



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**EVALUACIÓN DEL CRITERIO DE INFORMACIÓN AKAIKE
(AIC) PARA EL AJUSTE DE MODELOS, PARA CALCULAR
CAUDAL MÁXIMO EN LA CUENCA YABROCO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. HUGO GILDRES MIRANDA MONASTERIO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A DIOS por darme Vida y Salud y así ponerme a su voluntad para llevar adelante las metas trazadas.

A mis padres MIGUEL MIRANDA CHAMBILLA e INÉS MONASTERIO BALBOA por darme siempre su apoyo incondicional y la oportunidad mis sueños criándome siempre con amor, cariño y mucha perseverancia dispuesto a servir a la sociedad.

Ala compañera de mi vida MARIBEL por su apoyo y comprensión en todo momento y a mis dos amores MARX e ISABEL sin ellos nada hubiera tenido sentido, son el motor de mi vida para luchar y llegar a cada objetivo trazado.

A mis hermanos HÉCTOR, YENI, RENE y YENI y mi tío SANTIAGO MIRANDA siempre estuvieron en los momentos que los necesite.

A los amigos que en verdad que estuvieron siempre ahí dándome los ánimos para seguir luchando por mis metas y no desfallecer a mi pueblo querido Zepita por sus días tan maravillosas vividas aprendiendo mucho para el porvenir.

Hugo Gildres Miranda Monasterio



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater “Universidad Nacional del Altiplano – Puno “Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por su existencia, donde tuve la oportunidad de recibir conocimientos para poder desempeñar en la vida profesional de Ingeniería Agrícola.

Al Mgr. Roberto Alfaro Alejo por su apoyo como asesor y por compartir su sabia experiencia y orientación profesional, su comprensión y tolerancia que gracias a ello puede concluir el presente trabajo de investigación.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por sus conocimientos que me brindaron a lo largo de mi formación Universitaria en especial al Dr. Germán Belizario Quispe por sus consejos para llegar a ser un profesional.

A todas aquellas personas, compañeros de estudio, amigos que me brindaron su apoyo, tiempo e información para el logro del presente trabajo de investigación.

Hugo Gildres Miranda Monasterio



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 15

ABSTRACT..... 16

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 18

1.1.1. Pregunta general..... 19

1.1.2. Preguntas específicas. 19

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... 19

1.3. HIPÓTESIS..... 20

1.3.1. Hipótesis general..... 21

1.3.2. Hipótesis específicas..... 21

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 21

1.4.1. Objetivo general..... 21

1.4.2. Objetivos específicos. 21

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES..... 23

2.2. MARCO CONCEPTUAL..... 25



2.2.1. Criterios de información Akaike (AIC).....	25
2.2.2. Modelo hidrológico HYFRAN.	26
2.2.3. Selección del modelo.	29
2.2.4. Criterio de información mixta.....	29
2.2.5. Máxima avenida.....	30
2.2.6. Precipitación máxima de 24 horas.	30
2.2.7. Hidrograma.	31
2.2.8. Análisis de consistencia.	32
2.2.9. Prueba de ajuste chi cuadrado.....	34
2.2.10. Características geomorfológicas.	35
2.2.11. Métodos de estimación de máximas avenidas.	37
2.2.12. Distribución normal.	37
2.2.13. Distribución log-normal de II parámetros.	39
2.2.14. Distribución Gumbel o extremo tipo I.....	41
2.2.15. Distribución Gamma o Pearson de III Parámetros.	43
2.2.16. Proceso de modelado de la superficie de elevación digital.	45
2.2.17. Modelo de elevación digital.....	45
2.2.18. Aplicación de los DEM en la modelación hidrológica.	46
2.2.19. Dirección de flujo.	46
2.2.20. Acumulación de flujo.....	47
2.2.21. Cuenca hidrográfica.	48
2.2.22. Característica geomorfológicas.....	48
2.2.23. Parámetro de forma de la cuenca.	49
2.2.24. Área de la cuenca.	49
2.2.25. Estimación del caudal máximo.	50



2.2.26. Integración de sistemas de información geográfica SIG.	50
2.2.27. Herramientas de sistema de información geográfica.	51
2.2.28. Generación del modelo HEC HMS.	52

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. POBLACIÓN Y MUESTRA	53
3.1.1. Población	53
3.1.2. Muestra.	53
3.2. MATERIALES.....	53
3.2.1. Imágenes raster.	54
3.2.2. Delimitación de cuenca y sus parámetros.	55
3.2.3. Parámetros de forma.	56
3.2.4. Parámetros asociados a la longitud.	57
3.2.5. Categoría del sistema de clasificación de tierras.	58
3.2.6. Categoría del sistema de clasificación de tierras.	58
3.2.7. Altitud media de la cuenca.....	59
3.2.8. Pendiente promedio de la cuenca.....	60
3.2.9. Perfil longitudinal del cauce.	60
3.2.10. Pendiente del cauce principal.	61
3.2.11. Densidad de drenaje.....	62
3.2.12. Tiempo de concentración.....	63
3.2.13. Resumen de parámetros geomorfológicos.	63
3.3. METODO.	65
3.3.1. Verificación de hipótesis estadística.....	65
3.3.2. Análisis de la estadística inferencial no paramétrica.	66



3.3.3. Análisis de la función de distribución de probabilidad empírica.....	66
3.3.4. Modelo estadístico Smirnov-Kolgomorov.....	67
3.3.5. Modelo estadístico de Akaike (AIC)	69
3.3.6. Ajuste por el método de gráfico.....	70
3.3.7. Prueba de chi cuadrado.	70
3.3.8. Modelo hidrológico HEC HMS.....	70
3.3.9. Transformación de precipitación a escorrentía.....	71
3.3.10. Función de infiltración.....	71

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PARAMETROS DE LA CUENCA.....	72
4.1.1. Determinación de la pendiente.	72
4.1.2. Cobertura vegetal y uso de los suelos.....	72
4.1.3. Delimitación y determinación del modelo de la cuenca Yabroco.	73
4.1.4. Información pluviométrica e hidrográfica.	75
4.1.5. Registro de precipitación máxima de 24 horas.....	75
4.1.6. Verificación de la hipótesis estadística en la información pluviografica utilizando el criterio de información Akaike (AIC).	79
4.1.7. Estimación de los parámetros de Máxima Verosimilitud.....	81
4.1.8. Ajuste de función de distribución y estimación de parámetros.	81
4.1.9. Análisis de probabilidad de distribución empírica para eventos extremos.....	83
4.2. RESULTADO DEL MODELO ESTADÍSTICO.....	92
4.3. SELECCIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO.....	95
4.3.1. Criterio de Akaike AIC para diferentes periodos de retorno.....	95
4.3.2. Selección de la función de probabilidad.....	96



4.3.3. Cálculo de la curva IDF para un periodo de retorno de 100 años.	97
4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MARGEN DE ERROR.....	101
4.5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN POR EL MÉTODO DE ISOYETAS.....	102
4.6. CAUDAL GENERADO POR EL MODELO HEC HMS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS	104
4.6.1. Determinación del hietograma de diseño.....	105
V. CONCLUSIONES.....	112
VI. RECOMENDACIONES	113
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
ANEXOS.....	119
Anexo 1. Tablas de registro de precipitaciones de las estaciones meteorológicas.....	119
Anexo 2. Mapa de la delimitación de la cuenca en estudio.....	124
Anexo 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas	125
Anexo 4. Mapa de distribución de precipitación utilizando el método de isoyetas	126
Anexo 5. Mapa de distribución de precipitación por el método del polígono thiessen	127
Anexo 6. Elaboración para la determinación del orden de la red de drenaje	128
Anexo 7. Mapa de la pendiente de red de drenaje principal.....	129
Anexo 8. Mapa de la delimitación de la pendiente de la cuenca.....	130
Anexo 9. Mapa para la capacidad de uso mayor del suelo.....	131

Área: Ciencias de la Ingeniería

Línea: Recursos Naturales y Medio Ambiente

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de agosto 2021.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la cuenca	55
Tabla 2. Datos para la obtención de la curva Hipsométrica	56
Tabla 3. Descripción de tierras según capacidad de uso mayor	59
Tabla 4. Perfil longitudinal del río principal.....	61
Tabla 5. Resumen de parámetros geomorfológicos de la cuenca Yabroco	64
Tabla 6. Nivel de significancia – Smirnov-Kolmogorov.....	69
Tabla 7. Cobertura vegetal del suelo para la cuenca Yabroco.....	73
Tabla 8. Características morfo métricas de la cuenca Yabroco	74
Tabla 9. Características principales del cauce principal	74
Tabla 10. Resumen de las estaciones meteorológicas de influencia para el estudio	75
Tabla 11. Cuadro de verificación de hipótesis estación Susapaya	80
Tabla 12. Cuadro de verificación de hipótesis estación Vilacota	80
Tabla 13. Cuadro de verificación de hipótesis estación Candarave	80
Tabla 14. Cuadro de verificación de hipótesis estación Sitajara	81
Tabla 15. Cuadro de verificación de hipótesis estación Aricota.....	81
Tabla 16. Cuadro de probabilidad y estimación de parámetros estación Susapaya.....	82
Tabla 17. Cuadro de probabilidad y estimación de parámetros estación Vilacota	82
Tabla 18. Cuadro de probabilidad y estimación de parámetros estación Candarave.....	82
Tabla 19. Cuadro de probabilidad y estimación de parámetros estación Sitajara	83
Tabla 20. Cuadro de distribución teórica Weibull	84
Tabla 21. Cuadro de distribución teórica Gamma	85
Tabla 22. Cuadro de distribución teórica estación Candarave.....	87
Tabla 23. Cuadro de distribución teórica estación Sitajara.....	88
Tabla 24. Cuadro de distribución teórica estación Aricota.....	90



Tabla 25. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov estación Vilacota	92
Tabla 26. Verificación estadística Chi-Cuadrado estación Vilacota	92
Tabla 27. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov estación Susapaya.....	92
Tabla 28. Verificación estadística Chi-cuadrado estación Susapaya.....	93
Tabla 29. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov estación Candarve.....	93
Tabla 30. Verificación estadística Chi-Cuadrado estación Candarave.....	93
Tabla 31. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov estación Sitajara.....	94
Tabla 32. Verificación estadística Chi - Cuadrado estación Sitajara.....	94
Tabla 33. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov estación Aricota	94
Tabla 34. Verificación estadística Chi Cuadrado estación Aricota	95
Tabla 35. Selección del modelo estadístico para T=100 años	96
Tabla 36. Cuadro de precipitación según la probabilidad de distribución.....	97
Tabla 37. Cuadro de precipitación máxima 24 h.....	98
Tabla 38. Cuadro de intensidad de duración de 1 a 24 horas	99
Tabla 39. Cuadro de intensidad de duración.....	100
Tabla 40. Cuadro de distribución teórica aceptable.....	102
Tabla 41. Comparación de los modelos para T= 100	102
Tabla 42. Cuadro resumen de precipitaciones dentro de la cuenca	103
Tabla 43. Cuadro de valores delta tabular y teórico de las distribuciones de frecuencia	103
Tabla 44. Cuadro de parámetros de la sub cuencas para el análisis del HEC HMS....	104
Tabla 45. Método de Hietograma de	106
Tabla 46. Hietograma de diseño y distribución de lluvias para un T de 100 años	107
Tabla 47. Registro de precipitación máxima 24 h estación Susapaya	119
Tabla 48. Registro de precipitación máxima 24 h estación Vilacota.....	120



Tabla 49. Registro de precipitación máxima 24h estación Candarave	121
Tabla 50. Registro de precipitación máxima 24 h estación Sitajara	122
Tabla 51. Registro de precipitación máxima 24 h estación Aricota	123



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva masa.....	33
Figura 2. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.	57
Figura 3. Perfil del río principal Yabroco.....	60
Figura 4. Pendiente del cauce principal.....	62
Figura 5. Registro de PP Máx 24 horas estación Susapaya.	76
Figura 6. Registro de PP Máx 24 horas estación Vilacota.	77
Figura 7. Registro de PP Máx 24 horas estación Candarave.....	77
Figura 8. Registro de PP Máx 24 horas estación Sitajara.....	78
Figura 9. Registro de PP Máx 24 horas estación Aricota.....	78
Figura 10. Distribución teórica Weibull estación Susapaya.....	84
Figura 11. Histograma de función de probabilidad Weibull.	85
Figura 12. Distribución teórica Gumbel estación Vilacota.	86
Figura 13. Histograma de función de probabilidad estación Vilacota.....	86
Figura 14. Distribución teórica Log Pearson III estación Candarave.....	87
Figura 15. Histograma de función de probabilidad estación Candarave.	88
Figura 16. Distribución teórica Log Normal estación Sitajara.....	89
Figura 17. Hidrograma de función de probabilidad estación Sitajara.	89
Figura 18. Distribución teórica Normal estación Aricota.....	90
Figura 19. Hidrógrama de función de probabilidad estación Aricota.	91
Figura 20. Precipitación máxima diaria.....	98
Figura 21. Regresión potencial.....	100
Figura 22. Curvas de intensidad de tiempo de duración.....	101
Figura 23. Hidrograma unitario adimensional.....	104
Figura 24. Planteamiento para el HEC HMS.	105



Figura 25. Hietograma para T=100 años.	108
Figura 26. Confluencia de crecidas para T= 100 años.	109
Figura 27. Determinación del caudal máximo.....	109
Figura 28. Mapa de la delimitación de la cuenca hidrográfica.....	124
Figura 29. Mapa de ubicación de estaciones hidrográficas	125
Figura 30. Mapa de Isoyetas de precipitación max para un T =100.....	126
Figura 31. Mapa de polígono de Thiessen para un T=100	127
Figura 32. Mapa de orden de ríos de la cuenca hidrográfica.....	128
Figura 33. Mapa de la pendiente del cauce principal	129
Figura 34. Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica	130
Figura 35. Mapa de capacidad de uso mayor de suelos de la cuenca hidrográfica	131



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AIC	: Criterio de información Akaike.
HYFRAN	: Análisis de Frecuencia Hidrológica.
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
TC	: Tiempo de Concentración
DGIAR	: Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego.
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SNIRH	: Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos
SWC	: Conservación del suelo y del agua (Soil and water conservation)
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería.
EICP	: Estimación de intervalos de confianza de los parámetros
ArcGIS	: Sistema de Información Geográfico
DEM	: Modelo de elevación digital
UTM	: Unidad de medida
IDF	: Frecuencia de Intensidad
SCS	: Servicio de conservación de suelos
CN	: Numero de Curva
Cp	: Coeficiente adimensional



RESUMEN

La evaluación de modelos estadísticos para la obtención de caudales máximos son procesos complejos de analizar, uno de los procedimientos de bondad de ajuste cuando se utilizan las distribuciones de probabilidad de avenidas es el Criterio de Información de Akaike (AIC). El objetivo de la presente investigación es la aplicación del AIC para el ajuste de un modelo de distribución de probabilidad de precipitación máxima en 24 horas para la obtención de caudal máximo en la cuenca Yabroco. Se recurrió a modelos estadísticos para la evaluación y ajuste mediante Chi-cuadrado y Smirnov-Kolmogórov para su selección del mejor modelo de distribución de probabilidad de la información, se validó mediante el AIC integrados por el modelo hidrológico Hyfran. Se pudo verificar las distribuciones Pearson III, Weibull, LogNormal, Gamma y Normal, funciones de mejor ajustan para las estaciones Candarave, Susapaya, Sitajara, Vilacota y Aricota, con valores AIC de 345.62, 315.98, 557.04, 223.67 y 34.81, respectivamente. Con la lluvia de diseño se utilizó el programa HEC – HMS generándose el caudal máximo de 212.1 m³/s para un periodo de retorno de 100 años mediante el modelo de hidrograma unitario SCS. A partir de ello se puede observar que el AIC permite evaluar los métodos cuantitativos asintóticos, no asintóticos y generales, para la selección de modelos en la cuenca Yabroco.

Palabras clave: Akaike, caudal pico, efectos mixtos, Hyfran



ABSTRACT

The evaluation of statistical models to obtain maximum flows are complex processes to analyze, one of the goodness of fit procedures when using the probability distributions of floods is the Akaike Information Criterion (AIC). The objective of the present investigation is the application of the AIC for the adjustment of a distribution model of maximum precipitation probability in 24 hours to obtain maximum flow in the Yabroco basin. Statistical models were used for the evaluation and adjustment using Chi-square and Smirnov-Kolmogórov for their selection of the best probability distribution model of the information, it is validated by means of the AIC integrated by the Hyfran hydrological model. It was possible to verify the Pearson III, Weibull, LogNormal, Gamma and Normal distributions, functions of best fit for the Candarave, Susapaya, Sitajara, Vilacota and Aricota stations, with AIC values of 345.62, 315.98, 557.04, 223.67 and 34.81, respectively. With the design rain, the HEC - HMS program was used, generating the maximum flow of 212.1 m³/s for a return period of 100 years using the SCS unit hydrograph model. From this it can be observed that the AIC allows evaluating asymptotic, non-asymptotic and general quantitative methods for the selection of models in the Yabroco basin.

