

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Estudios Sociales y Globales

Maestría Profesional en Cambio Climático y Negociación Ambiental

**Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al
embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable
Papallacta**

Diana Fernanda Ontaneda Andrade

Tutor: Jorge Rodrigo Núñez Jara

Quito, 2020



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Diana Fernanda Ontaneda Andrade, autora de la tesis “Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta”, mediante el presente documento de constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático y Negociación Ambiental en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo, por lo tanto, la Universidad utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en formato virtual, electrónico, digital u óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

10 de octubre de 2020

Fecha: _____

Resumen

Este estudio tiene como objetivo conocer el comportamiento de la precipitación y el volumen en el embalse Salve Faccha, destinado para abastecer de agua de consumo a la ciudad de Quito, esto con la finalidad de inferir en la demanda de agua tanto actual como futura, frente a las variaciones de estacionalidad en la zona del páramo.

La información está dividida en tres tiempos: para el tiempo pasado (1981-2003) se utilizan los datos de precipitación ajustados de la tercera comunicación nacional (TCN) con los observados del satélite CHIRPS. Se efectuó un análisis mensual y mensual multianual que permite conocer los regímenes de lluvia, así como los meses de mayor y menor precipitación en épocas pasadas.

Para tiempo presente (2004-2018) se utiliza información otorgada por la Empresa de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Se realizó un análisis multitemporal de la precipitación mensual y mensual multianual relacionándola con los volúmenes del embalse Salve Faccha, rescatando las temporadas de mayor y menor intensidad de lluvias y las variaciones del volumen frente a la estacionalidad del páramo.

Para depurar los datos de precipitación de la EPMAPS se efectuó una comparación entre estaciones climáticas, mediante *clusters* y dendogramas de similitud con un proceso de validación que permite obtener una base de datos confiable para el respectivo análisis.

Adicionalmente, se realizó una comparación de la precipitación con los datos de volumen obtenidos por la EPMAPS, esto con la finalidad de conocer la relación que existe entre el volumen y la precipitación del embalse y resaltar la estacionalidad de acuerdo con eventos como los fenómenos del niño y la niña, profundizando el análisis en los meses de mayor y menor intensidad de lluvia.

Para el tiempo futuro (2030-2040), se utilizaron datos de precipitación de la Tercera Comunicación Nacional (MAE, 2017), en el escenario RCP 4.5, siendo este el más optimista, aquí se obtuvo tendencias futuras que permitan realizar un pronóstico sobre la intensidad de las lluvias en determinados meses.

Palabras clave: precipitación, volumen, variación, estacionalidad, tendencias, modelo hidrológico

A mi hijo Ariel, el motor que me impulsa a cumplir mis metas, a mis padres y hermano por ser ese apoyo incondicional, siempre han estado conmigo en los momentos más difíciles y en las alegrías más profundas, inculcando en mí, valores y virtudes para poder conseguir lo que me proponga.

Agradecimientos

A todas las personas que conforman la Universidad Andina Simón Bolívar gracias por la paciencia y dedicación para con los alumnos. Al ingeniero Jorge Núñez, quien con su ayuda y conocimiento generó un aporte vital a la presente tesis; a mis amigos maestrantes por su apoyo y por grandes momentos compartidos.

A la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), lugar donde encontré toda la información y ayuda para elaborar la presente investigación.

Al ingeniero Marco Polo Jiménez, jefe del Sistema Papallacta, quien me proporcionó los datos y fórmulas correspondientes a volúmenes en el embalse Salve Faccha.

Al matemático Diego Escobar, quien con su conocimiento ayudó en la construcción de series y validación de datos de precipitación en cada estación perteneciente a la EPMAPS.

A mi familia y amigos, quienes con su paciencia y palabras de aliento me ayudaron a salir de tiempos difíciles y enfocarme en la realización de mi tesis de maestría.

Tabla de contenidos

Figuras, tablas y fotografías	13
Introducción.....	15
Capítulo primero: Marco teórico	19
1. Caracterización de los páramos en el Ecuador	19
1.1. Clasificación del páramo del Parque Nacional Cayambe Coca de acuerdo a la vegetación de los Andes del Ecuador	20
1.2 Embalse Salve Faccha.....	21
1.2.1. Caracterización de la cuenca del río Quijos.....	21
1.2.2. Antecedentes de la presa Salve Faccha.....	21
1.2.3. Características del embalse Salve Faccha.....	23
1.2.4. Caracterización de las microcuencas aportantes al embalse Salve Faccha....	24
1.2.5. Funcionamiento del sistema de captación y conducción de agua para el abastecimiento en la red del sistema Papallacta.	26
1.3. Conceptos principales	29
1.3.1. Cambio climático.....	29
1.3.2. ¿Qué es el clima?.....	29
1.4. Variabilidad climática	30
1.4.1. Efectos climáticos en ecosistemas altoandinos	30
1.4.2. Eventos climáticos extremos en los páramos.....	31
1.4.3. Precipitaciones en el embalse Salve Faccha.....	32
1.4.4. Temperatura en el embalse Salve Faccha	33
1.5. Demanda y Oferta del agua en el Distrito Metropolitano de Quito.....	33
1.5.1. Demanda hídrica.....	33
1.5.2. Oferta hídrica.....	34
1.5.3. Uso del agua potable	35
Capítulo segundo: Metodología.....	37
1. Tiempo pasado.....	37
2. Tiempo presente.....	38
2.1.1. Programa estadístico R.....	39
2.1.3. Análisis de información hidrometeorológica red EPMAPS	42

2.1.4. Análisis clúster	43
2.1.5. Cálculo de volumen en el embalse Salve Faccha	44
2.3. Tiempo futuro.....	46
Capítulo tercero: Análisis de resultados.....	49
1. Resultados	49
2. Análisis de la precipitación en tiempo pasado, presente y futuro	50
2.2.1. Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha.....	52
2.3. Análisis mensual de series de precipitación	52
2.3.1. Tiempo pasado con datos ajustados de CHIRPS.....	52
2.3.2. Precipitación mensual multianual en tiempo pasado con datos de CHIRPS..	55
2.4. Tiempo presente.....	56
2.4.1. Análisis de precipitación mensual.....	56
2.4.2. Precipitación mensual multianual	58
2.4.3. Análisis de precipitación y volumen en el embalse Salve Faccha (2007- 2017)	59
2.5. Tiempo futuro.....	62
2.5.1. Análisis de precipitación mensual multianual estimada.....	63
Discusión y conclusiones	65
Lista de referencias.....	69
Anexos.....	73

Figuras, tablas y fotografías

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del embalse Salve Faccha	23
Figura 2. Ubicación de las microcuencas aportantes al embalse Salve Faccha.....	25
Figura 3. Esquema del Sistema Papallacta.....	26
Figura 4. Componentes del sistema de conducción para la red Papallacta.....	27
Figura 5. Metodología de la validación de resultado.....	40
Figura 6 Reportes de precipitación estación Salve Faccha.....	41
Figura 7 Ubicación de estaciones pluviométricas en el sistema Papallacta.....	42
Figura 8. Datos de series de precipitación diaria en diferentes estaciones meteorológicas de la EPMAPS desde el año 2000 hasta el 2018 (mm).....	42
Figura 9. Dendograma de estaciones pluviométricas, 2019	44
Figura 10. Cotas Embalse Salve Faccha año 2018.....	45
Figura 11. Cálculo delta volumen del embalse Salve Faccha.....	46
Figura 12. Precipitación mensual en “tiempo pasado” 1981-2003 en el embalse Salve Faccha.....	54
Figura 13. Análisis de precipitación mensual 1981-2003.....	55
Figura 14. Análisis de precipitación mensual “tiempo presente” 2004-2018 en el embalse Salve Faccha.....	57
Figura 15. Análisis de la precipitación mensual multianual 2004-2018.....	58
Figura 16. Análisis de precipitación y delta volumen 2007 hasta 2017 en el embalse Salve Faccha.....	61
Figura 17. Análisis de la precipitación mensual multianual mm/año 2020-2040.....	63

Lista de tablas

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la EPMAPS	28
Tabla 2. Estaciones meteorológicas de la EPMAPS, promedios mensuales de precipitación mm	32

Tabla 3. Estaciones meteorológicas de la EPMAPS promedio mensuales de temperatura °C	33
Tabla 4. Proyecciones del balance de oferta en el DMQ (l/s).....	35
Tabla 5 Extracto de los datos de precipitación (mm) ajustados de satélite CHIRPS del año 1981.....	37
Tabla 6. Registros de precipitación tiempo presente mm/mes (estaciones EPMAPS) y datos proyectados 2020-2040 (TCN, en el escenario 4.5).....	47
Tabla 7. Registros de precipitación ajustada desde 1981-2003.....	50
Tabla 8. Precipitación mensual tiempo presente.....	51
Tabla 9. Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha.....	52
Tabla 10. Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha.....	52
Tabla 11. Tendencias obtenidas para calcular los valores proyectados en los años 2020- 2025-2030-2035 y 2040.....	62

Lista de fotografías

Fotografía 1. Estación meteorológica C13 Salve Faccha.....	28
--	----

Introducción

Los páramos son ecosistemas de alta importancia en el planeta, debido a su capacidad reguladora de agua que los lleva a cumplir funciones de almacenamiento y regulación del líquido vital que ahí se acumula por efecto de la lluvia y el deshielo de los glaciares.

El IPCC, en su último informe remitido en el 2014, indica como clara evidencia de cambio climático a las afectaciones que están sufriendo los sistemas hidrológicos en distintas regiones; esto debido a las cambiantes precipitaciones, derretimiento de glaciares y aumento en la temperatura, lo que pone en riesgo la calidad y disponibilidad de agua dulce.

El ciclo hidrológico se encuentra estrechamente ligado a la temperatura y al balance radiativo, así como las variaciones que en este ciclo se dan, están relacionadas con factores como: cambios en las intensidades de las precipitaciones, fusión generalizada de la nieve, aumento del vapor de agua atmosférico, aumento de la evaporación, aumento la humedad del suelo y la escorrentía.

También se suman a la problemática del cambio climático las diferentes actividades de tipo antropogénicas como son: la expansión de la franja agrícola, la ganadería extensiva y el acelerado crecimiento demográfico han puesto a este tipo de ecosistemas en una situación de fragilidad, debido a que se encuentran en eminente peligro los diferentes servicios ecosistémicos que estos ofrecen como son: biodiversidad, regulación de agua, retención de carbono y diversidad paisajística (Vásquez & Buitrago, 2011).

Aproximadamente el 70% del agua que se consumen en las grandes ciudades del Ecuador proviene de los páramos, debido a que de estos nacen lagunas, ríos y diferentes cuerpos de agua que son la materia prima más importante para el desarrollo de la vida en la Tierra (CIFEN, 2011). Según el Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), existen impactos en los cuerpos de agua como consecuencia de los cambios en la temperatura, la variación en el nivel del mar y la inestabilidad en las precipitaciones; estos factores ponen en riesgo a la gestión integral hídrica viéndose amenazada la calidad y disponibilidad del recurso.

Según algunas proyecciones realizadas por diferentes organizaciones nacionales (CIFEN, INAMHI, Ministerio del Ambiente (MAE)) e internacionales (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo) encargadas de realizar seguimiento y monitoreo en diferentes países, se prevé que en el Ecuador la cantidad de sedimentos acumulados en los aportantes que llegan a los embalses por procesos de escorrentía incrementará debido a las constantes precipitaciones, así como el cambio en las estaciones invierno - verano en las zonas de páramo (EPMAPS, 2016).

El objetivo general de la presente investigación es: Estimar potenciales variaciones en la disponibilidad de agua en el embalse Salve Faccha, perteneciente a la red de agua potable Papallacta; para lo cual se realizará un análisis multitemporal de las afectaciones de la variabilidad climática en la microcuenca de estudio, esto con datos de precipitación y volumen del embalse.

Adicionalmente, se estimarán proyecciones sobre la disponibilidad de agua en la ciudad de Quito a corto y largo plazo (2040) utilizando datos proyectados y modelaciones climáticas simples.

Esta investigación está estructurada en tres capítulos. El capítulo primero aborda toda la recopilación bibliográfica en cuanto a la caracterización del páramo dentro del Parque Nacional Cayambe Coca y del embalse Salve Faccha con sus aportantes, así como los conceptos relacionados a cambio climático, variabilidad climática y clima. También, se hace énfasis en la oferta de agua para el Distrito Metropolitano de Quito, así como los posibles efectos causantes de los cambios de clima.

El capítulo segundo analiza la información que está dividida en tres tiempos: “tiempo pasado” desde el año 1981 hasta el 2003, “tiempo presente” desde el año 2004 hasta el 2018 y para el “tiempo futuro” se tomaron en cuenta los datos de precipitación de la Tercera Comunicación Nacional (TCN), en el escenario 4.5 que resulta uno de los escenarios más optimistas según las proyecciones de la Tercera Comunicación Nacional (Mae, 2017) a corto y largo plazo (2020-2025-2030-2035-2040); obteniendo así tendencias futuras.

Tiempo pasado.- Se analizó la precipitación con datos de la Tercera Comunicación Nacional, que utilizó los datos satelitales de Chirps, resaltando los meses y años de mayor precipitación.

Tiempo presente.- se describe la metodología que se utilizó para realizar el análisis de precipitación donde se analizó el proceso de validación de datos, mediante la realización de *clusters* y dendogramas, todo esto para realizar relleno de datos y obtener

información confiable. Se realizó comparaciones entre los datos de precipitación y volumen en el embalse para determinar los periodos de mayor y menor intensidad de lluvias.

Tiempo futuro.– Para el análisis de este periodo se realizaron tendencias a corto y largo plazo, en cuanto al comportamiento de la precipitación en el embalse Salve Faccha en base a los datos de precipitación de la Tercera Comunicación Nacional en el escenario 4.5 (MAE,2017).

En el capítulo tercero, se efectuó un análisis y una interpretación de los resultados obtenidos durante los tres periodos (pasado, presente y futuro), en cuanto a la precipitación donde se realizó graficas de los datos mensuales y mensuales multianuales para “tiempo pasado” con datos observados de Chirps. Para “tiempo presente” se realizó una comparación entre la precipitación y el volumen del embalse, se resaltó los meses de mayor y menor intensidad de lluvias y su incidencia con la cantidad de volumen en el embalse; se analizó los periodos en los que ocurrió el fenómeno del niño y la niña para contrastar con los resultados observados

Finalmente, en el “tiempo futuro” se realizó tendencias de las precipitaciones de la TCN para conocer los pronósticos de lluvia y su posible estacionalidad en los años 2020-2025-2030-2035 y 2040, resaltando la tendencia unimodal en el páramo.

Capítulo primero

Marco teórico

1. Caracterización de los páramos en el Ecuador

Los páramos son considerados unos de los ecosistemas más importantes a nivel mundial, debido a su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos ofrecen. Se extienden desde Venezuela, Colombia y Ecuador con terrenos en Costa Rica, Panamá y hacia el centro de Perú con latitudes desde los 11° norte y 8° sur (Luteyn 1992; Hofstede 1995).

Este tipo de ecosistemas poseen una amplia diversidad de especies de flora y fauna, siendo muchas de estas endémicas y con una gran adaptabilidad a las condiciones climáticas de la zona, entre las especies representativas están: pajonales, rosetas, arbustos, líquenes y briofitos; especies que se encuentran distribuidas a lo largo de toda la gradiente altitudinal. Existen tierras dedicadas al pastoreo donde existe una predominancia de arbustos como es el caso del *Polilepys* o árbol de papel, razones por las que este páramo ha sido considerado una zona vulnerable y declarada como área protegida.

Las zonas de mayor altura en los páramos son carentes de vegetación donde se encuentra pajonal (*Calamagrostis* sp.) en su mayoría, seguidos por la línea de nieve (Buytaert, 2004).

En el Ecuador los páramos tienen una posición intermedia debido a que existe una zona de transición entre los polos y las praderas naturales de altura para lo cual es importante recalcar los límites que tienen estos ecosistemas en el país: Al norte se encuentra el páramo de frailejón hasta Colombia y Venezuela, y entre los valles de Zumbahua y Palmira se encuentran praderas de *Stipa Ichu* que se asemejan a una puna; esto se debe a las condiciones edáficas y climáticas en los que se encuentran distribuidos los ecosistemas (Cesa, 1983).

Debido a la gradiente altitudinal existe variabilidad en cuanto a la temperatura, pudiendo esta variar hacia los 7°C hasta los 3500 m s. n. m. Según Bacuilima *et al*; la temperatura puede variar entre 0,5 a 0,6 °C cada 100 metros. Existe una fuerte relación entre la temperatura y la precipitación ya que existe nubosidad en los días con más lluvia y la radiación decrece, por el contrario, cuando existen días con mayor radiación solar

(días secos), la humedad relativa aumenta especialmente en la noche cuando el frío aumenta.

El clima tropical de alta montaña es el clima que se encuentra en los ecosistemas páramos, donde existe una radiación solar durante todo el año debido a la ubicación en la línea ecuatorial, las variaciones en la temperatura de aproximadamente de más de 20 °C durante el día (Buytaert, 2004). Estas variaciones de temperatura tienen una incidencia importante en la presencia de nieve y la generación de heladas ocasionan impactos en la parte hidrológica.

La presencia del fenómeno del Niño hace que la gradiente latitudinal tenga un efecto acentuado en los páramos de Colombia y al norte de Ecuador, esto como resultado de la variación climática en las costas del Pacífico comparadas con las de la cuenca del Amazonas (Buytaert et al., 2006).

Las cotas entre las que se encuentran los páramos ecuatorianos van desde los 3200 y 4700 msnm, razón por la que estos ecosistemas son catalogados como húmedos, anualmente sobre estos hay una precipitación anual entre los 500 – 2000 mm, siendo la Cordillera Central la que más lluvia recibe (Lozano et al., 2016).

1.1. Clasificación del páramo del Parque Nacional Cayambe Coca de acuerdo a la vegetación de los Andes del Ecuador

Según Cañadas, la capacidad que tienen los suelos del páramo del Parque Nacional Cayambe Coca de retener agua es de aproximadamente el 200%, convirtiendo a este ecosistema en uno de los principales proveedores de agua para consumo humano.

Dentro de la clasificación bioclimática de ecosistemas del Ecuador el páramo donde se ubica el embalse Salve Faccha es considerado un Páramo de tipo Arbustivo (Pa), conformado por: arbustos, paja, hierbas de varios tipos, rosetas, almohadillas, también se pueden encontrar árboles medianos como son: *Escallona*, *Polylepisy Gynoxis*, diferentes especies de *valeriana* que ayudan a determinar las formaciones vegetales de acuerdo las gradientes altitudinales que van desde un rango de los 2000 a 4000 msnm, resaltando la formación de páramos herbáceos con especies de *Chuquiragua* y *Calamagrostis*.

Las características biofísicas de la vegetación de este ecosistema son: déficit hídrico de 50 a 100 mm, altura media 3060 msnm, pendiente de 9°, meses secos 5, temperatura anual 8°C y máxima de 17°C, potencial de evapotranspiración de 142mm (Baquero et al., 2004).

1.2 Embalse Salve Faccha

1.2.1. Caracterización de la cuenca del río Quijos

La información utilizada en el presente capítulo fue tomada del plan de manejo ambiental del embalse Salve Faccha y del Plan de Manejo de las Cuencas y subcuencas hidrográficas del sistema Papallacta, realizadas por: Tufiño *et al.*, 2011 y COSTECAM Cia. Ltda., 2006.

En la cuenca del río Quijos es donde se encuentra ubicado el embalse Salve Faccha, se encuentra ubicada en la provincia del Napo, con una superficie aproximada de 3630 Km², posee un rango latitudinal que varía desde los 567 hasta los 5692 msnm, la precipitación oscila entre los 1100 y 4200 mm al año. Los principales ríos que alimentan a la cuenca del río Quijos son: Papallacta, Cosanga, Borja, Sardinas Grande, Oyacachi, Moradillas, Salado y Malo (Quintero et al., 2013).

La caracterización de esta zona de páramo ha sido catalogada como páramo de la Cordillera Real, con precipitaciones anuales de 1000mm por año y con épocas lluviosas los meses de abril a agosto.

El embalse Salve Faccha ubicado entre los 3000 y 4500 msnm, dentro del Parque Nacional Cayambe Coca, es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito. Inicialmente el embalse está formado por terrenos pantanosos con vertientes termales (ojos de agua) y minerales, la cobertura total del área de estudio está conformada por páramo arbustivo el 61% y pajonal el 38% restante (Tufiño,2010).

Es importante recalcar que tanto los embalses Salve Faccha, Sucus y Mogotes se encuentran dentro del Parque Nacional Cayambe Coca, razón por la que el desarrollo de actividades de tipo agrícola y de ganadería extensiva se ha visto limitado sin demostrarse impactos notables en la cantidad y calidad del agua en los embalses.

