



**UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU  
VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL A LO LARGO DE  
UNA GRADIENTE ALTITUDINAL.**

Tesis previa a la obtención del  
grado de Ingeniero Civil

**AUTOR:**

JUAN DIEGO TAPIA SISALIMA

**DIRECTOR:**

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR, PhD

CUENCA – ECUADOR

MARZO 2016

## RESUMEN

La precipitación es un fenómeno caracterizado por su alta variabilidad espacio-temporal. En las cadenas montañosas, particularmente en los Andes ecuatorianos, la variabilidad en su distribución es extrema. Para el desarrollo de los recursos hídricos es importante determinar la extensión real de las sub-regiones de precipitación en cuencas de montaña con relación al impacto de la topografía en su variabilidad. El objetivo de este estudio fue mejorar el conocimiento de la estructura y variabilidad de la precipitación en una gradiente altitudinal, para proveer de información acerca de su continuidad y dinámica a diferentes altitudes y escalas temporales. Se usaron datos de 6 pluviómetros en el período marzo 2014 – febrero 2015, siendo una red sin precedentes particularmente valiosa, pues monitorea el rango altitudinal 2600 – 4000 m.s.n.m. a lo largo de un transecto de 27 km, cubriendo diferentes ecosistemas en una cuenca al sur del Ecuador. Metodología específica se aplicó de acuerdo a las escalas temporales de acumulación: anual, mensual, diaria, eventos y horaria. No se encontró una relación lineal entre cantidad de precipitación anual y elevación, con el máximo volumen anual a la mitad de la gradiente. El rango altitudinal 3060 – 3300 m.s.n.m. determina una ruptura en la continuidad de los aspectos de la precipitación estudiados, con la escala temporal de análisis influyendo en esta determinación de la continuidad. Aspectos tales como: regímenes, estacionalidad, intensidades diarias y valores extremos, son comunes para los pluviómetros sobre los 3300 m.s.n.m. con marcadas diferencias respecto a ubicaciones de menor altitud. Con menor escala de acumulación, características de las sequías, propiedades de eventos y la dinámica intra-diaria de precipitación, son comunes en cambio para los pluviómetros en el valle interandino bajo los 2700 m.s.n.m., y sobre esta altura las características son también semejantes entre ellos. Tanto la estructura de la precipitación como su variabilidad dependen de la elevación, con diferencias notables entre el valle interandino y el páramo, con un comportamiento menos variable en este último.

**Palabras Clave:** Precipitación; variabilidad espacio-temporal; gradiente altitudinal; continuidad espacial; Andes ecuatorianos; páramo; valle interandino.

## ABSTRACT

Rainfall is a phenomenon characterized by its high spatial-temporal variability. In mountain ranges, particularly in the Ecuadorian Andes, the variability in its distribution is extreme. In order to develop water resources, it is important to determine the real extension of the precipitation sub-regions in mountain basins with relation to the impact of the topography in its variability. The aim of this research was to improve the knowledge of the precipitation structure and its variability in an altitudinal gradient, to provide new insights about its continuity and dynamics at different altitudes and temporal scales. Data from six rain gauges were used during the period March 2014 - February 2015, being a particularly valuable network with no precedents, as it monitors the altitudinal range 2600 – 4000 m.a.s.l. along a 27 km transect, covering different ecosystems in a basin in the south of Ecuador. Also, specific methodology was applied according to the temporal scales of accumulation: annual, monthly, daily, events and hourly. A linear relationship between annual rainfall amount and elevation was not found, with the highest annual volume in the middle of the gradient. The altitudinal range 3060 – 3300 m.a.s.l. determines a break up in the continuity of the studied aspects of precipitation, with the temporal scale of analysis influencing this determination of the continuity. Aspects such as: regimes, seasonality, daily intensities and extreme values, are common for the rain gauges above 3300 m.a.s.l. with sharp differences from lower altitude locations. With a smaller accumulation scale, characteristics of dry spells, properties of events and intra-daily dynamics of rainfall, instead, are common below 2700 m.a.s.l., and above this altitude the characteristics are also similar among them. Both structure and variability of rainfall depend of the elevation, with significant differences between the inter-Andean valley and the *páramo*, with a less variable behavior in the latter.

**Keywords:** Rainfall, space-time variability; altitudinal gradient; spatial continuity; Ecuadorian Andes; *páramo*; inter-Andean valley.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Justificación .....	10
1.3 Marco Teórico.....	12
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo General .....	15
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
<b>CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 Zona de Estudio.....	17
2.1.1 Ecosistemas Páramo – Bosque Altimontano y Altoandino.....	17
2.1.2 Ecosistema Valle Interandino.....	20
2.2 Materiales .....	22
2.2.1 Diseño de la Red de Monitoreo de la Precipitación.....	22
2.2.2 Pluviómetros de la Red de Monitoreo de la Precipitación .....	24
2.2.3 Calibración y Control de Calidad.....	26
2.3 Métodos.....	27
2.3.1 Resumen de los Métodos.....	27
2.3.2 Descripción de los Métodos .....	28
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
3.1 Escala Anual – Estacional .....	35
3.2 Escala Mensual .....	39
3.3 Escala Diaria.....	40
3.4 Eventos Representativos (de los períodos lluviosos) .....	53
3.5 Escala Horaria .....	54
3.6 Resumen de Resultados.....	58
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
4.1 Conclusiones del Estudio.....	62
4.2 Recomendaciones y Estudios Futuros.....	63
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>68</b>
Anexo 1: Calibración de Pluviómetros .....	68
Anexo 2: Control de Calidad de las Series .....	70



Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

---

Yo, Juan Diego Tapia Sisalima, autor de la tesis **“ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL A LO LARGO DE UNA GRADIENTE ALTITUDINAL”**, 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 hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, marzo de 2016

---

Juan Diego Tapia Sisalima

C.I.: 0104882675



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Juan Diego Tapia Sisalima, autor de la tesis "ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL A LO LARGO DE UNA GRADIENTE ALTITUDINAL", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, marzo de 2016.

Juan Diego Tapia Sisalima

C.I: 0104882675



## **Agradecimientos**

Mi más profundo agradecimiento al Ingeniero Rolando Célleri Alvear, por haberme brindado su confianza, tiempo, motivación, sabiduría y soporte continuo desde el principio y a lo largo del desarrollo de esta investigación.

Quiero agradecer al personal de iDRHICA por su colaboración tanto en labores de campo, como con el aporte de ideas y conocimientos, en especial a la Ing. Johanna Orellana.

Así mismo, mi agradecimiento a ETAPA EP por la información concedida, sin la cual esta investigación no hubiera podido completarse. De manera especial a la Ing. Ana Parra y al Ing. Mario Gualpa.



## **Dedicatoria**

A mis padres Mauro y Carmita, a mi hermano Andrés y a mi hermana María José; especialmente a mi papá por enseñarme a amar la Ingeniería, pero sobre todo por ser mi héroe y todo lo que algún día quiero ser.

A cada uno de los miembros de mi familia, que siempre mostró interés y preocupación, además de brindarme apoyo incondicional durante toda mi carrera estudiantil, especialmente a ti Rosita.

A mis amigos Diego A., Cristian O. y Sebastián S.



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La precipitación es un fenómeno caracterizado por su alta variabilidad espacio-temporal (Chen, Liu, An, Görsdorf, & Berger, 2015; Villarini, Mandapaka, Krajewski, & Moore, 2008). Información acerca de esta variabilidad es requerida para la mayoría de aplicaciones meteorológicas, hidrológicas y ecológicas (Céleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007; Pedersen, Jensen, Christensen, & Madsen, 2010). Mediciones espacio-temporales precisas de la precipitación son importantes para la aplicación en modelos numéricos de clima, modelos lluvia-escorrentía y validación en tierra de sensores remotos (Chen et al., 2015; Hrachowitz & Weiler, 2010; Pedersen et al., 2010).

La precipitación es responsable de la variabilidad espacio-temporal de los recursos hídricos, y sus cambios tienen impacto en la hidrología y en la disponibilidad del agua (Buttafuoco, Caloiero, & Coscarelli, 2011). Es por esto que aplicaciones civiles tales como: diseño y operación de sistemas de abastecimiento de agua potable y de plantas de generación de energía hidroeléctrica, evaluación de riesgos, diseño y manejo de proyectos de riego y diseño de estructuras de drenaje pluvial urbano, también requieren de la caracterización espacio-temporal precisa de la precipitación (Ciach & Krajewski, 2006; Tapiador et al., 2011; Torres, Céleri, Cisneros, & Feyen).

En las cadenas montañosas el conocimiento de la variabilidad climática es limitado debido a una combinación de escasez de datos (baja densidad de redes de monitoreo) y a la heterogeneidad de la orografía. Los Andes tropicales comparten muchas de sus características con las cadenas montañosas en general (Céleri et al., 2007), y su recurso hídrico alimentado por glaciares, páramo y bosques representa un gran potencial económico y ecológico (Céleri & Feyen, 2009).

El páramo es un ecosistema alpino neo-tropical que cubre la región más alta de los Andes del norte, extendiéndose desde el norte de Perú hacia Ecuador, Colombia y Venezuela cubriendo cerca de 35000 km<sup>2</sup> (Buytaert, Céleri, Willems, De Bièvre, & Wyseure, 2006). Aunque el páramo es una zona bastante remota y desolada con poca actividad humana, este ecosistema proporciona una importante función socio-económica a la comunidad andina como su principal fuente de agua (Buytaert, Céleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006).

Los Andes ecuatorianos muestran una extrema variabilidad en la distribución espacio-temporal de la precipitación. No existe un solo mecanismo de generación de lluvia, sino que muchos procesos interactúan (Rollenbeck & Bendix, 2011). A pequeña escala la precipitación está influenciada por el viento, determinado por las fuertes pendientes y la accidentada topografía. A gran escala está influenciada por efectos altitudinales y latitudinales (Buytaert, Céleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006).

La combinación de diferentes características fisiográficas, gradientes altitudinales y condiciones climáticas especiales de los Andes del sur del Ecuador, resulta en cuencas con una multitud de zonas ecológicas, en donde el páramo es el ecosistema de mayor importancia. Con una elevada capacidad reguladora, los flujos base que descienden de los páramos son altos y sostenidos, característica única de su hidrología superficial que está altamente influenciada por la cobertura de este ecosistema (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006; Célleri et al., 2007).

## 1.2 Justificación

En la región Interandina el agua proveniente del páramo tiene diversos usos: doméstico e industrial, riego, generación hidroeléctrica, eco-servicios; considerándose incluso la única fuente de agua de consumo en gran parte de esta región (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006; Buytaert, Célleri, Willems, et al., 2006). En ciertas zonas en la actualidad no hay problemas graves en cuanto a la disponibilidad, sin embargo, el racionamiento del servicio de agua potable –y de energía– en varias ciudades de la región interandina tales como Quito, Cuenca, Bogotá, Boyacá, Caracas, especialmente durante las temporadas de estiaje es bastante común (AFP, 2014, 2015; Agredo, 2015; Beltrán, 2015; CMR, 2016; El Universo, 2009). Debido a que la mayoría de decisiones en relación al manejo de los recursos hídricos son tomadas a escala de cuenca entre los 100 y 300 km<sup>2</sup> (Célleri, 2007), una evaluación precisa de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en zonas de montaña a esta escala es un prerrequisito para su manejo integral (Célleri et al., 2007) y para los proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos.

Es fundamental tener buenas estimaciones de la cantidad de precipitación con resoluciones espacio-temporales finas, pues no importa que tan bueno sea un modelo hidrológico, si los datos de entrada de precipitación son erróneos, no se puede estimar caudales de manera confiable (Célleri & Feyen, 2009). Una representación razonable de su variabilidad espacial es requerida (Hrachowitz & Weiler, 2010). Así también, un mejor conocimiento de la precipitación en zonas de montaña es ciertamente demandado para mejorar las interpolaciones de precipitación sobre un área. El conocimiento no solamente de las cantidades de precipitación, sino de sus ciclos y regímenes es primordial para el diseño y operación de presas con aplicaciones en el manejo óptimo de la energía hidroeléctrica, agricultura, industria y control de riesgos (Tapiador et al., 2011).

El cambio climático en la región Andina podría tener un gran impacto en los recursos hídricos y sus ecosistemas podrían sufrir drásticos impactos como resultado de largas sequías e intensidades de precipitación que deriven en crecidas e inundaciones (Mora, Liu, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2012). En este contexto, cambios en la precipitación se han proyectado en relación a volúmenes anuales,

frecuencia de días con lluvia e incremento en intensidades de eventos en una cuenca interandina con cobertura de páramo y bosque (Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2014). Es esencial entonces el incremento del conocimiento de la precipitación a profundidad para realizar simulaciones y proyecciones climáticas futuras de mayor calidad (Mora & Willems, 2012; Tapiador et al., 2011).

Los ecosistemas terrestres al sur del Ecuador están fuertemente afectados por las variaciones interanuales del clima. La precipitación constituye la fuente de entrada más importante de nutrientes inorgánicos en el ecosistema de bosque montano tropical (Rollenbeck, Fabian, & Bendix, 2006). La zonificación vertical de la vegetación alpina tropical parece reflejar la cantidad de precipitación, por lo que ecólogos vegetales se han interesado especialmente en los gradientes altitudinales de precipitación (Bendix, Rollenbeck, & Reudenbach, 2006). En las cadenas montañosas, el entendimiento de las interacciones entre la precipitación, la producción de fitomasa y la densidad de ganadería y fauna es importante para la implementación de planes de manejo y protección de especies endémicas en peligro, más aún si se añade el factor de condiciones climáticas cambiantes (Retzer, Nadrowski, & Miehe, 2006).

Debido a la complejidad del terreno, en áreas montañosas las mediciones de clima se limitan generalmente al fondo de los valles, resultando en bajas densidades de monitoreo a elevaciones mayores (Hrachowitz & Weiler, 2010). El conocimiento exacto acerca de la distribución espacio-temporal y de las dinámicas de los patrones de precipitación en los Andes ecuatorianos es aún pobre (Rollenbeck & Bendix, 2011). Los datos son limitados y de baja calidad, lo que dificulta la evaluación de la naturaleza, cantidad y tiempo de precipitación (Padrón, Wilcox, Crespo, & Célleri, 2015). Adicionalmente, las condiciones meteorológicas, hidrológicas y ecológicas pueden variar drásticamente a lo largo de distancias cortas debido a diferencias de elevación y exposición (Célleri et al., 2007). A pesar de que el monitoreo remoto se ha vuelto una alternativa viable para lidiar efectivamente con este problema se presentan incertidumbres por falta de entendimiento de los procesos físicos, estimación de parámetros y de los propios instrumentos de monitoreo (Pedersen et al., 2010; Villarini et al., 2008). Factores económicos y operacionales, y la calibración de los sensores remotos, hacen también que el uso de redes de pluviómetros siga prevaleciendo, teniendo el monitoreo en tierra tanta importancia como el remoto.

Mejorar el conocimiento hidrológico a escala de meso-cuenca es una tarea difícil que debe llevarse a cabo mediante métodos experimentales y con redes de monitoreo avanzadas, cubriendo diferentes escalas y ecosistemas en cuencas andinas (Célleri, 2007). En la cuenca del Paute al sur del Ecuador, la densidad de estaciones de monitoreo sobre los 3000 m.s.n.m. es de 1 por cada 360 km<sup>2</sup>. Monitorear la precipitación en el rango altitudinal 2800 – 4200 m.s.n.m. es

necesario, pues para el desarrollo de los recursos hídricos es importante determinar la extensión real de las sub-regiones de precipitación en cuencas de montaña con relación al impacto de la topografía en su variabilidad (Célleri et al., 2007).

### 1.3 Marco Teórico

La precipitación es cualquier forma de agua sólida o líquida que cae de la atmósfera a la superficie terrestre. La lluvia, la llovizna, el granizo y la nieve son ejemplos de precipitación. Para su formación se requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los mecanismos para la elevación de masas de aire definen el tipo de precipitación, se distinguen tres principales: frontal, orográfica y convectiva (Chow, Maidment, Mays, Saldarriaga, & Santos, 1994).

La precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales (Chow et al., 1994). El conocimiento de la distribución y variabilidad espacio-temporal de la precipitación es importante para el planeamiento de los recursos hídricos y para diversos estudios hidrológicos (Villela & Mattos, 1975).

Krajewski, Ciach, y Habib (2003) estudiaron la variabilidad de la precipitación a pequeña escala en cinco regímenes climáticos diferentes con datos de redes pluviométricas de características similares. Los resultados demostraron que la precipitación exhibe suficiente alta variabilidad a pequeñas distancias como para justificar que es necesaria mayor investigación. Los autores concluyen que la mejor manera de obtener características espaciales precisas de la precipitación es mediante redes pluviométricas experimentales que operen durante amplios períodos de tiempo.

Según Villarini et al. (2008), en donde se evalúa la incertidumbre de las mediciones de precipitación con aproximadamente 6 años de datos de una red pluviométrica densa en el sur de Inglaterra, las mediciones confiables de la precipitación son muy difíciles de obtener debido a que el proceso de la lluvia es un fenómeno altamente variable en espacio y tiempo. Chen et al. (2015) mediante una red de monitoreo con micro-radares y pluviómetros investigaron acerca de la variabilidad de la precipitación a escalas de 4 y 9 km que corresponden a la resolución de radares y productos satelitales, concluyendo que es importante evaluar la precisión de la medición de la lluvia en un área con diferentes arreglos en la disposición de los equipos con la finalidad de obtener un diseño económico de la red con una precisión aceptable de acuerdo al objetivo buscado.

Hrachowitz y Weiler (2010) caracterizaron la variabilidad de la precipitación en una cuenca montañosa pequeña al norte de la Isla de Vancouver, Canadá, mediante una red pluviométrica densa. Concluyeron que la precipitación sobre terrenos complejos presenta variabilidad especialmente alta incluso en cuencas pequeñas,

y que las mediciones en uno o dos puntos en dichas cuencas no son suficientes para obtener representaciones válidas de su precipitación media. Encontraron que el volumen de precipitación incrementa con la elevación, pero también sugieren la evidencia de otros controles topográficos.

Las diferencias en la precipitación a escala de kilómetros son grandes, y estas se agravan en zonas montañosas debido a la interacción de la orografía con la atmósfera, lo que modifica la estructura de la precipitación produciendo sistemas meteorológicos incluso en regiones de topografía moderada (Tapiador et al., 2011).

En áreas montañosas, como en el caso de la cordillera de los Andes, la precipitación y sus patrones pueden ser muy variables en espacio y tiempo. Estos patrones pueden ser muy complejos, pues la cantidad y distribución de la precipitación a pequeña escala depende de la velocidad y dirección del viento, el cual está determinado por las pendientes fuertes y topografía accidentada. A gran escala, los patrones dependen de la orientación de los flancos de las cordilleras y de la posición geográfica en relación a las influencias oceánicas. Esta compleja distribución climática produce gran variedad de microclimas locales (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006; Josse, Mena, & Medina, 2000).

Espinoza Villar et al. (2009) estudiaron la variabilidad de la precipitación en la cuenca del Amazonas en el período 1964 – 2003 con datos mensuales de estaciones pluviométricas de los países Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia. Encontraron que los regímenes de precipitación son más diversos en las regiones Andinas que en ubicaciones más bajas. Valores muy altos y muy bajos de precipitación anual en estaciones cercanas fueron identificados, además de una fuerte variabilidad espacial debido a la disminución de la lluvia con la altura y a la posición de sotavento o barlovento de las estaciones. Concluyeron que en los Andes ecuatoriales la distribución de la precipitación es altamente compleja y está asociada a la exposición de las estaciones de monitoreo: regímenes bimodales en las cuencas inter-andinas se encontraron cerca a regímenes unimodales en estaciones a barlovento.

Bendix y Lauer (1992) establecieron que en Ecuador la determinación solar de los regímenes anuales de precipitación se ve afectada por la influencia de la cordillera de los Andes y por las corrientes oceánicas (Humboldt y El Niño), así como por el fenómeno meso-escala de los vientos de valle. Encontraron que estos regímenes varían en las diferentes regiones del país. Las zonas bajas costeras y las cuencas inter-andinas del norte y centro del Ecuador se caracterizan por un régimen con dos máximos en febrero, marzo y abril (FMA) y octubre, noviembre y diciembre (OND). La región Amazónica fue caracterizada por su humedad a lo largo del año, e identificaron un tercer máximo durante junio y julio (JJ) en el régimen de las estribaciones de la vertiente oriental.



Debido a que varios son los factores que afectan las diferencias espaciales en la precipitación, entre ellos la exposición de las cadenas montañosas a los vientos prevalecientes, las variaciones del nivel de condensación de las nubes y procesos dinámicos locales, Rollenbeck, Fabian, y Bendix (2006) combinando monitoreo puntual y remoto, estudiaron la dinámica de la precipitación en los flancos orientales de la cordillera de los Andes al sur del Ecuador. Encontraron que la variabilidad climática está controlada principalmente por variables topográficas, procesos climatológicos y la interacción entre estos factores. En la misma zona, Rollenbeck y Bendix (2011) mediante un radar localizado en la Reserva Biológica de San Francisco al sur del Ecuador en combinación con una red pluviométrica, estudiaron la distribución de la precipitación en el rango altitudinal 800 – 3600 m.s.n.m. en un área de 120 por 120 km. Encontraron que la precipitación es principalmente de tipo frontal, siendo la forma más común la llovizna con eventos de larga duración pero de baja intensidad. Varias características climáticas revelaron estar determinadas por combinaciones específicas de procesos atmosféricos locales y regionales, y por la interacción con la configuración topográfica.

Bendix, Rollenbeck, y Reudenbach (2006) estudiaron los patrones diurnos de precipitación en un valle interandino oriental al sur del Ecuador (valle del río San Francisco) principalmente mediante 175 días de datos de un radar vertical en combinación con información pluviométrica y de otros sensores remotos. Un máximo de precipitación se encontró entre las 5:30 – 6:30 y un segundo pico entre las 14:30 – 15:30. Se concluyó que el pico pre-amanecer está relacionado a inestabilidades de meso-escala, mientras que la lluvia de la tarde muestra influencia de convección local.

Buytaert et al. (2006) estudiaron la variabilidad de la precipitación en la zona montañosa occidental de los Andes al sur del Ecuador, en la cuenca del río Paute. En el páramo, entre los 3500 y 4100 m.s.n.m. un claro patrón intra-diario fue determinado, con la mayoría de la precipitación entre las 14 y 19h. Sin embargo, la variación estacional fue baja y solamente el 20% de los días en el año fueron secos. A pesar de que encontró una alta correlación en los datos diarios de la precipitación para distancias de hasta 4 km, la variabilidad espacial fue alta. Los autores concluyeron que el impacto de la topografía es la mayor fuente de incertidumbre en los patrones de precipitación y recomiendan que esta relación es objeto de estudios más profundos.

Celleri et al. (2007) con el objetivo de generar un mejor entendimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en los Andes tropicales, tomaron como caso de estudio la cuenca del río Paute. Identificaron la existencia de cuatro regímenes de precipitación. Los regímenes bimodales presentaron picos de precipitación en abril y octubre. El primer régimen bimodal (BM1) se presentó en la parte central de la cuenca o depresión inter-andina (depresión bajo los 3000 m.s.n.m.), y tiene una estación seca marcada entre junio y agosto y un promedio

de precipitación anual en el rango 660 – 1100 mm. El segundo régimen bimodal (BM2) se presentó en los flancos altos tanto orientales como occidentales de la cuenca (sobre los 3000 m.s.n.m.), y tiene una estación seca menos pronunciada entre junio y agosto, además de un segundo pico débil de precipitación en octubre. El promedio anual de precipitación de BM2 varía entre 1000 y 1800 mm. Los autores concluyen que es necesario mejorar el monitoreo en la banda 2800 – 4200 m.s.n.m. para evaluar efectivamente la variación de la precipitación con la elevación. La complejidad y variabilidad de los patrones espacio-temporales de la precipitación en esta cuenca andina típica, reveló la necesidad de expandir el monitoreo y mejorar el control de calidad de las bases de datos, pues así se podrá detectar posibles cambios en el clima y mejorar el entendimiento del ciclo hidrológico de las cuencas de montaña.