Keywords: Akaike, peak flow, mixed effects, Hyfran.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación nace a partir de la problemática que ocasiona los daños causados por inundación en la cuenca Yabroco, los daños a viviendas, infraestructura, escuelas, vías, cultivos, etc. para lo cual se planteó ejecutar un trabajo de investigación, es por eso que surge la necesidad de proponer una metodología para la estimación de hidrogramas de crecientes asociados a diferentes periodos de retorno, basados en el Criterio de Información Akaike (AIC) (H. Akaike, 1974), con esto se pretende obtener el modelamiento de lluvia-escorrentía en el software HEC HMS, esta información es oportuna y necesaria para la aplicación de diseño hidráulico, para diferentes proyectos, por otro lado, evalúa el crecimiento de las precipitaciones observadas a causa del cambio climático (Belizario, 2014, 2015) siendo este uno de los factores que hoy en día se está tomando en cuenta como causantes de desbordes de los ríos y huaycos, activación de quebradas adyacentes, etc. el modelo HEC HMS permitió simular el caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años en la cuenca Yabroco, de manera que justifica este trabajo de investigación, porque se pretende promover estudios de igual o mayor grado de predicción. Los datos utilizados en el presente estudio son precipitaciones máximas de 24 horas con un registro de 48 años, obtenido por el SENAMHI. Este estudio nos permite conocer la magnitud del caudal máximo, el resultado se evaluó con una proyección hacia el futuro aplicando métodos estadísticos integrados en el modelo hidrológico Hyfran. En cuanto a los registros de las estaciones hidrométricas se mostraron datos no asintóticos. Esta información hidrológica permite cuantificar la oferta hídrica de la cuenca Yabroco, en realidad la relevancia del análisis de crecimiento del caudal no solo se relaciona con conocer la magnitud de la creciente



que se va a presentar durante un determinado tiempo, también es importante considerar como administrar esta información para la toma de decisiones y el aprovechamiento del recurso hídrico, existen diversos criterios para la selección del AIC (H. Akaike, 1974), si indicamos claramente su probabilidad de excedencia en la cuenca Yabroco, en esta investigación el objetivo es determinar el modelo estadístico más óptimo a través del criterio de información de Akaike y el posterior uso del modelo de hidrograma unitario acoplado en el software HEC HMS en la cuenca Yabroco, se determinó el caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años $212.1 \text{ m}^3/\text{s}$, esto contribuirá en realizar estudios de máximas avenidas, para el diseño de hidráulico, sistemas de riego entre otros.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La presente investigación pone su interés al tratamiento de la información meteorológica evaluando dicha información con teorías de bondad, partiendo con información tomada en 24 horas los cuales podrían ser asintóticos por mostrar una incertidumbre a la hora de realizar una simulación de crecidas por ende trae un impacto en el estudios hidrológico (Belizario et al., 2013a), como consecuencia de ello se tiene una considerada evolución de los datos tomados en crecientes, generados a causa del cambio climático, fenómeno que ha sido difícil de predecir, en el actual estudio de la información manipulada es necesario analizar con profundidad los diferentes métodos que han influenciado a realizar estudios similares, para luego plantear una propuesta del AIC, (H. Akaike, 1974) que visualice el impacto y alcance así como las repercusiones en el cálculo del caudal máximo.



Este problema también es evidente en las regiones de nuestro país, donde se observa la presencia del cambio climático por las presencia de intensas lluvias (Belizario et al., 2013b). Así mismo, el problema se encuentra presente en la cuenca Yabroco, aumentando significativamente el caudal del río Yabroco, debido a estos eventos presentados en este sector se requiere de un estudio de máximas avenidas para plantear una medida de prevención, frente a esto se propone la aplicación de un modelo hidrológico que ayude a determinar el caudal máximo.

1.1.1. Pregunta general.

¿El Criterio de Información de Akaike es adecuado para realizar el ajuste de un modelo de obtención de caudales máximos en la cuenca Yabroco?

1.1.2. Preguntas específicas.

¿Los coeficientes no paramétricos del Criterio de Información de Akaike nos permite ajustar la distribución de precipitación máxima en 24 horas?

¿Cuál es el caudal máximo generado por el programa HEC-HMS mediante el modelo SCS para un periodo de retorno de 100 años?

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la mayoría de proyectos el problema la variabilidad de información es analizada por diferentes métodos, en algunos casos se utilizan los métodos estadísticos más conocidos, pero dependiendo de las condiciones de la información obtenida se opta



por utilizar modelos hidrológicos los cuales deberían ser validados antes de ser utilizados y a la vez dar resultados más o menos significativos (Alcántara et al., 2016).

Los Criterios de Información Akaike, podrían dar una consistencia errónea, existen métodos que sea prácticos para determinar dicho resultado es por eso que antes de utilizar el AIC, se evaluara comparándolos con métodos estadísticos probabilísticos para dicha prueba mixta.

Además, cada método requiere de una cierta cantidad de datos como muestra, por lo que se reduce la probabilidad de utilizar un modelo matemático de efectos mixtos, como posible solución se evaluara los resultados obtenidos del AIC, comparando los coeficientes y parámetros estadísticos.

La presente investigación cuenta con la metodología, la información y los recursos necesarios para alcanzar los objetivos. Además, se ha tomado referencia de estudios presentados en nuestra casa de estudios de la facultad de ingeniería Agrícola, los cuales servirán de pilares para la elaboración del presente estudio de evaluación de los Criterios de Información Akaike (Hirotoogu Akaike, 1998).

1.3. HIPÓTESIS.

Desde una perspectiva hidrológica se puede visualizar las variables básicas como: caudal máximo, precipitación, escorrentía, entre otros; que intervienen para la determinación de un caudal máximo, en cuanto a la disponibilidad de información es escasa. Teniendo en cuenta ello es opta por los Criterios de Información Akaike.



1.3.1. Hipótesis general.

Los Criterio de Información Akaike pueden ajuste los modelos estadísticos para la obtención de caudales máximos en la cuenca Yabroco.

1.3.2. Hipótesis específicas.

La precipitación máxima en 24 horas más óptimo se obtiene de los coeficientes no paramétricos del Criterio de Información de Akaike ajustándose a la distribución de menor probabilidad.

El programa HEC-HMS permite determinar el caudal máximo mediante el modelo de SCS para un periodo de retorno de 100 años.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general.

Evaluar en forma asintótica del criterio de información Akaike para el ajuste de un modelo para la obtención de caudales máximos en la cuenca Yabroco.

1.4.2. Objetivos específicos.

Determinar los coeficientes no paramétricos del criterio de información de Akaike para el ajuste de la distribución de precipitación máxima en 24 horas más óptimo.



Determinar el caudal máximo utilizando el programa HEC-HMS mediante el modelo de SCS para un periodo de retorno de 100 años.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES.

Analizaron el rendimiento de tres criterios de selección del modelo, a saber, el Criterio de Información de Akaike, el Criterio de Información Bayesiano y el Criterio de Anderson-Darling. Los tres métodos se comparan mediante un extenso análisis numérico utilizando muestras de datos sintéticos (Di Baldassarre et al., 2009).

El AIC como prueba de bondad de ajuste para identificar de manera más objetiva el modelo óptimo para el análisis de frecuencia de inundaciones en Kenia a partir de una clase de modelos competidores. La clase se compone de (a) siete funciones de densidad de tres parámetros, a saber, log-normal, Pearson, log-Pearson, Fisher-Tippet, log-Fisher-Tippet, Walter Boughton y log-Walter Boughton; y (b) dos funciones de densidad de cinco parámetros, a saber, Wakeby y log-Wakeby. El AIC también se utiliza en este estudio como un método de prueba de la existencia de valores de flujo máximo atípicos en los datos anuales pico utilizados. También se utiliza una versión modificada de la prueba de bondad de ajuste de Chi-cuadrado, pero solo a efectos de comparación con la AIC (Mutua, 1994).

Adoptaron un total de cuatro pruebas de bondad de ajuste, es decir, el criterio de información de Akaike, el criterio de información bayesiano, prueba de Anderson-Darling y prueba de Smirnov-Kolmogorov, para identificar las distribuciones de



probabilidad de mejor ajuste. Además, el diagrama de razón de momentos L se utiliza para realizar una evaluación visual de las distribuciones alternativas (Rahman, et, 2013).

Analizaron la aplicación de series de lluvia de duración parcial (PDS) en la vasta y creciente ciudad urbana de Madinah ubicada en la parte occidental de Arabia Saudita. Se aplicaron diferentes distribuciones estadísticas (Normal, Log Normal, Valor extremo tipo I, Valor extremo generalizado, Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III) y sus parámetros de distribución se estimaron utilizando métodos de L-momentos. Además, se aplican diferentes modelos de criterios de selección, por ejemplo, el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información de Akaike corregido (AICc), el criterio de información bayesiano (BIC) y el criterio de Anderson-Darling (ADC). El análisis indicó la ventaja del valor extremo generalizado como la distribución estadística de mejor ajuste para la serie de lluvias diarias de duración parcial de Medina. El resultado de dicha evaluación puede contribuir a mejorar los criterios de diseño para la gestión de inundaciones, especialmente las medidas de protección contra inundaciones (Alahmadi et al, 2014).

Encontraron que los modelos de distribución Gamma (tipo Pearson 3) y log-normal eran las funciones de mejor ajuste para los caudales máximos, ya que tenían los valores más bajos del criterio de información de Akaike de 1083 y 1081, y los valores del criterio de información bayesiano (BIC) correspondientes a 1087 y 1086, respectivamente (Langat et al., 2019).



Reyes-Olvera & Gutiérrez-González (2016) se basaron en principalmente en el criterio de información de Akaike (AIC) para la elección del modelo de distribución Gumbel o de valores extremos generalizada (Reyes-Olvera & Gutierrez-González, 2016).

2.2. MARCO CONCEPTUAL.

2.2.1. Criterios de información Akaike (AIC).

El criterio combina la teoría de máxima verosimilitud, información teórica y la entropía de información (Motulsky & Christopoulos, 2004), y es definido por la ecuación (1).

$$AIC = -2 * \log Lik + 2k \quad (1)$$

Donde:

AIC = Criterio de Información Akaike

Log = Logaritmo

Li = Máximo valor inicial de la función de verosimilitud para el modelo estimado

K = Numero de parámetros en el modelo

Este criterio tiene en cuenta los cambios en la bondad de ajuste y las diferencias en el número de parámetros entre dos modelos.

Los mejores modelos son aquellos que presentan el menor valor de AIC. Cuando los valores de AIC están muy cercanos, la elección del mejor modelo se puede realizar

con base en el cálculo de la probabilidad (Hirotoogu Akaike, 1998), y la probabilidad relativa (relación de evidencia), a través de las ecuaciones (2) y (3).

$$\text{Pr obabilidad} = \frac{e^{-0.5\Delta}}{1 + e^{-0.5\Delta}} \quad (2)$$

$$\text{Pr obabilidad relativa} = \frac{\text{Pr obabilidad de que el modelo 1 sea correcto}}{\text{Pr obabilidad de que el modelo 2 sea correcto}} = \frac{1}{e^{-0.5\Delta}} \quad (3)$$

2.2.2. Modelo hidrológico HYFRAN.

Es un software que nos permite ajustar datos a través de métodos estadísticos incluyendo un juego de instrumentos matemáticos, poderosos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos y de manera más general el análisis estadístico de serie de datos. HYFRAN ha sido desarrollado al Instituto Nacional de Investigación Científica –Agua, Tierra y Medioambiente (INRS-ETE) de la Universidad de Québec con el patrocinio de Hydro-Québec (el principal productor de energía hidroeléctrica del mundo) y del Consejo de investigación en las ciencias naturales y en ingeniería de Canadá (CRSNG). Inicialmente, concebido para al análisis de frecuencia de eventos extremos, Hyfran, (Castillo, 2008), puede ser usado para todo estudio que requiere el ajuste de una distribución estadística de una serie de datos independientes e idénticamente distribuidas, y esto, en áreas profesionales tan variadas como ingeniería, medioambiente, meteorología, medicina, etc. Estas son todas las funciones que se pueden manejar con este programa:

- Comprobación de hipótesis estadísticas.



- Independencia de datos de series.
- La homogeneidad de las series de datos (paso de series de tiempo, las hipótesis estadísticas, efecto estacional).
- La detección de las tendencias.
- La detección de valores atípicos.

Estas son las bondades de ajuste de distribuciones que son seleccionadas en el programa:

Gran número de distribuciones de probabilidad estadística:

De la familia Gamma:

- Gamma
- Inversa Gamma
- Gamma Generalizada
- Pearson tipo III
- Log Pearson tipo III

Otras distribuciones:

- Exponencial,
- Exponencial,
- Weibull,
- Valor Extremo Generalizado (GEV),



- Compuesto exponencial de Poisson,
- Normal,
- Gumbel,
- Halphen (A, B, B-1),
- Generalizada de Pareto,
- Lognormal (2 o 3 parámetros).
- Distribución mixta:
- Log normal y Weibull,
- modificado para tener en cuenta los valores nulos.
- Numerosos métodos de ajuste:
- Método de los Momentos (normal /peso),
- Método de los Momentos (CMR, SAM, BOB),
- Método de máxima verosimilitud, estimación de cuantiles XT de periodo de retorno T con intervalos de confianza.

Con aplicabilidad en áreas tales como la ingeniería, medio ambiente, meteorología, medicina, etc.(Castillo, 2008).

Ventajas

- Varias distribuciones disponibles: da acceso a la mayoría de las distribuciones comúnmente usadas en el análisis de frecuencia, en varios países del mundo.
- Funciones gráficas: Ofrece una gama completa de funcionalidades reservadas para la representación gráfica de sus datos.



- Comparación entre diferentes ajustes: Permite comparar los resultados de ajuste de varias leyes estadísticas con el mismo conjunto de datos.
- Facilidad de uso de las funciones avanzadas de estadística: Es amigable, esto es, requiere un periodo corto de aprendizaje

2.2.3. Selección del modelo.

En una gran cantidad de investigaciones publicadas, establecen los valores del coeficiente de determinación r^2 y del coeficiente de variación (CV), como criterios de selección entre diferentes modelos candidatos de crecimiento individual. El criterio de selección se fundamenta en identificar el modelo candidato con el valor de r^2 más cercano a 1 y con el CV más bajo (Burnham et al., 2011; Alcántara et al., 2016; Traverso et al., 2019).

2.2.4. Criterio de información mixta.

Sean ℓ_A y ℓ_0 las log-verosimilitudes evaluadas en los parámetros estimados obtenidos bajo las hipótesis alternativa y nula, respectivamente. Además, sean s y p el número de parámetros libres bajo la hipótesis nula y alternativa. El test de razón de verosimilitud 2 rechaza la hipótesis nula si $\ell_A - \ell_0$ es grande en comparación a la diferencia en grados de libertad entre dos modelos que van a ser comparados o equivalentemente sí.

$$l_A - l_0 > F(p) - F(s) \quad (4)$$

Para una función apropiada $F(\cdot)$. Este procedimiento puede interpretarse como un test formal de significancia solo si el modelo bajo la hipótesis nula está anidado



2.2.5. Máxima avenida.

Se entiende por avenida la elevación de los niveles de agua en el cauce a valores no usuales, como consecuencia del crecimiento del caudal que circula por la red de drenaje. Este crecimiento de caudal en la mayoría de los casos es consecuencia de precipitaciones extraordinarias de una magnitud tal que la superficie de la cuenca no es capaz de asimilarlas en su totalidad (Villon, 2009).

Se entiende por avenida a un caudal muy grande de esorrentía superficial que sobrepasan la capacidad de transporte del canal generando la inundación de tierras aledañas. Las inundaciones traen, como es sabido problemas de toda índole en diversas áreas de la actividad humana. Por lo tanto, el objetivo de este texto enfoca al aspecto hidrológico de la determinación de los caudales del proyecto en obras hidráulicas, el que podría ser denominado “predeterminación de descargas máximas”, ya que se trata del cálculo anticipado (en la fase del proyecto) de un caudal crítico que tal vez no haya sucedido o que existe una cierta probabilidad de suceder en el futuro (Vásquez, 2000).

2.2.6. Precipitación máxima de 24 horas.

Señala que la verdadera precipitación máxima en 24 horas se estima en promedio, 1.13 veces mayor que la máxima de 1 día. Estudios efectuados a partir de millares de años-estación de datos de precipitación de lluvia que, multiplicado por 1.13 las cantidades máximas anuales de lluvia horarias o diarias de un único intervalo de observación fijo comprendido entre 1 y 24 horas, obtendrán valores cercanos a los obtenidos mediante un análisis de máximos verdaderos (Villón, 2002).



2.2.7. Hidrograma.

La estimación de los hidrogramas de crecida se elabora a través de los hidrogramas normales, un hidrograma de caudal es una gráfica o tabla que muestra la tasa de flujo del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre lluvia y escorrentía de una cuenca, dos tipos de hidrogramas son particularmente importantes: el hidrograma anual y el hidrograma de tormenta (Chow, 1994).

El hidrograma de una corriente es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo, arregladas en orden cronológico en un lugar dado de la corriente analizando el hidrograma correspondiente a una tormenta aislada se tiene lo siguiente:

- Curva de concentración, es la parte que corresponde al ascenso del hidrograma.
- Pico del hidrograma, es la zona que rodea al caudal máximo.
- Curva de descenso, es la zona correspondiente a la disminución progresiva del caudal.
- Punto de inicio de la curva de agotamiento, es el momento en que toda la escorrentía directa.

Provocada por esas precipitaciones ya ha pasado. El agua aforada desde ese momento es escorrentía básica que corresponde a escorrentía subterránea.



Curva de agotamiento, es la parte del hidrograma en que el caudal procede solamente de la esorrentía básica. Es importante notar que la curva de agotamiento, comienza más alto que el punto de inicio del escurrimiento directo eso es debido a que parte de la precipitación que se infiltro esta ahora alimentando el cauce (Mejía, 2012).

2.2.8. Análisis de consistencia.

El análisis de consistencia es una técnica que permite detectar, corregir y eliminar errores sistemáticos y aleatorios que se presentan en series hidrométricas; en consecuencia, la serie analizada debe ser homogénea, consistente y confiable. Cualquier cambio en la ubicación como en la exposición de un pluviómetro puede conllevar un cambio relativo en la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro. El registro completo publicado representará condiciones inexistentes. Un registro de este tipo se dice que es inconsistente (Escalante & Reyes, 2002).

Una forma de detectar las inconsistencias es mediante las curvas doble masa. Una curva doble masa se construye elevando en ordenadas los valores acumulados de la estación en estudio y en abscisas los valores acumulados de un patrón, que consiste en el promedio de varias estaciones índice (Vásquez, 2000).

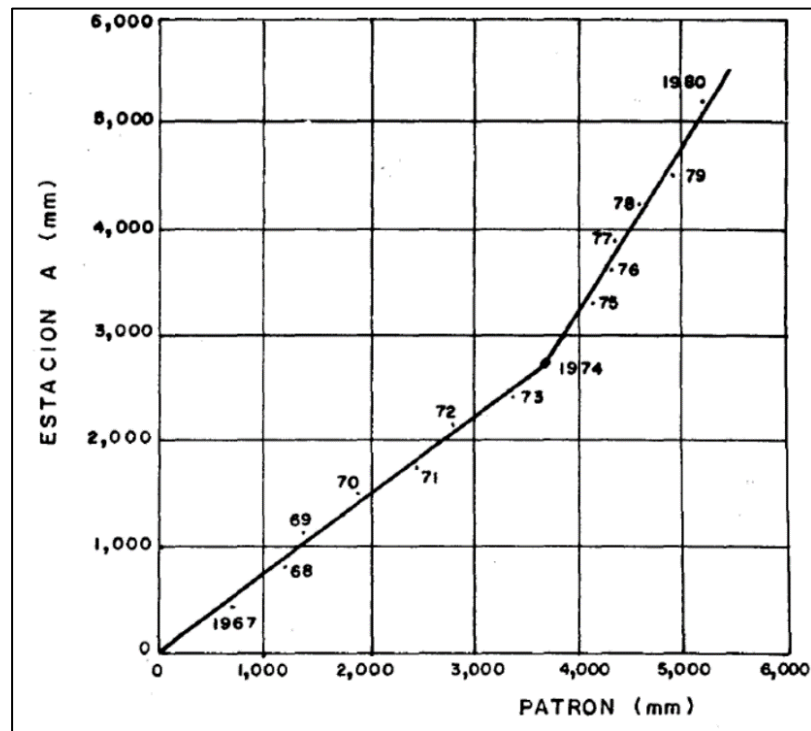


Figura 1. Curva masa.

