



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES
MÁXIMAS EN EL CANTÓN AZOGUES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: FREDDY ESTEBAN SANTACRUZ CALLE

DIRECTOR: ING. CRISTIAN VINTIMILLA ULLOA MSC

AZOGUES - ECUADOR

2020

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN
EL CANTÓN AZOGUES

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: FREDDY ESTEBAN SANTACRUZ CALLE

DIRECTOR: ING. CRISTIAN VINTIMILLA ULLOA MSc.

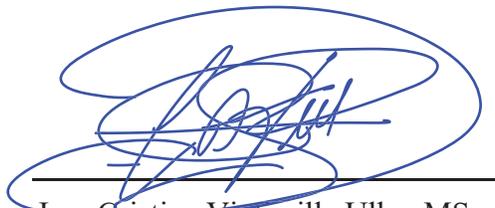
AZOGUES - ECUADOR

2020

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

En calidad de director del Trabajo de titulación denominado **“ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN EL CANTÓN AZOGUES”**, elaborado por el estudiante Freddy Esteban Santacruz Calle con C.I. 0302195599, egresado de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, Carrera de Ingeniería Civil, declaro que el mismo fue dirigido, observando los aspectos técnicos establecidos en el reglamento de la normativa vigente: y por tanto está aprobado.



Ing. Cristian Vintimilla Ulloa MSc.
Director del trabajo de titulación

CERTIFICADO AUTORÍA

Yo, Freddy Esteban Santacruz Calle, declaro bajo juramento que el trabajo de titulación realizado es de mi autoría, y que he consultado las referencias bibliográficas y linkográficas descritas en estos documentos.

A través de la presente declaración cedo el derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Católica de Cuenca, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y demás normativas vigentes



Freddy Esteban Santacruz Calle

C.I. 0302195599

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicar principalmente a Dios, por haberme dado la vida, fuerza y constancia que me ha permitido culminar esta etapa tan importante de mi vida. A mis padres Freddy y Silvia por ser el motor que me impulsaron día tras día en mi vida universitaria, por su sacrificio en todos estos años, por su amor incondicional, por creer en mi en todo momento y por todo el apoyo que me brindaron para poder afrontar cada obstáculo que se presentó. A mi hermana Lorena, quien con su amor, paciencia y consejos me ha enseñado a ser mejor cada día y salir adelante siempre. A mis abuelitos Norma, Guillermo, Inés (+) y Eloy (+), por todo su apoyo y consejos, que me han servido para avanzar y crecer como ser humano.

A mis amigos que siempre estuvieron a mi lado dándome ánimos para seguir adelante y poder cumplir mis metas. A mi enamorada Doménica que en todo este tiempo ha estado día tras día apoyándome en cada decisión que he tomado y me ha servido para alcanzar este sueño tan anhelado.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras hicieron de mi una mejor persona y de una u otra manera me impulsaron para poder lograr mis metas y objetivos.

AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme en todo momento, por bendecirme y darme salud en el transcurso de mi vida para poder culminar mi carrera universitaria.

A mi familia, amigos y enamorada, por la paciencia, consejos y todo el apoyo que me brindaron durante esta etapa para impulsar a cumplir mis objetivos.

A mi director de tesis Ing. Cristian Vintimilla por impartir sus conocimientos, quien, con su amabilidad, paciencia, exigencia y apoyo, me guió para desarrollar este trabajo.

A la Universidad Católica de Cuenca Sede Azogues y los docentes de la carrera de Ingeniería Civil quienes nos impartieron sus conocimientos académicos y experiencia a lo largo de la carrera.

Resumen

La falta de estudios hidrológicos en el cantón Azogues ha generado problemas a la hora de determinar caudales extremos importantes dentro de la ingeniería civil. El objetivo del presente trabajo es generar mapas que evidencien la distribución de precipitaciones máximas en el cantón y que sirvan como referencia para futuros estudios y diseños de obras civiles.

Se considera información de cinco estaciones meteorológicas, recolectando datos hidrológicos de catorce años, desde el 2000 hasta el 2013, a los cuales se realiza un análisis estadístico, aplicando diferentes métodos que permita transferir información a la zona de estudio.

Aplicando tres métodos para establecer regiones homogéneas, se observa que las estaciones Guapán, Cañar y Gualaceo son un grupo homogéneo. Para estimar las precipitaciones se realiza una comparación entre tres métodos probabilísticos, siendo la función probabilística Log Normal 3 Parámetros la que presenta el mejor ajuste en las tres estaciones.

La interpolación de los valores hidrológicos se realiza mediante el método IDW, obteniendo una distribución de precipitaciones que varían desde los 50mm hasta los 70 mm en el centro urbano, mientras que los valores más altos de lluvias se presentan en la zona sur-este. Estos valores sirven de referencia para valorar el diseño y ejecución de obras civiles, garantizando un adecuado funcionamiento estructural y geotécnico de las obras en el cantón Azogues.

Palabras clave: Precipitaciones máximas, Periodos de retorno, Regiones homogéneas, Distribuciones de probabilidad.

Abstract

The lack of hydrological studies in Azogues canton has developed problems in determining important extreme flows within civil engineering. The objective of this work research is to generate maps that show the distribution of maximum rainfall in the canton which will be helpful as a reference for future studies and designs of civil works.

Information from five meteorological stations is considered, collecting hydrological data during fourteen years, from 2000 to 2013, with this information a statistical analysis is performed, applying different methods that allow transferring data to the study area.

Applying three methods to establish homogeneous regions, it is observed that the Guapán, Cañar, and Gualaceo stations are a homogeneous group. To estimate rainfall, a comparison is made between three probabilistic methods with the Log-Normal 3 Parameters probabilistic function, presenting the best fit in the three seasons.

The interpolation of the hydrological values is conducted using the IDW method, obtaining a distribution of rainfall that varies from 50mm to 70mm in the urban center, while the highest rainfall values are presented in the south-east zone. These values serve as a reference to assess the design and civil works, guaranteeing an adequate structural and geotechnical operation of the works in Azogues.

Keywords: maximum rainfall, return periods, homogeneous regions, probability distributions.

| | |
|-------------------------|-----|
| Aprobación del Director | i |
| Certificado Autoría | ii |
| Dedicatoria | iii |
| Agradecimiento | iv |
| Resumen | v |
| Abstract | vi |

Tabla de Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | CAPÍTULO I Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Formulación del problema | 1 |
| 1.3 | Delimitación del problema..... | 2 |
| 1.4 | Definición de la zona de estudio | 3 |
| 1.5 | Justificación..... | 4 |
| 1.6 | Hipótesis..... | 6 |
| 1.1.1 | Objetivo General..... | 6 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos..... | 6 |
| 2 | CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica..... | 8 |
| 2.1 | Precipitación y métodos de medición..... | 8 |
| 2.2 | Cuencas hidrográficas y sus características fisiográficas..... | 8 |
| 2.2.1 | Parámetro de forma (Pt)..... | 9 |
| 2.2.2 | Longitud de la Cuenca | 9 |
| 2.3 | Regiones Homogéneas | 9 |
| 2.3.1 | Identificación y formación de regiones homogéneas..... | 10 |
| 2.3.2 | Métodos para determinar regiones homogéneas..... | 11 |
| 2.4 | Periodo de retorno y ley empírica de Weibull..... | 14 |
| 2.5 | Distribuciones Probabilísticas | 14 |
| 2.5.1 | Distribución Normal | 14 |
| 2.5.2 | Distribución Gumbel..... | 15 |
| 2.5.3 | Distribución Log Normal 3 Parámetros | 15 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.6 | Prueba de bondad de ajuste | 16 |
| 2.6.1 | Error estándar de ajuste..... | 16 |
| 2.7 | Eventos de diseño..... | 17 |
| 2.8 | Análisis espacial e interpolación | 17 |
| 3 | CAPÍTULO III: Desarrollo Metodológico | 19 |
| 3.1 | Identificar y seleccionar estaciones meteorológicas | 19 |
| 3.2 | Recopilación y relleno de registro de datos hidrológicos | 20 |
| 3.3 | Determinación de Regiones Homogéneas..... | 21 |
| 3.3.1 | Método del parámetro β de la distribución GVE..... | 21 |
| 3.3.2 | Método del coeficiente de variación..... | 23 |
| 3.3.3 | Método de la prueba de Fisher | 24 |
| 3.4 | Funciones de distribución para la estimación de eventos hidrológicos. | 27 |
| 3.6 | Interpolación..... | 39 |
| 4 | CAPÍTULO IV: Análisis de Resultados..... | 41 |
| 5 | CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones..... | 47 |
| | Conclusiones | 47 |
| | Recomendaciones..... | 49 |
| | Bibliografía..... | 50 |
| | Anexos..... | 52 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Fórmulas para aplicar el método del parámetro beta | 11 |
| Tabla 2.2 Fórmulas para aplicar el método del coeficiente de variación | 12 |
| Tabla 2.3 Fórmulas para aplicar la distribución Gumbel..... | 15 |
| Tabla 2.4 Fórmulas para aplicar la distribución Log Normal 3P..... | 16 |
| Tabla 2.5 Fórmulas para estimar eventos en función del periodo de retorno | 17 |
| Tabla 3.1 Precipitaciones máximas anuales | 21 |
| Tabla 3.2 Resultados aplicación método del parámetro Beta | 22 |
| Tabla 3.3 Resultados aplicación método del coeficiente de Variación..... | 24 |
| Tabla 3.4 Resultados aplicación método de la prueba de Fisher | 25 |
| Tabla 3.5 Resultados de homogeneidad entre las estaciones aplicando método de Fisher | 26 |
| Tabla 3.6 Tabla de resumen de los Grupos Homogéneos..... | 26 |
| Tabla 3.7 Datos estadísticos de los registros de cada una de las estaciones | 27 |
| Tabla 3.8 Valores de los parámetros estimados por el método de momentos..... | 28 |
| Tabla 3.9 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de Gumbel | 28 |
| Tabla 3.10 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de la distribución Normal | 29 |
| Tabla 3.11 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de la distribución Log Normal 3P | 30 |
| Tabla 3.12 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Gualaceo | 30 |
| Tabla 3.13 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Gumbel | 32 |
| Tabla 3.14 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Normal..... | 32 |
| Tabla 3.15 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Log Normal 3P | 33 |
| Tabla 3.16 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Guapán..... | 34 |
| Tabla 3.17 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Gumbel..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.18 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Normal | 36 |
| Tabla 3.19 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Log Normal 3P. | 37 |
| Tabla 3.20 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Cañar | 38 |
| Tabla 4.1 Precipitaciones máximas anuales estimadas (mm) | 41 |

Índice de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1.1 Ubicación del cantón Azogues | 4 |
| Gráfico 3.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas..... | 20 |
| Gráfico 3.2 Valores del parámetro Beta | 23 |
| Gráfico 3.3 Valores del coeficiente de variación | 24 |
| Gráfico 3.4 Comportamiento de los datos registrados por la estación Gualaceo y los datos estimados a través de la Función Log Normal 3P | 31 |
| Gráfico 3.5 Comportamiento de los datos registrados por la estación Guapán y los datos estimados a través de Gumbel | 35 |
| Gráfico 3.6 Comportamiento de los datos registrados por la estación Cañar y los datos estimados a través de Gumbel | 38 |
| Gráfico 3.7 Interpolación de precipitaciones máximas entre las estaciones meteorológicas. | 40 |
| Gráfico 4.1 Precipitaciones máximas cantón Azogues, T=20 años | 42 |
| Gráfico 4.2 Precipitaciones máximas cantón Azogues, T=30 años | 43 |
| Gráfico 4.3 Precipitaciones máximas cantón Azogues, T=50 años | 44 |
| Gráfico 4.4 Precipitaciones máximas cantón Azogues, T=100 años | 45 |

1 CAPÍTULO I Introducción

1.1 Introducción

En el cantón Azogues no se han realizado estudios hidrológicos que permitan estimar precipitaciones máximas, siendo un problema que afecta en la determinación de caudales extremos importantes dentro de la ingeniería civil. Utilizar datos de estaciones que no corresponda con el sitio de interés, puede ocasionar el mal dimensionamiento de las obras con consecuencias graves.

Se pretende estimar precipitaciones máximas para el cantón Azogues, en función de diferentes periodos de retorno, que sirvan de referencia para futuros estudios y diseños de obras civiles, mediante el análisis estadístico de datos hidrológicos, de estaciones meteorológicas cercanas a la estación Guapán.

La finalidad es obtener mapas de distribución de precipitaciones máximas para el cantón Azogues, en función de diferentes periodos de retorno, mediante un análisis estadístico de datos históricos de estaciones homogéneas, útiles para los diseños de obras de ingeniería civil.

1.2 Formulación del problema

La falta de estudios hidrológicos que permitan estimar precipitaciones máximas en el cantón Azogues, es un problema que afecta en la determinación de caudales extremos, importantes dentro de la ingeniería civil. En el diseño y operación de obras civiles es fundamental considerar estos caudales, en función de un periodo de retorno, con el fin de garantizar un adecuado funcionamiento estructural de las obras.

El análisis estadístico de los registros de las estaciones meteorológicas permite estimar las lluvias máximas que se pueden presentar. No es recomendable instalar estaciones de medición en toda la extensión territorial de un cantón debido al costo alto que representa esto, además las instituciones responsables de estas estaciones de medición, no siempre difunden libremente su registro de datos. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) posee una red limitada de estaciones de medición de lluvias, y es la única que pone a disposición pública su registro de datos a través de anuarios periódicos.

Las estaciones meteorológicas cercanas o dentro de la misma cuenca hidrológica, no necesariamente presenta un comportamiento estadístico similar, que permitan inferir datos a cualquier sitio de interés dentro de una zona de estudio. Utilizar datos de una estación que no corresponda con el sitio de interés, puede ocasionar el sobredimensionamiento estructural de una obra, haciéndola económicamente no viable, o el subdimensionamiento de esta, pudiendo provocar pérdidas humanas, ambientales y económicas.

1.3 Delimitación del problema

La distribución espacial de precipitaciones máximas en un sitio de estudio se puede obtener mediante la interpolación de datos históricos de estaciones de medición dentro de una región estadísticamente homogénea.

Escalante & Reyes (2002) presentan varios métodos y técnicas para establecer si las estaciones meteorológicas se encuentran dentro de una región homogénea, así como, criterios de ajuste a funciones de probabilidad para estimar eventos extremos de precipitaciones, con respecto a periodos de diseño que obedecen a la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

El análisis estadístico de los registros históricos de estaciones cercanas a la estación Guapán, permitirá la interpolación dentro de una región homogénea de precipitaciones máximas, dando como resultado mapas de distribución espacial de precipitaciones, en todo el cantón Azogues.

1.4 Definición de la zona de estudio

El cantón Azogues pertenece a la provincia del Cañar, se encuentra en la cuenca alta del río Paute, ubicada al sur del callejón Interandino, en el Austro ecuatoriano. Limita políticamente al norte con la provincia de Chimborazo y Morona Santiago, al sur y al este con la provincia del Azuay y al oeste con los cantones Déleg, Biblián y Cañar.

En la figura 1 se observa el cantón Azogues y sus parroquias, atravesadas por el cauce del río Burgay. Se identifica la estación de medición que se encuentra en la parroquia Guapán, instalada por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPAL) y algunas estaciones cercanas a la zona de estudio, operadas por el Instituto Nacional de meteorología e Hidrología (INAMHI).