1.2.2. Antecedentes de la presa Salve Faccha

La cuenca del río Napo se encuentra ubicada al noreste del Ecuador en la región amazónica, entre las provincias de Tungurahua, Pichincha, Cotopaxi, Sucumbíos, Pastaza, Napo y Francisco de Orellana, delimitada por las latitudes 0° 09' 36" N y 01° 28' 48" S y longitudes 78° 26' 24" W y 75° 23' 24" W., con un área aproximada de 27448 Km², la

cuenca del río Napo representa la mayor cuenca Hidrográfica del país, lo cual es de suma importancia para las grandes ciudades, en especial para la ciudad de Quito donde se encuentran las principales obras de infraestructura (plantas de tratamiento) para abastecer de agua a la ciudad, como es el Proyecto La Mica Quito Sur, el Proyecto red Papallacta I y II, donde se ubican las principales fuentes de agua para captación como son los embalses: Salve Faccha, Mogotes y Succus.

La temperatura media anual oscila alrededor de los 25,8 °C, siendo los meses más calurosos diciembre y enero. Las temperaturas más bajas se presentan en los meses de junio y julio. La zona en estudio (embalse Salve Faccha), se caracteriza por tener alta humedad relativa durante todo el año, con valores medios del orden de 84,3 %.

La cuenca hidrográfica del río Napo nace a los 4200 m s.n.m., en las faldas del Volcán Antisana, hasta la estación de cierre en Nuevo Rocafuerte a 166 m s. n. m. El eje de la cuenca y su colector principal lo constituye el río Napo, que discurre a lo largo de 495 Km desde su nacimiento, hasta el cierre de la cuenca. En la Zona Sub-andina, los efectos de erosión han dado lugar a relieves derivados, formando cañones angostos y profundos, por donde corren los ríos de régimen sub-montañoso, cuyas aguas van a desembocar en los dos grandes ríos que bordean y cortan de oeste a este, esta zona; el río Quijos al norte y el Napo al sur.

La precipitación media de la cuenca en la parte alta es del orden de los 1 500 mm, en la parte media 3 500 mm y en la parte baja 2 500 m s. n. m. Los caudales medios multianuales registrados en el cierre de las estaciones representativas de las tres zonas son del orden de los 300 m³/s en la parte alta, 1050 m³/s en la parte media y 2200 m³/s en la parte baja.

En la parte alta de la cuenca se ubica la parroquia de Oyacachi como población más cercana al embalse Salve Faccha, donde unas de las principales actividades productivas es la ganadería; es importante recalcar que actualmente aún existen cabezas de ganado que pastorean libremente por el páramo e incluso existen bebederos dentro del embalse (figura 1).

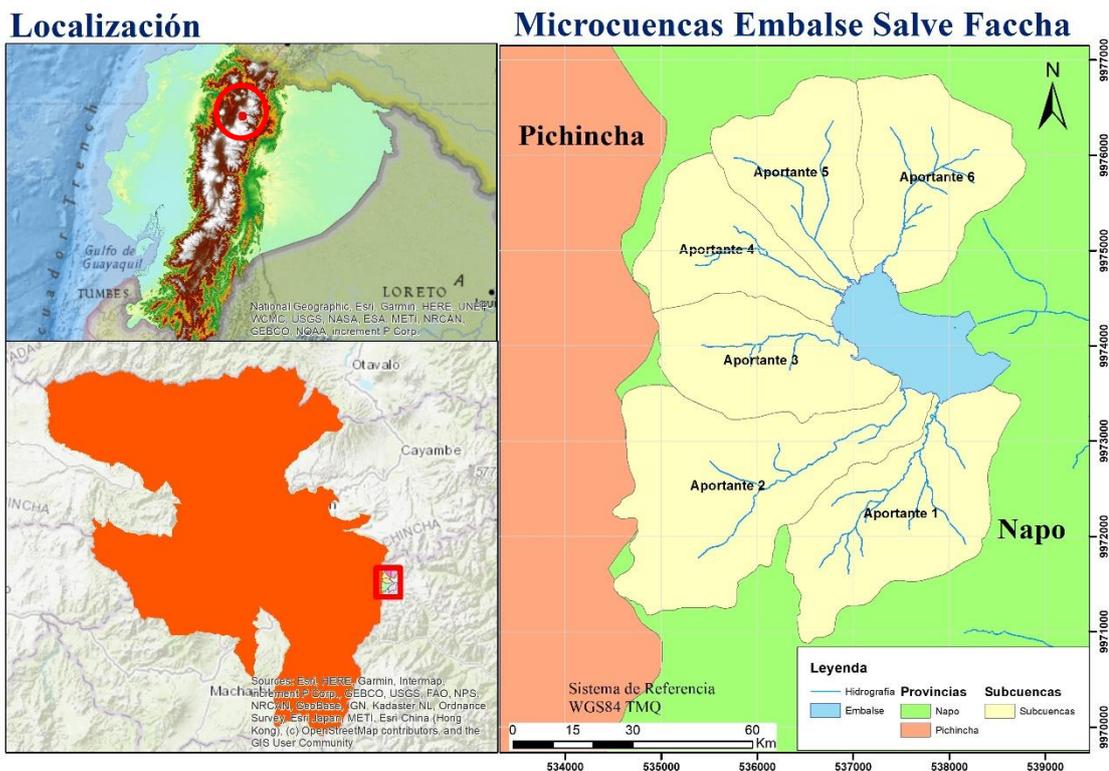


Figura 1. Ubicación del embalse Salve Faccha
Fuente: Imagen de GAR (2020)

1.2.3. Características del embalse Salve Faccha

La construcción de la presa Salve Faccha tiene su origen desde el año 1990, donde el principal objetivo es dotar de agua potable a la ciudad de Quito, especialmente en época seca (estiaje), la presa obtiene el agua del río Cunuyacu, misma que reserva alrededor de $10.5000.00 \text{ m}^3$, con un caudal de 1000 l/s , abasteciendo a la ciudad de Quito con casi el 50% de agua potable obtenida por gravedad. Este proyecto fue implantado dentro del Parque Nacional Cayambe-Coca, en la provincia del Napo.

El embalse se encuentra construido por materiales sueltos, constituidos por morrenas; posee una altura máxima de 44 metros y una longitud de la corona de 190 metros, tiene una capacidad máxima de 1450 l/s . Adicionalmente se realizan constantes desagües de fondo que van directamente sobre una tubería de 0.90 metros con un vertedero adicional de 8 metros de largo con una capacidad de descarga de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (Larrea & Arias, 2002).

1.2.4. Caracterización de las microcuencas aportantes al embalse Salve Faccha

La microcuenca del *aportante 1* se encuentra delimitada al Norte por el Embalse Salve Faccha, al este por las microcuencas de las lagunas Guambicochas y Mogotes, al sur por el área perteneciente al Parque Nacional Cayambe Coca y al oeste por la microcuenca del aportante 2, tiene un área aproximada de 3,28 km², con un rango de altitudes que varía desde los 3.894 hasta los 4.234,18 m s. n. m. Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderadas, siendo el mayor porcentaje del área de pendientes suaves que pueden contribuir a mayor escorrentía superficial (figura 2).

La microcuenca del *aportante 2* se encuentra delimitada al Norte por la microcuenca del aportante 3, al este por la microcuenca del aportante 1 y el Embalse Salve Faccha, al sur por la microcuenca 1 y al oeste por el área del Parque Nacional Cayambe Coca, tiene un área aproximada de 4,40 km², con un rango de altitudes que varía desde los 3.894 hasta los 4.400 m s. n. m. Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderadas, siendo el mayor porcentaje del área de pendientes suaves que pueden contribuir a mayor escorrentía superficial, estas pendientes están asociadas a la presencia de depósitos volcano sedimentarios; un bajo porcentaje del área corresponde a pendientes muy altas (figura 2).

La microcuenca del *aportante 3* se encuentra delimitada al Norte por la microcuenca del aportante 4, al este por el Embalse Salve Faccha, al sur por la microcuenca 1, al sur por la microcuenca del aportante 2 y al oeste por el área del Parque Nacional Cayambe Coca, tiene un área aproximada de 2,36 km², con un rango de altitudes que varía desde los 3.894 hasta los 4.291 m s. n. m. Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderadas, siendo el mayor porcentaje del área de pendientes suaves que pueden contribuir a mayor escorrentía superficial, estas pendientes están asociadas a la presencia de depósitos volcano sedimentarios; un bajo porcentaje del área corresponde a pendientes muy altas (figura 2).

La microcuenca del *aportante 4* se encuentra delimitada al Norte por la microcuenca del aportante 5, al este por la microcuenca del aportante 3 y el Embalse Salve Faccha, al sur por la microcuenca 3 y al oeste por el área del Parque Nacional Cayambe Coca, tiene un área aproximada de 4,40 km², con un rango de altitudes que varía

desde los 3.894 hasta los 4.318 m s. n. m. Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderada (figura 2).

La microcuenca del *aportante 5* se encuentra delimitada al Norte por el área del Parque Nacional Cayambe Coca, al este por la microcuenca del aportante 6, al sur por el Embalse Salve Faccha y al oeste por la microcuenca del aportante 4. Ver figura 4.3., tiene un área aproximada de 2,21 km², con un rango de altitudes que varía desde los 3.894 hasta los 4.346 m s. n. m. (Tabla 4.1). Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderadas, siendo el mayor porcentaje del área de pendientes suaves, planas o semiplanas que pueden contribuir a mayor escorrentía superficial, estas pendientes están asociadas a la presencia de depósitos volcánico sedimentarios; un bajo porcentaje del área corresponde a pendientes muy altas (figura 2).

La microcuenca del *aportante 6* se encuentra delimitada al Norte y al este por el área del Parque Nacional Cayambe Coca, al sur por el Embalse Salve Faccha y al oeste por la microcuenca del aportante 5, tiene un área aproximada de 2,83 km², con un rango de altitudes que varía desde los 3.894 hasta los 4.345 m s. n. m. Presenta una topografía variable con presencia de terrenos escarpados con pendientes en el rango de suaves a moderadas, siendo el mayor porcentaje del área de moderadas que pueden contribuir a mayor escorrentía superficial, estas pendientes están asociadas a la presencia de depósitos volcánico sedimentarios; un bajo porcentaje del área corresponde a pendientes altas (figura 2).



Figura 2. Ubicación de las microcuencas aportantes al embalse Salve Faccha
Fuente y elaboración: EPMAPS (2019)

1.2.5. Funcionamiento del sistema de captación y conducción de agua para el abastecimiento en la red del sistema Papallacta

Entre los principales sistemas para abastecer de agua a la ciudad de Quito se encuentran: Sistema Lloa-Atacazo-El Placer desde 1956, Sistema Pita desde 1973, Sistema Papallacta Integrado desde 1990 (Sistema Papallacta I y Optimización del sistema Papallacta 1998- 2002), y Sistema Mica Quito Sur desde el 2000 (figuras 3-4). Entre las conducciones para la red del sistema Papallacta se encuentra distribuido de la siguiente manera:

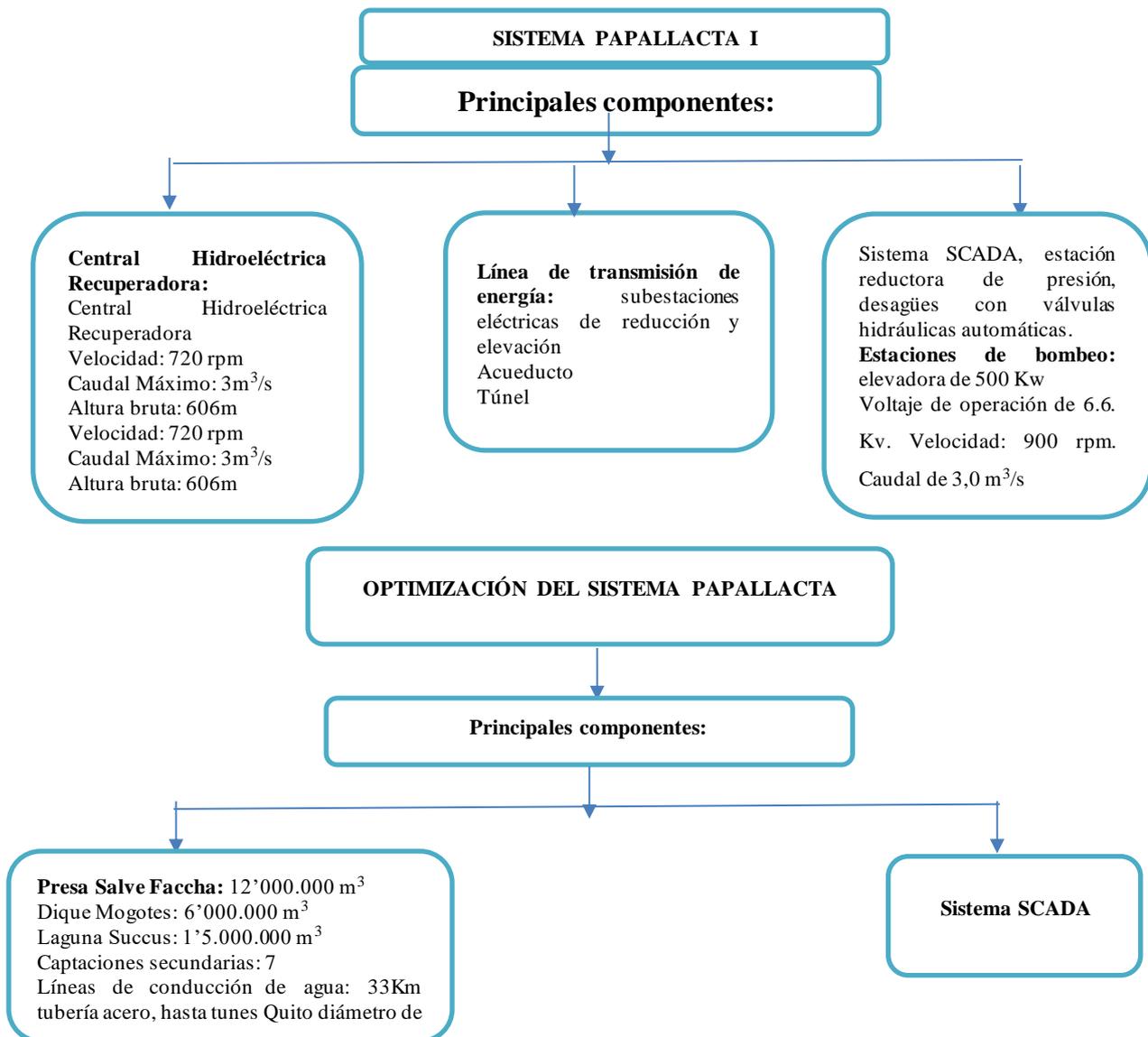


Figura 3. Esquema del Sistema Papallacta
Fuente: EPMAPS (2008). Elaboración propia (2019)

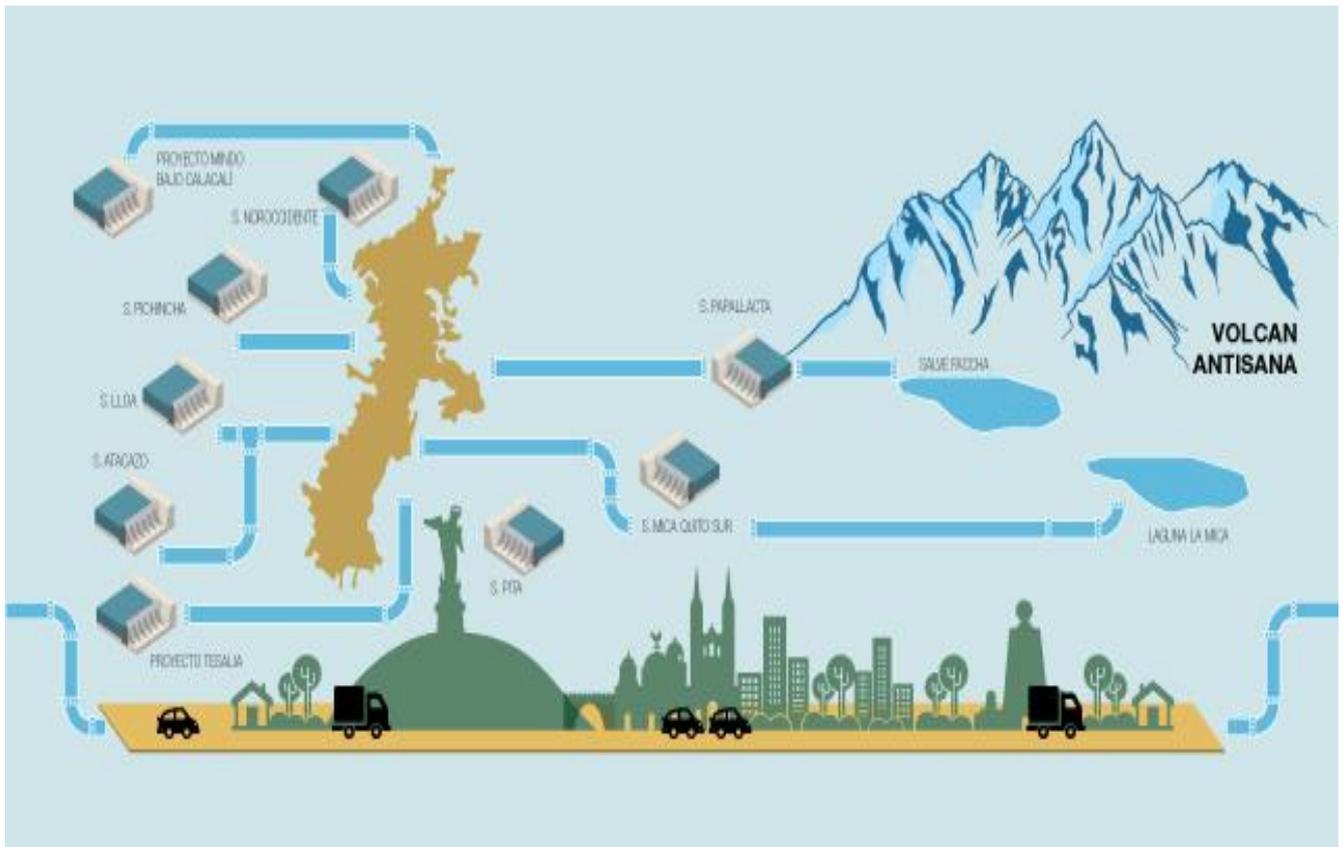


Figura 4. Componentes del sistema de conducción para la red Papallacta
Fuente y elaboración: EPMAPS (2017)

a) *Estaciones meteorológicas de la EPMAPS*

La red de estaciones en la EPMAPS se inició en el año 2000, con el objetivo de monitorear las condiciones meteorológicas del DMQ, y los sistemas de abastecimiento hídrico de la Empresa (fotografía 1); además, de contar con información meteorológica para el análisis de disponibilidad de agua, los cuales son utilizados para la generación de proyectos para la dotación de agua a la población, así como también, para la protección de las cuencas aportantes y fuentes de agua (GAR, 2019).

A continuación, se presentan las estaciones analizadas en la presente investigación, los datos de estas fueron tomados para realizar un relleno de datos de precipitación, donde se registró todas las estaciones sobre los 2596 msnm (tabla 1):

¹ Debido a la emergencia sanitaria que afronta el país (Covid 19), no fue posible obtener un mapa más esquemático sobre el sistema Papallacta.

Tabla 1
Estaciones meteorológicas de la EPMAPS

Código	Nombre	Tipo	Provincia	Cuenca	X (WGS84 TMQ)	Y (WGS84 TMQ)	Altura msnm
C10	La Mica Presa	Meteorológica	Napo	Antisana	530267,2	9939548,97	3922
C12	Quijos Campamento	Meteorológica	Napo	Quijos	550490,3	9947685,48	2596
C13	Salve Faccha	Meteorológica	Napo	Oyacachi	538701,84	9974481,34	3888
P34	Papallacta	Pluviométrica	Napo	Papallacta	539936,28	9957892,78	3156
P38	San Simón	Pluviométrica	Napo	Antisana	538914,71	9942255,9	4303
P40	Tambo 2a	Pluviométrica	Napo	Tambo	515838,44	9916833,32	3880
P42	Antisana Ramón Huañuna	Pluviométrica	Napo	Antisana	533533,37	9933428,27	3691
P43	Antisana Limboasi	Pluviométrica	Napo	Antisana	532466,92	9934401,31	3734
P44	Guaytaloma	Pluviométrica	Napo	Chalpi	542097,78	9967076,3	3782
P46	Chalpi Grande	Pluviométrica	Napo	Chalpi	546170,21	9960778,58	2905
P55	Antisana Diguchi	Pluviométrica	Napo	Antisana	526392,68	9936650,63	3958
P62	Blanco Chico Alto	Pluviométrica	Napo	Papallacta	539591,68	9949890,69	4320
P63	La Virgen Papallacta	Pluviométrica	Napo	Papallacta	534308,65	9964564,66	4365
P64	Laguna Encantada	Pluviométrica	Napo	Chalpi	547840,09	9968126,57	4000
P65	Laguna Santa Lucía	Pluviométrica	Napo	Antisana	535420,41	9948588,36	4379
P66	Blanco Grande	Pluviométrica	Napo	Papallacta	545738,02	9955637,48	3208
P68	Salve Faccha alto	Pluviométrica	Napo	Oyacachi	536741,69	9974088,22	3919

Fuente: Departamento de Gestión de Recursos Hídricos (EPMAPS), 2019
Elaboración propia (2019)



Fotografía 1. Estación meteorológica C13 Salve Faccha
Fuente y elaboración: EPMAPS (2017)

1.3. Conceptos principales

1.3.1. Cambio climático

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), define al cambio climático como: “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Existen diferentes escenarios sobre el cambio climático, donde se proyectan aumentos de temperatura de 1 y 3°C en los próximos años, viéndose afectada la productividad agrícola presentando rendimientos bajos en todo el mundo (IPCC, 2007 & Stern, 2006).