Recientemente, Mora et al. (2014) investigaron sobre señales de cambio climático en variables hidrometeorológicas e hidrológicas en la misma cuenca de estudio de Celleri et al. (2007). Los autores proyectaron incrementos en la profundidad media de lluvia anual y en las intensidades extremas diarias para todos los sitios de estudio y en todos los escenarios considerados, con cambios más pronunciados en la región más húmeda de la cuenca. Sin embargo, según las proyecciones, la frecuencia de días húmedos se reduce. Se espera que el cambio climático en la región Andina tenga un gran impacto en los recursos hídricos, por lo que mejorar el conocimiento de la estructura de la precipitación en esta región es indispensable.

En este contexto, el estudio y caracterización a profundidad de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a escala de meso-cuenca se ha identificado como un vacío en el conocimiento hidrológico en la región Interandina. La investigación a continuación, a través de una red pluviométrica sin precedentes, abarcando el monitoreo en un amplio rango altitudinal y cubriendo los diferentes ecosistemas que conforman la cuenca de estudio, tiene como objetivo mejorar el conocimiento de la estructura y variabilidad de la precipitación en una gradiente altitudinal para proveer de nueva información acerca de su dinámica a diferentes escalas temporales.

Se espera que los resultados sean significativos e indicativos para cuencas de los Andes que compartan características topográficas y climáticas, de manera que se contribuya efectivamente a llenar el vacío identificado y este conocimiento pueda usarse en diferentes aplicaciones meteorológicas, hidrológicas, ecológicas y civiles.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Estudiar la estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de una gradiente altitudinal en una cuenca interandina conformada por varios ecosistemas y con distintos regímenes de precipitación.



#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar el efecto de la elevación en la variabilidad de la precipitación.
- Estudiar la continuidad espacio-temporal de diferentes aspectos de la precipitación en la gradiente tales como: regímenes anuales, estacionalidad, volúmenes mensuales, intensidad diaria, propiedades de eventos y variabilidad intra-diaria.
- Estudiar la dinámica de períodos de precipitación y de sequía representativos y su evolución en la gradiente.



## CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Zona de Estudio

El estudio se realizó en una gradiente altitudinal en el rango 2 600 - 4 000 m.s.n.m. a lo largo de un transecto de aproximadamente 27 km en la cuenca del río Tomebamba, sur del Ecuador, provincia del Azuay. La sub-cuenca representa un área de 325 km<sup>2</sup>, desde la zona de origen del río Tomebamba hasta su punto de entrada a la zona urbana del cantón Cuenca (Figura 2.1.1).

El río Tomebamba tiene su origen en el límite norte del Parque Nacional Cajas en el sector denominado Tres Cruces, zona cercana a la laguna La Toreadora que es el punto de mayor altitud en la zona de estudio. El río Tomebamba hace su camino hasta el noroeste de la ciudad de Cuenca atravesando la zona de Balzaín en donde se encuentra el punto más bajo en la gradiente altitudinal de análisis. Luego de bordear el centro histórico de la ciudad, se junta con el río Machángara formando el río Cuenca, el cual es afluente del Paute cuyas aguas llegan hasta el río Amazonas y finalmente al Océano Atlántico.

En la zona de estudio existen ecosistemas diferentes: *Páramo* y *Bosque Altimontano* y *Altoandino* en la cuenca alta – media, y *Valle Interandino* en la cuenca baja.

#### 2.1.1 Ecosistemas Páramo – Bosque Altimontano y Altoandino

Debido a que la transición entre estos ecosistemas no está definida claramente, ni por límites altitudinales ni por regímenes de precipitación, se estudian de manera conjunta.

El Parque Nacional Cajas (PNC) es un área protegida localizada al sur del Ecuador, dentro de los límites del cantón Cuenca en la zona denominada Cima Fría de la Cordillera Occidental (entre los 2900 y 4560 m.s.n.m.). Altitudinalmente el PNC está enmarcado entre los 3160 y 4454 m.s.n.m., conformando las cuencas altas de ríos que drenan tanto hacia el Atlántico como hacia el Pacífico (Ilustre Municipalidad de Cuenca & Universidad del Azuay, 2011; Vasco et al., 2012).

El páramo tiene un mecanismo natural de captación, reserva y regulación de caudales de agua y debido a esta capacidad reguladora hidrológica, el PNC constituye una zona de altísima importancia para la disponibilidad del recurso hídrico en las zonas bajas, específicamente para la ciudad de Cuenca (Buytaert, Célleri, De Bièvre, Cisneros, et al., 2006; Vasco et al., 2012).

Además, el PNC incluye un sistema lacustre superior a 767 cuerpos de agua que permite el incremento en el tiempo de permanencia de agua en las sub-cuencas. Por la extensión e importancia de este sistema, el PNC está reconocido a nivel mundial como Humedal de Importancia Internacional en la Convención Relativa a

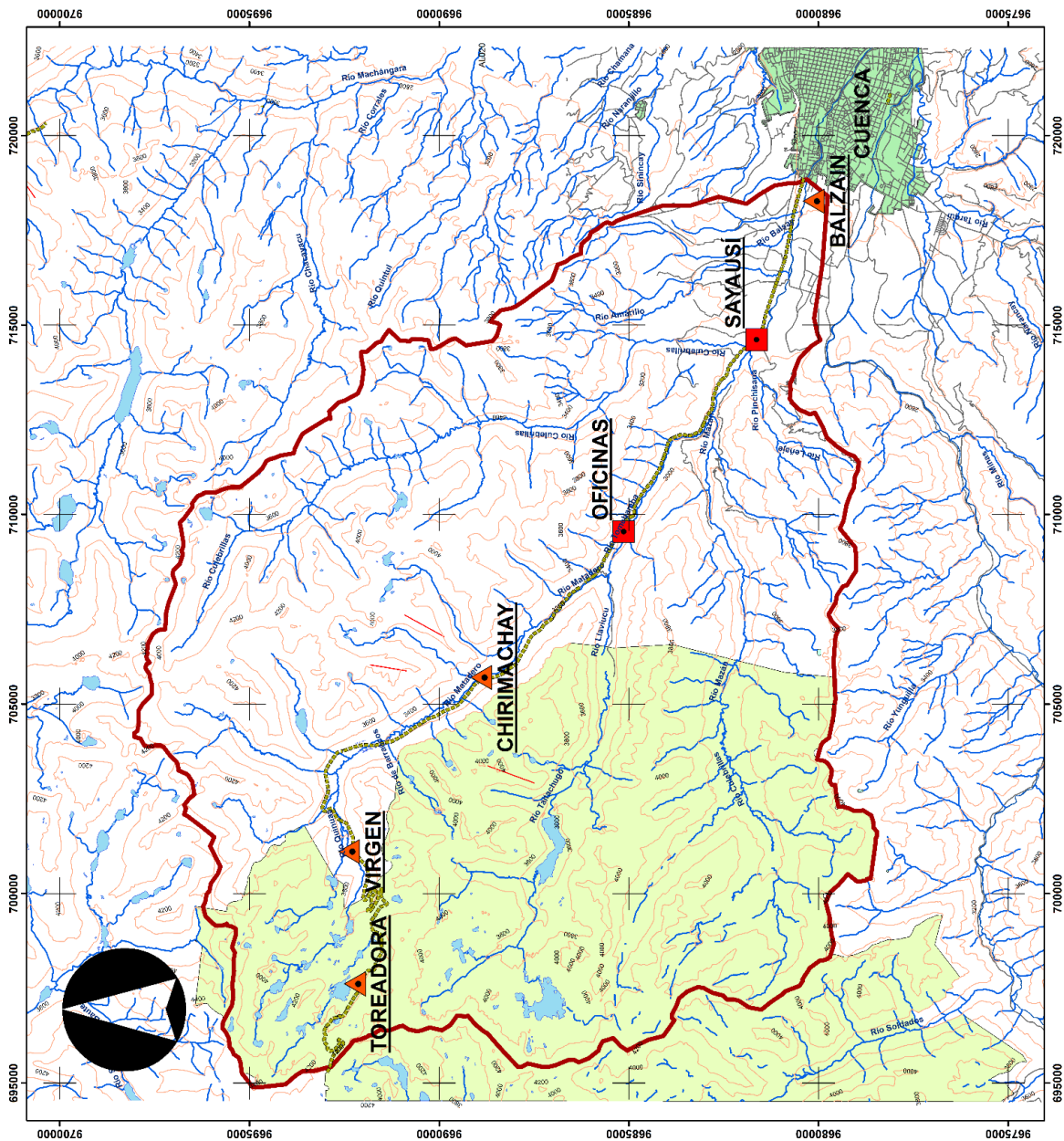
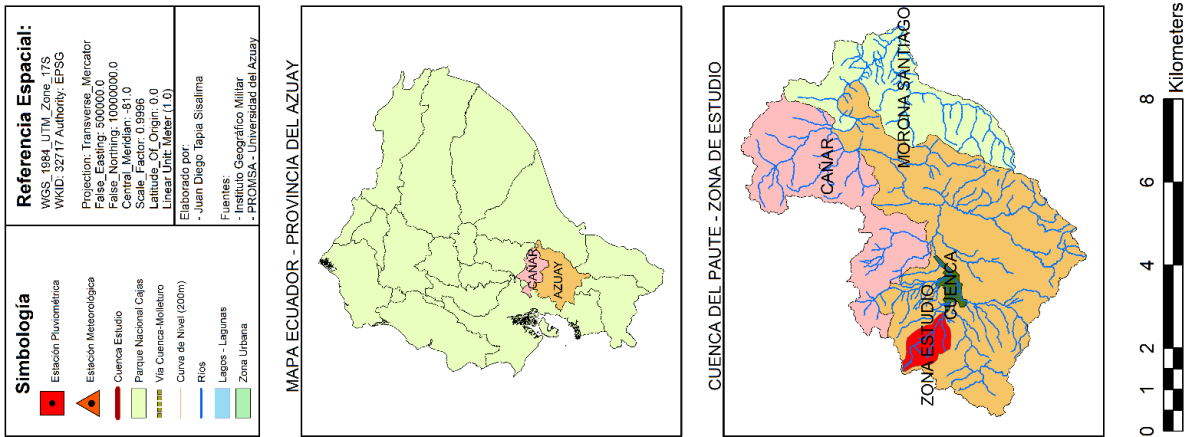


Figura 2.1.1. Mapa de la Zona de Estudio: Cuenca de la Gradiente Altitudinal en el transecto Laguna La Toreadora – Balzain

los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (RAMSAR).

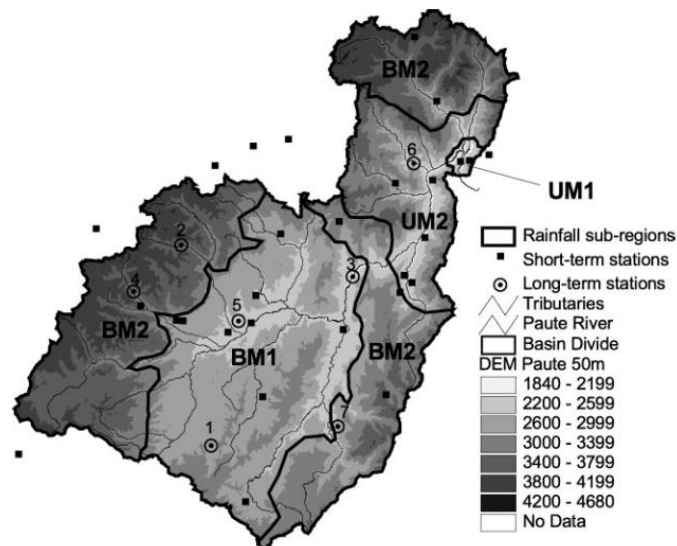
El recurso hídrico proveniente del PNC tiene un uso actual y potencial en actividades como consumo humano urbano y rural (en sistemas de potabilización y abastecimiento de agua para la ciudad de Cuenca y parroquias rurales próximas), riego (en centros poblados de la vertiente oriental), generación hidroeléctrica (ríos como el Tomebamba y Yanuncay que nacen en el PNC son principales aportadores del Complejo Hidroeléctrico Paute) y actividades recreativas (Ilustre Municipalidad de Cuenca & Universidad del Azuay, 2011; Vasco et al., 2012).

El PNC presenta dos sistemas ecológicos: *Humedales de altura* (sobre los 3800 m.s.n.m.) y *Bosques Altimontanos y Altoandinos húmedos de estribaciones andinas* (altos y bajos, entre los 3.500 y 3.800 m.s.n.m. y los 2.500 y 2.800 m.s.n.m. respectivamente). Para información detallada sobre este tema el lector es referido a (Vasco et al., 2012).

Debido a sus características, el PNC fue declarado en el año 2013 como Área Núcleo de Reserva de Biósfera por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación y Diversificación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

### Régimen de Precipitación

La precipitación media anual estimada para el PNC en el período 1965 – 1990 es de 1072 mm, con un mínimo de 829 mm y máximo 1343 mm (Guzmán, 2004).



**Figura 2.1.2.** Sub-regiones de precipitación en la cuenca del Río Paute UM1, Unimodal 1; UM2, Unimodal 2; BM1, Bimodal 1; BM2, Bimodal 2. (Figura de Céleri et al. (2007)).

Los límites de las sub-regiones en la cuenca del río Paute con distintos regímenes de precipitación definidos por Céleri et al. (2007) se presentan en la Figura 2.1.2. Sin embargo, según los autores del estudio, estos deben interpretarse cuidadosamente debido a la baja densidad de pluviómetros usados para definirlos.

La sub-cuenca del río Tomebamba en donde se encuentra la gradiente altitudinal de estudio tiene un área de aproximadamente 29 km<sup>2</sup> por debajo de los 3000 m.s.n.m. (que representan un 9% del área total de análisis), umbral con el que los regímenes de precipitación bimodales en la cuenca del Paute son limitados por Célleri et al. (2007). Así los ecosistemas páramo y bosque Altimontano y Altoandino en la sub-cuenca de estudio pertenecerían al régimen BM2, con un área aproximada de 296 km<sup>2</sup> (91% de la sub-cuenca).

### **2.1.2 Ecosistema Valle Interandino**

El cantón Cuenca se encuentra en la parte meridional de la cordillera de los Andes ecuatorianos. El valle interandino tiene un área de 75876.47 ha (aproximadamente el 21% del área total del cantón). Compreendido entre los 2300 y 2900 m.s.n.m., con temperatura promedio anual que varía según la altura entre los 13 y 19°C, alberga a aproximadamente al 98% de la población del cantón y a la ciudad Santa Ana de los Ríos de Cuenca (Ilustre Municipalidad de Cuenca & Universidad del Azuay, 2011).

En dicho valle, se reconocen áreas de mosaico de vivienda, cultivos, pastos y vegetación leñosa (remanentes de bosque de eucalipto y pequeñas áreas de arbustos nativos). Esta cobertura abarca las parroquias próximas a la ciudad, entre ellas, las áreas bajas de las parroquias rurales Chiquintad, Sayausí y San Joaquín que forman parte de la cuenca de estudio. Se caracteriza por el avance de la urbanización de manera no planificada, ocupando zonas con limitaciones topográficas e inestables de origen geológico (Ilustre Municipalidad de Cuenca & Universidad del Azuay, 2011).

### **Régimen de Precipitación**

De acuerdo a la Figura 2.1.2, la precipitación en la depresión o valle interandino donde se asienta la ciudad de Cuenca (que para la zona de estudio representa un 9% del área total de estudio) correspondería al régimen BM1. Como se mencionó anteriormente la interpretación de los límites de las sub-regiones de precipitación de la cuenca del Paute de Célleri et al. (2007) se han de interpretar con cierto grado de incertidumbre.

### **Captaciones de Agua en la zona de la gradiente (ETAPA EP, 2006, 2015a)**

En la actualidad se emplea el agua de las vertientes orientales, proveniente de los humedales de altura del PNC para diferentes propósitos, siendo el de mayor impacto el de consumo humano. Se consideró importante describir las captaciones que se encuentran en la sub-cuenca de la gradiente altitudinal de estudio.

La ciudad de Cuenca cuenta con infraestructura necesaria para abastecimiento de agua potable originada en los humedales del PNC hasta el año 2030 (Vasco et al., 2012). La Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca – Ecuador (ETAPA EP) es responsable



del mantenimiento y operación de los sistemas de agua potable en cada una de sus etapas: Captación, Conducción, Potabilización y Distribución.

En el sistema de abastecimiento denominado “Tomebamba – Machángara”, el sub-sistema “Tomebamba” cuenta con tres captaciones dentro de la sub-cuenca de la gradiente altitudinal de estudio. Estas captaciones son:

*1. Captación Río Tomebamba:*

Ubicada en el noroccidente de la ciudad, toma las aguas del río Tomebamba, 300 metros aguas bajo de la confluencia con el río Mazán, en la cota 2736 m.s.n.m. El caudal captado está limitado a 1000 l/s concordante con las limitaciones existentes en la conducción y con el máximo caudal aforado al ingreso de la Planta de El Cebollar.

*2. Captación Sayausí Alto – Paquitranca:*

El agua es captada en el río Culebrillas. La obra de toma se encuentra en la cota 2872 m.s.n.m. En condiciones normales el caudal captado es de 437 l/s.



**Figura 2.1.3.** Captación Sayausí Alto – Paquitranca.

*3. Captación Sayausí Bajo – Culebrillas:*

Estructura emplazada en la margen izquierda del río Culebrillas, 800 m aguas abajo de su confluencia con el río Tomebamba.

Las captaciones descritas, abastecen de agua cruda a las siguientes plantas de tratamiento:

*Planta de Tratamiento El Cebollar*

Las aguas captadas por estas estructuras llegan hasta la planta El Cebollar, la misma que fue construida en el año 1949 con una capacidad de 200 l/s. Posteriormente en 1970 la capacidad de la planta fue incrementada a 600 l/s. En 1984 se realizó otra ampliación construyéndose 4 unidades de filtración rápida y, por último, como parte de las obras emergentes de la primera fase de los Planes Maestros, en 1992, se construyó una unidad de floculación adicional y se mejoraron los sedimentadores. La planta, ubicada en la cota 2640 m.s.n.m. es de tipo convencional, con una capacidad nominal de tratamiento de 1000 l/s.

Esta planta abastece de agua potable a la ciudad de Cuenca con 2100000 m<sup>3</sup> por mes, beneficiando a 200 000 personas en la zona denominada Tomebamba – Machángara (centro histórico, sur y suroeste de la ciudad).



**Figura 2.1.4.** Planta de Tratamiento El Cebollar (Foto de ETAPA EP (2015a)).

### *Planta de Tratamiento Culebrillas*

El río Culebrillas conocido también como Sayausí es el principal afluente del río Tomebamba y durante el periodo 1949 – 1970 era la fuente de abastecimiento de la ciudad de Cuenca. La planta de tratamiento Culebrillas alimenta al sistema del mismo nombre, posee una capacidad para ocuparse con un caudal de 150 l/s.

La planta sirve a las zonas del Noroccidente de la ciudad de Cuenca que se encuentran a un nivel superior al de la planta El Cebollar. Tiene una producción de 300000 m<sup>3</sup> por mes sirviendo aproximadamente a 25000 personas con una proyección de 50000 usuarios.

## **2.2 Materiales**

### **2.2.1 Diseño de la Red de Monitoreo de la Precipitación**

El Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca, maneja el “Observatorio Ecohidrológico de Quinuas” ubicado en la cuenca del río Quinuas (94.1 km<sup>2</sup>) cubriendo parte del PNC, aproximadamente a 35 km al noroeste de la ciudad de Cuenca. El observatorio corresponde a un ecosistema de páramo que se extiende entre los 3100 y 4300 m.s.n.m. Cuenta con cuatro estaciones meteorológicas *Campbell Scientific* y una red de monitoreo de precipitación compuesta por cinco pluviómetros a lo largo de un transecto altitudinal (Universidad de Cuenca, 2015).

Paralelamente, ETAPA EP maneja su propia Red de Monitoreo Hidrometeorológico desde el año 1997. La modernización efectuada en el año 2013 permite el monitoreo del PNC, estudios de investigación científica, análisis de comportamiento de lluvias y mejoramiento de obras de colectores e interceptores en la ciudad de Cuenca mediante la información de 33 estaciones de última tecnología de las

cuales 14 son limnigráficas, 12 meteorológicas y 7 pluviométricas (ETAPA EP, 2015b).

A partir de estas redes de monitoreo hidrometeorológico la elección de los pluviómetros a usarse en el estudio se fundamentó en dos aspectos:

1. *La ubicación geográfica del sensor:* de manera que la red presente un diseño bien distribuido a lo largo de un transecto en la sub-cuenca de estudio, fundamentalmente respecto a las inter-distancias tanto horizontales como verticales entre pluviómetros. Dentro de esta consideración, los potenciales sensores de la red de estudio fueron aquellos en el trayecto Balzaín – Laguna La Toreadora.
2. *La disponibilidad de información confiable y coincidente:* de los diferentes pluviómetros disponibles de las dos redes. Este aspecto con la intención de realizar los análisis en un período de tiempo lo más amplio posible. Aquí también se tomó en cuenta la resolución del sensor, a través, de su marca.

A partir de las consideraciones descritas, la red de estudio finalmente constó de 5 pluviómetros de iDRHICA (4 de los cuales forman parte de estaciones meteorológicas) y 1 pluviómetro de ETAPA EP. Todos los pluviómetros de iDRHICA usados en el estudio son de la misma marca y resolución, mientras que el pluviómetro de ETAPA EP es diferente. Se describen a continuación estos dos tipos de pluviómetros.

#### - **TE525MM Tipping Bucket Rain Gage**

Fabricado por *Texas Electronics*, de alta precisión, registra tips en acumulaciones con una resolución de 0.1 mm. Su embudo tiene un diámetro de 24.50 cm. Es compatible y está conectado a un *datalogger Campbell Scientific* de la estación meteorológica o pluviométrica respectiva. Cuenta con un exterior de aluminio anodizado, además de un imán unido al mecanismo de *tipping* que actúa como interruptor mientras el balancín registra los *tips*. Los balancines son de plástico ABS con protección UV. El sensor pesa 2.4 lb, tiene una malla protectora sobre el embudo y tiene integrado un nivel para su instalación. Tiene una precisión de  $\pm 1\%$  para intensidades de hasta 10 mm/h y +0 a -5 % para intensidades entre 20 y 30 mm/h (Campbell Scientific Inc., 2015; Padrón, 2013). Los pluviómetros usados de la red de iDRHICA son de este tipo (Figura 2.2.1).