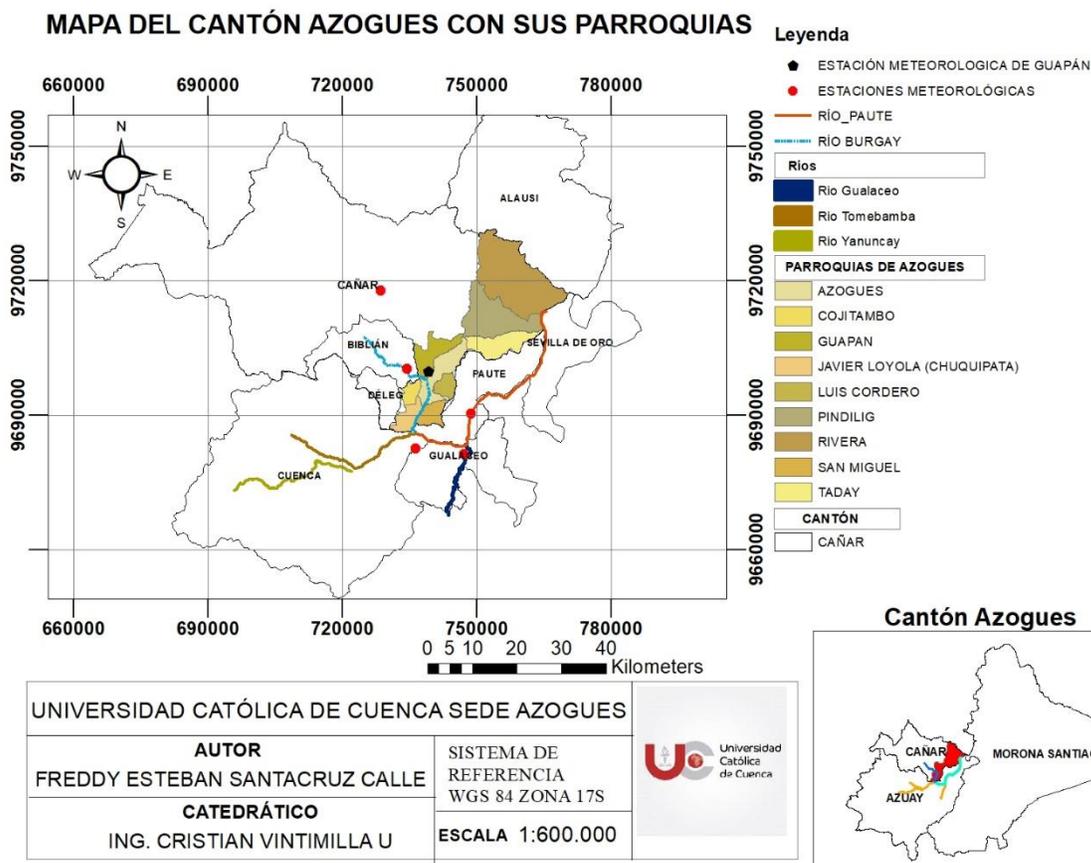


Gráfico 1.1 Ubicación del cantón Azogues

1.5 Justificación

La estimación de precipitaciones máximas es de gran importancia porque permite determinar caudales extremos, útiles para el diseño y ejecución de obras civiles, garantizando un adecuado funcionamiento estructural de las obras. Las lluvias máximas para la zona de interés se estimarán considerando datos hidrológicos de estaciones de medición cercanas, que tengan registros estadísticamente homogéneos, para poder transferir información que permita interpolar estos datos.

Dentro de la ingeniería civil, un estudio hidrológico garantiza el diseño adecuado y una correcta ejecución de las obras, permitiendo que las construcciones se realicen con mayor confiabilidad, evitando, encarecer la obra, o deficiencias de seguridad. Normativas como la NEVI y la NEC contemplan periodos de diseño según la obra a ejecutar, y exigen la estimación de caudales máximos mediante métodos lluvia-escorrimento.

La determinación de lluvias máximas tendrá un gran aporte para el cantón Azogues, facilitando la evaluación de obras existentes, para minimizar el estancamiento de aguas lluvias en las vías, desbordamientos de los ríos, deslizamientos de taludes, entre otros; con el objetivo de brindar seguridad a las poblaciones. Servirá de guía para tomar decisiones en el diseño y construcción de obras a ejecutarse dentro del cantón. Las instituciones podrán utilizar la información de este estudio, como referencia para la gestión de proyectos de aprovechamiento del agua lluvia en cualquier sitio de interés.

En nuestro país ya se han realizado estudios hidrológicos para obtener distribuciones de lluvias máximas, existen estaciones meteorológicas de las cuales se puede obtener información. Los Gobiernos Municipales deberían realizar estos estudios, con el propósito de conocer y actualizar periódicamente la distribución espacial de lluvias máximas; sin embargo, en el cantón Azogues no se han realizado estas investigaciones aplicando esta metodología.

Los registros de las estaciones de medición se encuentran disponibles en los anuarios meteorológicos, publicados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en su página web y son de libre acceso. La metodología se basa en un proceso estadístico, analizando datos hidrológicos a través de diferentes criterios, para determinar las estaciones que presenten un

comportamiento estadístico homogéneo, y para transferir información de manera confiable a la zona de estudio.

1.6 Hipótesis

Aplicando métodos estadísticos y teniendo una base de datos históricos de al menos 10 años de precipitaciones máximas anuales, es posible determinar regiones homogéneas y mediante el ajuste estadístico a distribuciones de probabilidad, estimar eventos hidrológicos extremos en el cantón Azogues para diferentes periodos de retorno.

1.1.1 Objetivo General

Generar mapas de precipitaciones máximas en el cantón Azogues para diferentes periodos de retorno mediante criterios de regiones homogéneas, que sirven de referencia para futuros estudios y diseños de obras civiles.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar datos hidrológicos históricos de las estaciones meteorológicas cercanas a la estación Guapán mediante anuarios institucionales o informes oficiales, que permitan realizar estudios estadísticos de series de datos.
- Identificar regiones homogéneas entre las estaciones a través de métodos estadísticos, para definir qué grupo de datos presenta un comportamiento estadístico similar.
- Determinar precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, mediante ajuste estadístico a una distribución de probabilidad, para estimar eventos hidrológicos extremos.

- Establecer mapas de distribución de precipitaciones máximas en función del periodo de retorno, dentro de la zona de estudio mediante interpolación estadística, que sirva de referencia para estudios y diseños futuros.

2 CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica

2.1 Precipitación y métodos de medición

Desde un enfoque de ingeniería hidrológica, se conoce que el origen primario del agua de la tierra es la precipitación, las mediciones constituyen el principio de la mayoría de estudios referentes al uso y control del agua.(Mijares, 2012)

La precipitación es medida en término de la altura de lámina de agua y generalmente se representa en milímetros (mm). Los aparatos de medida son depósitos cilíndricos abiertos en su parte superior, que están expuestos a la intemperie, en los que se almacena el agua fruto de las precipitaciones, existen dos tipos: pluviómetros y pluviógrafos. (Villón, 2002)

2.2 Cuencas hidrográficas y sus características fisiográficas

Es una región de la extensión terrenal que se puede excluir de modo que si esta fuera impermeable toda el agua que cae sobre ella serían drenadas por el sistema de corrientes hacia un solo sitio de evacuación.(Mijares, 2012). El parte aguas se le conoce como una línea ilusoria que delimita la cuenca, está constituida por las cotas topográficas más elevadas y la separa de las cuencas aledañas. Al área drenada se le conoce como el espacio medido en km^2 y está demarcada por el parte aguas. Actualmente es más sencillo y rápido determinar esta característica mediante un programa computacional como el Sistema de Información Geográfica. (GIS). (Escalante & Reyes, 2002)

2.2.1 Parámetro de forma (P_t)

El parámetro de forma es un buen identificador de cómo será el escurrimiento a partir de la forma de la cuenca, puesto que, entre mayor sea éste mayor será el perímetro por km^2 de área que se encuentre limitado la cuenca, por lo tanto es un parámetro importante dentro de las características fisiográficas. (Escalante & Reyes, 2002)

2.2.2 Longitud de la Cuenca

Hay dos tipos de cuencas, las irregulares y las regulares, en los dos casos se debe obtener la longitud de la cuenca. Para la primera se traza círculos dentro de la cuenca y la longitud L_c se establece a partir de la línea que se forma al unir los puntos centrales de cada circunferencia; en cambio, si es regular se toma en cuenta como un rectángulo, considerando al lado mayor de este, como la longitud de la cuenca L_c . (Escalante & Reyes, 2002)

2.3 Regiones Homogéneas

Las regiones homogéneas son aquellas que presentan similitud entre la información que la componen que con la información perteneciente a otras regiones. La homogeneidad establece la semejanza menor o mayor de los datos de una variable o de una composición de características en un conjunto geográfico. (Lujano Laura et al., 2017)

La regionalización es de gran importancia para estimar precipitaciones en cuencas sin información a partir de ecuaciones regionales, establecidos con información de cuencas aforadas. (Lujano Laura et al., 2017). En Hidrología a la regionalización se le conoce como el traslado de información de un lugar a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante, así, se aplica la regionalización para adquirir información hidrológica en sitios sin datos o con escasa

información. La regionalización se basa en la similitud espacial de algunas funciones, parámetros y variables que permitan esa transferencia. (Graciela & Zucarelli, 2017)

La transferencia de datos se puede efectuar de una manera más eficiente, dividiendo la región en áreas homogéneas. La homogeneidad de los diferentes aspectos se define para establecer regiones hidrológicas homogéneas en los eventos hidrológicos con reacciones semejantes. (Tavakkoli & Hosseini, 2015)

Los modelos de regionalización se basan en las características fisiográficas y climáticas de una región de interés. Las características fisiográficas son: área de la cuenca, longitud de la cuenca, ancho de la cuenca, longitud del eje mayor de la cuenca, corriente principal, orden de corrientes. (Lujano Laura et al., 2017)

2.3.1 Identificación y formación de regiones homogéneas

De las diferentes fases dentro del estudio regional de frecuencias, la determinación de regiones homogéneas es habitualmente la de mayor problema, ya que considera gran cantidad de juicios subjetivos. El objetivo primordial de establecer regiones homogéneas es crear grupos de estaciones que cumplan la condición de homogeneidad, la cual se basa en que las funciones de distribución de probabilidades son similares en toda la región. (Palomino, 2014)

Para establecer las regiones hidrológicamente homogéneas, se deben aplicar dos pasos fundamentales. como primer paso se debe formar regiones a través de diferentes métodos como el medio ambiente, información referente al clima y la cuenca. En el segundo paso, se aplicarán pruebas de heterogeneidad y discordancia para examinar si las regiones poseen sitios estadísticamente similares o no. (Palomino, 2014)

2.3.2 Métodos para determinar regiones homogéneas

2.3.2.1 Método del parámetro β de la distribución GVE

El objetivo principal de este método es establecer el parámetro Beta de cada una de las estaciones y determinar si los parámetros son semejantes mediante un gráfico. Se debe considerar periodos comunes entre estaciones de al menos 10 años. A estos registros se les aplica la distribución General de Valores Extremos y se obtienen los parámetros por momentos, máxima verosimilitud y momentos L, y. Se analiza el parámetro de forma de cada estación obtenido con el mejor ajuste. (Alcalá, 2016).

Aplicando las ecuaciones 1 ó 2 para determinar β según sea el caso, en función de g que es el coeficiente de asimetría de la muestra. Si $\beta = 0$ es una distribución tipo I y se aplicara la función Gumbel, Si $\beta < 0$ es una distribución tipo II y se aplicara la función Fréchet, y si $\beta > 0$ es una distribución tipo III y se aplicara la función Weibull, donde v es el parámetro de ubicación, α el parámetro de escala y β : parámetro de forma.(Alcalá, 2016)

Tabla 2.1 Fórmulas para aplicar el método del parámetro beta

| |
|--|
| Para $-11.35 < g < 1.1396$ |
| $\beta = 0.279434 - 0.333535g + 0.048306g^2 - 0.23314g^3 + 0.00376g^4 - 0.000263g^5 \quad (1)$ |
| Para $-1.14 < g < 18.95$ |
| $\beta = 0.25031 - 0.29219g + 0.075357g^2 - 0.010883g^3 + 0.000904g^4 - 0.000043g^5 \quad (2)$ |
| $F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{a}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (3)$ |

Fuente: Autor

2.3.2.2 Método del coeficiente de variación

Este método se basa en la comparación gráfica entre atributos estadísticos de los registros analizados, para cada una de las series j que son las estaciones, se obtendrán valores estadísticos muestrales \bar{X}_j y Cv_j , posteriormente se construye una gráfica situando en el eje de las ordenadas los coeficientes Cv_j y las abscisas las relaciones (\bar{X}_j / A_j) , donde A_j son las áreas drenadas de cada uno de los sitios j . Los grupos se forman por la concentración de puntos alrededor de determinado valor de coeficiente de variación. (Escalante & Reyes, 2002)

Se aplican las siguientes ecuaciones (4), (5) y (6) para determinar el coeficiente de variación, donde n es el número de datos de la muestra, X_i el valor de las precipitaciones, \bar{X} la media de los datos, S la desviación estándar y Cv el valor del coeficiente de variación que se va a calcular.

Tabla 2.2 Fórmulas para aplicar el método del coeficiente de variación

| Media | Coeficiente de variación |
|--|------------------------------|
| $\bar{X} = \frac{1}{n} * \sum_{x=t}^n X_i$ (4) | $Cv = \frac{S}{\bar{X}}$ (5) |
| $S = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{x})^2}{N-1}}$ (6) | |

Fuente: Autor

2.3.2.3 Método de la prueba de Fisher

La distribución F de Fisher, llamada así por el profesor Sir Ronald A. Fisher, utilizada comúnmente en la teoría de probabilidad y estadística, se emplea para verificar si las varianzas de dos poblaciones normales son iguales, partiendo de la comparación de las varianzas de dos

muestras extraídas aleatoriamente de esas poblaciones. En otras palabras, su aplicación se basa en la comparación de varianzas muestrales. (Alcalá, 2016)

La distribución F se aplica en la rama de la Hidrología cuando se requiere probar si dos o más series climatológicas, o hidrométricas, pertenecen a una misma población, es decir, forman parte de la misma región homogénea. La principal ventaja que se obtiene al utilizar la distribución F, es que resulta ser un buen indicador de la estabilidad de la varianza, aunque los datos no se apeguen a una distribución normal. (Alcalá, 2016)

Para establecer si dos pruebas corresponden a una población similar, es necesario aplicar la prueba de significancia estadística o prueba de hipótesis, se le denomina prueba de Fisher F:

$$F = \frac{S_1^2 \sigma_2^2}{S_2^2 \sigma_1^2} \quad (7)$$

Donde S_1^2 y S_2^2 son las varianzas que corresponden a las muestras aleatorias independientes de tamaño n_1 y n_2 tomadas de las poblaciones normales con varianza σ_1^2 y σ_2^2 , respectivamente, con $v_1 = n_1 - 1$ y $v_2 = n_2 - 1$ grados de libertad. (Alcalá, 2016)

En esta prueba la hipótesis nula a probar es $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, con una hipótesis alternativa $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$, considerando la hipótesis nula el estadístico F se calcula:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (8)$$

Cuando se calcula el estadístico $\frac{S_1^2}{S_2^2}$, el recíproco de F, se tiene una distribución 1/F con $v_1 = n_2 - 1$ y $v_2 = n_1 - 1$. Como en ambos casos se tiene una distribución F, conviene tomar a la varianza mayor como el numerador y a la menor como el denominador. Para rechazar o aceptar

una hipótesis nula es necesario comparar el valor estadístico F con el F crítico (F_c) para un nivel de significancia dado, generalmente del 1 ó 5 %. (Alcalá, 2016)

(Alcalá, 2016) presenta una tabla de valores de F_c que corresponde al valor calculado de F , para poder compararlos mediante un gráfico y determinar si la hipótesis propuesta $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, se cumple o no.

