



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

“Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar”

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Rocío Esperanza Salinas Orrego
C.I. 0106067200

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez
C.I. 0104580477

Directora:

Ing. Johanna Marlene Orellana Alvear, Msc.
C.I. 0104162268

Codirector:

Ing. Rolando Enrique Célleri Alvear, PhD.
C.I. 0602794406

Tutor:

Ing. Adrián Esteban Sucozhañay Calle, Msc.
C.I. 0105103766

Cuenca-Ecuador

16/05/2019



RESUMEN:

La intensidad de la precipitación y su variación espacial incide en la disponibilidad del recurso agua, el cual es relevante en el manejo de cuencas hidrográficas. En zonas de montaña, uno de los factores que influye en las características de la precipitación es la elevación. El presente estudio determina el efecto de la elevación en la distribución espacio temporal de la precipitación en las cuencas del río Tomebamba y Yanuncay. Se emplearon datos de un radar meteorológico con respecto a los meses de abril 2015, 2016, 2017, mayo 2015, 2016, noviembre 2016, enero y febrero 2017. Se encontró que entre los 2800 m s.n.m. a 3300 m s.n.m. se registra la mayor precipitación en seis de los ocho meses de estudio, principalmente en los meses más lluviosos. Además, entre los 3300 m s.n.m. a 3900 m s.n.m. se ve la mayor variabilidad espacial; adicionalmente, se determinó que la cuenca del Tomebamba es más húmeda que la del Yanuncay. Este estudio es pionero en la identificación de la relación precipitación-altitud en zonas de montaña en Ecuador con datos de radar. Se aprecia que no existe una relación lineal única entre la elevación y la distribución de la precipitación. Además, no se aprecia una relación entre la elevación y la variabilidad de la precipitación. Futuras investigaciones podrían estar enfocadas en determinar la influencia de la pendiente con relación a la variabilidad espacial- temporal de la precipitación orográfica.

Palabras clave: Radar meteorológico. Precipitación. Variabilidad espacio temporal. Distribución espacio temporal.



ABSTRACT:

Rainfall depth and its spatial variation affects water resources availability, which is relevant in watersheds management. In mountain areas, one of the factors that influences rainfall characteristics is elevation. The present study determines the effect of elevation in space time rainfall distribution in the Tomebamba and Yanuncay river basins. Data from a radar located on the Paragüillas hill at the northern limit of the Cajas National Park was used, regarding to the months April 2015, 2016, 2017, May 2015, 2016, November 2016, January and February 2017. It was found that between 2800 m s.n.m. and 3300 m s.n.m. the highest rainfall is recorded in six of the eight months of study, mainly in the rainiest months. Also, between 3300 m s.n.m. and 3900 m s.n.m. the greatest rainfall spatial variability is seen; additionally, it was determined that the Tomebamba basin is more humid than the Yanuncay basin. This study is pioneer in the identification of precipitation-altitude relationship in mountain areas in Ecuador with radar data. It is appreciated that there is no unique linear relationship between elevation and rainfall distribution. Moreover, there is no relationship between elevation and rainfall variability. Future investigations could be focused on determining the influence of the slope in the space-time orographic rainfall variability.

Keywords: Weather radar. Rainfall. Space-time variability. Space-time distribution.



Índice

1. INTRODUCCIÓN	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1 Área de estudio.....	18
2.2 Datos.....	20
2.2.1 Radar Meteorológico CAXX	20
2.2.2 Recolección y procesamiento de datos.....	21
2.3 Métodos	23
2.3.1 Clasificación del gradiente altitudinal	23
2.3.2 Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación.....	28
2.3.3 Variabilidad espacio-temporal de la precipitación	28
2.3.4 Diferencias en la variabilidad y distribución espacio-temporal de la precipitación entre las cuencas de Tomebamba y Yanuncay	29
3. RESULTADOS.....	31
3.1. Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación, en toda el área de estudio.....	31
3.2. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación	37
3.3. Diferencias en la variabilidad y distribución espacio-temporal de la precipitación entre las cuencas de Tomebamba y Yanuncay	40
4. DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.....	51
5. CONCLUSIONES	53
6. RECOMENDACIONES.....	55



7. REFERENCIAS56

8. ANEXOS64

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.19

Figura 2. Ubicación del Radar CAXX20

Figura 3. División Altitudinal de cinco pisos piso27

Figura 4. División altitudinal de cinco pisos para la Cuenca del Tomebamba y Yanuncay30

Figura 5. Relación entre altitud y precipitación promedio, por mes.33

Figura 6. Precipitación promedio mensual por piso altitudinal.35

Figura 7. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal para los meses de abril de los tres años de estudio.....36

Figura 8. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal para los meses de mayo de los dos años disponibles.....36

Figura 9. Coeficiente de variación mensual por piso altitudinal.....38

Figura 10. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal para los meses de abril de los tres años de estudio.....39

Figura 11. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal para los meses de mayo de los dos años disponibles.....40

Figura 12. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal por mes para cada cuenca.....43

Figura 13. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal bajo mes a mes.45

Figura 14. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio bajo mes a mes.45

Figura 15. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio mes a mes.45

Figura 16. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio alto mes a



mes.46

Figura 17. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal alto mes a mes.
.....46

Figura 18. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal por mes para cada
cuenca.....48

Figura 19. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal bajo mes a mes.
.....50

Figura 20. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio bajo mes
a mes.50

Figura 21. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio mes a
mes.51

Figura 22. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio alto mes a
mes.51

Figura 23. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal alto mes a mes.
.....51

Índice de Tablas

Tabla 1. Porcentaje (%) de datos disponibles para cada mes de datos analizados.
..... 22

Tabla 2. Clasificación de ecosistemas propuestos por el MAE 24

Tabla 3. Clasificación de ecosistemas propuestos por el MAE 24

Tabla 4. División de rangos altitudinales de seis pisos 26

Tabla 5. División de rangos altitudinales de cinco pisos 27



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Rocío Esperanza Salinas Orrego en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de Mayo del 2019

Rocío Esperanza Salinas Orrego

C.I: 0106067200



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de mayo de 2019

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez

C.I: 0104580477



Cláusula de Propiedad Intelectual

Rocío Esperanza Salinas Orrego, autora del trabajo de titulación “Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar.”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 16 de mayo del 2019

A handwritten signature in blue ink that reads "Rocío Salinas Orrego" written over a horizontal line.

Rocío Esperanza Salinas Orrego

C.I: 0106067200



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez, autor del trabajo de titulación "Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 16 de mayo de 2019

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez

C.I: 0104580477



AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la Ing. Johanna Orellana Alvear, Msc. por su constante motivación, por su valiosa contribución y aporte de conocimientos para la realización de esta investigación. Agradecemos también al Ing. Rolando Célleri Alvear, PhD y al Ing. Adrián Sucoshañay, Msc., por todo el tiempo, conocimientos y paciencia brindada.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, Fundación Alemana de Investigación, Empresa de telecomunicaciones, alcantarillado y agua potable de Cuenca (ETAPA EP); instituciones parte del proyecto —Operational rainfall monitoring in southern Ecuador, quienes han facilitado los datos del radar meteorológico para la realización de la presente investigación.

Rocío y Pedro



AGRADECIMIENTOS

A mis padres Esperanza y Luis quienes son los pilares de mi vida por su perseverancia, dedicación y por su profundo amor.

A mi hermano Luis por ser mi ejemplo a seguir, por siempre brindarme su apoyo y consejos en los momentos más importantes de mi vida.

A mi hermano Juan Pablo por ser mi mejor amigo, siempre escucharme y brindarme su apoyo.

A mis amigas y amigos a Joselyn, Valeria, Gabriela, Irina, Magaly, Carina, Pamela, Viviana, Maca, Carolina, Fredy, Pancho, Cachetes, Fabián, Tania, Franklin, Oscar, chino, Rafael, Mishelle, Emilia, Belén, Cajitas y Angi, por todas las experiencias compartidas que han enriquecido mi vida.

A Pedro mi mejor amigo y hermano, por siempre estar conmigo apoyándome en los momentos buenos y malos.

A Dios quien me ha dado la fortaleza y sabiduría para alcanzar esta etapa académica.

Rocío Esperanza Salinas Orrego



AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por apoyarme siempre a alcanzar mis metas, ellos han sido un pilar fundamental en mi formación personal y académica, a mi madre por permanecer a mi lado siempre y guiar mi camino en la dirección correcta, a mi padre por su sabias palabras que cada vez me han inspirado a continuar con más fuerza y conseguir mis objetivos, a mi hermano que siempre está presente en mis pensamientos recordándome mis ideales y a mi hermana que me inspira a ser un ejemplo para ella y dar lo mejor de mí.

Gracias a mis amigos y amigas, principalmente a mi gran amiga y coautora de esta tesis, Rocío, sin la cual este trabajo no habría sido posible y que además me ha enseñado invaluable lecciones de vida más allá de lo académico, a mis amigos de la carrera que han ido más allá de compartir un aula y gracias a su incondicional apoyo han creado un vínculo que continuará después de esta etapa, a mis amigos de la vida que con su “bullying” han logrado levantarme cuando me he caído y me han regresado al camino indicado.

Gracias a la suerte en mi vida que me ha permitido estudiar, a la universidad que me ha prestado las facilidades para hacerlo, a los profesores que me han compartido su conocimiento y a todas esas personas que han influido positivamente en mi vida.

Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez



1. INTRODUCCIÓN

La precipitación tiene un papel esencial en las interacciones de los ecosistemas y en las actividades socioeconómicas de las poblaciones (Dominguez, Velásquez, Jiménez, & Faustino, 2008). Es clave para el desarrollo porque influye en la disponibilidad de recursos hídricos y está relacionada con ciertos fenómenos naturales como inundaciones y sequías (Casas & Alarcón, 1999; Hrachowitz & Weiler, 2010).

La variabilidad espacial y temporal de la precipitación es determinante en el aprovechamiento de los recursos hídricos con influencia directa en los ecosistemas y supervivencia de las especies (Berndtsson & Niemczynowicz, 1988; Casas et al., 1999). Por lo cual, la evaluación de esta variabilidad es de gran importancia para la gestión de las cuencas hidrográficas, porque repercute en los planes de desarrollo y ordenamiento territorial (Céleri, Willems, Wouter, & Feyen, 2007).

Gran parte de la variabilidad de la precipitación se debe a características de pequeña escala como el viento, determinado por las pendientes y topografía (Celleri et al., 2007; Mora et al., 2014). Además, a gran escala está influenciada por efectos altitudinales y latitudinales (Buytaert, Celleri, De Bièvre, Cisneros, & Wyseure, 2006). Por ejemplo, en el sur de Cataluña se encontró que en las estaciones secas (verano e invierno) la variabilidad espacio-temporal aumenta, mientras que en las estaciones húmedas (primavera y otoño) disminuye (Lemus, Albert, & López, 2016).

Pabón et al., (2001), encontró una elevada variación en el volumen de precipitación para la parte interandina de Colombia, la precipitación aquí varía entre 500 y 4000 mm y presenta un régimen bimodal en su distribución anual. En las zonas montañosas de Perú con altitud superior a los 3000 m s.n.m. (Andes del



Norte y Centrales), la altitud y latitud tienen una influencia (mayoritariamente positiva) muy notoria sobre la precipitación media total anual en todas las regiones (Rau & Condom, 2010).

La distribución de la precipitación también está influenciada por diferentes factores (ej. orografía, altitud, latitud, temperatura) en zonas de montaña (Casas et al., 1999; Céleri et al., 2007; Rodríguez, Capa, & Lozano, 2004). Por ejemplo, en la cuenca del Mediterráneo occidental se identificó que la orografía es un factor clave para la distribución espacial de la precipitación, que se favorece en tierras altas expuestas al flujo de aire y se reduce en las tierras bajas circundantes (Sotillo, Ramis, Romero, Alonso, & Homar, 2003). Además, Pizarro & Gutiérrez (2006), sostienen que la circulación de masas de aire generadas entre el valle y la montaña en la cuenca del río Guatapé (Medellín) explica la distribución espacial y temporal de la precipitación. También se conoce que la altitud influye significativamente en la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas (Sokol & Bližňák, 2009); por lo cual, se considera uno de los mejores predictores para la distribución de la precipitación (Sevruk, Matokova, & Toskano, 1998). Por ejemplo, en el sur de Kenia se identificó una relación directamente proporcional entre la altitud y la precipitación. Se encontró que, en las zonas oriental y occidental la proporción precipitación-altitud es mayor que en la zona central (Trapnell & Griffiths, 2016).

También, en las montañas de Santa Catalina (Arizona) se identificó que el promedio de eventos por temporada, el promedio de precipitación por evento y el promedio total de precipitación por temporada incrementan con la elevación; mientras, que el coeficiente de variación disminuye (Duckstein, Fogel, & Thames, 1973). Además, Hayward & Clarke (2009), determinó que la precipitación incrementa con la altitud durante el monzón que se presenta en los meses de julio-octubre en la península de Freetown (Sierra Leona). Se debe mencionar que las relaciones altitud-precipitación dependen en gran medida de la calidad y la



representatividad de los datos (Sokol & Bližňák, 2009), es decir, de las redes de monitoreo en tierra con las cuales se pueden realizar los estudios.

En el Ecuador en la cuenca del río Paute se han llevado a cabo varios estudios pues esta cuenca es una de las más importantes del país por su riqueza ecosistémica y por albergar importantes proyectos energéticos (Avilés et al., 2016). Se demostró un elevado grado de variabilidad espacial (Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2014). También, se encontró que en la depresión central y la zona oeste de la cuenca existe una relación lineal entre la precipitación media anual y la elevación (Céleri et al., 2007). Además, en la parte alta de la cuenca del río Paute se encuentran las cuencas del Tomebamba y Yanuncay, las cuales abastecen de agua aproximadamente al 64% de la población de la ciudad de Cuenca. Estas también proveen agua para los requerimientos agrícolas, ganaderos y turísticos (Cocha, 2009). Buytaert et al., (2006), hacen referencia a la relevancia de examinar el efecto de la elevación en la distribución de la precipitación e intentar definir una relación entre ambos debido a que en cuencas de montaña la elevación es uno de los principales factores que conduce los patrones climáticos.

En la cuenca del Yanuncay se realizó un estudio sobre la variabilidad de la precipitación a lo largo de la misma y se recomienda realizar estudios similares para otras cuencas que aporten recursos hídricos a la ciudad de Cuenca (Brito, 2018). Por otro lado, Tapia (2016), realizó un estudio de la estructura de la precipitación y la variabilidad espacio-temporal a lo largo del gradiente altitudinal en la cuenca del Tomebamba; se encontró que no existe una relación lineal entre la elevación y la precipitación.

En los estudios mencionados se utilizaron pluviómetros, los que generan una limitada cantidad de información al representar la lluvia en un solo punto, por lo que presentan una amplia incertidumbre en la estimación espacial de la lluvia



(Bendix et al., 2017; Renom, 2011), debido a que los métodos de interpolación/extrapolación espacial requieren de una densa red de equipos localizados en forma homogénea para representar adecuadamente la precipitación. Estos métodos generalmente utilizan la relación altitud-precipitación para mejorar los resultados (Sokol & Bližňák, 2009).

Celleri et al. (2007) indican que son necesarias más estaciones en el rango altitudinal de 2800 a 4200 m s.n.m. en la cuenca del Paute para evaluar efectivamente la variabilidad de la precipitación con la elevación. Sin embargo, equipar la cuenca de montaña con más pluviógrafos es muy complejo por la poca accesibilidad al terreno. Como una alternativa a estos sensores en la actualidad se usan radares meteorológicos, pues estos pueden obtener estimaciones de lluvia a intervalos cortos de tiempo, detectar la precipitación sobre el área de cobertura y detectar celdas de lluvia intensa (Villarini, Witold, & Krajewski, 2009). Por esta razón, en el sur del Ecuador se implementó el proyecto Radarnet-Sur, como parte de una nueva red de radares meteorológicos desarrollada en las altas montañas tropicales (Bendix et al., 2017; Orellana et al., 2017).

El proyecto Radarnet-Sur consta de tres radares meteorológicos ubicados en las provincias de Azuay (CAXX) y Loja (LOXX y GUAXX). Las imágenes generadas por estos radares reportan la intensidad relativa y la distribución espacial de la precipitación con una frecuencia de cinco minutos (Bendix, 2017). A pesar de las ventajas que presentan estos radares, sus estimaciones se ven afectadas por un inadecuado ajuste, efecto de la atenuación, terreno irregular, propagación anómala, bloqueo del haz energético y variabilidad de la relación reflectividad-precipitación (relación Z-R). Por esto, se realizan correcciones en las estimaciones para mejorar la calidad de datos generados por estos radares (Hossain, Anagnostou, & Borga, 2004; Orellana et al., 2017; Villarini et al., 2009).



Considerando la importancia ya mencionada del recurso hídrico, los vacíos de conocimiento sobre la variabilidad de la precipitación, esta investigación pretende determinar el efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas del Tomebamba y Yanuncay. Para ello se aprovechará la disponibilidad de información espacial proveniente del radar CAXX.

Este estudio es exploratorio, busca emplear una tecnología innovadora como lo es el sensor remoto activo que tiene poco tiempo de instalación, si bien no trabajamos con dos años de datos consecutivos, de igual manera con ocho meses no consecutivos es un primer acercamiento para evaluar el comportamiento de la precipitación en cada piso altitudinal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay comprenden un área de 380.42 km² y 418.88 km², respectivamente (Cocha, 2009). La ciudad de Cuenca se encuentra en su desembocadura. Dentro de estas cuencas se ubica parte del Parque Nacional Cajas, como se muestra en la Fig.1. Estas son refugio de una riqueza de flora y fauna endémica así como de un complejo lagunar excepcional de casi 700 cuerpos de agua, donde nacen los ríos Tomebamba y Yanuncay (Astudillo, Tinoco, & Siddons, 2015; Machado & Samaniego, 2012; Pesántez, 2015).

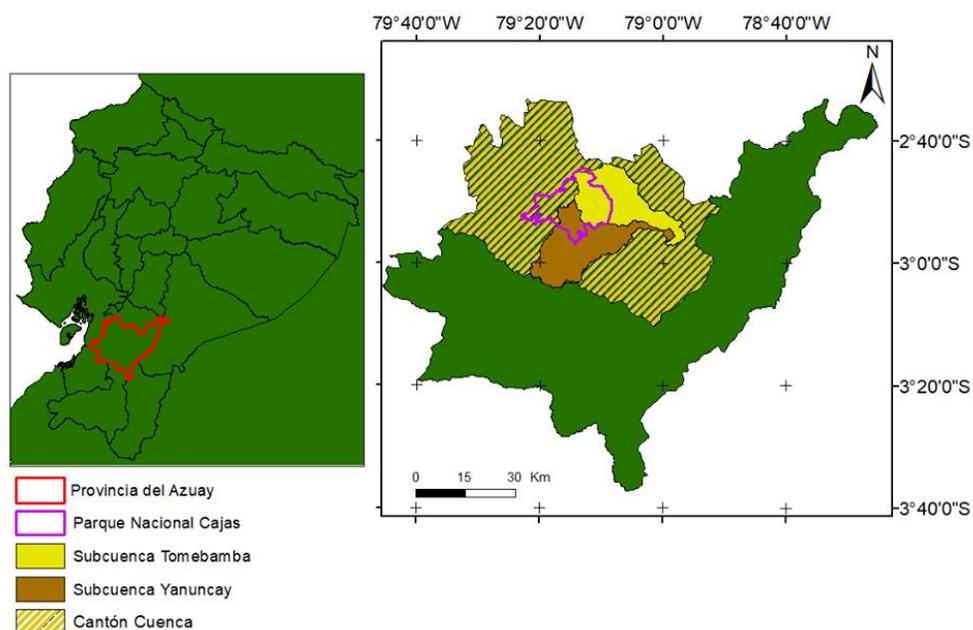


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Fuente: (ODEPLAN, 2002; Universidad del Azuay, 2002;)

Estas cuencas muestran una pluviosidad media anual de 1013 mm (Muñoz, Orellana, Willwms, & Célleri, 2007), presentan un régimen estacional bimodal con dos estaciones húmedas (118.17mm por mes) marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON); y dos estaciones secas (100.5 mm por mes) diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA) (Célleri et al. 2007).