**Figura 2.2.1.** Exterior e interior del pluviómetro marca *Texas Electronics* modelo TE525MM.

### - Pluviomètre à auget basculeur 3032

Fabricado por *Précis Mécanique*, de alta precisión, registra *tips* en acumulaciones con una resolución de 0.5 mm. Su embudo tiene un diámetro de 22.57 cm. Es compatible con un *datalogger* de entrada analógica. De cubeta basculante, su tipo de contacto es una bombilla de mercurio sin rebote y muy fiable. Eficaz incluso en los fuertes vientos que acompañan a la precipitación. El fabricante no provee de información acerca de la precisión según la intensidad (*Précis Mécanique*, 2015). El pluviómetro usado de la red de ETAPA EP es de este tipo (Figura 2.2.2).



**Figura 2.2.2.** Exterior e interior del pluviómetro marca *Précis Mécanique* modelo 3032.

### 2.2.2 Pluviómetros de la Red de Monitoreo de la Precipitación

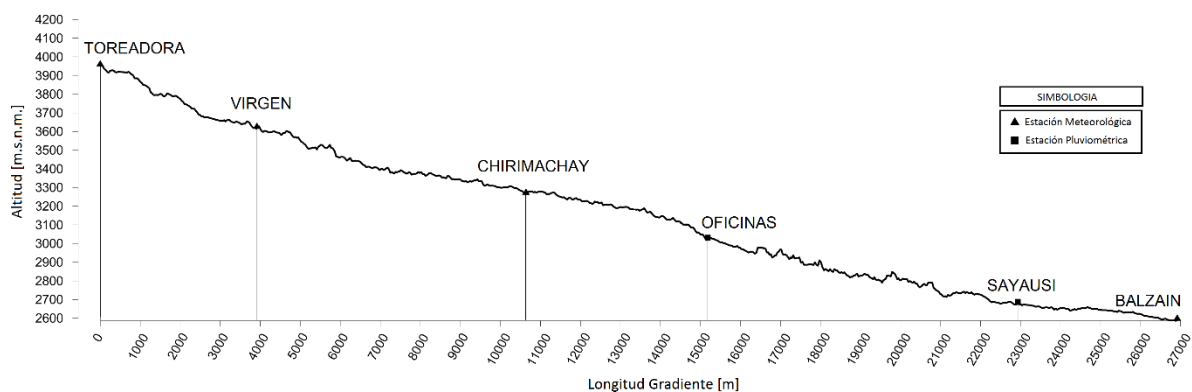
Para identificar los pluviómetros usados en el estudio se les asignaron nombres y un código de acuerdo a su ubicación geográfica. En la Tabla 2.2.1 se describe información a detalle, y un mapa con su ubicación se puede encontrar en la figura 2.1.1.



**Tabla 2.2.1.** Pluviómetros de la Red de Estudio en el transecto La Toreadora – Balzaín.  
\*Datum de Referencia: WGS84

Estación	Código	Red de Origen	Resolución (mm)	Coordenadas*		
				X	Y	Z
Balzaín	BAL	iDRHICA	0.1	718267	9680131	2610
Sayausí	SAY	ETAPA EP	0.5	714618	9681633	2693
Oficinas	OFI	iDRHICA	0.1	709549	9685136	3060
Chirimachay	CHI	iDRHICA	0.1	705704	9688895	3298
Virgen	VIR	iDRHICA	0.1	701111	9692382	3626
Toreadora	TOR	iDRHICA	0.1	697619	9692227	3955

La máxima distancia horizontal entre dos pluviómetros consecutivos es de 8 km (entre SAY y OFI) con una distancia media de 4.5 km. El rango altitudinal del diseño de la red varía entre los 2610 y 3955 m.s.n.m. La máxima diferencia en altura entre pluviómetros consecutivos es de 367 m (entre SAY y OFI nuevamente) y la diferencia media sin tomar en cuenta a BAL y SAY es de 316 m (Figura 2.2.3). Cabe recalcar que la configuración de la red propuesta no tiene precedentes en zonas alto-andinas y que los datos están poco explorados, presentando esta red de estudio características únicas que la hacen particularmente valiosa.



**Figura 2.2.3.** Perfil de la Gradiente Altitudinal en el transecto La Toreadora – Balzaín.  
(Figura adaptada del Prof. Galo Carillo – iDRHICA).

Tal como se describió en la sección 2.2.1, en la elección de los pluviómetros para el diseño de la red de estudio se tuvo en cuenta la disponibilidad de información confiable y coincidente registrada por los sensores escogidos de las redes de iDRHICA y ETAPA EP.

El pluviómetro Sayausí (SAY) está en operación desde julio de 1997, año en el ETAPA EP comenzó su monitoreo hidrometeorológico. Los pluviómetros de iDRHICA, Chirimachay (CHI) y Toreadora (TOR) se instalaron y registran datos desde finales del año 2012; mientras que Virgen (VIR) registra precipitación desde marzo del 2013. Los pluviómetros Balzaín (BAL) y Oficinas (OFI) son los más recientes en haberse instalado y registran datos desde enero de 2014.

El almacenamiento de información de SAY es instantáneo, es decir, se registra en el *datalogger* la hora exacta cuando se acumulan 0.5 mm de precipitación en el balancín del pluviómetro y se produce el *tip*. Para todos los pluviómetros de iDRHICA el almacenamiento es de *tips* (0.1mm) por minuto.

En las estaciones meteorológicas de iDRHICA se cuenta con pluviómetros pares de diferentes marcas y resoluciones (*Davis* – 0.254 mm y *Onset* – 0.2 mm). En SAY el pluviómetro par instalado es de marca *Texas Electronics*, sin embargo, no estaba funcionando correctamente y se descartó del estudio.

De acuerdo a estas limitaciones y con el objetivo de realizar el estudio en al menos un año hidrológico completo, se escogió el período marzo 2014 – febrero 2015 para los diferentes análisis.

### **2.2.3 Calibración y Control de Calidad**

#### **Calibración de Pluviómetros**

Es importante realizar una calibración cuidadosa de los pluviómetros para asegurar mediciones correctas tanto de intensidades como de volúmenes totales (Overgaard, El-Shaarawi, & Arnbjerg-Nielsen, 1998). Los pluviómetros de balancín subestiman el volumen de la precipitación, pero no necesariamente en toda la gama de medición (el efecto es potenciado en intensidades extremas) (Luyckx & Berlamont, 2001; Vasvári, 2005).

La calibración de los pluviómetros usados en el estudio se realizó personalmente y con la colaboración del personal de iDRHICA el día martes 1 de septiembre del 2015. Adicionalmente factores de calibración del año 2014 estaban disponibles en las bases de datos, tanto de iDRHICA como de ETAPA EP.

Información acerca del proceso de calibración, así como los valores de los Factores de Corrección (FC) obtenidos se encuentran en el Anexo 1. Los Fc se usaron respectivamente para todos los registros anteriores a su obtención. En cuanto a las diferencias entre volúmenes totales registrados y corregidos mediante los Fc, estos valores resultan entre -50 mm en SAY hasta +110 mm en TOR (representando entre el -4.4% y 9.4% del volumen anual de precipitación).

#### **Control de Calidad de las Series**

Luego de la calibración, como metodología previa al uso de la información de la red pluviométrica conformada, se efectuó un esfuerzo considerable en el escrutinio de las series para garantizar la calidad de los resultados obtenidos con los análisis posteriores. Este control de calidad está referido a la construcción de bases de datos correctamente conformadas. Información detallada de la metodología aplicada y los resultados obtenidos pueden encontrarse en el Anexo 1.

Todos los datos perdidos o dudosos fueron omitidos de los análisis debido a la naturaleza y a los objetivos del estudio. La serie del pluviómetro OFI fue la que presentó la mayor cantidad de información perdida, con un total del 3% de datos

omitidos, que equivalen a 11 días del año de estudio. Para el resto de series, los vacíos representan menos de una hora de información perdida. El uso de los datos de los pluviómetros pares de las estaciones de monitoreo no fue necesario.

## 2.3 Métodos

### Metodología de Análisis

Para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en la gradiente altitudinal se opta por abordar el estudio mediante metodología específica de acuerdo a las diferentes escalas temporales de acumulación propuestas. Cada método aporta con resultados específicos al objetivo general del estudio.

#### 2.3.1 Resumen de los Métodos

Debido a la cantidad de análisis realizados, se presenta primeramente un resumen de la metodología aplicada respectiva. Más adelante, se explica a detalle cada método.

##### 2.3.1.1 Escala Anual – Estacional

- **Regímenes de Precipitación:** se grafican las series mensuales con el objetivo de comparar, discutir y clasificar los regímenes de precipitación, en función de la altitud.
- **Variabilidad de la Estacionalidad:** se calcula el Índice de Estacionalidad para determinar su variabilidad en la gradiente en el período de estudio, mas no para clasificar a los regímenes de precipitación debido al corto período de observación.
- **Lluvia acumulada a lo largo del año:** estudiada mediante gráficos de volúmenes acumulados de los registros de los diferentes pluviómetros en el año de estudio. Contribuye al análisis de regímenes.

##### 2.3.1.2 Escala Mensual

- **Variabilidad de la Correlación Espacial Unidireccional:** con referencia al pluviómetro de mayor altitud se calculan los índices de correlación de Spearman, se grafica el correlograma correspondiente y se conforma la matriz de correlación de la gradiente.

##### 2.3.1.3 Escala Diaria

- **Variabilidad de la Intensidad:** mediante diagramas de caja y bigotes, colocados uno al lado del otro según la altitud. Se analiza por estaciones trimestrales y anualmente.
- **Análisis de Valores Extremos:** estudiados con la curva de porcentaje de excedencia de cada pluviómetro de la gradiente, determinando umbrales de excedencia de intensidad, así como su variabilidad con la altura.

- **Dinámica y Evolución de Períodos Lluviosos:** a partir de la identificación previa, es estudiada mediante gráficos de volúmenes acumulados.
- **Distribución de Días Secos:** se realiza un análisis exploratorio variando el umbral de definición de día seco. Se estudia su porcentaje anual, además de su variabilidad en la gradiente.
- **Dinámica y Evolución de Períodos de Sequía:** analizados con el apoyo de gráficos de contorno.

#### 2.3.1.4 Eventos Representativos

- **Variabilidad de las Propiedades:** de la duración, profundidad, intensidad y tiempo entre eventos, se obtienen los diagramas de caja y bigotes, para estudiar la estructura de la precipitación en la gradiente.

#### 2.3.1.5 Escala Horaria

- **Variabilidad Intra-Diaria:** de la distribución del porcentaje de precipitación diaria según la hora del día en cada uno de los días del año de estudio. Mediante gráficos de contorno, combinando el análisis con gráficos del promedio anual de estos porcentajes para cada estación pluviométrica de la gradiente.

### 2.3.2 Descripción de los Métodos

#### 2.3.2.1 Escala Anual – Estacional

La metodología aplicada en esta sección se refiere al año hidrológico de estudio, a través de acumulaciones de la precipitación para cada pluviómetro. Se estudia así la variabilidad interanual y estacional en la gradiente.

#### **Análisis de Regímenes de Precipitación**

Graficar series temporales son siempre un buen comienzo para la investigación de datos, pues se incrementa el conocimiento acerca de ellos y es posible detectar sus componentes esenciales. Proporcionan un resumen rápido de los datos y describen la información esencial mejor que tablas de números.

Siendo consecuentes con el período de estudio, se grafican las series mensuales con un objetivo descriptivo: identificar (de ser posible) patrones de comportamiento en los regímenes de precipitación anual y estacionales a lo largo de los pluviómetros de la gradiente.

Los regímenes de precipitación en el páramo y en el valle interandino han sido descritos previamente en las secciones 2.1.1 y 2.2.2. Comparar, discutir y clasificar los regímenes de precipitación, en función de la altitud, fue el resultado derivado de este análisis.

#### **Variabilidad de la Estacionalidad: Índice de Estacionalidad**

La estacionalidad de la precipitación se refiere a su grado de variabilidad mensual a lo largo del año (Walsh & Lawler, 1981). La distribución de la precipitación puede

variar desde una concentración en pocos meses, hasta una distribución uniforme a lo largo del año.

Se calcula el “Índice de Estacionalidad” (SI, por sus siglas en inglés) desarrollado por Walsh & Lawler, (1981), el cual se define según la Ecuación 2.1.

$$SI = \frac{1}{\bar{R}} \sum_{n=1}^{n=12} |\bar{x}_n - \bar{R}/12| \quad (2.1)$$

donde  $\bar{x}_n$  = promedio de precipitación del mes  $n$  y  $\bar{R}$  = promedio de precipitación anual.

Este índice provee de una medida de la dispersión de la precipitación mensual con respecto a una distribución ideal uniforme de la precipitación en los 12 meses (Célleri et al., 2007). Los autores del SI establecen una clasificación de los regímenes de precipitación de acuerdo su valor.

Sin embargo, clasificar los regímenes de precipitación de la gradiente con solamente un año de datos no es correcto ni concluyente. Por ejemplo, en Célleri et al. (2007) se llegan a conclusiones acerca de estacionalidad mediante el SI calculado con al menos 30 años de datos. Es por esto que el SI obtenido para los diferentes pluviómetros de la gradiente no se usa para definir el tipo de régimen de precipitación de cada uno, sino más bien para determinar su variabilidad a lo largo del transecto.

### **Lluvia acumulada a lo largo del año: Gráfico de Volúmenes Acumulados**

A partir de datos horarios, éstos son acumulados en todo el período de análisis. Se obtiene entonces el gráfico de volúmenes acumulados para cada uno los pluviómetros de la gradiente.

Dichos gráficos permiten observar y describir la dinámica de la precipitación en el tiempo. Períodos de sequía equivalen a tramos de la curva con pendiente nula o casi nula, mientras que períodos lluviosos son identificados cuando la pendiente aumenta.

Semejanzas y diferencias en los volúmenes acumulados a lo largo del tiempo a diferentes altitudes en la gradiente, permiten comparar, discutir y clasificar los regímenes de precipitación identificados.

#### **2.3.2.2 Escala Mensual**

Se acumulan los datos de cada una de las series de precipitación en el mes en el que son registradas, para obtener el volumen mensual respectivo. Se estudia el grado de correlación espacial de esta información entre los pluviómetros de la gradiente altitudinal mediante el método descrito a continuación.

## Variabilidad de la Correlación Espacial Unidireccional: Matriz de Correlación – Correlograma Unidireccional

La correlación se usa como una medida no-dimensional de la dependencia estadística (Krajewski et al., 2003). Los coeficientes de correlación miden la fuerza de asociación entre dos variables continuas, permitiendo entonces describir las dependencias espaciales del proceso de precipitación (Villarini et al., 2008).

El coeficiente  $r$  de Pearson es comúnmente usado para la evaluación de la variabilidad espacial de la precipitación, por ejemplo, se aplica en: Chen et al. (2015); Habib, Krajewski, & Ciach (2001); Krajewski et al. (2003); Pedersen et al. (2010) y Villarini et al. (2008). Sin embargo, asume una distribución normal en los datos, a pesar de que es bien conocido que datos sesgados resultarán en estimaciones de correlación sesgadas. El uso del coeficiente  $\rho$  de Spearman es una alternativa adecuada pues al ser no paramétrico, depende solamente del orden y no de los valores de los datos en sí, sin asumir ningún tipo de distribución (Habib et al., 2001).

Para calcularlo, los datos de las dos variables son ordenados y reemplazados por su respectivo orden de manera independiente entre ellos. Para el orden de los valores de  $x$  ( $Rx_i$ ) y de los valores de  $y$  ( $Ry_i$ ),  $\rho$  se calcula con la ecuación 2.2.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (Rx_i - Ry_i) - n \left( \frac{n+1}{2} \right)^2}{n(n^2-1)/12} \quad (2.2)$$

donde  $(n+1)/2$  es el orden promedio de ambos  $x$  e  $y$ . Valores iguales en  $x$  o  $y$  son asignados con órdenes promedio (Helsel & Hirsch, 2002).

Se calcula entonces la matriz triangular de correlación de los pluviómetros de la gradiente, es decir, la correlación unidireccional entre las series. Con referencia al pluviómetro de mayor altitud (TOR), se calculan los coeficientes de correlación con los pluviómetros ubicados a menor altitud, y así sucesivamente para todas las ubicaciones. Se grafican los valores calculados con referencia a este pluviómetro más alto, obteniendo un correlograma unidireccional de los datos mensuales de precipitación de la gradiente.

Los valores de los coeficientes de correlación y la forma del correlograma dependen de la escala temporal de análisis y de la intensidad de la precipitación. Para escalas de agregación pequeñas se ve afectada la forma del correlograma, mientras para escalas temporales más grandes permanece aproximadamente constante (Ciach & Krajewski, 2006).

Se escogió la escala de agregación mensual pues la intención fue estudiar la variabilidad de la correlación espacial en la gradiente altitudinal. Las características espaciales obtenidas pueden ser muy informativas y la aplicación de este método es interesante pues se deriva directamente de observaciones con pluviómetros.



### 2.3.2.3 Escala Diaria

El valor obtenido para precipitación diaria representa la cantidad de precipitación entre las horas 1 y 24 del día en cuestión. Se estudia la variabilidad de la intensidad diaria de la precipitación en la gradiente, la dinámica sus períodos lluviosos/secos y variabilidad en la distribución de los días secos en el año. Estos datos son importantes para entender las respuestas hidrológicas de las cuencas.

#### **Variabilidad de la Intensidad: Diagramas de Caja y Bigotes**

Los diagramas de caja son una herramienta gráfica muy útil y concisa para resumir la distribución de una serie de datos y de sus características esenciales. Proveen información de: la mediana (línea central de la caja), el rango intercuartil (alto de la caja), el sesgo (tamaño relativo de las mitades de la caja), y de la presencia de valores inusuales (valores atípicos). Son bastante útiles al comparar estos atributos entre varias series de datos, a menudo poniéndose uno junto a otro para realizar una comparación y contraste visual (Helsel & Hirsch, 2002).

Se obtienen los diagramas de caja de las intensidades diarias de precipitación, para todo el año de estudio y también por estaciones trimestrales (DEF-MAM-JJA-SON). Estos diagramas son puestos uno al lado del otro según la altitud del pluviómetro para poder analizar cómo varían estas propiedades en la gradiente.

#### **Análisis de Valores Extremos: Curva de Porcentaje de Excedencia**

Estos gráficos proveen de información acerca de la distribución de los datos, así como de los valores extremos. Permiten además la estratificación de la información de acuerdo a la imposición de umbrales de excedencia del parámetro de construcción de la curva.

Se grafican, describen y comparan las curvas de porcentaje de excedencia para cada una de las series de los pluviómetros de la gradiente. Información sobre la probabilidad de exceder cierto umbral de intensidad diaria de precipitación es obtenida y analizada en función de la altura.

#### **Dinámica y Evolución de Períodos Lluviosos: Gráfico de Volúmenes Acumulados**

Al partir de los resultados de la sección 2.3.2.1, se identifican los períodos lluviosos más representativos del período de estudio. Con los volúmenes diarios y sus respectivos gráficos de volúmenes acumulados, se relata la dinámica (patrones) de estos períodos en su tiempo de duración y su evolución en la gradiente.

#### **Distribución de Días Secos**

El término sequía puede tener definiciones tanto conceptuales como operacionales. Definiciones operacionales sirven para analizar su frecuencia, severidad y duración en un determinado período histórico. A menudo la sequía se define de acuerdo a un punto de vista disciplinario. En el estudio de Wilhite & Glantz (1985), en el que

han revisado más de 150 definiciones publicadas y que ha sido citado más de un millar de veces, se identifican cuatro tipos de sequías: meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica (las 3 primeras tratan de medir la sequía como un fenómeno físico).

Para definir un día seco es necesario el establecimiento de un valor umbral. El criterio escogido para determinar este umbral debe indicarse explícitamente para que la definición pueda ser evaluada y sea aplicable a otras zonas (Wilhite & Glantz, 1985). Un día es meteorológicamente seco si en ese día no se registra precipitación (0 mm). Mientras tanto, un día es hidrológicamente seco si la precipitación registrada es menor a 1 mm (Célleri, 2007). Si se toma en cuenta la resolución del sensor, los días con precipitación menor a esta resolución, se consideran secos (Buytaert, Célleri, Willems, et al., 2006).

Con estos antecedentes, se realiza en primer lugar un análisis exploratorio los datos de precipitación diaria en la gradiente, variando el umbral para la definición de días secos. A partir de este análisis se estudia el porcentaje de días secos en el año, además de la variabilidad y evolución de los períodos de sequía en la gradiente.

### **Dinámica y Evolución de Períodos de Sequía: Gráficos de Contorno**

Los gráficos de contorno permiten explorar la posible relación entre tres variables mostrando la relación tridimensional en dos dimensiones. En la sección 2.3.2.5 se describe con mayor amplitud este método.

En este punto, se usan estos gráficos para mostrar la distribución de los días secos (con criterio meteorológico) en los meses del año de estudio. El eje X representa los meses desde marzo 2014 a febrero 2015, el eje Y representa cada uno de los días de cada mes y los días secos se representan por los contornos.

#### **2.3.2.4 Eventos Representativos**

Se ha identificado un vacío respecto a la información de las propiedades de eventos de precipitación en el páramo y tampoco se encontraron estudios respecto a su distribución espacio-temporal en los ecosistemas de la zona de estudio.

Definir un evento y analizar tanto sus propiedades como su variabilidad espacio-temporal es esencial para una correcta interpretación del tipo de precipitación en determinada región geográfica (Barbosa, 2014). Análisis sistemáticos de la precipitación a escala sub-diaria pueden usarse para la detección y el entendimiento de cambios ambientales con consecuencias eco-hidrológicas. Cambios en las propiedades de los eventos tienen implicaciones en fenómenos como erosión, infiltración, generación de flujo superficial y otros aspectos del funcionamiento de un ecosistema (Dunkerley, 2008).

Los criterios para la identificación de eventos dependen de la naturaleza de la precipitación y se basan en valores umbrales para propiedades específicas de



dichos eventos usando generalmente duración, intensidad, profundidad mínima y tiempo mínimo entre eventos (Barbosa, 2014; Dunkerley, 2008; Haile, Rientjes, Habib, Jetten, & Gebremichael, 2011).

Explorando los datos y de acuerdo a la experiencia de investigadores que trabajan con información de ecosistema páramo se ha determinado que, para efectos de caracterización de la precipitación, el tiempo entre eventos no tiene mayor incidencia en los histogramas de frecuencias de eventos a nivel mensual o incluso de clasificación de lluvia. Sin embargo, la profundidad mínima y la duración son parámetros a calibrar y afectan los resultados al identificar eventos (Orellana-Alvear, Célleri, Fries, & Bendix, 2015). Se determinan las siguientes condiciones para identificar un evento:

- Profundidad Mínima = 1 mm
- Duración Mínima = 5 minutos
- Tiempo Mínimo entre Eventos = 30 minutos

El umbral de profundidad mínima es el comúnmente usado y recomendado en la bibliografía. La duración mínima se escogió con la finalidad de no pasar por alto eventos de corta duración en la gradiente (especialmente en la cuenca baja). El tiempo mínimo entre eventos escogido se fundamenta en el hecho de que en el páramo se esperan eventos de baja intensidad. Estos umbrales se han usado previamente con éxito en un estudio en zonas de páramo andino (Padrón, 2013).

Hay que recordar que el análisis de eventos en redes de pluviómetros añade varias complicaciones, entre ellas la posibilidad de diferencias en el tiempo de aparición y terminación del evento entre los diferentes pluviómetros a través de la red, así como la variación espacial de sus propiedades (Dunkerley, 2008).

Para la separación de eventos a partir de las series de datos con escala cada minuto se usó un script desarrollado en iDRHICA, en el interfaz de programación R. Una vez obtenida la información de los eventos ocurridos durante los períodos lluviosos identificados en secciones anteriores que se consideran representativos, esta es procesada para identificar relaciones, semejanzas y/o diferencias en sus propiedades a lo largo de la gradiente. Con esto se estudia la estructura de la precipitación en función del cambio de altitud y de ecosistema.

