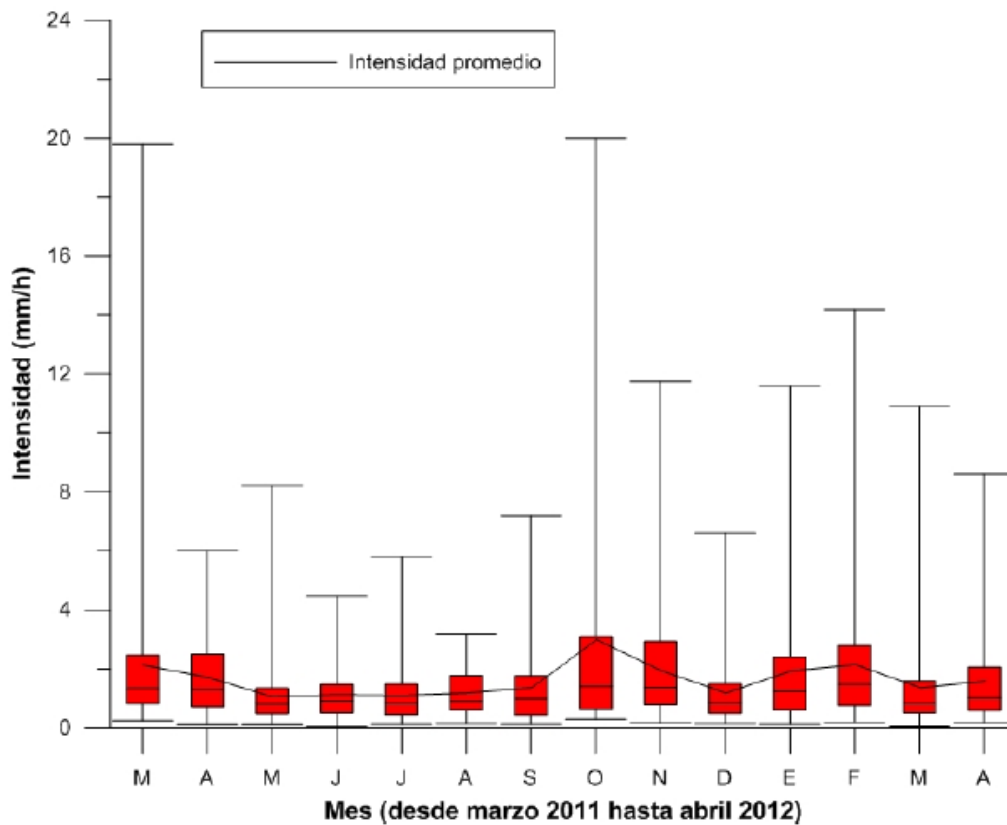


Figura 4.4.6: Distribución de los datos de intensidad del Texas1 para una duración de 30 min correspondientes a cada mes



La variabilidad subdiaria de la intensidad, tiene un comportamiento muy similar al del acumulado de precipitación. Es decir, las intensidades son mayores en horas de la tarde, disminuyen durante la noche y los menores valores suceden en la mañana. En el Apéndice D se presenta una gráfica con esta información.

En el análisis de la variabilidad subdiaria se identificó que los porcentajes de precipitación entre mayo - agosto tienen un comportamiento distinto al resto de meses, y que las discrepancias son en horas de la tarde y la madrugada. Por este motivo, se analiza la distribución de las intensidades correspondientes a estos períodos en la Figura 4.4.7. La similitud entre las intensidades en horas de la madrugada para ambos períodos del año indica que seguramente el proceso de generación de la lluvia es el mismo para ambos casos. Para las horas de la tarde la diferencia es notoria entre las épocas del año. Incluso para el período mayo - agosto el comportamiento de las intensidades en las horas de la tarde es bastante parecido al de la madrugada, lo que sugiere el mismo mecanismo de generación de la lluvia para la mayoría de los casos. Una posible explicación de este mecanismo de generación de la lluvia, considerando que sucede principalmente en horas de la madrugada y en épocas de vientos fuertes, es el siguiente: Durante la noche las bajas temperaturas provocan la condensación de pequeñas partículas de agua, que ante la acción del viento se convierten en una llovizna de carácter advectivo.

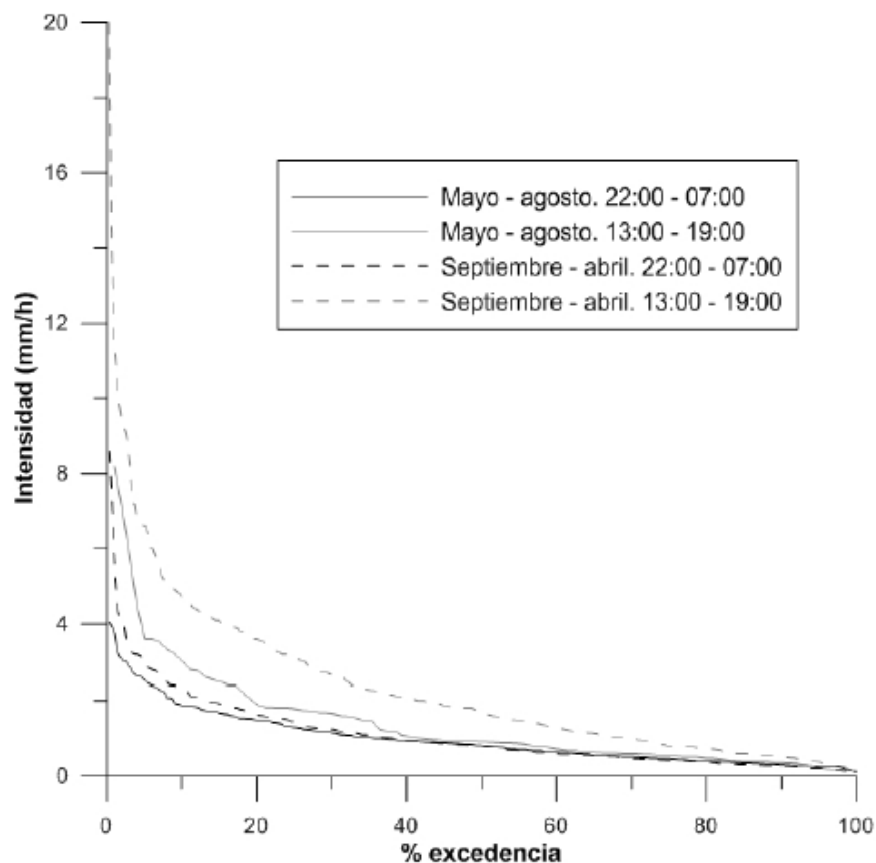


Figura 4.4.7: Porcentaje de excedencia de intensidades del Texas1 para períodos de interés