La altitud de las cuencas varía entre 2440 y 4419 m s.n.m., la temperatura diurna media anual varía en función de la altitud desde 12.5°C a los 2600 m s.n.m. hasta 6°C a los 4200 m s.n.m. (Córdova, Célleri, Shellito, & Orellana, 2016). La vegetación predominante en estas cuencas consiste en pajonales (comúnmente del género *Calamagrostis* y *Festuca*) y almohadillas (como *Plantago rigida*, *Xenophyllum humile*, *Azorella spp.*) que están directamente relacionadas con el tipo de suelo, en este caso Andosoles e Histosoles respectivamente (Mosquera et al., 2016). Además, presentan rosetas, arbustos pequeños y musgos (Brito, 2018).

2.2 Datos

2.2.1 Radar Meteorológico CAXX

El radar CAXX se encuentra instalado en el cerro Paragüillas, ubicado en el límite norte del Parque Nacional Cajas a una altitud de 4450 m s.n.m como se muestra en la Fig. 2. El alcance de monitoreo de precipitación cubre las provincias de Azuay y Cañar y de forma parcial El Oro, Loja y Guayas (GAD provincial de Loja, 2018). Forma parte del proyecto regional de Transferencia de Conocimiento Alemán “Operational rainfall monitoring in southern Ecuador” (Monitoreo operativo de lluvia en el sur de Ecuador) (German Research Foundation, 2018).

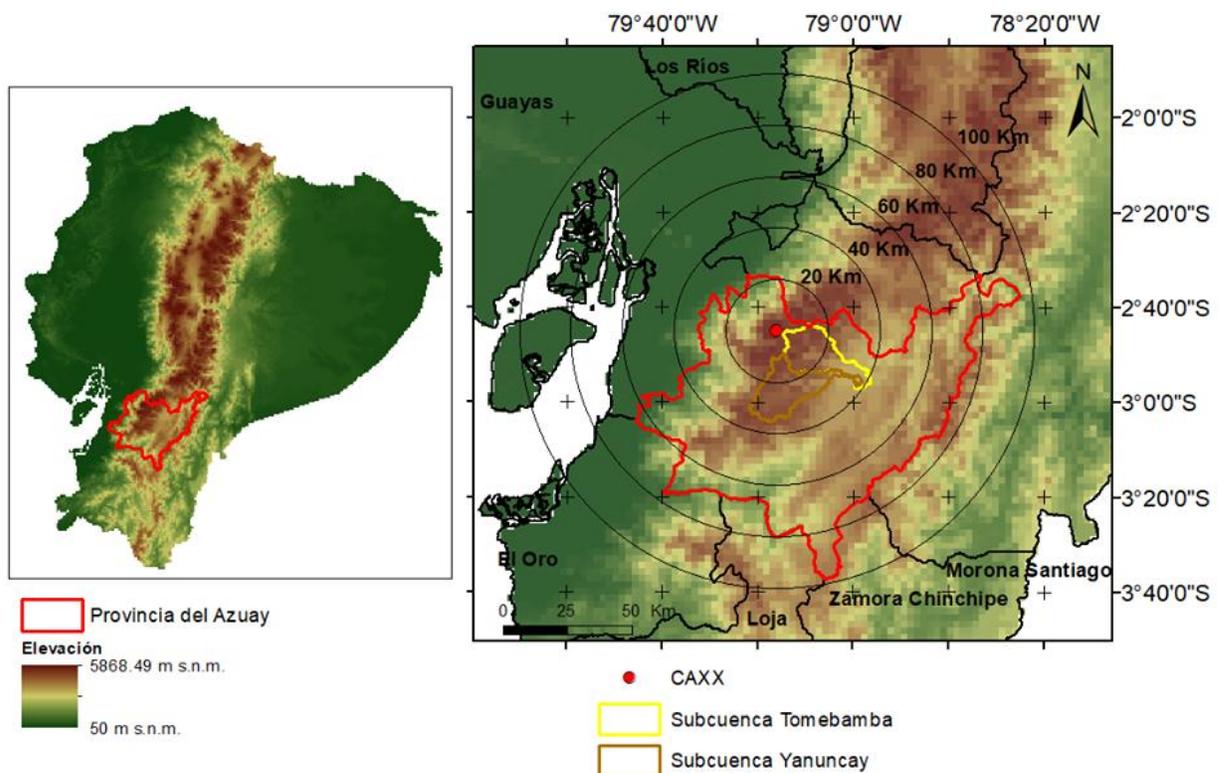


Figura 2. Ubicación del Radar CAXX

Fuente: (ODEPLAN, 2002; Universidad del Azuay, 2002)



Este radar emite una onda magnética que cubre un área de 31 415.93 km². El radar recibe el reflejo de energía de las gotas de precipitación registrando la información en datos de reflectividad (dBZ), mientras mayor sea la distancia que recorre este reflejo de energía, es más probable que presente mayor subestimación por el efecto de la atenuación. Posteriormente, en el procesamiento estos datos se transforman a unidades de precipitación (mm) (Guerra, Mamaduo, Joret, 2011; Moshinsky, 1995).

2.2.2 Recolección y procesamiento de datos

La precipitación registrada por el radar CAXX está expresada en forma de reflectividad (dBZ). El radar entonces genera mapas de reflectividad con una frecuencia de 5 minutos y resolución espacial en coordenadas polares, ángulo de 2 grados y una distancia de 100 m con una cobertura total de 360 grados y 100 km (Bendix et al., 2017). Para evitar la pérdida de datos que se produce en la transformación a coordenadas cartesianas, en el presente estudio se trabajó en coordenadas polares; sin embargo, para la representación gráfica de los resultados estos se transformaron a coordenadas cartesianas.

Los datos se guardan en archivos diarios en formato NetCDF (*.nc), los archivos en este formato almacenan matrices de dos o más dimensiones que incluyen metadatos donde se detalla el tipo de información en el archivo (unidades, dimensiones y otros) (Environmental Systems Research Institute, 2018; Villarini et al., 2009). Los archivos provenientes del radar CAXX se presentan en forma de una matriz de tres dimensiones (288*180*1000). La primera dimensión corresponde a los intervalos de tiempo, la segunda dimensión a los intervalos de azimuth y la tercera a los intervalos de distancia.

Los datos fueron procesados por el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca y se realizaron los siguientes procedimientos: 1)



corrección de clutter (estático y dinámico) para remover interferencias debido al terreno irregular (Gabella & Notarpietro, 2002); 2) interpolación de datos con el fin de completar espacialmente las celdas removidas (Heistermann, Jacobi, & Pfaff, 2013); 3) corrección de la atenuación para minimizar subestimaciones; 4) conversión de reflectividad (dBZ) a lluvia (mm/h) utilizando la relación de precipitación-reflectividad $Z=180 \cdot R^{2.03}$ establecida por Orellana et., al (2017) ; 5) transformación a intensidad de lluvia (mm); y 6) acumulación en una escala temporal horaria, es decir en una matriz de tres dimensiones (24*180*1000).

Con el fin de escoger los meses representativos para las estaciones secas y húmedas, se calculó el porcentaje de datos disponibles para cada mes utilizando un script¹ creado en Python. Los meses escogidos presentan porcentajes entre el 71% al 99% como se observa en la Tabla 1. Se eligió: abril y mayo de 2015; abril y mayo de 2016; noviembre de 2016 y abril de 2017 como meses representativos de la estación húmeda, enero y febrero de 2017 como representativos de la estación seca en función del régimen bimodal.

Tabla 1. Porcentaje (%) de datos disponibles para cada mes de datos analizados.

Año/Mes	Abril	Mayo	Noviembre	Enero	Febrero
2015	96.75	83.47	-	-	-
2016	98.82	80.10	70.70	-	-
2017	83.75	-	-	71.89	90.80

Se calculó la acumulación mensual de la precipitación a partir de los archivos diarios de los meses escogidos. Las acumulaciones mensuales exigen menos

¹Script: Los scripts utilizados para esta investigación son propiedad del departamento de recursos hídricos y ciencias ambientales.



recursos analíticos y computacionales y por otro lado son el primer paso para comprender la variabilidad espacial de lluvia a nivel de cuencas (Germann, Galli, Boscacci, & Bolliger, 2006). Finalmente, se generó una matriz de dos dimensiones (180*1000) mediante un script¹ creado en Python.

Se emplearon las librerías: 1) netCDF4 para la manipulación de archivos NetCDF; 2) wradlib para el manejo de datos de radar; 3) numpy para trabajar con matrices y arreglos de datos (Oliphant, 2015); y 4) matplotlib para graficar y observar la distribución de los datos (Heistermann, Jacobi, Pfaff, & Technical, 2011; Hunter, 2007) .

2.3 Métodos

Para esta investigación se analizaron las siguientes relaciones: primeramente, el efecto de la elevación tanto en la distribución espacial como temporal de la precipitación (sección 2.3.1), y posteriormente la variabilidad espacial y temporal de la precipitación (sección 2.3.2). Desde el punto de vista geográfico, estos análisis se realizaron para toda el área de estudio; es decir, se consideró ambas cuencas como un solo cuerpo como se observa en la Fig. 3. En segunda instancia (sección 2.3.3) se realizaron estos análisis independientemente para cada cuenca y se compararon los resultados para identificar si existen o no diferencias entre ellas. A continuación, se detallan las actividades realizadas y los métodos empleados.

2.3.1 Clasificación del gradiente altitudinal

Para visualizar la precipitación dentro del área de estudio y determinar su relación con la elevación, el área de estudio se dividió en seis pisos altitudinales mediante las herramientas del software ArcGIS 10.5. Se emplearon los rangos de elevación



del sector sur de la cordillera de los andes y del sector páramo (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013), como se puede observar en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Clasificación de ecosistemas propuestos por el MAE

Sector sur de la cordillera oriental de los Andes		
Clasificación MAE	Formación vegetal/ecosistema	Variación altitudinal
Bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes	Bosque de neblina montano, sector sur de la cordillera oriental	2200-3000 m s.n.m.
Bosque siempreverde montano alto del sur de la cordillera oriental de los Andes	Bosque siempreverde montano alto, sector sur de la cordillera oriental	3000-3400 m s.n.m.

Tabla 3. Clasificación de ecosistemas propuestos por el MAE

Sector páramo		
Clasificación MAE	Formación vegetal/ecosistema	Variación altitudinal
Bosque siempreverde montano alto y montano alto superior de páramo	Bosque siempreverde montano alto	2900-3300 m s.n.m.
Herbazal bambusoide montano alto y montano alto superior de páramo Herbazal montano alto y	Páramo herbáceo	3000-3300 m s.n.m.



montano alto superior de páramo		2850-3900 m s.n.m.
Herbazal inundable montano alto y montano alto superior de páramo	Herbazal lacustre montano alto	3300-4500 m s.n.m.
Herbazal y arbustal montano alto y montano alto superior de páramo	Bosque siempreverde montano alto	2800-3600 m s.n.m.
Herbazal húmedo montano alto superior de páramo	Páramo seco	3500-4200 m s.n.m.
Arbustal siempreverde montano alto superior y subnival de páramo	Páramo de almohadillas	4100-4500 m s.n.m.
Arbustal siempreverde montano alto de páramo del sur de Ecuador	Páramo arbustivo	2800/3100-3300 m s.n.m.

Esta división fue propuesta por el sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador Continental (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). En la Tabla 4 se muestra la división altitudinal de 6 pisos ajustada a partir de esta clasificación. Los mapas usados en esta investigación fueron descargados de la página web de cartografía de la Universidad del Azuay, (2002), “Información digital de la cuenca del río Paute”.



Tabla 4. División de rangos altitudinales de seis pisos

Pisos Altitudinales	Rangos Altitudinales
Piso 1	2200 m s.n.m. -2800 m s.n.m.
Piso 2	2800 m s.n.m. -2900 m s.n.m.
Piso 3	2900 m s.n.m. -3300 m s.n.m.
Piso 4	3300 m s.n.m. -3600 m s.n.m.
Piso 5	3600 m s.n.m. -4100 m s.n.m.
Piso 6	4100 m s.n.m. -4500 m s.n.m.

Sin embargo, con esta clasificación los picos de las montañas más altas pertenecientes al piso 6 producen polígonos con áreas muy pequeñas dentro del polígono que representa al piso 5. Además, el polígono que representa al piso 2 posee un área muy pequeña. Por estas razones, se eliminó el piso 2 y se reajustaron los rangos altitudinales de los demás pisos, dando como resultado una división del área de estudio en cinco pisos altitudinales en función de los rangos mostrados en la Fig. 3. En la tabla 5 se muestra los acrónimos con los que se trabajaran de aquí en adelante.

Tabla 5. División de rangos altitudinales de cinco pisos

Pisos Altitudinales	Acrónimos	Rangos Altitudinales
Piso Altitudinal Bajo	PAB	2200 m s.n.m-2800 m s.n.m
Piso Altitudinal Medio Bajo	PAMB	2800 m s.n.m-3300 m s.n.m
Piso Altitudinal Medio	PAM	3300 m s.n.m-3600 m s.n.m
Piso Altitudinal Medio Alto	PAMA	3600 m s.n.m-3900 m s.n.m
Piso Altitudinal Alto	PAA	3900 m s.n.m-4500 m s.n.m

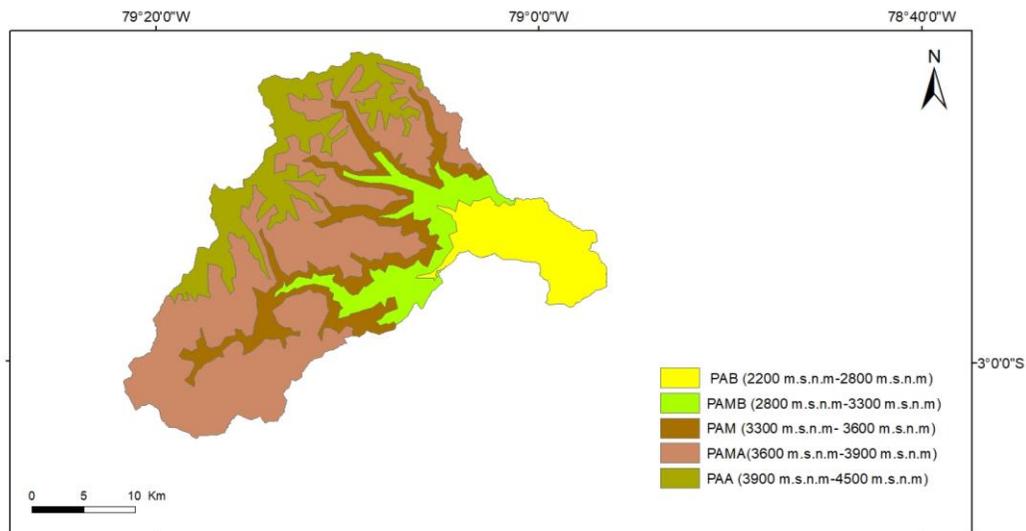


Figura 3. División Altitudinal de cinco pisos piso

Fuente: (Universidad del Azuay, 2002; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013)



2.3.2 Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación

A partir de los datos de precipitación de las celdas que registra el radar como se explica en la sección 2.2.2 y empleando la división altitudinal de la sección 2.3.1 se calcularon los promedios mensuales de precipitación para cada piso altitudinal. Para determinar el grado o fuerza y dirección (inversa o directa) de la relación lineal entre la elevación y la distribución espacial de la precipitación se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) y para determinar el grado de ajuste del modelo lineal se calculó el coeficiente de determinación (R^2). Se empleó el diagrama de dispersión para visualizar esta relación, tomando como variable independiente a la altitud promedio y como variable dependiente a la precipitación promedio mensual.

Además, para determinar el efecto de la elevación en la distribución temporal de la precipitación, se graficó mediante el diagrama de barras la evolución temporal de precipitación con respecto a cada piso altitudinal para cada mes de estudio.

Adicionalmente, para estimar la variación interanual en la distribución mensual de la precipitación, se utilizaron diagramas de dispersión y se analizaron las variaciones entre los meses de abril para los tres años de estudio y los meses de mayo para los dos años disponibles.

2.3.3 Variabilidad espacio-temporal de la precipitación

Para determinar la variabilidad espacial dentro de cada piso altitudinal se calculó el coeficiente de variación de Spearman (CV) a partir de la ecuación 1, empleando los promedios de precipitación obtenidos en la sección 2.3.2 y la desviación estándar calculada para cada piso altitudinal. Este coeficiente expresa la dispersión relativa de los datos. Cuanto mayor es este coeficiente más



heterogénea es la dispersión, generalmente este coeficiente es menor a 1 (Cortez , Olivares, 2016; Lemus, Albert & , Bustins , 2016).

$$\text{Coeficiente de variación} = \frac{\text{Desviación estandar}}{\text{Media aritmética}} \quad \text{Ecu. (1)}$$

Además, para determinar la variabilidad temporal de la precipitación, se graficó mediante el diagrama de barras la evolución temporal de precipitación con respecto a cada piso altitudinal.

Finalmente, para estimar las diferencias anuales de la variabilidad, se analizó las variaciones mediante diagramas de dispersión para los meses de abril para los tres años de estudio y los meses de mayo para los dos años disponibles.

2.3.4 Diferencias en la variabilidad y distribución espacio-temporal de la precipitación entre las cuencas de Tomebamba y Yanuncay

Para contrastar el efecto de la elevación en la distribución espacial de la precipitación entre las cuencas de estudio, se dividió el área de estudio como se aprecia en la Fig. 4, se calcularon los promedios de precipitación para cada piso altitudinal y se emplearon diagramas de dispersión con el objetivo de indicar las diferencias entre las cuencas del Tomebamba y Yanuncay. Las diferencias del efecto de la elevación en la distribución temporal entre las cuencas de estudio se determinaron mediante diagramas de dispersión de precipitación con respecto a cada piso altitudinal para cada mes de estudio.