### **Variabilidad de las Propiedades: Diagramas de Caja y Bigotes**

Con la misma metodología de la sección 2.3.2.3, se obtienen y analizan los diagramas de caja de las diferentes propiedades para cada grupo de eventos derivados de las series respectivas. Semejanzas, diferencias y tendencias de estas propiedades en la gradiente según la altitud son descritas.



### 2.3.2.5 Escala Horaria

Se estudia la variabilidad intra-diaria de la precipitación según el mes, para cada pluviómetro de la gradiente.

#### **Variabilidad Intra-Diaria: Gráficos de Contorno**

Como se mencionó anteriormente, los gráficos de contorno permiten explorar la relación entre tres variables mostrando la relación tridimensional en dos dimensiones. En los ejes vertical y horizontal están las 2 variables independientes respectivas, mientras que las líneas son los valores de iso-respuesta a estas variables.

Los gráficos de contorno se usan aquí para estudiar la variabilidad de la distribución intra-diaria del porcentaje de precipitación diaria según la hora en los diferentes meses del año. El eje X representa los días en cada uno de los meses desde marzo 2014 a febrero 2015, el eje Y representa las 24 horas de cada día, y las líneas de contorno representan el porcentaje de precipitación diaria según la hora a la cual se registra precipitación.

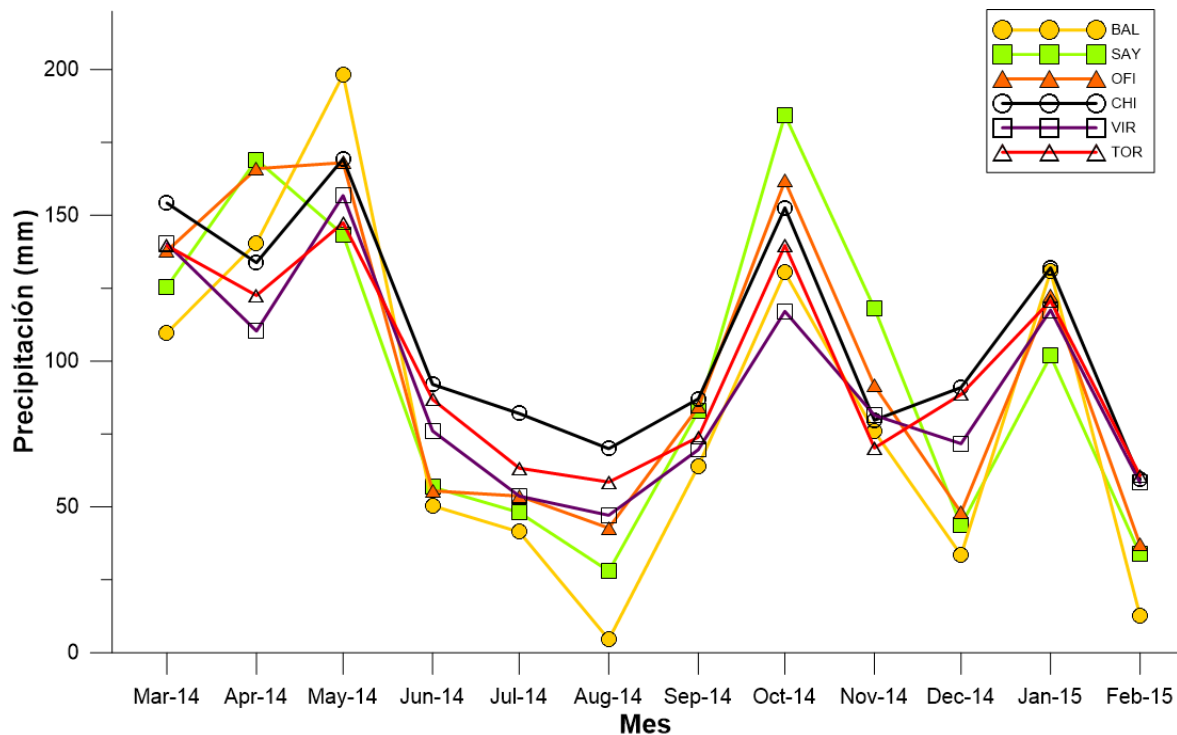
Gráficos del promedio anual de estos porcentajes horarios se analizan en conjunto con los gráficos de contorno para cada estación pluviométrica de la gradiente.

## CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Escala Anual – Estacional

#### Regímenes de Precipitación

Se identificaron los regímenes en la gradiente como bimodales, con picos de precipitación en mayo y en octubre. La estación seca marcada se identifica en JJA. Un aparente tercer pico de precipitación puede observarse en enero (Figura 3.1.1).



**Figura 3.1.1.** Regímenes de precipitación de la gradiente altitudinal de estudio.

Todos los pluviómetros de la gradiente presentan régimen bimodal, sin embargo, la variación en los volúmenes de precipitación para un mismo mes entre un pluviómetro y otro, durante las épocas lluviosas y de sequía permiten una subclasificación de regímenes en dos grupos (Figura 3.1.2):

#### - Grupo I – Régimen Bimodal 1 (BM1)

Conformado por los pluviómetros Balzay, Sayausí y Oficinas (bajo los 3060 m.s.n.m.), en donde los regímenes de precipitación muestran volúmenes semejantes durante todo el año. Las diferencias entre los volúmenes de un mismo mes en este grupo presentan un promedio de 19.60 mm, con una máxima diferencia porcentual de 28% (54.85 mm) y una mínima de 2% (1.27 mm).

Durante la época seca (JJA) la precipitación registrada es más baja que para el otro grupo; mientras que en los picos lluviosos de mayo y especialmente de octubre, los volúmenes mensuales son los mayores de la gradiente.

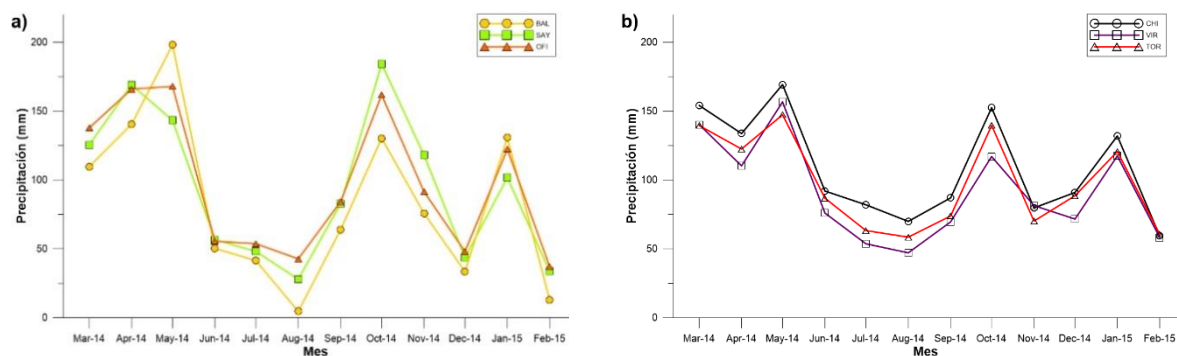
Adicionalmente, para un mismo pluviómetro de este grupo, la mayor diferencia entre el mes más seco (agosto) y más lluvioso (mayo) es de 193.63 mm en el caso de Balzay.

### - Grupo II – Régimen Bimodal 2 (BM2)

Un segundo grupo está conformado por los pluviómetros Chirimachay, Virgen y Toreadora (sobre los 3300 m.s.n.m.). Como puede constatarse en la Figura 3.1.2, al igual que en el caso anterior, la distribución y variabilidad en la lluvia mensual de este grupo son semejantes entre sí. Las diferencias en los volúmenes para un mismo mes presentan un promedio de 13.38 mm, con una máxima diferencia porcentual de 23% (35.48 mm) y una mínima de 0.5% (1.14 mm).

Aunque se distingue la misma época seca (JJA), esta no presenta volúmenes tan bajos como en el régimen del grupo I (e.g. el mínimo volumen en agosto es 47.13 mm para VIR mientras que para BAL es 4.57 mm). Así mismo, los picos lluviosos de mayo y octubre no son tan pronunciados.

La mayor diferencia entre el mes más seco (febrero) y más lluvioso (mayo) es de 109.93 mm en el caso de Chirimachay. Sin embargo, este volumen del mes más seco casi 5 veces mayor que aquel correspondiente al mismo mes de BAL.



**Figura 3.1.2.** Regímenes de precipitación: a). Bimodal 1 (BM1) y b). Bimodal 2 (BM2) de la gradiente altitudinal de estudio.

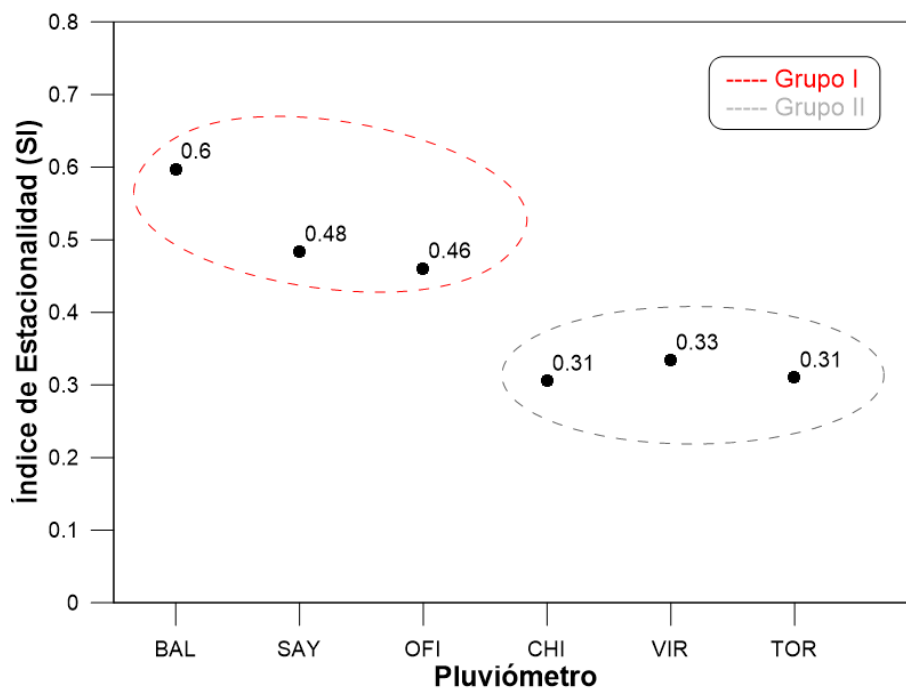
Los regímenes identificados (figura 3.1.2) coinciden con la categorización propuesta por Célleri et al. (2007). El régimen BM1 está efectivamente presente bajo los 3000 m.s.n.m. en la depresión inter-andina (los pluviómetros de este grupo se encuentran bajo los 3060 m.s.n.m.), con volúmenes de precipitación anual entre 991.79 mm (BAL) y 1168.90 mm (OFI). Mientras tanto, el régimen BM2 se presenta en los pluviómetros sobre los 3300 m.s.n.m. con los períodos secos y lluviosos mencionados, y con volúmenes anuales entre 1099.73 mm (VIR) y 1303.03 mm (CHI), cercanos al límite superior de Guzmán (2004) para el PNC.

Se puede observar que para el régimen BM1 del grupo I, la estación seca JJA presenta volúmenes de precipitación menores que para el régimen BM2 del grupo II. De la misma manera los picos lluviosos tienen mayor magnitud en el grupo I que

en el grupo II. Diferencias en volúmenes entre el mes más seco y más lluvioso son más acentuadas en el grupo I, mientras que en el grupo II los volúmenes mensuales son menos variables a lo largo del año.

### Variabilidad de la Estacionalidad

Se calculó el Índice de Estacionalidad (SI) del año de estudio para cada pluviómetro de la gradiente. Como se puede observar en la figura 3.1.3, mientras se va ganando altura, el SI disminuye su valor. Un salto negativo importante en los valores del índice obtenidos para los tres pluviómetros más altos de la gradiente respecto a OFI se identifica con claridad.



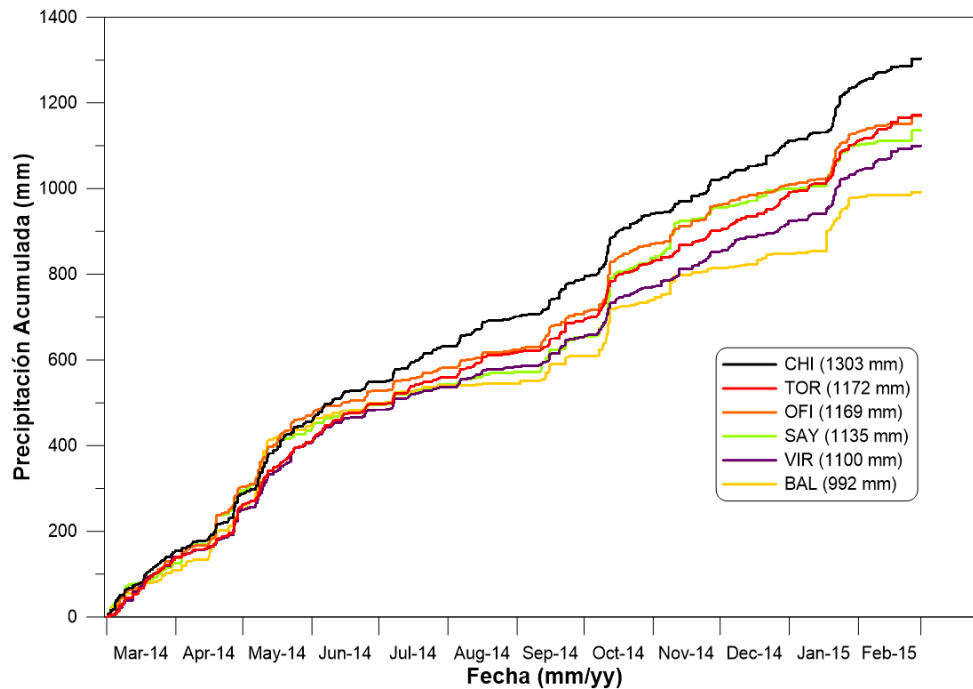
**Figura 3.1.3.** Índices de Estacionalidad (SI) para los pluviómetros de la gradiente.

A partir del salto entre los SI de OFI y CHI, y por resultar en valores parecidos entre sí, se puede clasificar a los SI de la gradiente en los mismos dos grupos que para los regímenes de precipitación. El grupo I (BAL, SAY y OFI), conformado por los pluviómetros instalados bajo los 3060 m.s.n.m. presenta SI mayores a 0.46; mientras tanto el grupo II (CHI, VIR y TOR), con pluviómetros instalados sobre los 3300 m.s.n.m. tiene índices semejantes con un valor promedio de 0.32.

Estos resultados indican que para el grupo II la precipitación presenta una distribución más uniforme a lo largo del año que para el grupo I: es decir, las diferencias entre los volúmenes de los meses más secos y más lluviosos son más notorias para el grupo I que para el grupo II, tal como ya se había apreciado en la clasificación de los regímenes. La estacionalidad es menos pronunciada a elevaciones mayores, tal como lo señalado por Céleri et al. (2007).

### Lluvia Acumulada a lo largo del año

En la figura 3.1.4 se observa que los volúmenes anuales de precipitación son variables en la gradiente, y no necesariamente una mayor altitud significa mayor cantidad de precipitación anual. El pluviómetro CHI es el que registró mayor volumen anual, mientras que TOR, OFI, SAY y VIR presentaron volúmenes en el rango 1100 – 1172 mm. Finalmente BAL presentó el menor volumen anual. Entre CHI y BAL existe una diferencia considerable de 311.2 mm, lo que representa un aproximadamente un 30% de precipitación más en CHI que en BAL.

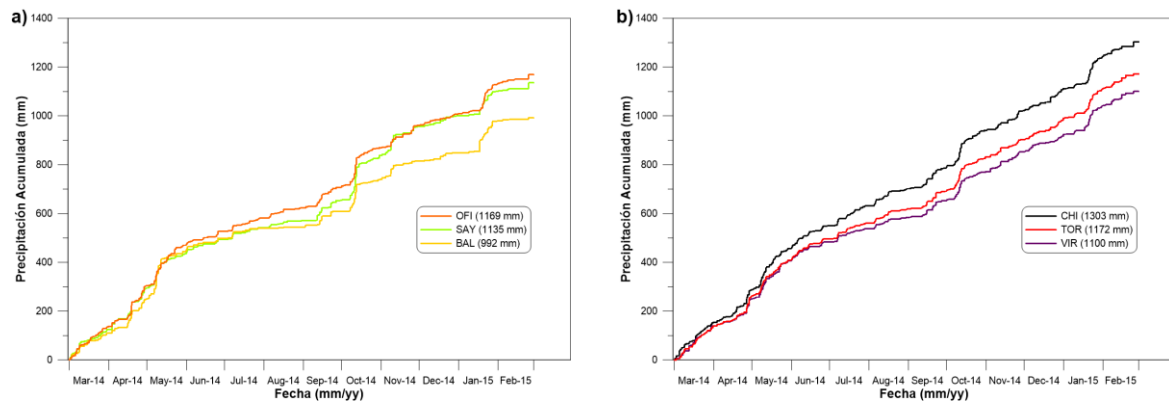


**Figura 3.1.4.** Precipitación horaria acumulada para los pluviómetros de la gradiente.

Lo destacable de la figura 3.1.4 es la dinámica de los períodos secos y lluviosos registrados por los diferentes pluviómetros a lo largo del año. Luego de analizar el gráfico, se separó a los pluviómetros nuevamente en dos grupos (Figura 3.1.5):

#### - Grupo I

Los pluviómetros OFI, SAY y BAL presentan el mismo comportamiento en la dinámica de acumulación del volumen de precipitación en el tiempo. En este grupo los cambios de pendiente en la curva son notables (en al menos cuatro puntos, los mismos que fueron estudiados a detalle en la sección 3.3). Estos cambios fuertes en la pendiente de la curva de acumulación representan períodos lluviosos.



**Figura 3.1.5.** Precipitación Acumulada Horaria: Grupo I y b). Grupo II. Para el grupo II el cambio de pendientes es menor que para el grupo I.

### - Grupo II

Los pluviómetros CHI, TOR y VIR conforman este segundo grupo, en donde la variación de la pendiente en las acumulaciones es mucho menos marcada. No se identifican períodos de sequía con pendiente tan baja como para el grupo I, sino más bien una tendencia en la acumulación casi constante.

Nuevamente la clasificación resultó en los mismos dos grupos que con los métodos anteriores. Para el grupo I (pluviómetros bajo los 3060 m.s.n.m.), los regímenes de acumulación anual presentaron un comportamiento más variable que para el grupo II, siendo la tendencia en la acumulación más constante en este segundo grupo lo que sugiere que la precipitación en la gradiente sobre los 3300 m.s.n.m. está más distribuida a lo largo del año. Sin embargo, en cuanto a volúmenes anuales, dos extremos son identificados: CHI y BAL con una diferencia algo mayor al 30% entre ellos; mientras tanto, los pluviómetros restantes en la gradiente registran volúmenes semejantes en el rango 1100 – 1172 mm. La mayor cantidad de precipitación se registra a una altitud de 3300 m.s.n.m. (exactamente en la mitad de la gradiente), con un volumen 11% mayor que para el pluviómetro que registra el siguiente volumen más alto en la gradiente (TOR).

## 3.2 Escala Mensual

### Variabilidad de la Correlación Espacial Unidireccional

Debido a que la región de páramo es caracterizada por intensidades de precipitación bajas (Padrón, 2013), y a que es probable que los resultados de correlación espacial a escalas de acumulación pequeñas se vean afectados por incertidumbres en la medición (Villarini et al., 2008), se calculó la matriz de correlación con volúmenes mensuales (Tabla 3.2.1).

La correlación unidireccional entre OFI y los dos pluviómetros más abajo (SAY y BAL, que conforman el grupo I) resultó en valores mayores a 0.916 (0.945 promedio), es decir, los regímenes de precipitación mensuales son muy parecidos entre sí. La correlación unidireccional entre los pluviómetros TOR, VIR y CHI (grupo

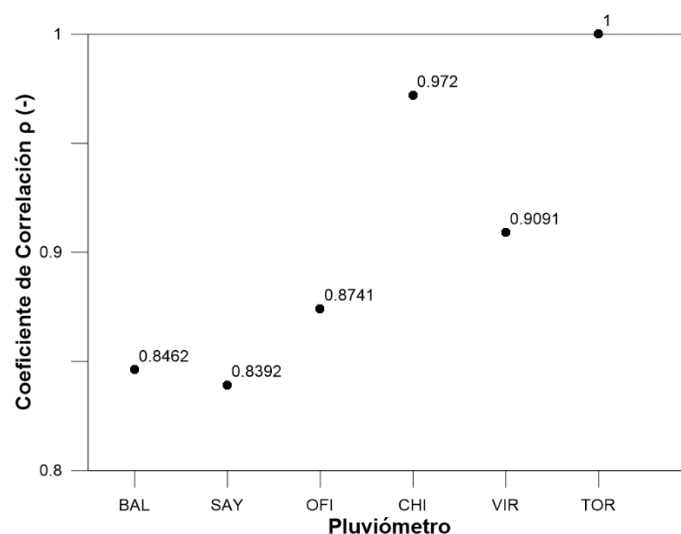


II) y los del grupo I, está en el rango 0.797 – 0.888. La correlación promedio entre TOR y los dos pluviómetros más abajo (VIR y CHI, grupo II) resulta en 0.921, siendo un poco menor que para el grupo I.

**Tabla 3.2.1.** Matriz triangular inferior de correlación entre los volúmenes mensuales de precipitación de los pluviómetros de la gradiente.

	BAL	SAY	OFI	CHI	VIR	TOR
<b>BAL</b>	1.000					
<b>SAY</b>	0.916	1.000				
<b>OFI</b>	0.972	0.958	1.000			
<b>CHI</b>	0.825	0.797	0.867	1.000		
<b>VIR</b>	0.888	0.825	0.874	0.881	1.000	
<b>TOR</b>	0.846	0.839	0.874	0.972	0.909	1.000

En cuanto al correlograma de la figura 3.2.1 respecto al pluviómetro de mayor altitud en la gradiente (TOR), la tendencia general es de una menor correlación mientras aumenta la distancia – altura de separación entre pluviómetros. Sin embargo, es importante destacar que los coeficientes de correlación obtenidos son altos a pesar de que las distancias de separación inter-pluviómetros son de hasta 27 km. Esto confirma que los pluviómetros en la gradiente altitudinal están en el mismo régimen general (bimodal), pero con diferencias entre ellos.



**Figura 3.2.1.** Correlograma unidireccional de los volúmenes mensuales de precipitación de la gradiente con referencia al pluviómetro de mayor altitud (TOR).