Actualmente el cambio climático es considerado un fenómeno a nivel mundial que pone en riesgo los recursos naturales de los países, debido a que sus efectos resultan irreversibles, por esta razón se ha convertido en una problemática que abarca varios escenarios como el político, económico y social.

La información que proporcionan diferentes estudios sobre la gestión de los ecosistemas páramo han resaltado la importancia de trabajar bajo escenarios que permitan manejar datos climatológicos (temperatura, precipitación) para tratar al cambio climático en territorios menores donde es posible su gestión para pensar en un futuro en un manejo de ecosistemas regional.

Es importante definir los conceptos de clima, variabilidad y eventos climáticos extremos, con el objetivo de identificar estos fenómenos y las relaciones que interactúan sobre los páramos.

1.3.2. ¿Qué es el clima?

Algunos autores definen al clima como el resultado de diferentes interacciones abióticas como son: temperatura, presión atmosférica, humedad, precipitación, latitud y altitud.

Según el IPCC, en el quinto informe emitido en el año 2014, define al clima como: “Es una descripción estadística del tiempo atmosférico, en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes, desde períodos que pueden abarcar meses hasta miles o millones de años, siendo el promedio habitual de 30 años, de

acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial”. Este concepto ha sido desarrollado tomando en cuenta lo que es un sistema climático que relaciona cinco factores importantes: la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, así como las interacciones entre ellos.

Por lo antes mencionado, se recalca que, los cambios en el clima atribuidos al cambio climático se manifiestan por las constantes actividades antropogénicas sobre los ecosistemas, siendo estos altamente vulnerables a las variaciones y eventos extremos (IPCC, 2014).

1.4. Variabilidad climática

Según el grupo de expertos que conforman en Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), en el último informe en el año 2014 definen a la variabilidad climática de la siguiente manera: “Denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales de los sistemas climáticos (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad extrema)”.

1.4.1. Efectos climáticos en ecosistemas altoandinos

En los ecosistemas altoandinos es donde se conservan los mayores recursos hídricos que los seres humanos utilizamos en nuestras actividades diarias como son: uso doméstico, industrial, riego, generación de energía hidroeléctrica, entre otros.

Existen impactos como: el crecimiento demográfico, la expansión de la franja agrícola y la ganadería extensiva, actividades que alteran la regulación hídrica de los páramos, poniendo en riesgo la capacidad que tienen estos de brindar servicios ecosistémicos, influyendo directamente en el incremento de la demanda de agua y sus usos.

Según un estudio realizado por Buytaert *et al*, en el 2006 estima que solo en el Ecuador más de tres millones de personas se benefician directamente del agua proveniente de los páramos, para lo cual en términos de variabilidad climática los ecosistemas dependen de factores abióticos y las condiciones climáticas y

meteorológicas, tipos de suelos y vegetación, las precipitaciones pueden variar durante el año desde los 800 hasta los 3000 mm, con variaciones altitudinales y de temperatura.

La capacidad que tienen los páramos de regular agua se debe a las constantes precipitaciones, pero también es importante recalcar que las condiciones edafológicas de los suelos que son los que infiltran determinada cantidad de agua que no son las mismas en todos los páramos.

1.4.2. Eventos climáticos extremos en los páramos

Los páramos son considerados ecosistemas altamente vulnerables al fenómeno del cambio climático sumado a conflictos sociopolíticos y ambientales debido a la reducción de flujos de agua, pérdida de biodiversidad y usos de la tierra.

El suelo de los páramos no solo tiene la función de almacenar y regular agua, también está estrechamente relacionado con la capacidad de almacenar carbono proveniente de la materia orgánica como producto de la descomposición a bajas temperaturas durante millones de años, conformando el 50% de la cobertura del suelo del páramo (Duque et al, 2016).

De acuerdo con las observaciones de las variables climatológicas que registraban una tendencia al aumento de las temperaturas de la atmósfera y del mar, se dio a conocer a la comunidad científica la necesidad de estudiar el fenómeno de cambio climático, quienes comenzaron a relacionar eventos como el deshielo de los polos y el incremento en el nivel del mar, con el aumento de la temperatura media global.

También se ha analizado los cambios en el comportamiento de la precipitación con una tendencia a su reducción, temperaturas extremas que han provocado olas de calor, desplazamiento de la flora y de la fauna a zonas que antes eran consideradas más frías, incremento en la temperatura de lagos y ríos que incide en la calidad de sus aguas y modificación en los sistemas marinos que coinciden con el hecho de que la temperatura media de la superficie y del mar ha aumentado (IPCC, 2007b).

Adicionalmente, la reducción de los glaciares; en el Ecuador tiene incidencia directa sobre las vertientes del Antisanilla señalan niveles inferiores en unos 300 0 400 metros más arriba de los 5100 msnm y en los glaciares del Cotopaxi se encuentran con una reducción del 40% en los últimos 30 años (IRD, INAMHI y EPMAPS, 2016).

1.4.3. Precipitaciones en el embalse Salve Faccha

Se han proyectado cambios en el clima para los próximos años, donde se exponen diferentes escenarios sobre la disponibilidad de humedad y por consiguiente alteraciones en el volumen de los caudales de los embalses, disminuciones en el nivel de agua de diversos humedales y disminución de disponibilidad de agua de niebla en los bosques de montaña tropicales (Burkett et al., 2005).

En el embalse Salve Faccha, las microcuencas aportantes se localizan en la vertiente tropical de la cordillera de los Andes, su drenaje natural conduce sus aguas hacia la región amazónica. Los factores físicos como la altura, morfología, pendientes, latitud, exposición a las masas húmedas, dirección del viento, hacen que la zona de estudio presente el clima tipo Ecuatorial Frio de Alta Montaña (Pourrut, 1995), con una variedad de microclimas, precipitaciones de larga duración y de baja intensidad y con una humedad relativa superior al 80%.

La variación de la precipitación en el tiempo afecta directamente la cantidad de escurrimiento superficial, lo que se traduce en disponibilidad de agua para el Sistema de abastecimiento.

En la zona en estudio las precipitaciones están presentes casi todo el año sin una verdadera época seca. Las precipitaciones mayores, sin embargo, se presentan entre los meses de mayo y junio.

La variación interanual de la precipitación influye en los valores medios de aprovechamiento anual; sin embargo, su pronóstico tiene muy poco éxito al emplear los ciclos para hacer proyecciones de precipitación, ya que la ocurrencia de una serie de años con altas precipitaciones o de estiaje tiende más al azar que a cierta tendencia, razón por la que exclusivamente se evaluó la precipitación en base estaciones meteorológicas de la zona (tabla 2).

Tabla 2
Estaciones meteorológicas de la EPMAPS, promedios mensuales de precipitación mm

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	Periodo
P68	81,8	81,2	89,5	114,	121,0	107,5	104,5	68,1	58,6	71,2	64,6	55,5	1017,9	2012 - 2017 ¹
P37	63,5	80,7	92,0	122,2	114,8	127,3	106,2	83,2	66,3	81,0	71,3	64,5	1073,0	2004 - 2015
C13	127,3	80,3	130,3	104,1	142,6	139,	97,9	52,8	114,1	80,6	66,4	79,0	1215,	2015 - 2017 ¹

Fuente y elaboración: EPMAPS (2019)

1.4.4. Temperatura en el embalse Salve Faccha

Debido a que el calentamiento global ha generado variaciones en la temperatura de la Tierra con un incremento de $\pm 0,2$ °C según el quinto informe del IPCC; poniendo en riesgo a todos los ecosistemas en especial a los altoandinos; diversos estudios han determinado que a consecuencia del aumento o variación en la temperatura se pueden producir aislamientos o extinción de diversas especies y servicios ambientales como almacenamiento de carbono y regulación de agua.

Según la Comunidad Andina de Naciones en un estudio en el año 2007, indica que existe un retroceso de los glaciares sobre los 5000 m s. n. m., siendo la región subandina la que concentra el 95% de los glaciares tropicales en el mundo, siendo estos los que alimentan a grandes ríos de los que también se represan sus aguas cuya función es la de abastecer de agua a las personas para lo cual se prevé una menor disponibilidad del recurso.

Mediciones directas de temperatura son muy escasas en la zona, pues se tiene exclusivamente una estación meteorológica dentro del área de estudio, donde la temperatura media mensual para la zona en estudio es de $5,3^{\circ}\text{C}^1$ (tabla 3).

Tabla 3
Estaciones meteorológicas de la EPMAPS promedio mensuales de temperatura °C

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio	Periodo
C13	5,5	5,8	5,8	5,7	5,7	5,1	3,6	4,5	4,5	5,8	6,2	5,7	5,3	2015 - 2017 ¹

Fuente: Departamento de Gestión de Recursos Hídricos (EPMAPS)

Elaboración: Unidad de Hidrología (2019)

1.5. Demanda y Oferta del agua en el Distrito Metropolitano de Quito

1.5.1. Demanda hídrica

La disponibilidad de agua resulta de vital importancia para el desarrollo del ser humano, para lo cual el adecuado suministro de agua potable para que se desarrollen sus actividades es una pieza clave que garantiza el bienestar en las actividades tanto físicas, sociales y psicológicas.

De acuerdo con el programa OMS/UNICEF, quien se encarga del monitoreo, saneamiento y abastecimiento de agua a nivel mundial, realiza una estimación donde

¹ Información del Dpto. Gestión de Recursos Hídricos (EPMAPS).

aproximadamente el 17% de la población mundial tiene acceso limitado al recurso hídrico, tomando en cuenta que existe disponibilidad del recurso de al menos 20 litros de agua por persona, tomando en cuenta que existen plantas de tratamiento con una distancia de casi 1 Km.

Entre los aspectos ambientales de la ciudad se destacan temperaturas promedio entre 10 y 22°C, el 40% de la superficie tiene pendientes superiores al 70% razón por la que la topografía es muy variada. En cuanto al déficit de precipitaciones que hay en la ciudad, estas oscilan entre los 1000 y 1259 mm en el río pita San Pedro y de 1250mm y 1500 mm en la subcuenca del río Pisque, en zonas como las de Guayllabamba las precipitaciones están entre los 500 y 1000 mm; en estas zonas existen déficits hídricos anuales entre los 3 a 9 meses (FLACSO, 2015).

1.5.2. Oferta hídrica

Para realizar un análisis de la oferta de agua en determinada zona se deben disponer de modelos de balances hídricos, también el balance hídrico natural depende directamente del ciclo hidrológico, para lo cual se considera el caudal y las precipitaciones.

La hoy de Quito es considerada una de las más pobladas en toda la región de los Andes, por esta razón la oferta suele sobrepasar las proyecciones de abastecimiento de agua para las grandes ciudades.

Para determinar la oferta hídrica dentro de la ciudad de Quito se determinan zonas de respuesta hidrológica definidas, siendo la calidad de la información un problema para obtener datos reales hidrológicos del manejo de las cuencas lo que ha llevado a que se tome información de cuencas más grandes de precipitación y uso del suelo (UICN, 2008).

Según un estudio realizado por Bierre para la UICN y de acuerdo con un análisis en la precipitación en la hoy de Quito, concluye que existe un patrón de precipitaciones estacionales ya que en los meses de abril y octubre (60 y 160mm/al mes) se exhibe una mayor lluvia y en los meses de junio y agosto registros mínimos de la misma (7mm/al mes); influyendo directamente en la cantidad de agua captada por las fuentes aledañas a las zonas del DMQ.

Actualmente, la ciudad de Quito tiene una producción de agua potable de 9,467 l/s; existen proyecciones realizadas donde se estima que se necesitará para los años proyectados de una producción de 1406 l/s, hasta el 2020 y 13606 l/s hasta el 2040, lo

que llevaría a un incremento en la producción anual de 119l/s en los siguientes 30 años (tabla 4).

Tabla 4
Proyecciones del balance de oferta en el DMQ (l/s)

	2010	2020	2030	2040
Distrito urbano de Quito	6086	6818	7808	8758
Parroquias Rurales	1661	2295	2363	2440
Parroquias Urbanas	1311	1761	1795	1833
Total, DMQ	9040	108073	11966	13036

Fuente: Hasen y Sawyer (2011)

1.5.3. Uso del agua potable

Según varios estudios realizados sobre el cambio climático, se concluye que los cambios en el clima continuarán con mayor frecuencia durante las siguientes décadas, dejando como consecuencias variaciones en la temperatura y precipitaciones, derretimiento de glaciares y cambios en el nivel del mar y los cuerpos de agua. Según la OMS en su tercer informe “El agua un mundo de cambio”, recalca el déficit de agua potable como consecuencia de cambio climático.

De acuerdo al IPCC (2007), en su cuarto informe indica que en cuanto a la precipitación durante los años 1900 y 2005 ha existido un notable incremento, especialmente en las zonas correspondientes a: Norte de Europa, Asia Norte y Central, Sudamérica y Norteamérica; el aumento en las precipitaciones genera que existan mayores procesos de escorrentía en las cuencas aportantes a los embalses, lo que da como resultado cambios en las condiciones físico-químicas y biológicas de los embalses, alterando su calidad de agua.

Según la Secretaria de Gestión de Riesgos en una investigación denominada “Propuesta de Estrategia Nacional para la reducción de Riesgos y Desastres”, concluye que tanto los eventos naturales como la magnitud de los mismos no pueden evitarse; siendo que las condiciones que incrementan la vulnerabilidad de las cuencas que son tomadas para la captación de agua para consumo son los constantes cambios en las precipitaciones, temperaturas, vientos y nivel de los ríos (CEPAL, 2002).

Adicionalmente en este trabajo también se resalta la necesidad de contar con la información necesaria en cuanto a: climatología, meteorología e hidrología que permitan

construir bases de datos que permitan dar alertas tempranas sobre posibles eventos que pongan en riesgo la disponibilidad de agua en la ciudad.

La Secretaría Nacional del Agua (Senagua), conjuntamente con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inamhi), son las entidades encargadas de organizar e interpretar la información para determinar la disponibilidad de agua tanto superficial como subterránea; este tipo de manejo de información ayuda en la elaboración de nuevas políticas en cuanto al recurso hídrico, así como la participación de autoridades en la toma de decisiones para el bien de la ciudadanía.

Según proyecciones realizadas por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (Epmaps) en el 2011, y de acuerdo con su plan maestro 2010-2040, resalta que la población del DMQ, tendrá un incremento del 2,4 a 4,2 millones de habitantes razón por lo que la demanda de agua incrementará de 9040 a 13036 l/s.

1981	1	2.5
1981	1	4.9
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	3.8
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
1981	1	0
sum		32.1

Fuente y elaboración propias (2019)

2. Tiempo presente

Para analizar este período, se realizó un análisis estadístico con datos históricos de precipitación y volumen del embalse Salve Faccha, proporcionados por el Departamento de Gestión de Recursos Hídricos y el Departamento de Captaciones y Conducciones de la EPMAPS, para esto se realizó un relleno de datos con series históricas desde el año 1966 de precipitación esto con datos de las estaciones hidrométricas ubicadas en la provincia del Napo y que son cercanas al área de estudio (cerca a los 3000 msnm); también se procesaron datos en cuanto a volúmenes del embalse Salve Faccha de alrededor de 11 años.

Se compararon datos pluviométricos de los últimos 30 años para dar mayor confiabilidad a la información procesada, con esta información se realizaron estimaciones a corto plazo y se relacionaron con el volumen del embalse Salve Faccha.

2.1. Análisis de datos para establecer bases de datos de precipitación

El análisis exploratorio de series temporales hidrometeorológicas y volúmenes del embalse registrados por la EPMAPS, se lo realizó utilizando los principales estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, entre otros); se debe recalcar que se analizaron las estaciones de la Red de Estaciones Hidrometeorológicas de la EPMAPS que registran precipitación y se encuentran sobre los 3000 msnm, con una frecuencia de 5 minutos, lo cual exige manejo de matrices y análisis de datos a gran escala es por esto

la necesidad de utilizar software especializado como R y técnicas como: análisis de conglomerados, dendogramas, y correlaciones; a continuación se describen ciertas definiciones y metodologías que fueron usadas.

Promedio. Se calcula obteniendo la suma de todos los datos dividido para el número total de datos sumados; el valor representa lo que pasa con un conjunto de datos y análisis.

Mediana. Se trata de un número de datos que se encuentran intermedios, y se utilizan principalmente cuando hay distribuciones numéricas sesgadas, devolviendo la tenencia central a un grupo de datos.

Desviación estándar. Es una medida de dispersión, la cual indica que tan dispersos están los datos de acuerdo con la media, mientras mayor sea la desviación estándar más dispersos estarán los datos.

Estandarización. Es una técnica muy utilizada en el caso de que las variables de estudio no posean la misma escala. Una variable está tipificada o estandarizada cuando a sus valores se les resta su media aritmética y se les divide por su desviación estándar, es decir:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

2.1.1. Programa estadístico R

Para realizar la presente investigación se utilizó estadística multiparamétrica donde se manejan datos de precipitación de todas las estaciones pertenecientes a la red hidrometeorológica de la EPMAPS y los volúmenes captados y extraídos en el embalse Salve Faccha, mismos que han sido procesados con el programa estadístico R STUDIO, que permite obtener conglomerados, similitudes, correlaciones y posibles escenarios de la variación de precipitación.

Para empezar a manejar este tipo de información se procedió a verificar que todos los datos obtenidos se encuentren validados esto dará confiabilidad en los resultados obtenidos, este proceso es de la siguiente manera:

2.1.2. Metodología de la validación

Conversión de datos. Este procedimiento se realiza desde que los archivos son extraídos en campo, mismos que se transforman a un archivo de texto plano mediante un ejecutable.

Recopilación de datos. Se recopiló los datos de precipitación de todas las estaciones hidrometeorológicas y los volúmenes del embalse Salve Faccha y se ordenó la información que se encontraba dispersa en archivos separados en Excel.

Ejecución de filtros o *scripts*. Son códigos de programación que permiten hacer un control de calidad en los datos recopilados, esto se realizó utilizando el programa R STUDIO, la validación de información se ejecutó gracias a la colaboración de los funcionarios del Departamento de Gestión de Recursos Hídricos y el apoyo de múltiples convenios interinstitucionales entre EPMAPS-EPN-FONAG-IRD.

Revisión de información. Una vez que se obtuvo toda la información se revisó los datos obtenidos de cada año con la finalidad de verificar que todos los datos se encuentren validados y sean coherentes (figura 5).