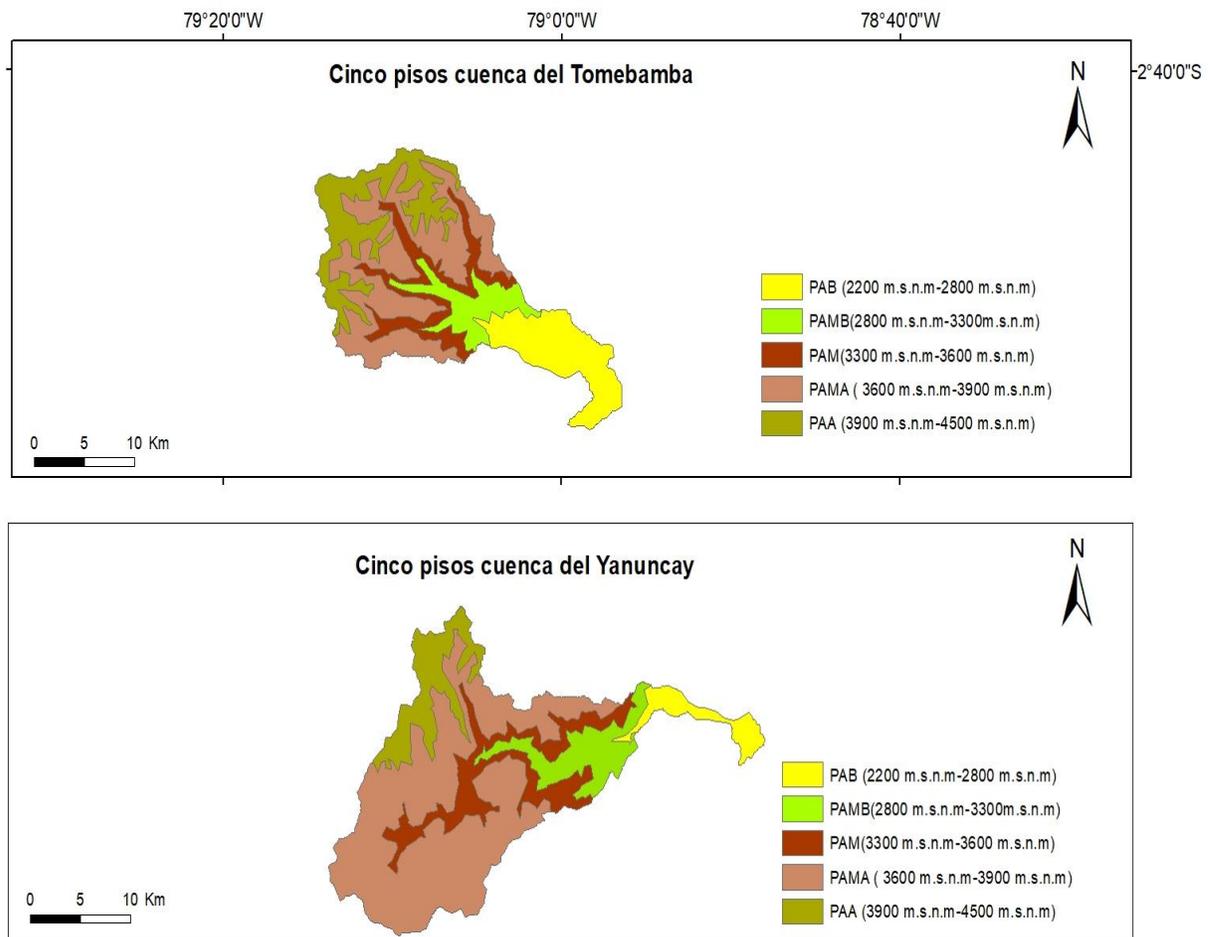


Figura 4. División altitudinal de cinco pisos para la Cuenca del Tomebamba y Yanuncay
Fuente: (Universidad del Azuay, 2002; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013)

Para determinar la relación de la variabilidad espacial se calculó el coeficiente de variación de cada piso altitudinal para la cuenca del Tomebamba y para la cuenca del Yanuncay. La variabilidad temporal se determinó mediante diagramas de dispersión del coeficiente de variación de cada piso altitudinal y su evolución mes a mes para todos los meses de estudio por cuenca.



Finalmente, se generaron mapas mostrando los coeficientes de variación en forma porcentual y los promedios de precipitación para cada piso altitudinal correspondientes a cada cuenca.

3. RESULTADOS

3.1. Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación, en toda el área de estudio

En la Fig. 5 se presenta los promedios de precipitación en el gradiente altitudinal para cada mes junto con la tendencia y el coeficiente de determinación, esto se realizó para determinar el grado y dirección de la relación entre estas variables.

Se observa que en noviembre de 2016 ($r = 0.07$) y abril de 2015 ($r = 0.08$) no existe una relación entre la elevación y la promedio de la precipitación en los pisos altitudinales; además, se observa una relación de grado moderado que en febrero de 2017 ($r = 0.41$) y enero de 2017 ($r = 0.62$) es directa y en abril de 2017 ($r = -0.45$) y abril de 2016 ($r = -0.54$) es inversa. Finalmente, la relación de mayor grado se presenta en mayo, siendo directa para el año 2015 ($r = 0.8$) e inversa para el año 2016 ($r = -0.8$).

Como se aprecia no existe una relación única entre la elevación y la precipitación, pues esta varía de un año a otro y de mes a mes, aparentemente sin un patrón definido. Sin embargo, si no se toma en cuenta los meses del año 2015, se ve que la relación es directa para los meses de inicio de año (enero y febrero), inversa para los meses intermedios (abril y mayo) y nula para fin de año (noviembre).

Aunque algunos meses tienen un r alto como ya se mencionó, se observa que el grado de ajuste del modelo lineal es aceptable únicamente para los meses de



mayo ($R^2 > 60\%$), mientras que para los meses restantes de estudio no se aprecia una relación lineal con la altura ($R^2 < 40\%$).

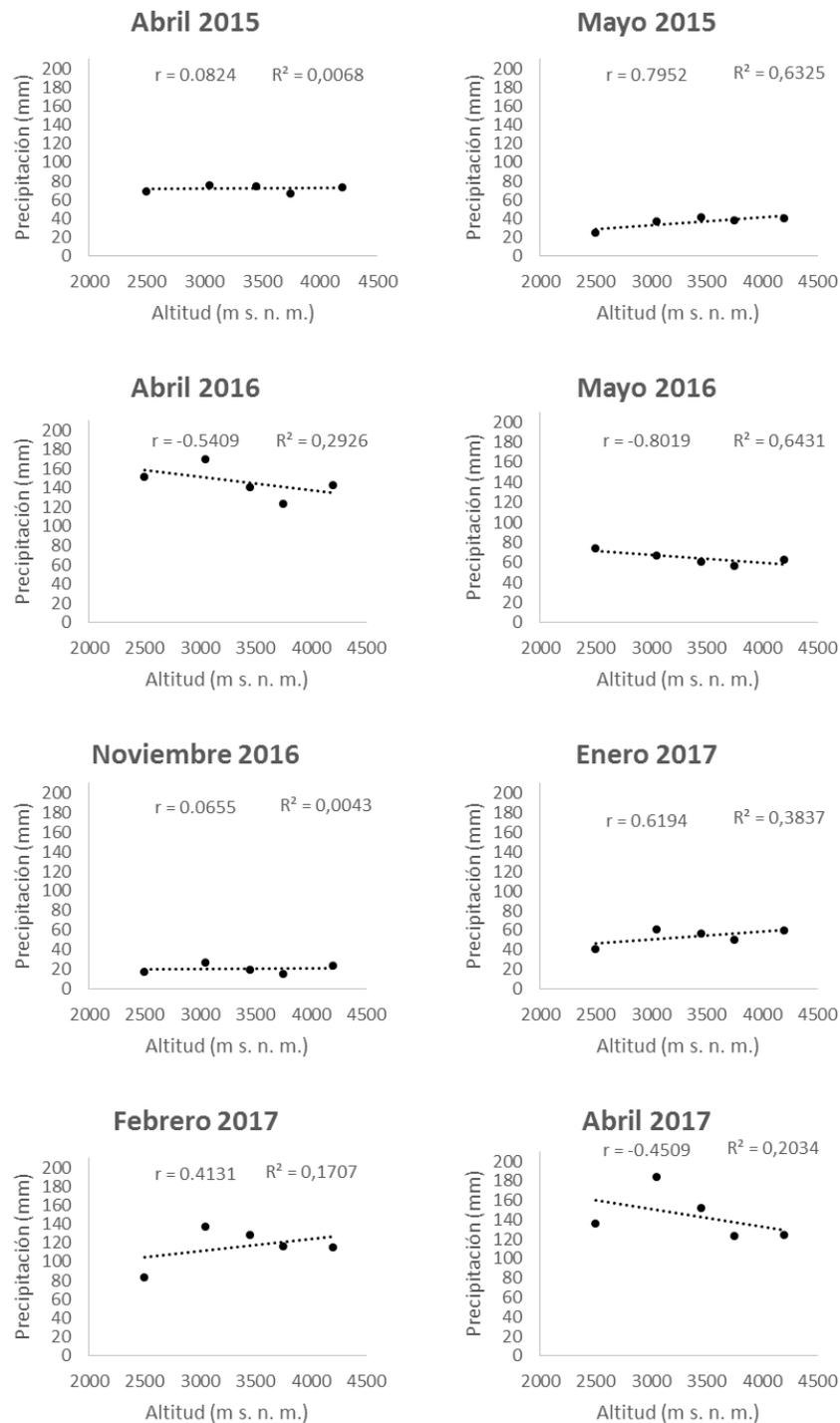


Figura 5. Relación entre altitud y precipitación promedio, por mes.



Además, en la Fig. 6 se ve que existe una alta variabilidad de la distribución temporal de la precipitación en el gradiente altitudinal. El PAB y el PAM en algunos meses presentan elevados valores de precipitación y en otros meses presentan bajos valores de precipitación con respecto a los otros pisos, siendo el PAB el que presenta mayor precipitación en mayo de 2016 y menor precipitación en mayo de 2015, enero y febrero de 2017 y el PAM el que presenta mayor precipitación en mayo de 2015 y el segundo con menor precipitación en abril y mayo de 2016.

Por otro lado, el PAMB registra la mayor precipitación en seis de los ocho meses de estudio, principalmente en los meses más lluviosos registrados en este estudio (abril de 2016 y 2017, febrero de 2017). Mientras, que el PAMA presenta la menor precipitación en cinco de los ocho meses de estudio. Por último, el PAA muestra menor variación, pues se mantiene en una posición intermedia con respecto a los demás pisos altitudinales y en los meses de estudio nunca presenta la menor o mayor precipitación.

Para los meses de este estudio se puede decir que, en la parte media - baja del área de estudio, entre los 2800 m s.n.m. y los 3600 m s.n.m. (PAMB y PAM) se presenta una mayor precipitación con un promedio de 89.73 mm, así como en la parte alta del área de estudio sobre los 3900 m s.n.m. (PAA) aunque en menor medida 80.29 mm. Mientras, que entre los 3600 m s.n.m. y los 3900 m s.n.m. (PAMA) así como por debajo de los 2800 m s.n.m. (PAB) la precipitación en promedio es menor 74.27 mm.

Debido que el coeficiente de determinación (R^2) es muy bajo en la mayoría de los meses y el grado de libertad es muy amplio por el bajo número de datos, no se calculó la significancia.

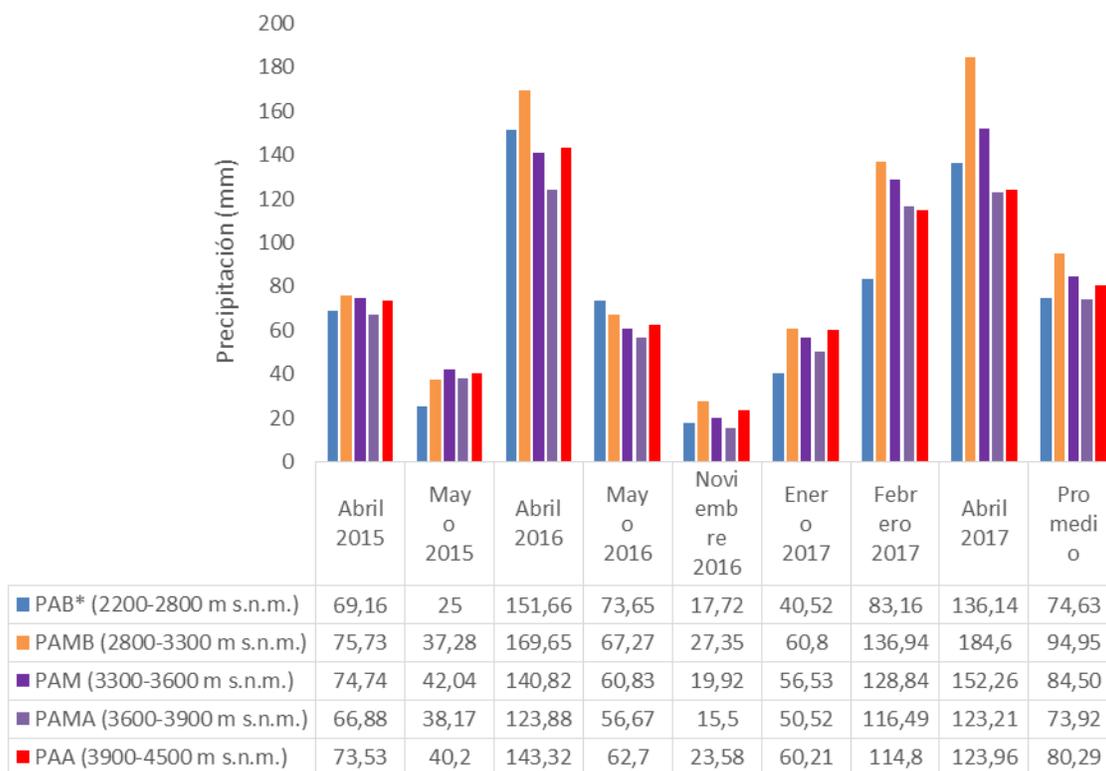


Figura 6. Precipitación promedio mensual por piso altitudinal.

En las Figs. 7 y 8 se muestran la distribución de la precipitación para los meses de abril de los tres años y mayo de los dos años de estudio disponibles, donde se analizó la variación interanual. Se aprecia que en abril de 2015 la cantidad de precipitación es aproximadamente la mitad (72.94 menos en promedio) en comparación con los abrils de 2016 y 2017 (que son muy parecidos, con una diferencia promedio de 12.39 mm); además, la precipitación para el año 2015 es muy uniforme en toda la gradiente pues la relación entre la elevación y la precipitación es prácticamente nula ($r = 0.08$); por otro lado, para los años 2016 y 2017 es moderada e inversa ($r = -0.54$ y $r = -0.45$ respectivamente), con el pico en el piso PAMB. Por otro lado, se observa que para el año 2017 los picos de precipitación son más pronunciados que en el año 2016 y la máxima diferencia es alrededor de 20 mm. Para los meses de mayo se ve una relación directa para el año 2015 y por el contrario, inversa para el año 2016.

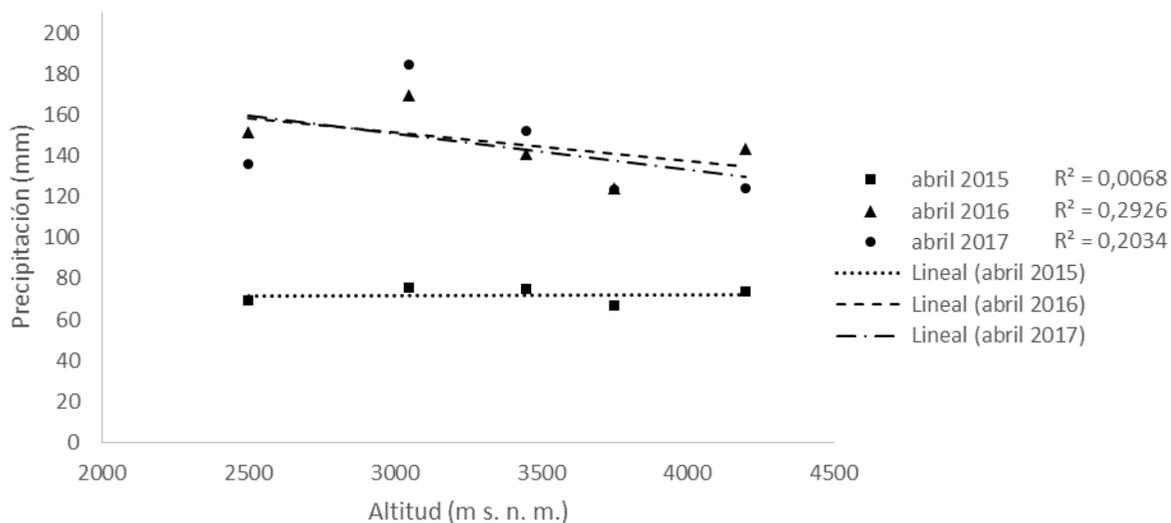


Figura 7. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal para los meses de abril de los tres años de estudio.

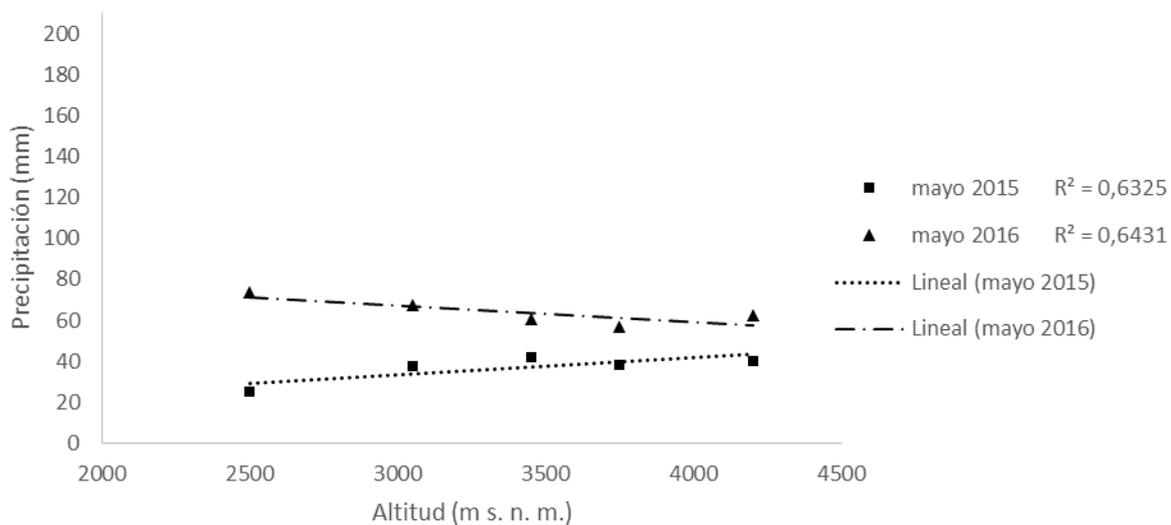


Figura 8. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal para los meses de mayo de los dos años disponibles.



3.2. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación

Para los meses de este estudio en la Fig. 9 se muestran los coeficientes de variación para cada piso altitudinal por mes, no se aprecia una relación directa entre la elevación y la variabilidad de la precipitación, sin embargo, se observa que mayor variabilidad espacial se presenta en la parte media alta del área de estudio entre los 3300 m s.n.m. a 3900 m s.n.m., esta presenta un valor promedio del CV de 36.24% (PAM) y 39.06% (PAMA). Mientras, en altitudes inferiores a los 3300 m s.n.m. o superiores a los 3900 m s.n.m. se aprecia una menor variabilidad, esta presenta un valor promedio del CV de 28.9% (PAB – PAMB) y 23.80% (PAA).

La parte media-alta del área de estudio presenta la mayor variabilidad, en cuatro de los ocho meses de estudio para el PAMA y tres de los ocho meses de estudio para el PAM, en los otros meses de estudio estos se mantienen entre los tres pisos con mayor variabilidad. Por otro lado, el PAA presenta la menor variabilidad en cuatro de los ocho meses de estudio y se mantiene entre los dos pisos con menor variabilidad para los otros meses. Asimismo, el PAB se mantiene entre los dos pisos con la menor variabilidad, a excepción de abril y mayo de 2015 y enero de 2017. Finalmente, el PAMB es el más cambiante, posicionándose como el que presenta mayor variabilidad en febrero de 2017 y menor variabilidad en mayo de 2016, cambiando su posición mes a mes.