Fuente: Vásquez Villanueva (2000).

En la figura 1 se observa un quiebre el año 1974. Si se supone que las estaciones que componen el patrón son confiables éste será consistente y por lo tanto el quiebre debe atribuirse a una inconsistencia de la estación en estudio, es necesario ajustar los valores del período más lejano (1967-1973) para reducirlos a las condiciones de ubicación, exposición, etc. imperantes en el período más reciente (1974-1980). En el ejemplo de la, el ajuste o corrección se realiza multiplicando cada precipitación del período 1967 a 1973 por la razón de las pendientes m_2/m_1 .

$$pc = \frac{m_2}{m_1} * p \quad \dots\dots (5)$$

Donde:

P= precipitación observada



P_c = precipitación corregida

m_2 = pendiente del periodo más reciente

m_1 = pendiente del periodo cuando se observó p

La ecuación 5 corrige la precipitación registrada de manera que la curva doble másica se convierte en una sola recta. Se ha partido de suponer que el patrón es consistente. Sin embargo, se recomienda verificar la consistencia de cada estación índice. Es to se hace dibujando una curva doble másica entre cada estación y el patrón formado por las restantes. Aquellas estaciones que resulten inconsistentes deben ser removidas del patrón (Vásquez, 2009).

Al trazar la curva doble másica no se consideran los quiebres que no persisten por más de 5 años, ya que se considera que los quiebres cortos se deben principalmente a la variabilidad inherente a los datos hidrológicos. A veces un cambio pequeño en la ubicación del pluviómetro, de sólo unos cuantos metros, puede afectar su exposición y provocar inconsistencias en el registro. Además, aunque el pluviómetro no cambie de ubicación su exposición puede verse afectada por el crecimiento de vegetación cercana, o por la construcción de edificios en los alrededores. No se recomienda-usar curvas doble masa en regiones montañosas, porque las diferencias en los registros de estaciones cercanas pueden deberse a eventos meteorológicos diferentes.

2.2.9. Prueba de ajuste Chi-cuadrado.

La prueba Chi-cuadrado se basa en el cálculo de frecuencias, tanto de valores observados, como valores esperados, para un número determinado de intervalos. Esta

prueba es comúnmente usada, para verificar la bondad de ajuste de la distribución empírica a una distribución teórica conocida, fue propuesta por Karl Pearson en 1900.

La expresión general de la prueba Chi-cuadrado está dado por (Takahashi et al., 2017):

$$X_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i} \quad (6)$$

Donde:

X_c^2 = Valor calculado de Chi-cuadrado, a partir de los datos.

θ_i = Numero de valores observados en el intervalo de clase i.

e_i = Numero de valores esperados en el intervalo de clase i.

k = Numero de intervalos de clase.

2.2.10. Características geomorfológicas.

Asignando probabilidades a la ecuación anterior, es decir, asignando igual probabilidad de ocurrencia a cada intervalo de clase, se tiene.

$$X_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - NP_i)^2}{NP_i} \quad (7)$$

Donde:

N_i = Número de observaciones que caen dentro de los límites de clases ajustadas del intervalo i.

N = Tamaño de la muestra.

P_i = Probabilidad igual para todos los intervalos de clases.

$$P_i = \frac{1}{k} \wedge e_i = P_i N \quad (8)$$

Simplificando la ecuación anterior se obtiene la fórmula computacional desarrollada:

$$X_c^2 = \sum_{i=1}^k N_i^2 - N \quad (9)$$

El valor obtenido por la ecuación se compara con el valor determinado como:

Nivel de significación: $\alpha=0.05$ ó $\alpha=0.01$ y Grados de libertad: $g.l.=k-1-h$

Donde:

h = es el número de parámetro a estimarse, así:

$h = 2$, para distribución normal.

$h = 3$, para distribución log-normal de 3 parámetros.

Criterios de decisión:

El criterio de decisión se fundamenta en la comprobación del valor calculado de Chi-cuadrado con el valor tabular encontrado, esto es:

- Si el Chi-cuadrado calculado es menor o igual que el valor tabular, es decir:

$X_c^2 \leq X_t^2$ entonces se acepta la hipótesis que el ajuste es bueno al nivel de significación seleccionado.

- Si el Chi-cuadrado calculado es mayor que el valor tabular, es decir: $X_c^2 >$

X_t^2 , entonces el ajuste es malo y se rechaza la hipótesis, siendo necesario probar con otra distribución teórica.



2.2.11. Métodos de estimación de máximas avenidas.

Para la estimación de una avenida máxima se dispone de variadísimos métodos de cálculo, los mismos que pueden ser agrupados en términos generales en orden de importancia, son los siguientes:

- Métodos empíricos
- Métodos históricos
- Métodos de correlación hidrológica de cuencas
- Métodos directos o hidráulicos
- Métodos estadísticos o probabilísticos
- Métodos hidrológicos o de relación lluvia escurrentía.

Dentro de los métodos estadísticos tenemos:

- Distribución normal
- Distribución Log Normal 2 parámetros
- Distribución Log Normal 3 parámetros
- Distribución Gamma 2 parámetros
- Distribución Gamma 3 parámetros
- Distribución Log Pearson tipo III
- Distribución Gumbel
- Distribución Log Gumbel.

2.2.12. Distribución normal.

La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como la campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los



datos hidrológicos tiene amplia aplicación por ejemplo a los datos transformados que siguen la distribución normal (Villon, 2009).

Función densidad

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, -\infty < X < \infty, \quad (10)$$

Los dos parámetros de la distribución son: la media y desviación estándar σ para los cuales (media) y s (desviación estándar) son derivados de los datos.

Estimación de parámetros

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

$$s = \frac{1}{n-1} * [\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^{1/2} \quad (12)$$

Factor de frecuencia

Si se trabaja con los X sin transformar el KT se calcula como

$$K_T = \frac{X_T - \mu}{\sigma} \quad (13)$$

este factor es el mismo de la variable normal estándar

$$K_T = F^{-1} * \left(1 - \frac{1}{T_R}\right) \quad (14)$$

2.2.13. Distribución log-normal de II parámetros.

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente (Ponce, 1989).

Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos por ejemplo Q_{max} , $Q_{mín}$, P_{max} , $P_{mín}$. Tiene la ventaja que $X > 0$ y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva ya que al sacar logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores.

Limitaciones: tiene solamente dos parámetros, y requiere que los logaritmos de la variable estén centrados en la media.

Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{-\frac{(y - \mu_y)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}}, x > 0 \quad y = \ln x \quad (15)$$

donde:

μ_y : Media de los logaritmos de la población (parámetro escalar),
estimado

σ_y : Desviación estándar de los logaritmos de la población estimado y,

Estimación de parámetros:



$$\bar{y} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (16)$$

$$s = \frac{1}{n-1} * [\sum_{i=1}^n (\ln(x_i) - \bar{y})^2]^{1/2} \quad (17)$$

Factor de frecuencia:

Puede trabajarse en el campo original y en el campo transformado.

Campo transformado: Si se trabaja en el campo transformado se trabaja con la media y la desviación estándar de los logaritmos, así:

$$\ln(X_{TR}) = x_{TR} + K S_y \quad (18)$$

De donde:

$$X_{TR} = e^{\ln(x_{TR})} \quad (19)$$

con K con variable normal estandarizada para el Tr dado, xy media de los logaritmos y Sy es la desviación estándar de los logaritmos.

Campo original: Si se trabaja con los X sin transformar el K se calcula como:

$$K_t = \frac{\text{Exp}\left\{K_T * (\ln(1 + C_v^2))^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\ln(1 + C_v^2)}{2}\right)\right\} - 1}{C_v} \quad (20)$$



K es la variable normal estandarizada para el Tr dado, $Cv=S/X$ es el coeficiente de variación, \bar{x} media de los datos originales y s desviación estándar de los datos originales.

Límites de confianza:

En el campo transformado.

$$Ln(X_{Tr}) \pm t_{(1-\alpha)} S_T \quad (21)$$

Donde, n número de datos, s error estándar, KT variable normal estandarizada.

2.2.14. Distribución Gumbel o extremo tipo I.

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías (máximos y mínimos).

Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp^{-\frac{x-\mu}{a}} \exp^{-\frac{x-\mu}{a}} \quad (22)$$

Donde α y β son parámetros de la distribución.

α = es el parámetro de escala.



β = es el parámetro de posición

estimación de parámetros.

$$y = \frac{x-\mu}{a} \quad (23)$$

los valores de x e y están relacionados por:

$$y = \frac{x-\mu}{a} \quad \delta x = \mu + \alpha y \quad (24)$$

Factor de frecuencia

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \right\} \quad (25)$$

Donde T_r es el periodo de retorno. Para la distribución Gumbel se tiene que el caudal para un período de retorno de 500 años es igual a la media de los caudales máximos.

Límites de confianza

$$X_t \pm t_{(1-\alpha)} Se \quad (26)$$

$$Se = \frac{\delta \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (27)$$

$$\delta = [1 + 1.1396K_T + 1.1K_T^2]^{1/2} \quad (28)$$

K_T es el factor de frecuencia y $t_{(1-\alpha)}$ es la variable normal estandarizada para una probabilidad de no excedencia de $1-\alpha$.

2.2.15. Distribución Gamma o Pearson de III Parámetros.

y volúmenes de lluvia de corta duración. La función de distribución Gamma tiene dos o tres parámetros. Esta distribución ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función Gamma se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximos anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas parámetros.

Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp\left(- \frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right) \quad (28)$$

Donde:

$$x_0 \leq x < \infty \text{ para } \alpha > 0$$

$$\infty < x \leq x_0 \text{ para } \alpha < 0$$

α y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y x_0 es el parámetro de localización.

Estimación de parámetros:



$$\hat{\beta} = \left(\frac{2}{Cs} \right)^2; \quad \hat{\alpha} = s \frac{Cs}{2}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x} - \alpha \hat{\beta} \quad (29)$$

Cs es el coeficiente de asimetría, \bar{X} y S son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente.

Factor de frecuencia:

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{Cs}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{Cs}{6} \right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{Cs}{6} \right)^3 + z \left(\frac{Cs}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{Cs}{6} \right)^5 \quad (30)$$

Donde z es la variable normal estandarizada, este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de Cs calculado con la muestra.

Intervalos de confianza:

$$Xt \pm t(1-\alpha) Se \quad (31)$$

$$Se = \frac{\delta \cdot S}{\sqrt{n}} \quad (32)$$

Donde S es la desviación estándar de la muestra, n es el número de datos y δ se encuentra tabulado en función de Cs y Tr.



2.2.16. Proceso de modelado de la superficie de elevación digital.

Las características físicas de la superficie determinan las características del flujo del agua a través de la misma; paralelamente, el flujo del agua tiende a cambiar las características del terreno.

La dirección del flujo es determinada por el "aspecto" o dirección de la pendiente, esto es la dirección donde se produce la mayor velocidad de cambio de elevación en un modelo digital (Ayu & Armayah, 2016).

2.2.17. Modelo de elevación digital.

La forma más común de representar digitalmente la forma de la tierra es a través de un modelo basado en celdas, conocido como modelo de elevación digital (DEM). Estos datos son utilizados en ArcGIS para cuantificar las características de la superficie de la tierra (Aplicación de SIG a Recursos Hídricos). Un DEM es una representación gráfica de una superficie continua, usualmente referida como una superficie de la tierra. La precisión de estos datos es determinada primariamente por resolución del modelo y resulta de vital importancia para la determinación de la dirección de flujo del agua.

Los mapas de pendiente (grado o porcentaje), aspecto de la pendiente, relieve de sombras, vistas en perspectiva 3D, son algunos los productos derivados del análisis topográfico a partir de un DEM (Olaya, 2014).



2.2.18. Aplicación de los DEM en la modelación hidrológica.

Dado que el flujo de las aguas a través de la superficie es siempre en la dirección de máxima pendiente, una vez que la dirección de flujo es conocida es posible determinar cuáles y cuántas celdas fluyen hacia una celda particular. Esta información puede ser utilizada para definir los límites de las cuencas y la red de drenaje (Olaya, 2014).

2.2.19. Dirección de flujo.

Una de las claves del modelado hidrológico lo constituye la determinación de la dirección de flujo de cualquier punto de una cuenca (cualquier celda). El proceso de cálculo de la dirección de flujo consiste en determinar la dirección de máxima pendiente hacia abajo de cada celda. Existen ocho direcciones posibles de flujo de una celda considerando las ocho celdas adyacentes (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

Esta herramienta permite generar la red de corrientes y los parteaguas de las subcuencas en una estructura de datos hidrológicos que representan la respuesta de la cuenca a la precipitación. A continuación, se definen los procesos utilizados por la herramienta para el análisis del terreno utilizando el DEM.

Fill Sink (corrección de celdas), corrige las celdas del DEM que no fluyen hacia ninguna de las celdas vecinas o con errores de elevaciones menores que sus ocho celdas vecinas, ocasionando durante el proceso de determinación de la dirección de flujo se interrumpa en estas celdas ya que no tienen salidas hacia sus celdas vecinas.



Flow Direction (dirección de flujo), aquí se define la dirección de mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas de las celdas circundantes a cada una de ellas (Olaya, 2014).

2.2.20. Acumulación de flujo.

Constituye el peso acumulado en una celda determinada de todas celdas que fluyen pendiente abajo hacia la misma. De este modo es posible conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda determinada. Asimismo, el cálculo de flujos acumulados posibilita también determinar la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por una celda dada, asumiendo que toda la lluvia se convierte en escurrimiento superficial y que no existe infiltración, evapotranspiración u otras pérdidas de agua (Olaya, 2014).

Flow Accumulation (Acumulación de flujo), determina el número de celdas que drenan hacia una celda dada. En cada nodo se cuantifican las celdas que fluyen hacia él. Le da un valor de cero a la celda donde inicia el flujo, es decir que no recibe flujo de ninguna otra, le da un valor acumulado de tres a la celda que está alimentada por el flujo de tres celdas aguas arriba de ella y así sucesivamente. La corriente principal está compuesta por la ruta que contiene el mayor número de celdas que contribuyen a ella (Olaya, 2014)

Stream Definition y stream segmentation (delineación de subcuencas y corrientes), para evitar tomar la red de drenajes tal y como se obtuvo al estimar el flujo acumulado, se determinan las corrientes de las celdas cuyo flujo acumulado o su equivalente en área están arriba de un umbral seleccionado por el usuario, de este modo



las celdas con menor aporte no se toman en cuenta. Los segmentos son tramos de cauces situados entre dos uniones de cauces sucesivas, una unión y la salida o una unión y el límite de la cuenca.

2.2.21. Cuenca hidrográfica.

Es el área natural o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (Divortium Acuarium), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal (Vásquez, 2000).

Desde el punto de vista hidrológico, una cuenca es una superficie de tierra donde todas las aguas de precipitación se unen para formar un solo curso de agua. El área o superficie de la cuenca está limitada por la divisoria de las aguas que es una línea que separa la superficie de terreno cuyo drenaje fluye hacia el curso del agua (Gonzales & Alejo, 2008).

2.2.22. Características geomorfológicas.

La geomorfología es la rama de la geografía física que estudia de manera descriptiva y explicativa el relieve de la Tierra, el cual es el resultado de un balance dinámico - que evoluciona en el tiempo - entre procesos constructivos y destructivos, dinámica que se conoce de manera genérica como ciclo geomorfológico (Alfaro, 2011).

Define como la forma de una superficie determina el modo en que el agua pueda fluir a través de la misma. Las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS proveen



un método que permite describir las características físicas de una superficie. Utilizando un modelo de elevación digital, es posible delinear un sistema de drenaje y cuantificar las características del sistema. Estas herramientas permiten determinar para cualquier ubicación de la cuenca el área de contribución para cualquier punto de interés y la cantidad de agua que puede recibir dicho punto. Las cuencas y las redes de drenaje creadas a partir de un modelo de elevación digital utilizando ArcGIS son las fuentes primarias para la mayoría de los modelados hidrológicos de superficie. Dichos modelos pueden ser utilizados, entre otros, para determinar la altura, tiempo y magnitud de inundación de un área, localización de área que contribuye a la contaminación de los cursos fluviales o predecir los efectos de alteración del paisaje (Alcántara et al., 2016).

2.2.23. Parámetro de forma de la cuenca.

La forma superficial de la cuenca hidrográfica es importante debido a que influye en el valor del tiempo de concentración, definido como el tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya al flujo en la sección en estudio a partir del inicio de la lluvia o, en otras palabras, tiempo que tarda el agua, desde los límites de la cuenca para llegar a la salida de la misma. En general las cuencas hidrográficas de grandes ríos presentan la forma de una pera, pero las cuencas pequeñas varían mucho de forma, dependiendo de su estructura geológica (Gonzales & Alejo, 2008).

2.2.24. Área de la cuenca.

El área de la cuenca o área de drenaje es el área cerrada que comprendido dentro del límite o divisoria de agua. El área de la cuenca es el elemento básico para el cálculo



de las otras características físicas y es determinado normalmente con planímetro y expresado en kilómetros o hectáreas. Es importante mencionar que las cuencas hidrográficas con la misma área pueden tener comportamientos hidrológicos completamente distintos en función de los otros factores que intervienen (Aparicio, 1992).

2.2.25. Estimación del caudal máximo.

Para diseñar las dimensiones de un cauce, sistemas de drenaje, muros de encauzamiento, alcantarillas vertederos de demasías u otras estructuras hidráulicas, se debe calcular o estimar el caudal de diseño, que, para esos casos, son los caudales máximos (Alcántara et al., 2016).

La magnitud del caudal de diseño, es función directa del periodo de retorno que se le asigne, el que a su vez depende de la importancia de la obra y de la vida útil de ésta (Mejía, 2012).

2.2.26. Integración de sistemas de información geográfica SIG.

Para Olaya (2014), un SIG es como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad



de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Hoy día existen numerosas herramientas SIG libre como GRASS Gis, gvSIG, MapWindow, OpenJUMP, Quantum GIS (QGIS), entre otros, y los comerciales como ArcGis (ESRI), que brindan un conjunto de herramientas robustas que abarcan tanto funcionalidades del lado del servidor como las del lado del cliente.