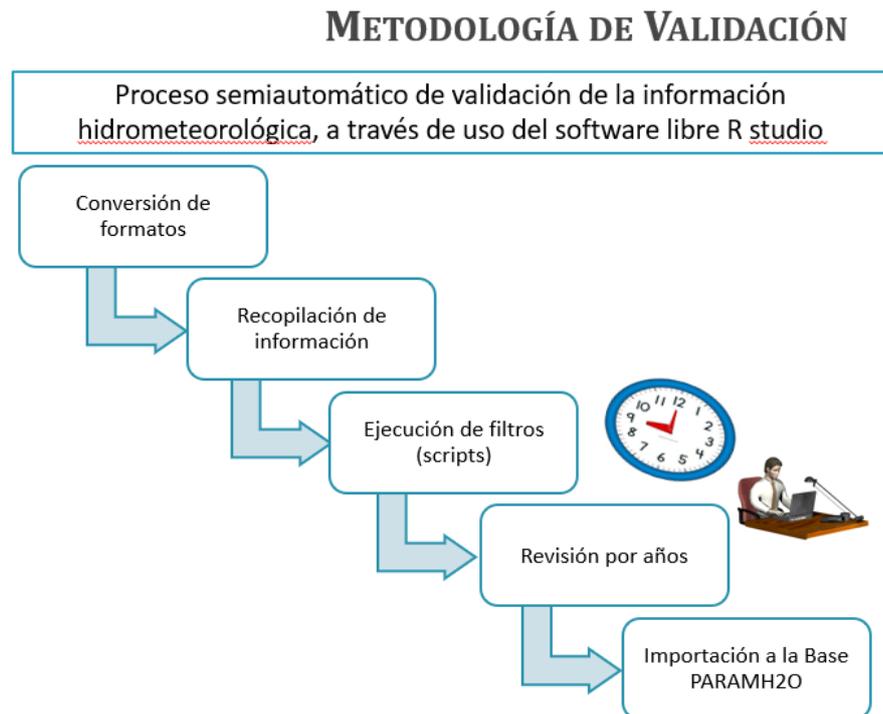


Figura 5. Metodología de la validación de resultado
Fuente: Imagen de GAR (2018)

En la Figura 6 se presenta uno de los reportes de la variable precipitación que fue generado para la estación P68 Salve Faccha Alto, este reporte consolida información multianual mensual (figura 6):

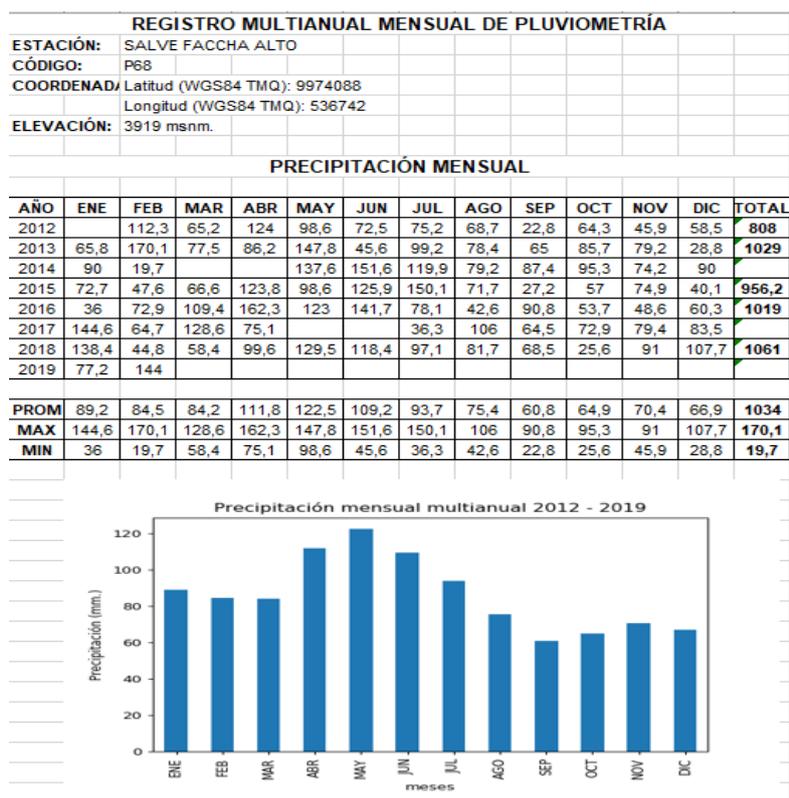


Figura 6 Reportes de precipitación estación Salve Faccha
Fuente: Elaboración propia (2019)

Como se exhibe en la figura 7, dentro de la base de datos PARAMH2O de la EPMAPS, en encuentran los mapas donde están ubicadas todas las estaciones pluviométricas pertenecientes al Sistema Papallacta, mismas que fueron utilizadas para la presente investigación

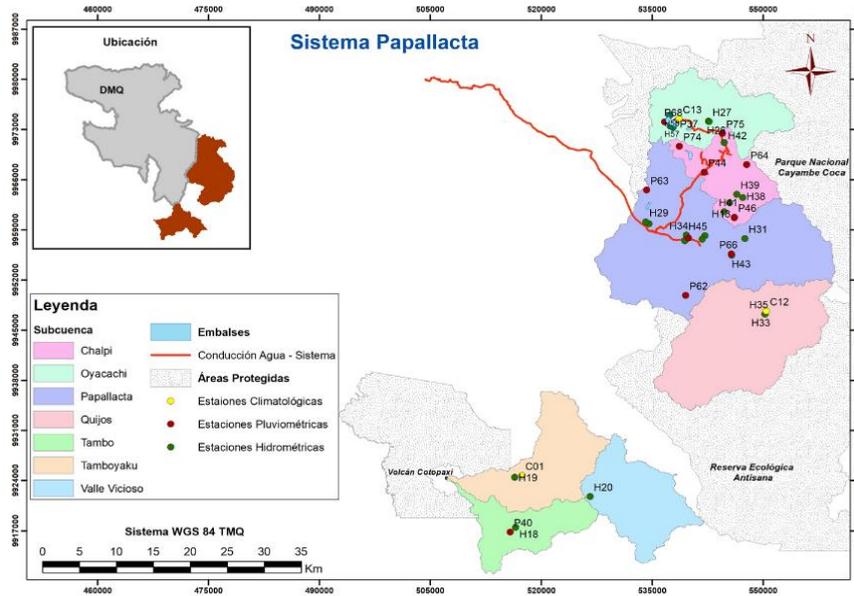


Figura 7 Ubicación de estaciones pluviométricas en el sistema Papallacta
 Fuente: Imagen de PARAMH2O (2018)

2.1.3. Análisis de información hidrometeorológica red EPMAPS

Se construyeron y organizaron las series de datos de precipitación diaria, mensual y multianual mensual, desde el año 2000 ya que es el año donde se instalaron la mayor cantidad de estaciones (figuro 8).

C10LaMicaPr	C11PitaCamr	C12QuijosCa	C13SalveFac	P03Rumihun	P08Rumipan	P09Inaquito
0	24.9	15	1.6	0	0	0
0	19.4	11.7	0.1	1.5	20	13.3
5.1	37.6	12.5	11.8	17	15.6	10.3
1.2	1.4	7.9	0.9	53.9	6.5	1.5
7	3.8	7.5	1	0.8	3.3	7.3
0.5	0	6.5	0	0	0	0
0	0	3.5	0	0	0	0
0.1	21.6	0.5	0	0	0	0
0	0.6	0	0	0	0	0
0	0.1	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.1	0	0	0
0.9	0.2	3.9	3.5	0	0	0
0	21.2	2.7	0.4	0	0	0
0	0	1.8	0	0	0	0.1
0	0	0.3	1.3	0	0	0
0	1.8	0.4	0.2	0.1	0.9	0
9.8	6.8	0.1	0	17.5	6.6	6.3
4.9	13.4	3.3	3.6	16.5	28.9	11.3
8.1	13.8	24.2	8.6	14.7	13.7	13.7
0.4	8.9	1.4	6.3	18.9	22.4	14.8

Figura 8. Datos de series de precipitación diaria en diferentes estaciones meteorológicas de la EPMAPS desde el año 2000 hasta el 2018 (mm)
 Fuente y Elaboración propia (2019)

Con toda la información de las series se ejecutaron diferentes análisis de conglomerados y clusters con diferentes distancias para identificar zonas homogéneas y dendrogramas (figura 9), que indiquen la mejor relación entre estaciones con la estación analizada (Salve Faccha).

Una vez, procesada toda la información se obtuvieron clusters de similitud para ver la relación que existe entre todas las estaciones meteorológicas que tiene la Empresa Pública de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), se realizó una comparación entre todas las estaciones para analizar el comportamiento y relación de la estación P37 correspondiente a la presa Salve Faccha.

Se calcularon los datos de las estaciones que se tienen cerca del embalse La Mica que es la que mayor número de datos históricos tiene con los datos de las estaciones en el embalse Salve Faccha, esto permitirá conocer el comportamiento de la precipitación en tiempo presente.

Los datos fueron procesados en el programa R STUDIO, que es una herramienta estadística para el análisis de datos. Esta herramienta tiene procedimientos de cálculo numérico para estadística, gráficos, álgebra lineal, ecuaciones diferenciales, optimización, etc.

2.1.4. Análisis clúster

Este tipo de análisis consiste en separar varios tipos de variables y relacionarlos en grupos homogéneos, es un análisis discriminante donde se aplican técnicas para clasificar a los individuos desconocidos a priori que permitan obtener clasificaciones.

A continuación, en la figura 8, se observa un dendrograma de análisis donde se divide a las estaciones por niveles, esto para determinar la similitud entre estas y poder organizarlas (figura 9).

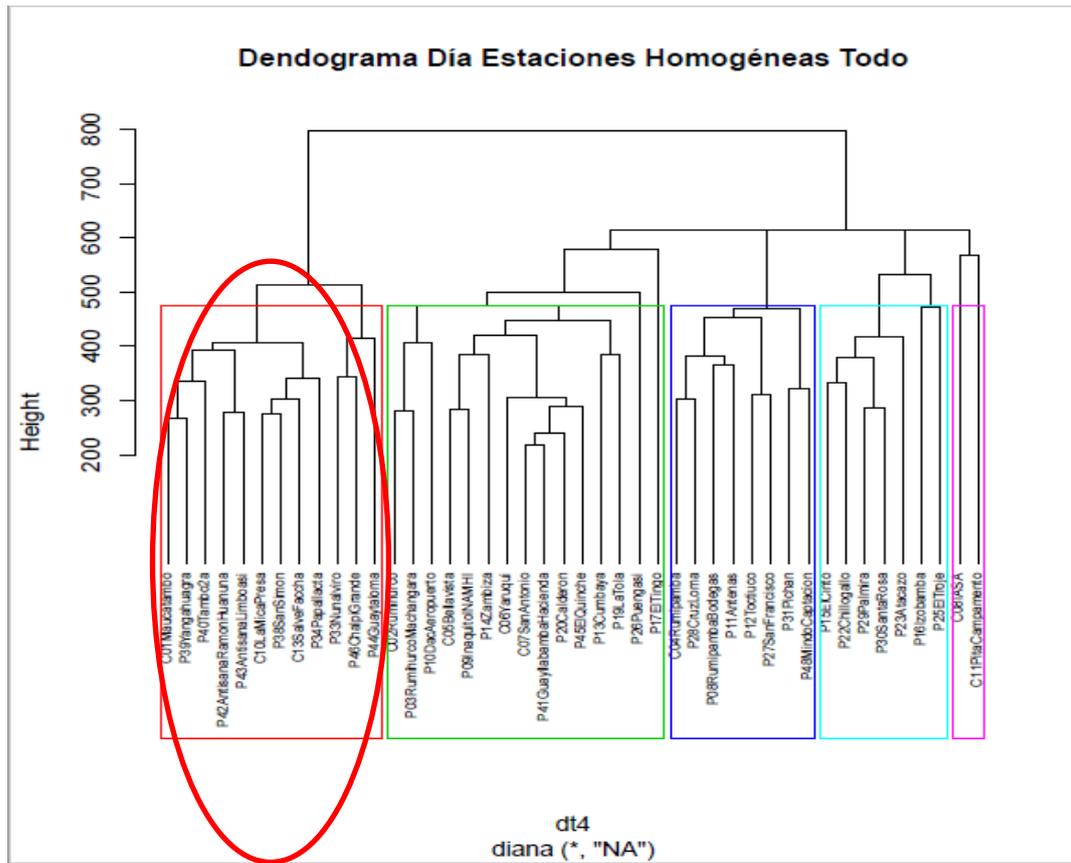


Figura 9. Dendrograma de estaciones pluviométricas, 2019
Fuente y Elaboración propia (2019)

Con la información validada, lo primero que se realizó fue construir series con los datos históricos tanto de precipitación, como de volúmenes del embalse Salve Faccha; adicionalmente se calculó la media mensual de los parámetros para poder realizar comparaciones, esto de todos los años de información: desde el 2007 hasta el 2017 para volúmenes; y desde el año 1963 hasta el año 2018 en cuanto a precipitación.

Se procesó toda la información de todos los años, y se realizó comparaciones entre el volumen del embalse versus la precipitación acumulada mensual.

2.1.5. Cálculo de volumen en el embalse Salve Faccha

El Departamento de Captaciones y Conducciones de la EPMAPS utiliza una ecuación para determinar el volumen útil del embalse Salve Faccha, misma que se obtuvo de un análisis batimétrico (morfología del embalse) en el año 2007 (Recalde, 2007), con el uso de un Perfilador Acústico de Corrientes Doppler. Se ejecutó un levantamiento en

maña, utilizando transectos de manera transversal y longitudinal a lo largo del embalse (Recalde, 2007). De esta manera se obtuvo el volumen en función de nivel (figura 10).

Donde, se obtiene: una curva de volumen acumulado, versus la cota correspondiente; incluyendo solamente las cotas que se encuentran dentro del volumen útil, es decir, entre: 3882.16 a 3890.9 msnm, donde se ajusta la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = \text{msnm } \delta^2 + 675512.83 \delta$$

Donde:

Volumen: Volumen útil

delta: cota de medición – cota mínima

cota mínima = 3882.6 msnm

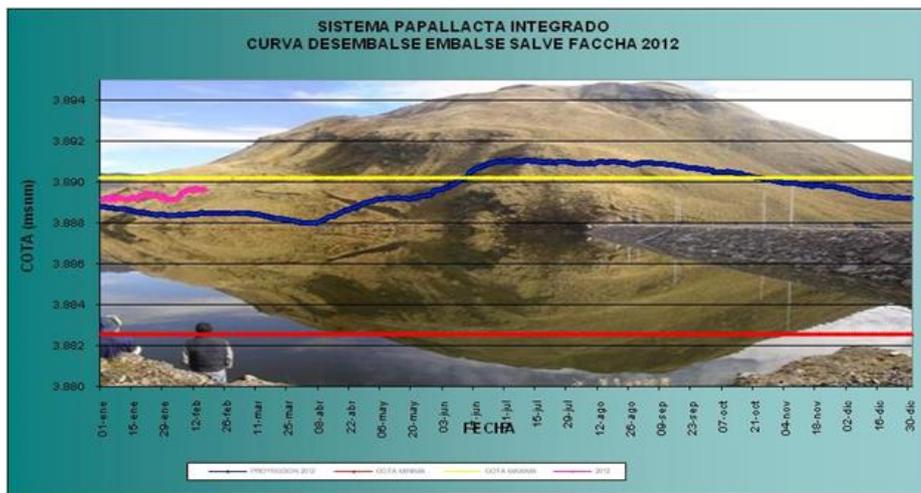


Figura 10. Cotas Embalse Salve Faccha año 2018
Fuente: Imagen de Dpto. Captaciones y Conducciones (2018)

a) Delta volumen en el embalse Salve Faccha

Para obtener el delta volumen del embalse en tiempo presente, se calculó el promedio de todos los días de todos los meses, posteriormente, se sumó el volumen del embalse más el volumen extraído que es el utilizado para la operación del embalse, obteniendo así el volumen total.

Con estos datos se puede calcular el delta volumen que es la diferencia entre el volumen total del día actual menos el volumen total del día anterior (figura 11).

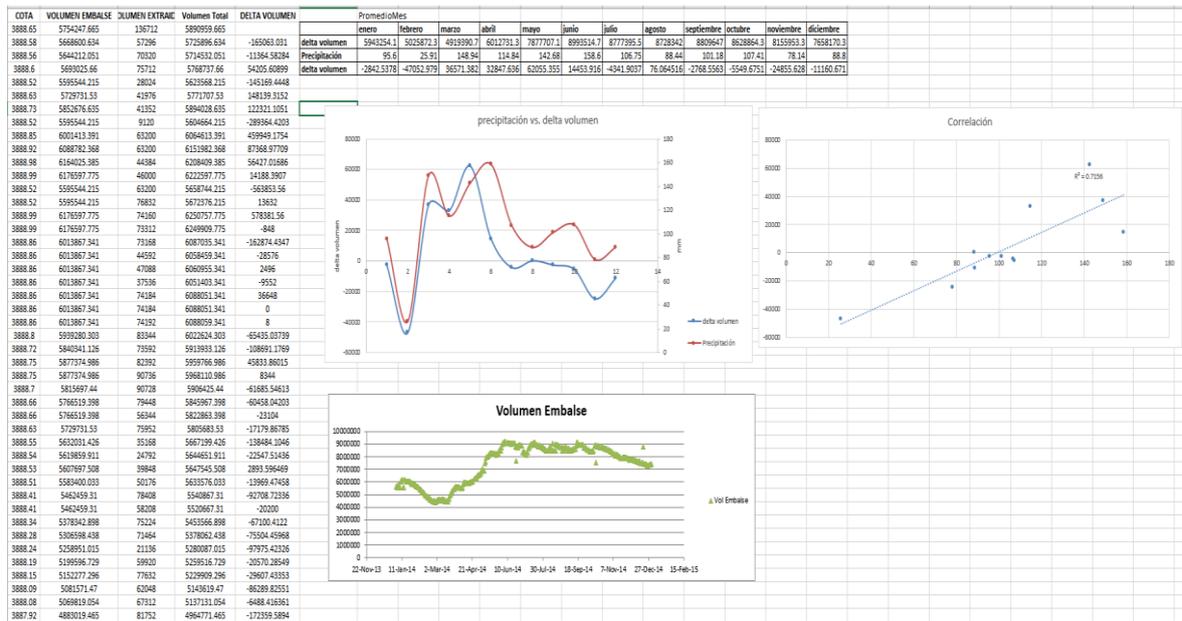


Figura 11. Cálculo delta volumen del embalse Salve Faccha Fuente y Elaboración propia (2019)

2.3. Tiempo futuro

Las proyecciones climáticas, permiten estimar las tendencias de cambio y el impacto que tienen variables como la precipitación y su incidencia en el volumen en épocas de mayor y menor precipitación en el embalse Salve Faccha.

Para realizar estos análisis se tomaron los datos proyectados de precipitación utilizados en la Tercera Comunicación Nacional (MAE 2017), en el escenario RCP 4.5, que es el más optimista de acuerdo con la TCN, correspondientes a los años: 2020, 2025, 2030, 2035 y 2040.

Para esto se construyó una serie de datos de precipitación en tiempo futuro y se obtuvo una tendencia que permita determinar el comportamiento de la lluvia a corto y largo plazo, se utilizó datos de todas las estaciones meteorológicas en la zona de Salve Faccha para poder rellenar los datos en donde faltaba información (tabla 6).

Para calcular estos pronósticos de tiempo futuro de la precipitación, se utilizó el comportamiento mensual, por ejemplo, la precipitación de todos los meses de enero, febrero...diciembre desde el 2003 hasta el 2018, calculando la línea de tendencia la cuál no indica la precipitación para los años futuros.

Tabla 6
**Registros de precipitación tiempo presente mm/mes (estaciones EPMAPS) y datos
 proyectados 2020-2040 (TCN, en el escenario 4.5)**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2004	21.6	43.7	43.9	119.5	150.2	122.6	133.4	82.3	40.1	47.1	57.4	56.4	918.3
2005	40.3	118.1	110.4	200.6	83.5	152.4	45.5	20.5	70.1	51.9	41.2	104.6	1039
2006	67.4	51.8	89.5	84.2	76.3	156.0	43.0	58.6	85.9	75.8	55.7	48.1	892.5
2007	18.5	22.2	73.0	89.0	46.5	265.4	31.4	74.9	41.4	91.0	105.1	85.9	944.3
2008	39.0	70.0	123.8	124.6	151.4	178.1	139.7	144.7	117.4	172.8	87.6	78.5	1428
2009	130.8	102.2	96.5	110.4	115.4	134.2	143.5	100.1	15.6	36.1	37.9	61.0	1084
2010	69.6	110.6	86.9	102.8	115.2	95.8	125.8	107.5	110.4	73.7	175.7	105.4	1279
2011	53.5	121.7	107.8	188.8	143.0	105.6	208.6	108.5	91.3	64.2	88.0	83.7	1365
2012	69.0	115.9	92.6	164.6	141.6	109.7	98.3	73.0	32.1	58.7	54.3	58.1	1068
2013	70.2	180.7	90.5	101.9	182.8	52.1	108.5	81.4	68.4	95.9	98.8	38.7	1170
2014	101.2	32.1	148.9	114.8	147.8	165.6	93.6	97.7	115.0	119.5	82.1	87.6	1306
2015	92.9	70.1	102.5	103.2	99.6	154.3	192.2	93.4	41.8	85.4	86.7	54.0	1176
2016	50.0	94.7	122.3	173.1	126.4	153.1	91.1	52.8	114.1	80.6	46.2	79.0	1183
2017	127.3	66.0	138.1	104.1	74.6	102.7	97.9	125.8	68.3	80.3	75.0	81.1	1141
2018	129.0	37.0	52.4	91.7	184.4	141.8	94.1	77.6	63.4	24.3	87.1	58.4	1041
2020	97.0	85.5	117.1	116.6	148.3	113.2	131.8	100.4	81.8	75.8	87.4	66.7	1222
2025	108.5	87.2	127.4	112.0	162.5	98.8	144.1	108.1	87.4	75.0	92.3	63.8	1267
2030	120.0	88.9	137.7	107.4	176.8	84.3	156.4	115.8	93.1	74.3	97.2	60.8	1313
2035	131.6	90.6	148.0	102.9	191.0	69.8	168.6	123.5	98.7	73.5	102.0	57.9	1358
2040	143.1	92.3	158.3	98.3	205.3	55.3	180.9	131.2	104.3	72.8	106.9	54.9	1404

Fuente y elaboración propias (2019)

Capítulo tercero

Análisis de resultados

1. Resultados

Este capítulo se detalla la interpretación y análisis de resultados de la presente investigación realizada en la Cuenca del Quijos, específicamente en la zona del embalse Salve Faccha, donde se estudió la relación que existe entre la precipitación de la zona, el volumen del embalse en tiempo pasado, presente y futuro, para analizar el comportamiento de la lluvia y su incidencia en los volúmenes del embalse.

Como se mencionó anteriormente, se utilizó datos de precipitación ajustada de la TCN y de satélite CHIRPS para el análisis de precipitación en “tiempo pasado”, también se analizó información de precipitación de la Red Hidrometeorológica de la EPMAPS, donde se construyeron series históricas con información diaria, mensual y multianual para posteriormente compararlas con el delta volumen calculado del embalse en “tiempo presente”.