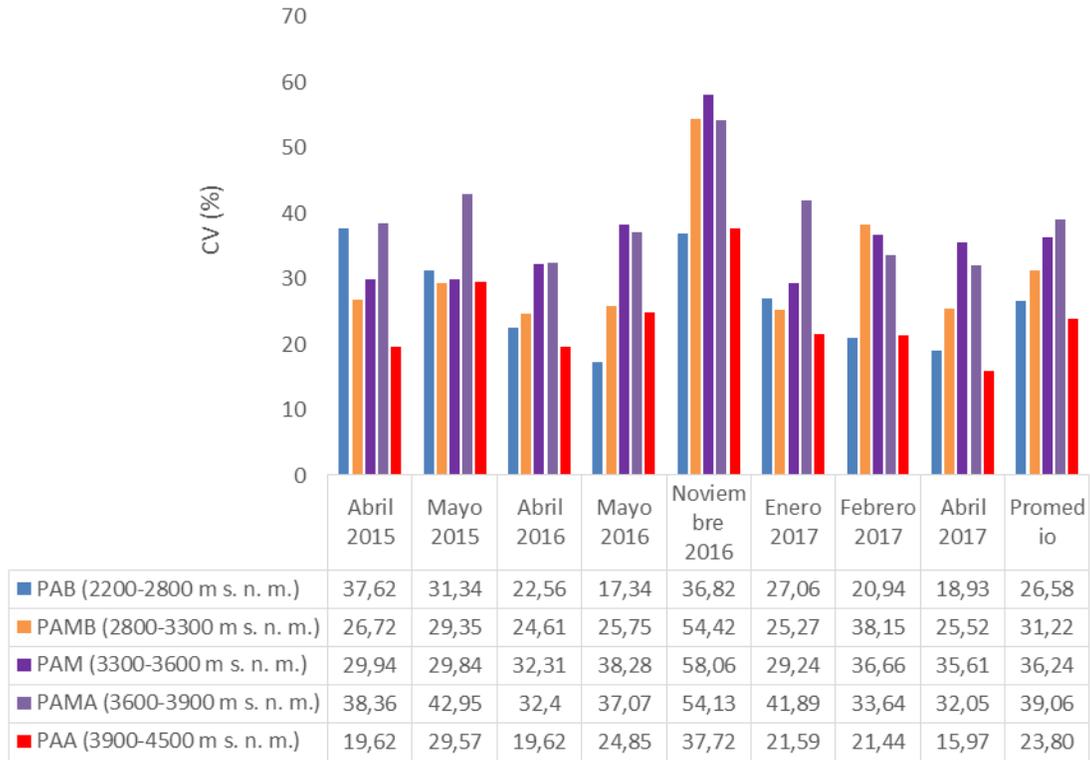


Figura 9. Coeficiente de variación mensual por piso altitudinal.

Algo a destacar es que noviembre de 2016 presenta valores elevados de CV con respecto a los demás meses, este presenta la mayor variabilidad en el PAMB, PAM, PAMA y PAA. El PAB muestra la máxima variabilidad en abril de 2015. Los coeficientes de variación mínimos se presentan en diferentes pisos cada mes, el PAB tiene la menor variabilidad en mayo y noviembre de 2016 y febrero de 2017, el PAMB en abril de 2016 y mayo de 2015, el PAM en enero de 2017 y el PAA en abril de 2015 y 2017.

Además, para los meses de este estudio los promedios de CV del PAB y PAA son los menores y presentan una diferencia de 2.78% entre ellos. Los CV promedio del PAM y PAMA son los más elevados con una diferencia de 2.82% entre el de cada piso. El PAMB muestra una variabilidad promedio intermedia en comparación con los otros pisos. Finalmente, se ve que los CV de cada piso altitudinal presentan



desviaciones estándar entre 6.47% y 9.69%, por lo cual estos no permanecen constantes en el tiempo. Sin embargo, si excluimos noviembre de 2016, las desviaciones estándar están entre 3.42% y 6.57%.

En la Fig. 10 se muestra los coeficientes de variación a lo largo del gradiente altitudinal para los meses de abril de los tres años de estudio. Se observa que los meses de abril de 2016 y 2017 presentan valores de CV muy próximos entre ellos con una diferencia máxima de 3.65%. Se aprecia algunas diferencias entre los CV, principalmente en el PAB donde la diferencia entre el CV de abril de 2015 y los CV de los abril de 2016 y 2017 es en promedio de 16.88%.

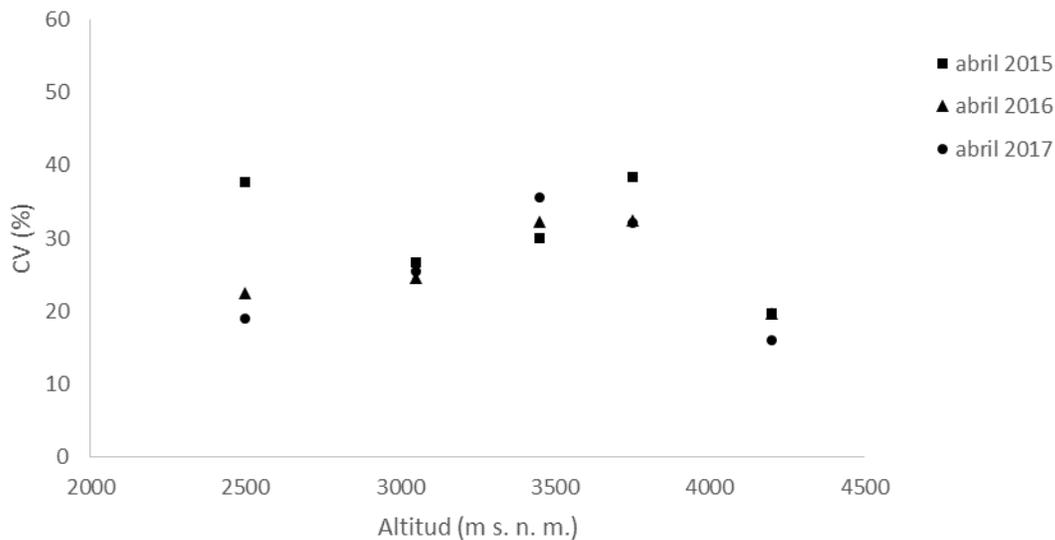


Figura 10. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal para los meses de abril de los tres años de estudio.

En la Fig. 11 se muestra los coeficientes de variación a lo largo del gradiente altitudinal para los meses de mayo de los dos años disponibles. Así mismo, se aprecia diferencias entre los CV de ambos meses, siendo la máxima diferencia de 14% correspondiente al PAB.

En ambas figuras se observa que los meses correspondientes al año 2015 presentan valores de CV mayores a los años 2016 y 2017, excepto en el PAM. Se



ve que en el año 2015 la mayor variabilidad se presenta en el PAB y en el PAMA y la menor variabilidad en el PAMB y en el PAA. Por otro lado, en los años de 2016 y 2017 la variabilidad aumenta con el gradiente altitudinal en los primeros pisos y a partir del PAMA disminuye.

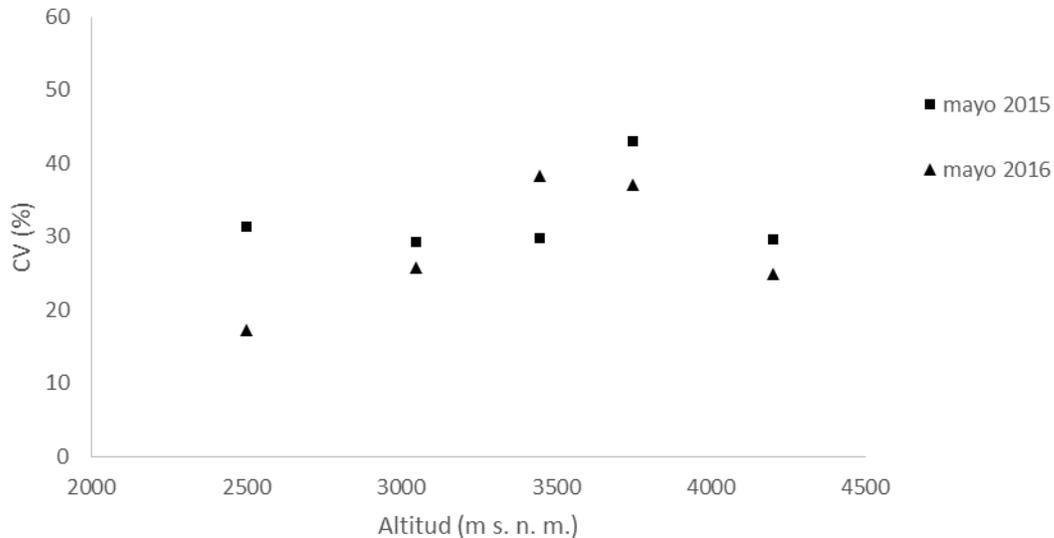


Figura 11. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal para los meses de mayo de los dos años disponibles

3.3. Diferencias en la variabilidad y distribución espacio-temporal de la precipitación entre las cuencas de Tomebamba y Yanuncay

En esta sección se analizan las diferencias y similitudes entre las dos cuencas. En la Fig. 12 se muestran los promedios de precipitación mensual en el gradiente altitudinal para estas cuencas. Se aprecia un interesante cambio en la magnitud de las relaciones entre la cuenca del Tomebamba y del Yanuncay. En los primeros meses: abril y mayo de 2015 y 2016, los coeficientes de correlación de Pearson (altitud-precipitación) presentan en promedio una magnitud mayor en 0.28 en la cuenca del Yanuncay con respecto a la cuenca del Tomebamba. En los siguientes meses: noviembre de 2016, enero, febrero y abril de 2017, los coeficientes de

Rocío Salinas Esperanza Orrego-Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez



correlación de Pearson presentan en promedio una magnitud mayor en 0.49 en la cuenca del Tomebamba con respecto a la cuenca del Yanuncay.

En abril de 2015, noviembre de 2016 y febrero de 2017, la relación cambia de dirección entre una y otra cuenca, mientras para los meses restantes solo varía su magnitud. Por otro lado, en promedio la cuenca del Tomebamba presenta una mayor cantidad de precipitación (83.98mm) que la cuenca del Yanuncay (78.08mm). No obstante, esta condición no se cumple en ciertos meses para algunos pisos (ej. en noviembre de 2016 en el PAMB).

En abril de 2015 y mayo de 2016 la cuenca del Tomebamba presenta una precipitación uniforme en la gradiente altitudinal; mientras, la cuenca del Yanuncay presenta un incremento de la precipitación con la elevación para abril y una disminución para mayo. En mayo de 2015 ambas cuencas presentan valores de precipitación similares con un comportamiento muy parecido (Tomebamba: $r = 0.73$; Yanuncay: $r = 0.81$). En abril de 2016 se observa que la cuenca del Tomebamba muestra mayor precipitación que la del Yanuncay a partir del PAMB, sin embargo, presentan una distribución similar.

Con respecto al modelo lineal para la cuenca del Tomebamba se aprecia que en los meses de noviembre de 2016 y enero y febrero de 2017 presentan un buen grado de ajuste ($R^2 > 75\%$), para el resto de los meses R^2 es inferior a 54% y para la cuenca del Yanuncay se observa un buen grado de ajuste para mayo de 2015 y abril y mayo de 2016 ($R^2 > 65\%$), para el resto de los meses R^2 es inferior a 35%.

En noviembre de 2016 y enero, febrero y abril de 2017 la cuenca del Yanuncay presenta mayor precipitación en los primeros pisos altitudinales con respecto a la cuenca del Tomebamba, mientras, en los pisos superiores la cuenca del Tomebamba presenta mayor precipitación. Es decir, con el aumento de la elevación se invierte esta relación. Por último, cabe mencionar que en el PAB ambas cuencas presentan valores muy próximos entre sí.



En ambas cuencas el PAMB es aquel que presenta mayor precipitación en el mayor número de meses (tres de los ocho meses en la cuenca del Yanuncay y cuatro de los ocho meses en la del Tomebamba). Por otro lado, el PAMA es el más seco en la cuenca del Yanuncay, presentando la menor precipitación en seis de los ocho meses de estudio y por el contrario en la cuenca del Tomebamba el más seco es el PAB, el cual presenta la menor precipitación en cinco de los ocho meses de estudio.

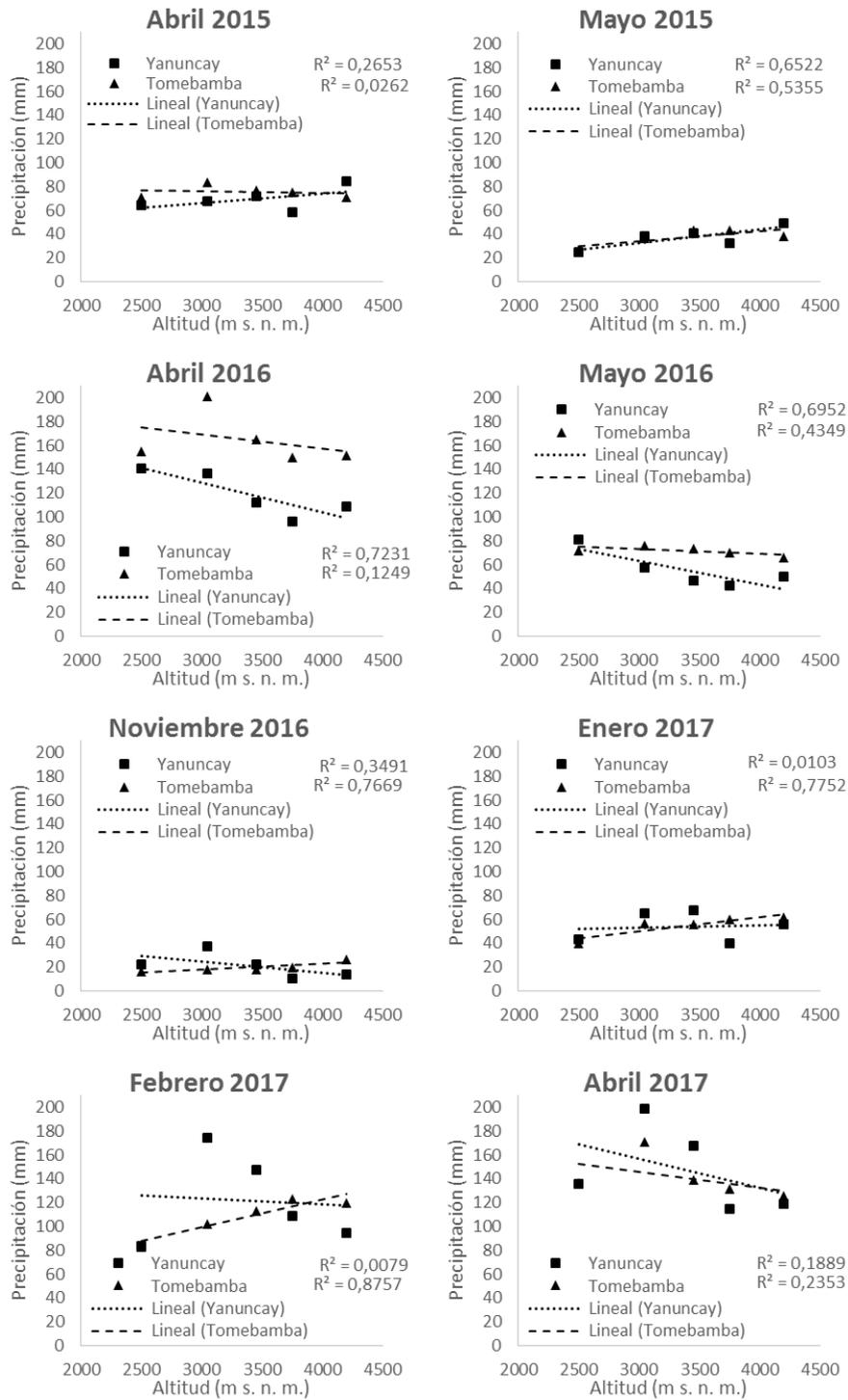


Figura 12. Precipitación promedio en el gradiente altitudinal por mes para cada cuena.



En las Figs. 13-17 se muestra la evolución temporal de los promedios de precipitación mensual por cuenca para cada piso altitudinal. Se ve que la precipitación es muy similar en todos los pisos altitudinales para abril de 2015, mayo de 2015, noviembre de 2016 y enero de 2017, con diferencias promedio de 11.65 mm, 5.51 mm, 9.9 mm y 9.67 mm respectivamente. También, en mayo de 2016 y abril de 2017 se observa precipitaciones similares en todos los pisos, estos presentan diferencias promedio de 19.56 mm y 16.12 mm respectivamente, en el PAB y PAA estas diferencias son menores (12.51 mm y 3.54 mm) y presentan mayores diferencias en los pisos intermedios (PAMB, PAM, PAMA) con diferencias promedio de 24.19 mm y 24.52 mm respectivamente.

Por otro lado, abril de 2016 presenta diferencias notorias entre las precipitaciones de ambas cuencas para todos los pisos, con una diferencia promedio de 45.62 mm, aunque en el PAB la diferencia es baja (13.99 mm). Por último, febrero de 2017 presenta grandes diferencias en el PAMB y el PAM, con un promedio de 53.29 mm.

Además, se observa que las precipitaciones de ambas cuencas muestran las menores diferencias (4.95 mm) en el PAB para todos los meses de estudio. Mientras, la parte media de las cuencas (PAMB, PAM y PAMA) presenta las mayores diferencias (28,52 mm, 20.85 mm y 21.05 mm respectivamente). Finalmente, el PAA presenta diferencias menos pronunciadas (16.69 mm) que en la parte media pero mayores a aquellas del PAB.

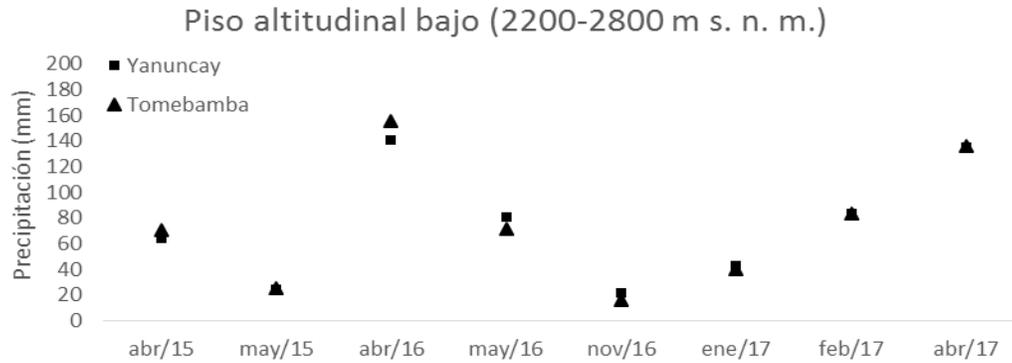


Figura 13. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal bajo mes a mes.