### 3.3 Escala Diaria

#### Variabilidad de la Intensidad

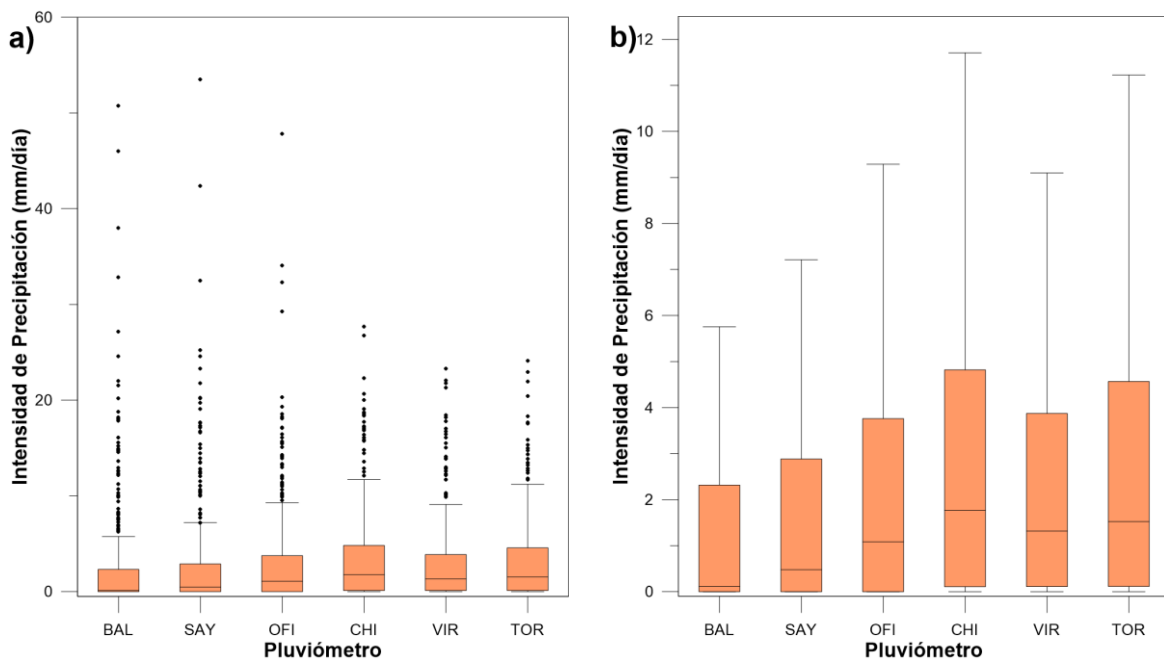
La figura 3.3.1.a ilustra la variabilidad de la lluvia diaria, donde se evidencia principalmente los valores atípicos u *outliers*. Mientras tanto, la figura 3.3.1.b (sin *outliers*), permitió describir la variabilidad de valores centrales de la intensidad, así como su dispersión y simetría entre los diferentes pluviómetros de la gradiente.



Para este análisis, se separaron a los pluviómetros en los dos grupos de las secciones anteriores con los siguientes resultados:

### - Grupo I

Los pluviómetros el grupo I (BAL, SAY y OFI) mostraron un promedio de 50 valores atípicos cada uno, los mismos que representan alrededor del 14% de los días del año. Estos *outliers* están en un amplio rango, desde 6 mm/día hasta 54 mm/día, siendo poco comunes en el año intensidades mayores a 30 mm/día, sin embargo, éstas se presentaron en los tres pluviómetros. Tanto la mediana como el límite superior de la caja respectiva incrementan conforme se gana altitud. El rango intercuartílico crece de 2.43 mm/día en BAL hasta 3.78 mm/día en OFI, lo que significa que para mayores altitudes en este grupo hay una mayor variabilidad en la intensidad diaria de precipitación.



**Figura 3.3.1.** Diagramas de caja de la Intensidad de Precipitación Diaria Anual para los pluviómetros de la gradiente: a) Con valores atípicos, y b) Sin valores atípicos.

### - Grupo II

Los pluviómetros del grupo II (CHI, VIR y TOR) mostraron un promedio de 27 *outliers* (7% de los días del año), desde los 10 mm/día hasta 28 mm/día. Intensidades mayores a 30 mm/día no se observaron en este grupo. La mediana y el percentil 75 alcanzaron sus máximos para la gradiente en el pluviómetro CHI, a partir del cual estos valores decrecen un tanto, pero se mantienen para los dos pluviómetros más altos. De hecho, la mediana y el rango intercuartílico presentaron valores semejantes con promedios de 1.54 mm/día y 4.31 mm/día respectivamente. Aunque OFI no comparte las características de los valores atípicos con este grupo,

el rango inter-cuartílico y la mediana de los datos anuales son parecidos especialmente para lo obtenido en VIR.

A partir de este análisis, se puede decir que en el grupo I se presentan días especialmente lluviosos con intensidades bastante altas (hasta 54 mm/día), en contraste con el grupo II en donde los valores de precipitación no superan los 30 mm/día. Existen de hecho diferencias sustanciales en los volúmenes diarios, tal como lo encontrado por Buytaert, Célleri, Willems, et al. (2006) para distancias inter-pluviómetros de hasta 4km en páramo.

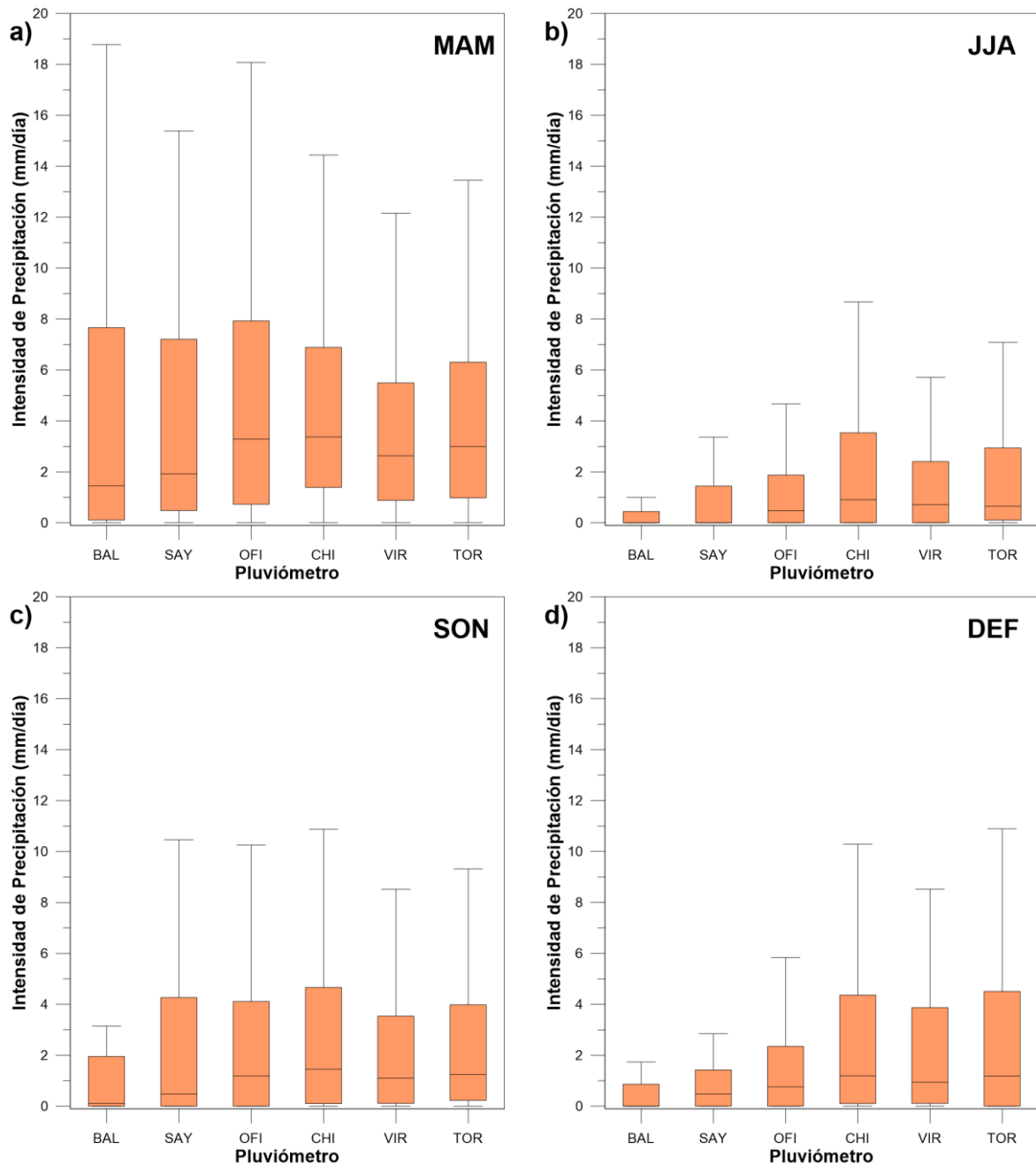
Así mismo, para este grupo II, el percentil 25 superó los 0 mm/día a diferencia del grupo I, lo que se interpreta como una menor cantidad de días sin precipitación a partir de los 3300 m.s.n.m. (este tema se estudió a profundidad más adelante). La mediana de la intensidad diaria incrementó conforme se gana altitud hasta el pluviómetro CHI, a partir del cual con rangos inter-cuartílicos más amplios, se puede decir que para mayores altitudes en la gradiente hay una menor variabilidad en la intensidad diaria de precipitación.

#### - **Análisis Estacional**

Se graficaron las intensidades diarias de precipitación por estaciones trimestrales, en donde la estación lluviosa MAM (figura 3.3.2.a) mostró intensidades mayores que para el resto del año, con rangos inter-cuartílicos más amplios especialmente para los pluviómetros del grupo I. Para BAL y SAY la mediana es menor que para el resto de la gradiente, y las mitades de sus cajas visiblemente asimétricas muestran una mayor variabilidad en los valores de la intensidad.

La estación lluviosa SON (figura 3.3.2.c) presentó rangos inter-cuartílicos menores que para MAM, pero igualmente con poca variabilidad en la gradiente, excepto en BAL. Los valores obtenidos representan aproximadamente la mitad en magnitud en referencia a la otra estación lluviosa. Los *outliers* mostraron la existencia de días con precipitación alta sobre los 25mm en el grupo I, lo que no se presenta en el grupo II. Igualmente, BAL y SAY muestran asimetría que significa una alta variabilidad con gran cantidad de días con poca o nula precipitación y días con intensidades de hasta 38 mm/día.

En tanto, las estaciones secas JJA y DEF (figuras 3.3.2.b y 3.3.2.d) mostraron un comportamiento bastante similar entre ellas, con variaciones mínimas en magnitud siendo JJA un poco más seca. Tanto la mediana como el percentil 75 incrementan su valor conforme se gana altitud en la gradiente desde BAL hasta CHI, a partir del cual para los pluviómetros del grupo II los valores se estabilizan y son parecidos entre sí. Valores atípicos no sobrepasan los 20 mm/día en JJA y son muy pocos sobre este umbral en DEF.

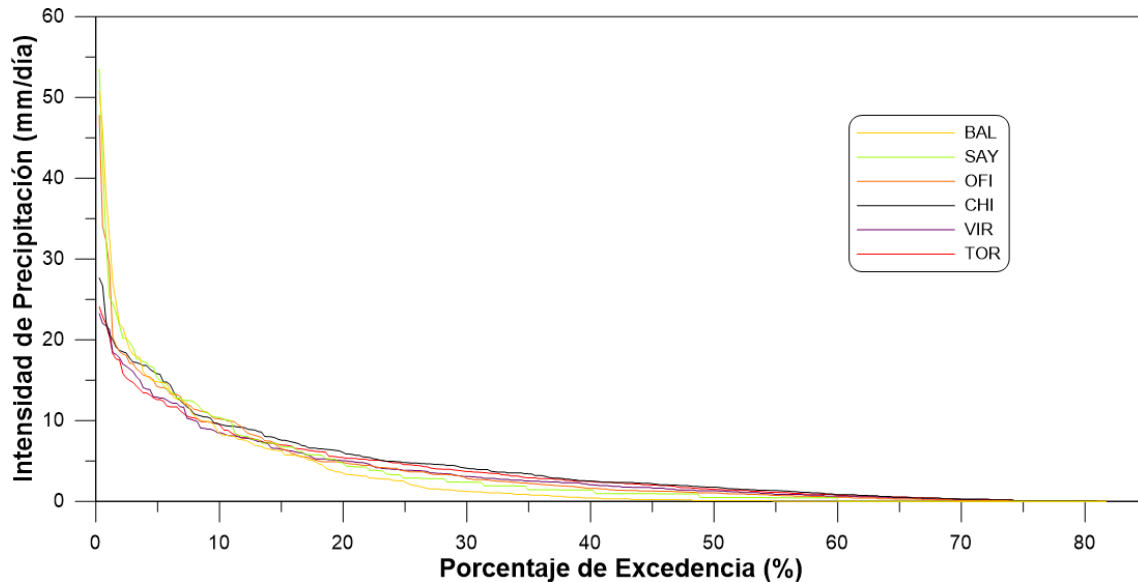


**Figura 3.3.2.** Diagramas de caja de la Intensidad de Precipitación Diaria Estacional para los pluviómetros de la gradiente: a) MAM, b) JJA, c) SON, y d) DEF.

En las estaciones lluviosas hay poca variabilidad entre los pluviómetros de la gradiente con rangos inter-cuartílicos muy parecidos entre sí, únicamente pudiendo diferenciar a los grupos I y II mediante los valores atípicos y con la particularidad de que en BAL la precipitación presenta los eventos extremos de mayor magnitud. Es este pluviómetro el más estacional pues en JJA y DEF es el que presenta menores valores de intensidad diaria. En estas estaciones secas claramente se identifican los grupos I y II. Mientras que para el grupo I las intensidades diarias incrementan con la altitud, para el grupo II las características son más similares entre sí, con intensidad que alcanzan dos y hasta tres veces los valores del grupo I.

### Análisis de Valores Extremos

Las curvas de la figura 3.3.3 mostraron particularidades que soportan lo obtenido con metodologías previas. De manera complementaria, con la serie de datos histórica en el período 1998 – 2015 del pluviómetro SAY, se obtuvo la intensidad de precipitación diaria promedio con un valor de 5.10 mm/día (sin tomar en cuenta los días con precipitación cero) con el objetivo de fijar un umbral para el análisis de los resultados en esta sección.



**Figura 3.3.3.** Curvas de Porcentaje de Excedencia de Precipitación Diaria de los pluviómetros de la gradiente.

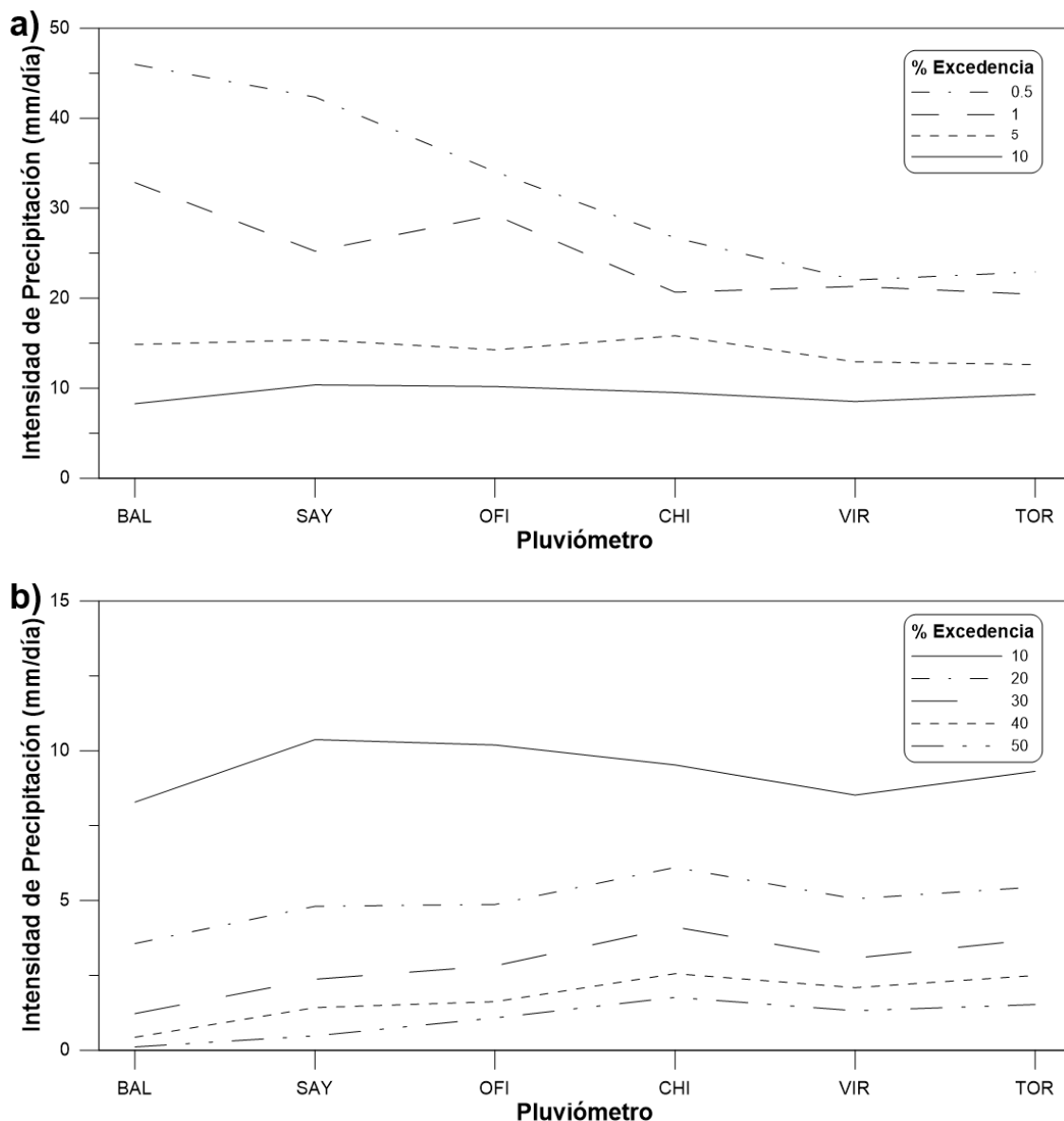
Los pluviómetros del grupo I (BAL, SAY y OFI) mostraron intensidades aproximadamente del doble de magnitud para porcentajes de excedencia menores a 1% en comparación con los del grupo II (CHI, VIR y TOR); así intensidades entre los 30 y 50 mm/día solo estuvieron presentes en el grupo I, mientras que para el grupo II las intensidades no superan los 28 mm/día. De hecho, para porcentajes de excedencia menores a 5%, las intensidades resultantes son siempre mayores para el grupo I y superiores a 12.5 mm/día, lo que significa que días especialmente lluviosos se presentan sólo bajo los 3060 m.s.n.m. en la gradiente.

Para la intensidad umbral de 5.10 mm/día los porcentajes de excedencia para el grupo I están entre 17.5% y 19.5% mientras que para el grupo II están en el rango 19.5% y 23%, lo que significa que para los pluviómetros sobre los 3300 m.s.n.m. es más probable superar la intensidad promedio obtenida con los datos históricos de SAY.

La probabilidad de que exista precipitación aumenta conforme se gana altitud en la gradiente. En BAL el porcentaje de excedencia de precipitación cero es de 55%, llegando a un máximo de 81% en CHI, bajando en VIR y TOR hasta 79%.

Para analizar la variabilidad de las intensidades diarias en la gradiente según el porcentaje de excedencia respectivo se estratificaron estos porcentajes, con lo que se pudo observar de mejor manera algunas características no tan visibles en las curvas de la figura 3.3.3.

En la figura 3.3.4.a puede observarse el comportamiento de la intensidad diaria para porcentajes de excedencia inferiores al 10%. Para el porcentaje de 0.5% se puede notar que mientras se aumenta en altitud la intensidad diaria disminuye de manera gradual. Un comportamiento con tendencia a la baja, pero más irregular se observa con porcentaje de 1%. Para porcentajes de excedencia entre 5 y 10% la variación de la intensidad es baja, con curvas casi horizontales.



**Figura 3.3.4.** Variación de la Intensidad de Precipitación Diaria en la gradiente de acuerdo al porcentaje de excedencia. a) Porcentajes superiores a 10% y b) Porcentajes inferiores a 10%.

Para porcentajes superiores al 10% en la figura 3.3.4.b, la variabilidad de la intensidad para todos ellos presenta el mismo patrón. La intensidad aumenta de acuerdo a la altitud hasta el pluviómetro CHI, a partir del cual presenta valores semejantes.

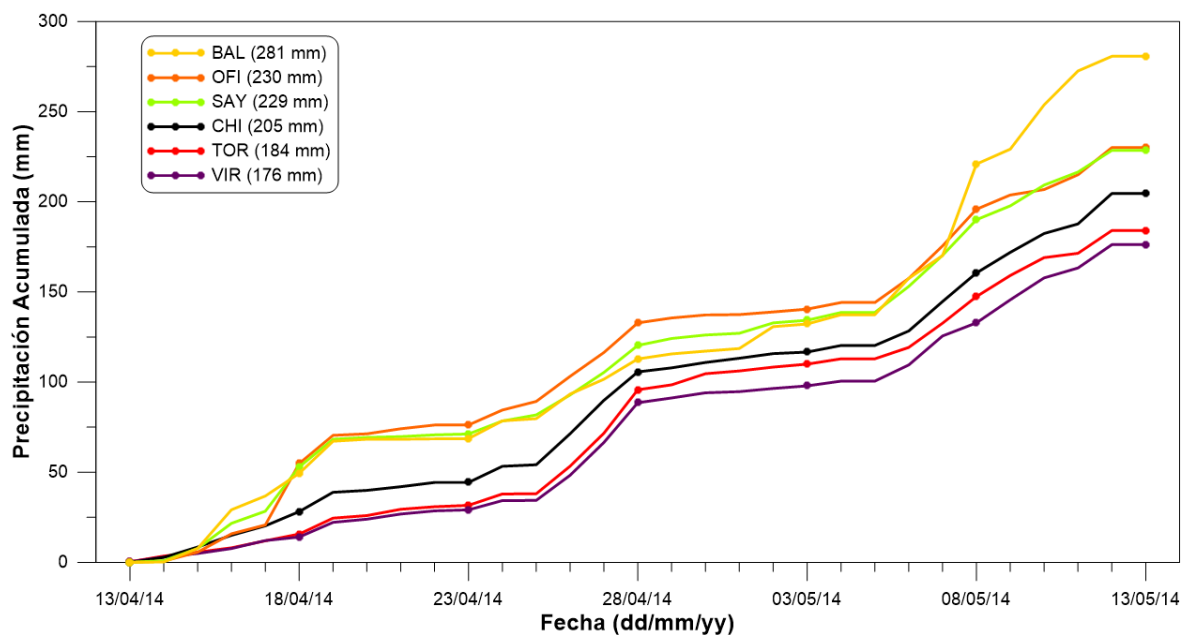
En resumen, eventos extremos se presentan con mayor intensidad en la parte baja de la gradiente, y esta intensidad se ve disminuida mientras se gana altitud. Para porcentajes de excedencia entre 5 y 10% las intensidades no presentan mayor variabilidad en la gradiente. Finalmente, porcentajes de excedencia sobre el 20% muestran el mismo comportamiento, con intensidades que aumentan conforme se sube en la gradiente. Es decir, es más probable que cuando haya precipitación, la intensidad sea mayor en la parte alta que en la parte baja de la cuenca.

### Dinámica y Evolución de Períodos Lluviosos

De la figura 3.1.4 se identificaron 3 períodos lluviosos de interés, los mismos que coinciden con los meses que presentan picos en los regímenes de precipitación y son descritos a continuación:

- **Período 1:** 13/abr/2014 – 13/may/2014

La estación MAM es la que presentó mayor cantidad de precipitación en el año de estudio. La figura 3.3.5 muestra que los volúmenes de lluvia de esta estación están principalmente distribuidos durante los últimos 15 días de abril y los primeros 15 de mayo. Aunque la tendencia de acumulación es similar para todos los pluviómetros, se observa con facilidad que los pluviómetros del grupo II (CHI, VIR y TOR) tienen en todo el período menores volúmenes que los del grupo I (BAL, SAY y OFI).