Para el “tiempo futuro”, se realizó tendencias en cuanto a la precipitación y el volumen total del embalse para los años 2020-2025-2030-2035 y 2040, los datos de precipitación utilizados correspondieron a la TCN en el escenario más optimista RCP 4.5 para la zona de la cuenca del Quijos lo que permite tener una idea del comportamiento hídrico del embalse en años futuros de acuerdo con los regímenes de precipitación.²

La relación existente entre la precipitación y el volumen nos indica el comportamiento multianual mensual, sin embargo, no permite generalizar una ecuación directa entre precipitación y volumen.

² Una vez procesados todos los datos y realizados todos los análisis correspondientes se detallan los resultados de la siguiente manera:

- “tiempo pasado” desde el año 1981 hasta el año 2003.
- “tiempo presente”, desde el año 2004 hasta el año 2018.
- “tiempo futuro” los años 2020- 2025-2030-2035 y 2040.

2. Análisis de la precipitación en tiempo pasado, presente y futuro

a) Precipitación en tiempo pasado.

Se utilizó una serie de datos de precipitación desde el año 1981 hasta el año 2003. Posteriormente, se tomó datos de precipitación de la TCN ajustados con los datos de CHIRPS, obteniendo una serie artificial (Comunicación personal, Armentta, 2019).

La siguiente tabla exhibe, los datos de precipitación ajustados de CHIRPS donde se encuentran los valores de precipitación utilizados para este periodo (tabla 7).

Tabla 7
Registros de precipitación ajustada desde 1981-2003

PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	32.1	72.9	87.3	124.9	95.8	36.8	79.2	71.7	35.7	87.9	138.3	48.2
1982	68.8	118.4	83.2	105.8	103.6	26.5	52.8	32.3	62.8	100.0	91.6	86.0
1983	42.5	86.0	100.8	118.1	105.6	40.8	67.4	53.2	56.7	82.6	88.4	70.8
1984	52.5	113.4	80.0	122.0	97.7	96.4	74.6	70.8	121.1	88.0	162.0	47.1
1985	59.6	62.4	57.0	92.6	97.8	46.8	34.8	87.7	94.6	59.0	51.6	65.5
1986	50.4	94.5	93.1	74.8	114.7	31.9	34.2	37.2	45.5	90.3	97.0	37.1
1987	34.8	86.6	89.7	95.9	110.2	26.5	60.0	68.3	59.9	94.9	81.4	39.7
1988	47.1	107.2	39.6	102.6	89.5	81.3	57.2	66.8	121.4	117.8	157.4	51.4
1989	58.5	97.0	116.1	70.8	60.6	104.3	70.9	62.1	102.4	121.6	80.7	35.8
1990	30.8	98.6	55.0	89.6	134.6	53.3	75.3	35.6	39.7	138.0	61.6	47.0
1991	29.5	98.4	93.8	73.5	92.6	67.9	53.7	54.6	56.5	68.6	90.4	43.2
1992	24.3	68.2	52.7	68.0	99.9	41.0	50.7	59.3	85.1	60.3	82.0	49.3
1993	52.6	155.3	102.2	110.1	132.8	17.2	50.0	40.6	49.8	56.9	105.2	51.4
1994	42.6	110.8	88.9	123.5	135.6	33.4	38.5	41.5	67.9	62.2	114.9	54.6
1995	16.3	62.6	77.7	75.7	43.5	60.3	74.7	123.8	28.2	78.6	125.6	49.7
1996	54.8	165.7	122.3	112.2	165.0	89.9	64.0	72.5	80.1	90.4	61.2	46.8
1997	65.9	86.3	95.9	88.2	59.1	87.3	41.6	31.4	75.8	73.8	160.1	43.6
1998	23.6	97.2	68.6	81.3	170.2	47.1	82.2	87.6	52.2	123.0	113.4	36.4
1999	57.8	277.5	86.1	101.6	105.9	124.0	46.2	60.4	182.2	65.3	116.7	102.3
2000	64.3	153.7	89.0	95.8	127.0	111.0	80.3	59.2	151.4	34.5	61.5	30.8
2001	22.9	102.2	51.7	61.3	69.7	49.2	105.1	37.3	79.2	41.7	90.7	46.6
2002	33.1	82.2	58.2	102.2	80.1	99.3	56.4	64.3	56.9	86.9	117.8	60.8
2003	21.0	81.9	71.5	79.4	44.1	82.4	84.7	27.1	74.2	86.3	73.8	60.5
PROMEDIO	42.9	107.8	80.9	94.3	101.5	63.2	62.4	58.5	77.4	83.0	101.0	52.4

Fuente y elaboración propias (2019)

- a) **Precipitación en tiempo presente.** Se utilizó la serie de datos desde los años 2004-2018, y se trabajó con información de precipitación del Dpto. de Gestión de Recursos Hídricos de la EPMAPS, en este periodo se calculó

también el delta volumen del embalse Salve Faccha para compararlo con la lluvia mensual y multianual (tabla 8).

Tabla 8
Precipitación mensual tiempo presente

Registro multianual mensual de pluviometría epmaps													
ESTACIÓN:	SALVE FACCHA												
CÓDIGO:	C13												
COORDENADAS:	Latitud (WGS84 TMQ): 9974118												
	Longitud (WGS84 TMQ): 538298												
	3880 m s. n.												
ELEVACIÓN:	m.												
PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2004	21,6	43,7	43,9	119,5	150,2	122,6	133,4	82,3	40,1	47,1	57,4	56,4	918,3
2005	40,3	118,1	110,4	200,6	83,5	152,4	45,5	20,5	70,1	51,9	41,2	104,6	1039
2006	67,4	51,8	89,5	84,2	76,3	156,0	43,0	58,6	85,9	75,8	55,7	48,1	892,5
2007	18,5	22,2	73,0	89,0	46,5	265,4	31,4	74,9	41,4	91,0	105,1	85,9	944,3
2008	39,0	70,0	123,8	124,6	151,4	178,1	139,7	144,7	117,4	172,8	87,6	78,5	1428
2009	130,8	102,2	96,5	110,4	115,4	134,2	143,5	100,1	15,6	36,1	37,9	61,0	1084
2010	69,6	110,6	86,9	102,8	115,2	95,8	125,8	107,5	110,4	73,7	175,7	105,4	1279
2011	53,5	121,7	107,8	188,8	143,0	105,6	208,6	108,5	91,3	64,2	88,0	83,7	1365
2012	69,0	115,9	92,6	164,6	141,6	109,7	98,3	73,0	32,1	58,7	54,3	58,1	1068
2013	70,2	180,7	90,5	101,9	182,8	52,1	108,5	81,4	68,4	95,9	98,8	38,7	1170
2014	101,2	32,1	148,9	114,8	147,8	165,6	93,6	97,7	115,0	119,5	82,1	87,6	1306
2015	92,9	70,1	102,5	103,2	99,6	154,3	192,2	93,4	41,8	85,4	86,7	54,0	1176
2016	50,0	94,7	122,3	173,1	126,4	153,1	91,1	52,8	114,1	80,6	46,2	79,0	1183
2017	127,3	66,0	138,1	104,1	74,6	102,7	97,9	125,8	68,3	80,3	75,0	81,1	1141
2018	129,0	37,0	52,4	91,7	184,4	141,8	94,1	77,6	63,4	24,3	87,1	58,4	1041

MAX	68.8	277.5	122.3	124.9	170.2	124.0	105.1	123.8	182.2	138.0	162.0	102.3
MIN	16.3	62.4	39.6	61.3	43.5	17.2	34.2	27.1	28.2	34.5	51.6	30.8

Fuente y elaboración propias (2019)

Precipitación en tiempo futuro. – Se utilizó las series de datos de precipitación de la Tercera Comunicación Nacional (TCN), en el escenario RCP. 4.5 en los años correspondientes a: 2020-2025-2030-2035-2040.

También, se incluyen datos de morfometría de cada uno de los aportantes para tener una mejor comprensión de la topografía de la zona.

2.2.1. Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha

A continuación, se detallan los valores correspondientes al área, longitud, pendiente y número de curva de cada uno de los aportantes al embalse Salve Faccha; este tipo de datos nos permiten conocer la tipología del terreno (tabla 9-10).

Los datos que se exhiben en las siguientes tablas corresponden a una caracterización sobre la geología de los aportantes al embalse Salve Faccha.

Tabla 9
Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha

Nombre	área Km	longitud Km	longitud metros	pendiente	Pendiente de la Cuenca %	Número de curva (CN)	Cotas msnm	pendiente en metros
aportante 1	3.28	1.91	1910	0.3931	17,78	74	340	0.18
aportante 2	4.4	3.24	3240	0.075	15,61	74	506	0.16
aportante 3	2.36	1.18	1180	0.0033	33,54	74	397	0.34
aportante 4	4.4	1.79	1790	0.0033	23,72	74	424	0.24
aportante 5	2.21	1.26	1260	0.003	35,79	74	452	0.36
aportante 6	2.83	1.82	1820	0.01	24,79	74	451	0.25

Fuente y elaboración: EPMAPS (2019)

Tabla 10
Datos morfométricos de los aportantes al embalse Salve Faccha.

Rango Pendiente %	Tipo de pendiente	Microcuencas 1-2-3-4		Microcuenca 5		Área (km ²)	% Rango Pendiente
		Área (km ²)	% Rango Pendiente	Área (km ²)	% Rango Pendiente		
0-14	Suaves, Planas o Semiplanas	6,36	52,87%	1,27	57,50%	0,9	31,80%
14.01-29	Moderadas	4,73	39,31%	0,81	36,70%	1,4	49,50%
29.01-44	Altas	0,9	7,50%	0,12	5,40%	0,5	17,70%
> 45	Muy Altas	0,04	0,33%	0,006	0,30%	0,03	1,00%

Fuente y Elaboración: EPMAPS (2019)

2.3. Análisis mensual de series de precipitación

2.3.1. Tiempo pasado con datos ajustados de CHIRPS

Se utilizó información de precipitación ajustada de la TCN con datos observados del satélite CHIRPS, desde el año 1981 hasta el año 2003, se trabajó con datos diarios y se calculó la sumatoria para cada mes, se realizó gráficas de precipitación de todos los meses. Adicionalmente, se hizo un análisis multianual con el promedio de todos los años.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada mes de análisis, y también los datos mensuales y multianuales.

En la figura 12 se observa que, los años donde existe mayor precipitación durante el tiempo de análisis están entre los años 1995 y 2000 con valores de precipitación superiores a los 100 mm; los años 1980 y 1990 reportaron precipitaciones con valores hasta los 80mm.

Es importante recalcar que, Ecuador tuvo varios años con fenómenos del niño que fueron 1997-1998, con precipitaciones de hasta 4000mm en la costa del país modificando el comportamiento de la lluvia (figura 12), pero estos eventos no fueron reflejados en las máximas precipitaciones ocurridas en la cuenca.

Se resalta el comportamiento unimodal que tiene la precipitación durante el análisis, con tendencias crecientes durante los meses de: febrero, junio, julio y septiembre, mientras que las tendencias decrecientes correspondieron a los meses de: enero, marzo, abril, mayo, agosto, octubre, noviembre y diciembre, lo que evidencia también la estacionalidad en “tiempo pasado”.



Figura 12. Precipitación mensual en “tiempo pasado” 1981-2003 en el embalse Salve Faccha
Fuente y Elaboración propia (2019)

2.3.2. Precipitación mensual multianual en tiempo pasado con datos de CHIRPS

Dentro del análisis de precipitación correspondiente al periodo 1981-2003, se reporta que los meses de febrero, mayo y noviembre son los que registraron mayor precipitación con valores máximos de 277.5, 170.2 y 323.9 mm.

Adicionalmente, se reportan los meses de menor precipitación que correspondieron a enero y diciembre con valores máximos de 68,8 y 102, 3 mm respectivamente (figura 13).

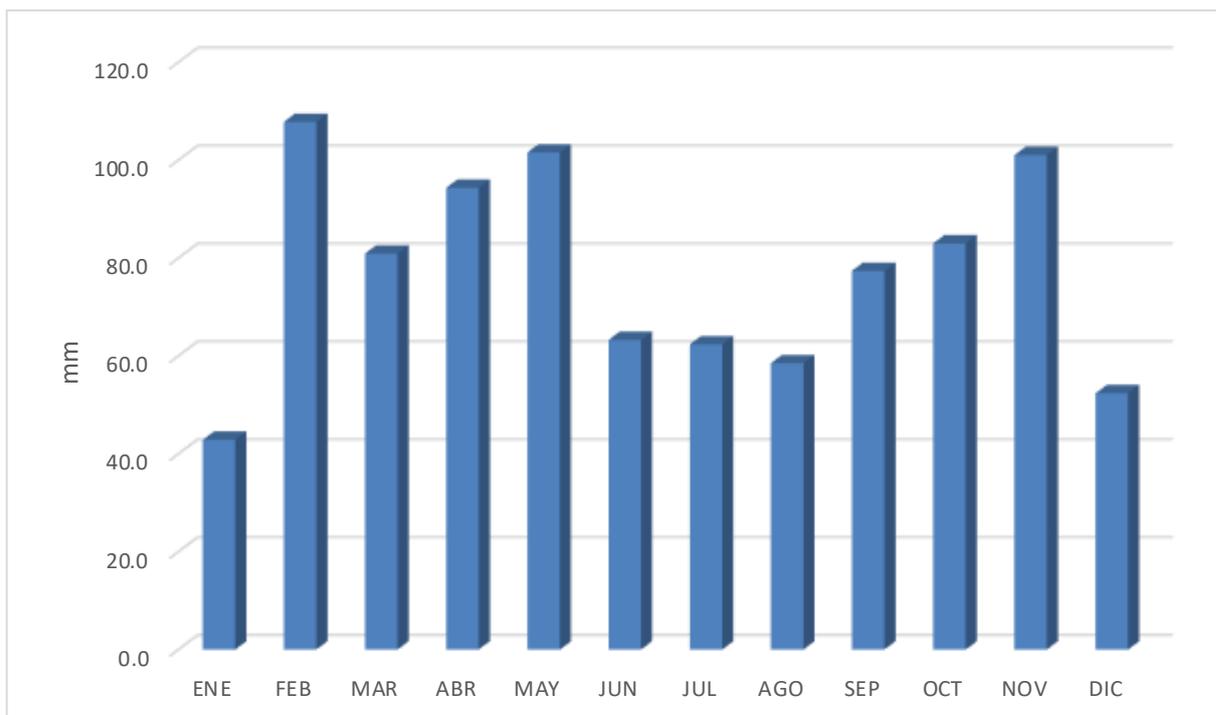


Figura 13. Análisis de precipitación mensual 1981-2003
Elaboración propia (2019)

Es importante recalcar que, el comportamiento de la precipitación durante el “tiempo pasado”, corresponde a información modelada por la TCN con datos observados por el satélite CHIRPS, lo que no garantiza que los resultados puedan ser exactos para la zona de estudio, sin embargo, los resultados obtenidos son una referencia y pueden ser comparados con los datos de los otros periodos analizados.

2.4. Tiempo presente

Para el análisis del tiempo presente se utilizaron los datos de precipitación de la EPMAPS, de los años 2004 hasta el 2018, aquí se analizó la información de las estaciones hidrometeorológicas (C13 y P64) que operan en la empresa correspondientes a la zona de estudio donde se ubica el embalse Salve Faccha, se realizó una comparación mensual de todo el tiempo de análisis y adicionalmente una multianual, con la finalidad de poder analizar los meses y años de mayor y menor presencia de lluvia en la zona.

Adicionalmente, se realizó el análisis de los datos correspondientes al volumen del embalse Salve Faccha de los años 2007 hasta el 2017, estos datos fueron proporcionados por el Dpto. De Captaciones y Conducciones de la EPMAPS y lo que se realizó fue una comparación de la precipitación y el volumen total de forma mensual, para así obtener una tendencia en el comportamiento del volumen durante todo el tiempo analizado, así como también, analizar los posibles fenómenos ocurridos durante las diferentes estacionalidades en el páramo (fenómeno del niño y la niña).

2.4.1. Análisis de precipitación mensual

El análisis de “tiempo presente”, registrados por las estaciones hidrometeorológicas de la EPMAPS, donde se observa que las lluvias más intensas se presentan con valores desde los 100 hasta los 265 mm en casi todos los años. Las tendencias para este periodo se muestran crecientes en precipitación en los meses de: enero, febrero, marzo, abril, mayo, julio, agosto y septiembre; mientras que las tendencias decrecientes de precipitación están en los meses de: junio, octubre, noviembre y diciembre, siendo un indicativo de la estacionalidad de la zona con un comportamiento bimodal (figura 14).



Figura 14. Análisis de precipitación mensual “tiempo presente” 2004-2018 en el embalse Salve Faccha
Elaboración propia (2019)

2.4.2. Precipitación mensual multianual

Al realizar el análisis de precipitación mensual multianual correspondiente al período 2004- 2018, se destacó el comportamiento unimodal durante los años de análisis, también se recalca que los meses de mayor precipitación fueron abril y junio con valores máximos de 206,6 y 265,4 mm y valores mínimos de 84,24 y 52,15 mm respectivamente.

Los meses que reportaron menor precipitación fueron septiembre y diciembre con valores máximos 117,4 y 105,4 mm y valores mínimos de 15,6 38,72 mm en todo el tiempo de análisis (figura 15).

En este periodo de análisis se observa un comportamiento acorde con las condiciones climáticas del páramo, donde los meses de mayor y menor precipitación corresponden a la estacionalidad que se registra en la zona de la microcuenca de estudio, el registro de datos en tiempo real y con estaciones en las cercanías del embalse es lo que permite obtener aproximaciones reales del comportamiento de la lluvia.

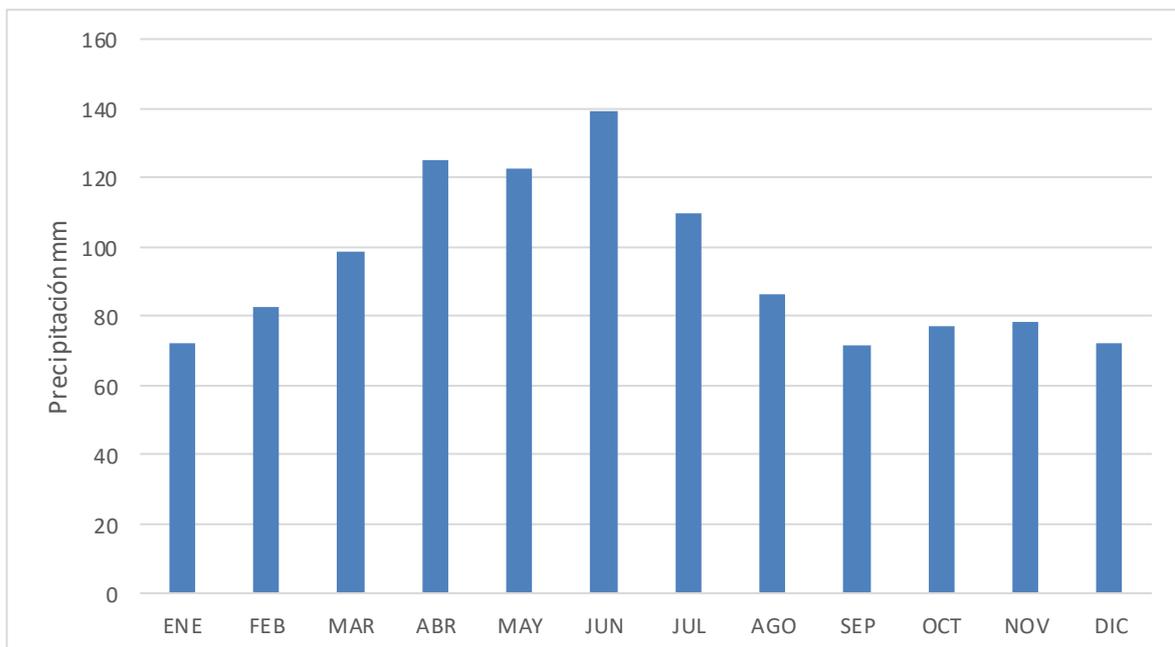


Figura 15. Análisis de la precipitación mensual multianual 2004-2018
Elaboración propia (2019)

2.4.3. Análisis de precipitación y volumen en el embalse Salve Faccha (2007- 2017)

Como se menciona en el segundo capítulo de la presente investigación se utilizó el delta volumen del embalse, que es el acumulado de las variaciones del volumen entre días por cada mes; el cual es comparado con las precipitaciones correspondientes a este periodo.

El delta volumen tiene mayor variación cuando existe mayor precipitación, esto quiere decir que, después del tiempo de respuesta hídrico el delta volumen aumenta y viceversa, es decir mientras menos precipitación se tenga el delta volumen disminuye lo que es importante en la operación del embalse.

En la figura 16 se observa que, la relación que existe entre el delta volumen del embalse y la precipitación es directa ya que durante todos los años las variaciones mayores de volumen se registran en los meses de mayor precipitación y las menores variaciones en los de menor precipitación.