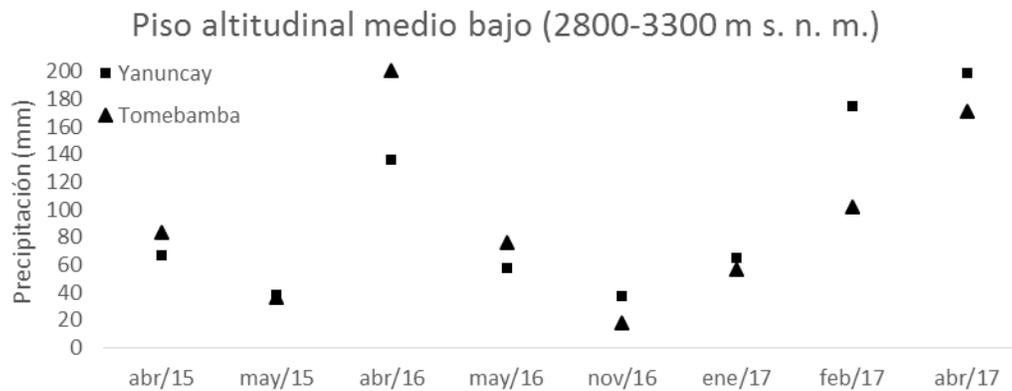


Figura 14. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio bajo mes a mes.

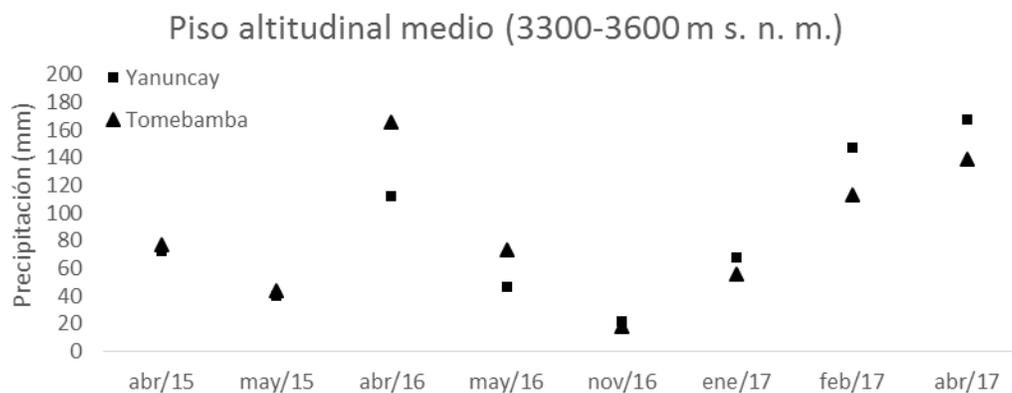


Figura 15. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio mes a mes.

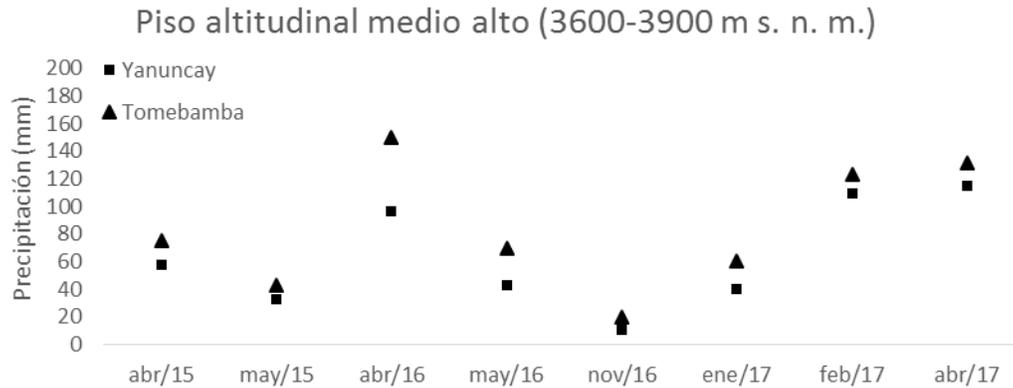


Figura 16. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal medio alto mes a mes.

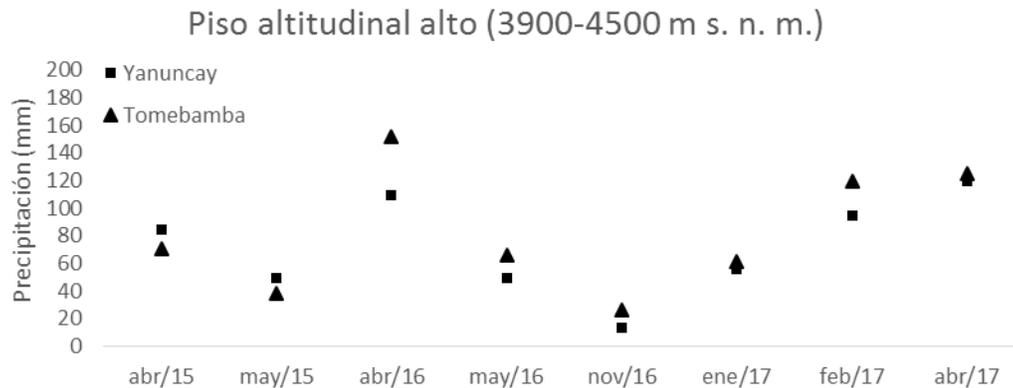


Figura 17. Precipitación promedio por cuenca del piso altitudinal alto mes a mes.

En la Fig. 18 se muestran los coeficientes de variación de ambas cuencas en la gradiente altitudinal. Se observa que la cuenca del Yanuncay presenta mayores diferencias en la variabilidad espacial para todos los meses con respecto a la cuenca del Tomebamba. Sin embargo, el PAB presenta diferencias importantes en la variabilidad de la cuenca del Tomebamba en algunos meses (abril de 2015, noviembre de 2016 y enero y febrero de 2017).

A excepción de estos meses, se observa que en la cuenca del Tomebamba es más uniforme la variabilidad espacial, pues se mantiene muy próxima en todos los



pisos con una desviación estándar de 4.05%. Mientras, la cuenca del Yanuncay presenta diferentes comportamientos para cada mes con una desviación estándar de 12.36%. Los principales picos se ven en el PAM y PAMA que muestran una diferencia máxima de 46.63% (noviembre de 2016, PAMA-PAB).

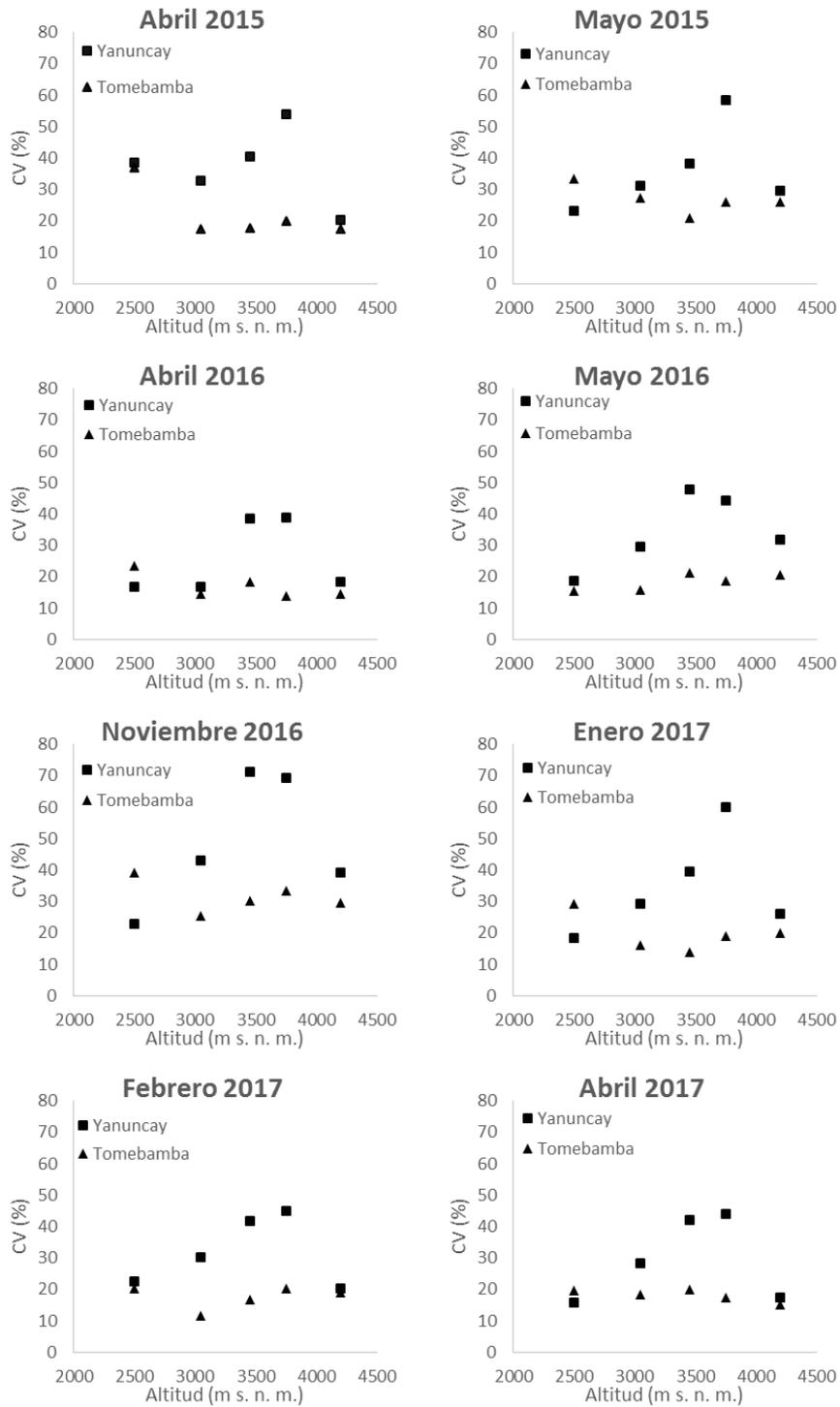


Figura 18. Coeficiente de variación en el gradiente altitudinal por mes para cada cuenca.



En las Figs. 19-23 se presentan los coeficientes de variación mes a mes de las cuencas del Tomebamba y del Yanuncay por piso altitudinal. Se aprecia que, los CV en la cuenca del Tomebamba son mayores con respecto a la cuenca del Yanuncay en el PAB para los meses de mayo de 2015, abril y noviembre de 2016, enero y abril de 2017, con un promedio de 9.6%. Sin embargo, los CV son mayores para la cuenca del Yanuncay en el resto de los meses (2.22%) y en los otros pisos (PAMB, PAM, PAMA y PAA).

En los pisos intermedios, PAMB, PAM y PAMA las diferencias entre cuencas son notables 11.84%, 25.07% y 30.64% en promedio respectivamente, es decir, más del doble de CV de la cuenca del Tomebamba en el PAM y PAMA. Por otro lado, en el PAA y PAB, las diferencias son muy bajas, con valores promedio de 6.84% y 5.03% respectivamente.

Finalmente, se observa que el CV es poco variable en todos los pisos en cada cuenca, con desviaciones estándar promedio de 5.63% para la cuenca del Tomebamba y 8.12% para la cuenca del Yanuncay. No obstante, a excepción del PAB para la cuenca del Yanuncay y el PAMB para la cuenca del Tomebamba, en noviembre se presenta más variabilidad en todos los pisos para ambas cuencas, con un promedio de 33.09% para la cuenca del Tomebamba y 55.68% para la cuenca del Yanuncay.

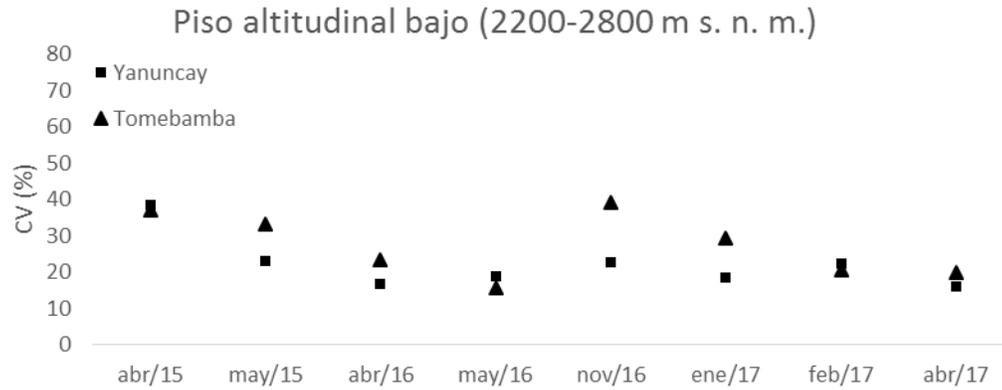


Figura 19. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal bajo mes a mes.

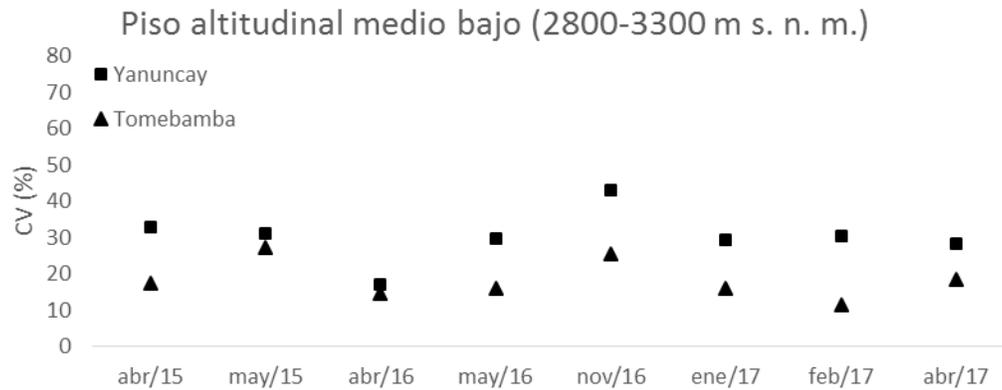


Figura 20. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio bajo mes a mes.

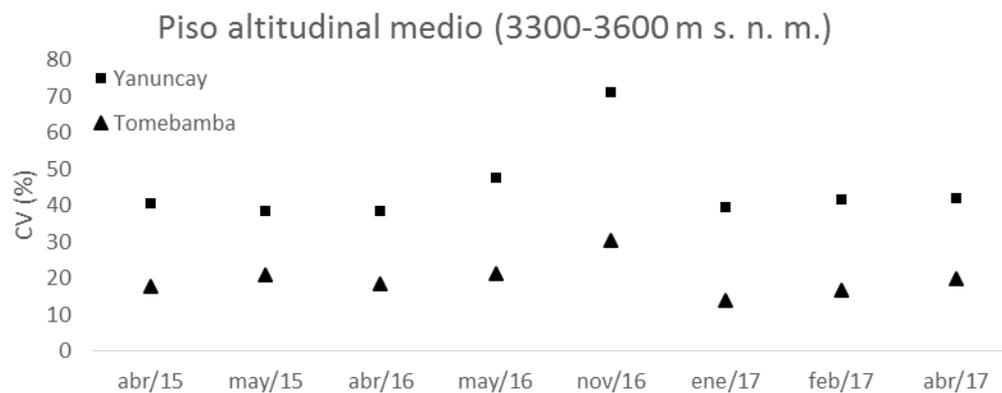


Figura 21. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio mes a mes.

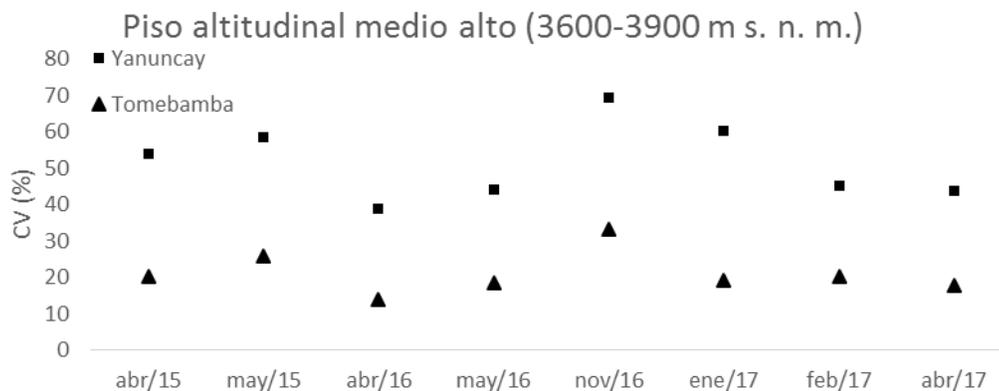


Figura 22. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal medio alto mes a mes.

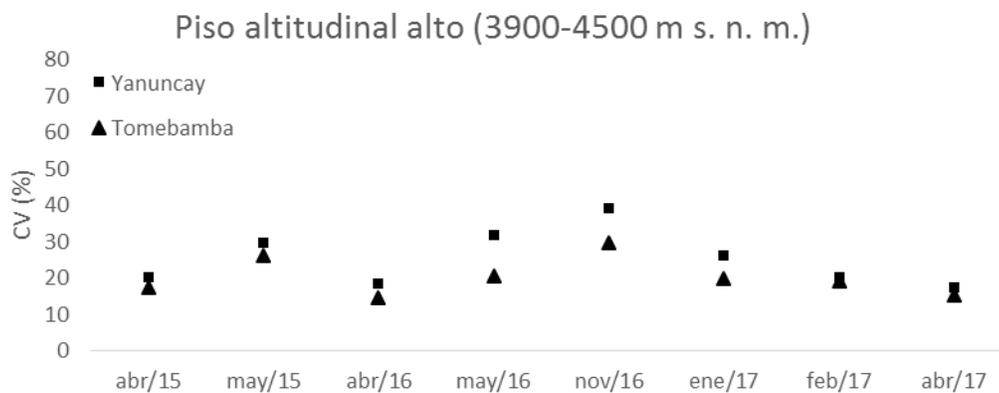


Figura 23. Coeficiente de variación por cuenca del piso altitudinal alto mes a mes.

4. DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Se conoce que en cuencas de montaña la altitud es uno de los principales factores que conduce los patrones climáticos (Buytaert et al., 2006) e influencia significativamente la distribución espacial de la precipitación (Sokol & Bližňák, 2009). Célleri et al. (2007), sostiene que la depresión central y la parte oeste de la cuenca del río Paute presenta una relación lineal. Sin embargo, al analizar



únicamente las cuencas del Tomebamba y Yanuncay se encontró que no existe una relación lineal entre la precipitación promedio mensual y la elevación como corroboran Brito, (2018); Tapia, (2016) & Vélez, (2018).

Además, como menciona Tapia, (2016), en la parte baja de la cuenca del Tomebamba (debajo de los 3300 m s.n.m.), las diferencias entre el mes más seco y lluvioso son más acentuadas, mientras que en la parte alta de la cuenca (sobre los 3300 m s.n.m.) estas son menores. Así mismo, de acuerdo con Tapia, (2016) en este estudio se encontró que las mayores precipitaciones se presentan en la parte media de la cuenca (entre los 2800 m s.n.m. y los 3300 m s.n.m.) para la mayoría de los meses.

Por el contrario, Brito, (2018) encontró que las mayores precipitaciones se presentan en la parte alta de la cuenca del Yanuncay (sobre los 3750 m s.n.m.). De acuerdo con Vélez, (2018), se aprecia que en los meses de enero, febrero y noviembre la precipitación tiende a aumentar con la gradiente. Finalmente, para la cuenca del Tomebamba se aprecia que la variabilidad es más estable sobre los 2800 m s.n.m. similar a la investigación de Tapia, (2016), aunque él indica que esta estabilidad se presenta sobre los 3060 m s.n.m.