2.4 Periodo de retorno y ley empírica de Weibull

El periodo de retorno se le conoce como un intervalo promedio de tiempo en años, en el cual un determinado evento puede ser superado o igualado. La ley empírica de Weibull ordena los valores hidrológicos de mayor a menor permitiendo alcanzar la probabilidad de ocurrencia de los valores y el respectivo periodo de retorno. Donde T es el periodo de retorno, n el número de datos y m el número de orden. (Villón, 2002)

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (9)$$

2.5 Distribuciones Probabilísticas

2.5.1 Distribución Normal

La distribución Normal es aquella que representa una distribución de frecuencias de un grupo de datos, comúnmente es relacionada con los fenómenos que ocurren en la naturaleza, los cuales crean variables continuas y aleatorias. Esta representa la distribución de frecuencias de una población de valores. Su aplicación se basa en dos parámetros: μ de ubicación y σ parámetro de

escala. Estos parámetros se determinan a través de la técnica estimadores por momentos, donde μ = media aritmética y σ = la desviación estándar de la muestra. (Dicovski, 2002)

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (10)$$

2.5.2 Distribución Gumbel

La distribución probabilística más utilizada en la actualidad para la estimación de precipitaciones en función de un periodo de retorno es la Gumbel, siendo $F(x)$ la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor menor o igual que x , es decir $F(x)$ representa la probabilidad de que un valor dado de x no sea superado. Esta técnica considera dos parámetros para su aplicación, donde α es parámetro de escala y μ parámetro de ubicación y se determinan mediante el método de estimadores por momento. (García, 2013)

Tabla 2.3 Fórmulas para aplicar la distribución Gumbel

| | |
|---|---|
| <p>Función Gumbel</p> $F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (11)$ | <p>Parámetro de Ubicación</p> $\mu = \dot{x} - 0,45 S \quad (12)$ |
| <p>Parámetro de Escala</p> $\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0,78S \quad (13)$ | |

Fuente: Autor

2.5.3 Distribución Log Normal 3 Parámetros

La distribución de probabilidad Log Normal 3P es conocida como uno de los métodos que se usa hoy en día, esta distribución probabilística considera tres parámetros para el cálculo de la

probabilidad. Los parámetros se pueden determinar a través de varios métodos, siendo un método confiable el de estimadores por momentos, donde μ_y es el parámetro de forma, σ_y parámetro de escala y X_0 el parámetro de ubicación. (Rufino & Saravia, 2004)

Tabla 2.4 Fórmulas para aplicar la distribución Log Normal 3P

| | |
|---|---|
| <p>Función log Normal 3P</p> $F(x) = \frac{1}{(X - X_0) \sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2} \quad (14)$ | <p>Parámetro de Ubicación</p> $X_0 = \dot{x} \left(1 - \frac{nx}{nz} \right) \quad (15)$ |
| <p>Parámetro de Escala</p> $\sigma_y = \sqrt{\ln(nz^2 + 1)} \quad (16)$ | <p>Parámetro de Forma</p> $\mu_y = \ln\left(\frac{s}{nz}\right) - \frac{1}{2} \ln(nz^2 + 1) \quad (17)$ |

Fuente: Autor

2.6 Prueba de bondad de ajuste

Una prueba de bondad de ajuste es utilizada para seleccionar entre diferentes modelos probabilísticos ajustados a una sola muestra, se aplica para definir la distribución que presente mejor ajuste a un grupo de datos hidrométricos, es necesario contar con una medida cuantificable que permita encontrar la distribución que conduce a la mejor estimación. (Campos, 2006)

2.6.1 Error estándar de ajuste

El error estándar de ajuste permite seleccionar la función probabilística que mejor describe los datos hidrométricos, dando como resultado un valor cuantitativo conocido como el error, esta prueba de bondad de ajuste considera el número de parámetros que utiliza cada distribución de

probabilidad, donde n es el número de datos de la muestra, np el número de parámetros de ajuste de la distribución utilizada, X_i las precipitaciones máximas anuales ordenadas de mayor a menor y \hat{x}_i las precipitaciones estimadas con la distribución. (Kite, 1999)

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{x}_i)^2}{n - np}} \quad (18)$$

2.7 Eventos de diseño

Los eventos de diseño se aplican para determinar valores hidrológicos en función de periodos de retorno de interés. La estimación de valores extremos se realiza aplicando las distribuciones de Gumbel, Normal y Log normal 3p. donde se consideran los parámetros de forma, escala y de ubicación. (Kite, 1999)

Tabla 2.5 Fórmulas para estimar eventos en función del periodo de retorno

| | |
|---|--|
| Distribución Gumbel $X_T = \mu - \alpha \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (19)$ | Distribución Normal $X_T = \mu + \sigma U_T \quad (20)$ |
| Distribución Log Normal 3P $X_T = X_o + \exp(\mu_y + U_T \sigma_y) \quad (21)$ | |

Fuente: Autor

2.8 Análisis espacial e interpolación

El análisis espacial se le conoce como un proceso en el cual se manipula información espacial con el fin de extraer nueva información a partir de datos originales. Usualmente el análisis espacial se realiza con un Sistema de Información Geográfica (SIG). La interpolación espacial de

datos es una parte de la geo estadística que se basa en el cálculo de los valores desconocidos de una variable espacial a partir de otros valores conocidos.(Gomariz, 2013)

El método IDW (Distancia Inversa Ponderada) estima los valores de un atributo de puntos no muestreados utilizando una combinación lineal de información en puntos muestreados ponderados por una función inversa de la distancia desde el punto de interés a los puntos muestreados. La suposición es que los puntos muestreados más cercanos al punto no muestreado son más similares a él que aquellos más alejados en sus valores. (Keblouti et al., 2012)

3 CAPÍTULO III: Desarrollo Metodológico

3.1 Identificar y seleccionar estaciones meteorológicas

Se analizaron todas las estaciones cercanas al cantón Azogues, descartando las que no se encuentran en funcionamiento, luego se identificó las estaciones que poseen un registro común de datos disponibles. Se eligen cinco estaciones, tres pertenecen a la provincia del Cañar y dos a la provincia del Azuay. La estación Gualaceo se encuentra dentro de la subcuenca del río Santa Bárbara, la estación Paute dentro de la subcuenca del río Paute, mientras que las estaciones Guapán y Biblián están localizadas dentro de la subcuenca del Burgay. Estas cuatro estaciones están ubicadas en la cuenca del río Santiago y la estación Cañar se encuentra en la cuenca del río Cañar.

En el gráfico 3.1 se observa las cinco estaciones meteorológicas aforadas a ser utilizadas para el análisis estadístico de los datos, ubicadas en diferentes cantones de la provincia del Azuay y Cañar que limitan con la zona de estudio. El cantón Azogues cuenta con una estación de medición ubicada en la parroquia Guapán, se considera que representa el comportamiento de todo el cantón y se utiliza como referente para estimar la homogeneidad estadística de las demás estaciones.

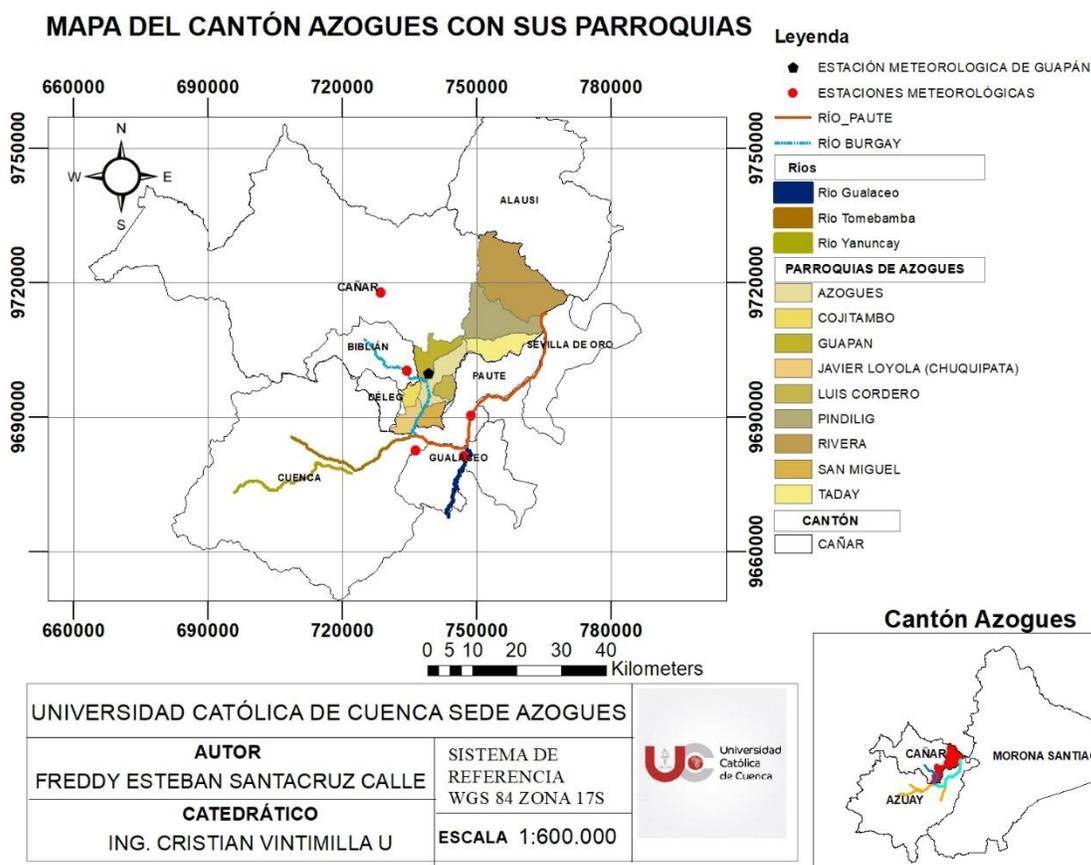


Gráfico 3.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas

Fuente: Autor

3.2 Recopilación y relleno de registro de datos hidrológicos

Para este estudio se recopila datos de precipitaciones máximas anuales de cinco estaciones meteorológicas, distribuidas de la siguiente manera: dos pertenecen a la provincia del Azuay (Gualaceo y Paute) y tres a la provincia del Cañar (Cañar, Biblián y Guapán). Los datos se obtienen del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) que está a cargo de cuatro de las cinco estaciones en estudio y los datos de la estación Guapán se adquirió de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPAL).

En la tabla 3.1 se detallan los valores de las precipitaciones máximas de cada estación meteorológica, el registro de datos se establece considerando información hidrológica de catorce años, desde el año 2000 hasta el 2013. Durante este periodo algunas estaciones no poseen un registro completo de datos debido a que se encontraban en mantenimiento, para completar estos valores se aplican métodos estadísticos que permiten estimar las precipitaciones no registradas, se utilizó el método de regresión lineal para el relleno de datos hidrológicos.

Tabla 3.1 Precipitaciones máximas anuales

| Precipitación Máxima (mm) | | | | | |
|----------------------------------|------------|---------|--------|-------|----------|
| | Estaciones | | | | |
| Años | Cañar | Biblián | Guapán | Paute | Gualaceo |
| 2000 | 18,1 | 33,1 | 18,29 | 66 | 40,29 |
| 2001 | 19,2 | 29,23 | 22,14 | 17,2 | 30 |
| 2002 | 16,8 | 29,23 | 38,61 | 27,6 | 36 |
| 2003 | 14,7 | 33,6 | 31,8 | 37,2 | 32,7 |
| 2004 | 33,1 | 30,2 | 31,75 | 27,3 | 50,1 |
| 2005 | 31,1 | 45,5 | 21,08 | 23,3 | 32,5 |
| 2006 | 25 | 52,6 | 33,02 | 24 | 87,2 |
| 2007 | 18,6 | 44 | 18,29 | 29,6 | 35,9 |
| 2008 | 36,2 | 43,6 | 14,39 | 36,2 | 38 |
| 2009 | 25,1 | 35,5 | 15,6 | 27,7 | 39,3 |
| 2010 | 20,8 | 29,23 | 22,5 | 33,3 | 45,5 |
| 2011 | 23,6 | 30 | 51,5 | 37,1 | 61,7 |
| 2012 | 16,8 | 30 | 33,02 | 72,7 | 48,4 |
| 2013 | 23,8 | 31,2 | 38,61 | 78,2 | 26,7 |

Fuente: Autor

3.3 Determinación de Regiones Homogéneas

3.3.1 Método del parámetro β de la distribución GVE

Este método se basa en el cálculo del parámetro Beta de cada estación mediante diferentes funciones probabilísticas. En esta técnica se debe considerar periodos comunes entre estaciones de

al menos 10 años. Los registros se les aplica la distribución General de Valores, formando tres grupos donde $\beta = 0$, $\beta < 0$ y $\beta > 0$. De estos tres grupos se conforman subregiones agrupando los parámetros β que se encuentre dentro de cierto intervalo.

En la tabla 3.2 se detallan los parámetros que se utiliza para obtener los valores de Beta de cada una de las estaciones: número de datos (n), desviación estándar (s), la media (\bar{X}), el coeficiente de asimetría (g) y por último el valor de Beta (β). Una vez obtenido los resultados de β se procede a graficar los valores para formar los grupos de regiones homogéneas en base al criterio mencionado anteriormente. En el Gráfico 3.2 se observa dos grupos homogéneos, el primero está conformado por valores mayores a 0 que corresponden a las estaciones de Cañar y Guapán y el segundo grupo formado por valores menores a 0 que corresponden a las estaciones de Biblián, Gualaceo y Paute.