Es importante recalcar que en el páramo existe una respuesta hídrica lo que hace que el tiempo de recuperación en el embalse sea más tardío y exista un pequeño desfaz entre la curva de volumen y la de precipitación (figura 16).

Se realizó una gráfica de la precipitación y el volumen mensual en el embalse para analizar de manera cualitativa la evolución de estas dos variables en el cuerpo de agua. El tiempo utilizado para este análisis fue desde el año 2007 hasta el año 2017 que es donde se tiene datos del volumen observado.

Durante el año 2007, el mes de mayor precipitación corresponde al mes de junio (265.4 mm), la respuesta del embalse se da días después donde se registran los valores más altos de volumen en el mes de julio, las variaciones de volumen tienden a disminuir durante los siguientes meses que es donde se registran menor cantidad de lluvia.

El año 2008, considerado unos de los años de mayor lluvia en el callejón interandino (CIFEN, 2019), los registros de mayor precipitación se dan en los meses de julio y octubre con 139,8 y 172.8 mm y las variaciones más altas de volumen son coincidentes con estos meses, en general todo el año presenta precipitaciones altas lo que hace que no exista un desfase en el volumen.

En el año 2009, el pico máximo de volumen está en el mes de junio y julio mismo que coincide con los meses de más altas precipitaciones (134.2 y 143.72 mm),

manteniendo una relación directa durante todo el año, donde las variaciones están de acuerdo con la estacionalidad de la zona.

Para el año 2010 y 2011 según la Organización Meteorológica Mundial fueron los años muy lluviosos en zonas de altura, los registros en la zona de Salve Faccha en cuanto a precipitación van hasta los 208,56 mm registrando los meses de junio, julio y agosto los de mayor precipitación, el volumen también presenta picos máximos durante estos meses.

El 2012 y 2013, se presentan como años atípicos comparados con los años de estudio ya que en todos los meses las intensidades de lluvia son bajas con valores de hasta 114 mm las variaciones de volumen son relativamente bajas y continúan manteniendo una relación con la mayor y menor precipitación en la zona, es importante recalcar que en estos años se reportó el fenómeno de la niña que es característico por fuertes sequías.

Para el año 2014 y 2015, se registraron fuertes lluvias durante todo casi todos los meses con valores de hasta 171,17 mm, los meses de mayor precipitación siguen coincidiendo con junio y julio; en estos años se registraron fenómenos del niño con fuertes intensidades, se observa que el volumen se mantiene constante durante casi todos los meses.

Los años 2016 y 2017, los meses de mayor precipitación fueron desde abril, mayo, junio con valores de hasta de 162.3 mm, las variaciones de volumen se registran en los mismos meses. En abril del 2016 se reportó una caída en la cantidad de volumen existente con valores menores a los 4000000 m³, esto puede atribuirse a la operación del embalse misma que está sujeta a la demanda de agua.

Es importante tomar en cuenta los índices de ENOS que se tratan de los cambios en los patrones climáticos con un aumento de las temperaturas en los que se consideran los fenómenos del Niño y la Niña, mismos que pueden determinar posibles alteraciones en la oferta hídrica ya que causan anomalías en diferentes variables como son: la precipitación, rendimientos hídricos e interacciones entre el suelo y la vegetación.

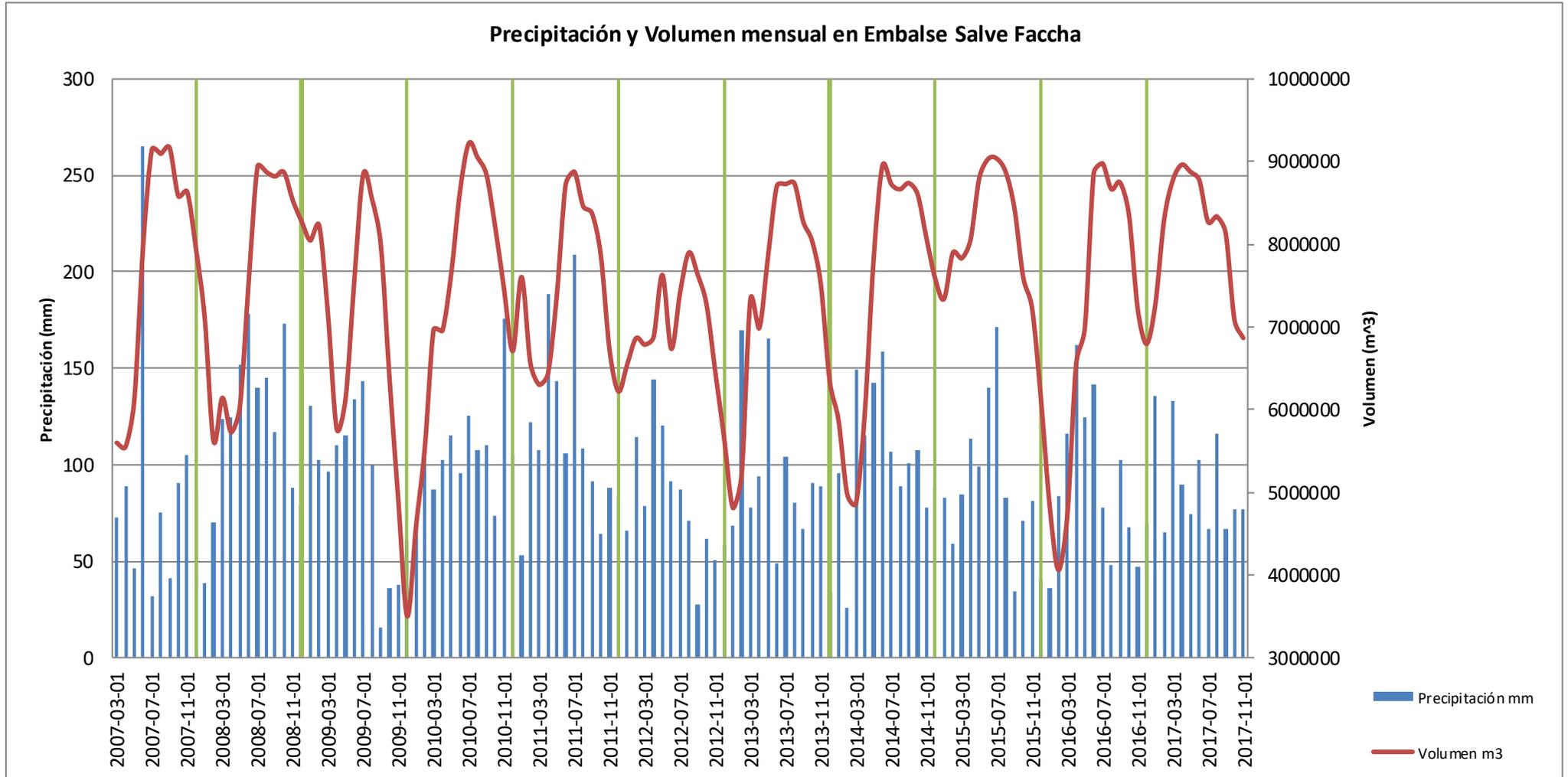


Figura 16. Análisis de precipitación y delta volumen 2007 hasta 2017 en el embalse Salve Faccha
Elaboración propia (2019)

2.5. Tiempo futuro

De acuerdo, al análisis de “tiempo futuro” (2020-2025-2030-2035-2040), se puede observar que según las tendencias obtenidas los meses correspondientes a: enero, febrero, marzo, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, tienden a tener un ascenso, mientras que los meses de: abril, junio, octubre y diciembre tienen tendencias decrecientes.

Este análisis permite inferir en el comportamiento de la lluvia durante un futuro a corto y largo plazo, donde se puede apreciar que existirían momentos donde las luvias sean más intensas o frecuentes con valores sobre los 90mm/mes en casi todos los meses de los años proyectados hasta los 205,3 mm en el año 2040; los meses tienden a variar en el comportamiento de la precipitación.

Después del análisis realizado se reportan que, en las estimaciones obtenidas para años futuros, la temporada de mayor precipitación la tendencia es al aumento de la cantidad de lluvia, mientras que para la temporada de menor precipitación la lluvia disminuye, siendo esto un comportamiento polarizado como se lo describe también en Choy et al, 2008 (figura 17).

El detalle de las proyecciones se encuentra en el ANEXO 4, “tiempo futuro” de la presente investigación.

Tabla 11
Tendencias obtenidas para calcular los valores proyectados en los años
2020-2025-2030-2035 y 2040

mes	tendencia mm/año
enero	(+)2.94
febrero	(+)0.34
marzo	(+)2.05
abril	(-)0.91
mayo	(+)2.85
junio	(-)2.89
julio	(+)2.45
agosto	(+)1.54
septiembre	(+)1.12
octubre	(-)0.15
noviembre	(+)0.97
diciembre	(-)0.59

Elaboración propia (2019)

2.5.1. Análisis de precipitación mensual multianual estimada

Al realizar el análisis de precipitación mensual multianual correspondiente al período “tiempo futuro”, se corrobora el comportamiento unimodal en la precipitación, también se recalca que los meses de mayor precipitación fueron abril, mayo y junio con valores superiores a los 140 mm y valores mínimos de 69,2 mm respectivamente.

Los meses que reportaron menor precipitación fueron octubre y diciembre con y los de menor precipitación corresponden a: octubre y diciembre (figura 18).

En este periodo de análisis concuerda con el obtenido durante el “tiempo presente”, donde el comportamiento de la lluvia se mantiene unimodal, con variaciones en la cantidad de lluvias tanto en los meses de mayor como en los de menor precipitación (figura 17).

En cuanto a la precipitación mensual multianual proyectada, esta presenta un aumento en las intensidades de la lluvia según los pronósticos obtenidos, la tendencia sigue unimodal con un cambio en los meses de junio donde de esperaríamos un posible decremento en las precipitaciones (figura 17)

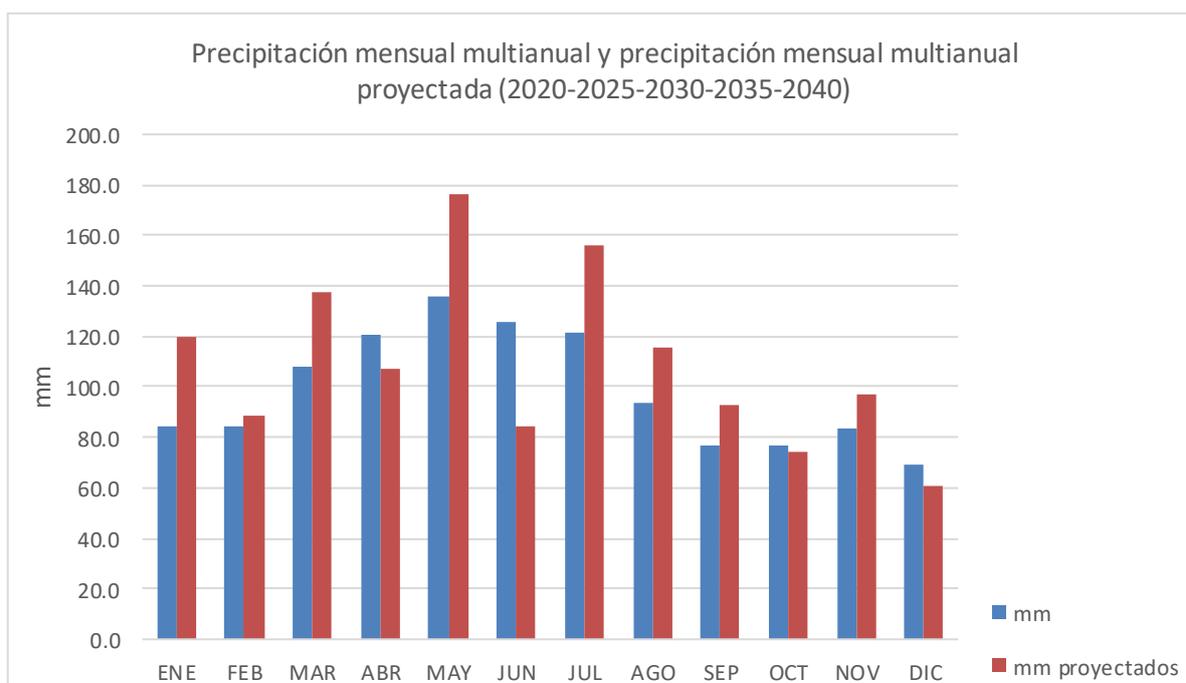


Figura 17. Análisis de la precipitación mensual multianual mm/año 2020-2040
Elaboración propia (2019)

Discusión y conclusiones

Discusión

Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), desde el año 1958 hasta el año 2017, la temperatura de la Tierra ha tenido un aumento de entre 0,4 y 0,8 °C, estos resultados están asociados a diferentes factores como son el incremento de gases de efecto invernadero, la variabilidad en la precipitación y temperatura sobre el clima, el aumento del nivel del mar, las glaciaciones y las actividades antrópicas que ejerce el ser humano sobre los ecosistemas.

Los efectos de las actividades humanas tienen repercusión directa sobre el clima, mismo que ha ido evolucionando a través de los años modificando el comportamiento y tendencias en cuanto a factores como la temperatura, precipitación, entre otros (Palau & Alonso, 2008).

En algunos estudios donde, se realizan análisis regionales sobre el comportamiento de la precipitación en la zona de los Andes, se puede encontrar tendencias sobre el incremento de las precipitaciones en los páramos ecuatorianos, mientras que al sur de Peru se prevé un considerable decremento de las lluvias (Hungtinton, 2006).

Es común que al hablar de calentamiento global se entienda como un incremento de las condiciones de la variabilidad natural, donde el recurso hídrico se ve seriamente afectado debido a factores como cambios en el uso del suelo, sobreexplotación de los recursos hídricos y el deterioro de la disponibilidad de agua superficial (Martelo & Pérez, 2010).

Se han realizado varios análisis con datos climáticos históricos en diferentes zonas en el mundo, donde se desarrollan modelos o simulaciones de escenarios climáticos que permiten determinar las consecuencias de la variabilidad climática sobre los cuerpos de agua en un futuro.

Según el Proyecto GEF/PNUD/MAE, 2011, se ha registrado un aumento del 8% en la cantidad anual de precipitación en todo el callejón interandino, con repercusiones en la estacionalidad, lo que significa mayor incremento de lluvias en los meses más húmedos y precipitaciones menores en los meses menos húmedos.

En la presente investigación se hace un análisis de la precipitación en tres periodos: pasado, presente y futuro, donde se utilizó las variables de precipitación y volumen del embalse Salve Faccha, con la finalidad de conocer el comportamiento de la lluvia y su incidencia futura en la capacidad de disponibilidad de agua por parte del embalse.

En el “tiempo pasado” (1981-2003), se utilizó datos de la Tercera Comunicación Nacional (TCN) que se ajustan con los datos observados de CHIRPS (Rainfall Estimates From Rain Gauge And Satellite Observations), en este análisis se resalta que los meses de mayor precipitación corresponden a febrero, mayo y noviembre con valores mayores a 100 mm y los meses de menor precipitación correspondieron a diciembre, enero, junio, julio y diciembre con precipitaciones de hasta 60 mm destacando que la precipitación presentaba en ese tiempo un comportamiento bimodal.

Al contrario, los datos registrados *in situ* en “tiempo presente” (2004-2018), correspondientes a los de la red Hidrometeorológica de la EPMAPS, indica que los meses de mayor precipitación correspondieron a abril, mayo y junio con precipitaciones mayores a los 120 mm y los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre fueron los de menor precipitación con registros de hasta 80 mm, señalando un comportamiento unimodal en toda la zona de estudio.

Como se menciona anteriormente, el comportamiento de la precipitación en el *tiempo pasado* y *tiempo presente* no es coincidente, a esto se le puede atribuir a que los datos modelados para simular escenarios (TCN) utilizando datos ajustados de CHIRPS (con mapas de distancias de hasta 1 Km), son en muchos casos contradictorios, debido a que los datos que se utilizan corresponden a lugares más alejados de las zonas de estudio y más aún si estas son pequeñas microcuencas como es el caso de Salve Faccha y en general para las zonas de los Andes donde, se han realizado varios estudios de predicciones climáticas, esto ha sido corroborado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático en el año 2010.

Sin embargo, según el IPCC, en su último informe indica que de existir un aumento de 0,5 ° más sobre los 1,5 °C actuales atribuidos directamente a los fenómenos climáticos y meteorológicos, se alterarían los regímenes e intensidad de lluvias lo que podría ocasionar un cambio en los meses de mayor y menor precipitación en las zonas altoandinas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en cuanto a las comparaciones de precipitación y volumen del embalse Salve Faccha, durante el tiempo presente, se

reportaron que en la mayoría de los meses de mayor precipitación (abril, mayo y junio) la variación de volumen es menor, mientras que en los meses de menor precipitación (septiembre, octubre, noviembre y diciembre) la variación es mayor; sin embargo este resultado depende también de la operación del embalse, misma que puede variar según la demanda de consumo de agua potable en la ciudad de Quito (Comunicación verbal M. Jiménez, 2019).

El volumen del embalse se encuentra relacionado de forma directa con la precipitación en la zona, según el análisis realizado existen meses donde existe mayor volumen en el cuerpo de agua los cuales corresponden con los meses de abril, mayo y junio que es donde se registra la temporada de mayor precipitación y las épocas de menor precipitación son coincidentes con menor volumen (septiembre octubre, noviembre y diciembre).

También dentro del análisis se resaltó que existieron periodos atípicos en cuanto a la intensidad de lluvias; siendo los años 2012 y 2013 donde existió un decremento en las precipitaciones correspondientes al fenómeno de la niña y los años 2015 y 2016 un incremento considerable en las lluvias atribuyéndosele al fenómeno del niño; este tipo de fenómenos y las variaciones en el comportamiento del clima pueden aumentar o disminuir los regímenes de lluvia en determinados meses en la zona, lo que podría ocasionar un cambio en la operación del embalse.

En cuanto al análisis de “tiempo futuro”, donde se estimaron las variables de precipitación para un futuro a corto y largo plazo para lo cual se eligió los años 2020-2025-2030-2035 y 2040.

Según los resultados estimados de precipitación se destacó que el comportamiento se mantiene unimodal al igual que en tiempo presente, con diferencias en los picos máximos de lluvia siendo estas más intensas en las épocas de mayor precipitación.

Es importante considerar que existen otros factores como la escorrentía, percolación e infiltración, así como la evaporación en el embalse que también contribuyen en la cantidad de caudal de entrada de cada aportante hacia el embalse y por ende en la cantidad de volumen para la operación y captación de agua para abastecer a la ciudad de Quito.

Conclusiones

En el “tiempo pasado”, al utilizar datos ajustados de la TCN, se pudo comprobar que en el análisis la estacionalidad se presenta de forma bimodal, lo que no resulta coincidente con la estacionalidad reportada en tiempo presente, a esto se le atribuye que la información modelada no es muy útil para zonas pequeñas debido a que los datos utilizados para la TCN con CHIRPS presentan información de zonas más amplias lo que limita conocer la precipitación real de la microcuenca de estudio.

Al tener variaciones en la intensidad de lluvia con respecto a los resultados estimados (tiempo futuro), en el páramo podrán existir prolongaciones en los tiempos tanto de menor precipitación como en los de mayor precipitación; estos efectos tendrán incidencia directa sobre la cantidad de volumen en el embalse ya que en épocas de menor precipitación la capacidad de abastecimiento reduciría drásticamente, obligando a buscar otras fuentes de abastecimiento para el Distrito Metropolitano.

En cuanto a la comparación del volumen y la precipitación desde 2007 hasta el 2017, se pudo resaltar que estos tienen una relación directa ya que la cantidad de volumen en el embalse depende de la precipitación en la zona; después de realizado el análisis se puede observar que existen meses en los que hay más intensidad en las lluvias mismos que están asociados a fenómenos como los del niño y a cambios en los regímenes de lluvia en la zona durante la última década.

También es importante recalcar, que existen varias discusiones en cuanto al uso de estimaciones y modelos para determinar escenarios climáticos; en la presente investigación al analizar datos modelados correspondientes a la TCN, se puede observar que los datos utilizados pertenecen a una región más amplia donde la distribución de la lluvia es más variable que la zona del embalse que es más pequeña y tiene otro tipo de comportamiento.

La falta de acceso a datos históricos tanto de operación del embalse como de precipitación dificulta la realización de estudios enfocados al cambio climático en zonas específicas (microcuencas), debido a que no existe información suficiente sobre el área de estudio, para lo cual se utilizan datos extrapolados que permitan obtener escenarios de toda el área.