Debido al carácter exploratorio de esta investigación los resultados encontrados en nuestro estudio presentaron limitaciones debido que para esta investigación se trabajó con 8 meses no consecutivos a diferencia de los estudios de Brito, (2018) & Tapia, (2016), los cuales cuentan con datos de precipitación de 12 meses consecutivos de información; por esta razón, no se pudo determinar la estacionalidad, las tendencias y la precipitación promedio anual.

No obstante, el uso de los datos provenientes del radar en esta investigación solventan las limitaciones presentes en las redes de monitoreo en las cuales son necesarias más estaciones en el rango altitudinal de 2800 m.s.n.m a 4200 m.s.n.m



para evaluar efectivamente el efecto de la elevación en la precipitación como indica Celleri et al., (2007).

Cabe recalcar que las relaciones altitud precipitación como afirma Sokol et al., (2009), dependen en gran medida de la calidad y la representatividad de los datos en ese sentido usar datos de radar provee mejor información espacial. A diferencia de los pluviómetros que presentan una densidad promedio de 1 por 360 Km² como menciona Celleri et al., (2007), el radar reporta una densidad que varía desde 1 por 1.75 E-4 Km² hasta 1 por 4 Km² dentro de los 40 km que abarcan la área de estudio. Por esto, el uso del radar es más efectivo para estudiar las dinámicas y las características de la precipitación.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como objetivo estudiar el efecto de la elevación en la distribución espacio temporal de la precipitación en las cuencas del Tomebamba y Yanuncay usando un radar meteorológico. Este cubre un amplio rango altitudinal y los diferentes ecosistemas que conforman las cuencas de estudio; gracias a esto se obtiene nueva información acerca de la relación y dinámica de la precipitación en diferentes pisos altitudinales.

En el área de estudio se aprecia que no existe una relación única entre la elevación y la precipitación, pues esta relación varía de un año a otro y de mes a mes sin un patrón definido. Sin embargo, seis de los ocho meses de estudio presentan las precipitaciones más elevadas en el piso altitudinal medio bajo, mientras que en el piso altitudinal medio alto muestra las menores precipitaciones en cinco de los ocho meses de estudio.

No se aprecia una relación entre la elevación y la variabilidad de la precipitación; sin embargo, se observa que la mayor variabilidad espacial se presenta en la parte media entre los 3300 m s.n.m. a 3900 m s.n.m. y la menor variabilidad se presenta



en la parte alta del área de estudio, sobre los 3900 m s.n.m. Además, algo a destacar es que noviembre de 2016, es el más seco de este estudio, presenta los valores más elevados del CV en el piso altitudinal medio bajo, medio, medio alto y alto, siendo en promedio 41.41 % mayor, es decir cerca del doble con respecto a otros meses.

Con respecto a las diferencias interanuales, se observa que la cantidad de precipitación del año 2015 frente a los años 2016 y 2017 es notablemente inferior para los meses de abril y mayo. No obstante, los coeficientes de variación entre estos meses son similares para todos los pisos excepto el piso altitudinal bajo, lo cual indica que no se encontró una relación entre la cantidad de lluvia y la variabilidad espacial en los pisos altitudinales estudiados.

Mediante la división por cuencas se pudo evidenciar que, en promedio, la cuenca del Tomebamba presenta una mayor cantidad de precipitación, 7.03 % más que la cuenca del Yanuncay. Esta condición no se cumple en ciertos meses para algunos pisos, al considerar esta distinción, para los casos que si se cumple es en promedio 21.64% (0.68%-47.05%) mayor y para los que no cumplen es en promedio 18.72% (0.35%-50.61%) menor.

Por otro lado, el piso altitudinal medio bajo presenta mayor precipitación en tres de los ocho meses de estudio en la cuenca del Yanuncay y en cuatro de los ocho meses de estudio en la del Tomebamba. El piso altitudinal medio alto es el más seco en la cuenca del Yanuncay y el piso altitudinal bajo en la cuenca del Tomebamba. Además, la cuenca del Yanuncay tiene mucha más variabilidad espacial, en promedio 38.68% más que la cuenca del Tomebamba, excepto en el piso altitudinal bajo.

La variabilidad espacial de la lluvia (medida por el coeficiente de variación) de cada cuenca permanece casi constante en el tiempo en cada piso altitudinal, más aún si no se toma en cuenta noviembre de 2016 que es el mes de mayor



variabilidad. Se observa que en los pisos intermedios las diferencias entre cuencas son notables (50.96%) y en los pisos más alto y más bajo las diferencias son bajas (20.93%).

El uso de los sensores activos en esta investigación nos permitió mejorar la representatividad de los datos y así estimar de forma más confiable la relación precipitación-elevación, esto solventó algunas limitaciones que presentan las redes de monitoreo en estudios anteriores.

6. RECOMENDACIONES

Debido a la disponibilidad de datos, este estudio tomó en cuenta información relativamente corta. Por lo tanto, se debería considerar más meses de estudio dentro de un mismo año hidrológico para describir de mejor manera la variabilidad espacial y temporal, y generalizar el conocimiento adquirido en este estudio.

Además, futuras investigaciones podrían incorporar otros factores topográficos (ej. pendientes, exposición) y meteorológicos (ej. dirección de viento) y determinar su influencia con relación a la variabilidad espacio-temporal de la precipitación. Así mismo, para ampliar el conocimiento sobre estos procesos se podría considerar reducir la escala temporal (ej. períodos semanales o por eventos de varios días) y espacial (divisiones altitudinales con rangos de menor tamaño).

Por último, se espera que la cantidad de datos disponibles aumente para así realizar análisis de mayor profundidad. También, que la generación de información nueva y la manipulación continua de los datos permita mejorar la calidad de estos.



7. REFERENCIAS

- Astudillo, P. X., Tinoco, B. A., & Siddons, D. C. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve , southern Ecuador , with notes on new records, (June 2013), 1–11.
- Avilés-Añazco, A., Abel, S., & Paredes, J. (2016). ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS HÍDRICOS EN DESARROLLO MEDIANTE EL ACOPLA DE MODELOS ESTOCÁSTICOS HIDROLÓGICOS Y OPTIMIZACIÓN DE REDES DE FLUJO.
- Azuay, U. del. (2002). Microcuencas Cuenca del río Paute. Retrieved from <http://web.uazuay.edu.ec/promsa/paute/home.htm>
- Bendix, J. (2017). RadarNet-Sur first weather radar network in tropical high mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(6), 1235–1254. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00178.1>
- Bendix, J., Fries, A., Zárate, J., Trachte, K., Rollenbeck, R., Pucha-Cofrep, F., ... Achilles, S. (2017). RadarNet-Sur first weather radar network in tropical high mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(6), 1235–1254. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00178.1>
- Berndtsson, & Niemczynowicz. (1988). Spatial and temporal scales in rainfall analysis — Some aspects and future perspectives. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90189-8](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90189-8)



Brito. (2018a). Estudio de la variabilidad temporal-espacial de lluvia a lo largo de la subcuenca del río Yanuncay del año 2016, Azuay-Ecuador.

Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>

Casas Castillo M Carmen; Alarcon Jordan Marta. (1999). *Metereología y clima*.

Celleri, Willems, Wouter, & Feyen. (2007). Space – time rainfall variability in the Paute Basin , Ecuadorian Andes, 3327(August), 3316–3327. <http://doi.org/10.1002/hyp>

Cocha, J. (2009, November). *Estado actual de la calidad físico-química, bacteriológica y biológica del agua de la subcuenca del río Yanuncay*.

Córdova, Céleri, Shellito, & Orellana. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes : implications for temperature mapping, (January 2017). <http://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>

Cortez, A., & Olivares, B. (2016). Variabilidad espacio temporal de la precipitación en Variabilidad espacio temporal de la precipitación en el estado Guárico , Venezuela Temporary space variability of precipitation in Guarico state , Venezuela Variabilidad espacial e temporal da precipit, (December).

Rocío Salinas Esperanza Orrego-Pedro Sebastián Sarmiento Vásquez



Duckstein, Fogel, & Thames. (1973). ELEVATION EFFECTS ON RAINFALL : A STOCHASTIC MODEL, 18, 21–35.

Faustino, D. ; V. J. ; (2008). *Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca bimunicipal del río Aguas Calientes, Nicaragua.*

Gabella, & Notarpietro. (2002). ERAD 2002 Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain. *Proceedings of ERAD*, 305–311.
<http://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2014.6904062>

German Research Foundation. (2018). Knowledge Transfer in South Ecuador: RADARNET SUR - Operational rainfall monitoring in southern Ecuador.

Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., & Bolliger, M. (2006). Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(618 A), 1669–1692.
<http://doi.org/10.1256/qj.05.190>

Guerra, Mamaduo, Joret, D. (2011). Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente.

Hayward, & Clarke. (2009). Relationship between rainfall , altitude and distance from the sea in the Freetown Peninsula , Sierra Leone, 6667.
<http://doi.org/10.1080/02626669609491509>



Heistermann, Jacobi, Pfaff, & Technical. (2011). A Typical Workflow For Radar-Based Rainfall Estimation. <http://doi.org/doi:10.5194/hess-17-863-2013>, 2013

Heistermann, M., Jacobi, S., & Pfaff, T. (2013). Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 863–871. <http://doi.org/10.5194/hess-17-863-2013>

Hossain, F., Anagnostou, E. N., Dinku, T., & Borga, M. (2004). Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty. *Hydrological Processes*, 18(17), 3277–3291. <http://doi.org/10.1002/hyp.5659>

Hrachowitz, & Weiler. (2010). Uncertainty of Precipitation Estimates Caused by Sparse Gauging Networks in a Small, Mountainous Watershed.

Hunter. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. <http://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Institute, E. S. (2018). ¿Qué son los datos netCDF?

Lemus, Albert, & López. (2016). Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en el sur de Cataluña y su relación con la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO). *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio:[Aportaciones Presentadas Al X Congreso de La Asociación Española de Climatología, 2016]*, 225–236. <http://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-21>



Loja., G. provincial de. (2018). Radar Network South Ecuador.

Machado, & Samaniego. (2012). Influencia de la carretera Cuenca Molleturo Naranjal sobre la comunidad de aves de páramo en el Parque Nacional Cajas, 24.

Michaelides, S. (2008). *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). Sistema de Clasificación de ecosistemas del Ecuador Continental. In *Subsecretaría de Patrimonio Natural*. Quito. (Vol. 53, pp. 1689–1699). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 631–648. <http://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>

Moshinsky. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda de dos partes). *Ingeniería Hidráulica En México*, X(2), 59–78.

Mosquera, Segura, Vaché, Windhorst, Breuer, & Crespo. (2016). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem, 2987–3004. <http://doi.org/10.5194/hess-20-2987-2016>



Muñoz, Orellana, Willwms, & Célleri. (2007). Flash-Flood Forecasting in an Andean Mountain Catchment — Development of a Step-Wise Methodology Based on the Random Forest Algorithm. <http://doi.org/10.3390/w10111519>

ODEPLAN. (2002). Curvas de Nivel.

Oliphant. (2015). *Guide to NumPy*.

Orellana-Alvear, J., Célleri, R., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2017). Analysis of rain types and their Z-R relationships at different locations in the high andes of southern Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(11), 3065–3080. <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0009.1>

Pabón-caicedo, J. D., Eslava-ramírez, J. A., & Gómez-torres, R. E. (2001). GENERALIDADES DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA, 47–59.

Pesántez. (2015). Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación. *Maestría En Gestión Ambiental - Universidad de Azuay*, 1–183.

Pizarro, G. (2006). A comparison of gauge and radar precipitation data for simulating an extreme hydrological event in the Severn Uplands, UK.



- Rau, P., & Condom, T. (2010). Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007), (September 2017).
- Renom. (2011). Principios básicos de las mediciones atmosféricas 2011 (Vol. 2, pp. 1–13).
- Rodríguez, Capa, & Lozano. (2004). *Meteorología y Climatología Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004 FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA*. <http://doi.org/M-XXXXX-2004>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>
- Sevruk, Matokova, & Toskano. (1998). Topography effects on small-scale precipitation variability in the Swiss pre-Alps, (248), 51–58.
- Sokol, & Bližňák. (2009). Areal distribution and precipitation – altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year, 94, 652–662. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.001>
- Sotillo, M. G., Ramis, C., Romero, R., Alonso, S., & Homar, V. (2003). Role of orography in the spatial distribution of precipitation over the Spanish Mediterranean zone, 23, 247–261.



Tapia, J. D. (2016). *Estructura de la precipitación y su variabilidad espaciotemporal a lo largo de una gradiente altitudinal*. Universidad de Cuenca.

Trapnell, & Griffiths. (2016). The Rainfall-Altitude Relation and Its Ecological Significance in Kenya THE RAINFALL-ALTITUDE RELATION AND ITS, 0074(March). <http://doi.org/10.1080/03670074.1960.11665266>

Vélez. (2018). *Caracterización de la precipitación espacial en la cuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay*.

Villarini, Witold, & Krajewski. (2009). Review of the Different Sources of Uncertainty in Single Polarization Radar-Based Estimates of Rainfall, 107–129. <http://doi.org/10.1007/s10712-009-9079-x>

8. ANEXOS

Anexo 1. Diagramas de cajas y bigotes.

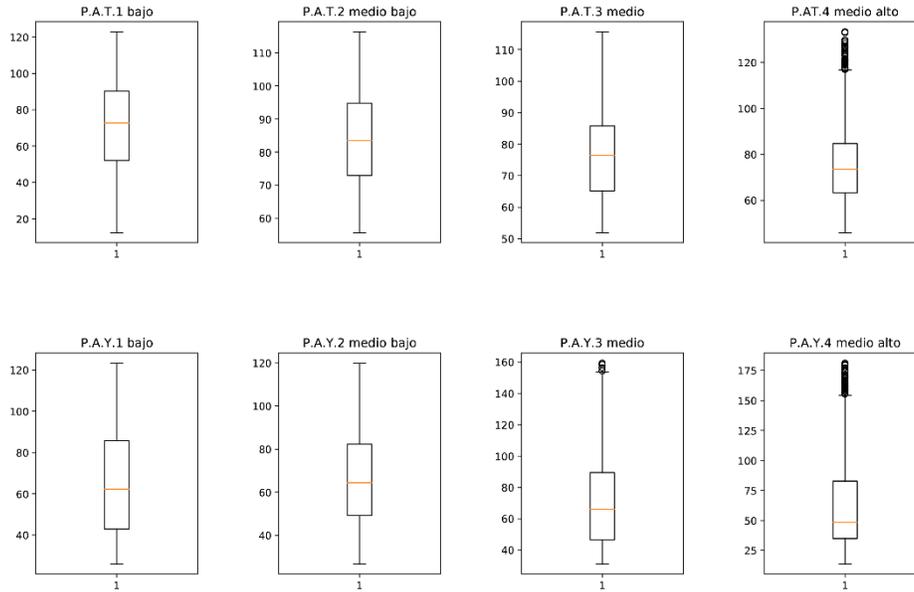


Figura A1 1. Diagramas de cajas y bigotes en abril de 2015. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

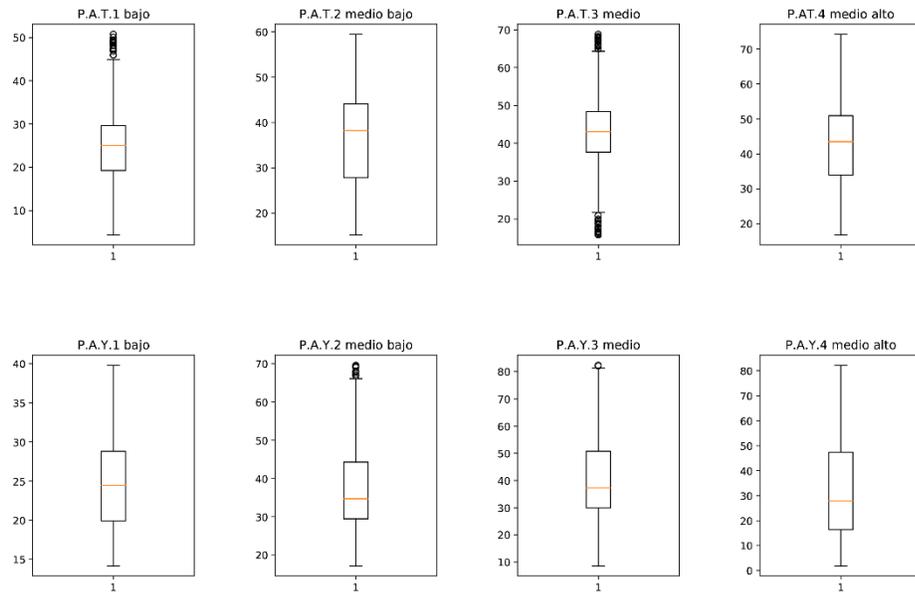


Figura A1 2. Diagramas de cajas y bigotes en mayo de 2015. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

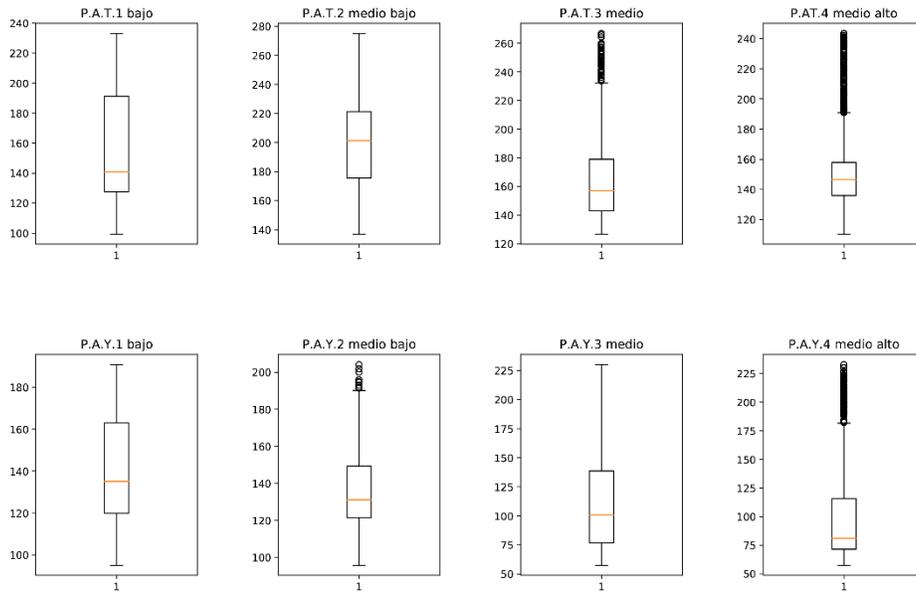


Figura A1 3. Diagramas de cajas y bigotes en abril de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