La duración de los eventos de lluvia es otro punto de interés. Para los 14 meses de datos se obtuvo una duración promedio de 85 minutos y una máxima de 753 minutos. Los promedios mensuales son bastante similares entre ellos para la mayoría de los casos (alrededor de 80 minutos). No obstante, se tiene dos puntos destacados: (i) Los eventos de mayo y junio tienen una duración promedio aproximada de 130 y 150 minutos, respectivamente. A pesar de que para estos meses se tienen valores extremos, las duraciones promedio largas se basan en un número considerable de eventos de más de 2 horas. (ii) Octubre está bastante por debajo que los demás meses, con eventos de una duración promedio de 46 minutos y su máximo de 165 minutos es el menor entre los demás máximos mensuales. Recordemos que octubre es un mes con un número escaso de eventos de altas intensidades, por lo tanto se nota que para estas condiciones la duración de los eventos es menor. En caso de flexibilizar la definición de evento, los valores máximos de duración se incrementan notablemente. Por ejemplo, si tomamos los datos del disdrómetro y no consideramos un par de pausas de 30 minutos sin lluvia para un evento a fines de mayo y otro en la primera semana de julio, se alcanzan duraciones de 65 y 57 horas respectivamente. Estos valores están muy por encima de los 753 minutos (12.5 horas), indicado como el evento de máxima duración al inicio del párrafo.

Llovizna

Se ha decidido abordar lo relacionado a la llovizna cómo un punto separado del análisis de intensidades, debido a su importancia dentro de la precipitación en el páramo. El presente estudio tiene una elevada relevancia, ya que es el primero que busca establecer qué tan frecuente es la llovizna en el páramo y su importancia cómo fuente de ingreso de agua. Se recuerda que el criterio empleado para clasificar la precipitación como llovizna, solamente incluye el límite de intensidad de 1 mm/h. Se utiliza los datos de intensidad del Texas1 y del disdrómetro para una duración de 30 minutos. En la Tabla 4.4.2 se resume la información sobre llovizna correspondiente a 1 año de datos (marzo 2011 - febrero 2012). Además se incluye información con respecto a la precipitación para otros umbrales de intensidades bajas. El *número de datos* indicado en la tabla hace referencia a la cantidad de intervalos de 30 min con información de intensidad de los que se dispone (ver sección 4.2).

El análisis demuestra que el aporte de la llovizna es considerable e importante en la cantidad total de precipitación en el páramo. Si tenemos en cuenta que la precipitación anual se estimó en 1600 mm (recordemos que el cálculo de intensidades disminuye la cantidad de datos disponibles para la Tabla 4.4.2), utilizando los porcentajes de precipitación correspondientes a llovizna, se tiene que la llovizna aporta con 300 mm al año según el Texas1, y con aproximadamente 400 mm de acuerdo con el disdrómetro. Se considera que los datos del disdrómetro son una estimación más cercana a la realidad, debido a que el sensor tiene un mejor desempeño que el Texas1 para intensidades bajas y a lo discutido en la sección de métodos sobre la menor representación de dicho rango de intensidades en los datos del Texas1. Se recuerda que el disdrómetro subestima la cantidad de precipitación debido a lecturas de nieve, especialmente cuando se tiene llovizna. Por lo tanto el ingreso de agua en forma de



llovizna es incluso probablemente superior al 25% del total de la precipitación. Aproximadamente un 80% de la diferencia entre la cantidad de llovizna medida por el disdrómetro y el Texas1 se justifica por las diferencias para intensidades ≤ 0.5 mm/h. Si tomamos como referencia los datos del disdrómetro en lugar de los del Texas1, el porcentaje de los eventos de precipitación en el páramo que se producen con intensidades ≤ 1 mm/h alcanza hasta un 75%.

Tabla 4.4.2: Cantidad de datos y precipitación (mm) correspondientes a llovizna

	Texas 1		Disdrómetro	
Número total de datos	1332		3427	
Número de datos de llovizna (≤ 1 mm/h)	665	49.9 %	2650	77.3 %
Número de datos para intensidad ≤ 0.5 mm/h	282	21.2 %	2178	63.6 %
Número de datos para intensidad ≤ 2 mm/h	1039	78.0 %	3066	89.5 %
Precipitación total para los datos utilizados	1000.7		1315.10	
Precipitación por llovizna (≤ 1 mm/h)	188.7	18.9 %	331.46	25.2 %
Precipitación para intensidad ≤ 0.5 mm/h	47.1	4.7 %	158.84	12.1 %
Precipitación para intensidad ≤ 2 mm/h	457.6	45.7 %	625.95	47.6 %

En el punto anterior se analizó la variabilidad mensual y subdiaria de las intensidades, dentro de lo cual se discutió el comportamiento de los datos de baja intensidad, que corresponden a la llovizna. De acuerdo con esto, la ocurrencia de llovizna es mayor para los meses entre mayo y agosto, y durante horas de la madrugada generalmente. Se analizó para cada mes el porcentaje de la cantidad de precipitación correspondiente a llovizna, encontrándose los siguientes puntos destacados: (i) En el período mayo - agosto un tercio de la precipitación se da en forma de llovizna. (ii) Con excepción de los meses del punto anterior, solo en diciembre se alcanza la cifra del 30%. (iii) Octubre, enero y febrero son los meses con menor aporte de la llovizna con respecto al total de la precipitación mensual, en promedio un 10% para los datos del Texas1, aunque para la disdrómetro en ningún caso es menor a 20%.

4.5 Conclusiones

En el presente estudio se analizó la variabilidad temporal de la precipitación en un ecosistema de páramo, a partir de mediciones puntuales de un pluviógrafo de balancín y un disdrómetro laser en la parte alta de la micro cuenca del río Zhurucay. Los estudios previos del tema ([3], [4], [42]) se desarrollaron a mayor escala (cuenca del río Paute), con equipos de menor precisión y con series de tiempo de lluvia diaria en el mejor de los casos. La base de datos empleada en este caso es de mejor calidad y mayor detalle. Por lo tanto, los resultados de esta investigación aportan de gran manera al conocimiento de la precipitación en el páramo. Además debido a su detalle



constituyen información valiosa a ser utilizada en estudios enfocados a esclarecer aspectos del funcionamiento del ecosistema y sus procesos.