**Figura 3.3.5.** Período lluvioso 13/abr/2014 – 13/may/2014.

El pluviómetro BAL mostró un comportamiento similar al resto de su grupo la mayor parte del tiempo, sin embargo, en 6 días (06/may al 11/may) se registraron 135 mm



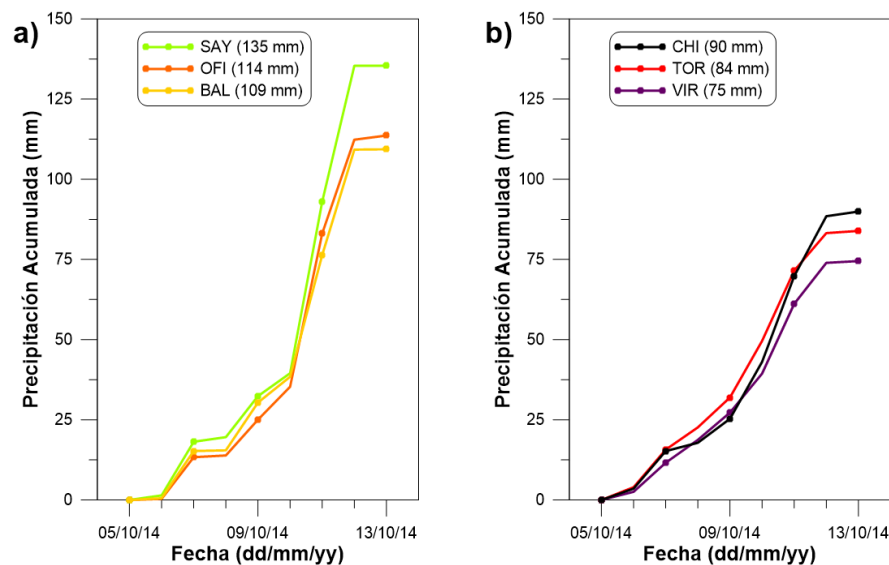
que representan el 48% del volumen total de precipitación del período de análisis. Específicamente, el 08/may se registró un volumen de 51 mm. Debido a esto el volumen total en BAL al final del período es el mayor en la gradiente.

Hay grupos de días (e.g. 16/abr al 19/abr) en los que la intensidad diaria en los pluviómetros del grupo I, es tres y hasta cuatro veces mayor que aquella registrada por los pluviómetros del grupo II. Esto, conjuntamente con la presencia de días con intensidades superiores a 20 mm/día sólo en el grupo I, hacen que los volúmenes acumulados al final del período sean hasta 100 mm (60%) mayores a los registrados por el grupo II. La cantidad de precipitación de este período representa en promedio el 15% del volumen anual para el grupo II y entre el 20% y 28% para el grupo I.

- **Período 2:** 05/oct/2014 – 13/oct/2014

En la estación SON, el mes de octubre es el que genera el segundo pico en los regímenes de precipitación de la gradiente. Se analizó todo el mes, identificándose el principal período lluvioso durante 9 días.

Al igual que en el período 1, la tendencia en la acumulación es similar para los grupos I y II (figura 3.3.6), sin embargo, hay un salto que permite diferenciarlos. Este salto se produce en los días 11-12 oct, en los cuales las intensidades diarias de los pluviómetros del grupo I son hasta dos veces más grandes que las de los pluviómetros del grupo II. Los volúmenes de este par de días representan entre el 40% y 70% de la precipitación del período de análisis.



**Figura 3.3.6.** Período lluvioso 05/oct/2014 – 13/oct/2014. a) Pluviómetros del grupo I, y, b) Pluviómetros del grupo II.

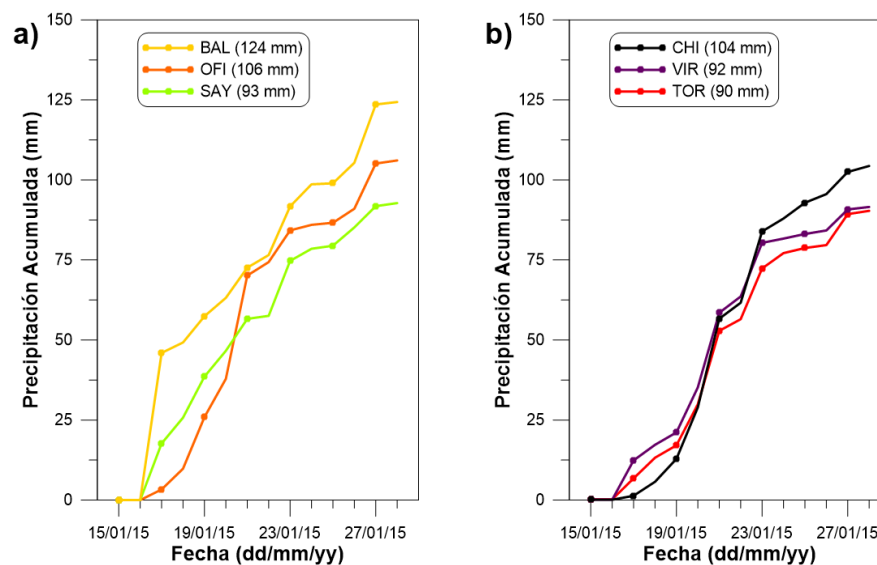
El pluviómetro SAY es el que registró mayor volumen acumulado con 135 mm, con una diferencia de 61 mm (80%) respecto a VIR que registra el menor volumen acumulado. Los volúmenes de este período lluvioso representan en promedio el 11% del volumen anual para el grupo I y el 7% para el grupo II.

- **Período 3:** 15/ene/2015 – 28/ene/2015

Un aparente tercer pico de precipitación en los regímenes es identificado en el mes de enero. Luego de haber analizado todo el mes, se limitó este período lluvioso a sus últimos 15 días.

En contraste con los dos períodos anteriores, volúmenes acumulados semejantes se presentaron en todos los pluviómetros al final de este período. La excepción es BAL, en el cual se registraron un par de días (17 y 27 ene) con intensidades que difieren ampliamente con el resto de la gradiente.

El comportamiento en las acumulaciones del grupo II es muy similar (figura 3.3.7). La cantidad de precipitación de este período representa en promedio el 8% del volumen anual para el grupo II y entre el 8% y 13% para el grupo I.



**Figura 3.3.7.** Período lluvioso 15/ene/2015 – 28/ene/2015. a) Pluviómetros del grupo I, y, b) Pluviómetros del grupo II.

De este análisis se puede manifestar que durante los períodos lluviosos identificados en el año de estudio hay días (o grupos cortos de hasta 3-4 días) que presentan intensidades extremas, y estas intensidades se presentan solamente en los pluviómetros del grupo I. Sin embargo, en estos períodos también existe precipitación en los pluviómetros del grupo II, y aunque no se presenten intensidades tan altas, la tendencia en las acumulaciones es muy similar para todos los pluviómetros de la gradiente.

Los tres períodos identificados (que en total corresponden a 54 días), representan en promedio un 30% de la precipitación anual de los pluviómetros del grupo II. Mientras que para el grupo I, este porcentaje es más variable e incrementa conforme se disminuye altitud, desde un 39% en OFI hasta un 52% en BAL.

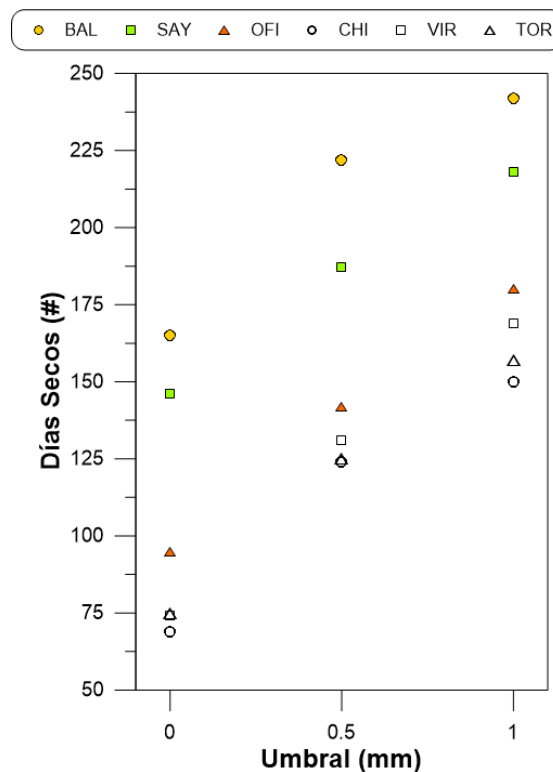
### Distribución de Días Secos

Se contabilizó el número de días secos en el año de estudio con tres umbrales: 0 mm (criterio meteorológico), 0.5 mm (criterio de resolución del sensor) y 1 mm (criterio hidrológico). Los resultados se muestran en la tabla 3.3.1, en la cual se presenta también el porcentaje correspondiente de estos días respecto al año de estudio.

**Tabla 3.3.1.** Número de días secos y porcentaje que representan del año de estudio según tres diferentes umbrales.

Umbral mm	BAL		SAY		OFI		CHI		VIR		TOR	
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
0	165	45.2	146	40.0	95	26.0	69	18.9	74	20.3	75	20.5
< 0.5	222	60.8	187	51.2	142	38.9	124	34.0	131	35.9	125	34.2
< 1	242	66.3	218	59.7	180	49.3	150	41.1	169	46.3	157	43.0

De acuerdo al tipo de umbral, el total de días secos en determinada ubicación en la gradiente puede variar hasta en 95 días (VIR). La diferencia en la cantidad de días secos entre los umbrales de 0 mm y 1 mm crece en magnitud según se gana altitud, siendo de 82 días la diferencia promedio. Esto indica que los días con precipitación menor a 1mm o con llovizna son más comunes sobre los 3060 m.s.n.m. en la gradiente. Para los pluviómetros del grupo I (BAL, SAY y OFI) los días secos con umbral de 1 mm representan al menos la mitad del tiempo de estudio. Este porcentaje alcanza un mínimo en CHI, y para los pluviómetros del grupo II (CHI, VIR y TOR) no se supera el 47% de días secos al año.



**Figura 3.3.8.** Días secos en el año de estudio en la gradiente según tres diferentes umbrales.

Como se muestra en la figura 3.3.8, independientemente del umbral de definición, el número de días secos disminuye para mayores altitudes en la gradiente. Para los pluviómetros del grupo I, la variación en la cantidad de días secos con un mismo umbral presenta mayores diferencias que para los del grupo II. De hecho, según el criterio meteorológico la cantidad de días secos en los pluviómetros del grupo II es prácticamente la misma. En este punto, cabe mencionar que el número de días secos en OFI presentó un comportamiento más cercano a los pluviómetros del grupo II. Los resultados para el páramo guardan relación con aquellos obtenidos por Céleri (2007) y Padrón et al. (2015).

**Tabla 3.3.2.** Volúmenes de precipitación que subestiman los umbrales de definición de días secos en la gradiente y sus porcentajes respecto a los volúmenes anuales.

Umbral (mm)	BAL		SAY		OFI		CHI		VIR		TOR	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
< 0.5	12.2	1.2	19.6	1.7	11.3	1.0	12.3	0.9	11.8	1.1	11.6	1.0
< 1	26.6	2.7	49.3	4.3	39.1	3.3	31.2	2.4	39.9	3.6	34.6	2.9

Sin embargo, como se muestra en la tabla 3.3.2, a pesar de que la diferencia en el número de días según el criterio de cálculo de días secos pueda parecer significativa, la cantidad de precipitación registrada en días hidrológicamente secos (con umbral de 0.5 y 1 mm) representa porcentajes menores al 5% de los volúmenes totales anuales registrados por los pluviómetros de la gradiente. En SAY, debido a la resolución del sensor, es en donde se subestimaría la mayor cantidad de precipitación con estos criterios.

Los períodos consecutivos de sequía meteorológica fueron estudiados y los resultados se han sintetizado en la tabla 3.3.3.

**Tabla 3.3.3.** Características de los períodos de sequía meteorológica en la gradiente.  
\*DS=Día Seco. \*\*Período de DS consecutivos con más de 3 días.

Característica	BAL	SAY	OFI	CHI	VIR	TOR
*DS consecutivos (# veces)	40	36	20	16	16	19
**DS consecutivos (# veces)	15	10	6	3	4	4
Máxima sequía (# días)	11	11	7	5	5	5
Mes más seco (# días)	feb. (22)	ago. (21)	ago. (13)	ago. (11)	ago. (11)	feb. (11)

El número de veces en los que se presentan días secos consecutivos es similar en BAL y SAY, reduciéndose a la mitad para el resto de pluviómetros de la gradiente. Si se consideran solamente los períodos superiores a tres días, el número de sequías se reduce en tres y hasta cuatro veces en las diferentes altitudes. El máximo período de sequía se presentó en febrero 2015, con hasta 11 días consecutivos sin precipitación en BAL y SAY. Sin embargo, para OFI y para los pluviómetros del grupo II la sequía más prolongada se dio en agosto 2014 y con la mitad de duración. Los resultados de la tabla 3.3.3 para altitudes desde los 3060

m.s.n.m. son prácticamente los mismos que aquellos obtenidos por Padrón et al. (2015).

Como se mencionó anteriormente, durante los períodos sin precipitación, el pluviómetro OFI tiene mayor similitud con los pluviógrafos del grupo II que con BAL y SAY (en donde las características de estos períodos presentan el doble de magnitud). Es decir, en la gradiente sobre los 3060 m.s.n.m., el comportamiento es prácticamente el mismo en lo referente al total de días secos contabilizados con diferentes umbrales, cantidad de precipitación durante las sequías, número de períodos de días secos consecutivos y cantidad de días secos consecutivos.

### **Dinámica y Evolución de Períodos de Sequía**

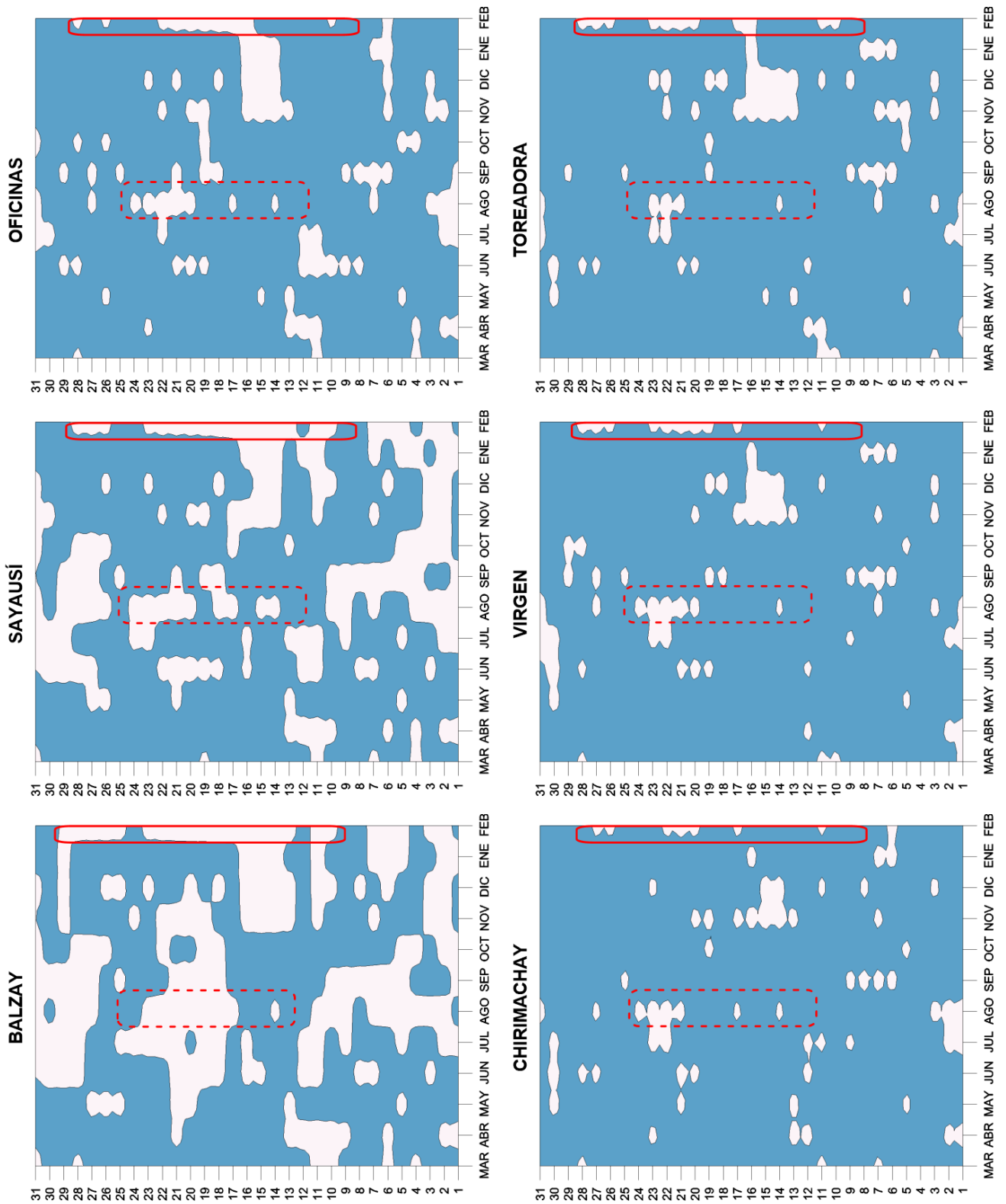
La figura 3.3.9 muestra la distribución anual de los días secos en la gradiente. Las áreas blancas son los días en los que no se registró precipitación, mientras que la superficie coloreada representa días con precipitación independientemente de su volumen. A partir de los resultados previos de esta sección se identificaron dos sequías significativas de las cuales se analizó su evolución en la gradiente.

#### **- Sequía 1: agosto del 2014**

Agosto resultó el mes con mayor cantidad de días secos en 4 de los 6 pluviómetros de estudio. El período de sequía de interés que se ha resaltado en la figura 3.3.9 abarca 11 días, entre el 14 y el 24 de agosto. Aunque SAY es el pluviómetro que registró mayor cantidad de días secos (9), BAL es el que presentó menor volumen acumulado de precipitación con tan solo 2.12 mm y mayor cantidad de días secos consecutivos (7). La cantidad de días secos en el período va disminuyendo mientras se gana altitud, aunque hay períodos cortos (3 días entre el 21 y 23) en los que no se registró precipitación en toda la gradiente. CHI y TOR son los pluviómetros que registraron mayor volumen durante esta sequía.

#### **- Sequía 2: febrero del 2015**

En febrero se registró el mayor número de días consecutivos en la gradiente. Esta sequía se desarrolló entre el 09 y 28 de febrero. BAL es el pluviómetro que presenta las características más marcadas en la sequía, con tan solo 6.6 mm de precipitación acumulados y 17 días secos de los cuales 11 son consecutivos. En este caso se observa claramente como el período coincidente de días secos consecutivos en las diferentes alturas se va reduciendo mientras se sube en la gradiente. Sobre los 3060 m.s.n.m. el número de días secos consecutivos es mucho menor que para alturas inferiores en la gradiente, así también los volúmenes acumulados son mayores para mayores altitudes.

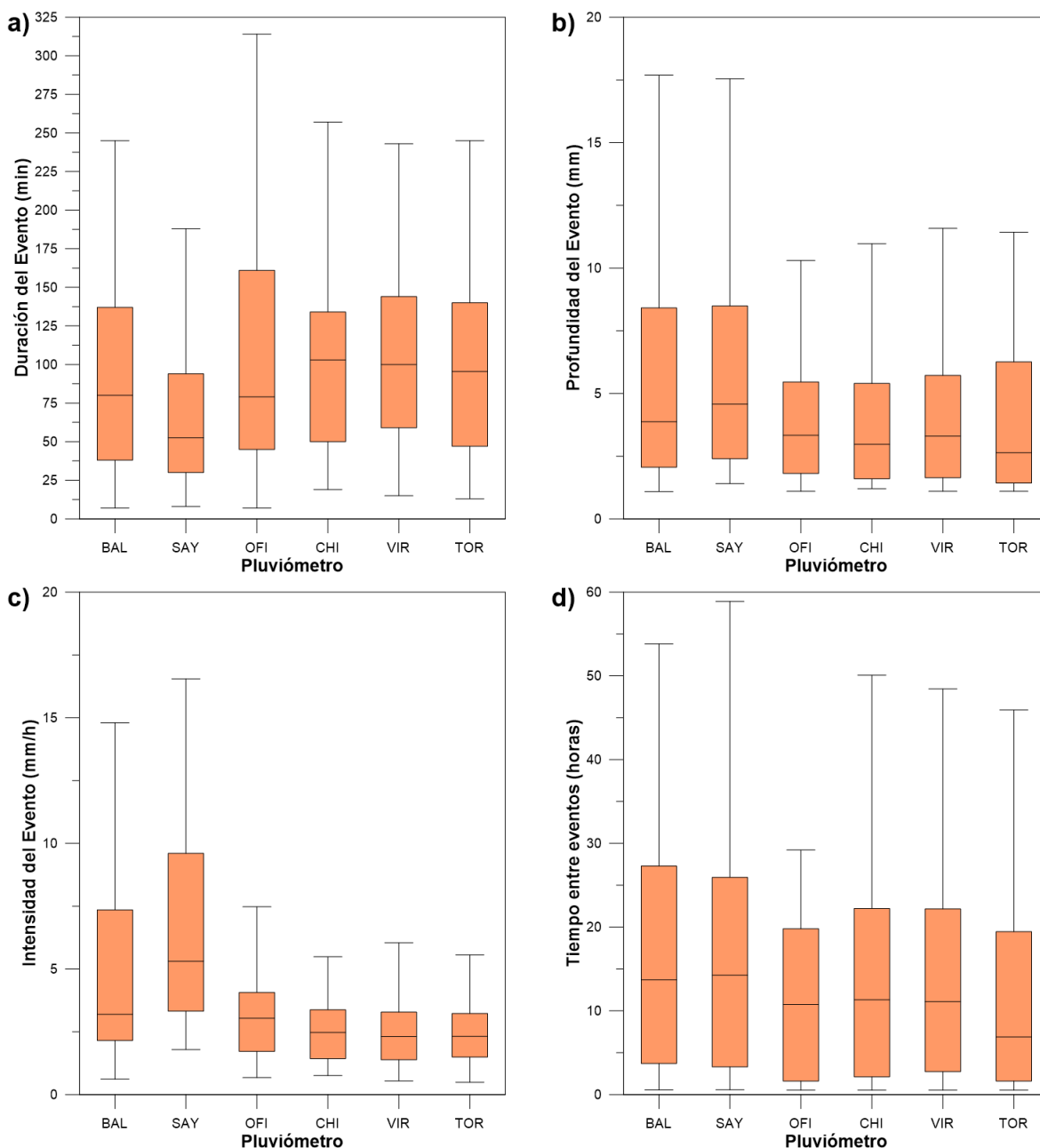


**Figura 3.3.9.** Distribución anual de los días secos en los pluviómetros de la gradiente. La sequía 1 está encerrada en línea punteada y la sequía 2 está encerrada en línea continua.