Lista de referencias

- Baquero, Francis. 2004. *La Vegetación de los Andes del Ecuador: Memoria explicativa de los mapas de vegetación potencial y remanente de los Andes del Ecuador a escala 1:2250.000 y del modelamiento predictivo de especies indicadoras*. Quito: Ecociencia.
- Buytaert, Wouter. 2004. *The properties of the soils of the south Ecuadorian paramo and the impact of land use changes on their hydrology*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, Wouter, Vicente Iñiguez, Rolando Celleri, Bert De Bièvre, Guido Wyseure, y J. Deckers. 2006. "Analysis of the water balance of small paramo catchments in south Ecuador". *Environmental role of wetlands in headwaters*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 63. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24.
- Burkett Virginia, Wilcox Douglas, Stottley Robert, Barrow Wylie, Fagre Dan, Baron Jill, Price Jeff, Nielsen Jeniffer, Allen Craig, Peterson David, Ruggerone Greg y Doyle Thomas. 2005. "Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: Case studies and police implications". *Ecological Complexity* 2 (4), 357-94. doi:10.1016/j.ecocom.2005.04.010
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN). 2019. "El Niño / La Niña en América Latina". *Ciifen*. Accedido 30 de enero. [https://www.ciifen.org/modelos globales Ecuador](https://www.ciifen.org/modelos_globales_Ecuador).
- Cesa. 1983. "Políticas y economías campesinas en ecosistemas de altura: Caso Pilahuín, Zona Interandina, Ecuador". En *Sobrevivencia campesina en ecosistemas de altura*, editado por Cepal y Pnuma, vol. II, 67-150. Santiago de Chile: Cepal / Pnuma.
- Chou Chia, Neelin David, Chen Chao.An, y Yi tu- Jhen. 2008. "Evaluating the 'Rich-Get-Richer' Mechanism in Tropical Precipitation Change under Global Warming". *Journal of Climate* 22 (8),1983-2005 doi.org/10.1175/2008JCLI2471.1.
- Duque David, Acurio Christian, Chimbolema Segundo y Aguirre Ximena. 2016. "Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas

- protegidas del Ecuador”. *Scielo Analytics* 15 (2), 172-177. doi.org/10.21704/rea.v15i2.756.
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). 2019. *Caracterización de las microcuencas del embalse Salve Faccha*. Quito: EPMAPS.
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). 2018. *Volúmenes del embalse Salve Faccha (2007-2018)*. Quito-EPMAPS.
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). 2011. *Planes de manejo ambiental de Salve Faccha. Mogotes y Sucus*. Quito EPMAPS. Quito- EPMAPS.
- Francis, Félix y Bussi, Gianbattista. 2014. “Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos en la cuenca del río Ésera mediante un modelo hidrológico distribuido”. *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua* 1(1), 14-25. doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30004-9.
- Global Environment Facility. 2011. “Programa para las Naciones Unidas, Ministerio del Ambiente”. En *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Hasen y Sawyer, P.C. 2011. “Programa de Saneamiento Ambiental para el Distrito Metropolitano de Quito (PSA)”. EPMAPS. Quito-EPMAPS.
- Huntington, Thomas. 2005. “Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis”. *Journal of Hydrology* 319 (1-4), 83-95. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003.
- Isch, Edgar. 2012. “Agua; el gobierno incumple con la Constitución”. *La Tendencia. Revista de Análisis Político*. 1 (13), 88-91. dl.handle.net/10469/4316.
- Larrea, Oscar y Arias, Néstor. 2002. “Aspectos constructivos especiales y control del llenado del embalse Salve Faccha”. EPMAPS. Quito- EPMAPS.
- Lozano. Patricio, Armas Aracely y Machado Verónica. 2016. “Estrategias para la Conservación del Ecosistema Páramo en Pulingui San Pablo y Chorrea Mirador, Ecuador”. *Scielo Analytics* 7(4), 55-70. doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.114.
- Marcela Quintero, Rubén Darío Estrada, Jairo Burbano, Jeimar Tapasco, Natalia Uribe, Germán Escobar, Emilie Beland, Alonso Moreno, Carla Gavilanes, David Mantilla y Jefferson Valencia. 2013. “Panorama para la distribución de los beneficios de los servicios ambientales hidrológicos de la cuenca del río Quijos, Ecuador”. Ecuador: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) GmbH; Centro Latinoamericano para

- el Desarrollo Rural (RIMISP); Iniciativa del Programa de Reto de CGIAR sobre Agua y Alimentación (CPWF).
- Martelo, María Teresa y Pérez, Mercedes. 2010. “Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la República Bolivariana de Venezuela”. En Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Venezuela: Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. 2017. Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Quito. Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Muñoz, Deysi. 2018. “Determinación de la variación de la escorrentía en la cuenca del río Papallacta y su influencia en la funcionalidad de la cuenca”. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/15290?show=full>.
- Ortiz, Efrén. 2015. “Definición de las reglas de operación hidráulica del embalse La Esperanza”. Tesis de Magister. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital EPN. bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11864.
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. 2019. “Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Resumen para responsables de políticas Resumen técnico. Preguntas frecuentes”. *Library.wmo*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10050.
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Palau, Antonio y Alonso, Miguel. 2009. “Embalses y Cambio Climático”. *Ingeniería del agua* 16(4), 312-324. doi.org/10.4995/ia.2009.2959.
- Pizarro, Roberto, Cabrera Jofre, Morales Carolina, Villanelo Juan. 2011. “Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial

influencia glaciaria en la producción de agua (1963-2006)". *Scielo Analytics* 2(3), 5-19.

Pourrut Pierre. 1995. "El agua en el Ecuador; clima, precipitaciones, escorrentía". Quito: Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI), Ministerios de Agricultura y Ganadería (MAG).

Caparros Gass, 2006. " El informe Stern sobre la economía del Cambio Climático". *Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*. 6(1), 124-125. hdl.handle.net/10261/10276.

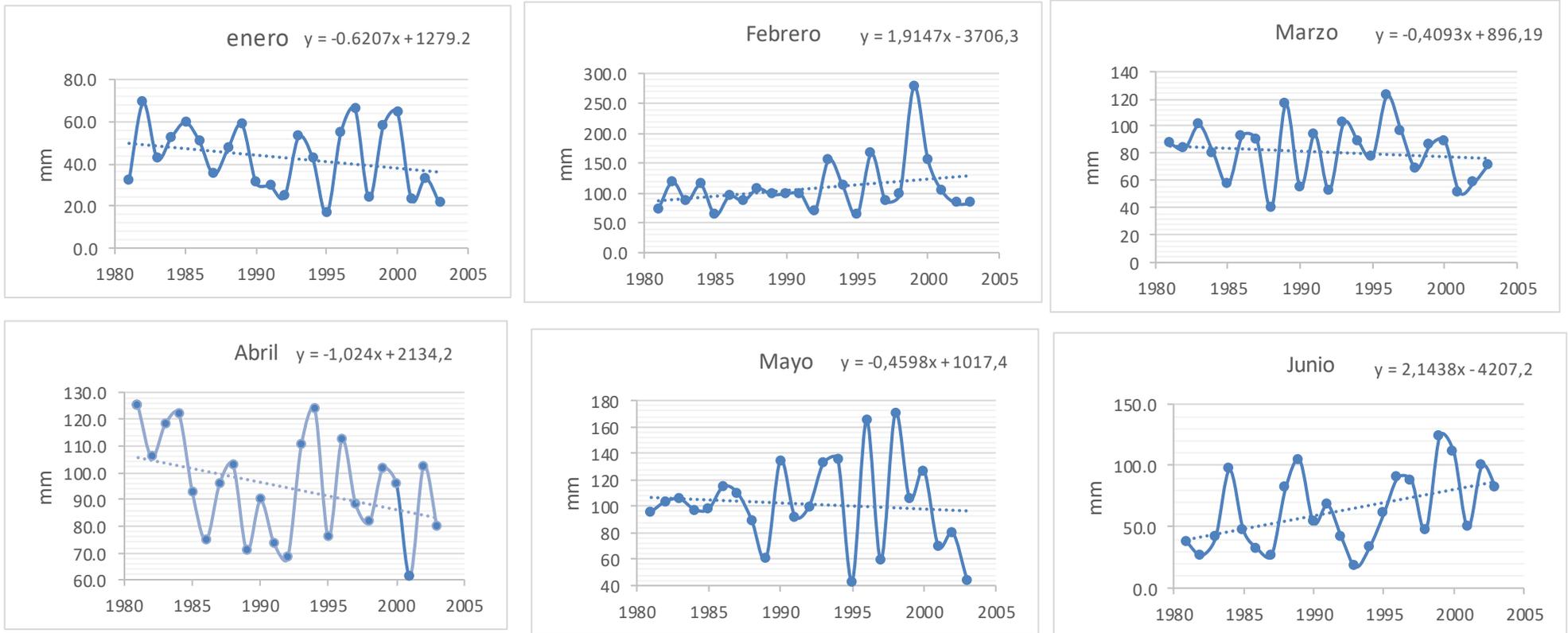
Vásquez, Adriana, Buitrago Andrea, eds. 2001. *El gran libro de los páramos*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.

Vargas, Jorge. 2002. *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*. Santiago de Chile: CEPAL.

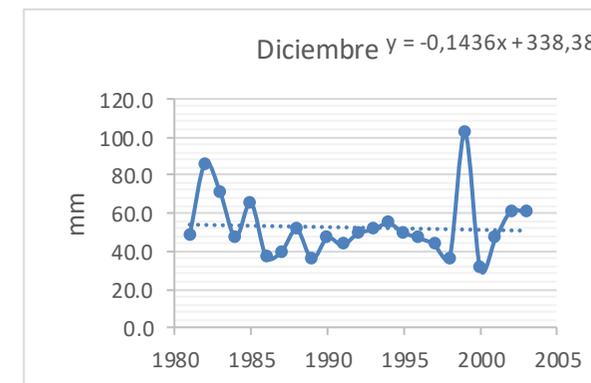
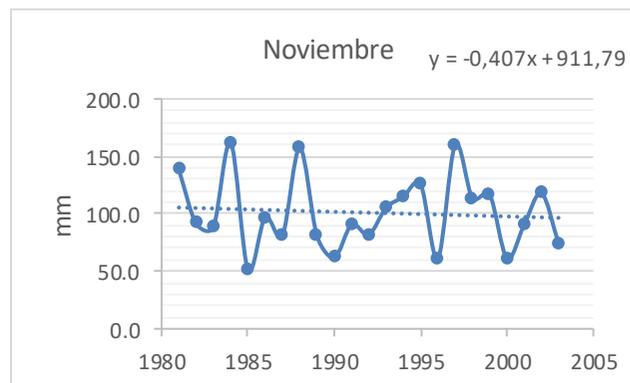
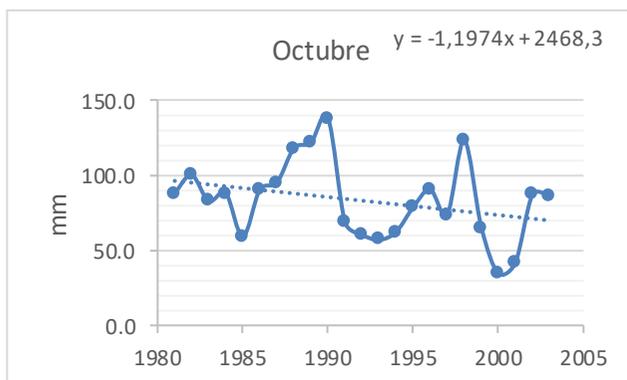
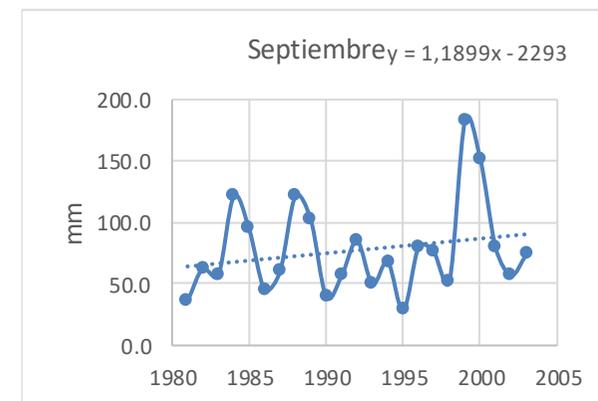
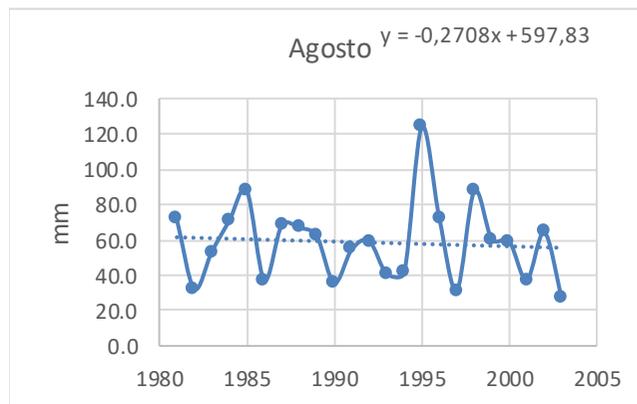
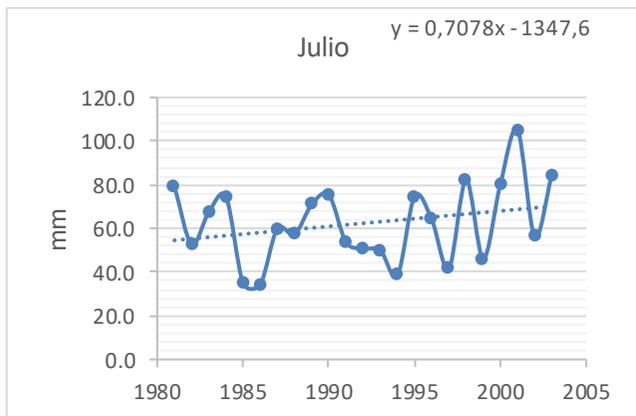
Anexos

Tiempo pasado

Anexo 1. Análisis de precipitación mensual (1981-2003)



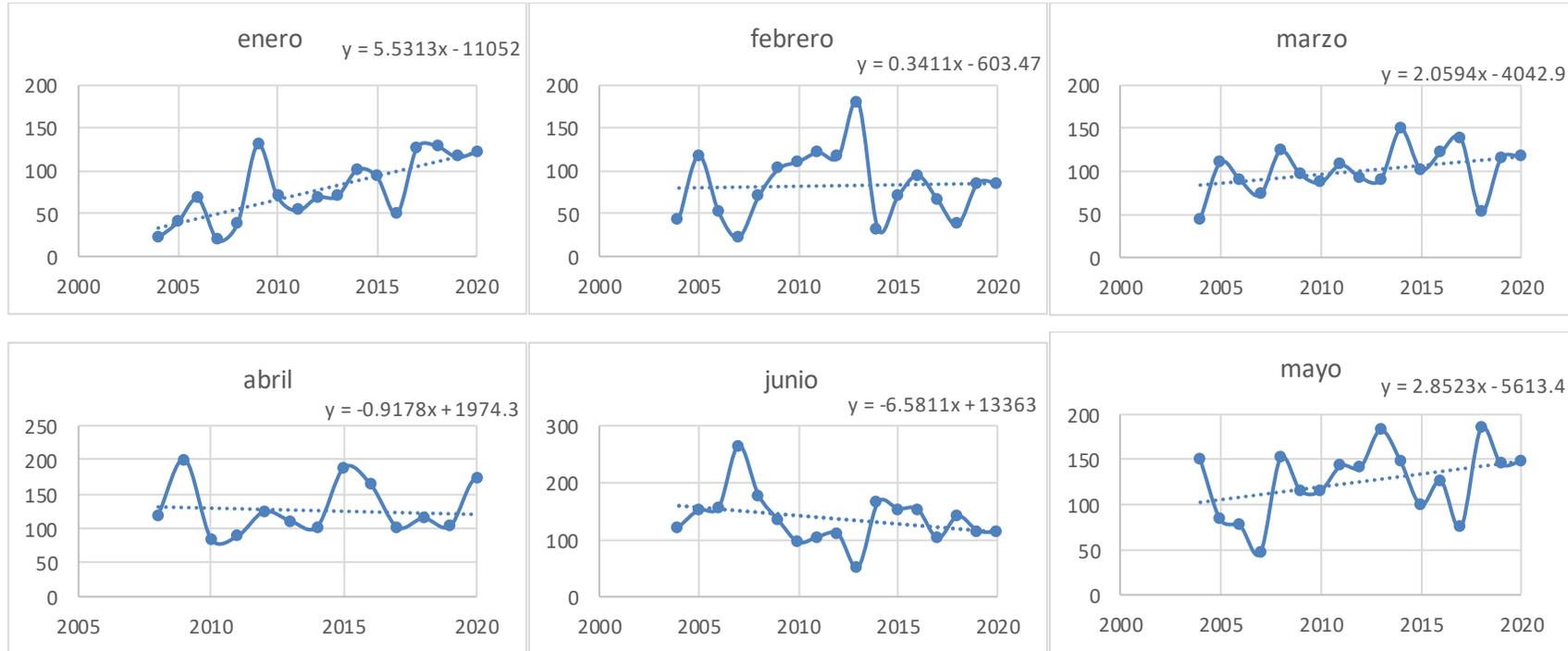
Fuente: Elaboración propia (2019)



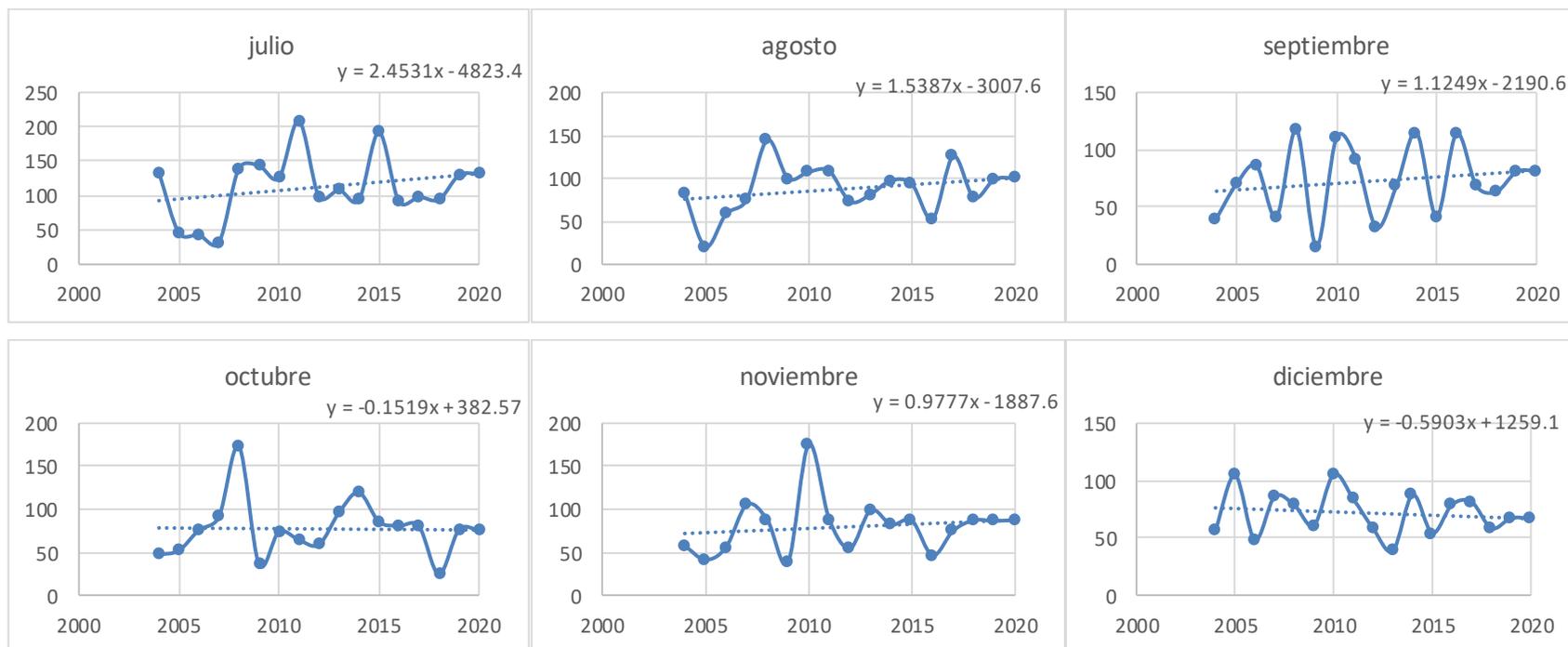
Fuente: Elaboración propia (2019)

Tiempo Presente

Anexo 2. Análisis de precipitación mensual (2004-2018)