La estacionalidad mensual es baja, solo agosto y octubre tienen valores de precipitación por debajo de los 100 mm. Además, según los datos del Texas1 el 60% de los días del año registran más de 1 mm de lluvia. Estas características de la precipitación tienen mucho que ver para que el páramo sea considerado como un proveedor confiable de una cantidad considerable de agua a lo largo de todo el año. Para la zona de estudio se determinó que el régimen de precipitación parece ser unimodal y no presenta un período seco entre diciembre y febrero, a diferencia de lo determinado por [3], [4] para los páramos de los Andes occidentales del sur del Ecuador. Este resultado puede tratarse de un régimen a nivel local debido al efecto topográfico y a la acción de las distintas corrientes de aire [3], pero puede deberse también a que la zona de estudio se encuentra muy próxima a la divisoria continental. Se recuerda que el área de estudio es la cabecera de las cuencas hidrográficas de los ríos Rircay, Tarqui y Yanuncay, los mismos que son muy importantes para el austro ecuatoriano. Por lo tanto este nuevo conocimiento sobre el régimen de precipitación es fundamental para la Secretaría Nacional del Agua, encargada de otorgar las adjudicaciones para el uso del agua.

Los caudales pico son relativamente bajos para los ecosistemas de páramo, debido especialmente a la excelente capacidad reguladora de sus suelos [1]. El que no se tengan caudales pico exageradamente elevados es fundamental para disminuir el riesgo de inundaciones y daños de estructuras aguas abajo. Los resultados del presente estudio muestran que las características de la precipitación también tienen mucho que ver en la ausencia de caudales muy altos. La máxima precipitación diaria registrada es de 32 mm y en menos de 15 días al año se supera los 20 mm. Además mediante la autocorrelación no se identificó ninguna tendencia a que se produzcan varios días consecutivos con precipitaciones altas. La intensidad máxima registrada para una duración de 1 hora fue de aproximadamente 20 mm/h, mientras que para 3 horas disminuyó a 5 mm/h. Es importante mencionar que estas características parecen ser comunes para todos los páramos del sur del país, ya que [3], [4], [7] encontraron resultados muy similares.

En base a los análisis realizados pareciera ser que existen dos procesos de generación de la precipitación en el páramo: (i) En las mañanas la radiación calienta el ambiente provocando un fenómeno de convección, que sumado al efecto orográfico, generan lluvias durante la tarde y (ii) Las bajas temperaturas de la noche provocan la condensación de pequeñas gotas de agua, las mismas que se convierten en una llovizna de carácter advectivo ante la acción del viento. Solamente un estudio a fondo de los procesos de generación de la lluvia permitirá validar o refutar la hipótesis planteada. Las lluvias generadas según (i), son de mayor intensidad y suceden generalmente entre las 13:00 y 19:00. Mientras tanto las precipitaciones según (ii) se dan principalmente en la madrugada, en más del 90% de los casos de lluvia de 22:00-07:00 la intensidad es ≤ 2 mm/h. Durante el período septiembre - abril la mayor parte de la precipitación sucede en horas de la tarde, lo que indica que las lluvias del tipo (i) se



producen comúnmente. Para el período mayo - agosto las lluvias del tipo (i) son menos frecuentes, mientras que las del tipo (ii) representan un mayor porcentaje. Estos resultados nos indican que, a pesar de que la estacionalidad mensual es baja, se tienen épocas del año para las cuales la intensidad promedio y la hora del día a la que llueve son diferentes. Este fenómeno puede estar relacionado con el ingreso de humedad desde la Costa durante una época del año y desde la Amazonía en otra. Los resultados de la variabilidad subdiaria brindan nueva información sobre las características de la precipitación en el páramo, la misma que tiene como finalidad aportar a un mejor entendimiento del funcionamiento del ecosistema y su respuesta hidrológica.

La utilización del disdrómetro en el presente estudio permitió obtener una mejor comprensión de la realidad sobre los días secos y la importancia de la llovizna en el páramo. Estudios anteriores han reportado más del 20% de días secos al año en el páramo [3], [4]. Para el Texas1 se obtuvo una cifra similar, pero con el disdrómetro se determina apenas un 12.5% de días secos al año. Esta situación no incrementa exageradamente la cantidad de precipitación, lo que se evidencia al tener un 40% de días en el año con una precipitación < 1 mm. Sin embargo, el que se registre precipitación en 7 de cada 8 días y que el lapso más extenso de días secos no supere las dos semanas, tiene una gran importancia en la ecología e hidrología del páramo. Al considerar los datos del disdrómetro en lugar de los del pluviógrafo de balancín, se tiene que el porcentaje del total de registros de precipitación que corresponde a llovizna (intensidad ≤ 1 mm/h) es de aproximadamente 80% en lugar de 50%. Para los datos del disdrómetro se cuantifica que la llovizna aporta un 25% del total de la precipitación anual. El valor real seguramente será un poco mayor, debido a la subestimación del total de lluvia por parte del disdrómetro a causa de las lecturas de nieve explicadas en los capítulos anteriores. Si se considera la cantidad total de agua proveniente de los páramos, el 25% que corresponde a la llovizna es un aporte muy importante.

Actualmente el disdrómetro se encuentra almacenando datos cada 5 minutos y en su información se incluye intensidades, tipo de precipitación y el espectro de la lluvia. Estos datos permitirán obtener resultados nuevos y de mayor precisión sobre la variabilidad temporal de la precipitación, por ejemplo, la variabilidad temporal de la distribución del tamaño de gotas. Se recomienda el desarrollo de nuevos estudios de precipitación con la información del disdrómetro. Finalmente, se destaca la necesidad de realizar estudios complementarios en el páramo sobre otros procesos hidrológicos que permitan alcanzar un mejor entendimiento de cómo funcionan estos ecosistemas.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El páramo es un ecosistema de alta montaña que resulta de vital importancia para los pueblos Andinos, porque constituye prácticamente la única fuente para agua de consumo. A pesar de su importancia, son pocos los estudios que se han llevado a cabo y todavía existe un vacío en el conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en estos ecosistemas. Teniendo en cuenta que la precipitación es el principal componente generador de procesos hidrológicos, y de que hay muy pocos estudios técnicos sobre la manera en la que ocurre, se planteó estudiar la estructura de la lluvia del páramo en la presente tesis.

El páramo de la parte alta de la micro cuenca del río Zhurucay (Azuay - Ecuador) se utilizó como caso de estudio, y se trabajó con información de 4 pluviógrafos de balancín (de distinta precisión y resolución) y 1 disdrómetro laser. El primer paso consistió en el control de calidad de los datos. Luego se realizó una evaluación del desempeño de los distintos sensores de precipitación empleados para las condiciones de lluvia del páramo. Finalmente se estudió la variabilidad temporal de la lluvia con mucho más detalle en comparación con investigaciones previas.