Tabla 3.2 Resultados aplicación método del parámetro Beta

| # | Estación | n | s | \bar{X} | coef. Asimetría (g) | Beta | |
|---|----------|----|-------|-----------|------------------------|--------|----------|
| 1 | Cañar | 14 | 6,56 | 23,06 | 0,621 | 0,09 | Región 1 |
| 2 | Biblián | 14 | 7,67 | 35,50 | 0,922 | -0,003 | Región 2 |
| 3 | Paute | 14 | 19,36 | 38,39 | 1,024 | -0,03 | |
| 4 | Gualaceo | 14 | 15,65 | 43,16 | 1,531 | -0,05 | |
| 5 | Guapán | 14 | 10,73 | 27,90 | 0,533 | 0,11 | Región 1 |

Fuente: Autor

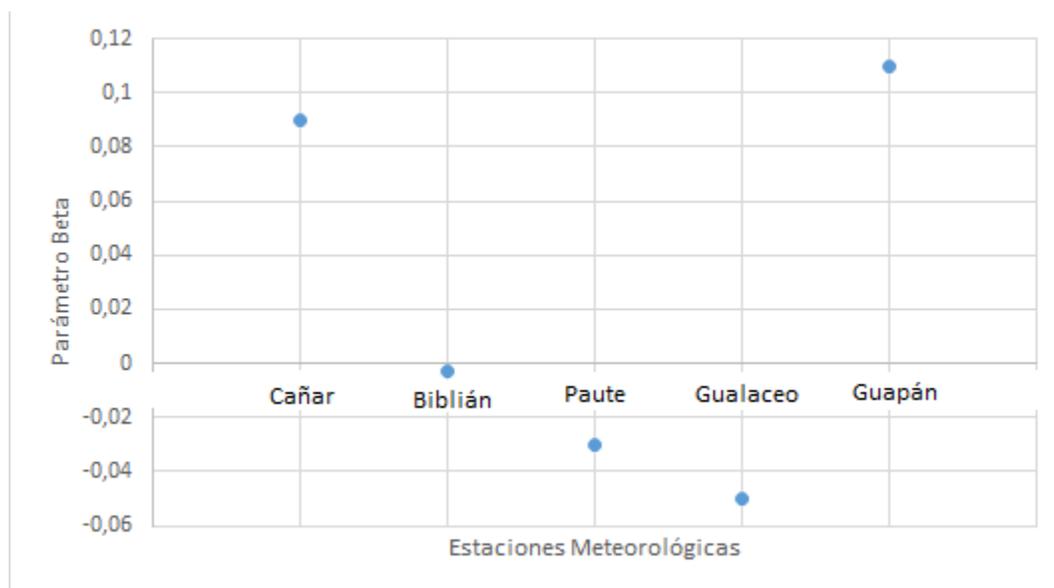


Gráfico 3.2 Valores del parámetro Beta

Fuente: Autor

3.3.2 Método del coeficiente de variación

Esta técnica se basa en una comparación gráfica entre atributos estadísticos de los registros analizados. Para cada una de las estaciones, se obtendrán los estadísticos muestrales \bar{X} y Cv , posterior se construye una gráfica situando en el eje de las ordenadas los coeficientes Cv y en el eje de las abscisas las relaciones (\bar{X}/A) , donde \bar{X} es la media y A es el área drenada de cada una de las estaciones.

En la tabla 3.3 se detalla los parámetros que se utilizaron para obtener los valores del coeficiente de variación de cada una de las estaciones: número de datos (n), desviación estándar (s), la media (\bar{X}) y el coeficiente de variación (Cv). Se procede a graficar los valores para formar grupos de regiones homogéneas. En el gráfico 3.3 se observa que luego de aplicar el método se tiene tres grupos, el primero está compuesto por dos estaciones que tienen valores similares y son

la de Cañar y Biblián, el segundo grupo formado solo por la estación Paute y el tercer grupo por dos estaciones que son la de Gualaceo y Guapán.

Tabla 3.3 Resultados aplicación método del coeficiente de Variación

| # | Estación | n | s | \bar{X} | A | \bar{X}/A | CV | |
|---|----------|----|-------|-----------|--------|-------------|------|----------|
| 1 | Cañar | 14 | 6,56 | 23,06 | 245,50 | 0,09 | 0,28 | Región 1 |
| 2 | Biblián | 14 | 7,67 | 35,50 | 447,04 | 0,08 | 0,22 | |
| 3 | Paute | 14 | 19,36 | 38,39 | 447,12 | 0,09 | 0,50 | Región 2 |
| 4 | Gualaceo | 14 | 15,65 | 43,16 | 952,53 | 0,05 | 0,36 | |
| 5 | Guapán | 14 | 10,73 | 27,9 | 447,04 | 0,06 | 0,39 | Región 3 |

Fuente: Autor

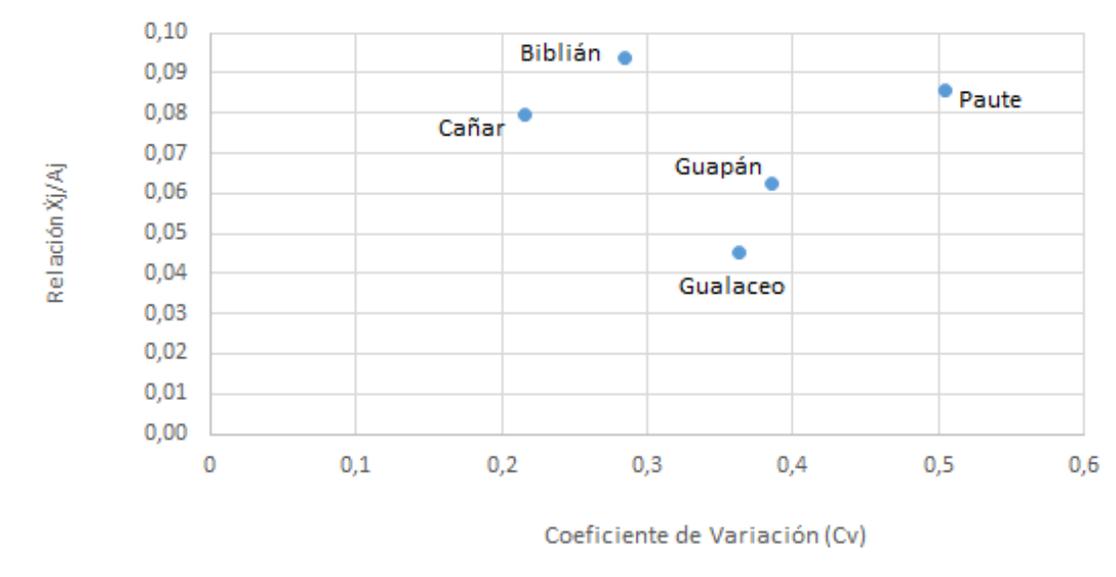


Gráfico 3.3 Valores del coeficiente de variación

Fuente: Autor

3.3.3 Método de la prueba de Fisher

Este método utiliza la teoría de probabilidad y estadística, empleada cuando se requiere probar si las varianzas de dos poblaciones normales son iguales, es decir su aplicación se basa en la comparación de varianzas muestrales. Se determinó la varianza de los registros de cada una de

las estaciones, luego se agrupa las estaciones de dos en dos para comparar sus respectivas varianzas, primero se calculó la distribución F entre las varianzas de las estaciones y posterior a eso se determinó el valor de F crítico.

En la tabla 3.4 se detalla los valores de F crítico y los valores de la prueba de Fisher (F) obtenidos de la comparación de las varianzas de las estaciones. Una vez obtenidos los resultados se analiza la hipótesis y comprueba si las estaciones pertenecen a un mismo grupo homogéneo, en la tabla 3.5 se da a conocer que estaciones son homogéneas y cuales son heterogéneas, de esta manera se establece un grupo homogéneo que corresponde a las estaciones, Cañar, Biblián, Guapán y Gualaceo.

Tabla 3.4 Resultados aplicación método de la prueba de Fisher

| | | | |
|---|---|--|---|
| Cañar y Biblián F= 1,169 Fc= 2,625 | Cañar y Paute F= 2,951 Fc= 2,625 | Cañar y Gualaceo F= 2,386 Fc= 2,625 | Cañar y Guapán F= 1,635 Fc= 2,625 |
| Biblián y Paute F= 2,525 Fc= 2,625 | Biblián y Gualaceo F= 0,490 Fc= 2,625 | Biblián y Guapán F= 1,399 Fc= 2,625 | |
| Paute y Gualaceo F= 1,237 Fc= 2,625 | Paute y Guapán F= 0,554 Fc= 2,625 | Gualaceo y Guapán F= 0,685 Fc= 2,625 | |

Fuente: Autor

Tabla 3.5 Resultados de homogeneidad entre las estaciones aplicando método de Fisher

| | Cañar | Biblián | Paute | Gualaceo | Guapán |
|-----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|
| Cañar | - | Homogénea | Heterogénea | Homogénea | Homogénea |
| Biblián | Homogénea | - | Homogénea | Homogénea | Homogénea |
| Paute | Heterogénea | Homogénea | - | Homogénea | Homogénea |
| Gualaceo | Homogénea | Homogénea | Homogénea | - | Homogénea |
| Guapán | Homogénea | Homogénea | Homogénea | Homogénea | - |

Fuente: Autor

Luego de haber obtenido los resultados de los tres métodos para determinar regiones homogéneas, se tiene que Cañar, Guapán y Gualaceo pertenecen a la misma región homogénea ya que en cada uno de los métodos indican que el grupo de datos de estas estaciones tienen un comportamiento estadístico similar. Como se observa en la tabla 3.6 la región 1 de cada método tiene a las estaciones Guapán, Cañar y Gualaceo que se repiten, por lo tanto, forman una región homogénea.

Tabla 3.6 Tabla de resumen de los Grupos Homogéneos

| | Regiones Homogéneas | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|----------|
| | Región 1 | Región 2 | Región 3 |
| Método Parámetro Beta | Cañar y Guapán | Biblián, Paute y Gualaceo | |
| Método coeficiente de variación | Gualaceo y Guapán | Cañar y Biblián | Paute |
| Prueba de Fisher | Cañar, Biblián, Guapán, y Gualaceo | Paute | |

Fuente: Autor

3.4 Funciones de distribución para la estimación de eventos hidrológicos.

Para realizar un ajuste estadístico a una función de distribución probabilística, primero se aplica la ley de Weibull al registro de datos, la cual ordena los datos de las precipitaciones de mayor a menor y determina el periodo de retorno que corresponde a cada valor, después se utilizan distribuciones probabilísticas, Gumbel, Normal y Log Normal con 3 parámetros a cada grupo de datos de las estaciones para estimar las precipitaciones, a los datos que se obtiene se aplica la prueba de bondad error estándar de ajuste para determinar el error de cada una de las funciones probabilísticas aplicadas y se define que función presenta un mejor ajuste.

En la tabla 3.7 se detalla los datos estadísticos de los grupos de datos que corresponde a cada una de las estaciones que forman el grupo homogéneo: número de datos (n), la media (\bar{x}), la desviación estándar (s) y el coeficiente de asimetría (g), son datos fundamentales para poder aplicar las funciones probabilísticas.

Tabla 3.7 Datos estadísticos de los registros de cada una de las estaciones

| Datos Estadísticos | | | |
|-----------------------------|--------|--------|----------|
| | Cañar | Guapán | Gualaceo |
| n | 14 | 14 | 14 |
| \bar{x} | 23,064 | 43,163 | 27,9 |
| s | 6,561 | 15,653 | 10,728 |
| g | 0,62 | 1,51 | 0,533 |
| w | 0,736 | 0,493 | 0,769 |

Fuente: Autor

Luego de haber definido los datos estadísticos a usar, procedemos a estimar los eventos hidrológicos en función de los periodos de retorno aplicando las funciones Gumbel, Normal y log Normal 3p a cada estación de medición, cada método contempla diferentes criterios y parámetros para el cálculo de los eventos máximos, estos se indican en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Valores de los parámetros estimados por el método de momentos

| Estaciones Meteorológicas | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-------|----------|-----------|-------|
| | Cañar | | | Guapán | | | Gualaceo | | |
| | Escala | Ubicación | Forma | Escala | Ubicación | Forma | Escala | Ubicación | Forma |
| Gumbel | 5,12 | 20,11 | - | 8,36 | 23,07 | - | 12,2 | 36,12 | - |
| Normal | 6,56 | 23,06 | - | 10,72 | 27,9 | - | 15,65 | 43,16 | - |
| Log Normal 3p | 0,36 | 5,35 | 2,87 | 0,34 | -2,89 | 3,42 | 0,57 | 17,91 | 3,23 |

Fuente: Autor

- Estación Gualaceo

En la tabla 3.9 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística de Gumbel, esta información corresponde a la estación meteorológica de Gualaceo, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, ubicación y escala.

Tabla 3.9 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de Gumbel

| | | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución de Gumbel | | EEA |
|-------------|----|--------------------------------------|-------|------------------------|--------------|-----|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 | |
| 2006 | 1 | 87,2 | 15,00 | 68,75 | 340,33 | |
| 2011 | 2 | 61,7 | 7,50 | 59,85 | 3,43 | |
| 2004 | 3 | 50,1 | 5,00 | 54,43 | 18,71 | |
| 2012 | 4 | 48,4 | 3,75 | 50,41 | 4,03 | |
| 2010 | 5 | 45,5 | 3,00 | 47,14 | 2,68 | |
| 2000 | 6 | 40,29 | 2,50 | 44,32 | 16,22 | |
| 2009 | 7 | 39,3 | 2,14 | 41,79 | 6,18 | |
| 2008 | 8 | 38 | 1,88 | 39,43 | 2,06 | |
| 2002 | 9 | 36 | 1,67 | 37,19 | 1,41 | |
| 2007 | 10 | 35,9 | 1,50 | 34,97 | 0,86 | |
| 2003 | 11 | 32,7 | 1,36 | 32,72 | 0,00 | |
| 2005 | 12 | 32,5 | 1,25 | 30,31 | 4,79 | |
| 2001 | 13 | 30 | 1,15 | 27,57 | 5,91 | |
| 2013 | 14 | 26,7 | 1,07 | 23,96 | 7,50 | |
| | | | | Suma | 414,11 | |

Fuente: Autor

En la tabla 3.10 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Normal, esta información corresponde a la estación meteorológica de Gualaceo, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, ubicación y escala.

Tabla 3.10 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de la distribución Normal

| Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Normal | | EEA | |
|----------------------------------|----|-----------------------------------|------|-------|--------------|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 |
| 2006 | 1 | 87,2 | 15 | 66,66 | 421,69 |
| 2011 | 2 | 61,7 | 7,5 | 60,55 | 1,32 |
| 2004 | 3 | 50,1 | 5 | 56,33 | 38,87 |
| 2012 | 4 | 48,4 | 3,75 | 52,91 | 20,33 |
| 2010 | 5 | 45,5 | 3 | 49,90 | 19,35 |
| 2000 | 6 | 40,29 | 2,5 | 47,12 | 46,69 |
| 2009 | 7 | 39,3 | 2,14 | 44,47 | 26,73 |
| 2008 | 8 | 38 | 1,88 | 41,86 | 14,88 |
| 2002 | 9 | 36 | 1,67 | 39,20 | 10,27 |
| 2007 | 10 | 35,9 | 1,5 | 36,43 | 0,28 |
| 2003 | 11 | 32,7 | 1,36 | 33,42 | 0,52 |
| 2005 | 12 | 32,5 | 1,25 | 29,99 | 6,29 |
| 2001 | 13 | 30 | 1,15 | 25,78 | 17,84 |
| 2013 | 14 | 26,7 | 1,07 | 19,66 | 49,53 |
| | | | | Suma | 674,59 |

Fuente: Autor

En la tabla 3.11 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Log Normal 3 P, esta información corresponde a la estación meteorológica de Gualaceo, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera tres parámetros para su aplicación, escala, forma y ubicación.