### 3.4 Eventos Representativos (de los períodos lluviosos)

Se procesó la información de la precipitación cada minuto de los períodos lluviosos identificados en la sección 3.3 para obtener los eventos correspondientes con la definición descrita anteriormente. Se obtuvieron sus diferentes características: duración, profundidad, intensidad y tiempo entre eventos. Los resultados se presentan en la figura 3.4.1.



**Figura 3.4.1.** Diagramas de caja de las propiedades de los eventos de precipitación durante los períodos lluviosos en la gradiente: a) Duración, b) Profundidad, c) Intensidad, y d) Tiempo entre eventos.

Debido tanto a que la resolución del sensor como a la frecuencia de almacenamiento de la información en SAY difieren del resto en la gradiente, los



resultados de las características de los eventos para este pluviómetro deben interpretarse cuidadosamente.

a. Duración

En BAL y OFI la mediana es de 80 minutos, mientras que para el resto de la gradiente es de 100 minutos (25% mayor). En OFI es en donde se registra la mayor variabilidad en la duración (con tendencia a la existencia de eventos de duración más larga, a diferencia de CHI en donde la tendencia es contraria), mientras que en el resto de pluviómetros según el rango inter-cuartílico la variabilidad en esta característica es semejante. Sobre los 3300 m.s.n.m. los eventos presentaron duraciones mínimas de mayor magnitud. SAY no se tomó en cuenta en este análisis.

b. Profundidad

En BAL y SAY los rangos inter-cuartílicos y la longitud de los bigotes mostró que sus eventos tienen profundidades más variables y mayores que el resto de la gradiente. A partir de OFI las características de la profundidad se reducen, aunque la mediana es semejante en todas las altitudes con un promedio de 3.5 mm por evento.

c. Intensidad

En BAL la intensidad es más variable con un rango inter-cuartílico hasta tres veces más grande que en el resto de la gradiente. Intensidades superiores a 10 mm/h se presentaron solamente en este pluviómetro. Sobre los 3060 m.s.n.m., a partir de OFI, la intensidad de los eventos está en el rango 1.5 – 3.5 mm/h.

d. Tiempo entre eventos

Esta propiedad ve reducida su magnitud conforme se gana altitud en la gradiente. El rango inter-cuartílico tiene un tamaño semejante en las diferentes altitudes. La mediana para BAL y SAY es de 14 h promedio, para OFI, CHI y VIR es de 11 h promedio, y finalmente en TOR es en donde se da la precipitación con mayor frecuencia con la mediana del tiempo entre eventos igual a 6.9 h.

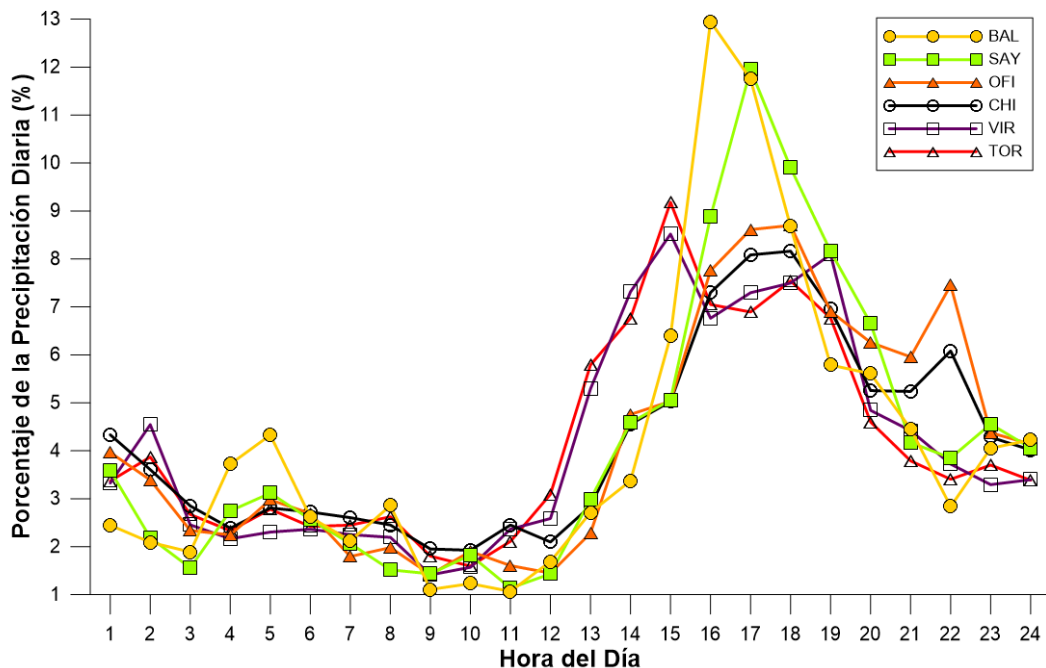
En general, la duración de los eventos es menor en la parte baja de la gradiente, pero con intensidades y profundidades mayores. El tiempo entre eventos se reduce con el incremento de altura.

### 3.5 Escala Horaria

#### Variabilidad Intra-Diaria

En la figura 3.5.1 se graficó el ciclo diario de la precipitación, que se calcula como los porcentajes de la lluvia anual para cada hora del día, de cada pluviómetro de la red. Para toda la gradiente, al menos el 50% de la precipitación total registrada se

da entre las 13h y 20h. En contraposición, entre las 7h y 12h los porcentajes alcanzan tan sólo entre el 10% y 14%, teniendo mayor magnitud para altitudes mayores.



**Figura 3.5.1.** Ciclo diario de la precipitación anual para cada hora del día en los pluviómetros de estudio.

Se identificaron comportamientos muy similares en cuanto a la distribución de estos porcentajes según la altura. En la figura 3.5.2 se clasificaron los pluviómetros en 3 grupos diferentes:

- BAL y SAY

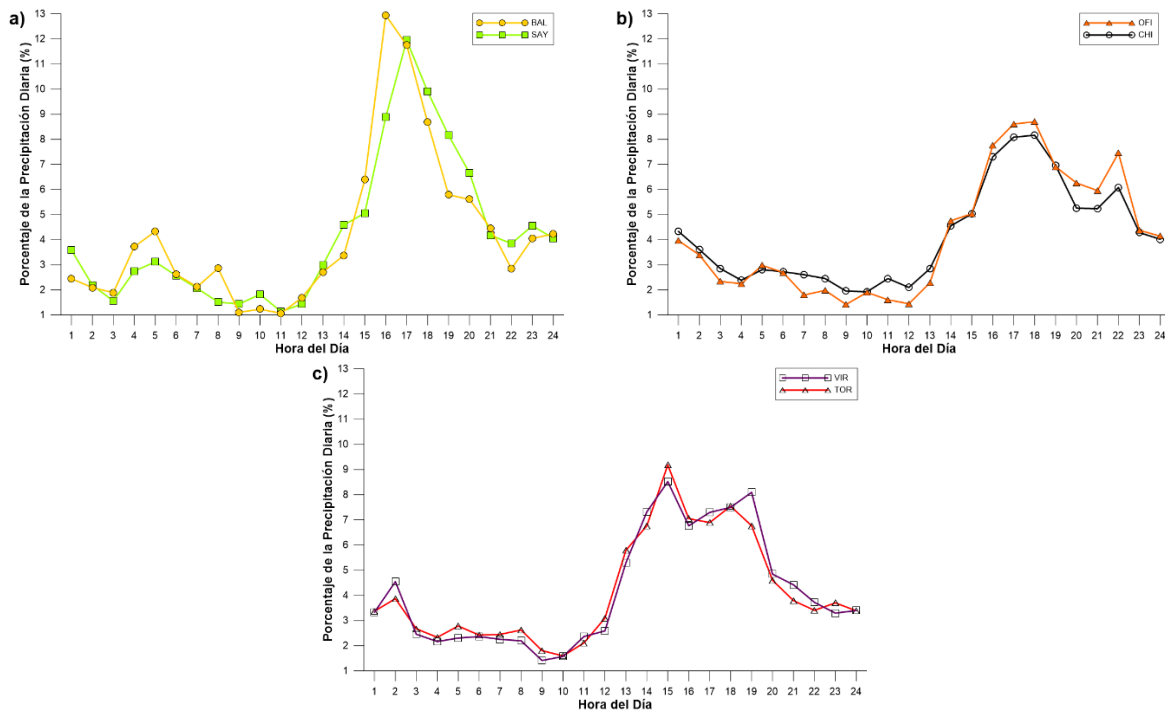
Entre las 13h y 20h estos pluviómetros registran casi el 60% de la precipitación total, con hasta el 35% entre las 16h y 18h. Solamente el 6% de la lluvia se da entre las 9h y 12h.

- OFI y CHI

El porcentaje de precipitación entre las 13h y 20h no supera el 50%, con hasta un 25% entre las 16h y 18h. Entre las 9h y 12h el porcentaje sube hasta el 8%

- VIR y TOR

Para estos pluviómetros el porcentaje de precipitación entre las 13h y 20h es de 55%, sin embargo, el periodo de lluvia en la tarde se extiende desde las 14h hasta las 18h con casi el 40% del total. El porcentaje de precipitación entre las 9h y las 12h se mantiene en el 8%.



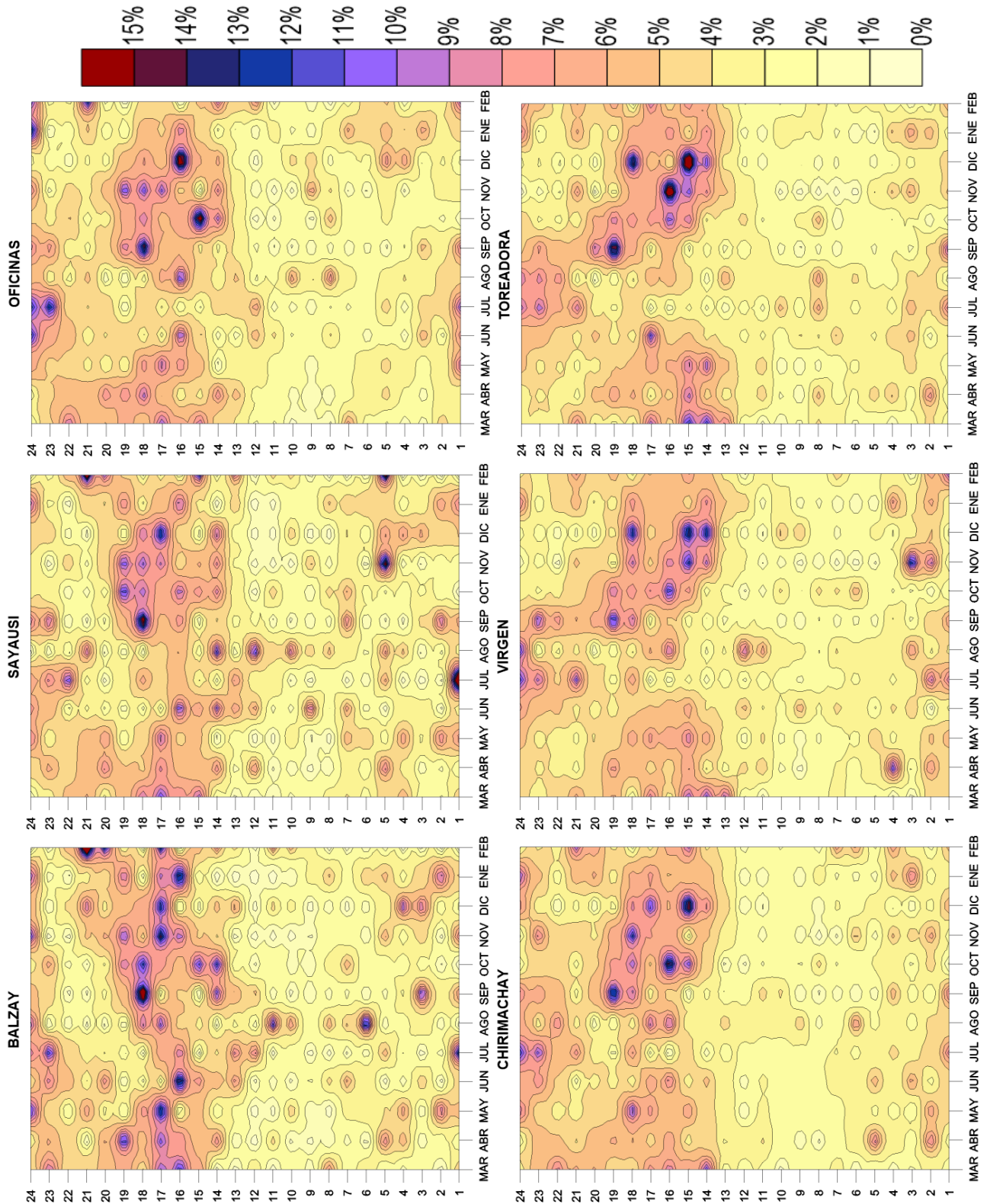
**Figura 3.5.2.** Ciclo diario de la precipitación anual para cada hora del día: a) BAL y SAY, b) OFI y CHI, y c) VIR y TOR.

Se puede decir entonces que en la parte baja de la gradiente la precipitación ocurre principalmente en horas de la tarde, entre las 16h y 18h. En altitudes medias, a pesar de que los porcentajes de precipitación en este periodo de la tarde son los mayores durante el día, muestran menor magnitud que en la parte baja. En la parte alta de la gradiente la precipitación de la tarde se extiende desde las 14h hasta las 19h. La menor cantidad de precipitación se registra entre las 9h y 12h con porcentajes algo mayores en la parte media y alta.

En la figura 3.5.3 se muestra la distribución de la lluvia (en porcentaje) durante todo el período de estudio, en los diferentes pluviómetros de la gradiente. Se observa que los patrones de comportamiento mostrados por las figuras 3.5.1 y 3.5.2 no son constantes en el año para las diferentes altitudes.

Durante los meses de septiembre a enero, mientras se gana altura en la gradiente, la precipitación en la tarde pasa de una alta concentración entre las 16h y 18h, a un período más amplio entre las 14h y 20h, con menor presencia de lluvia en las noches y madrugadas sobre todo para los dos pluviómetros más altos.

Para la estación lluviosa marzo-abril-mayo, los mayores porcentajes de precipitación se dan en la tarde entre las 14h y 20h. Sin embargo, la distribución de estos porcentajes no es tan marcada como en otros meses, sino que es más equilibrada y mientras se sube en la gradiente hasta CHI se expande hasta las 23h. En VIR y TOR hay poca lluvia nocturna luego de las 20h.



**Figura 3.5.3.** Distribución de la precipitación (en porcentaje) durante todo el período de estudio en los pluviómetros de la gradiente.

En la época seca junio-julio-agosto el porcentaje de precipitación entre las 16h y 18h es menor en todas las altitudes, siendo más bajo conforme sube en la gradiente. Los mayores porcentajes de precipitación durante estos meses (excepto en BAL) se presentan entre las 22h y 2h. Esta característica es únicamente observable mediante los gráficos de la figura 3.5.3.

En toda la gradiente, la precipitación entre las 6h y las 12h es presenta porcentajes bajos, excepto bajo los 3060 m.s.n.m. durante el mes de agosto (especialmente el BAL y SAY). Estos porcentajes son menores para los 3 pluviómetros más altos.

Resumiendo, se puede decir que hay una clara tendencia en la gradiente de la existencia de precipitación entre las 14h y 20h (que sustenta los patrones de la figura 3.5.1), sin embargo, en la estación seca junio-julio-agosto, la lluvia es común en la noche-madrugada. La precipitación es baja en la mañana entre las 9h y 12h. Los resultados para el páramo se asemejan a los obtenidos por Padrón et al. (2015). La diferencia en el porcentaje de lluvia entre horas secas y lluviosas es más marcada bajo los 3060 m.s.n.m. Esta diferencia porcentual disminuye mientras se gana altitud.

### **3.6 Resumen de Resultados**

#### **Control de Calidad**

El tiempo y los recursos invertidos en operar y mantener redes pluviométricas se ven justificados por obtención de bases de datos de buena calidad. El cálculo y aplicación de los Factores de Corrección resulta esencial para evitar por lo general la sub-estimación de los volúmenes totales de precipitación. Un error cercano al -10% del volumen anual fue encontrado en el pluviómetro TOR instalado a mayor elevación en la gradiente de estudio, en donde la combinación de vientos fuertes y eventos de precipitación de baja intensidad característicos del páramo potencian esta sub-estimación.

#### **Regímenes de Precipitación**

Los meses de junio, julio y agosto conforman la estación seca de la gradiente y dos picos de precipitación en mayo y octubre caracterizan su régimen bimodal. Sin embargo, diferencias en los volúmenes mensuales permitieron la clasificación de este régimen en dos grupos, con una ruptura en la continuidad de su comportamiento en el rango altitudinal entre los 3060 y 3300 m.s.n.m., sobre el cual tanto la estación seca como los picos de precipitación son menos pronunciados en relación a los de los pluviómetros instalados más abajo.

#### **Variabilidad de la Estacionalidad**

Los valores del índice de estacionalidad para la gradiente permitieron la clasificación de los pluviómetros en los mismos dos grupos que para los regímenes, con la discontinuidad en el mismo rango altitudinal. El mayor valor de estacionalidad se presentó en BAL en la parte más baja del valle interandino, en donde las



diferencias entre los meses más secos y más lluviosos son notorias. Mientras tanto, sobre los 3300 m.s.n.m. en el ecosistema páramo, los valores del índice resultaron bajos y casi idénticos en las tres ubicaciones, lo que soporta la hipótesis de que la precipitación del páramo puede ser la fuente del flujo base sostenido de los ríos que ahí nacen, constituyéndose como un auténtico reservorio de agua para las comunidades andinas.

### **Lluvia Acumulada a lo largo del año**

Los dos pluviómetros más bajos de la gradiente están separados altitudinalmente tan solo por 83 m, pero sus volúmenes anuales difirieron en cerca de 110 mm. En el rango altitudinal 2700 – 4000 m.s.n.m. la lluvia acumulada anual fue bastante similar, sin embargo, a la mitad de la gradiente en CHI a 3300 m.s.n.m. se presentó el máximo volumen anual. En la gradiente no se reveló una relación lineal directa entre la cantidad de precipitación y la altura.

Sin embargo, la dinámica de la acumulación de la precipitación a lo largo del año permitió la clasificación de los pluviómetros en los dos grupos previos. En el primero, bajo los 3060 m.s.n.m., los períodos secos son más largos y los períodos lluviosos más cortos en relación al grupo de pluviómetros de páramo.

### **Variabilidad de la Correlación Espacial Unidireccional**

Los coeficientes de correlación mensual entre los pluviómetros de la gradiente resultaron en valores siempre superiores a 0.8 a pesar de que las distancias interpluviómetros son de hasta 27 km. La correlación fue mayor entre pluviómetros del mismo grupo (según la clasificación previa), es decir, los pluviómetros de páramo mostraron una alta correlación entre ellos al igual que aquellos instalados bajo los 3060 m.s.n.m.

### **Variabilidad de la Intensidad**

Intensidades altas sobre los 30 mm/día se presentan solamente bajo los 3060 m.s.n.m., zona de la gradiente en la cual, la intensidad media diaria incrementa con la altura. A partir de los 3300 m.s.n.m., las intensidades diarias son menos variables, pero por lo general la mediana es mayor que en ubicaciones bajas de la gradiente.

Durante las estaciones lluviosas MAM y SON el rango de intensidad diaria de precipitación es común para toda la gradiente, sin embargo, en el valle interandino se presentaron los días de intensidad extrema. Mientras tanto, durante las estaciones secas JJA y DEF las intensidades diarias son de menor magnitud, incrementando según la altitud hasta los 3300 m.s.n.m., altitud a partir de la cual las intensidades alcanzan valores hasta tres veces mayores que los que se presentaron en el valle interandino.

### **Análisis de Valores Extremos**

El porcentaje de excedencia de precipitación diaria cero incrementa de 55% en la parte más baja de la gradiente, a un promedio de 80% en los pluviómetros de páramo. El análisis de los porcentajes de excedencia superiores a 20% reveló que es más probable que cuando exista precipitación, la intensidad sea mayor en el páramo que en la parte baja de la gradiente. Por el contrario, eventos extremos en el valle interandino presentaron intensidades hasta del doble en relación a aquellos de páramo para porcentajes de excedencia menores a 1%.

### **Dinámica y Evolución de Períodos Lluviosos**

Los períodos lluviosos de interés se dieron en los meses de mayo, octubre y enero, siendo los dos primeros los picos de precipitación de los regímenes bimodales. Pocos días (entre 2 y 4) con intensidades muy altas en el valle interandino generaron saltos en la acumulación de precipitación en estos períodos, que marcan la diferencia respecto a los pluviómetros de páramo en donde la tendencia de acumulación fue similar, pero con volúmenes menores.

Los 54 días que abarcaron estos períodos representan hasta un 30% de la lluvia anual en los pluviómetros de páramo, sin embargo, este porcentaje incrementa para los pluviómetros en el valle interandino hasta un 52%. Es decir, el valor de la lluvia anual bajo los 3060 m.s.n.m. se alcanza en menor cantidad de días que en el páramo, debido a la existencia períodos cortos de días o días aislados especialmente lluviosos en la parte baja del valle interandino.

### **Distribución de Días Secos**

Es importante la definición del umbral de un día seco en función del objetivo de su uso, ya que encontraron diferencias de hasta 95 días en el estudio. Independientemente del umbral, el número de días secos guarda una relación inversa con la altura en la gradiente, siendo significativamente mayor en el valle interandino. Los días con precipitación menor a 1 mm fueron más comunes sobre los 3060 m.s.n.m., y en el páramo según el criterio meteorológico el número de días secos fue prácticamente el mismo en las tres ubicaciones más altas de estudio, siendo los días sin lluvia aproximadamente 1 en 5. Sin embargo, la cantidad de precipitación sub-estimada en días hidrológicamente secos, no superó el 5% de la total anual.

Períodos de días meteorológicamente secos consecutivos se presentaron con el doble de frecuencia en las dos ubicaciones más bajas de la gradiente, siendo los meses más secos agosto y febrero. El comportamiento durante las sequías fue prácticamente el mismo a partir de los 3060 m.s.n.m. en la gradiente.

### **Dinámica y Evolución de Períodos de Sequía**

Durante los meses de agosto y febrero que fueron los más secos en el año de estudio, se analizaron dos períodos. La frecuencia y continuidad de días secos

durante estos períodos disminuye conforme se gana altitud. La sequía más prolongada tuvo la mitad de duración en los pluviómetros de páramo respecto a aquellos de valle interandino. A partir de los 3060 m.s.n.m. la dinámica fue similar y los volúmenes de precipitación acumulada durante la sequía son mayores que en el valle interandino. Sin embargo, se encontraron períodos aislados de hasta tres días consecutivos sin precipitación en toda la gradiente.

### **Variabilidad de las Propiedades de Eventos Representativos**

En el valle interandino los eventos muestran amplia variabilidad en los valores de profundidad e intensidad. Sin embargo, a partir de los 3060 m.s.n.m., en el páramo, los eventos son de menor intensidad y profundidad, pero de mayor duración. Eventos en el páramo tienen una duración media significativamente mayor que eventos de mayor intensidad a menor altitud en el valle interandino. En cuanto al tiempo entre eventos, este se ve reducido conforme se incrementa la altitud.

### **Variabilidad Intra-Diaria**

Al menos el 50% de la precipitación total se da entre las 13h y 20h en toda la gradiente, mientras que entre las 7h y las 12h la precipitación alcanza un máximo de 14% del total anual. En el valle interandino la mayor parte de precipitación se concentra entre las 16h y 18h, mientras que en la parte más alta del páramo el período lluvioso se extiende entre las 14h y 19h.