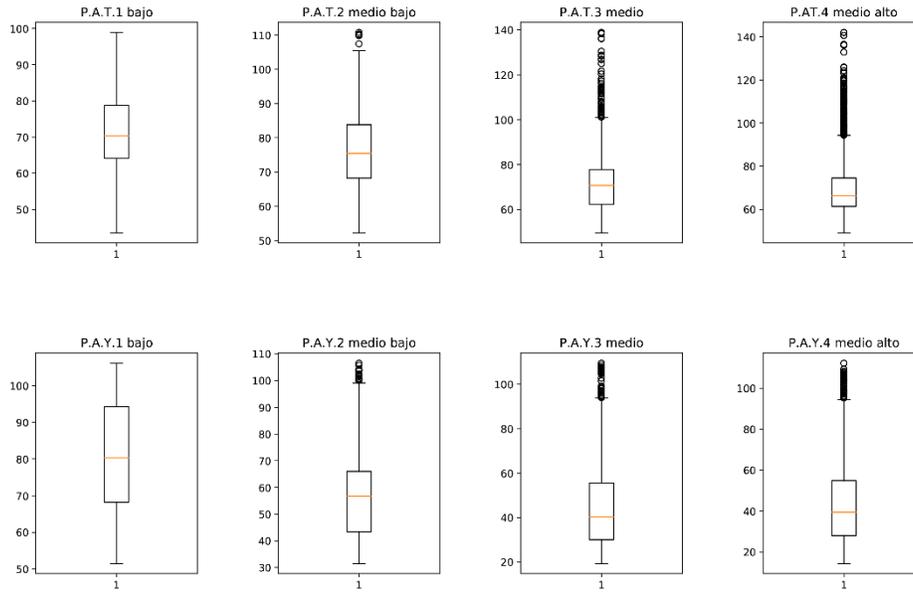


Figura A1 4. Diagramas de cajas y bigotes en mayo de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

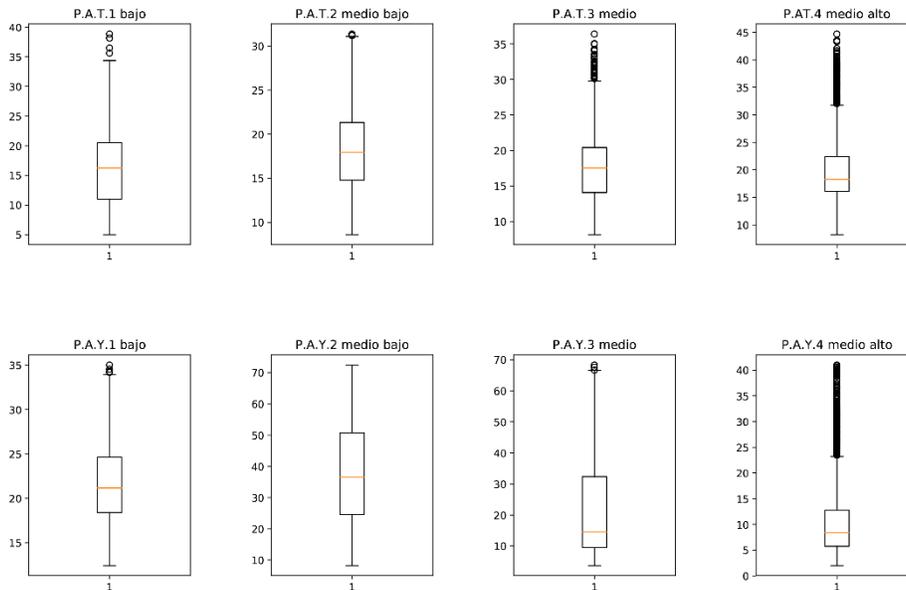


Figura A1 5. Diagramas de cajas y bigotes en noviembre de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

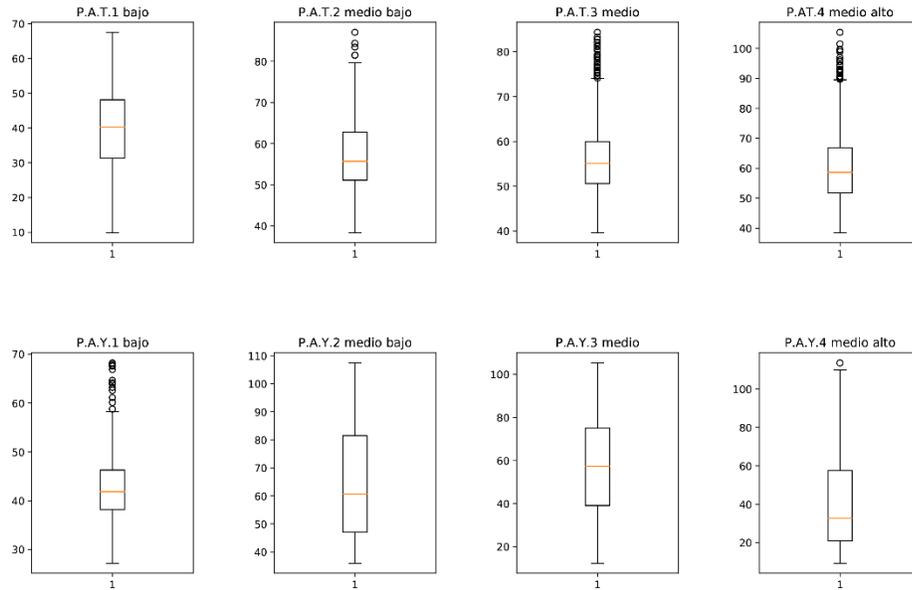


Figura A1 6. Diagramas de cajas y bigotes en enero de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

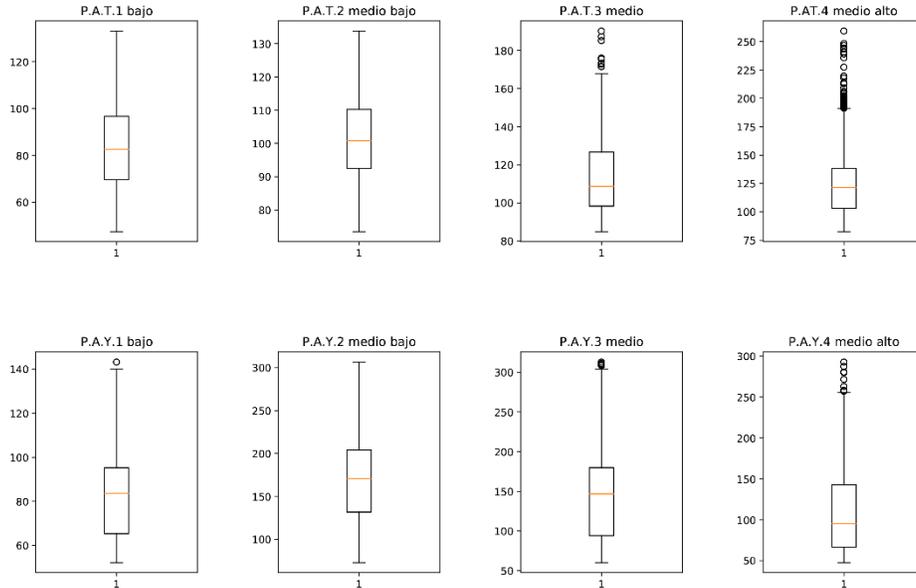


Figura A1 7. Diagramas de cajas y bigotes en febrero de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

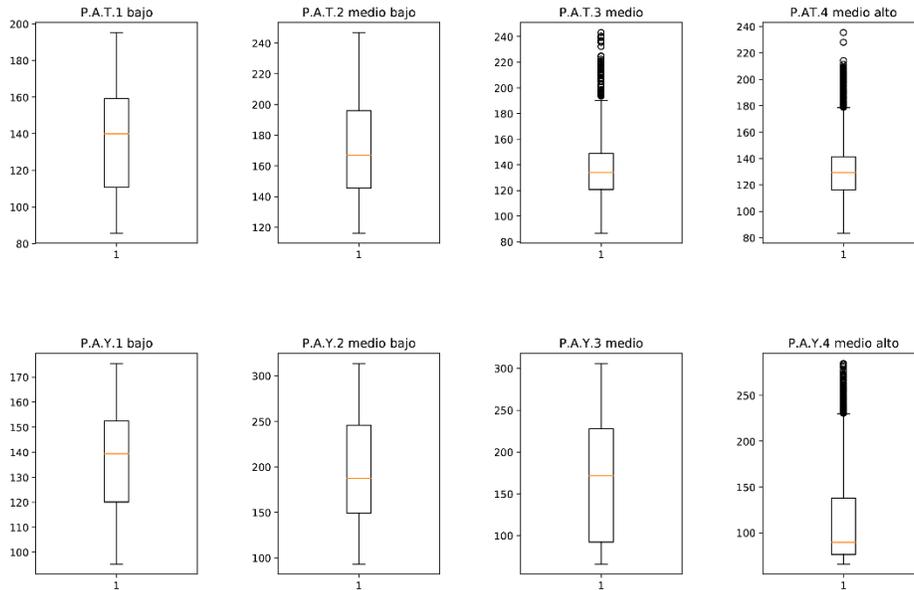


Figura A1 8. Diagramas de cajas y bigotes en abril de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

Anexo 2. Histogramas.

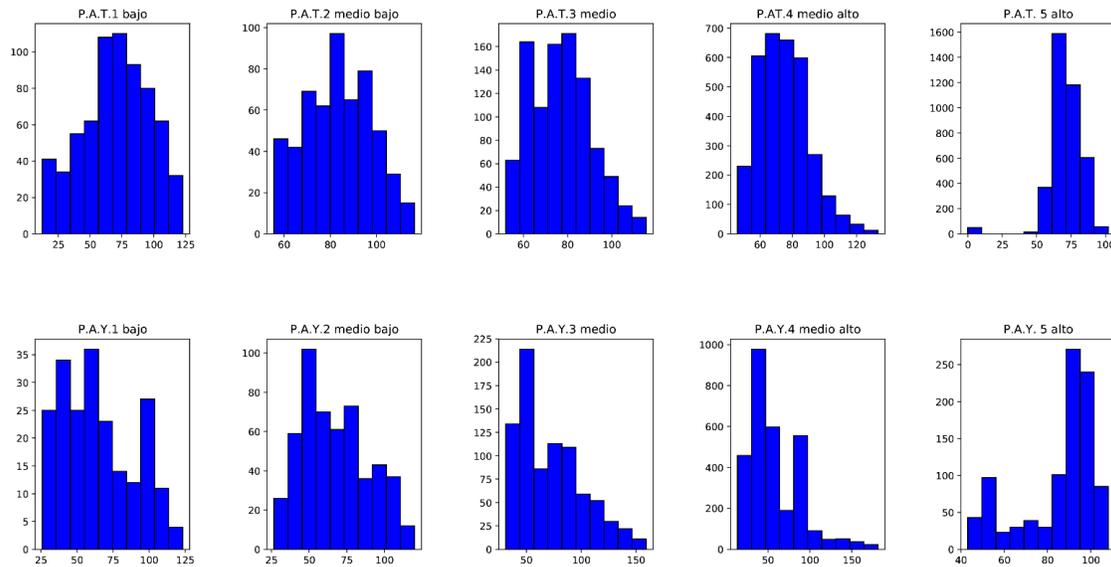


Figura A2 1. Histogramas en abril de 2015. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

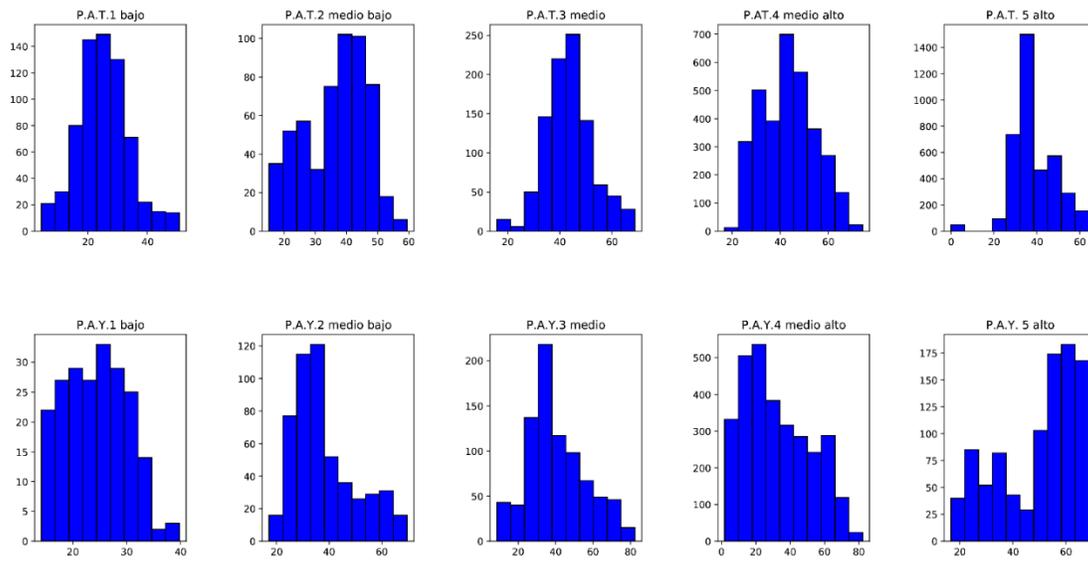


Figura A2 2. Histogramas en mayo de 2015. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

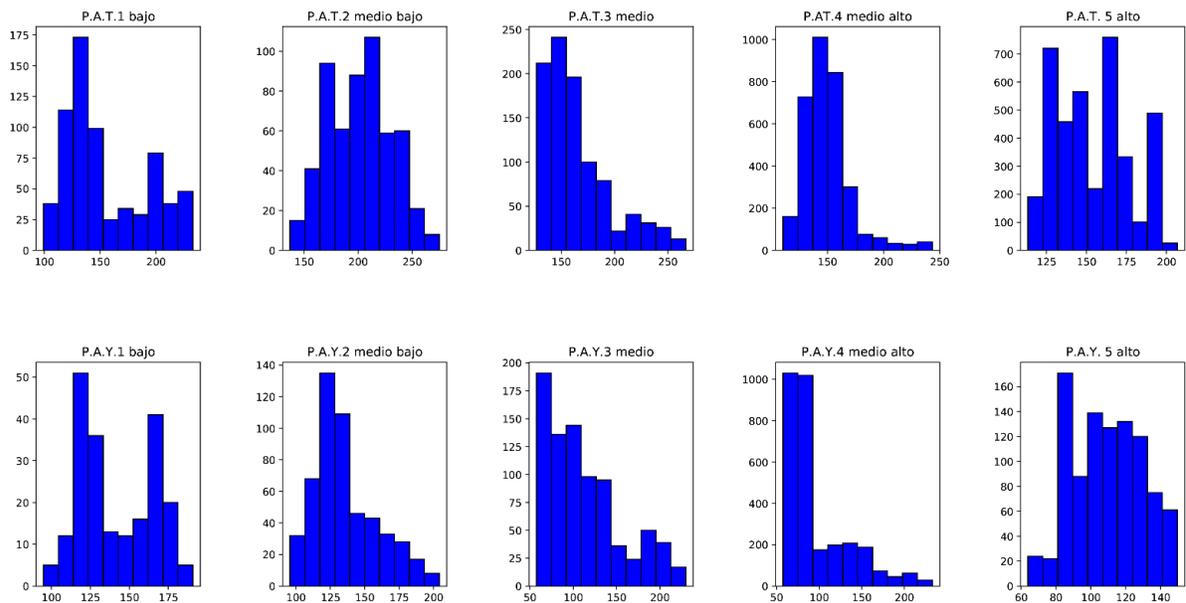


Figura A2 3. Histogramas en abril de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

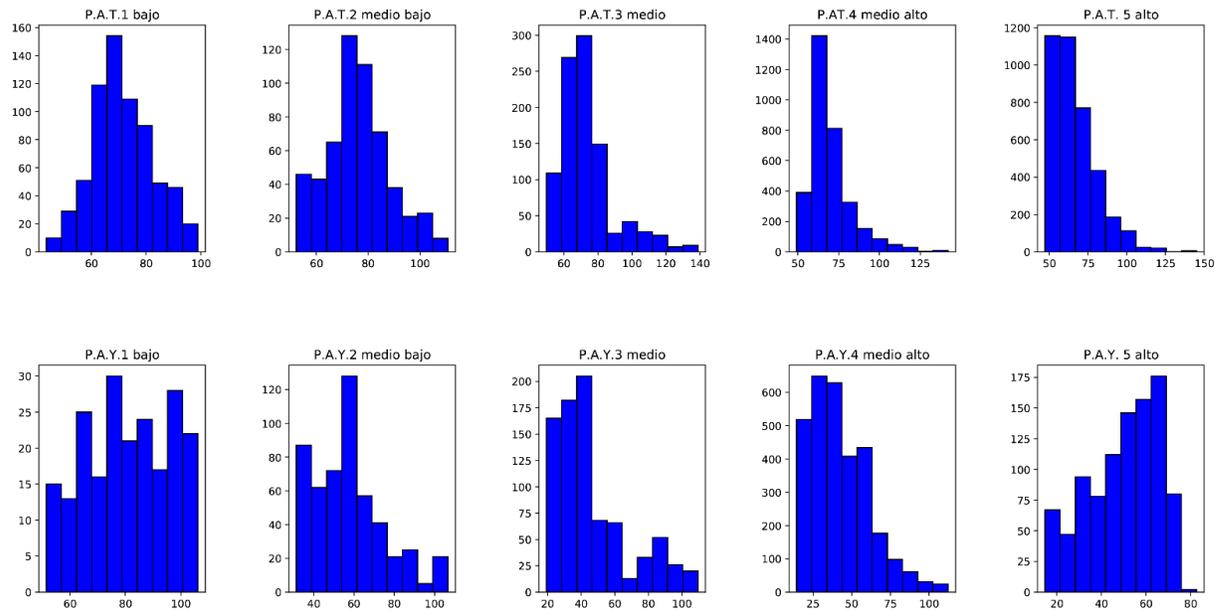


Figura A2 4. Histogramas en mayo de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

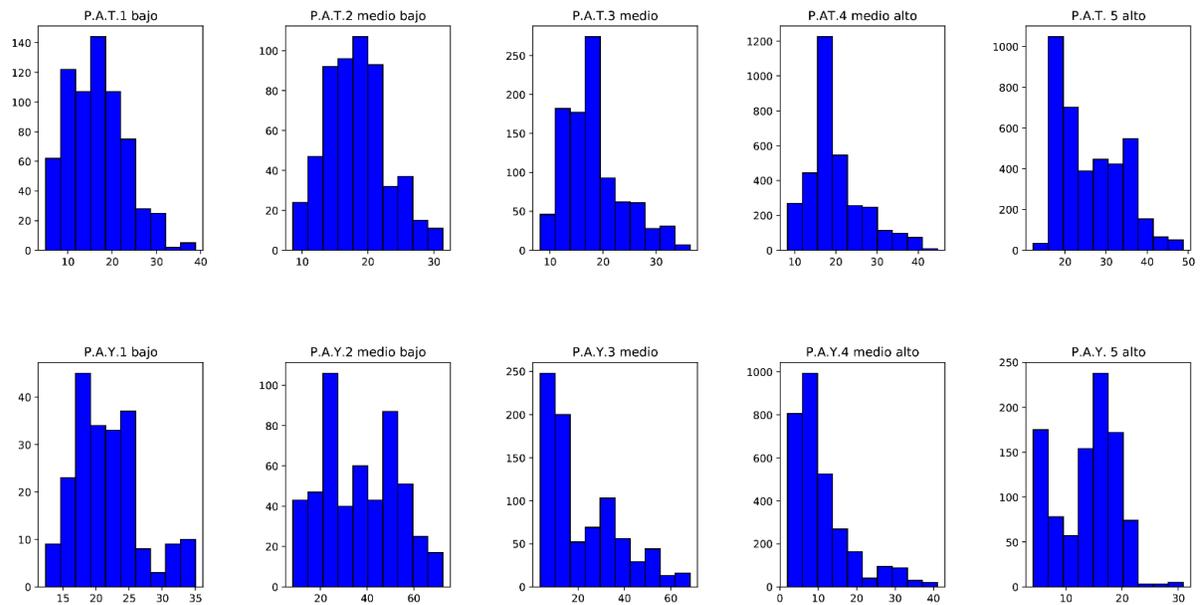


Figura A2 5. Histogramas en noviembre de 2016. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