El control de calidad realizado probó ser un aspecto fundamental para el éxito de la investigación. Los resultados obtenidos hubiesen contado una historia completamente diferente a la real de no haberse identificado y corregido ciertos problemas en las lecturas de los sensores. Las visitas de campo a los equipos y el otorgarles el mantenimiento adecuado permitieron la obtención de una base de datos de muy buenas características, lo cual es importante mencionar ya que no es una práctica común en nuestro medio. Así mismo, podría pensarse que los datos del disdrómetro no tienen errores debido a que es un equipo moderno y de tecnología de punta, sin embargo el estudio mostró la necesidad de un control de calidad también para este sensor. Se encontró que para la zona de estudio se tienen velocidades de caída de las partículas distintas a las de la calibración de fábrica del disdrómetro, lo que provocó para ciertos casos una subestimación de la precipitación al clasificarla incorrectamente como nieve. El haber contado con más de un sensor de precipitación en el mismo lugar fue de gran ayuda en la identificación de casos aislados de mal funcionamiento de los equipos, por lo que la utilización de dos sensores (pluviógrafos) por sitio resulta una práctica muy recomendable para el monitoreo de la precipitación, ya que además evita la pérdida de datos.

La comparación entre los equipos empleados para el estudio tuvo dos enfoques: (i) Entre equipos de una misma tecnología (pluviógrafos), pero de distinta precisión y resolución, y (ii) Entre equipos de distinta tecnología (pluviógrafo y disdrómetro). Se presentaron diferencias de hasta un 7% en la cantidad total de lluvia medida por pluviógrafos de distintas marcas durante los 14 meses. Las condiciones de baja intensidad de las lluvias del páramo contribuyen a dichas diferencias y una mayor evaporación en ciertos sensores aparece como la principal razón de estos resultados encontrados. El disdrómetro registró una mayor cantidad de precipitación total con respecto al pluviógrafo con las mejores características (5.6%). Esta diferencia se



sustenta principalmente en los volúmenes de lluvia que corresponden a intensidades bajas (≤ 5 mm/h). Para rangos de intensidades altas (> 5 mm/h) la bibliografía [24], [25] indica que las mediciones de los pluviógrafos son más confiables que las de los disdrómetros como el utilizado. De la comparación entre los equipos se concluyó que la cantidad real de precipitación para todo el período de datos es aproximadamente un 5% superior a la registrada por el mejor de los pluviógrafos y un 11% mayor a la medida por los otros pluviógrafos de balancín. Este es un resultado importante que puede ser aplicable en otros estudios del páramo.

Los resultados del estudio mostraron que los pluviógrafos (incluso los de resolución 0.1 mm) no tienen la capacidad para medir con una precisión adecuada las intensidades típicas del páramo, especialmente para escalas temporales menores a 30 min. Se encontró que es muy común para estas escalas temporales que un pluviógrafo registre un tip en un intervalo de, por ejemplo, 5 min cuando otro pluviógrafo no lo hace para dicho intervalo, sino para el siguiente. Esta situación generó que el sesgo absoluto porcentual marque diferencias exorbitantes entre los sensores cuando en realidad las diferencias en la cantidad de precipitación medida fueron bastante menores. Mientras más pequeña es la escala temporal, mayor es el sesgo absoluto porcentual. Por ejemplo, en la comparación de dos pluviógrafos (Onset respecto al Texas1) la diferencia en la cantidad total de lluvia medida fue de 6.3%, mientras que el sesgo absoluto porcentual fue de 57%, 20% y 7.1% para escalas temporales de 5 min, horaria y diaria respectivamente. Por esta razón no se recomienda el uso de este índice estadístico en la comparación de equipos para medir la precipitación, si la escala temporal utilizada es menor a la diaria. Además, los modelos hidrológicos suelen operar con datos horarios y como se evidenció con el sesgo absoluto porcentual, la resolución de los pluviógrafos no permite un cálculo muy preciso de la cantidad de lluvia para dicha escala temporal, bajo las condiciones de precipitación del páramo. Por lo tanto, podrían presentarse problemas en la modelación. De ser posible, se recomienda el uso de sensores de mayor resolución (por ejemplo el disdrómetro) para estimar la precipitación horaria con una mayor precisión, o caso contrario debería considerarse la incertidumbre de los datos obtenidos con los pluviógrafos dentro del modelo hidrológico.

Dentro del estudio de la variabilidad temporal de la lluvia, se analizó la variación en el año de los patrones subdiarios de cantidad de precipitación e intensidades, así como del aporte de la llovizna como fuente de ingreso de agua, entre otros puntos. No se encontraron estudios previos en ecosistemas de páramo que analicen dichos temas. Además, la utilización por primera vez de un disdrómetro en el páramo brindó nueva información sobre los días secos y la importancia de la llovizna. Las conclusiones más relevantes del estudio son: (i) El régimen de precipitación de la zona estudiada parece ser unimodal con la temporada más lluviosa en enero y febrero (se requiere de varios años de datos para llegar a una conclusión definitiva); no se distinguió en el patrón de lluvia mensual el ingreso de las dos fuentes de humedad (Pacífico y Atlántico/Amazonas) a las que se les atribuye la bimodalidad determinada para los páramos de la parte occidental de la cordillera en el sur del Ecuador [3], [4], (ii) El porcentaje de días secos en el año alcanzó apenas el 12.5%, el máximo número de



días secos consecutivos fue de 12 y sólo en 3 ocasiones se tuvo lapsos de más de 3 días secos consecutivos, (iii) Se identificaron dos épocas en el año (mayo-agosto y septiembre-abril) para las cuales la intensidad promedio y la hora del día a la que llueve son diferentes, lo que podría estar relacionado con distintos procesos de generación de la lluvia y/o con humedad proveniente desde la Costa y la Amazonía en épocas distintas del año, y (iv) La llovizna representó aproximadamente el 80% de los registros de precipitación y en el año aportó con un 25% de la cantidad total de agua que ingresó al ecosistema.

Los resultados de la tesis representan un valioso aporte al conocimiento científico de los ecosistemas de páramo. Es de gran importancia destacar que nunca antes se ha utilizado y evaluado el funcionamiento de un disdrómetro en el páramo. De igual manera, cabe recalcar que la presente investigación constituye la primera vez que para el páramo se estudia y documenta la variación mes a mes de: (i) Los patrones subdiarios de precipitación e intensidades, y (ii) La cuantificación de la ocurrencia de la llovizna y su aporte como fuente de ingreso de agua. De esta manera se ha contribuido en la búsqueda de información que permita un mejor entendimiento de la hidrología de los páramos y en consecuencia un manejo apropiado de los servicios ambientales que estos ecosistemas proporcionan, cuya importancia es invaluable para las poblaciones andinas.