Tabla 3.11 Precipitaciones estimadas para la estación Gualaceo a través de la distribución Log Normal 3P

| Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Log Normal 3P | | EEA | |
|----------------------------------|----|-----------------------------------|-------|-------|--------------|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 |
| 2013 | 1 | 87,2 | 15 | 77,19 | 100,16 |
| 2012 | 2 | 61,7 | 7,5 | 65,36 | 13,36 |
| 2000 | 3 | 50,1 | 5 | 58,60 | 72,24 |
| 2003 | 4 | 48,4 | 3,75 | 53,83 | 29,43 |
| 2011 | 5 | 45,5 | 3 | 50,10 | 21,12 |
| 2008 | 6 | 40,29 | 2,5 | 47,00 | 45,02 |
| 2010 | 7 | 39,3 | 2,14 | 44,32 | 25,20 |
| 2007 | 8 | 38 | 1,875 | 41,92 | 15,39 |
| 2009 | 9 | 36 | 1,67 | 39,71 | 13,77 |
| 2002 | 10 | 35,9 | 1,5 | 37,61 | 2,94 |
| 2004 | 11 | 32,7 | 1,36 | 35,57 | 8,23 |
| 2006 | 12 | 32,5 | 1,25 | 33,50 | 0,99 |
| 2005 | 13 | 30 | 1,15 | 31,28 | 1,64 |
| 2001 | 14 | 26,7 | 1,07 | 28,61 | 3,65 |
| | | | | Suma | 353,14 |

Fuente: Autor

Los resultados del error estándar de ajuste indican que la distribución de probabilidad que presenta mejor ajuste a los datos de la estación Gualaceo es la Log Normal 3 Parámetros, debido a que presenta menor error que las otras dos distribuciones. Aplicando la fórmula de la función Log Normal 3P para estimar eventos extremos, se determinan los valores de las precipitaciones máximas para periodos de retorno de 20, 30, 50 y 100 años, los mismos que se detallan en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Gualaceo

| Período de retorno - T(años) | Precipitación Máxima Anual (mm) |
|------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 82,26 |
| 30 | 89,59 |

| | |
|-----|--------|
| 50 | 99,16 |
| 100 | 112,83 |

Fuente: Autor

En el gráfico 3.4 se observa el comportamiento de los valores estimados a través de la función Log Normal 3P con respecto al registro de datos que se obtuvo de los anuarios meteorológicos de la INAMHI de la estación Gualaceo.

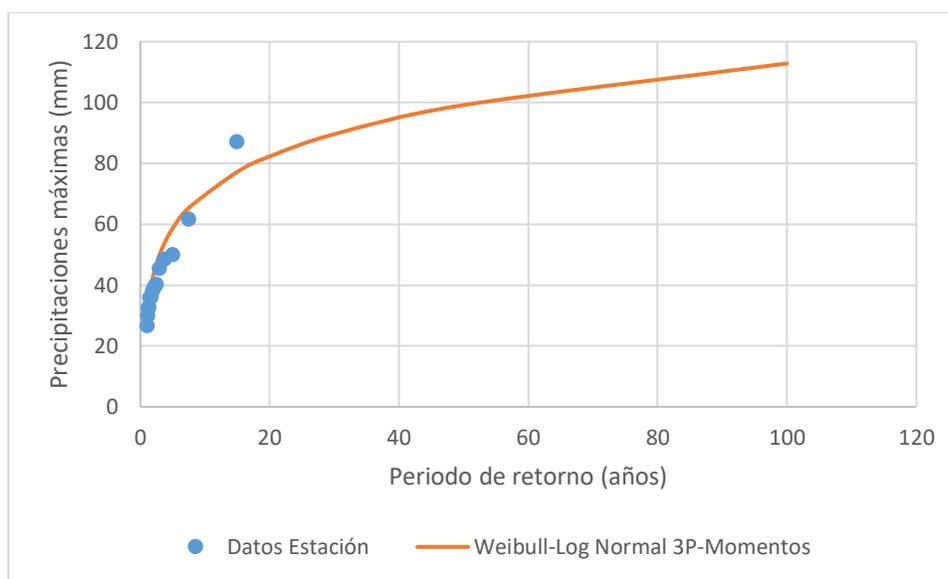


Gráfico 3.4 Comportamiento de los datos registrados por la estación Gualaceo y los datos estimados a través de la Función Log Normal 3P

Fuente: Autor

- Estación Guapán

En la tabla 3.13 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística de Gumbel, esta información corresponde a la estación meteorológica de Guapán, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, ubicación y escala.

Tabla 3.13 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Gumbel

| | | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución de Gumbel | | EEA |
|------|----|--------------------------------------|-------|------------------------|--------------|-----|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 | |
| 2011 | 1 | 51,5 | 15,00 | 45,44 | 36,76 | |
| 2002 | 2 | 38,61 | 7,50 | 39,33 | 0,53 | |
| 2013 | 3 | 38,61 | 5,00 | 35,62 | 8,95 | |
| 2006 | 4 | 33,02 | 3,75 | 32,86 | 0,02 | |
| 2012 | 5 | 33,02 | 3,00 | 30,62 | 5,74 | |
| 2003 | 6 | 31,8 | 2,50 | 28,69 | 9,67 | |
| 2004 | 7 | 31,75 | 2,14 | 26,96 | 22,99 | |
| 2010 | 8 | 22,5 | 1,88 | 25,34 | 8,09 | |
| 2001 | 9 | 22,14 | 1,67 | 23,80 | 2,77 | |
| 2005 | 10 | 21,08 | 1,50 | 22,29 | 1,45 | |
| 2000 | 11 | 18,29 | 1,36 | 20,74 | 6,00 | |
| 2007 | 12 | 18,29 | 1,25 | 19,09 | 0,64 | |
| 2009 | 13 | 15,6 | 1,15 | 17,21 | 2,60 | |
| 2008 | 14 | 14,39 | 1,07 | 14,74 | 0,12 | |
| | | | | Suma | 106,32 | |

Fuente: Autor

En la tabla 3.14 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Normal, esta información corresponde a la estación meteorológica de Guapán, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, escala y ubicación.

Tabla 3.14 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Normal

| | | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Normal | | EEA |
|------|---|--------------------------------------|------|---------------------|--------------|-----|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 | |
| 2013 | 1 | 51,5 | 15 | 44,01 | 56,15 | |
| 2012 | 2 | 38,61 | 7,5 | 39,82 | 1,46 | |
| 2000 | 3 | 38,61 | 5 | 36,93 | 2,83 | |
| 2003 | 4 | 33,02 | 3,75 | 34,58 | 2,43 | |

| | | | | | |
|-------------|----|-------|-------|-------|--------|
| 2011 | 5 | 33,02 | 3 | 32,52 | 0,25 |
| 2008 | 6 | 31,8 | 2,5 | 30,61 | 1,41 |
| 2010 | 7 | 31,75 | 2,14 | 28,80 | 8,73 |
| 2007 | 8 | 22,5 | 1,875 | 27,00 | 20,29 |
| 2009 | 9 | 22,14 | 1,67 | 25,19 | 9,28 |
| 2002 | 10 | 21,08 | 1,5 | 23,28 | 4,86 |
| 2004 | 11 | 18,29 | 1,36 | 21,22 | 8,59 |
| 2006 | 12 | 18,29 | 1,25 | 18,87 | 0,34 |
| 2005 | 13 | 15,6 | 1,15 | 15,98 | 0,15 |
| 2001 | 14 | 14,39 | 1,07 | 11,79 | 6,74 |
| | | | | Suma | 123,51 |

Fuente: Autor

En la tabla 3.15 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Log Normal 3 P, esta información corresponde a la estación meteorológica de Guapán, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera tres parámetros para su aplicación, escala, forma y ubicación.

Tabla 3.15 Precipitaciones estimadas para la estación Guapán a través de la distribución Log Normal 3P

| | | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Log Normal 3P | EEA |
|-------------|----|-----------------------------------|------|----------------------------|--------------|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 |
| 2013 | 1 | 51,5 | 15 | 48,25 | 10,55 |
| 2012 | 2 | 38,61 | 7,5 | 41,92 | 10,94 |
| 2000 | 3 | 38,61 | 5 | 38,01 | 0,36 |
| 2003 | 4 | 33,02 | 3,75 | 35,09 | 4,30 |
| 2011 | 5 | 33,02 | 3 | 32,70 | 0,10 |
| 2008 | 6 | 31,8 | 2,5 | 30,63 | 1,38 |
| 2010 | 7 | 31,75 | 2,14 | 28,76 | 8,96 |
| 2007 | 8 | 22,5 | 1,88 | 27,02 | 20,41 |
| 2009 | 9 | 22,14 | 1,67 | 25,35 | 10,31 |
| 2002 | 10 | 21,08 | 1,5 | 23,71 | 6,89 |
| 2004 | 11 | 18,29 | 1,36 | 22,03 | 13,98 |
| 2006 | 12 | 18,29 | 1,25 | 20,25 | 3,84 |
| 2005 | 13 | 15,6 | 1,15 | 18,23 | 6,93 |

| | | | | | |
|-------------|----|-------|------|-------|--------|
| 2001 | 14 | 14,39 | 1,07 | 15,62 | 1,51 |
| | | | | Suma | 100,47 |

Fuente: Autor

Los resultados del error estándar de ajuste indican que la distribución de probabilidad que presenta mejor ajuste a los datos de la estación Guapán es la Log Normal 3 Parámetros, debido a que presenta menor error que las otras dos distribuciones. Aplicando la fórmula de la función Log Normal 3P para estimar eventos extremos, se determinan los valores de las precipitaciones máximas para periodos de retorno de 20, 30, 50 y 100 años, los mismos que se detallan en la tabla 3.16

Tabla 3.16 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Guapán

| Periodo de retorno – T(años) | Precipitación Máxima Anual (mm) |
|------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 50,80 |
| 30 | 54,35 |
| 50 | 58,77 |
| 100 | 64,74 |

Fuente: Autor

En el grafico 3.5 se observa el comportamiento de los valores estimados a través de la función Log Normal 3P con respecto al registro de datos que se obtuvo de los anuarios meteorológicos de la INAMHI de la estación Guapán.

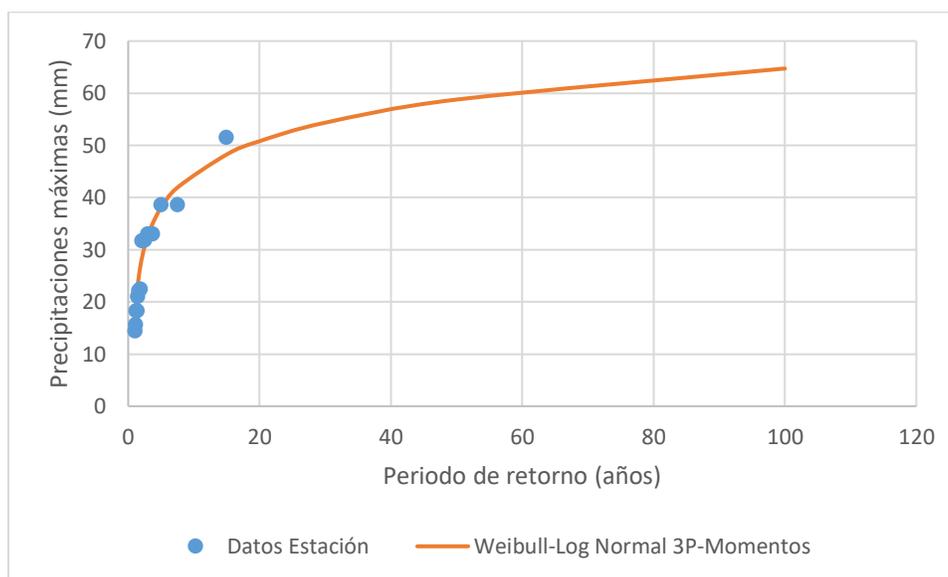


Gráfico 3.5 Comportamiento de los datos registrados por la estación Guapán y los datos estimados a través de Gumbel

Fuente: Autor

- Estación Cañar

En la tabla 3.17 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Gumbel, esta información corresponde a la estación meteorológica de Cañar, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, escala y ubicación

Tabla 3.17 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Gumbel

| año | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Gumbel | | EEA |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------|--------------|
| | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 |
| 2011 | 1 | 36,2 | 15,00 | 33,79 | 5,81 |
| 2002 | 2 | 33,1 | 7,50 | 30,06 | 9,26 |
| 2013 | 3 | 31,1 | 5,00 | 27,79 | 10,99 |
| 2006 | 4 | 25,1 | 3,75 | 26,10 | 1,00 |
| 2012 | 5 | 25 | 3,00 | 24,73 | 0,07 |
| 2003 | 6 | 23,8 | 2,50 | 23,55 | 0,06 |

| | | | | | |
|-------------|----|------|------|-------|-------|
| 2004 | 7 | 23,6 | 2,14 | 22,49 | 1,24 |
| 2010 | 8 | 20,8 | 1,88 | 21,50 | 0,49 |
| 2001 | 9 | 19,2 | 1,67 | 20,56 | 1,85 |
| 2005 | 10 | 18,6 | 1,50 | 19,63 | 1,06 |
| 2000 | 11 | 18,1 | 1,36 | 18,68 | 0,34 |
| 2007 | 12 | 16,8 | 1,25 | 17,68 | 0,77 |
| 2009 | 13 | 16,8 | 1,15 | 16,53 | 0,07 |
| 2008 | 14 | 14,7 | 1,07 | 15,02 | 0,10 |
| | | | | Suma | 33,12 |

Fuente: Autor

En la tabla 3.18 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Normal, esta información corresponde a la estación meteorológica de Guapán donde, XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera dos parámetros para su aplicación, escala y ubicación.

Tabla 3.18 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Normal

| | | Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Normal | | EEA |
|-------------|----|-----------------------------------|------|---------------------|--------------|-----|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 | |
| 2006 | 1 | 36,2 | 15 | 32,92 | 10,79 | |
| 2011 | 2 | 33,1 | 7,5 | 30,35 | 7,55 | |
| 2004 | 3 | 31,1 | 5 | 28,59 | 6,32 | |
| 2012 | 4 | 25,1 | 3,75 | 27,15 | 4,20 | |
| 2010 | 5 | 25 | 3 | 25,89 | 0,79 | |
| 2000 | 6 | 23,8 | 2,5 | 24,72 | 0,85 | |
| 2009 | 7 | 23,6 | 2,14 | 23,61 | 0,00 | |
| 2008 | 8 | 20,8 | 1,88 | 22,52 | 2,95 | |
| 2002 | 9 | 19,2 | 1,67 | 21,40 | 4,86 | |
| 2007 | 10 | 18,6 | 1,5 | 20,24 | 2,69 | |
| 2003 | 11 | 18,1 | 1,36 | 18,98 | 0,77 | |
| 2005 | 12 | 16,8 | 1,25 | 17,54 | 0,55 | |
| 2001 | 13 | 16,8 | 1,15 | 15,78 | 1,05 | |
| 2013 | 14 | 14,7 | 1,07 | 13,21 | 2,21 | |
| | | | | Suma | 45,59 | |

Fuente: Autor

En la tabla 3.19 se detalla los valores de las precipitaciones máximas obtenidas al aplicar la distribución probabilística Log Normal 3P, esta información corresponde a la estación meteorológica de Guapán, donde XT es el evento de diseño estimado para cada periodo de retorno, este método considera tres parámetros para su aplicación, escala, forma y ubicación.