Sin embargo, estos patrones no son constantes a lo largo del año para las distintas altitudes en la gradiente. De septiembre a enero, conforme se gana altura en la gradiente, el período lluvioso se expande de tres (16h a 18h) a seis (14h a 20h) horas en la tarde-noche. En la estación lluviosa MAM, el patrón de precipitación se extiende hasta las 23h, pero en la parte más alta del páramo hay poca lluvia luego de las 20h. Finalmente durante la época seca JJA, la precipitación es más común en la noche-madrugada entre las 22h y 2h, especialmente en el páramo. La diferencia en el porcentaje de lluvia entre horas secas y lluviosas es más marcada en el valle interandino.

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

### 4.1 Conclusiones del Estudio

El estudio tuvo como objetivo estudiar la estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de una gradiente altitudinal en una cuenca interandina. Mediante una red pluviométrica sin precedentes, abarcando el monitoreo en un amplio rango altitudinal y cubriendo los diferentes ecosistemas que conforman la cuenca de estudio, se provee de nueva información acerca de la continuidad y dinámica de la precipitación a diferentes altitudes y escalas temporales.

Toda la gradiente presenta régimen bimodal de precipitación, lo que se demuestra por la alta correlación mensual encontrada. Sin embargo, este régimen es menos pronunciado a elevaciones mayores, es decir, la estacionalidad disminuye con el incremento de altitud, alcanzando una aparente uniformidad a partir de los 3300 m.s.n.m. No existe una relación lineal entre la cantidad de precipitación anual y la elevación, presentándose el máximo volumen anual a la mitad de la gradiente.

El rango altitudinal 3060 – 3300 m.s.n.m. determina una ruptura en la continuidad de los aspectos de la precipitación estudiados en la gradiente, de acuerdo a la escala temporal de análisis, la misma que influye en la determinación de esta continuidad. Para las escalas anual, mensual y para ciertos aspectos de la precipitación diaria (intensidad, valores extremos y dinámica de períodos lluviosos), la continuidad tiene su punto de quiebre en el rango altitudinal mencionado, con características comunes tanto para los tres pluviómetros bajo los 3060 m.s.n.m. como para los tres pluviómetros sobre los 3300 m.s.n.m. pero con un comportamiento más similar para aquellos de mayor elevación en la gradiente. Mientras tanto, para el resto de aspectos estudiados a escala diaria (sequías), así como para las escalas de evento e intra-diaria, el comportamiento para los dos pluviómetros en el valle interandino (bajo los 2700 m.s.n.m.) es marcadamente diferente respecto a los pluviómetros de páramo (sobre los 3060 m.s.n.m.) que igualmente comparten un comportamiento similar entre ellos.

Durante los períodos lluviosos, la precipitación presenta un comportamiento general común para toda la gradiente, respecto a intensidades diarias y dinámica de acumulación (con volúmenes menores en el páramo). Sin embargo, en el valle interandino, los períodos lluviosos son más cortos, además de que los períodos secos son más extensos en relación al páramo.

En el páramo, la precipitación es constante a lo largo del año, de baja intensidad y profundidad, pero de larga duración. Eventos extremos de gran magnitud y corta duración se presentan solamente en el valle interandino, en donde, en relativamente pocos días se alcanza un gran porcentaje de la precipitación total

anual. Finalmente, los patrones intra-diarios de precipitación varían estacionalmente y conforme la altitud, siendo menos variables en el páramo.

La estructura de la precipitación en la gradiente guarda relación con la elevación pues diferencias notables se encontraron entre los pluviómetros instalados en el páramo respecto a aquellos instalados en el valle interandino. Así también la variabilidad espacio-temporal en la gradiente es alta y depende en gran medida de la elevación, con un comportamiento más estable para las ubicaciones sobre el límite inferior del páramo.

#### **4.2 Recomendaciones e Investigaciones Futuras**

En cuencas montañosas, la elevación es un controlador primario de la precipitación. En la gradiente estudiada, la franja altitudinal 3060 – 3300 m.s.n.m. (que coincide con el límite inferior del páramo) reveló ser una transición en la continuidad en la precipitación de la gradiente. Su monitoreo y el estudio detallado de los procesos que ahí se puedan dar es sugerido para mejorar el conocimiento y entendimiento de la variabilidad de la precipitación.

El tracking de tormentas a lo largo de la gradiente es necesario, para proveer de una visión más profunda de los procesos de formación y evolución de la precipitación en las cuencas andinas. Se analizaron las propiedades de los eventos durante las épocas lluviosas del período de estudio, sin embargo, investigar a profundidad las tormentas durante las sequías es recomendado. La dinámica intra-diaria de la precipitación y su evolución en la gradiente respecto a volúmenes horarios y su variabilidad anual es también un tema pendiente de análisis.

Aunque la variabilidad de la precipitación depende de la elevación, factores como temperatura, radiación solar, dirección y velocidad de viento, topografía, pendiente y aspecto, también influyen en diferente medida y no fueron tomados en cuenta en esta investigación debido a sus limitaciones. Se propone entonces el estudio conjunto de estas propiedades con los resultados aquí expuestos.

Analizar de qué manera afecta la variabilidad de la precipitación encontrada en la gradiente en el balance hídrico de la cuenca y el estudio de los errores en el cierre de este balance debido al efecto de tener por ejemplo solamente datos de un pluviómetro en la cuenca, son temas que también deben estudiarse.

Finalmente, la ampliación del período de análisis para reforzar las conclusiones aquí obtenidas es necesaria.

## REFERENCIAS

- AFP. (2014, mayo 6). Caracas tendrá cuatro meses de racionamiento de agua por sequía. *Expreso*. Recuperado a partir de <http://expreso.ec/expreso/plantillas/nota.aspx?idart=6183404&idcat=19411&tipo=2>
- AFP. (2015, septiembre 28). Escasez de agua afecta centro de Colombia y genera disturbios. *El Comercio*. Recuperado a partir de <http://www.elcomercio.com/actualidad/escasez-agua-afecta-centro-colombia.html>
- Agredo, P. (2015, diciembre 26). Varios municipios de Boyacá, en racionamiento de agua por la sequía. *Minuto30.com*. Recuperado a partir de <http://www.minuto30.com/variados-municipios-de-boyaca-en-racionamiento-de-agua-por-la-sequia/420339/>
- Barbosa, L. (2014). Characterization of sub-daily rainfall properties in three raingauges located in northeast Brazil. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 345-350.
- Beltrán, B. (2015, septiembre 14). 19 barrios de Quito tendrán racionamiento de agua a causa del verano. *El Comercio*. Quito.
- Bendix, J., & Lauer, W. (1992). Die Niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation (Rainy Seasons in Ecuador and Their Climate-Dynamic Interpretation). *Erdkunde*, 118-134. <http://doi.org/10.3112/erdkunde.1992.02.04>
- Bendix, J., Rollenbeck, R., & Reudenbach, C. (2006). Diurnal patterns of rainfall in a tropical Andean valley of southern Ecuador as seen by a vertically pointing K-band Doppler radar. *International journal of climatology*, 26(6), 829-846.
- Buttafuoco, G., Caloiero, T., & Coscarelli, R. (2011). Spatial patterns of variability for rain fields at different timescales: an application in southern Italy. *European Water*.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: Propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Condesan*.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72.
- Buytaert, W., Céleri, R., Willems, P., De Bièvre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of hydrology*, 329(3), 413-421.
- Campbell Scientific Inc. (2015). TE525 Tipping Bucket Rain Gage - Instruction Manual. Campbell Scientific, Inc.
- Céleri, R. (2007). *Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin, Southern Ecuadorian Andes*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355.





- Céleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space--time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological processes*, 21(24), 3316-3327.
- Chen, Y., Liu, H., An, J., Görsdorf, U., & Berger, F. H. (2015). A field experiment on the small-scale variability of rainfall based on a network of Micro Rain Radars and rain gauges. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(1), 243-255.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., & Santos, G. R. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. E. Suárez R., Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Ciach, G. J. (2003). Local random errors in tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(5), 752-759.
- Ciach, G. J., & Krajewski, W. F. (2006). Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma. *Advances in water resources*, 29(10), 1450-1463.
- CMR. (2016, enero 6). ETAPA analiza racionar el agua por bajas reservas. *El Tiempo*. Cuenca. Recuperado a partir de <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/175106-etapa-analiza-racionar-el-agua-por-bajas-reservas/>
- Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024-5036.
- El Universo. (2009, noviembre 5). Ya empezaron los racionamientos de energía en el país. *El Universo*. Recuperado a partir de <http://www.eluniverso.com/2009/11/05/1/1447/ya-empezaron-racionamientos-energia-pais.html>
- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., ... Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574-1594.
- ETAPA EP. (2006). *Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la ciudad de Cuenca - Etapa II*.
- ETAPA EP. (2015a). Plantas de Potabilización. Recuperado 25 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.etapa.net.ec/Productos-y-servicios/Agua-potable/Potabilizaci%C3%B3n/Plantas-urbanas>
- ETAPA EP. (2015b). Red Hidrometeorológica de ETAPA - EP. Recuperado 25 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.etapa.net.ec/Productos-y-servicios/Gesti%C3%B3n-ambiental/Monitoreo-y-Vigilancia-de-Recursos-H%C3%ADricos-y-Clima/Red-Hidrometeorologica-de-ETAPA-EP>
- Guzmán, P. (2004). *Análisis de la dinámica de lluvia-escorrentía en microcuencas de páramo*. Universidad de Cuenca.
- Habib, E., Krajewski, W. F., & Ciach, G. J. (2001). Estimation of rainfall interstation correlation. *Journal of Hydrometeorology*, 2(6), 621-629.

- Haile, A. T., Rientjes, T. . H., Habib, E., Jetten, V., & Gebremichael, M. (2011). Rain event properties at the source of the Blue Nile River. *Copernicus Publications*.
- Helsel, D., & Hirsch, R. (2002). *Statistical methods in water resources* (Vol. 323). US Geological survey Reston, VA.
- Hrachowitz, M., & Weiler, M. (2010). Uncertainty of precipitation estimates caused by sparse gauging networks in a small, mountainous watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 460-471.
- Ilustre Municipalidad de Cuenca, & Universidad del Azuay. (2011). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca - Tomo II*.
- iMHEA. (2014). Medición de la Precipitación. Recuperado 27 de noviembre de 2015, a partir de [http://paramo.cc.ic.ac.uk/w/index.php/Medición\\_de\\_la\\_precipitación#CALIBRACI.C3.93N\\_EST.C3.81TICA](http://paramo.cc.ic.ac.uk/w/index.php/Medición_de_la_precipitación#CALIBRACI.C3.93N_EST.C3.81TICA)
- Josse, C., Mena, P. A., & Medina, G. (2000). *La Biodiversidad de los Páramos*. (D. Mosquera, Ed.) (Páramo 7). Quito: GTP/Abya Yala.
- Krajewski, W. F., Ciach, G. J., & Habib, E. (2003). An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological sciences journal*, 48(2), 151-162.
- Luyckx, G., & Berlamont, J. (2001). Simplified method to correct rainfall measurements from tipping bucket rain gauges. En *Urban Drainage Modeling* (pp. 767-776).
- Mora, D., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 631-648.
- Mora, D., Liu, T., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2012). Statistical Analysis on the Performance of Global and Regional Climate Models for the Paute River Basin in the South-Ecuadorian Andes. En *Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany*.
- Mora, D., & Willems, P. (2012). Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin—Southern Andes of Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2), 267-282.
- Orellana-Alvear, J., Célleri, R., Fries, A., & Bendix, J. (2015). Climatic and event-based Z-R relationships of different rainfall types and altitudes for the Andes of southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*.
- Overgaard, S., El-Shaarawi, A. H., & Arnbjerg-Nielsen, K. (1998). Calibration of tipping bucket rain gauges. *Water science and technology*, 37(11), 139-145.
- Padrón, R. (2013). *Análisis de la Estructura de la Lluvia en el Páramo*. Universidad de Cuenca.
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985-996.
- Pedersen, L., Jensen, N. E., Christensen, L. E., & Madsen, H. (2010). Quantification

- of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, 95(4), 441-454.
- Précis Mécanique. (2015). Pluviomètres Automatiques. Recuperado 25 de noviembre de 2015, a partir de [http://www.precis-mecanique.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=20&Itemid=35](http://www.precis-mecanique.com/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=35)
- Retzer, V., Nadrowski, K., & Miehe, G. (2006). Variation of precipitation and its effect on phytomass production and consumption by livestock and large wild herbivores along an altitudinal gradient during a drought, South Gobi, Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 66(1), 135-150.
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 99(2), 277-289.
- Rollenbeck, R., Fabian, P., & Bendix, J. (2006). Precipitation dynamics and chemical properties in tropical mountain forests of Ecuador. *Advances in Geosciences*, 6, 73-76.
- Tapiador, F., Hou, A., de Castro, M., Checa, R., Cuartero, F., & Barros, A. (2011). Precipitation estimates for hydroelectricity. *Energy & Environmental Science*, 4(11), 4435-4448.
- Torres, P., Célleri, R., Cisneros, F., & Feyen, J. (s. f.). Análisis de la Distribución Espacial de Lluvia en Cuencas de Montaña. En *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*.
- Universidad de Cuenca. (2015). Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. Recuperado 25 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.ucuenca.edu.ec/la-investigacion/departamentos-investigacion/recursos-hidricos>
- Vasco, S., Rodríguez, S., Rodas, F., Pesántez, M., Cabrera, S., Romero, M., ... Vallejo, S. (2012). *Propuesta para la Declaratoria de la Reserva de Biosfera dirigida a la UNESCO denominada: Área de Biosfera Macizo del Cajas*. Cuenca.
- Vasvári, V. (2005). Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area. *Atmospheric research*, 77(1), 18-28.
- Villarini, G., Mandapaka, P., Krajewski, W., & Moore, R. (2008). Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984--2012), 113(D11).
- Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill.
- Walsh, P., & Lawler, D. (1981). Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 36(7), 201-208.
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.

## ANEXOS

### Anexo 1: Calibración de Pluviómetros

La calibración estática permite conocer el volumen real de los balancines de los pluviómetros. El volumen real se obtiene al verter agua con una micro-pipeta sobre los balancines hasta producir un tip. El volumen nominal es aquel especificado por el fabricante. Al no coincidir estos valores se tienen dos opciones: ajustar los tornillos de calibración de los pluviómetros o corregir los datos con un factor de calibración (iMHEA, 2014).

El proceso de calibración estática usado es descrito en detalle en Padrón (2013). El volumen nominal de carga (Ecuación A.1) de los pluviómetros se define como:

$$\text{Vol nominal de carga (ml)} = \frac{\text{Área de recolección del pluviómetro (cm}^2\text{)} * \text{Resolución (ml)}}{10000 \text{ cm}^2} \quad (\text{A.1})$$

El Factor de Corrección (Ecuación A.2) es entonces:

$$F_c = \frac{\text{Vol Real (ml)} - \text{Vol Nominal (ml)}}{\text{Vol Nominal (ml)}} \quad (\text{A.2})$$

Este factor puede ser positivo o negativo. En función de la resolución del pluviómetro y con su  $F_c$  correspondiente, se obtiene el volumen real que produce un tip (Ecuación A.3).

$$\text{Vol real tip (mm)} = \text{Resolución (mm)} * (1 + F_c) \quad (\text{A.3})$$

### Resultados de la Calibración

Las fechas dentro del período de estudio abarcan dos años calendario (2014 y 2015), y campañas de calibración de los pluviómetros son llevadas a cabo cada mes de agosto, razones por las cuales se calcularon y utilizaron dos factores de calibración para cada serie en la gradiente (Tabla A.1).

**Tabla A.1.** Datos y resultados de la calibración estática de los pluviómetros de la gradiente para los años 2014 y 2015. Se encuentran resaltados los valores del  $F_c$  para cada año.

Estación	BAL	SAY	OFI	CHI	VIR	TOR
Área de recolección (cm <sup>2</sup> ) =	471.44	400.00	471.44	471.44	471.44	471.44
Resolución (mm) =	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
Resolución (ml) =	100	500	100	100	100	100
Volumen nominal (ml) =	4.714	20.000	4.714	4.714	4.714	4.714
Volumen real 2014 (ml) =	5.250	19.230	4.925	5.050	5.182	5.138
<b>Fc 2014 (%) =</b>	<b>11.36</b>	<b>-3.85</b>	<b>4.47</b>	<b>7.12</b>	<b>9.91</b>	<b>8.98</b>
Volumen real tip 2014 (mm) =	0.111	0.481	0.104	0.107	0.110	0.109
Volumen real 2015 (ml) =	5.119	18.975	5.100	4.900	5.217	5.363
<b>Fc 2015 (%) =</b>	<b>8.58</b>	<b>-5.12</b>	<b>8.18</b>	<b>3.94</b>	<b>10.65</b>	<b>13.75</b>
Volumen real tip 2015 (mm) =	0.109	0.474	0.108	0.104	0.111	0.114

Para todos los pluviómetros *Texas* se obtuvieron factores de calibración positivos, es decir, los balancines de los sensores se vuelcan y producen tips con volúmenes



de agua mayores a su resolución (se subestima la cantidad de precipitación). Para el pluviómetro *Précis Mécanique* SAY, los Fc resultaron negativos, es decir, el sensor sobreestima la cantidad de precipitación. Tomando en cuenta su resolución (0.5 mm), el error absoluto en la medición es mayor para este pluviómetro que para cualquier otro de la gradiente.

Ya que las calibraciones del año 2014 se llevaron a cabo entre los últimos diez días de agosto y los primeros dos días de septiembre (de acuerdo a la información de las bitácoras), y empleando un criterio de uniformidad, el Fc 2014 respectivo se aplicó en todos los tips anteriores al 01 de septiembre del 2014. Para el resto de registros de las series se aplicó el Fc 2015 correspondiente en su corrección.

Se destaca la importancia tanto de visitas periódicas a los lugares de monitoreo para verificar el estado de los sensores, así como el cálculo y aplicación de los Factores de Corrección como metodología necesaria antes del uso de los datos pluviométricos en cualquier estudio.

## Anexo 2: Control de Calidad de las Series

Las mediciones con pluviómetros son convenientes y confiables, sin embargo, como cualquier sensor de campo, están sujetos a errores sistemáticos y aleatorios. Los primeros incluyen fallas en la calibración, sub-estimación por viento y/o intensidad, o pérdidas por evaporación. El problema aleatorio más frecuente es el atasco por escombros en el embudo (insectos muertos, lombrices, excremento de aves) (Ciach, 2003; Krajewski et al., 2003; Padrón, 2013; Pedersen et al., 2010).

Una configuración simple y relativamente económica de las redes de monitoreo de precipitación se basa en la instalación de “pluviómetros pares o gemelos” en cada sitio de monitoreo, lo que puede resultar en un mejoramiento dramático de la calidad de las mediciones de precipitación en superficie, ayudando en la detección temprana de fallas y cuando hay deterioros parciales en las series de tiempo (Buttafuoco et al., 2011; Ciach & Krajewski, 2006; Ciach, 2003). Como se mencionó, las estaciones de monitoreo del estudio cuentan con pluviómetros pares de diferente marca y resolución.

Algunas estaciones (tanto meteorológicas como pluviométricas) de iDRHICA cuentan con un sistema de transmisión a tiempo real de las diferentes variables medidas. Sin embargo, campañas mensuales son llevadas a cabo para descargar manualmente la información de los pluviómetros y realizar su mantenimiento. Esta actividad es de esencial importancia, pues las inspecciones frecuentes, la limpieza y control de nivel de los sensores, y los intervalos de recolección de los datos, garantizan su calidad (Ciach & Krajewski, 2006).

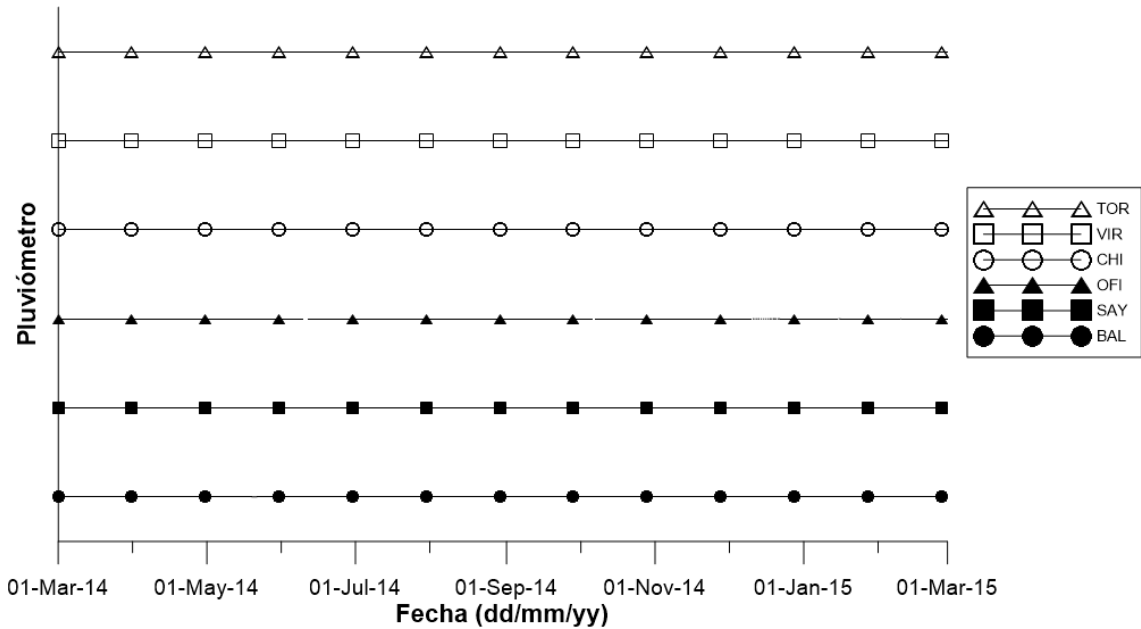
### Resultados del Control de Calidad

En los pluviómetros OFI, CHI, VIR y TOR se encontraron problemas en cuanto a información no coincidente con fecha traslapada en diferentes descargas. Al momento de conformar las series para cada pluviómetro se procuró la corrección de estos errores de una manera empírica.

La identificación de otro problema, derivada de la revisión de bitácoras, fue el desfase (adelantos) en la hora de los diferentes *dataloggers*, en el orden desde 22 s hasta 1 min 23 s por mes. El no corregir estos errores podría llevar a la obtención de conclusiones erróneas en análisis a escalas temporales pequeñas (5 minutos) (Ciach, 2003). Sin embargo, como se realizan descargas con frecuencia mensual y por estar fuera del alcance de este estudio, no se realizó ningún tipo de corrección adicional en este aspecto. Adicionalmente los registros causados por la manipulación de los pluviómetros (durante los procesos de calibración estática) fueron borrados.

Períodos vacíos en los registros de información se encontraron en algunas descargas. Sin embargo, estos vacíos representan un 3% de información perdida (equivalente a 11 días) en el caso de mayor magnitud para el pluviómetro OFI, especialmente durante el mes de diciembre del 2014. Para el resto de pluviómetros,

el porcentaje es extremadamente pequeño, representando menos de una hora de registros vacíos en toda la serie (Figura A.2). Debido a esto, tampoco fue necesaria la utilización de los pluviómetros pares instalados en las diferentes estaciones de monitoreo.



**Figura A.2.** Serie de datos disponible para cada pluviómetro en la gradiente. Los períodos vacíos en las series son mínimos.