5.1 Investigaciones futuras

La tesis abordó muchos aspectos de la estructura de la lluvia del páramo. No obstante, aún queda mucho por investigar sobre la precipitación en estos ecosistemas. En la actualidad se cuenta con 7 meses de datos del disdrómetro correspondientes al espectro de la lluvia y a las intensidades de precipitación en el páramo para una escala temporal de 5 min, lo que permitirá la realización de estudios que tengan como finalidad alcanzar un mejor entendimiento de las propiedades fundamentales de la lluvia. Se cree que son necesarios estudios en los siguientes temas para complementar lo investigado en la presente tesis.

- Comparación de las intensidades medidas por el disdrómetro y los pluviógrafos para escalas temporales de 5 y 10 minutos.
- Cuantificación de la frecuencia con la que ocurre la llovizna y su aporte como fuente de ingreso de agua, pero a partir de una definición de llovizna que incluya el tamaño de las partículas.
- Análisis de la variabilidad temporal del espectro de la lluvia, lo cual puede relacionarse a los procesos de generación de la precipitación.
- Identificación de entrada de humedad del Pacífico y del Atlántico/Amazonas hacia la zona de estudio, para lo cual las observaciones de isótopos en muestras de agua de lluvia puede ser muy útil.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Cuantificación de la subestimación de la cantidad de lluvia debido a los datos incorrectamente clasificados como nieve.
- Estimación del error inducido por efecto del viento a las lecturas de los sensores, tomando como referencia un pluviógrafo instalado a nivel del suelo.

Además de estudios complementarios, se requiere utilizar los resultados de esta investigación para llevar a cabo distintos análisis que involucren otros procesos hidrológicos aparte de la precipitación. Por ejemplo, deberían realizarse balances hídricos y análisis de incertidumbre en la modelación de la respuesta hidrológica de una cuenca de páramo.



REFERENCIAS

- [1] R. Célleri and J. Feyen, "The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives," *Mountain Research and Development Vol 29 No 4*, pp. 350-355, 2009.
- [2] S. G. C. Andina, Atlas de los Andes del Norte y Centro, 2009.
- [3] W. Buytaert, R. Celleri, P. Willems, B. De Bievre and G. Wyseure, "Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes," *Journal of Hydrology* 329, pp. 413-421, 2006.
- [4] R. Célleri, "Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin, Southern Ecuadorian Andes," *PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven*, 2007.
- [5] W. Buytaert, R. Célleri, B. De Bievre y F. Cisneros, «Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad,» 2006.
- [6] Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, «Captaciones de agua,» [En línea]. Available: <http://www.emaapq.gob.ec/>.
- [7] B. De Bievre, V. Iñiguez y W. Buytaert, «Hidrología del Páramo Andino: Importancia, propiedades y vulnerabilidad. Conocer para conservar.,» <http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/Hidroparamo.pdf>, 2006.
- [8] R. Rollenbeck, J. Bendix, P. Fabian, J. Boy, H. Dalitz, P. Emck, M. Oesker and W. Wilcke, "Comparison of Different Techniques for the Measurement of Precipitation in Tropical Montane Rain Forest Regions," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24, pp. 156-168, 2007.
- [9] P. Lazo y G. Mosquera, «Fraccionamiento y concentración de deuterio y oxígeno-18 en diferentes fuentes de agua que aportan a la cuenca del Río Zhuruca y,» *Universidad de Cuenca. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil.*, 2012.
- [10] V. Jaramillo, «Análisis y evaluación del régimen de escurrimiento superficial y su uso actual en la microcuenca del Río Zhuruca y. Cantones Girón, San Fernando - provincia del Azuay,» *Universidad Politécnica del Ejército*, 2011.
- [11] V. Iñiguez, P. Borja, P. Crespo y F. Cisneros, «Importancia de la hidropedología en la determinación de procesos hidrológicos a escala de ladera en zonas de



- páramo,» de *XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, Quito, 2008.
- [12] World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 2008.
- [13] E. Habib, W. F. Krajewski and A. Kruger, "Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements," *Journal of Hydrologic Engineering March/April*, pp. 159-166, 2001.
- [14] D. B. Michelson, "Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables," *Journal of Hydrology 290*, pp. 161-177, 2004.
- [15] J. E. Paturel, E. Servat and A. Vassiliadis, "Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model," *Journal of Hydrology 168*, pp. 111-125, 1995.
- [16] A. Tokay, D. B. Wolff, K. R. Wolff and P. Bashor, "Rain Gauge and Disdrometer Measurements during the Keys Area Microphysics Project (KAMP)," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 20*, pp. 1460-1477, 2003.
- [17] G. Upton and D. Brawn, "An investigation of factors affecting the accuracy of Thies disdrometers," in *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2008)*, 2008.
- [18] V. Vasvári, "Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area," *Atmospheric Research 77*, pp. 18-28, 2005.
- [19] S. J. Wood, D. A. Jones and R. J. Moore, "Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest," *Hydrology and Earth System Sciences 4(4)*, pp. 531-543, 2000.
- [20] W. F. Krajewski, A. Kruger and V. Nespor, "Experimental and numerical studies of small-scale rainfall measurements and variability," *Water Science and Technology*, vol. 37, pp. 131-138, 1998.
- [21] P. Willems, "Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 15*, pp. 132-152, 2001.
- [22] Thies, *Laser Precipitation Monitor: Instruction for use*. 5.4110.xx.x00.
- [23] I. R. Calder and C. H. Kidd, "A note on the dynamic calibration of tipping-bucket



- gauges," *Journal of Hydrology*, vol. 39, pp. 383-386, 1978.
- [24] R. P. d. M. Frasson, L. Kindl da Cunha and W. F. Krajewski, "Assessment of the Thies optical disdrometer performance," *Atmospheric Research* 101, pp. 237-255, 2011.
- [25] E. Lanzinger, M. Theel and H. Windolph, "Rainfall Amount and Intensity measured by the Thies Laser Precipitation Monitor," in *TECO-2006*, Geneva, Switzerland, 2006.
- [26] J. A. Nystuen, "Relative Performance of Automatic Rain Gauges under Different Rainfall Conditions," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16, pp. 1025-1043, 1999.
- [27] J. C. Alter, "Shielded Storage Precipitation Gages," *Monthly Weather Review* Vol 65 No 7, pp. 262-265, 1937.
- [28] C. E. Duchon and G. R. Essenberg, "Comparative rainfall observations from pit and aboveground rain gauges with and without wind shields," *Water Resources Research* Vol 37 No 12, pp. 3253-3263, 2001.
- [29] J. Jaffrain and A. Berne, "Experimental Quantification of the Sampling Uncertainty Associated with Measurements from PARSIVEL Disdrometers," *Journal of Hydrometeorology* 12, pp. 352-370, 2011.
- [30] W. F. Krajewski, A. Kruger, C. Caracciolo, P. Golé, L. Barthes, J.-D. Creutin, J.-Y. Delahaye, E. I. Nikolopoulos, F. Ogden and J.-P. Vinson, "DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basic results," *Advances in Water Resources* 29, p. 311–325, 2006.
- [31] M. Fernandez-Raga, C. Palencia, C. Tomas, A. I. Calvo, A. Castro and R. Fraile, "Rain research with disdrometers: a bibliometric review," *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 4, pp. 6041-6068, 2011.
- [32] A. Tokay and P. G. Bashor, "An Experimental Study of Small-Scale Variability of Raindrop Size Distribution," *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, pp. 2348-2365, 2010.
- [33] V. Nespor and B. Sevruk, "Estimation of Wind-Induced Error of Rainfall Gauge Measurements Using a Numerical Simulation," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16, pp. 450-464, 1999.