Tabla 3.19 Precipitaciones estimadas para la estación Cañar a través de la distribución Log Normal 3P

| Probabilidad empírica de Weibull | | Distribución Log Normal 3P | | EEA | |
|----------------------------------|----|-----------------------------------|------|-------|--------------|
| año | m | Precipitación Max anual (mm) (Xi) | (T) | XT | (Xi - XT) ^2 |
| 2013 | 1 | 36,2 | 15 | 35,65 | 0,30 |
| 2012 | 2 | 33,1 | 7,5 | 31,69 | 1,99 |
| 2000 | 3 | 31,1 | 5 | 29,26 | 3,37 |
| 2003 | 4 | 25,1 | 3,75 | 27,46 | 5,57 |
| 2011 | 5 | 25 | 3 | 25,99 | 0,97 |
| 2008 | 6 | 23,8 | 2,5 | 24,72 | 0,84 |
| 2010 | 7 | 23,6 | 2,14 | 23,57 | 0,00 |
| 2007 | 8 | 20,8 | 1,88 | 22,52 | 2,94 |
| 2009 | 9 | 19,2 | 1,67 | 21,50 | 5,30 |
| 2002 | 10 | 18,6 | 1,5 | 20,51 | 3,64 |
| 2004 | 11 | 18,1 | 1,36 | 19,50 | 1,95 |
| 2006 | 12 | 16,8 | 1,25 | 18,43 | 2,66 |
| 2005 | 13 | 16,8 | 1,15 | 17,23 | 0,18 |
| 2001 | 14 | 14,7 | 1,07 | 15,67 | 0,95 |
| | | | | Suma | 30,67 |

Fuente: Autor

Los resultados del error estándar de ajuste indican que la distribución de probabilidad que presenta mejor ajuste a los datos de la estación Cañar es la Log Normal 3 Parámetros, debido a que presenta menor error que las otras dos distribuciones. Aplicando la fórmula de la función Log Normal 3p para estimar eventos extremos, se determinan los valores de las precipitaciones

máximas para periodos de retorno de 20, 30, 50 y 100 años, los mismos que se detallan en la tabla

3.20

Tabla 3.20 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno de la estación Cañar

| Periodo de retorno – T(años) | Precipitación Máxima Anual (mm) |
|------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 37,25 |
| 30 | 39,49 |
| 50 | 42,29 |
| 100 | 46,08 |

Fuente: Autor

En el gráfico 3.6 se observa el comportamiento de los valores estimados a través de la función Log Normal 3P con respecto al registro de datos que se obtuvo de los anuarios meteorológicos de la INAMHI de la estación Cañar.

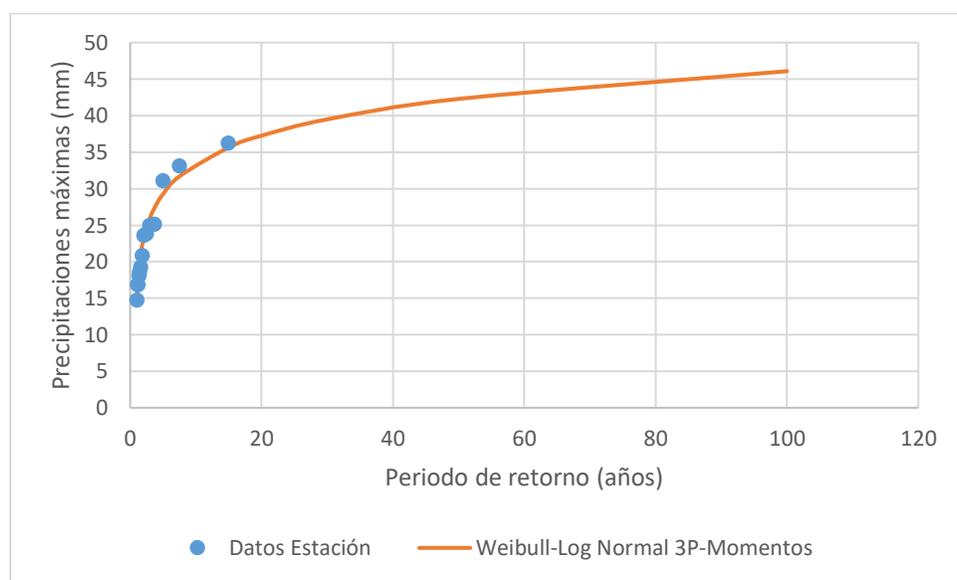


Gráfico 3.6 Comportamiento de los datos registrados por la estación Cañar y los datos estimados a través de Gumbel

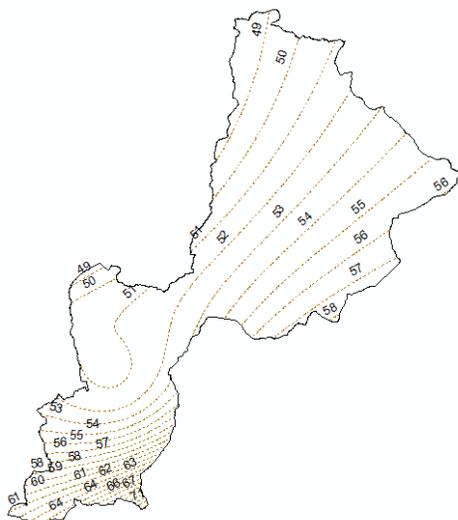
Fuente: Autor

3.6 Interpolación

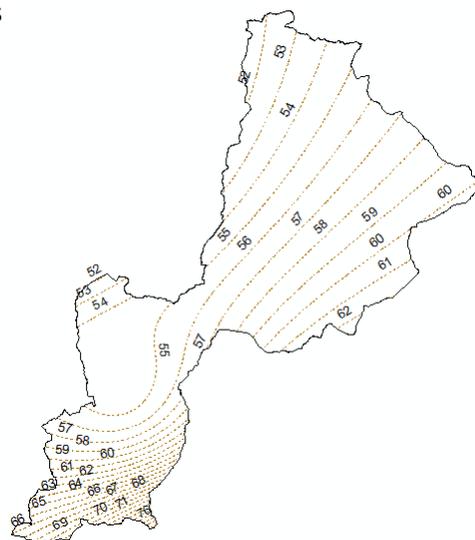
Obtenidos los datos de precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno, se interpola los valores en el programa computacional QGIS, ingresamos la información de las lluvias máximas correspondientes a cada estación y haciendo uso del método IDW de interpolación que tiene el programa de QGIS, se obtuvo las precipitaciones máximas para todo el cantón Azogues en función de los diferentes periodos de retorno definidos.

La técnica de la distancia inversa ponderada, hace referencia a que los puntos más alejados de las estaciones interpoladas pierden influencia, es por eso que se trabaja con estaciones cercanas a la zona de estudio. Para aplicar el método se debe cargar capas, tanto de los valores de las precipitaciones estimadas para el periodo de retorno establecido, como del cantón Azogues para definir el área de estudio, luego se define la variable de medición y se agregan los respectivos valores correspondientes a cada estación. Los resultados de la distribución espacial se presentan a través de mapas, donde se detallan los valores máximos y mínimos de las precipitaciones en diferentes sectores de la zona de estudio. En el gráfico 3.7 se observa las curvas de precipitación máxima con los diferentes valores que ha generado la interpolación para cada periodo de retorno.

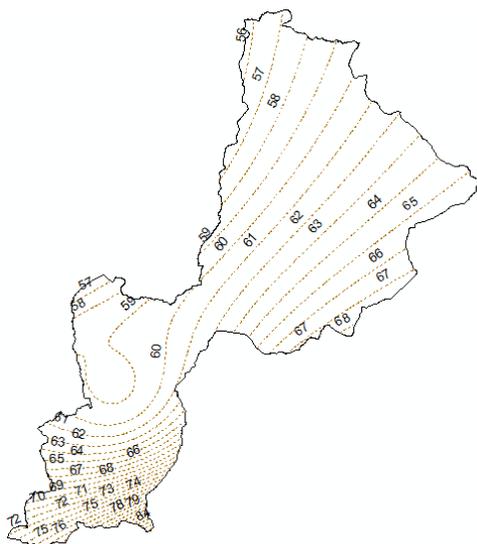
T= 20 años



T= 30 años



T= 50 años



T= 100 años

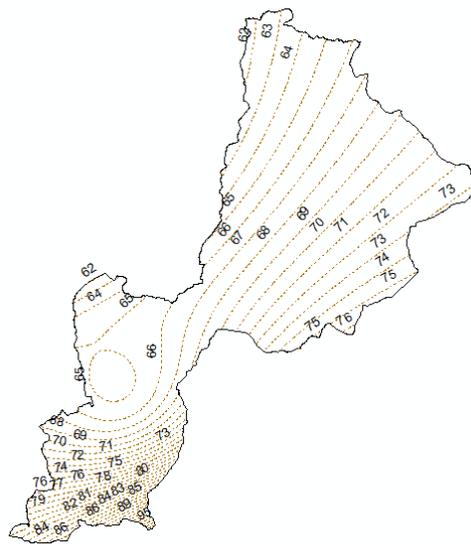


Gráfico 3.7 Interpolación de precipitaciones máximas entre las estaciones meteorológicas.

Fuente: Autor

4 CAPÍTULO IV: Análisis de Resultados

En este capítulo se da a conocer los resultados conseguidos al aplicar el análisis estadístico de datos hidrológicos de las estaciones aforadas. Los métodos para identificar regiones homogéneas dan resultados positivos, cada uno contempla diferentes parámetros para determinar si las estaciones pertenecen a un mismo grupo homogéneo, el resultado de los métodos establece que la estación Gualaceo, Guapán y Cañar presentan un comportamiento estadístico homogéneo.

Definidas las estaciones homogéneas se realiza un ajuste estadístico a diferentes distribuciones de probabilidad, aplicando las distribuciones Normal, Gumbel y Log normal 3 parámetros, de las cuales se obtuvo eventos de diseños para los periodos de retorno establecidos. Se ejecuta la prueba de bondad de error estándar de ajuste, que permite seleccionar la distribución que presenta menor error, la distribución probabilística log Normal 3 Parámetros. Los valores de las precipitaciones máximas anuales estimadas para los diferentes periodos de retorno se detallan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Precipitaciones máximas anuales estimadas (mm)

| T (años) | Estaciones | | |
|------------|------------------------------|--------|-------|
| | Precipitaciones máximas (mm) | | |
| | Gualaceo | Guapán | Cañar |
| 20 | 82,26 | 50,80 | 37,25 |
| 30 | 89,59 | 54,35 | 39,49 |
| 50 | 99,16 | 58,77 | 42,29 |
| 100 | 112,83 | 64,74 | 46,08 |

Fuente: Autor

Los resultados de la distribución espacial de precipitaciones máximas anuales se presentan a través de mapas, donde se detallan los valores máximos y mínimos representados por una escala de diferentes colores. En el gráfico 4.1 se observa que las lluvias más bajas están al norte del cantón

y varían en las diferentes poblaciones hasta llegar a la zona sur donde se encuentran los valores más elevados de precipitaciones, esta información corresponde para un periodo de retorno de 20 años, los valores van desde 47.10 mm hasta 72.27 mm, distribuidos en toda la extensión territorial de la zona de estudio.

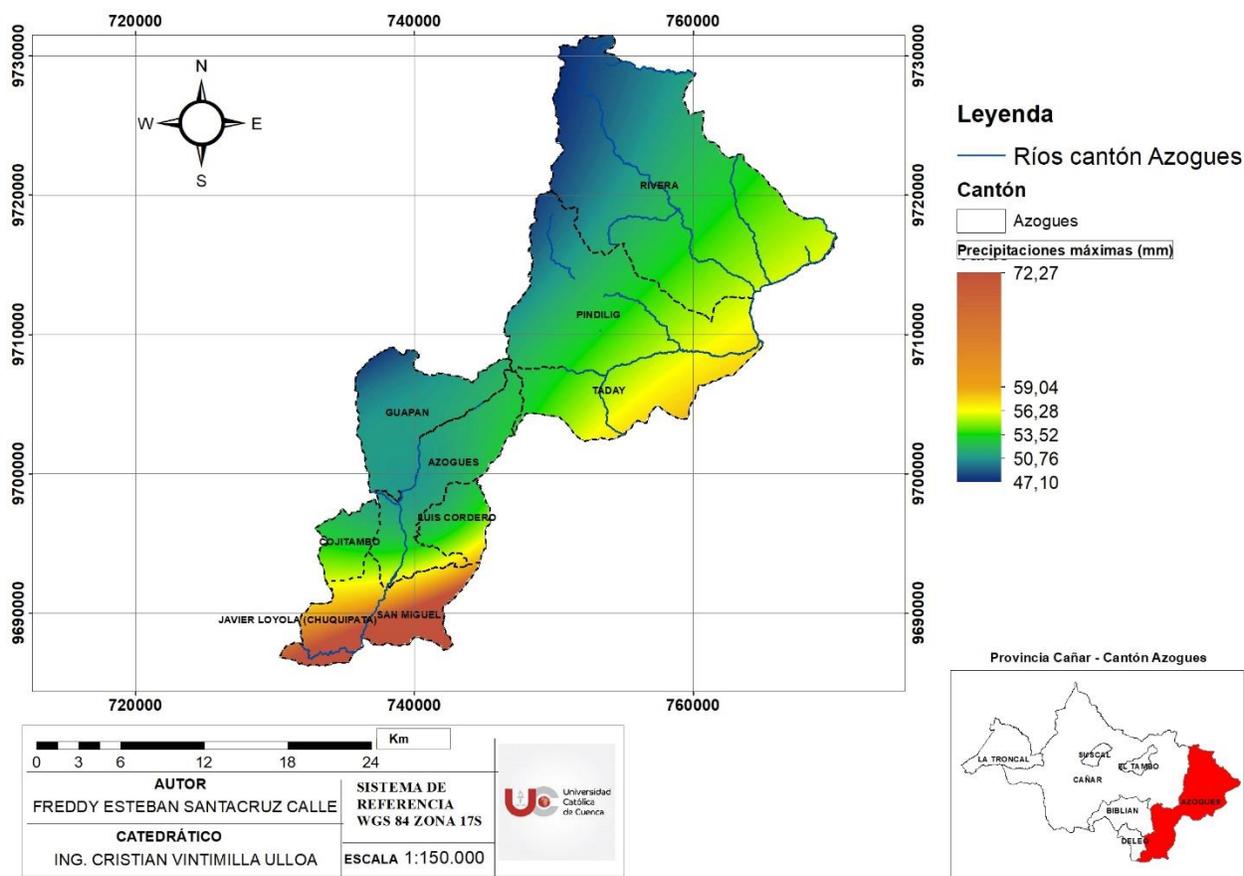


Gráfico 4.1 Precipitaciones máximas cantón Azogues, T=20 años

Fuente: Autor

En el gráfico 4.2 se indica las precipitaciones máximas estimadas para el cantón Azogues correspondientes a un periodo de retorno de 30 años, los valores van desde 51.38 mm hasta 78.41 mm, distribuidos en toda la extensión territorial de la zona estudiada. Los datos hidrológicos varían

con respecto al periodo de retorno de 20 años, siendo estos mayores a los anteriores, sin embargo, las zonas de máximas y mínimas precipitaciones siguen siendo las mismas.