La integración del SIG con los modelos matemáticos de simulación hidrológica permite llevar a cabo tareas de verificación y visualización de resultados de la modelación con el empleo de más gráficos y visualizaciones tridimensionales. Actualmente existen tres tendencias fundamentales para implementar la conexión entre los SIG y los modelos matemáticos (Olaya, 2014)

2.2.27. Herramientas de sistema de información geográfica.

Los SIG's funcionan como una interface entre los datos espaciales crudos y el programa de modelación hidrológica e hidráulica, pues contribuye al procesamiento y almacenamiento de la información de la cuenca utilizada en la modelación. Para el cálculo de las características morfométricas de la cuenca se utiliza herramientas SIG como HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS, las cuales son extensiones de ArcGis. Estas herramientas permiten el pre-procesamiento de la información espacial de las propiedades físicas de la cuenca y los parámetros hidrológicos de la misma, el cual se lleva a cabo dentro de un SIG antes de introducir estos datos al software de modelación hidrológica e hidráulica; y



el post-procesamiento de la información resultante de la modelación hidrológica e hidráulica (Correa & Salazar, 2016).

2.2.28. Generación del modelo HEC HMS.

El modelo hidrológico HMS ha sido desarrollado por la USACE (United States Army Corps of Engineers) como continuación del modelo Hidrológico HEC-2. La versión más actual de HMS es la HMS 3.0.0 en la que se ha mejorado mucho la parte de organización de ventanas y entorno gráfico (Villón, 2002)

El programa HMS permite multitud de metodologías de estimación tanto de lluvia correntía (Inicial and constant, SCS curve Number) como de propagación de hidrograma (Muskingum, Pulse Method). Es un modelo hidrológico contrastado, de gran validez para estimación de avenidas y aceptado por todas las administraciones (Villón, 2006)

Los componentes del modelo HEC-HMS son utilizados para simular la respuesta hidrológica en una cuenca. Estos incluyen modelos de cuencas, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. En una simulación se calcula la respuesta de la cuenca dada una precipitación, una vez definido el modelo meteorológico y las especificaciones de control que definen el tiempo y el intervalo de tiempo para el cual se realizará la simulación continuación se describirán los componentes utilizados para realizar la simulación hidrológica en una cuenca (Ford et al., 2008).



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.1.1. Población

Se consideró como población al total de datos de precipitación de la cuenca de Yabroco correspondiente a las estaciones meteorológicas y por el conjunto de imágenes satelitales seleccionadas.

3.1.2. Muestra.

Para el presente trabajo de investigación se consideró como muestra el conjunto de datos meteorológicos diarios (precipitación máxima en 24 horas), de las estaciones meteorológicas Susapaya, Vilacota, Candarave, Sitajara, Aricota, y Muñani y las imágenes satelitales. Estos datos fueron determinados en base a un muestreo estratigráfico sistemático según Alfaro y Gonzales (2008), en todo el periodo anual a intervalos de tiempo diario y espacio determinados según la ubicación de las estaciones.

3.2. MATERIALES.

Para el desarrollo de la presente investigación se tiene ubicado el área de estudio mediante una visita de campo, se obtuvo la imagen raster del arrea de estudio para su posterior delimitación de la Cuenca Yabroco. El río Yabroco tiene su nacimiento en las zonas altas de la cuenca Yabroco a más de 4000 msnm, la cual es alimentada por los ríos



adyacentes, por otra parte, las precipitaciones de la zona y los deshielos de los nevados existentes. Asimismo, la cuenca del río Yabroco, cuya cuenca se ubica en la provincia de Candarave, región Tacna.

Se cuenta con información meteorológica de precipitación máxima de 24 horas proporcionada por SENAMHI, software, etc.

3.2.1. Imágenes raster.

Para esta etapa se utilizó imágenes raster de alta calidad, USGS science for a changing world, información gratuita y necesaria para la obtención de los parámetros geomorfológicos de la cuenca en estudio. Obtenido de la imagen raster es mediante sistemas de coordenadas, área, shp y kml, en este caso el proyecto identificado su área de influencia se acepta el conjunto de datos raster, para luego activar el tipo de elevación digital y la imagen “Shuttle Radar Topography Mission” SRTM imagen tomada a 230 km de altura el cual tiene un tamaño raster de aproximadamente 25 km, para que finalmente podamos descargar la imagen raster en formato GeoTIFF de 24.8 MB. la imágenes raster obtenida se corrige las zonas sin datos, interpolando, de manera que se apoya con áreas cercanas a ella como 15 m de radio aproximadamente, estadísticamente se realiza la extensión de datos mediante FocalStatistics ("Mosaico.TIF", NbrCircle(15, "CELL"), "MEAN"), obteniéndose una imagen raster nueva y consistente.



3.2.2. Delimitación de cuenca y sus parámetros.

- Se creó un mosaico con las herramientas de ArcToolbox – Raster Dataset – Mosaic To New Raster, utilizando cuatro imágenes raster, se verificó el número de píxeles de la imagen, 16 Bit y la zona de georreferenciación WGS_1984_UTM_Zone_19S.
- El método de delimitación de la cuenca fue pfafstetter, herramientas del ArcToolbox – Hydrology, obteniendo la delimitación de la cuenca utilizando el shp de puntos para el Watershed, una vez delimitada la cuenca se procedió a transformar la imagen raster resultante a shp de polígonos y polylineas, para su uso más adelante.
- Como resultado, se tiene la cuenca Yabroco, con los parámetros de la cuenca utilizando gracias a las herramientas del ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Reclassify, para la obtención de la pendiente de la cuenca y demás parámetros como el área de la cuenca, perímetro, etc. los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la cuenca del estudio

Descripción	Medida	Condición	Denominación
Área de la cuenca	276.6992 km ²	> a 250 km ²	Cuenca media
Perímetro de la cuenca	82.1793 km ²	< a 500 km ²	Exorreica

Fuente: Agustín y Weimar (UMSS).

3.2.3. Parámetros de forma.

La forma de la cuenca se interviene según las características del hidrograma de descarga de un río, particularmente en los eventos de máximas avenidas, por la forma como se genere los hidrogramas se determinó la forma de la cuenca utilizando los coeficientes que se describen en la tabla 2, de cuadro de obtención de la curva hipsométrica y el mapa de resultado se muestra en el anexo A. Imagen 27

Tabla 2. Datos para la obtención de la curva hipsométrica

N°	Min	Max	Prom	Área	Acum	%Área	%Acum
1	3388	3490	3490	613.24	276210.07	0.22	100
2	3495	3595	3545	1814.70	275596.82	0.66	100
3	3595	3698	3647	5406.56	273782.12	1.96	99
4	3699	3802	3750	5631.83	268375.56	2.04	97
5	3803	3905	3854	5143.74	262743.73	1.86	95
6	3906	4009	3958	5343.98	257599.99	1.93	93
7	4010	4113	4061	6069.86	252256.01	2.20	91
8	4113	4217	4165	7621.75	246186.15	2.76	89
9	4217	4321	4269	16782.86	238564.40	6.08	86
10	4321	4424	4372	17909.23	221781.54	6.48	80
11	4424	4528	4476	23103.03	203872.32	8.36	74
12	4528	4631	4580	28897.56	180769.29	10.46	65
13	4632	4735	4683	29398.16	151871.73	10.64	55
14	4735	4839	4787	34679.57	122473.57	12.56	44
15	4839	4942	4891	32426.84	87794.00	11.74	32
16	4943	5046	4994	25518.46	55367.17	9.24	20
17	5046	5149	5098	17008.13	29848.71	6.16	11
18	5150	5253	5202	9286.27	12840.58	3.36	5
19	5254	5357	5305	3241.43	3554.31	1.17	1
20	5358	5461	5409	312.88	312.88	0.11	0
						276210.07	100

Fuente: Elaboración propia

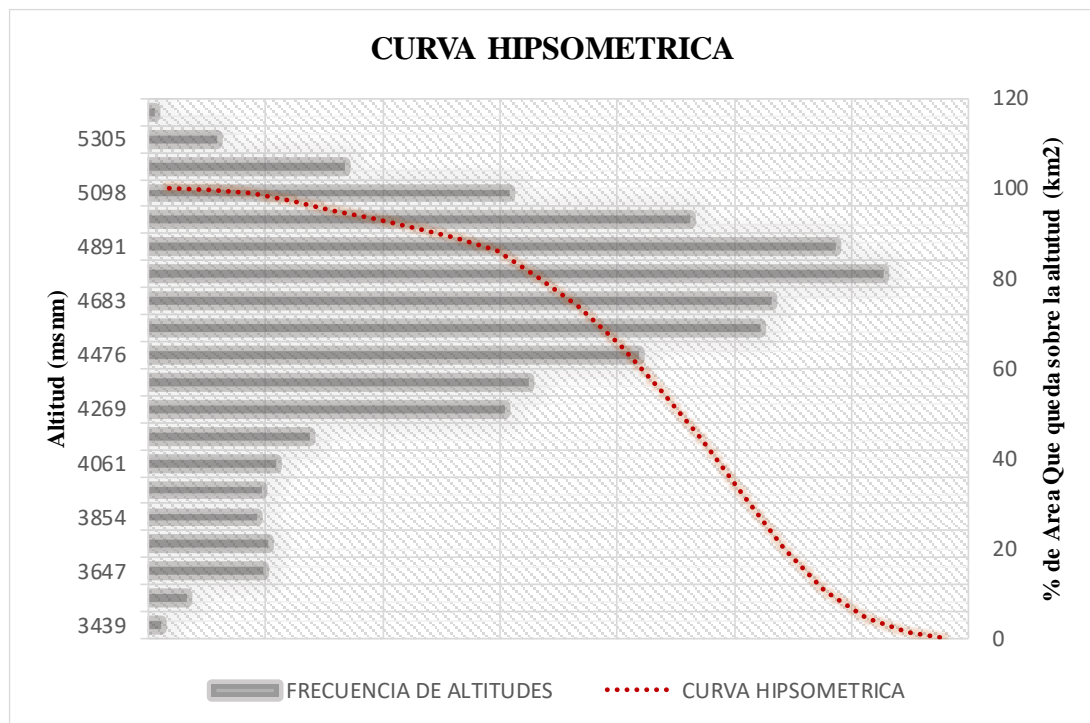


Figura 2. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Parámetros asociados a la longitud.

Se utilizó las herramientas de ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra opción Raster Calculator, donde la ecuación de $\log_{10}(\text{cuenca poquera})$, (Stream Link), una vez obtenida el río de mayor influencia se ordenó los ríos con Stream Order, finalmente utilizamos la conversión de raster a polyline para obtener las dimensiones del río en km que mayor orden ver. Anexos C Figura 29.



3.2.5. Categoría del sistema de clasificación de tierras.

Teniendo en cuenta el tipo de suelo y la vegetación de la cuenca hidrográfica, se ha definido una serie de parámetros empíricos para su clasificación. Entre los más aceptados y empleados se encuentra el llamado número de escurrimiento (N), el caudal vario de 0 a 100, según el Servicio de Conservación de Suelos (SCS).(Vásquez, 2000).

3.2.6. Categoría del sistema de clasificación de tierras.

El sistema de clasificación de tierras que se presenta está conformado por tres categorías de grupo de suelos, consisten en:

- Grupo de capacidades de uso mayor
- Clases de capacidad
- Sub – Clase

a) Capacidad de uso mayor.

Es la primera categoría del sistema, obedece y están definidos de acuerdo al reglamento de clasificación de tierras del Perú y representan la más alta abstracción, agrupando los suelos de acuerdo a su vocación máxima de uso. Comprende cinco grupos de capacidad de uso mayor:

- Cultivos en temporales (A) 3 %
- Cultivos permanentes (C) 4%
- Zonas de pastoreo (P) 26%
- Áreas de reforestación (F) 63%
- Reservas naturales (X) 4%

b) Clase de capacidades.

Tabla 3. Descripción de tierras según capacidad de uso mayor

Clases y sub clases de capacidad	Descripción
A ₃ wc	Tierras aptas para cultivos intensivos arables de baja calidad agrologica, con problemas de drenaje y limitaciones por clima
P1	Tierras aptas para pastos de buena calidad agrologica
P1c	Tierras aptas para pastos de buena calidad agrologica y factor limitante clima
P2c	Tierras aptas para pastos de calidad agrologica media y factor limitante clima
X-Pe	Tierras de protección y aptas para pastos con problemas de erosión
X	Tierras de protección y miscelaneas

Fuente: Elaboración propia

Para nuestro estudio de determino cinco capacidades de uso mayor los cuales se pueden apreciar mejor en el mapa de capacidad de uso mayor expresado en porcentajes ver Anexo D figura 30.

3.2.7. Altitud media de la cuenca.

$$E_m = \frac{\sum a.e}{A} \quad (33)$$

Donde:

Em : Elevación media.

a : Área entre dos contornos.

e : Elevación media entre dos contornos.

A : Área total de la cuenca.

Em : 4560 m.s.n.m. Resultado.

3.2.8. Pendiente promedio de la cuenca.

La pendiente de una cuenca, es un parámetro muy importante en el estudio de toda cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. El valor de la pendiente de la cuenca calculado mediante el uso del software ARCGIS, es de 44.27 %.

3.2.9. Perfil longitudinal del cauce.

El perfil Longitudinal de río se obtuvo a partir de la delimitación del río principal sobre el raster de evaluación, luego se aplicó la herramienta de 3D Analysis, finalmente interpolación de línea el cual se puede visualizar en la figura 2.

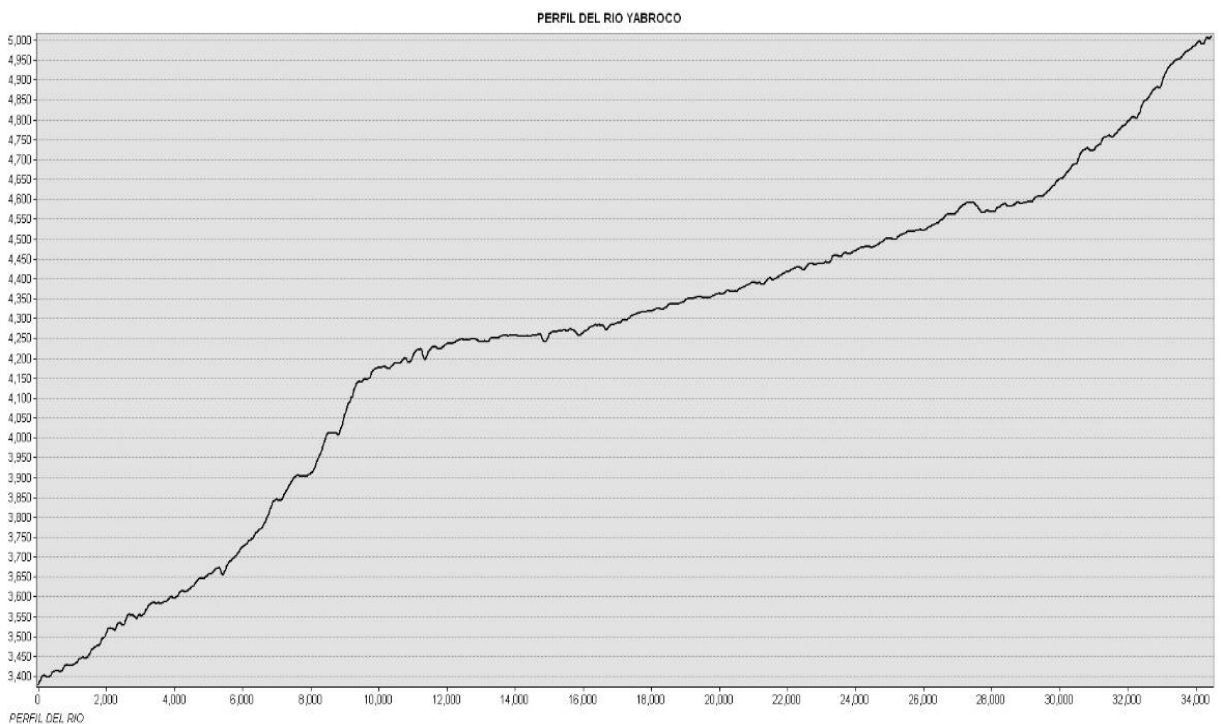


Figura 3. Perfil del río principal Yabroco

Fuente: Elaboración propia

3.2.10. Pendiente del cauce principal.

Para calcular la pendiente del cauce principal se utilizó el mapa de orden de los ríos y el mapa de pendientes para esto se utilizó la longitud de río de mayor orden y las cotas máximas y mínimas que están dentro del mapa de pendientes, los datos para obtención de la pendiente se muestran en la tabla 4 y el anexo H figura 34.

$$S = \left[\frac{17}{\frac{1}{\sqrt{0.0350}} + \frac{1}{0.0222} + \dots + \frac{1}{\sqrt{0.0424}}} \right] = 0.1177 \cong 11.77\% \quad (34)$$

Tabla 4. Perfil longitudinal del río principal

Progresiva	Long (km)	Long Acum (km)	Cota	Desnivel	S	L/(s)^0.5
0.00			3400			
2000	2000	2000	3519	119	0.0350	5.3452
4000	2000	4000	3597	78	0.0222	6.7168
6000	2000	6000	3720	123	0.0342	5.4078
8000	2000	8000	3928	208	0.0559	4.2290
10000	2000	10000	4177	249	0.0634	3.9718
12000	2000	12000	4237	60	0.0144	8.3437
14000	2000	14000	4258	21	0.0050	14.2043
16000	2000	16000	4268	10	0.0023	20.6349
18000	2000	18000	4319	51	0.0119	9.1480
20000	2000	20000	4361	42	0.0097	10.1407
22000	2000	22000	4417	56	0.0128	8.8247
24000	2000	24000	4473	56	0.0127	8.8812
26000	2000	26000	4523	50	0.0112	9.4583
28000	2000	28000	4567	44	0.0097	10.1388
30000	2000	30000	4626	59	0.0129	8.7981
32000	2000	32000	4790	164	0.0355	5.3111
34000	2000	34000	4993	203	4.8576	

Fuente: Elaboración propia

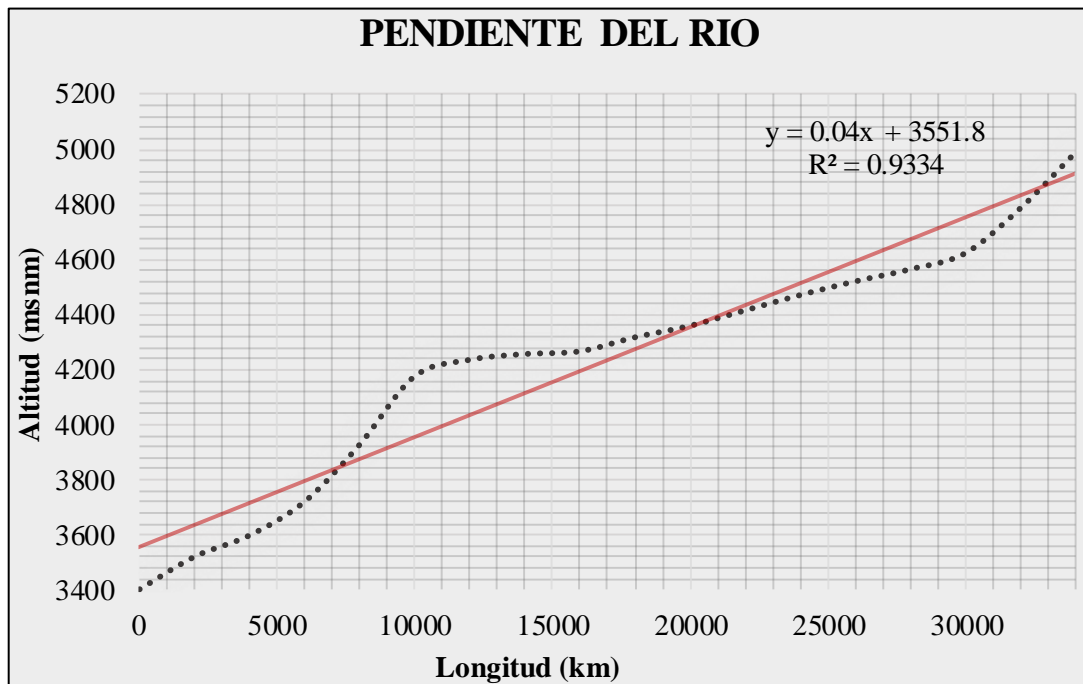


Figura 4. Pendiente del cauce principal

Fuente: Elaboración propia

3.2.11. Densidad de drenaje.

Para determinar la densidad de drenaje se utilizó la expresión:

$$Dd = Li / A \quad (35)$$

$$Dd = 0.1247 \text{ km/km}^2$$

Donde:

- Dd : Densidad de drenaje, en km/km^2 .
- Li : Longitud total de los cursos de agua, en km.
- A : Área de la cuenca, en km^2 .