- [34] C. E. Duchon and C. J. Biddle, "Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events," *Advances in Geosciences* 25, pp. 11-15, 2010.
- [35] G. J. Ciach, "Local Random Errors in Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, pp. 752-759, 2003.
- [36] J. Wang, B. L. Fisher and D. B. Wolff, "Estimating Rain Rates from Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25, pp. 43-56, 2008.
- [37] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, New York: Cambridge University Press, 1992.
- [38] A. Tokay, P. G. Bashor and V. L. McDowell, "Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid-Atlantic Region," *Journal of Hydrometeorology* 11, pp. 553-565, 2010.
- [39] V. Nespor, W. F. Krajewski and A. Kruger, "Wind-Induced Error of Raindrop Size Distribution Measurement Using a Two-Dimensional Video Disdrometer," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17, pp. 1483-1492, 2000.
- [40] E. Habib, W. F. Krajewski, V. Nespor and A. Kruger, "Numerical simulation studies of rain gage data correction due to wind effect," *Journal of Geophysical research* Vol 104 No D16, pp. 19723-19733, 1999.
- [41] R. Céleri, «Capítulo 2,» de *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina*, 2010.
- [42] R. Céleri, P. Willems, W. Buytaert and J. Feyen, "Space-time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes.," *Hydrological Processes*, vol. 21, pp. 3316-3327, 2007.
- [43] UNL, "Types of Drought," 2013. [Online]. Available: <http://water.unl.edu/web/drought/typesofdrought>.
- [44] G. J. McCabe, D. R. Legates and H. F. Lins, "Variability and trends in dry day frequency and dry event length in the southwestern United States," *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, 2010.
- [45] M. Nakano, S. Kanada, T. Kato and K. Kurihara, "Monthly maximum number of consecutive dry days in Japan and its reproducibility by a 5-km-mesh cloud-system



resolving regional climate model," *Hydrological Research Letters* 5, pp. 11-15, 2011.

- [46] R. Linsley, M. Kholer y J. Paulus, *Hidrología para ingenieros*, McGraw-Hill Latinoamericana, 1977.
- [47] Laboratory of Tree Ring Research, "Autocorrelation," [Online]. Available: http://www.ltrr.arizona.edu/~dmeko/notes_3.pdf.
- [48] I. I. Zawadzki, "Stastical Properties of Precipitation Patterns," *Journal of Applied Meteorology* 12, pp. 459-472, 1973.
- [49] P. D. Walsh and D. M. Lawler, "Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time," *Weather*, vol. 36, pp. 201-208, 1981.



ANEXOS

Apéndice A. Disdrómetro Thies: Clases de partículas que conforman el espectro de la lluvia

El disdrómetro Thies utilizado en el presente estudio tiene la capacidad de medir el espectro de la lluvia. El sensor registra la cantidad de partículas correspondientes a cada clase definida por un rango de tamaño y velocidad de caída de las partículas. Se tienen 440 clases correspondientes a la combinación de cada uno de los 22 rangos de tamaño con los 20 rangos de velocidad de caída. Los rangos que utiliza el disdrómetro se presentan en la Figura A.0.1.

Particle diameter class			Particle speed class		
Class	Diameter [mm]	Class width [mm]	Class	Speed [m/s]	Class width [m/s]
1	≥ 0.125	0.125	1	≥ 0.000	0.200
2	≥ 0.250	0.125	2	≥ 0.200	0.200
3	≥ 0.375	0.125	3	≥ 0.400	0.200
4	≥ 0.500	0.250	4	≥ 0.600	0.200
5	≥ 0.750	0.250	5	≥ 0.800	0.200
6	≥ 1.000	0.250	6	≥ 1.000	0.400
7	≥ 1.250	0.250	7	≥ 1.400	0.400
8	≥ 1.500	0.250	8	≥ 1.800	0.400
9	≥ 1.750	0.250	9	≥ 2.200	0.400
10	≥ 2.000	0.500	10	≥ 2.600	0.400
11	≥ 2.500	0.500	11	≥ 3.000	0.400
12	≥ 3.000	0.500	12	≥ 3.400	0.800
13	≥ 3.500	0.500	13	≥ 4.200	0.800
14	≥ 4.000	0.500	14	≥ 5.000	0.800
15	≥ 4.500	0.500	15	≥ 5.800	0.800
16	≥ 5.000	0.500	16	≥ 6.600	0.800
17	≥ 5.500	0.500	17	≥ 7.400	0.800
18	≥ 6.000	0.500	18	≥ 8.200	0.800
19	≥ 6.500	0.500	19	≥ 9.000	1.000
20	≥ 7.000	0.500	20	≥ 10.000	10.000
21	≥ 7.500	0.500			
22	≥ 8.000	∞			

Figura A.0.1: Rangos de diámetro y velocidad utilizados por el disdrómetro para medir el espectro de la lluvia

Apéndice B. Velocidad y dirección del viento en el sitio de estudio

Los datos de velocidad y dirección de viento que se presentan en esta sección corresponden únicamente a las fechas en las cuales también se registró precipitación durante el período de 1 año entre mayo de 2011 y abril de 2012. El sensor utilizado fue programado para que realice una lectura cada 10 segundos y almacene el valor promedio cada 5 minutos tanto para velocidad como para dirección. Los datos de dirección almacenados son los de la dirección del vector unitario de viento, es decir, las lecturas de dirección cada 10 segundos para las cuales la velocidad correspondiente sea mayor, tendrán más influencia en la dirección promedio almacenada. Para todas las figuras se utilizan valores promedio para una escala temporal de 5 minutos. En la Figura B.0.1 se grafica una media móvil que permite apreciar con más claridad el cambio en la velocidad promedio de viento según la época del año. En la Figura B.0.2 se presenta los datos de dirección de viento para el período de 1 año, mientras que en la Figura B.0.3 se grafica el comportamiento de la dirección de viento para la temporada más lluviosa del año (enero-febrero). En estas gráficas un ángulo de 0° corresponde a la dirección norte - sur.