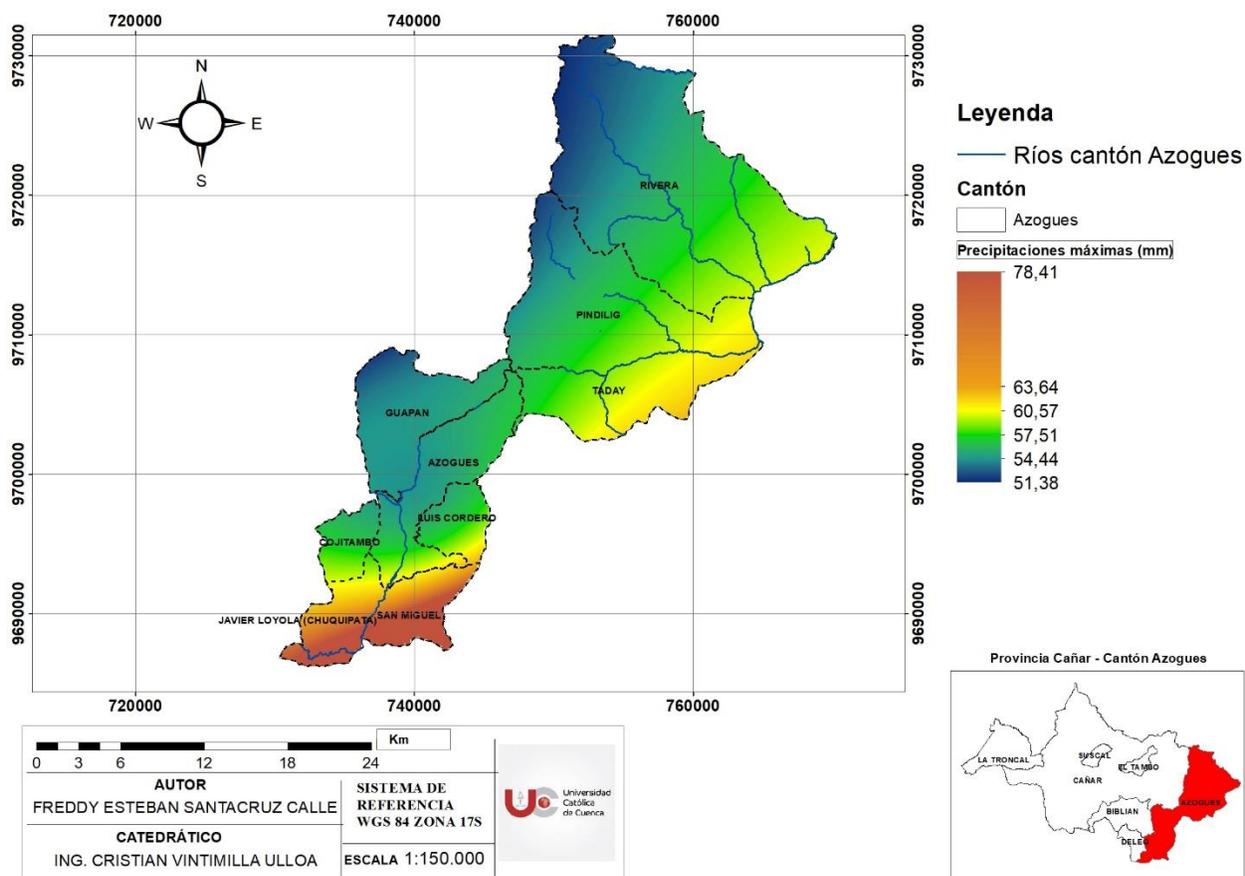


Gráfico 4.2 Precipitaciones máximas cantón Azogues, $T=30$ años

Fuente: Autor

En el gráfico 4.3 se indica las precipitaciones máximas estimadas para el cantón Azogues correspondientes a un periodo de retorno de 50 años, los valores van desde 55.66 mm hasta 86.37 mm, distribuidos en toda la extensión territorial de la zona de estudio. Los datos hidrológicos varían con respecto a los periodos de retorno de 20 y 30 años, siendo estos mayores, sin embargo, las zonas de máximas y mínimas precipitaciones siguen siendo las mismas.

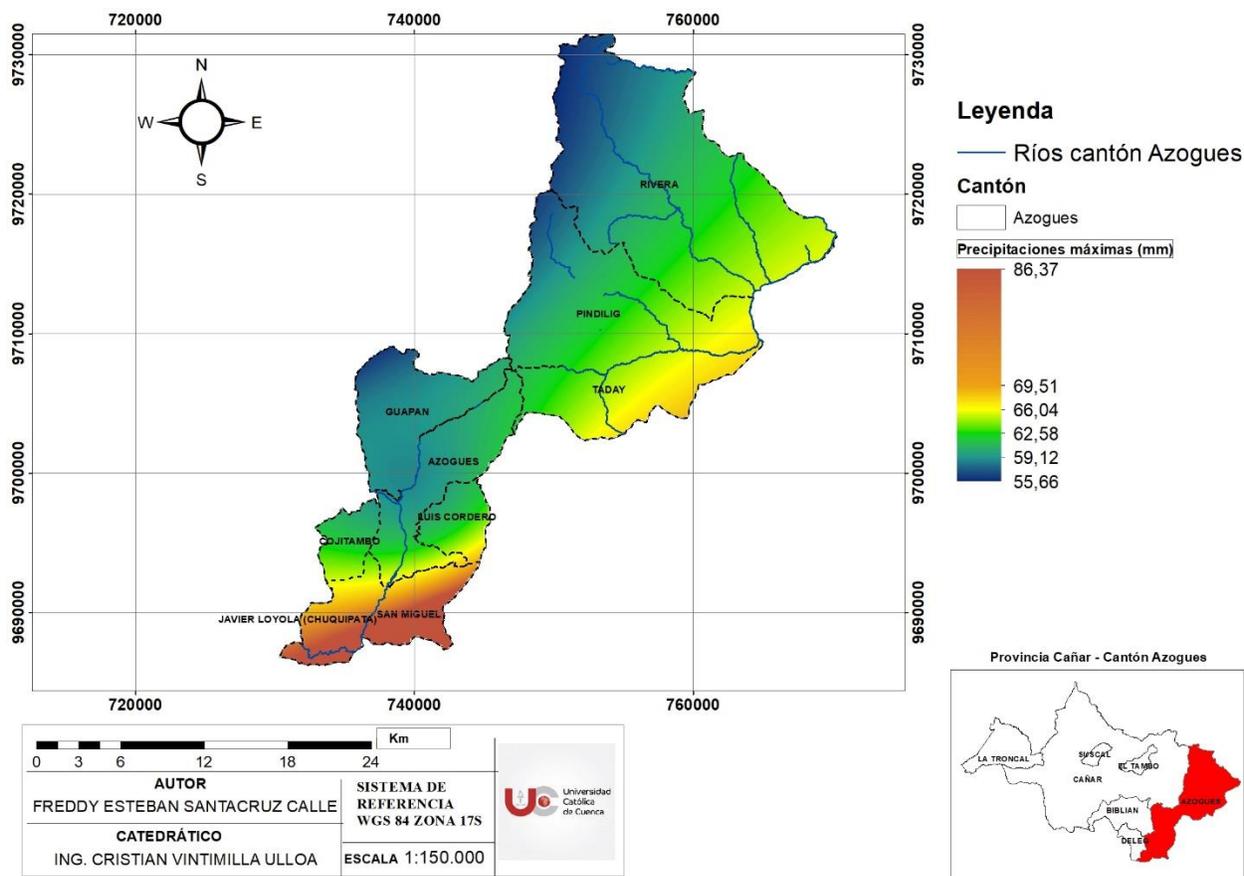


Gráfico 4.3 precipitaciones máximas cantón Azogues, T=50 años

Fuente: Autor

En el gráfico 4.4 se indica las precipitaciones máximas estimadas para el cantón Azogues correspondientes a un periodo de retorno de 100 años, los valores van desde 61.54 mm hasta 97.64 mm, distribuidos en toda la extensión territorial de la zona estudiada. Los datos hidrológicos varían con respecto a los periodos de retorno de 20, 30 y 50 años, siendo estos mayores a los anteriores, sin embargo, las zonas de máximas y mínimas precipitaciones siguen siendo las mismas.

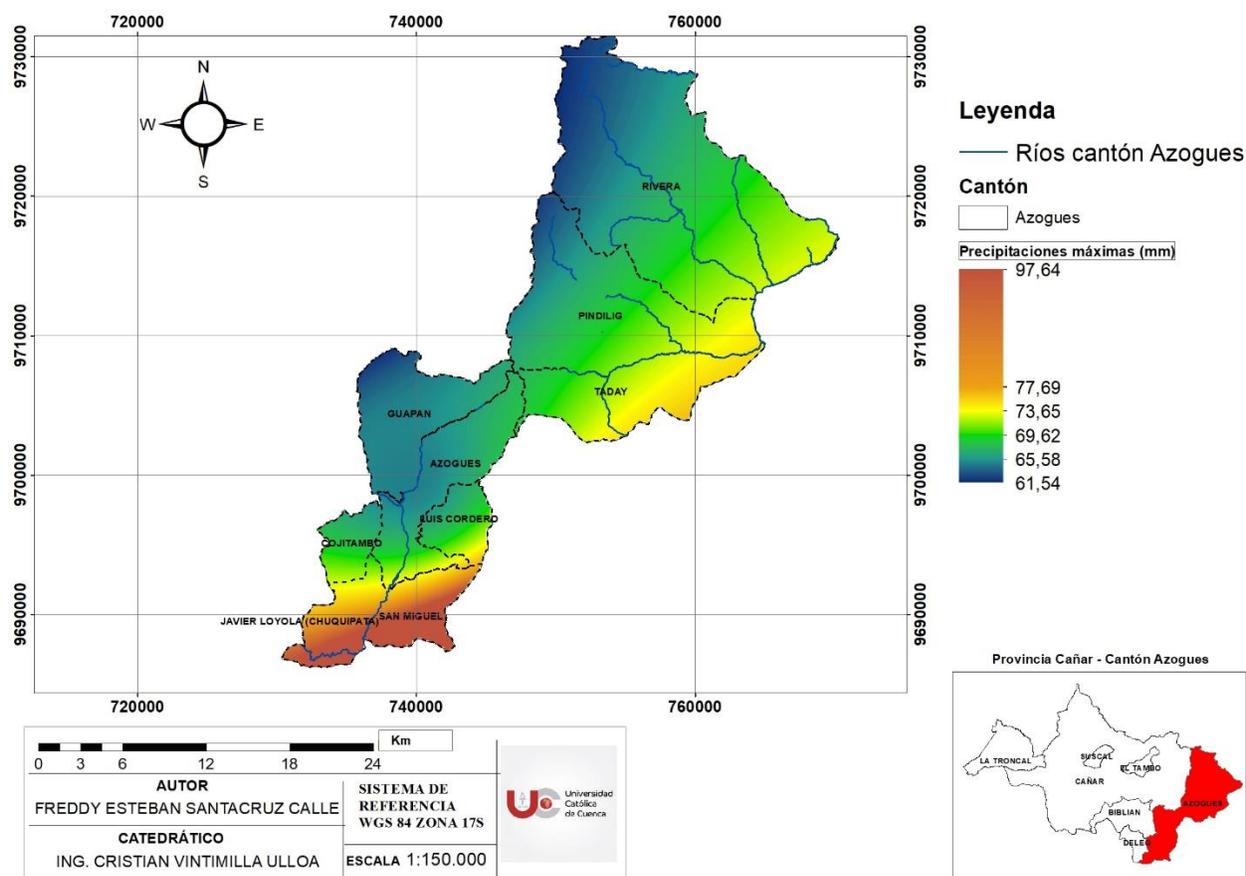


Gráfico 4.4 Precipitaciones máximas cantón Azogues, $T=100$ años

Fuente: Autor

Los gráficos presentan una distribución de precipitaciones máximas para toda la extensión territorial del cantón Azogues, las lluvias se estimaron en función de periodos de retorno y varían desde los 47 mm hasta 98 mm según el periodo de retorno. Los valores más bajos de precipitaciones se presentan al norte-este de la zona de estudio y los más altos se presentan al suroeste de la zona de estudio. Y en la ciudad de Azogues en el centro urbano las precipitaciones varían desde 50 mm hasta 70 mm según el periodo de retorno.

En el cantón Azogues se han presentado diferentes sucesos debido a precipitaciones altas que han caído en diferentes zonas. En años anteriores las zonas más afectadas debido a las lluvias

fueron el centro urbano de Azogues, en noviembre del 2018 se presentaron altas precipitaciones, ocasionando el colapso de alcantarillas que derivó en inundaciones de viviendas, tiendas, almacenes, negocios, entre otros. Uno de los barrios más afectados por las lluvias es el barrio cinco esquinas que se encuentra entre las calles Julio María Matovelle y Juan Bautista Vázquez, de igual manera en el sector de Zhirincay, Charasol y en la Avenida de los alcaldes la lluvia provocó estancamiento de agua en la vía.

En el mes de julio del año 2019 se produjo fuertes lluvias en Azogues, incrementando el caudal del río Burgay, la crecida provocó en la avenida 16 de abril, a lo largo del cauce del río, daños en los muros de contención, tramos de carreteras, muerte de animales que se encontraban en las orillas, inundaciones de algunos sectores afectó a viviendas y zonas agrícolas. Las instalaciones de la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues fueron afectadas por las lluvias, debido a que colapsó el sistema de drenaje, dejando aulas de clase y oficinas inundadas. El río se llevó gran parte del muro de gaviones que protegía la zona, por lo que autoridades actuaron de manera rápida para solucionar este problema y evitar daños futuros.

5 CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se pudo establecer una base de datos con un registro de precipitaciones máximas de al menos 10 años atrás, la información está disponible en los anuarios meteorológicos que ofrece el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en su página Web, la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado facilitó la información hidrológica correspondiente a la estación Guapán. En algunos casos las estaciones tienen información incompleta, debido a fallas en los dispositivos o mantenimiento, este problema se soluciona rellenando los valores faltantes a través de un análisis estadístico en base a los otros datos de cada estación.
- Aplicando los métodos estadísticos parámetro beta, coeficiente de variación y prueba de Fisher, se determinó que los registros de datos hidrológicos de las estaciones meteorológicas: Cañar, Guapán y Gualaceo presentan un comportamiento estadístico similar, formando así una región homogénea, siendo parte fundamental para realizar el estudio hidrológico, el trabajar con datos confiables.
- El ajuste estadístico de precipitaciones máximas anuales, da como resultado la función probabilística Log Normal 3 Parámetros como la distribución probabilística que menor error tiene de entre las tres funciones aplicadas para todas las estaciones. De esta manera se pudo estimar los eventos hidrológicos extremos con la ayuda de los parámetros que tuvieron un comportamiento estadístico aceptable, lo cual facilitó el cálculo de precipitaciones para los periodos de retorno de 20, 30, 50 y 100 años de cada estación meteorológica.

- La interpolación de los datos generó mapas de distribución de precipitaciones máximas en función de los diferentes periodos de retorno a lo largo de toda la extensión territorial de Azogues. Resaltando que las zonas donde existen mayores precipitaciones se encuentran en la zona sur-este del cantón Azogues perteneciente a la parroquia Javier Loyola (Chuquipata), en dicha zona se deben realizar estudios para la construcción de muros de gaviones para evitar desbordamiento del río, como también se puede realizar proyectos de aprovechamiento de agua lluvia.
- Los valores estimados de las precipitaciones máximas en el cantón Azogues permiten realizar diseños y ejecutar obras civiles de manera confiable, garantizando un adecuado funcionamiento estructural de la obra, precautelando la seguridad de las personas y así evitar pérdidas humanas, económicas y ambientales.