3.2.12. Tiempo de concentración.

Para determinar en tiempos concentración se recurrió a diferentes métodos que permiten la estimación del tiempo de concentración, estos resultados se pueden observar en el cuadro de resumen en la tabla 5.

$$\text{Kirpich} \Rightarrow T_c = 0.000325 \frac{L_{CP}^{0.77}}{S_{CP}^{0.385}} \quad (36)$$

$$\text{Giandoli} \Rightarrow T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{S \times L}} \quad (37)$$

$$\text{Athaway} \Rightarrow t_c = 0.286 \left(\frac{L^{0.467}}{S^{0.234}} \right) \quad (38)$$

$$\text{Promedio} \Rightarrow T_{c_{promedio}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n T_{ci}} \quad (39)$$

3.2.13. Resumen de parámetros geomorfológicos.

Se determinó los parámetros de la cuenca del río Yabroco con el fin de dar un resumen de todos los cálculos podemos apreciar en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de parámetros geomorfológicos de la cuenca Yabroco

Análisis regional hidrológico	
Parámetros	Cuenca Yabroco
Área de la cuenca (km ²)	276.6992
Perímetro de la cuenca (km)	82.1793
Longitud del cauce principal (km)	34.5038
Longitud máxima de la cuenca (km)	29.337
Ancho promedio de la cuenca (km)	15.133
Índice de compacidad (kc)	1.3932
Factor de forma (Ff)	0.3215
Radio de elongación (Re)	0.054
Radio de circularidad (Rc)	21537.36
Densidad de drenaje (Dd)	0.1247
Parámetro de relieve	
Altitud máxima (m.s.n.m.)	5050
Altitud mínima (m.s.n.m.)	3400
Altitud media (m.s.n.m.)	4293.5
Pendiente de la cuenca (%)	44.27
Pendiente del cauce (%)	11.77
Índice de la pendiente del cauce (Ip)	0.0069
Parámetros meteorológicos del tiempo de concentración	
Formula de Kirpich (h)	0.39
Formula de Giandotti (h)	36.22
Formula de U.S. Hathaway (h)	21.13
Promedio (h)	19.25

Fuente: Elaboración propia



3.3. METODO

El presente estudio desarrollado es no experimental. Porque son fenómeno que no se pueden manipular. Es de corte longitudinal pretérito, porque las descargas máximas de 24 horas son fenómenos que han sucedido a través del tiempo. El inconveniente principal que presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las formulas empíricas deriva del hecho de que estas se están utilizando en cuencas distintas a aquellas en las que fueron deducidas, por lo que sus coeficientes deberían ser ajustados, lo cual resulta sumamente difícil.

Sin embargo, debido a la correlación que existe entre la magnitud de cuenca y el gasto máximo, los resultados obtenidos con el modelamiento hidrológico podrían servir para estimar caudales máximos utilizando el modelo Hec Hms.

3.3.1. Verificación de hipótesis estadística

Para el análisis de consistencia se utilizó modelos probabilísticos, estimación de parámetros y la selección del modelo que mejor se ajuste a la muestra de datos de cada estación pluviométrica; en consecuencia, se evalúa el tipo de prueba estadística para este estudio se trabajó con datos puntuales de precipitación máxima de 24 horas:

- Prueba de independencia (Wald-Wolfowitz).
- Prueba de estacionalidad (Kendall).
- Prueba de homogeneidad a escala anual Wilcoxon.



3.3.2. Análisis de la estadística inferencial no paramétrica

Para determinar los parámetros de la distribución teórica a partir de la muestra obtenida de cada estación se utilizó los siguientes métodos de estimación, siendo en orden ascendente de menor a mayor eficiencia.

- Gráfico.
- Máxima Verosimilitud.

3.3.3. Análisis de la función de distribución de probabilidad empírica

De acuerdo a lo mencionado en el ítem de análisis de la información hidrometeorológica, y ante la carencia de registros de aforo en el ámbito del proyecto, para efectos de la estimación de precipitación extrema se ha efectuado un análisis de frecuencia de eventos hidrológicos máximos, aplicable a caudales de avenida y precipitación máxima, considerando los siguientes puntos de análisis:

Uso de registros de precipitación máxima en 24 horas de la estación Susapaya.
Procesamiento de las distribuciones de frecuencia más usuales y obtención de la distribución de mejor ajuste a los registros históricos, para la estación de Susapaya

Análisis estadístico de precipitaciones máximas para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, haciendo uso de los métodos probabilísticos a usar para el ajuste a valores extremos máximos, como es el caso son:



- Gumbel
- weibull
- Normal
- LogNormal
- LogNormal III Parámetros
- Gama
- Person Tipo III

Los ajustes se realizaron con el software Hyfran. Para ello, se selecciona la estación más representativa dentro de la cuenca, elegimos el método de estimación de los parámetros (Método de Máxima Verosimilitud, Método de Momentos). Para nuestro estudio se ajusta a la función Gumbel.

3.3.4. Modelo estadístico Smirnov-Kolgomorov.

Para determinar qué tan adecuado es el ajuste de los datos a las distribuciones de probabilidades se han propuesto una serie de pruebas estadísticas que determinan si es adecuado el ajuste. Estos son análisis estadísticos y como tal se deben entender, es decir, no se puede ignorar el significado físico de los ajustes.

El análisis de frecuencia referido a precipitaciones máximas diarias, tiene la finalidad de estimar precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación de modelos probabilísticos, los cuales pueden ser discretos y continuos.

Para determinar cuál de las distribuciones estudiadas se adapta mejor a la información histórica se utilizó la metodología de Smirnov-Kolgomorov.



El estadístico Smirnov-Kolmogorov (D) considera la desviación de la función de distribución de probabilidades de la muestra $P(x)$ de la función de probabilidades teórica, escogida $P_0(x)$ tal que

$$D_n = \max(P(x) - P_0(x)) \quad (40)$$

Para la prueba se requiere que el valor D_n calculado con la expresión anterior sea menor que el valor tabulado D_{α} para un nivel de probabilidad requerido.

Esta prueba es fácil de realizar y comprende las siguientes etapas:

El estadístico D_n es la máxima diferencia entre la función de distribución acumulada de la muestra y la función de distribución acumulada teórica escogida.

Se fija el nivel de probabilidad α , valores de 0.05 y 0.01 son los más usuales.

El valor crítico D_{α} de la prueba debe ser obtenido de tablas en función de α y n .

Si el valor calculado D_n es mayor que el D_{α} , la distribución escogida se debe rechazar. El nivel de significancia α depende directamente del tamaño de la muestra, tal como se aprecia en la que a continuación se muestra en la tabla 6

Tabla 6. Nivel de significancia – Smirnov-Kolmogorov

Tamaño	Nivel de significancia				
	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
1	0.090	0.950	0.975	0.990	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.900	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.689	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.734
5	0.477	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
7	0.359	0.410	0.454	0.507	0.542
8	0.339	0.387	0.430	0.480	0.513
9	0.323	0.369	0.409	0.457	0.486
10	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
11	0.295	0.338	0.375	0.419	0.449
12	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
13	0.275	0.314	0.349	0.390	0.418

Fuente: Hidrología Estadística (Villón, 2009).

3.3.5. Modelo estadístico de Akaike (AIC)

Mediante este criterio de información de Akaike (AIC), se midió la prueba de bondad de ajuste de los modelos estadístico utilizados en el estudio. Para esto se dirá que describe la relación entre el sesgo y varianza en la construcción del modelo, evaluando de manera general la exactitud y complejidad del modelo (H. Akaike, 1974).



3.3.6. Ajuste por el método de gráfico.

El ajuste gráfico se realizó comparando hidrogramas, con la función de densidad teórica para poder verificar el ajuste de acuerdo a la similitud o diferencia.

3.3.7. Prueba de Chi-cuadrado.

Para esta prueba de verificación se ha calculado la frecuencia de los valores observados y valores esperados para un número determinado de intervalos, para esta prueba de bondad de ajuste se utilizó la integración de modelo Hyfran.

3.3.8. Modelo hidrológico HEC HMS.

Con el modelo HEC-HMS, se ha generado un modelo hidrológico simulando un evento de máxima avenida en la cuenca Yabroco, como producto de la precipitación máxima de 24 horas. Para la generación del modelo se utilizó los parámetros hidrológicos obtenidos en la etapa de los materiales. Luego se calculó los hidrógramas del flujo.

Resumen de información utilizada.

- Intensidad de la precipitación obtenida de las curvas IDF (intensidad, duración, frecuencia)
- Características geomorfológicas de la cuenca como área, forma, longitud del cauce principal, centro de gravedad, pendiente media del terreno, cobertura vegetal, etc.



- Parámetros de infiltración y los parámetros correspondientes
- Parámetros del hidrograma unitario
- Tiempo de recesión de las máximas avenidas.

3.3.9. Transformación de precipitación a escorrentía

Para la transformación de la lluvia en escorrentía se utilizó métodos como el de Snyder SCS. método de Snyder. Requiere los siguientes parámetros,

- T_p = tiempo (h),
- C_t = Coeficiente que representa variaciones de los tipos y localizaciones de los ríos varía entre 1.8 y 2.2 se asumirá 2
- L_{ca} = distancia del centro de gravedad de la subcuenta a su salida (m)
- L = longitud del curso principal (m).
- C_p = Coeficiente adimensional varía entre 0.4 y 0.8 se asumirá 0.6

3.3.10. Función de infiltración.

Para el caso de función de infiltración, se utilizó el servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos, SCS. Se necesitan tres tipos de datos: la pérdida inicial (en mm), el número de curva (CN) y el porcentaje de suelo impermeable en la cuenca. Para el caso de nuestra cuenca es necesario realizar el tránsito de avenidas (Villon, 2009).



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PARÁMETROS DE LA CUENCA

4.1.1. Determinación de la pendiente.

Del mapa de pendientes se determinó que la pendiente de la cuenca se encuentra entre 0 y 44.27 % para la parte media y baja de la cuenca, en la parte alta de la cuenca se evidencia pendientes entre 10 y 50.6 %; es decir, fuertemente ondulado, con alturas sobre el nivel del mar desde 3387 m.s.n.m. hasta los 5357 m.s.n.m, como se puede observar en el mapa de pendientes anexo B.

4.1.2. Cobertura vegetal y uso de los suelos.

De acuerdo al mapa D, la zona media de la cuenca del río Yabroco se caracteriza por tener gran extensión de zonas de reforestación con un área aproximada de 12275 km² que representa el 63 % de ocupación del suelo, también encontramos dentro de esta área de estudio la presencia de cultivos permanentes y transitorios, ver tabla 7.

Tabla 7. Cobertura vegetal del suelo para la cuenca Yabroco

Clase	Área (km ²)	% que ocupa
Cultivos temporales	3410	3
Cultivos permanentes	761	4
Zonas de pastoreo	5115	26
Área de reforestación	12275	63
Reservas naturales	614	4

Fuente: Elaboración propia

En la cuenca Yabroco la mayor superficie de cobertura vegetal con reforestación de 12,275 km², seguida de las zonas de pastoreo de 5,115 km². Sin embargo, la menor superficie es 614 km que corresponde a las reservas naturales.

4.1.3. Delimitación y determinación del modelo de la cuenca Yabroco.

Para el presente estudio se determinó que la cuenca Yabroco tiene un área de 276.6992 km² y un perímetro total de 82.1793 km. Obtenidos a partir de software ArcGIS 10.7, para la pendiente calculada a partir del perfil se tiene 44.27 % que corresponde a un relieve moderado, y 0.32 para el factor de forma, señala que la cuenca tiene una forma alargada, por tanto, el tiempo de concentración va a ser mayor.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las características morfo métricas de la cuenca y de la red de drenajes descritas en la tabla 8.

Tabla 8. Características morfo métricas de la cuenca Yabroco

Cuenca	Parámetros de relieve				Parámetros de forma	
	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud (km)	Pendiente (%)	Índice de Gravelius	Factor de Forma
Yabroco	276.6992	82.1793	34.5038	44.27	1.96	0.32

Fuente: Elaboración propia

Para los resultados obtenidos de la densidad de drenaje con 0.1257 % y densidad de corriente con 06 para la cuenca Yabroco, como se puede observar en la tabla 9, lo que indican que los materiales del suelo son muy permeables y la pendiente es alta; debido a que gran parte de la cuenca presenta suelos con vegetación y un relieve ligeramente pronunciado se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Características principales del cauce principal

Río	Longitud (km)	Densidad de drenaje (%)	Densidad de corriente	Pendiente (%)	Tiempo de concentración
Yabroco	34.5038	0.1247	0.60	11.77	19.60

Fuente: Elaboración propia

Las características geomorfológicas del cauce principal tienen una relación directa con el comportamiento del río, principalmente de la descarga. Asimismo, la densidad de drenaje tiene relación con el tiempo de concentración, con influencia de la pendiente.

4.1.4. Información pluviométrica e hidrográfica.

En cuanto a la información hidro-meteorológica fue proporcionada por SENAMHI y el ANA. Dicha información fue contrastada con la de SENAMHI, las estaciones dentro del ámbito del estudio tienen la categoría de PLU y CO, como la estación Susapaya con precipitación máximas de 24 horas, otras estaciones como Candarave, Vilacota, Aricota, y Sitajara, en este último se observa como el más influyente para efectos de la determinación del caudal máximo de diseño. Los registros de precipitación máxima en 24 horas en la estación Sitajara, es desde 1964 hasta 2011, periodo utilizado para el análisis estadístico.

Tabla 10. Resumen de las estaciones meteorológicas de influencia para el estudio

Estacion	Este	Norte	Cota	Dep	Prov	Dist	Tipo	Cuenca	Registro
Susapaya	394956	8102391	3309	Tacna	Tarata	Susapaya	Plu	Sama	1964-2011
Vilacota	395175	8118785	4390	Tacna	Tarata	Susapaya	Plu	Maure	1964-2011
Candarave	362013	8109977	3415	Tacna	Candarave	Candarave	Plu	Locumba	1964-2011
Sitajara	374919	8088192	3166	Tacna	Tarata	Sitajara	Plu	Sama	1964-2011
Aricota	368967	8091307	2850	Tacna	Candarave	Quilahuani	Plu	Locumba	1994-2011

Fuente: Elaboración propias

4.1.5. Registro de precipitación máxima de 24 horas.

En las figuras 7, 8, 9, 10 y 11, se puede observar el registro de precipitación máxima de 24 horas anual para los períodos desde 1964 hasta 2011 y en el cuadro de

resumen de precipitaciones máximas de las diferentes estaciones hidrológicas que se encuentran en la cuenca Yabroco.

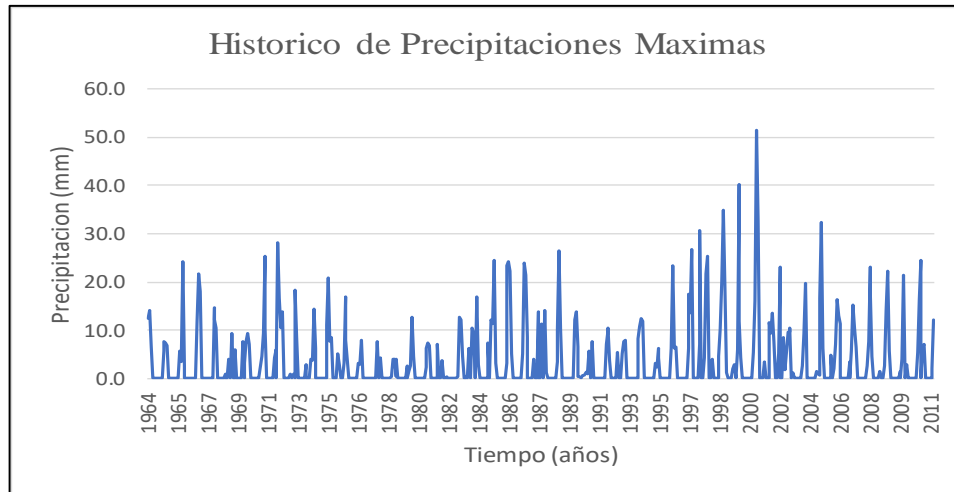


Figura 5. Registro de PP Máx 24 horas estación Susapaya

Fuente: SENAMHI – 2020

Las precipitaciones de las estaciones en estudio presentan variaciones en el tiempo, con más intensidad en el periodo de 1997 a 2001, años que muestran valores más altos respecto a otros periodos de la estación Susapaya. Mientras en la estación Vilcanota durante los años 1981 a 1989 se presentaron intensidades menores y en otros años fueron casi similares.