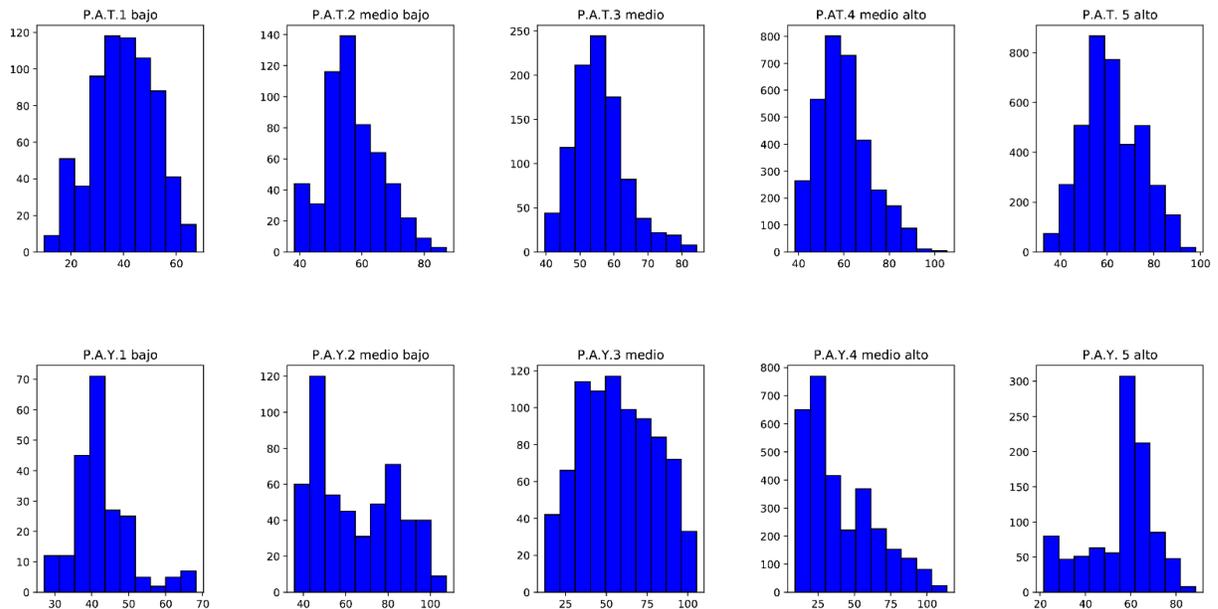


Figura A2 6. Histogramas en enero de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

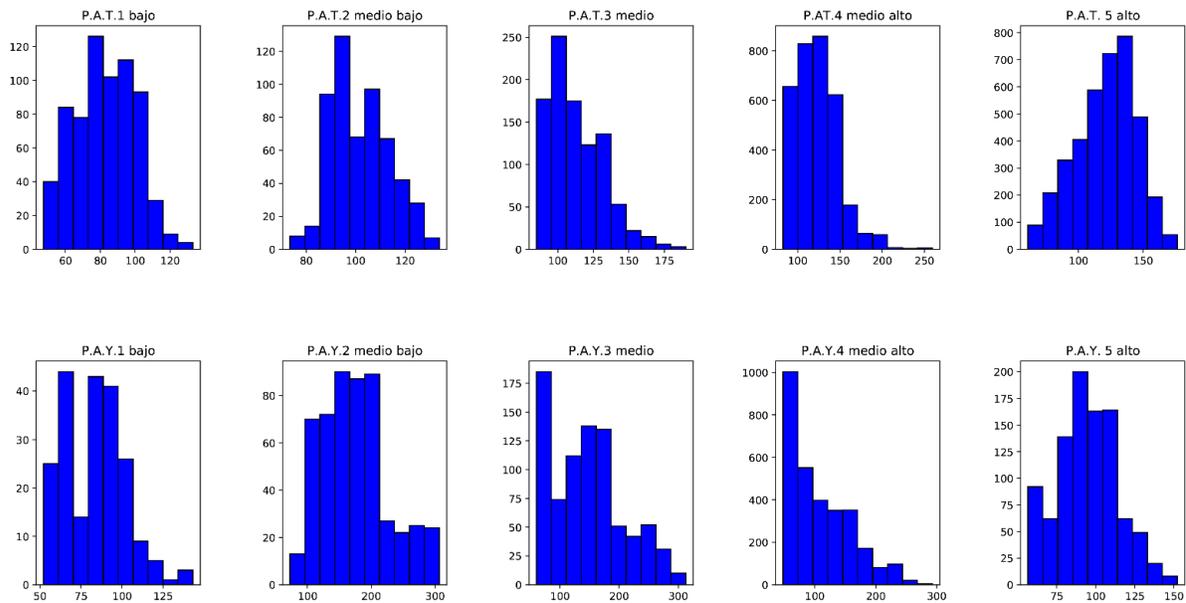


Figura A2 7. Histogramas en febrero de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

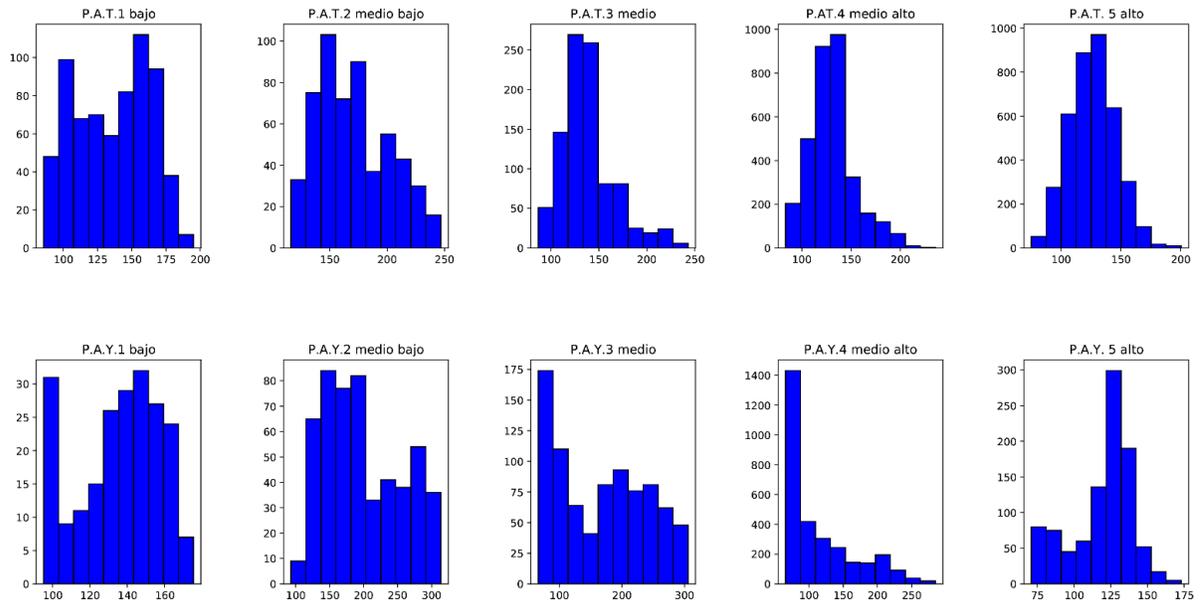


Figura A2 8. Histogramas en abril de 2017. Arriba: Subcuenca del Tomebamba. Abajo: Subcuenca del Yanuncay.

Anexo 3. Mapas.

Meses de estaciones húmedas

Meses de estaciones secas

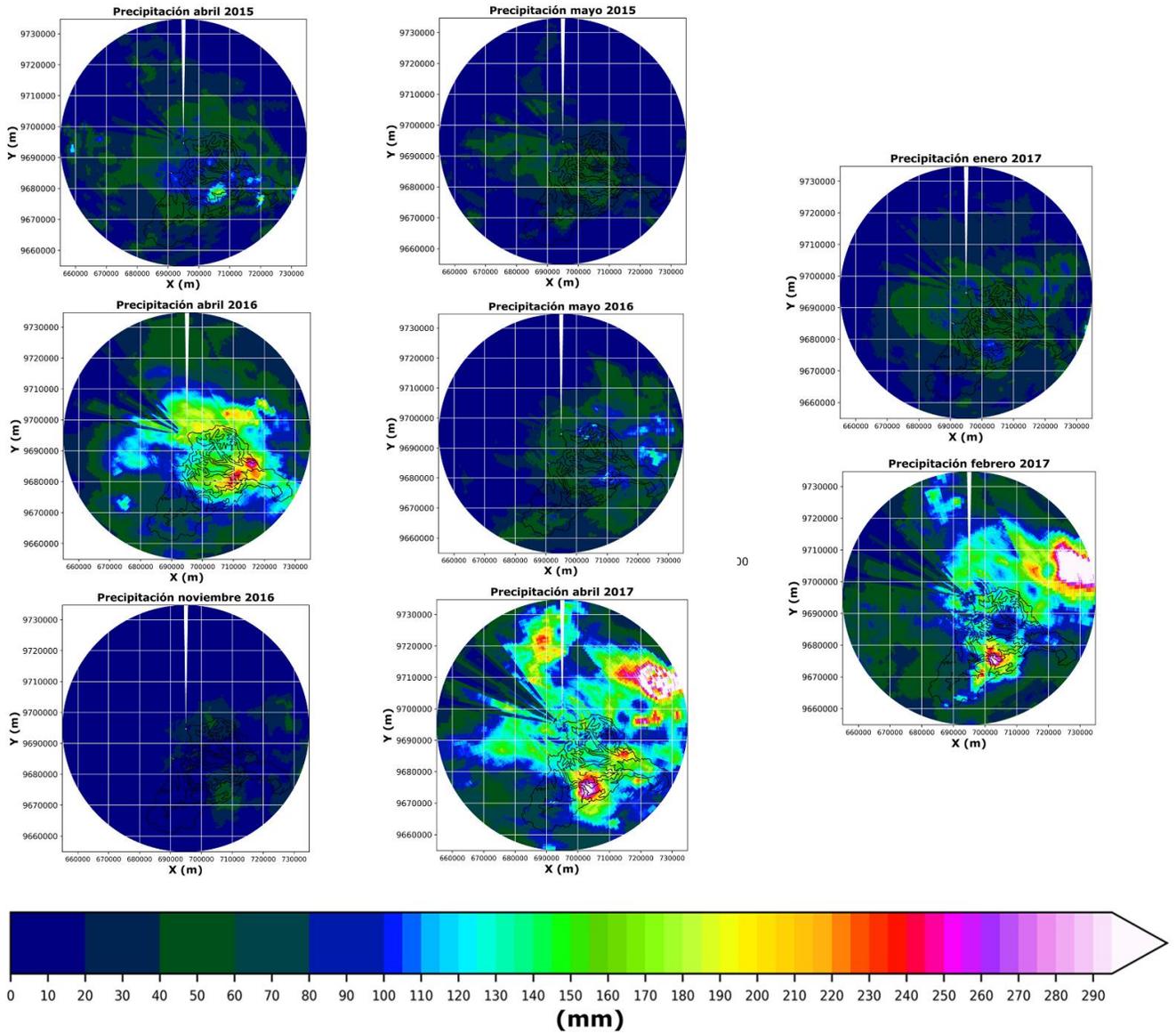


Figura A3 1. Precipitación acumulada mensual.

Meses de estaciones húmedas

Meses de estaciones secas

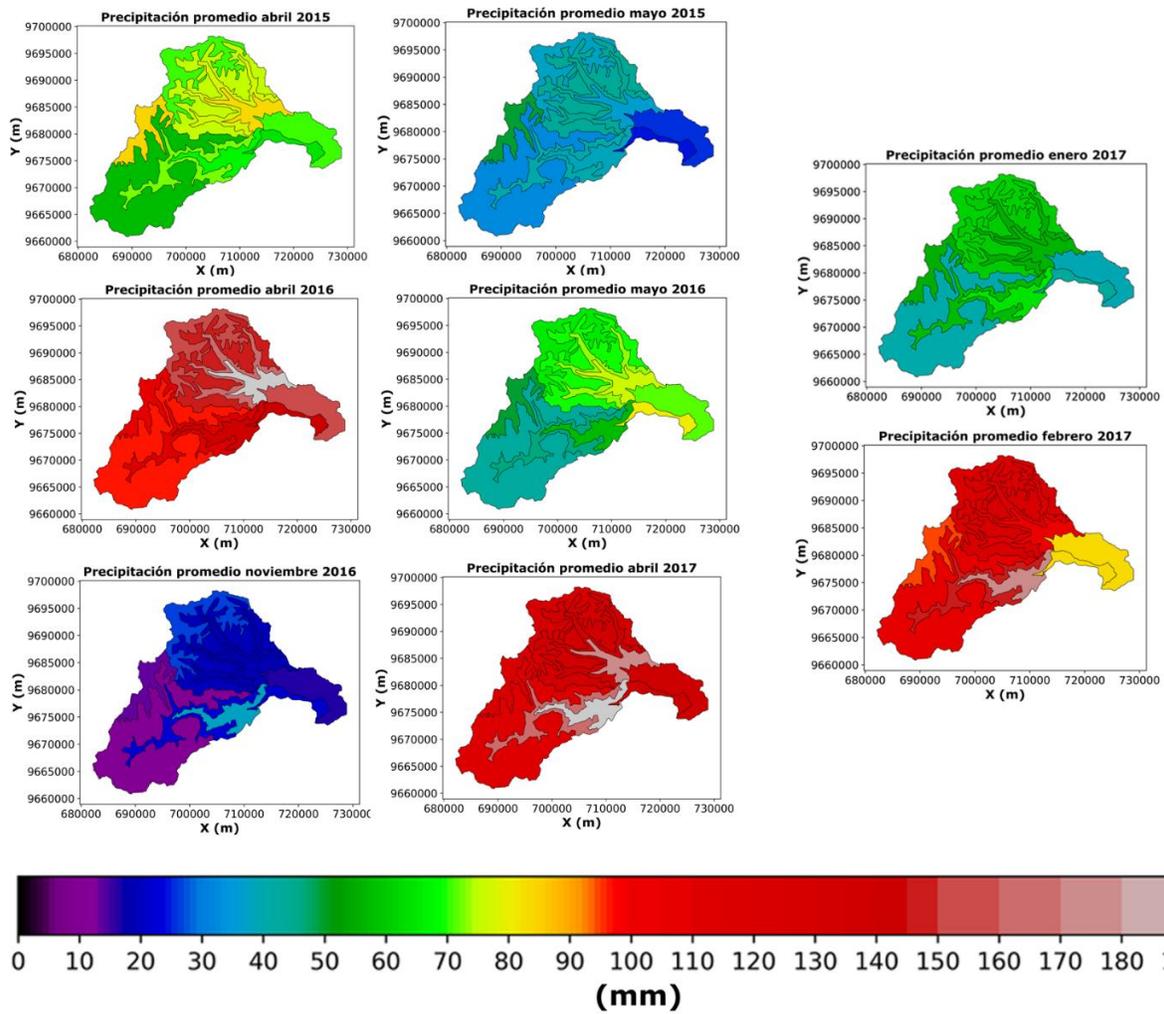


Figura A3 2. Promedios de precipitación por piso altitudinal.



Meses de estaciones húmedas

Meses de estaciones secas

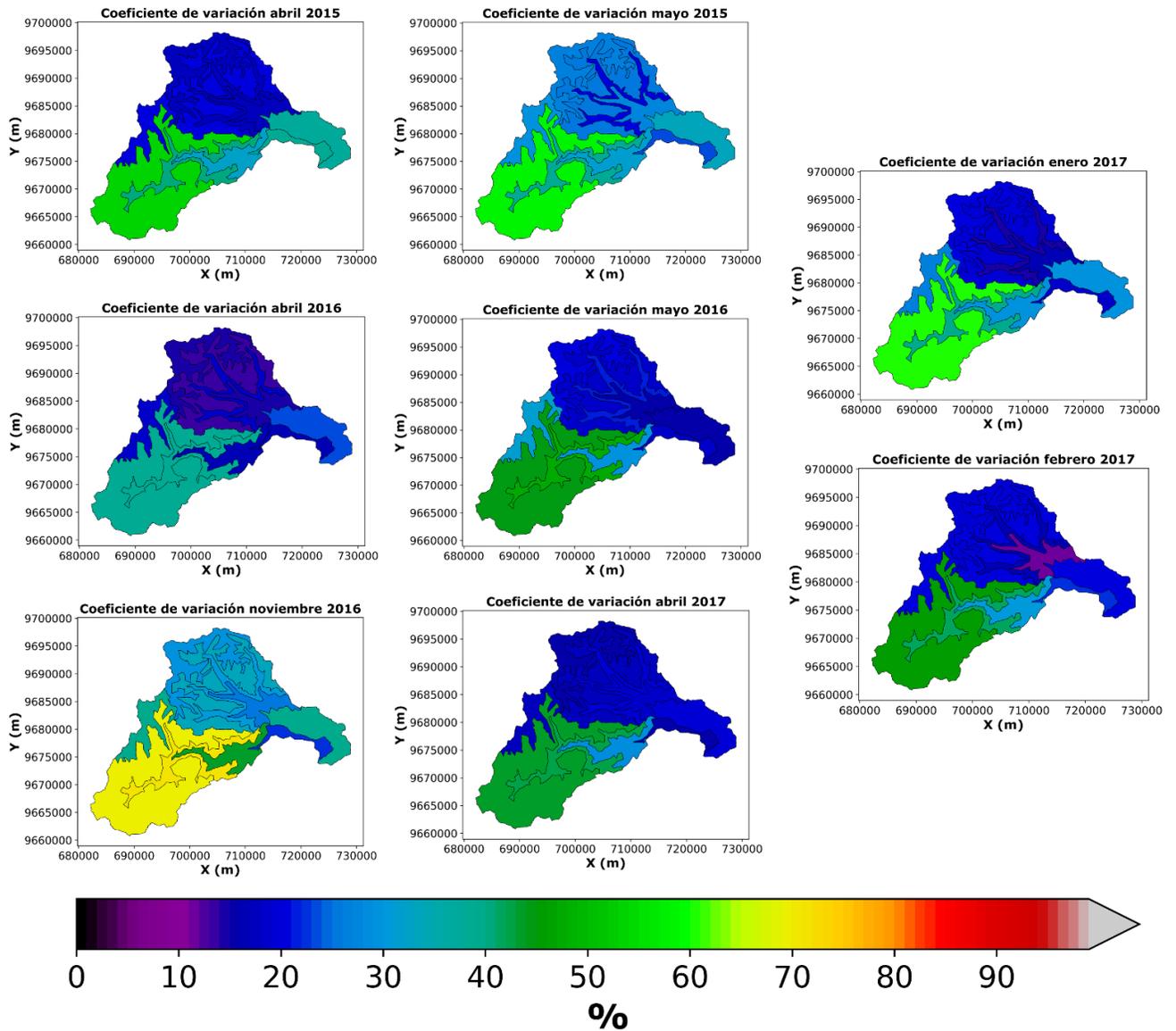


Figura A3 3. Coeficientes de variación por piso altitudinal.