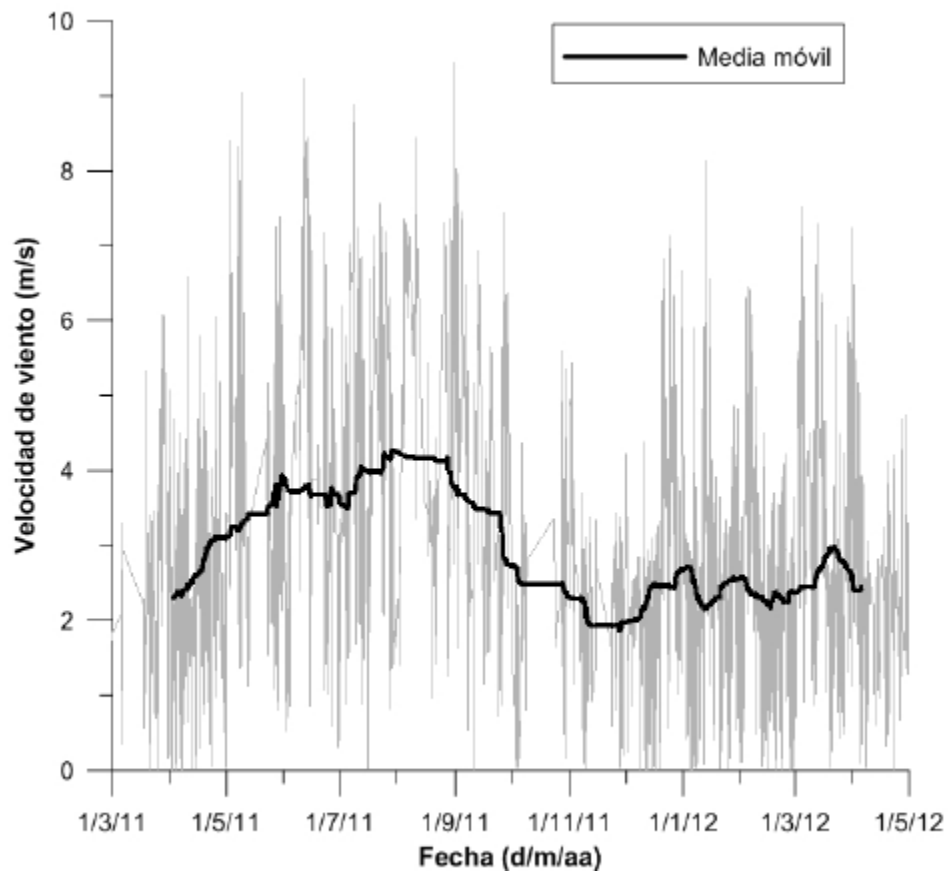


Figura B.0.1: Variación en el tiempo de la velocidad de viento durante precipitación. Escala temporal: 5 min.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

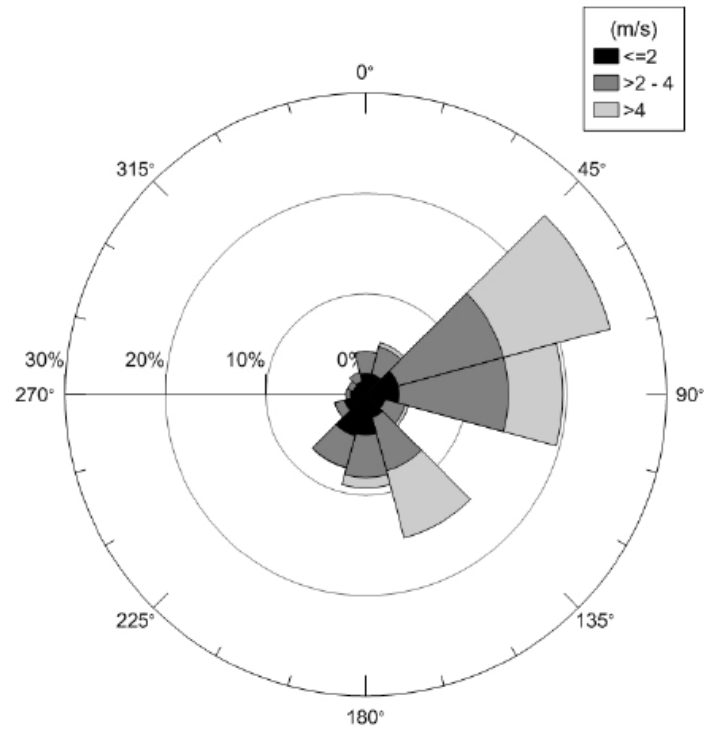


Figura B.0.2: Dirección de viento durante precipitación para el período mayo 2011 - abril 2012. Escala temporal: 5 min.

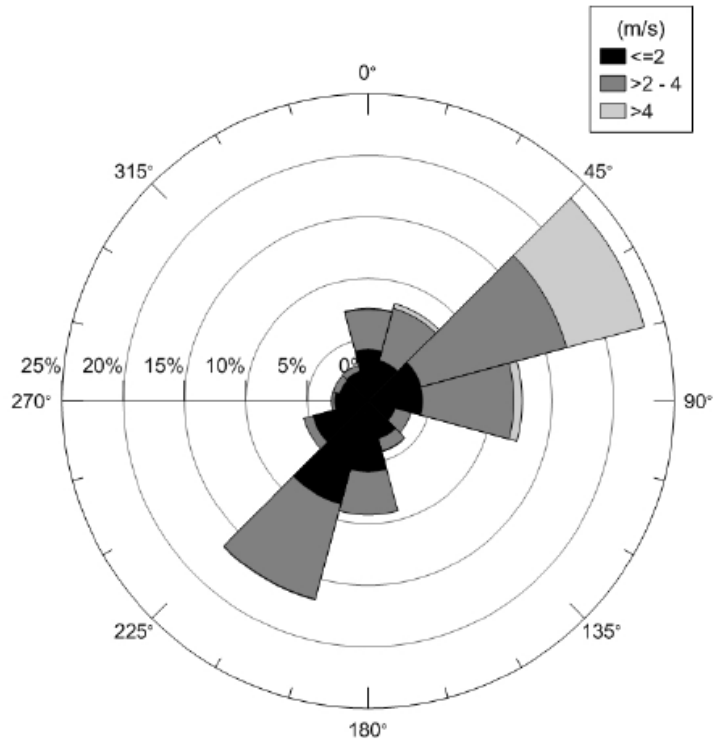


Figura B.0.3: Dirección de viento durante precipitación para los meses de enero y febrero. Escala temporal: 5 min.