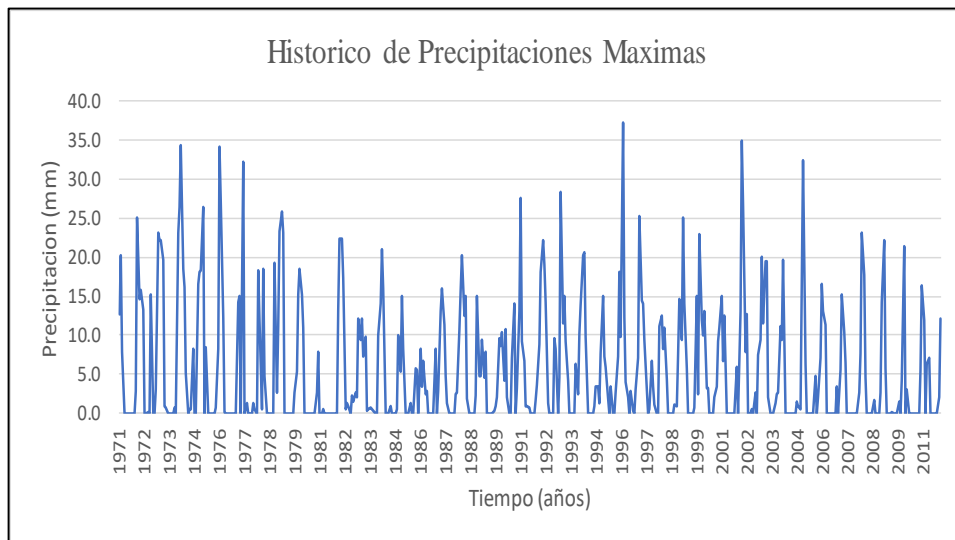


Figura 6. Registro de PP Máx 24 horas estación Vilacota

Fuente: SENAMHI – 2020

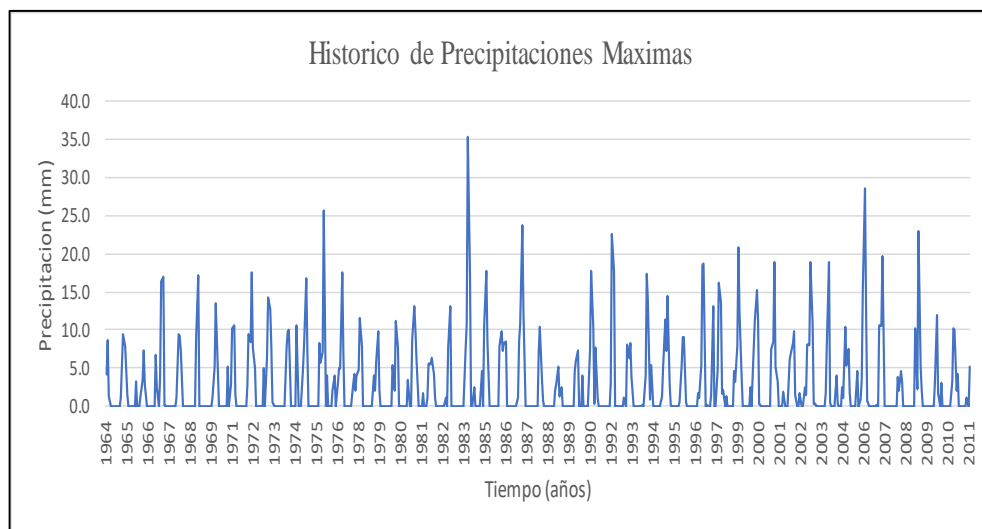


Figura 7. Registro de PP Máx 24 horas estación Candarave

Fuente: SENAMHI – 2020

El valor más alto se presentó en el año hidrológico de 1983-1984, esta inconsistencia se ha corregido las informaciones de la estación Candarave.

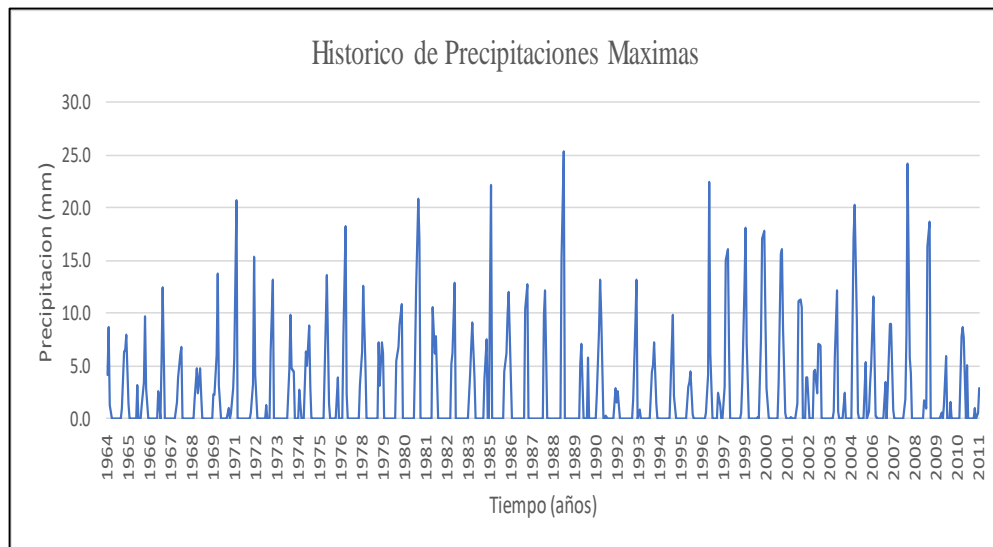


Figura 8. Registro de PP Máx 24 horas estación Sitajara

Fuente: SENAMHI – 2020

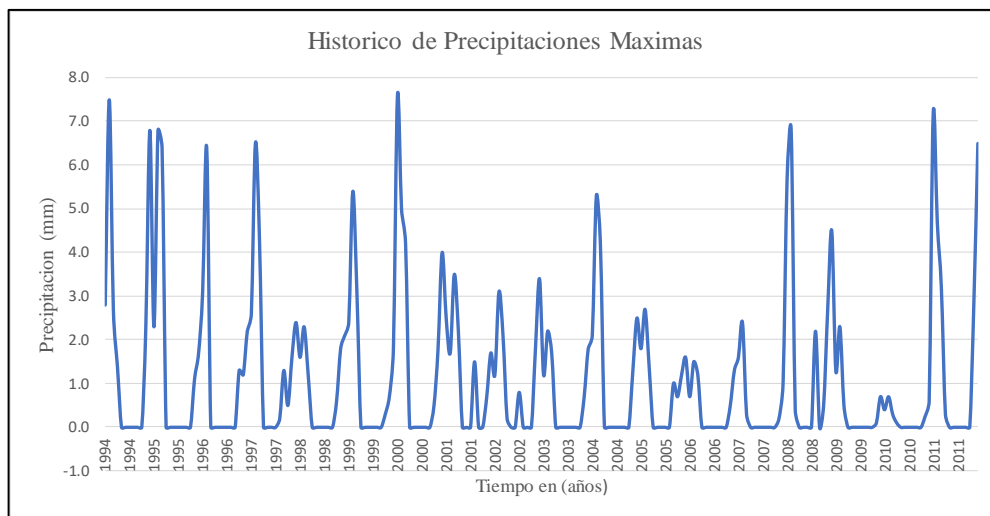


Figura 9. Registro de PP Máx 24 horas estación Aricota

Fuente: SENAMHI – 2020

Las informaciones de Sitajara y Aricota presentan irregularidades en las precipitaciones pluviales, estos comportamientos fueron revisadas sus consistencias.



4.1.6. Verificación de la hipótesis estadística en la información pluviográfica utilizando el criterio de información Akaike (AIC).

En esta etapa se realizó las tres verificaciones que se realizan a la serie asintóticas datos de crecidas de máximas de 24 h, con el objeto de garantizar la muestra, es decir que describe las características generales de la población a la que pertenece, y que a la misma se le puede aplicar la estadística inferencial, dichas verificaciones se muestra en las tablas 7, 8, 9, 10 y 11. Una de las condiciones para poder analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos sean aleatorios, es decir la probabilidad de ocurrencia de uno no dependa de otro. Una de estas pruebas de independencia, tenemos el de Wald-Wolfowitz. En la misma, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

H0: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

H1: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

Si $p < 0.05$ se considera significativo, en cuyo caso se rechaza la hipótesis nula

Si $p > 0.05$ se considera no significativo en cuyo caso no se rechaza la hipótesis nula.

Para la prueba de estacionalidad, mediante la prueba estadística de estacionalidad de Kendall se busca que en la serie de datos no se presente una tendencia temporal.

Finalmente, para la prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra.

Según los resultados obtenidos la muestra es independiente para la estación Susapaya, para el caso de las estaciones Vilacota, Candarave, Sitajara y Aricota no tiene independencia tal como se muestra en la figura 11, 12, 13,14 y 15.

Tabla 11. Verificación de hipótesis estación Susapaya

Tipo de Prueba	Ho	H1	U	P	Grupos	
Independencia (wald- wolfowitz)	5%		0.03	0.97	1965	2011
Estacionalidad (kendall)	5%		0.72	0.05	1965	2010
Homogeneidad a (escala anual wilcoxon)	5%		1.28	0.20	1965	2005

Fuente: Elaboración propia.

Las informaciones de las precipitaciones pluviales de la estación Susapaya y Vilcanota no presentan homogeneidad en sus registros. A excepción la estación Susapaya mediante la test Kendall.

Tabla 12. Verificación de hipótesis estación Vilacota

Tipo de Prueba	Ho	H1	U	P	Grupos	
Independencia (wald- wolfowitz)	5%		0.47	0.64	1965	2011
Estacionalidad (kendall)	5%		0.74	0.45	1965	2010
Homogeneidad a (escala anual wilcoxon)	5%		1.70	0.09	1965	1977

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Verificación de hipótesis estación Candarave

Tipo de Prueba	Ho	H1	U	P	Grupos	
Independencia (wald- wolfowitz)	0%	5%	3.23	0.00	1965	2011
Estacionalidad (kendall)	5%		0.09	0.93	1965	2010
Homogeneidad a (escala anual wilcoxon)	5%		0.24	0.81	1965	1985

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Verificación de hipótesis estación Sitajara

Tipo de Prueba	Ho	H1	U	P	Grupos	
Independencia (wald- wolfowitz)	5%		1.47	0.14	1965	2011
Estacionalidad (kendall)	5%		3.32	0.02	1965	2011
Homogeneidad a (escala anual wilcoxon)	5%		1.90	0.06	1965	1992

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Verificación de hipótesis estación Aricota

Tipo de Prueba	Ho	H1	U	P	Grupos	
Independencia (wald- wolfowitz)	5%		0.85	0.40	2006	2011
Estacionalidad (kendall)	5%		0.38	0.71	2006	2011
Homogeneidad a (escala anual wilcoxon)	5%		0.23	0.82	2006	2009

Fuente: Elaboración propia

4.1.7. Estimación de los parámetros de máxima verosimilitud.

Se utilizó los métodos estadísticos de distribución más conocidos y luego se procedió a analizarlos estadísticamente, tomando la media y la desviación estándar, para ver si sus valores están dentro del rango permisible para un cierto nivel de significancia, según la hipótesis que se planteó. Con el objetivo de llegar a la confiabilidad de la muestra, si fuera posible de corregir, es más, mejorar su bondad estadística y obtener finalmente una serie de datos homogéneos y consistentes.

4.1.8. Ajuste de función de distribución y estimación de parámetros.

En cuanto a los modelos hidrológicos de máximas avenidas evaluados mediante los criterios de información la hipótesis es aceptada para los métodos Gumbel, Weibull, Normal, LogNormal III Parametro, Gama y Person Tipo III, se rechaza el método

LogNormal según el criterio de información de máxima verosimilitud tal como se muestra en la tabla 16, 17, 18 y 19.

Tabla 16. Probabilidad y estimación de parámetros estación Susapaya

Metodo	maxima verosimilitud				Parametros						NC
	P	x2	GL	Ho=5%	μ	α	c	σ	m	λ	
Gumbel	0.7306	3.60	6	Aceptamos	10.39	6.57					95%
weibull	0.6227	4.40	6	Aceptamos		15.77	1.65				95%
Normal	0.1626	9.20	6	Aceptamos	14.18			8.82			95%
LogNormal	0.0100	16.80	6	Rechaza	2.41			0.89			95%
LogNormal III Parametros	0.6700	3.20	5	Aceptamos	3.83			0.35	-9.03		95%
Gama	0.3800	6.40	6	Aceptamos		0.16				2.20	95%
Person Tipo III	0.5500	4	5	Aceptamos		0.26			-3.64	4.64	95%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Probabilidad y estimación de parámetros estación Vilacota

Metodo	Maxima verosimilitud				Parametros						NC
	P	x2	GL	Ho=5%	μ	α	c	σ	m	λ	
Gumbel	0.8278	2.15	5	Aceptamos	9.26	6.05					95%
weibull	0.3033	6.03	5	Aceptamos		13.90	1.80				95%
Normal	0.1187	7.48	5	Aceptamos	12.54			6.76			95%
LogNormal	0.0006	16.21	5	Rechaza	2.27			0.96			95%
LogNormal III Parametros	0.3300	4.58	4	Aceptamos	3.69			0.16	.27.282		95%
Gama	0.1900	7.48	5	Aceptamos		0.17				2.10	95%
Person Tipo III	0.5200	4	5	Aceptamos		0.58			-13.67	15.24	95%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Probabilidad y estimación de parámetros estación Candarave

Metodo	maxima verosimilitud				Parametros						NC
	P	x2	GL	Ho=5%	μ	α	c	σ	m	λ	
Gumbel	0.6649	4.09	6	Aceptamos	12.86	8.02					95%
weibull	0.0417	13.09	6	Rechaza		19.86	1.48				95%
Normal	0.0022	20.52	6	Aceptamos	17.83			0.14			95%
LogNormal	0.9200	0.95	6	Rechaza	2.66			0.72			95%
LogNormal III Parametros	0.1800	7.61	5	Aceptamos	2.99			0.48	-4.66		95%
Gama	0.0400	13.48	6	Rechaza		0.14				2.41	95%
Person Tipo III	0.0600	10.74	5	Aceptamos		0.18			1	2.26	95%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Probabilidad y estimación de parámetros estación Sitajara

Metodo	maxima verosimilitud				Parametros						NC
	P	x2	GL	Ho=5%	μ	α	c	σ	m	λ	
Gumbel	0.5494	4	5	Aceptamos	8.15	4.69					95%
Weibull	0.1173	8.80	5	Aceptamos		12.33	1.98				95%
Normal	0.1355	8.40	5	Aceptamos	10.89			5.91			95%
LogNormal	0.6083	3.60	5	Aceptamos	2.23			0.60			95%
LogNormal III Parametros	0.4100	4	4	Aceptamos	2.62			0.39	-3.94		95%
Gama	0.5500	4	5	Aceptamos		0.30				3.31	95%
Person Tipo III	0.4100	4	4	Aceptamos		0.30			0.16	3.18	95%

Fuente: Elaboración propia

4.1.9. Análisis de probabilidad de distribución empírica para eventos extremos.

Para la distribución de probabilidades empírica las que más representan la probabilidad de ocurrencia de una serie hidrometeorológica. Se utilizó las más conocidas que se usan en hidrología generalmente en el análisis de eventos máximos son:

- Gumbel
- Weibull
- Normal
- LogNormal
- LogNormal III Parámetros
- Gamma
- Pearson Tipo III

De las cuales tenemos como resultado la distribución de probabilidad empírica para diferentes periodos de retorno:

Tabla 20. Distribución teórica Weibull estación Susapaya

T	q	Weibull		Límites	
		XT	Desv	Min	Max
10000	0.9999	70.90	7.53	56.1	85.6
2000	0.9995	60.30	6.29	48.0	72.6
1000	0.999	55.71	5.74	44.5	67.0
200	0.995	45.20	5.53	36.3	54.1
100	0.99	40.60	4.01	32.7	48.5
50	0.98	36.00	3.48	29.2	42.8
20	0.95	29.90	2.80	24.4	35.4
10	0.9	25.20	2.28	20.7	29.6
5	0.8	20.20	1.77	16.8	23.7
3	0.6	16.3	1.41	13.6	19.1
2	0.5	12.8	1.15	10.5	15.0

Fuente: Elaboración propia

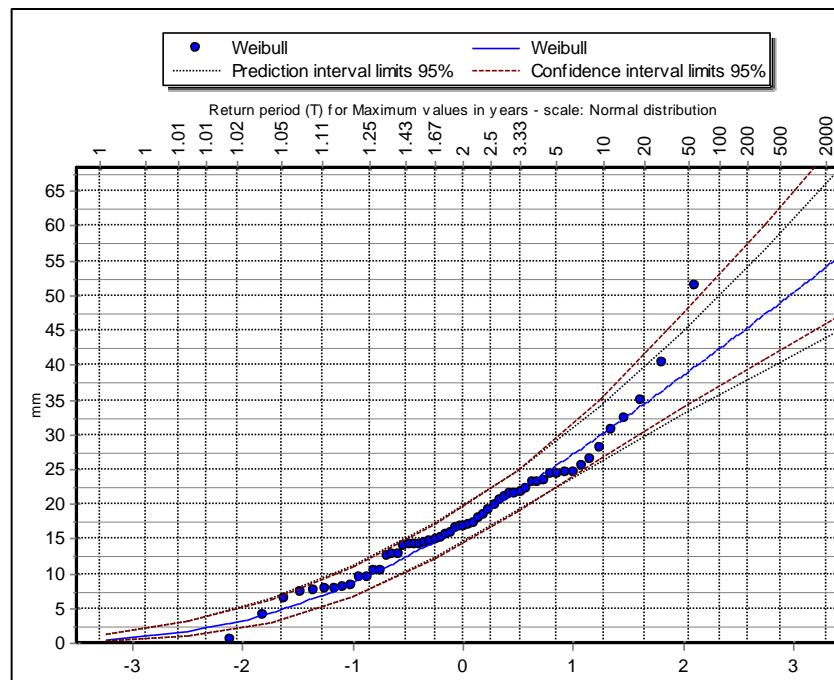


Figura 10. Distribución teórica Weibull estación Susapaya

Fuente: Elaboración propia

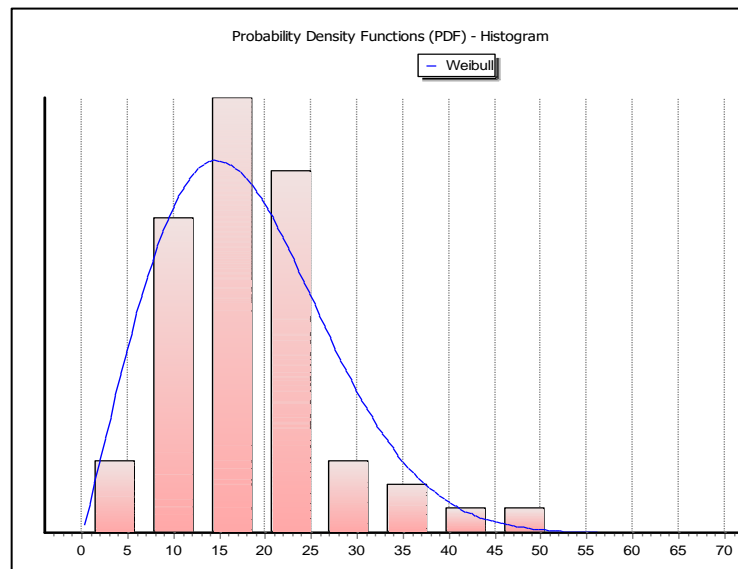


Figura 11. Histograma de función de probabilidad Weibull estación Susapaya

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Distribución teórica Gamma estación Vilacota

Gamma					
T	q	XT	Desv	Límites	
				min	max
10000	0.9999	64.9	8.14	49.0	80.9
2000	0.9995	55.2	6.80	41.9	68.5
1000	0.999	51.0	6.23	38.8	63.2
200	0.995	41.3	4.90	31.7	50.9
100	0.99	37.1	4.33	28.6	45.6
50	0.98	32.8	3.79	25.5	40.2
20	0.95	27.2	3.02	21.3	33.1
10	0.9	22.9	2.46	18.0	27.7
5	0.8	18.3	1.91	14.6	22.1
3	0.6667	14.7	1.51	11.7	17.7
2	0.5	11.5	1.23	9.1	13.9

Fuente: Elaboración propia.