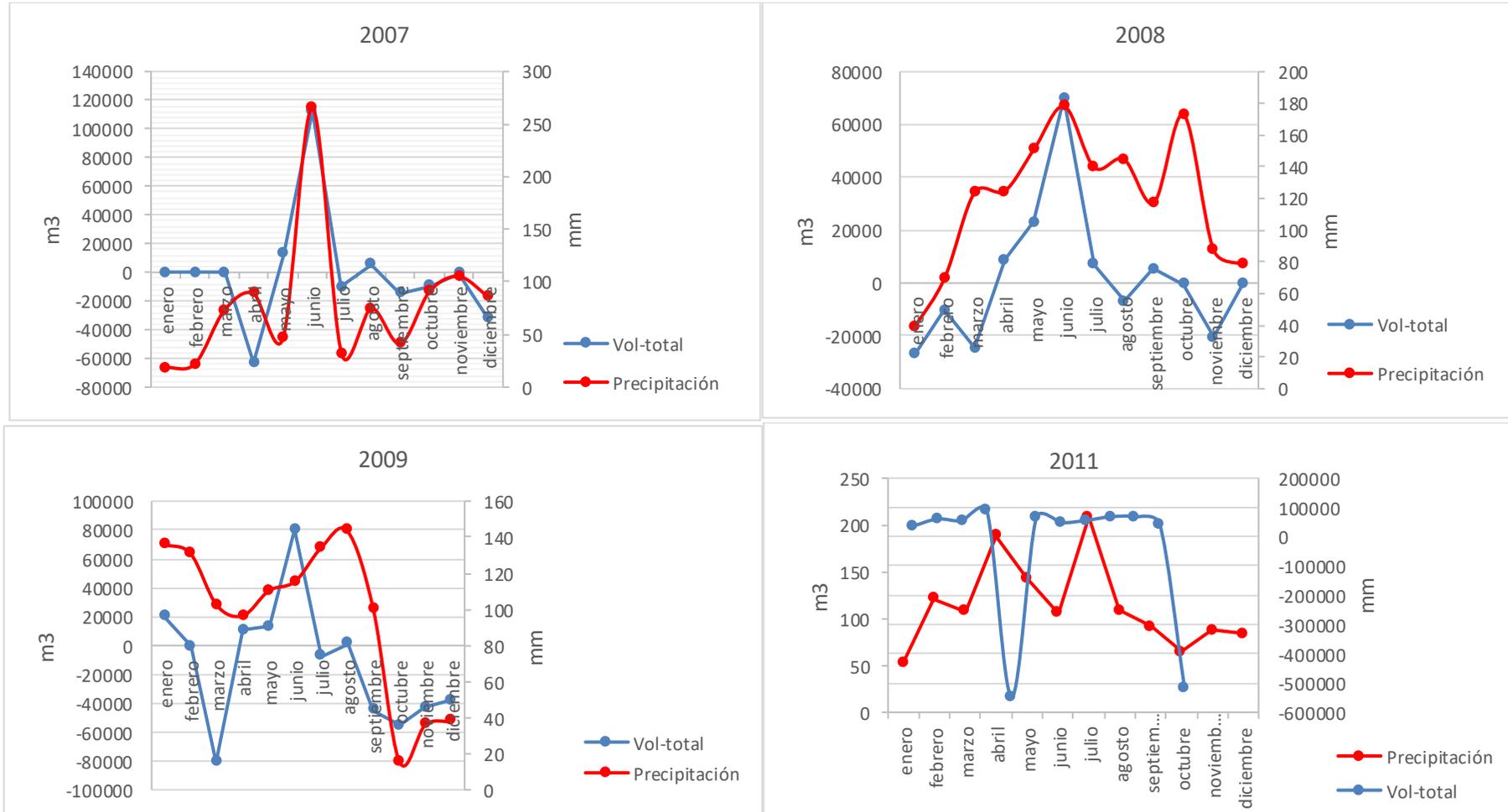
Fuente: Elaboración propia (2019)

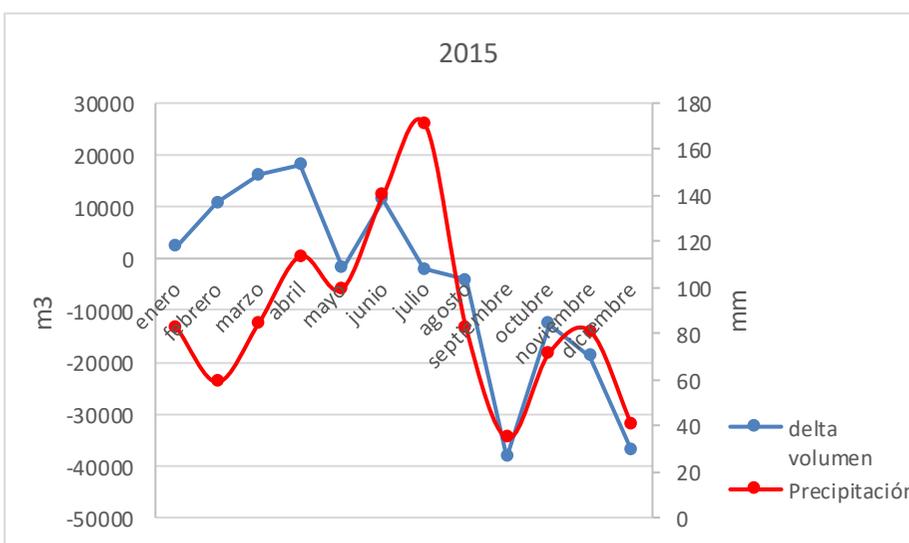
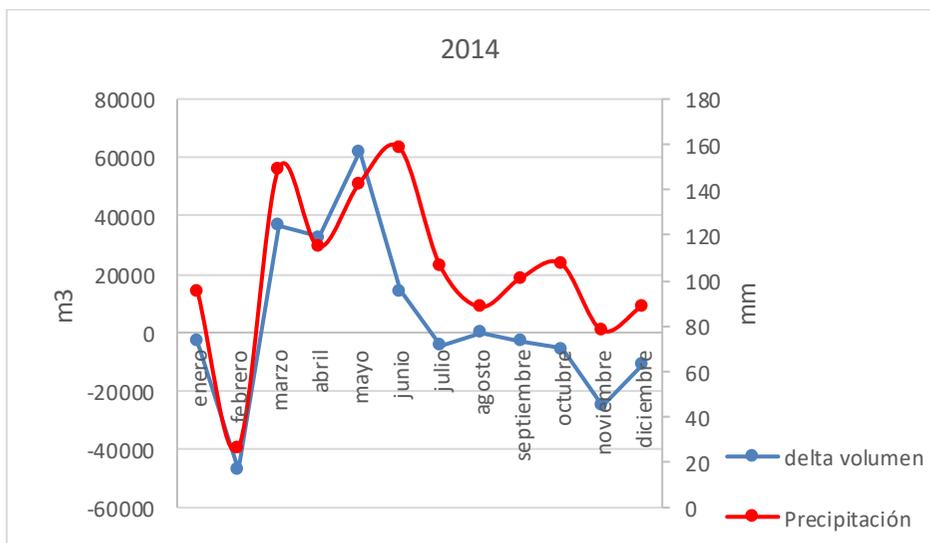
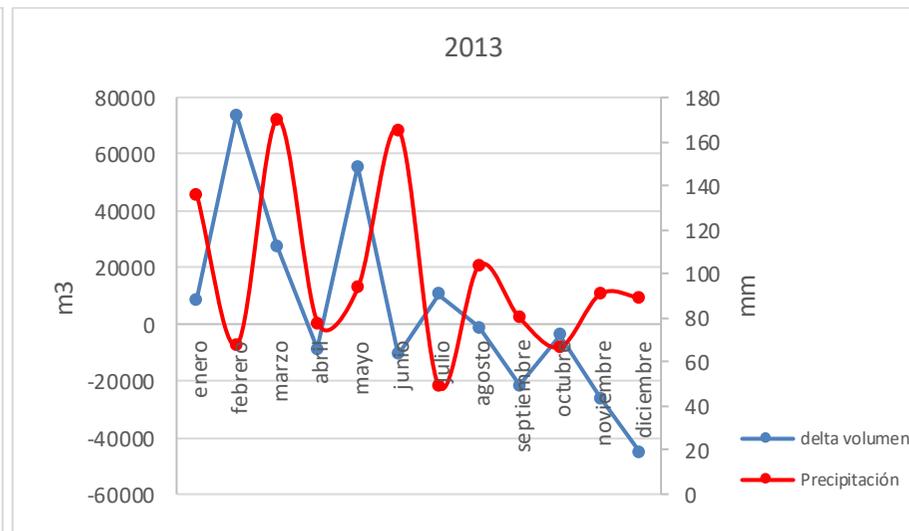
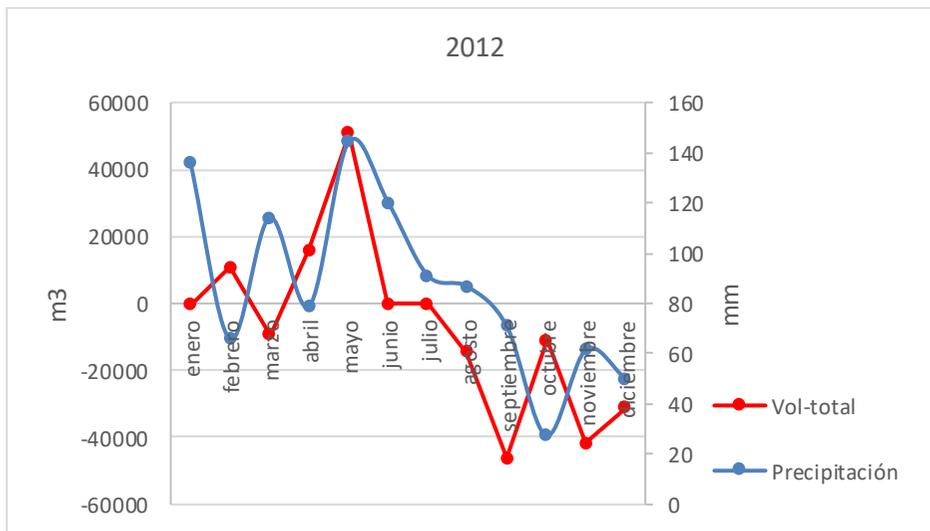


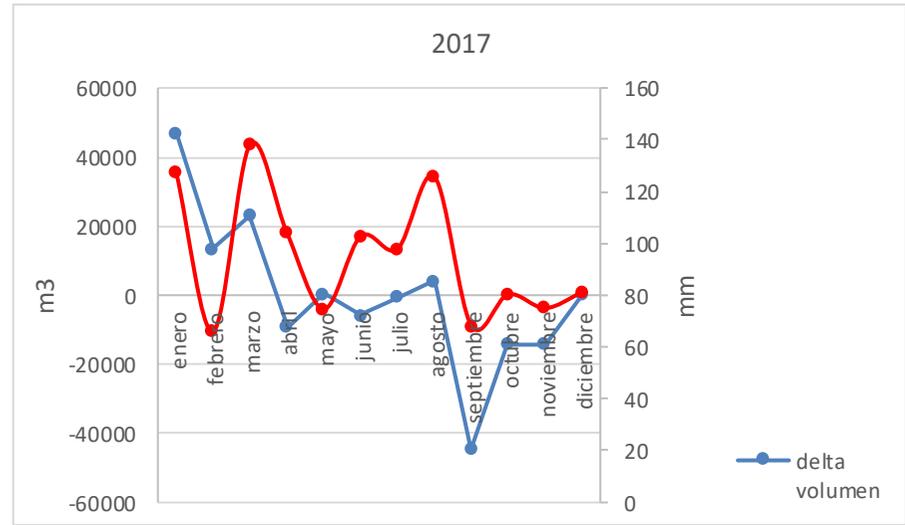
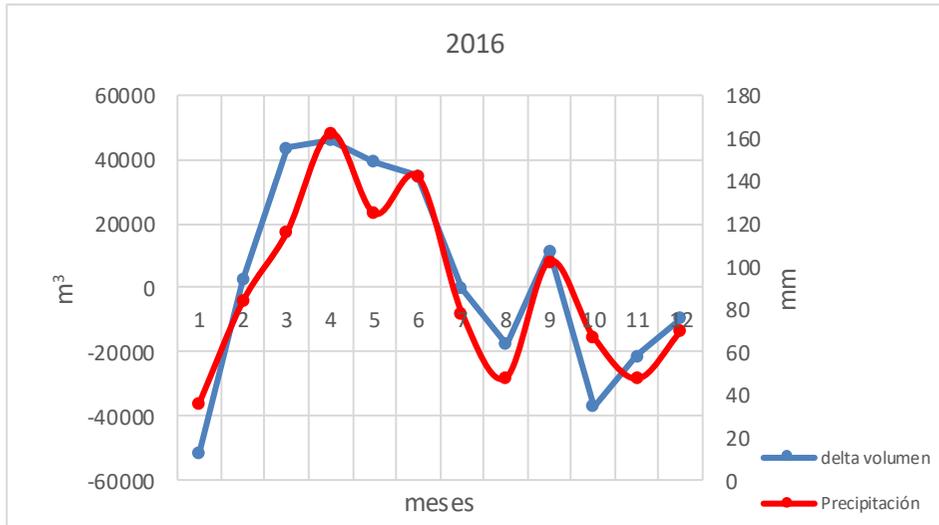
Fuente: Elaboración propia

Tiempo presente

Anexo 3. Análisis de precipitación y el delta volumen (2007- 2017).



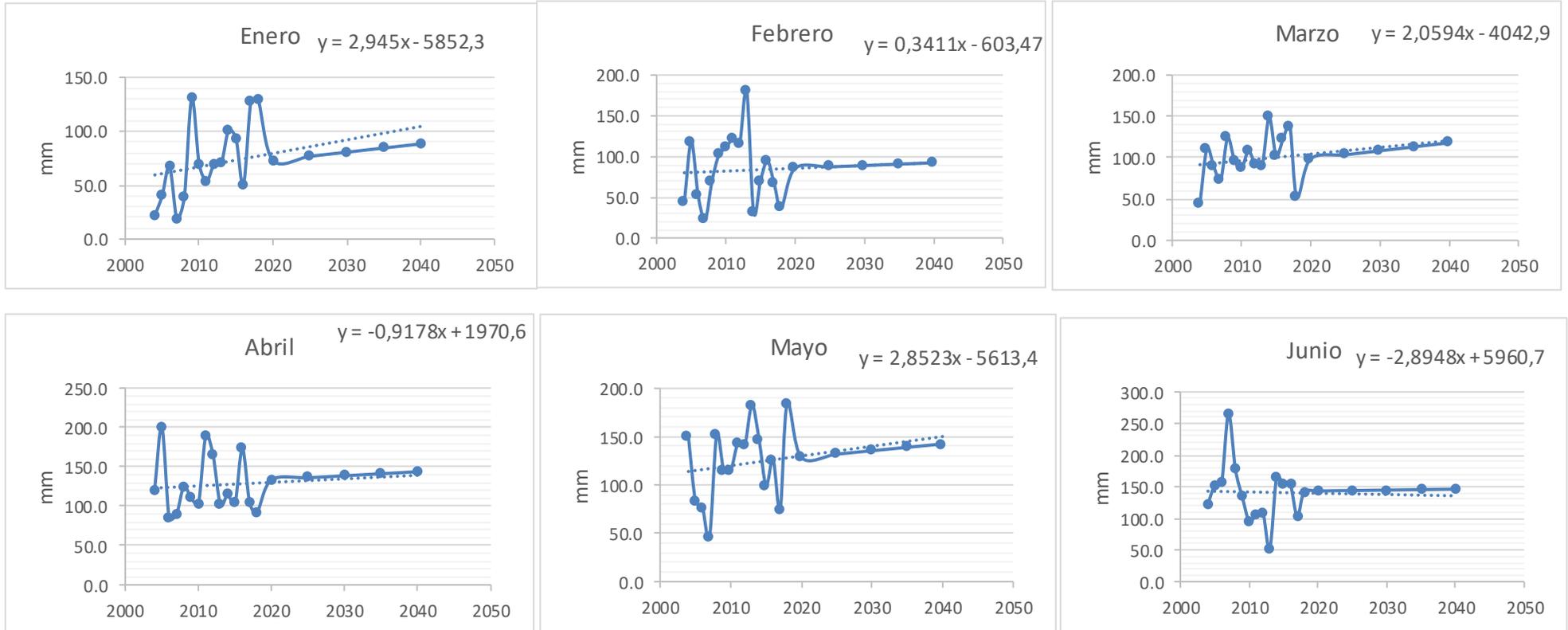




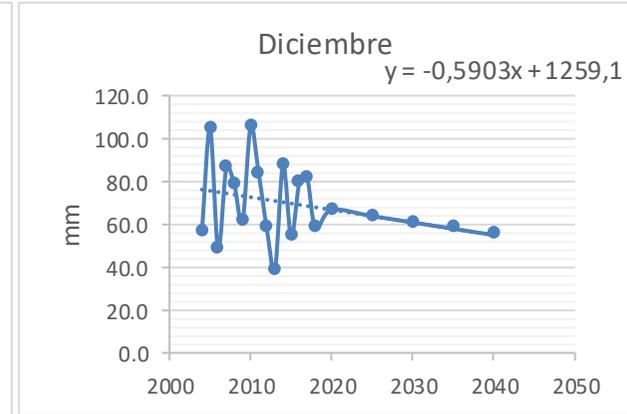
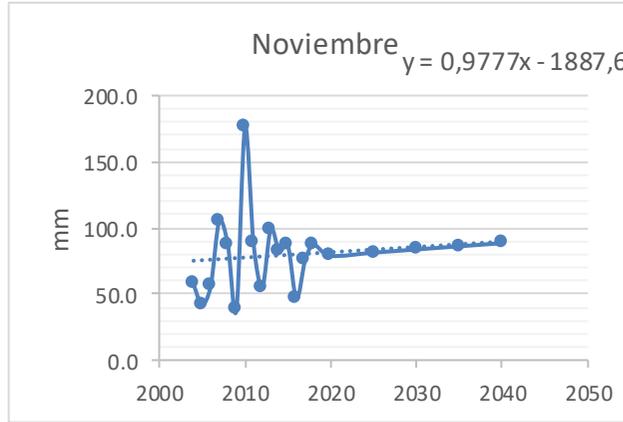
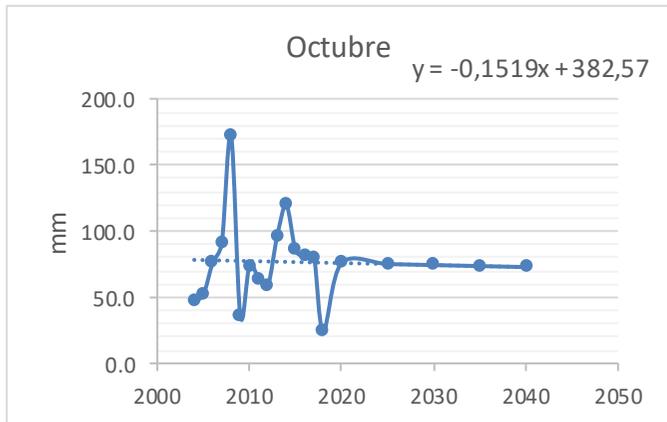
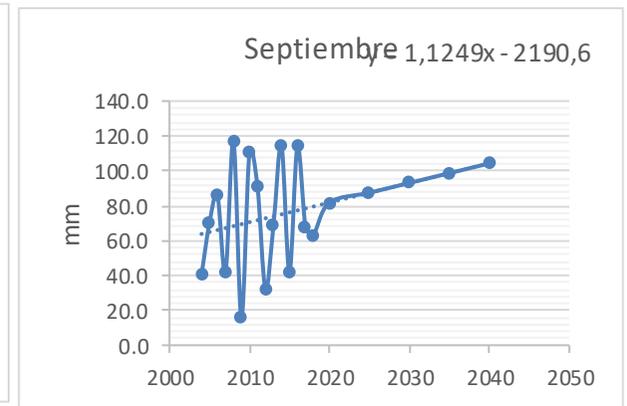
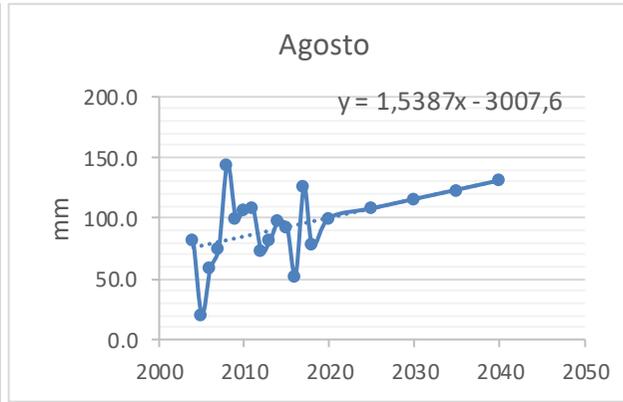
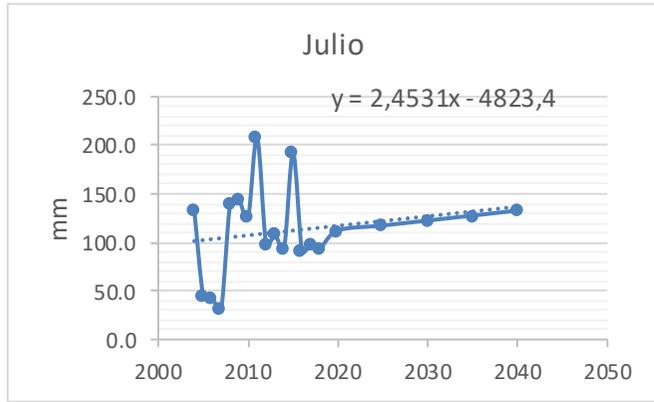
Fuente: Elaboración propia (2019)

Tiempo Futuro

Anexo 4. Análisis de precipitación futura en el embalse Salve Faccha



Fuente: Elaboración propia (2019)



Fuente: Elaboración propia (2019)