Recomendaciones

- Se recomienda extender el estudio para otras variables, como la evaporación, la capacidad de infiltración, la evapotranspiración para tener un conocimiento general del comportamiento estadístico de las variables hidrológicas.
- Se sugiere usar un registro de datos de al menos 10 años atrás y aplicar el mayor número de distribuciones probabilísticas posibles, para determinar que probabilidad es la que presenta mejor ajuste al grupo de datos de cada estación meteorológica analizada.
- Este estudio se debe realizar cada seis meses con el objetivo de actualizar los valores y así generar una base de datos que permitan el cálculo de caudales máximos de diseño para cualquier obra de ingeniería civil que se requiere ejecutar.
- Realizar este estudio en todos los cantones correspondientes a la provincia del cañar y posteriormente en todas las regiones del Ecuador, haciendo uso de la información proporcionada por las estaciones meteorológicas ubicadas en todo el territorio ecuatoriano.

Bibliografía

- Alcalá, V. O. (2016). *Estimación Regional de Gastos de Diseño; Aplicación a las RH 27, 28 y 29 de la República Mexicana*.
- Campos, A. D. F. (2006). *Análisis Probabilístico Univariado de Datos hidrológicos*. IMTA México.
- Dicovski, M. (2002). Estadística Básica para Ingenieros. *UNI Norte*, 16, 2–4.
<https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/estadisticas-uni.pdf>
- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2002). *Técnicas Estadísticas en Hidrología* (p. 298). UNAM Facultad de Ingeniería.
- García, A. J. (2013). *Análisis De Distribuciones Estadísticas Alternativas a Las Tradicionales Para La Optimización De Los Caudales De Cálculo Empleados En Los Estudios Hidrológicos*. 222. <https://core.ac.uk/download/pdf/72043241.pdf>
- Gomariz, F. (2013). Distribución Espacial: interpolación espacial. *Universidad de Alicante*.
- Graciela, A., & Zucarelli, V. (2017). *Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados*. 1–89.
- Keblouti, M., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba- Algeria - Comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia*, 18, 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.058>
- Kite, G. W. (1999). Frequency and risk analyses in hydrology. *Water Resources Publication, Colorado State, University Fort Collins*.

- Lujano Laura, A., Quispe Aragón, J. P., & Lujano Laura, E. (2017). Regionalización de caudales mensuales en la región hidrográfica del Titicaca Puno Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 19(2), 219–230. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.281>
- Mijares, F. J. A. (2012). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Limusa (ed.)).
- Palomino, C. F. (2014). *Análisis regional de precipitaciones máximas en las cuencas chillón, rímac, lurín y parte alta del mantaro*. 99.
- Rufino, M. C., & Saravia, G. A. (2004). *Probabilidad e Inferencia Estadística* (S. Marcos (ed.); Segunda, p. 807). Perú.
- Tavakkoli, A., & Hosseini, S. (2015). Hydrological Regionalization in Relation to Accuracy of Maximum Discharge Estimation. *Current World Environment*, 9(3), 903–912. <https://doi.org/10.12944/cwe.9.3.41>
- Villón, M. (2002). *Hidrología* (Villón). Perú.

Anexos

Tabla1: Datos hidrológicos recolectados sin relleno

| Precipitación Máxima (mm) | | | | | |
|----------------------------------|-------|---------|--------|-------|----------|
| Estaciones | | | | | |
| Años | Cañar | Biblián | Guapán | Paute | Gualaceo |
| 2000 | 18,1 | 33,1 | 18,29 | 66 | 40,29 |
| 2001 | 19,2 | 29,23 | 22,14 | 17,2 | 30 |
| 2002 | 16,8 | 29,23 | 38,61 | 27,6 | 36 |
| 2003 | 14,7 | 33,6 | 31,8 | | 32,7 |
| 2004 | | 30,2 | 31,75 | 27,3 | 50,1 |
| 2005 | 31,1 | 45,5 | | 23,3 | 32,5 |
| 2006 | 25 | 52,6 | 33,02 | 24 | 87,2 |
| 2007 | 18,6 | 44 | 18,29 | 29,6 | 35,9 |
| 2008 | 36,2 | 43,6 | 14,39 | | 38 |
| 2009 | 25,1 | 35,5 | 15,6 | 27,7 | 39,3 |
| 2010 | 20,8 | 29,23 | 22,5 | 33,3 | 45,5 |
| 2011 | 23,6 | 30 | | 37,1 | 61,7 |
| 2012 | 16,8 | 30 | 33,02 | 72,7 | 48,4 |
| 2013 | 23,8 | 31,2 | 38,61 | 78,2 | 26,7 |

Tabla 2: Coeficiente de asimetría de la estación Cañar

| Cálculo del Coeficiente de asimetría (g) | | | | |
|---|---|--------------------------------|--|----------------------|
| año | Precipitación Max año (mm) Xi | Xi-\bar{X} | (xi-\bar{X})³ | Asimetría (g) |
| 2000 | 18,1 | -4,964285714 | -122,340516 | 0,620839365 |
| 2001 | 19,2 | -3,864285714 | -57,7042351 | |
| 2002 | 16,8 | -6,264285714 | -245,818562 | |
| 2003 | 14,7 | -8,364285714 | -585,176097 | |
| 2004 | 33,1 | 10,03571429 | 1010,7526 | |
| 2005 | 31,1 | 8,035714286 | 518,887801 | |
| 2006 | 25 | 1,935714286 | 7,25310168 | |
| 2007 | 18,6 | -4,464285714 | -88,972531 | |
| 2008 | 36,2 | 13,13571429 | 2266,52796 | |
| 2009 | 25,1 | 2,035714286 | 8,43627004 | |
| 2010 | 20,8 | -2,264285714 | -11,6089698 | |
| 2011 | 23,6 | 0,535714286 | 0,15374453 | |
| 2012 | 16,8 | -6,264285714 | -245,818562 | |
| 2013 | 23,8 | 0,735714286 | 0,39822413 | |
| | | $\Sigma=$ | 2454,97022 | |

Tabla 3: Coeficiente de asimetría de la estación Biblián

| Cálculo del Coeficiente de asimetría (g) | | | | |
|---|---|--------------------------------|--|----------------------|
| año | Precipitación Max año (mm) Xi | Xi-\bar{X} | (xi-\bar{X})³ | Asimetría (g) |
| 2000 | 33,1 | -2,399285714 | -13,8116608 | 0,92249748 |
| 2001 | 29,23 | -6,269285714 | -246,407651 | |
| 2002 | 29,23 | -6,269285714 | -246,407651 | |
| 2003 | 33,6 | -1,899285714 | -6,85126719 | |
| 2004 | 30,2 | -5,299285714 | -148,816815 | |
| 2005 | 45,5 | 10,00071429 | 1000,2143 | |
| 2006 | 52,6 | 17,10071429 | 5000,83762 | |
| 2007 | 44 | 8,500714286 | 614,279834 | |
| 2008 | 43,6 | 8,100714286 | 531,581605 | |
| 2009 | 35,5 | 0,000714286 | 3,6443E-10 | |
| 2010 | 29,23 | -6,269285714 | -246,407651 | |
| 2011 | 30 | -5,499285714 | -166,310187 | |
| 2012 | 30 | -5,499285714 | -166,310187 | |
| 2013 | 31,2 | -4,299285714 | -79,4673852 | |
| | | $\Sigma=$ | 5826,12291 | |

Tabla 4: Coeficiente de asimetría de la estación Paute

| año | Precipitación Max año (mm) Xi | $Xi-\bar{X}$ | $(xi-\bar{X})^3$ | Asimetría (g) |
|------|----------------------------------|--------------|------------------|---------------|
| 2000 | 66 | 27,61428571 | 21057,2398 | 1,023571925 |
| 2001 | 17,2 | -21,18571429 | -9508,87926 | |
| 2002 | 27,6 | -10,78571429 | -1254,71975 | |
| 2003 | 37,2 | -1,185714286 | -1,66701749 | |
| 2004 | 27,3 | -11,08571429 | -1362,35736 | |
| 2005 | 23,3 | -15,08571429 | -3433,18838 | |
| 2006 | 24 | -14,38571429 | -2977,10596 | |
| 2007 | 29,6 | -8,785714286 | -678,158528 | |
| 2008 | 36,2 | -2,185714286 | -10,4419155 | |
| 2009 | 27,7 | -10,68571429 | -1220,14283 | |
| 2010 | 33,3 | -5,085714286 | -131,539405 | |
| 2011 | 37,1 | -1,285714286 | -2,12536443 | |
| 2012 | 72,7 | 34,31428571 | 40404,049 | |
| 2013 | 78,2 | 39,81428571 | 63112,7038 | |
| | | $\Sigma=$ | 103993,667 | |

Tabla 5: Coeficiente de asimetría de la estación Gualaceo

| Cálculo del Coeficiente de asimetría (g) | | | | |
|--|-------------------------------|--------------|------------------|---------------|
| año | Precipitación Max año (mm) Xi | $Xi-\bar{X}$ | $(xi-\bar{X})^3$ | Asimetría (g) |
| 2000 | 40,29 | -2,873571429 | -23,7282654 | 1,53057987 |
| 2001 | 30 | -13,16357143 | -2280,97856 | |
| 2002 | 36 | -7,163571429 | -367,611244 | |
| 2003 | 32,7 | -10,46357143 | -1145,618 | |
| 2004 | 50,1 | 6,936428571 | 333,739611 | |
| 2005 | 32,5 | -10,66357143 | -1212,57343 | |
| 2006 | 87,2 | 44,03642857 | 85395,7524 | |
| 2007 | 35,9 | -7,263571429 | -383,222178 | |
| 2008 | 38 | -5,163571429 | -137,673568 | |
| 2009 | 39,3 | -3,863571429 | -57,6722423 | |
| 2010 | 45,5 | 2,336428571 | 12,7543264 | |
| 2011 | 61,7 | 18,53642857 | 6369,10173 | |
| 2012 | 48,4 | 5,236428571 | 143,583836 | |
| 2013 | 26,7 | -16,46357143 | -4462,4376 | |
| | | $\Sigma=$ | 82183,4168 | |

Tabla 6: Coeficiente de asimetría de la estación Guapán

| Cálculo del Coeficiente de asimetría (g) | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|----------------------|
| año | Precipitación Max año (mm) Xi | Xi-\bar{X} | (xi-\bar{X})³ | Asimetría (g) |
| 2000 | 18,29 | -9,61 | -887,503681 | 0,533294609 |
| 2001 | 22,14 | -5,76 | -191,102976 | |
| 2002 | 38,61 | 10,71 | 1228,48091 | |
| 2003 | 31,8 | 3,9 | 59,319 | |
| 2004 | 31,75 | 3,85 | 57,066625 | |
| 2005 | 21,08 | -6,82 | -317,214568 | |
| 2006 | 33,02 | 5,12 | 134,217728 | |
| 2007 | 18,29 | -9,61 | -887,503681 | |
| 2008 | 14,39 | -13,51 | -2465,84655 | |
| 2009 | 15,6 | -12,3 | -1860,867 | |
| 2010 | 22,5 | -5,4 | -157,464 | |
| 2011 | 51,5 | 23,6 | 13144,256 | |
| 2012 | 33,02 | 5,12 | 134,217728 | |
| 2013 | 38,61 | 10,71 | 1228,48091 | |
| | | $\Sigma=$ | 9218,53645 | |

Tabla 7: Parámetros para el cálculo de la distribución Normal

| T | F(x) | V | Ut |
|----------|-------------|----------|-----------|
| 15,00 | 0,067 | 2,327 | 1,501 |
| 7,50 | 0,133 | 2,007 | 1,111 |
| 5,00 | 0,2 | 1,794 | 0,841 |
| 3,75 | 0,267 | 1,626 | 0,623 |
| 3,00 | 0,333 | 1,482 | 0,430 |
| 2,50 | 0,4 | 1,354 | 0,253 |
| 2,14 | 0,467 | 1,235 | 0,083 |
| 1,88 | 0,467 | 1,235 | -0,083 |
| 1,67 | 0,400 | 1,354 | -0,253 |
| 1,50 | 0,333 | 1,482 | -0,430 |
| 1,36 | 0,267 | 1,626 | -0,623 |
| 1,25 | 0,200 | 1,794 | -0,841 |
| 1,15 | 0,133 | 2,007 | -1,111 |
| 1,07 | 0,067 | 2,327 | -1,501 |

Tabla 8: Resultados del error estándar de ajuste de las tres estaciones analizadas

| | Estaciones meteorológicas | | |
|---------------|---------------------------|-------|--------|
| | Gualaceo | Cañar | Guapán |
| | EEA | EEA | EEA |
| Gumbel | 414,11 | 33,12 | 106,32 |
| Normal | 674,59 | 45,59 | 123,51 |
| Log Normal 3P | 353,14 | 30,67 | 100,47 |

Oficio Nro. UCACUE-CAVU-UT-2020-001-AP
Azogues, 16 de junio de 2020

Ingeniero Magister
Ricardo Romero González
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA - SEDE AZOGUES
Su despacho.

ASUNTO: Certificado de similitud Turnitin

REFERENCIA: Sin referencia

Reciba un cordial y atento saludo. Entrego el presente *Certificado de Similitud Turnitin* del trabajo de titulación "*Estimación estadística de precipitaciones máximas en el cantón Azogues*" elaborado por la estudiante SANTACRUZ CALLE FREDDY ESTEBAN, el resultado se detalla en el cuadro mostrado a continuación con un índice de similitud el 3%, declarándolo **APROBADO** para continuar con su proceso de titulación.

Santacruz Calle E1

| INFORME DE ORIGINALIDAD | | | |
|-------------------------|---|---------------|-------------------------|
| 3% | 3% | 1% | % |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |
| FUENTES PRIMARIAS | | | |
| 1 | senamhi.gob.pe Fuente de Internet | | 1% |
| 2 | www.conelsa.com.ec Fuente de Internet | | <1% |
| 3 | docplayer.es Fuente de Internet | | <1% |

Particular que pongo a su conocimiento para fines pertinentes.

Atentamente,
DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



Ing. Cristian Arturo Vintimilla Ulloa MSc.
RESPONSABLE DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN
INGENIERÍA CIVIL - SEDE AZOGUES

www.ucacue.edu.ec

PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo Freddy Esteban Santacruz Calle portador de la cédula de ciudadanía No. 0302195599. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “ Estimación estadística de precipitaciones máximas en el cantón Azogues” de conformidad a los establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de Los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de Conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 22 de julio de 2020



F:

El Bibliotecario de la Sede Azogues

CERTIFICA:

Que: **SANTACRUZ CALLE FREDDY ESTEBAN**, con cédula de ciudadanía Nro. **0302195599**, de la Carrera de: **INGENIERÍA CIVIL**

No adeuda libros, a esta fecha: **17 de junio del 2020**.



Byron Alonso Torres Romo
Bibliotecario

Biblioteca Universitaria
MONS. "FROILAN POZO QUEVEDO"