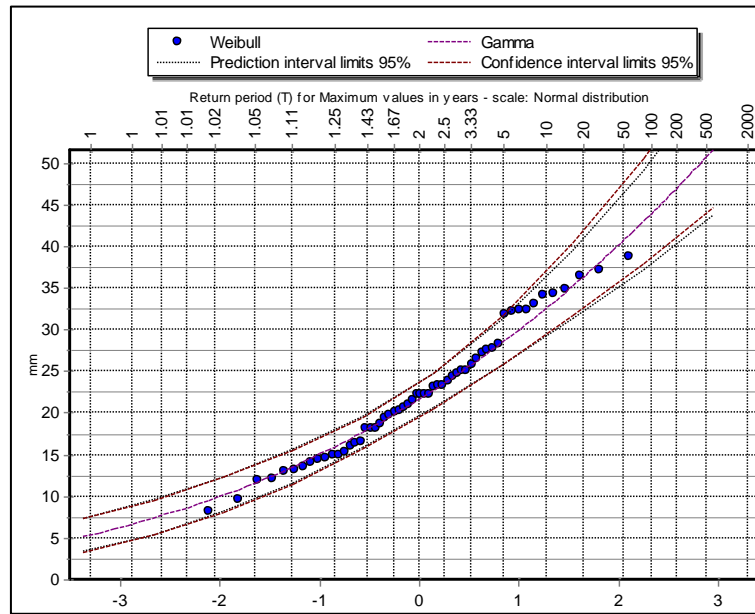


Figura 12. Distribución teórica Gumbel estación Vilacota

Fuente: Elaboración propia

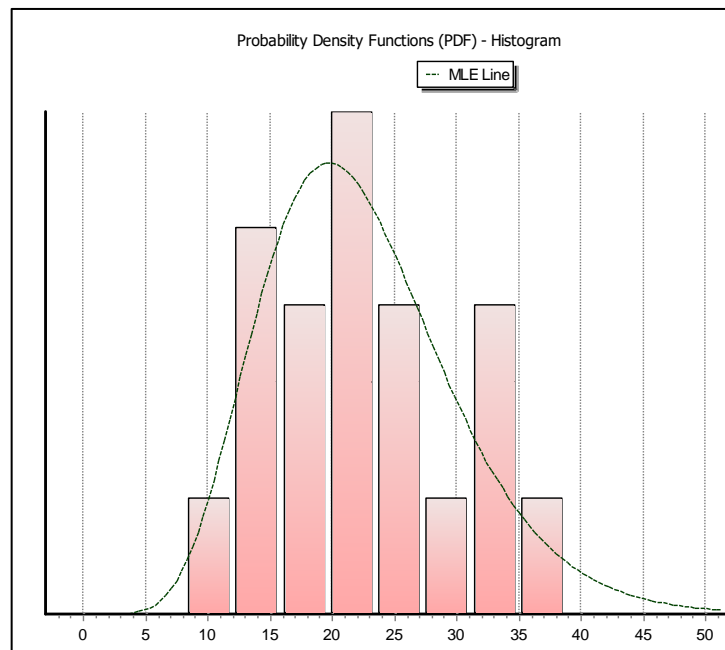


Figura 13. Histograma de función de probabilidad estación Vilacota.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Cuadro de distribución teórica estación Candarave

Person III					
T	q	XT	Desv	Límites	
				min	max
10000	0.9999	206	62	84.6	328
2000	0.9995	152	41	71.2	232
1000	0.999	131	33.7	65.2	197
200	0.995	90.7	20.1	51.3	130
100	0.99	75.9	15.6	45.3	106
50	0.98	62.4	11.7	39.4	85.4
20	0.95	46.5	7.6	31.6	61.4
10	0.9	35.8	5.14	25.8	45.9
5	0.8	26.1	3.23	19.8	32.5
3	0.6667	19.5	2.15	15.2	23.7
2	0.5	14.3	1.51	11.3	17.2

Fuente: Elaboración propia

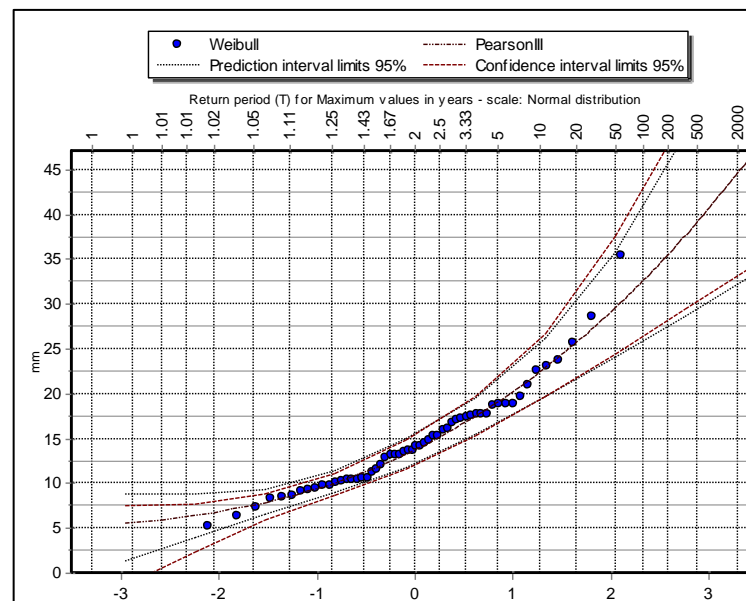


Figura 14. Distribución teórica Log Pearson III estación Candarave.

Fuente: Elaboración propia.

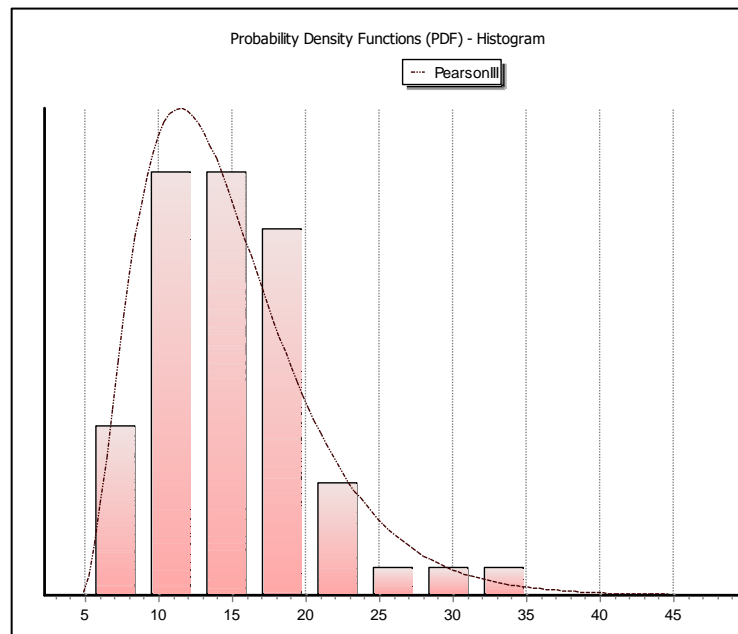


Figura 15. Histograma de función de probabilidad estación Candarave

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Distribución teórica estación Sitajara

LogNormal					
T	q	XT	Desv	Límites	
				min	max
10000	0.9999	51.30	5.72	40.1	62.5
2000	0.9995	43.80	4.78	34.4	53.2
1000	0.999	40.50	4.37	32.0	49.1
200	0.995	33.00	3.44	26.2	39.7
100	0.99	29.70	3.04	23.8	35.7
50	0.98	26.50	2.64	21.3	31.6
20	0.95	22.10	2.12	17.9	26.2
10	0.9	18.70	1.73	15.3	22.1
5	0.8	15.20	1.34	12.6	17.8
3	0.6667	12.4	1.07	10.3	14.5
2	0.5	9.87	0.868	8.2	11.6

Fuente: Elaboración propia.

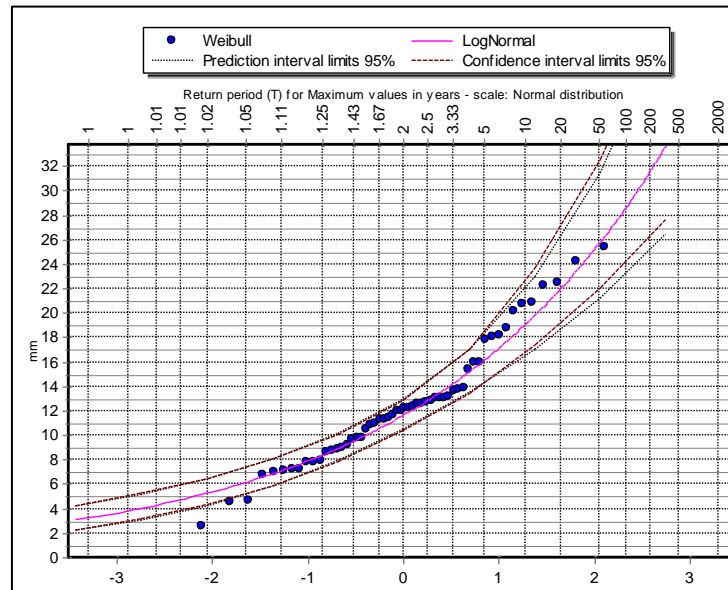


Figura 16. Distribución teórica Log Normal estación Sitajara

Fuente: Elaboración propia

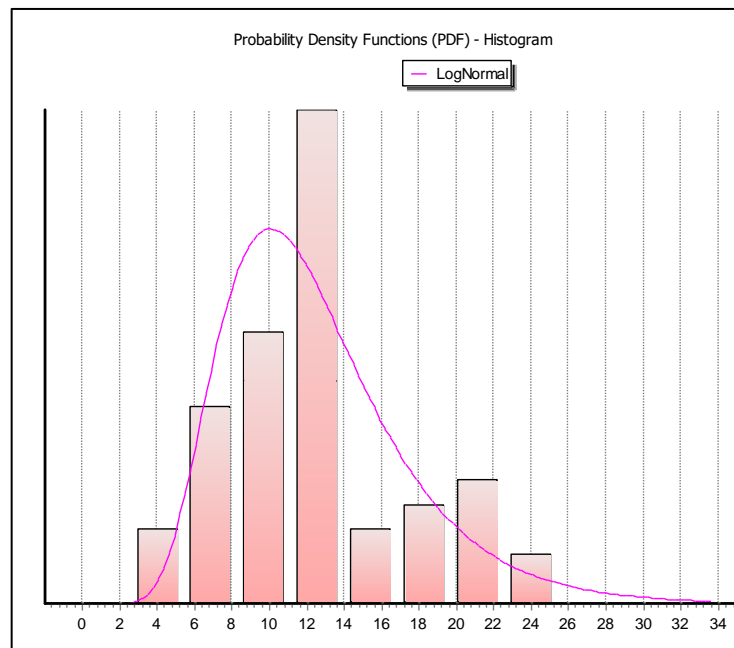


Figura 17. Hidrograma de función de probabilidad estación Sitajara

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Distribución teórica estación Aricota

Normal (Maxima verosimilitud)					
T	q	XT	Desviación estandar	Interval de confianza (95%)	
10000	0.9999	13.2	1.6	10.1	16.3
2000	0.9995	12.2	1.44	9.39	15
1000	0.999	11.7	1.36	9.06	14.4
200	0.995	10.5	1.18	8.22	12.8
100	0.99	9.94	1.09	7.8	12.1
50	0.98	9.3	0.996	7.35	11.2
20	0.95	8.34	0.864	6.64	10
10	0.9	7.48	0.757	6	8.97
5	0.8	6.45	0.649	5.18	7.72
3	0.6667	5.48	0.58	4.35	6.62
2	0.5	4.47	0.554	3.39	5.56

Fuente: Elaboración propia

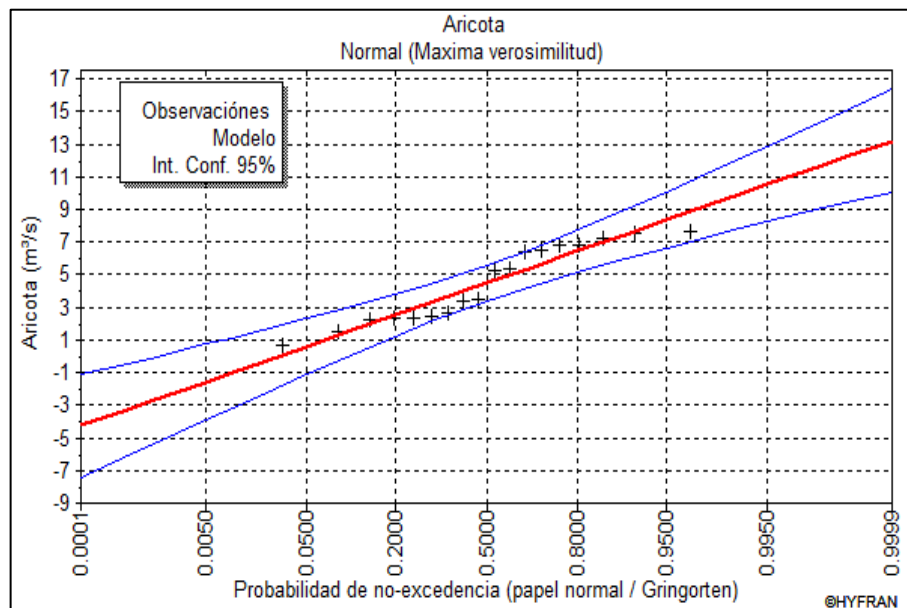


Figura 18. Distribución teórica Normal estación Aricota.

Fuente: Elaboración propia

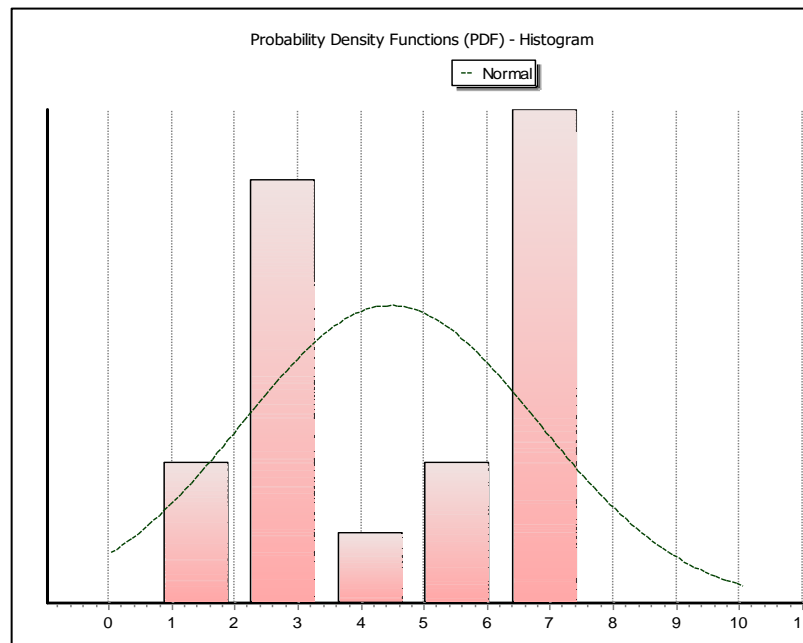


Figura 19. Hidrógrama de función de probabilidad, estación Aricota

Fuente: Elaboración propia

Se ha encontrado que la distribución Wilbull no genera una confiabilidad en los resultados como se puede observar en la tabla 20 de la estación Susapaya, lo cual, no es aceptable ya que no se ajustan a la distribución teórica de LogNormal, Normal, sin embargo, las distribuciones Gamma y Pearson III se ajustan a las estaciones Vilacota y Candarave como se puede observar en las tablas 21 y 22, este criterio de información es similar a lo obtenido según Akaike en su información teoría y una extensión del principio de máxima verosimilitud según el autor DeLeeuw, de la Universidad de California en Los Ángeles.