Apéndice C. Índices estadísticos para la evaluación general de los sensores de precipitación

En esta sección se presenta los valores de los índices estadísticos utilizados para la evaluación general de los pluviógrafos y el disdrómetro con respecto al pluviógrafo Texas1. La descripción de cada uno de los índices y las fórmulas utilizadas para su cálculo se encuentra en la sección 3.3.3.

Tabla C.0.1: Evaluación general del pluviógrafo Davis respecto al Texas1: Índices estadísticos.

Escala temporal =	5 min	10 min	30 min	horaria	diaria
$R^2 =$	0.731	0.882	0.965	0.981	0.993
$\rho =$	0.301	0.500	0.669	0.728	0.989
$\sigma_{x-y} =$	0.086	0.091	0.108	0.130	0.607
sesgo =	-0.008	-0.012	-0.021	-0.030	-0.300
sesgo absoluto =	0.074	0.078	0.090	0.102	0.390
sesgo ponderado =	-0.020	-0.036	-0.083	-0.141	-0.790
sesgo absoluto ponderado =	0.068	0.084	0.127	0.186	0.858
sesgo porcentual =	-6.9 %	-6.9 %	-6.9 %	-6.9 %	-6.7 %
sesgo absoluto porcentual =	61.1 %	45.8 %	29.6 %	23.2 %	8.7 %

Tabla C.0.2: Evaluación general del pluviógrafo Onset respecto al Texas1: Índices estadísticos.

Escala temporal =	5 min	10 min	30 min	horaria	diaria
$R^2 =$	0.756	0.898	0.971	0.984	0.997
$\rho =$	0.319	0.523	0.686	0.739	0.991
$\sigma_{x-y} =$	0.087	0.090	0.101	0.115	0.412
sesgo =	-0.008	-0.011	-0.020	-0.029	-0.288
sesgo absoluto =	0.073	0.074	0.083	0.093	0.325
sesgo ponderado =	-0.011	-0.019	-0.044	-0.076	-0.611
sesgo absoluto ponderado =	0.066	0.076	0.109	0.147	0.648
sesgo porcentual =	-6.3 %	-6.3 %	-6.3 %	-6.3 %	-6.3 %
sesgo absoluto porcentual =	57.5 %	41.7 %	26.1 %	20.1 %	7.1 %



Tabla C.0.3: Evaluación general del pluviógrafo Texas2 respecto al Texas1: Índices estadísticos.

Escala temporal =	5 min	10 min	30 min	horaria	diaria
$R^2 =$	0.713	0.892	0.976	0.988	0.997
$\rho =$	0.344	0.605	0.799	0.842	0.991
$\sigma_{x-y} =$	0.082	0.080	0.083	0.093	0.363
sesgo =	-0.002	-0.002	-0.005	-0.007	-0.057
sesgo absoluto =	0.065	0.063	0.065	0.072	0.192
sesgo ponderado =	0.003	0.006	0.014	0.017	-0.022
sesgo absoluto ponderado =	0.051	0.055	0.073	0.097	0.448
sesgo porcentual =	-1.4 %	-1.4 %	-1.4 %	-1.4 %	-1.3 %
sesgo absoluto porcentual =	53.9 %	36.6 %	20.0 %	14.7 %	4.4 %

Tabla C.0.4: Evaluación general del disdrómetro respecto al Texas1: Índices estadísticos.

Escala temporal =	30 min	horaria	diaria
$R^2 =$	0.922	0.937	0.958
$\rho =$	0.756	0.799	0.983
$\sigma_{x-y} =$	0.198	0.277	1.436
sesgo =	0.020	0.030	0.268
sesgo absoluto =	0.118	0.150	0.704
sesgo ponderado =	0.142	0.228	1.144
sesgo absoluto ponderado =	0.291	0.428	1.912
sesgo porcentual =	5.6 %	5.6 %	5.7 %
sesgo absoluto porcentual =	32.7 %	27.8 %	14.9 %



Apéndice D. Variabilidad subdiaria de la intensidad de precipitación

En la Figura D.0.1 se representa entre qué valores varían los registros de intensidad correspondientes a cada hora del día. Los datos utilizados para la gráfica corresponden a las intensidades para una duración de 30 min medidas por el Texas1 entre el 01/03/2011 y el 30/04/2012.

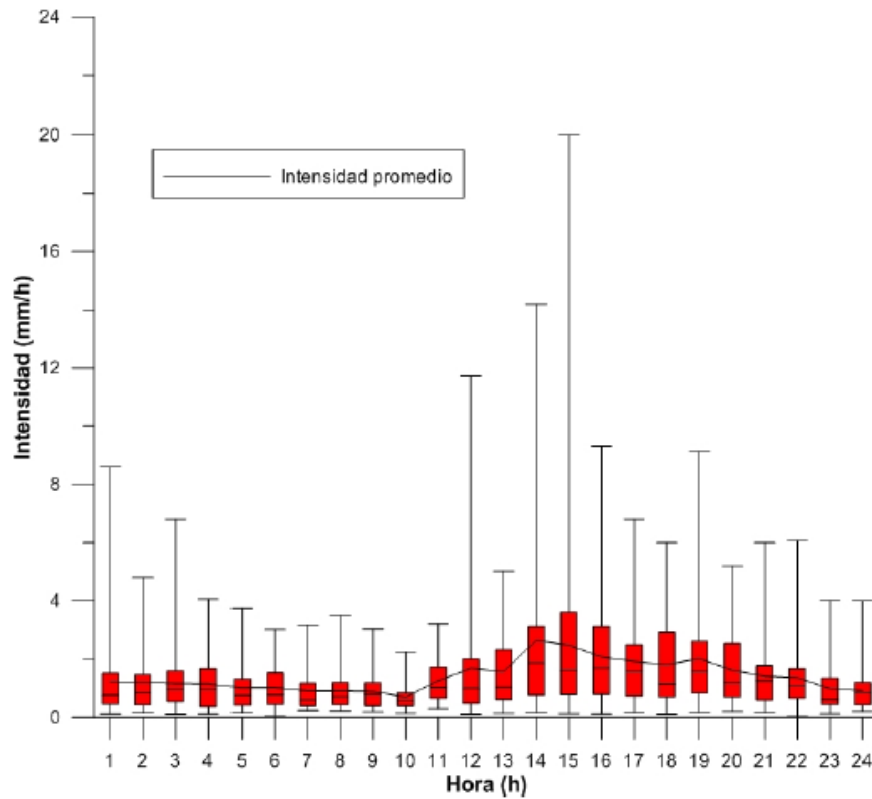


Figura D.0.1: Distribución de los datos de intensidad del Texas1 para una duración de 30 min correspondientes a cada hora del día