4.2. RESULTADO DEL MODELO ESTADÍSTICO.

Tabla 25. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov, estación Vilacota

Smirnov Kolmogorov				
	5%	10%	F (%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	81.72%	0.08
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	83.72%	0.08
Exponential	REJECT	REJECT	4.16%	0.19
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	87.59%	0.08
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	85.94%	0.08
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	76.80%	0.09
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	82.25%	0.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Verificación estadística Chi-cuadrado, estación Vilacota

Chi - Cuadrado				
	5%	10%	F(%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	61.75%	0.96
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	25.28%	2.75
Exponential	REJECT	REJECT	0.59%	10.25
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	67.51%	0.79
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	43.59%	0.61
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	10.88%	2.57
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	25.28%	2.75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov, estación Susapaya

Smirnov Kolmogorov				
	5%	10%	F (%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	85.08%	0.08
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	81.64%	0.08
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	24.93%	0.14
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	87.52%	0.08
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	83.80%	0.08
Log Pearson III	REJECT	REJECT	0.01%	0.30
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	93.80%	0.07

Fuente: Elaboración propia



Tabla 28. Verificación estadística Chi-cuadrado, estación Susapaya

Chi - Cuadrado				
	5%	10%	F(%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	90.98%	1.00
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	1.74%	12.00
Exponential	REJECT	REJECT	0.52%	14.75
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	44.09%	3.75
Pearson III	ACCEPT	REJECT	28.98%	3.75
Log Pearson III	REJECT	REJECT	0.00%	34.00
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	37.32%	4.25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov, estación Candarve.

Smirnov Kolmogorov				
	5%	10%	F (%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	79.37%	0.09
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	86.82%	0.08
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	37.54%	0.12
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	93.18%	0.07
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	95.20%	0.07
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	89.07%	0.08
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	84.55%	0.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Verificación estadística Chi-cuadrado, estación Candarave

Chi - Cuadrado				
	5%	10%	F(%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	43.20%	1.68
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	61.75%	0.96
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	25.28%	2.75
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	36.14%	2.04
Pearson III	ACCEPT	REJECT	7.79%	3.11
Log Pearson III	ACCEPT	REJECT	7.79%	3.11
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	39.51%	1.86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov, estación Sitajara

Smirnov Kolmogorov				
	5%	10%	F (%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	21.46%	0.14
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	97.23%	0.06
Exponential	ACCEPT	REJECT	35.29%	0.12
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	76.57%	0.09
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	64.53%	0.10
Log Pearson III	REJECT	REJECT	33.66%	0.13
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	94.15%	0.07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Verificación estadística Chi – Cuadrado, estación Sitajara

Chi - Cuadrado				
	5%	10%	F(%)	DMAX
Normal	REJECT	REJECT	3.28%	10.50
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	13.59%	7.00
Exponential	REJECT	REJECT	0.52%	14.75
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	28.73%	5.00
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	10.01%	6.25
Log Pearson III	REJECT	REJECT	1.66%	10.25
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	19.91%	6.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Verificación estadística Smirnov-Kolmogorov, estación Aricota

Smirnov Kolmogorov				
	5%	10%	F (%)	DMAX
Normal	ACCEPT	ACCEPT	18.46%	0.13
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	86.23%	0.05
Exponential	ACCEPT	REJECT	45.29%	0.10
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	67.57%	0.08
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	56.53%	0.12
Log Pearson III	REJECT	REJECT	36.66%	0.13
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	95.15%	0.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Verificación estadística Chi-cuadrado, estación Aricota

Chi - Cuadrado				
	5%	10%	F(%)	DMAX
Normal	REJECT	REJECT	2.28%	10.70
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	12.59%	8.00
Exponential	REJECT	REJECT	0.62%	13.57
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	30.73%	4.89
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	12.01%	5.89
Log Pearson III	REJECT	REJECT	1.86%	9.82
Gumbel	ACCEPT	ACCEPT	20.91%	7.00

Fuente: Elaboración propia

4.3. SELECCIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO.

4.3.1. Criterio de Akaike AIC para diferentes periodos de retorno.

En la tabla 35 se muestra la distribución normal ajustada con máxima verosimilitud se ajusta ya que para el criterio de información Akaike (AIC), se considera como la precipitación más confiable a máxima verosimilitud el valor más bajo AIC obtenido para este estudio se consideró la distribución teórica Normal con un AIC de 314.298 mm, como se puede observar en la tabla 35.

Tabla 35. Selección del modelo estadístico para T=100 años

PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS						
Modelos	N°	XT (mm)	P(Min)	P(Max)	BIC	AIC
Normal (Maxima verosimilitud)	2	29.592	8.33	40.21	317.955	314.298
GEV (Método de momentos)	3	31.637	8.33	13.24	320.177	314.691
Gumbel (Método de momentos)	2	35.369	8.33	12.73	320.255	316.597
Pearson tipo III (Método de momentos)	3	31.732	8.33	12.34	320.318	314.832
Log-normal (3 parametros) (Método de momentos)	3	31.787	8.33	12.06	320.363	314.877
Gamma generalizada (Método de momentos)	3	30.738	8.33	6.51	321.597	316.111
Weibull (Método de momentos)	2	32.79	8.33	2.61	323.426	319.769
Log-Pearson tipo III (Método de momentos (BOB), basis = 10)	3	29.77	8.33	0.3	327.752	322.266
Exponencial (Maxima verosimilitud)	2	69.832	8.33	0	337.197	333.539
Gamma (Método de momentos)	2	35.001	8.33	0	342.869	339.212
Lognormal (Maxima verosimilitud)	2	141.252	8.33	0	357.773	354.115
Pareto (Método de momentos ponderados)	2	23.546	8.33	N/D	N/D	N/D

Fuente: Elaboración propia

Este criterio de información discrepa con los resultados obtenidos del modelo estadístico Smirnov-Kolmogorov y Chi-cuadrado, en otros autores como Ximenes, hace la comparación de estos métodos de estimación de máxima verosimilitud y mínimos cuadrados no ponderados, el cual dio como resultado que son eficientes para muestras pequeñas no aleatorias.

4.3.2. Selección de la función de probabilidad.

En el análisis estadístico de las series de precipitación máxima 24h para las estaciones Susapaya, Vilacota, Candarave, Sitajara y Aricota sus Agua con influencia en el área de estudio, se abordó con la aplicabilidad de cinco modelos probabilísticos correspondientes a las funciones de Normal, Weibull, Log-Normal, Gamma, Pearson tipo III, el cual permite predecir el comportamiento futuro de la precipitación en el sitio de interés, a partir de la información histórica encontrada de registros de precipitación máxima 24 h. Se determinó que la mayor precipitación para un periodo de retorno de 100

años se encuentra en la estación Candarave, con una precipitación de 52.363 mm y la más baja en la estación Aricota con una precipitación de 18.422 mm, como se observa en la tabla 36.

Tabla 36. Precipitación según la probabilidad de distribución

ESTACION	MODELO DE DISTRIBUCION	N° DE PARAMETROS	XT	AIC
Candarave	Person III	2	52.365	345.621
Susapaya	Weibull	2	35.267	315.986
Sitajara	LongNormal	2	25.618	557.047
Vilacota	Gamma	2	22.135	223.675
Aricota	Normal	2	18.432	34.816

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, de la comparación de ambos métodos se puede evaluar según los valores de precipitación mostrados en la tabla 36 en el cual los resultados AIC obtenidos son más significativos si se quiere evaluar máximas avenidas.

4.3.3. Cálculo de la curva IDF para un periodo de retorno de 100 años.

Para el cálculo de las curvas IDF, se calculó las precipitaciones máximas probables para un periodo de retorno de 100 años, para diferentes tiempos de duración de lluvias que va desde una 1 hora hasta 24 horas de duración, resultados que podemos observar en la tabla 42 para las diferentes estaciones.

Tabla 37. Precipitación máxima 24 h de las estaciones de estudio

Precipitación máxima Pd (mm) para T = 100 años					
Tiempo de duración	Candarave	Susapaya	Sitajara	Vilacora	Aricota
24	52.365	35.267	25.618	22.135	18.432
20	48.69945	32.79831	23.82474	20.58555	17.14176
18	47.1285	31.7403	23.0562	19.9215	16.5888
16	45.55755	30.68229	22.28766	19.25745	16.03584
14	43.46295	29.27161	21.26294	18.37205	15.29856
12	41.36835	27.86093	20.23822	17.48665	14.56128
10	38.22645	25.74491	18.70114	16.15855	13.45536
8	33.5136	22.57088	16.39552	14.1664	11.79648
6	29.3244	19.74952	14.34608	12.3956	10.32192
4	23.0406	15.51748	11.27192	9.7394	8.11008
3	19.8987	13.40146	9.73484	8.4113	7.00416
2	16.23315	10.93277	7.94158	6.86185	5.71392
1	13.09125	8.81675	6.4045	5.53375	4.608

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de precipitación diaria máxima probables para distintas frecuencias

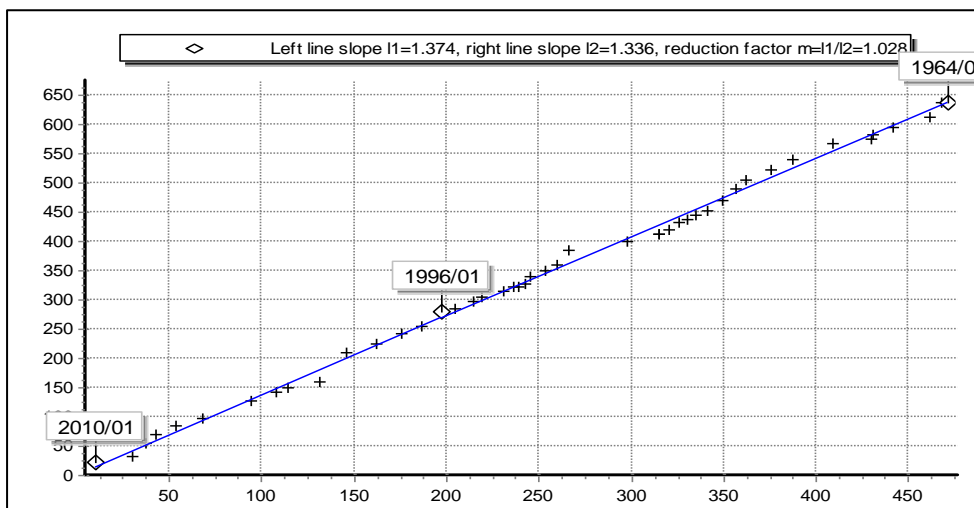


Figura 20. Precipitación máxima diaria

Intensidad de lluvia para tiempos de duración de 1 a 24 horas en diferentes periodos de retorno.

Tabla 38. Intensidad de duración de 1 a 24 horas

TIEMPO DE DURACION		INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/hr) SEGÚN EL PERIODO DE RETORNO							
HORAS	MINUTOS	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	200 años	500 años
24 hr	1440	0.7255	1.1429	1.4193	1.7684	2.0274	2.2846	2.5407	2.8787
22 hr	1320	0.7678	1.2094	1.5018	1.8713	2.1454	2.4175	2.6886	3.0462
20 hr	1200	0.8097	1.2755	1.5839	1.9736	2.2626	2.5496	2.8355	3.2126
18 hr	1080	0.8707	1.3715	1.7031	2.1221	2.4329	2.7415	3.0489	3.4544
16 hr	960	0.9468	1.4915	1.8521	2.3078	2.6458	2.9813	3.3157	3.7567
14 hr	840	1.0324	1.6262	2.0194	2.5162	2.8848	3.2506	3.6151	4.0960
12 hr	720	1.1464	1.8058	2.2424	2.7941	3.2034	3.6096	4.0144	4.5483
10 hr	600	1.2712	2.0024	2.4866	3.0983	3.5521	4.0025	4.4514	5.0435
8 hr	480	1.3931	2.1944	2.7250	3.3954	3.8927	4.3863	4.8782	5.5271
6 hr	360	1.6252	2.5602	3.1792	3.9613	4.5415	5.1174	5.6912	6.4483
5 hr	300	1.7413	2.7430	3.4062	4.2442	4.8659	5.4829	6.0977	6.9089
4 hr	240	1.9154	3.0173	3.7469	4.6686	5.3525	6.0312	6.7075	7.5998
3 hr	180	2.2057	3.4745	4.3146	5.3760	6.1634	6.9450	7.7238	8.7512
2 hr	120	2.6990	4.2517	5.2797	6.5785	7.5421	8.4985	9.4515	10.7088
1 hr	60	4.3533	6.8576	8.5156	10.6105	12.1647	13.7073	15.2722	17.2722

Fuente: Elaboración propia

$$I = \frac{K.T^m}{t^n} \quad (41)$$

$$I = \frac{99.153 * T^{0.1724}}{t^{-0.540}} \quad (42)$$

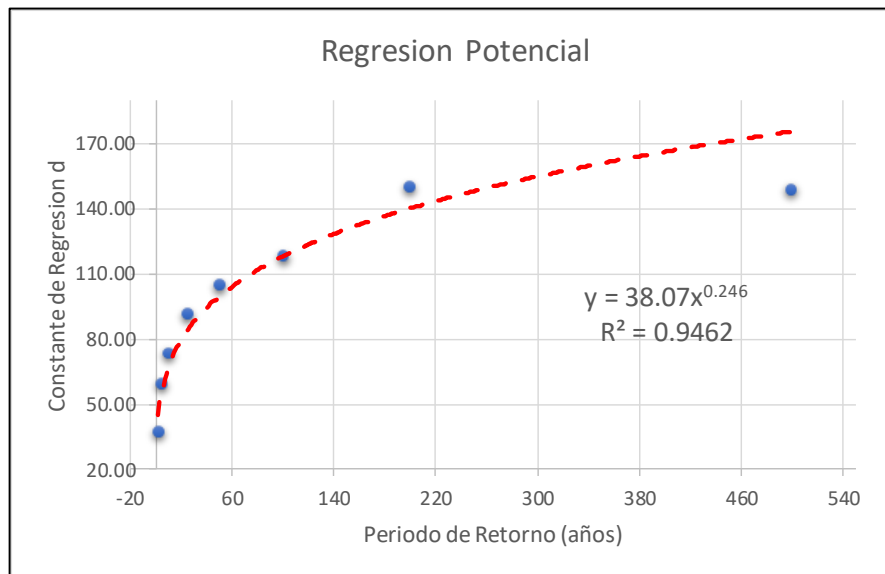


Figura 21. Regresión potencial

Tabla 39. Intensidad de duración para diferentes periodos de retorno

Frecuencia años	Duracion en minutos para I1											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	86.08	113.67	133.74	150.09	164.14	176.59	187.85	198.18	207.77	216.73	225.18	233.17
5	107.85	142.41	167.55	188.04	205.64	221.24	235.34	248.29	260.30	271.53	282.11	292.12
10	127.90	168.88	198.70	223.00	243.87	262.37	279.10	294.45	308.69	322.01	334.56	346.43
25	160.24	211.58	248.94	279.38	305.53	328.70	349.66	368.89	386.74	403.43	419.14	434.03
50	190.03	250.92	295.22	331.32	362.33	389.81	414.67	437.48	458.64	478.43	497.07	514.72
100	225.36	297.57	350.10	392.91	429.69	462.28	491.76	518.81	543.90	567.37	589.48	610.41
200	267.25	352.89	415.19	465.96	509.58	548.23	583.19	615.27	645.02	672.86	699.07	723.89
500	334.82	442.11	520.17	583.77	638.42	686.84	730.64	770.82	808.10	842.98	875.82	906.92

Fuente: Elaboración propia

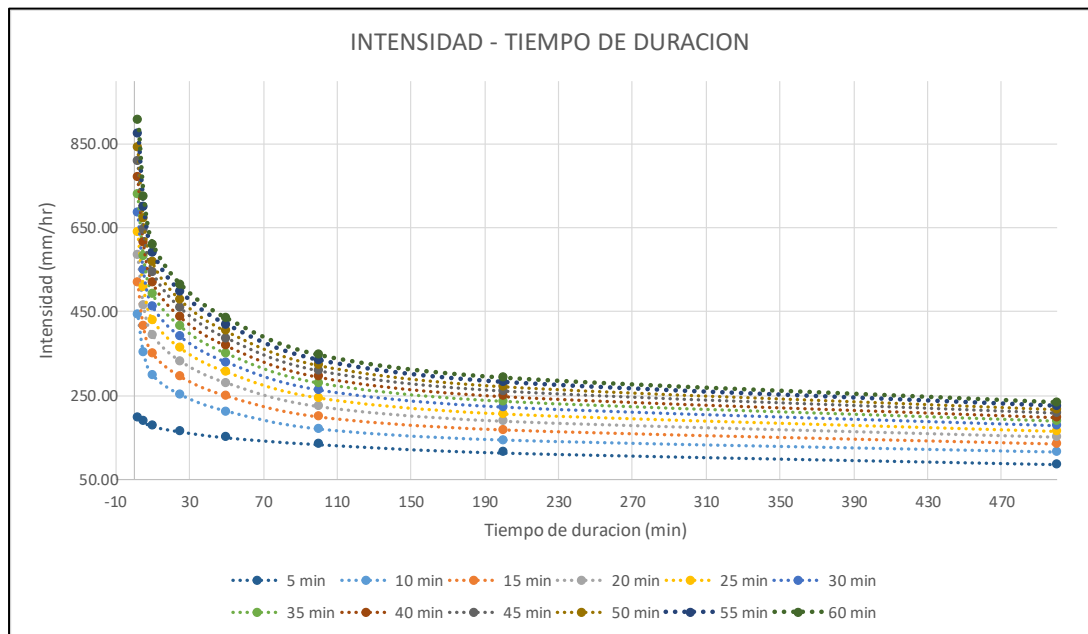


Figura 22. Curvas de intensidad de tiempo de duración

Fuente: Elaboración propia

4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MARGEN DE ERROR

Para determinar el ajuste de los datos a una distribución de probabilidad se han propuesto una serie de pruebas estadísticas que se mencionan anteriormente se determinó si es adecuado el ajuste.

En la teoría estadística las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son las de Smirnov–Kolmogorov y Chi–cuadrado, las cuales son las que se están utilizando en nuestro análisis, para encontrar la función de mejor ajuste se utilizó el software Hydrognomon, los resultados se pueden apreciar en el tabla 40 Al aplicar la funciones de distribución Gumbel a los datos de los registros de la estación en estudio es posible que se observen que existen diferencias que son apreciables entre las mismas.

Tabla 40. Distribución teórica aceptable

ESTACION	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Vilacota	26.86	31.35	41.21	45.37
Susapaya	19.33	23.74	33.57	37.69
Candarave	27.86	36.12	53.94	61.55
Sitajara	15.16	18.62	26.25	29.46
Aricota	6.54	8.65	13.25	15.32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Comparación de los modelos para T= 100

Estaciones	Hidrognomon	Hyfran
	Smirnov-Kolmogorov	Chi-cuadrado
Vilacota	45.36	28.292
Susapaya	37.72	40.599
Candarave	61.54	49.743
Sitajara	29.44	29.391
Aricota	15.23	27.9

Fuente: Elaboración propia

4.5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN POR EL MÉTODO DE ISOYETAS.

Para el análisis espacial de distribución de la precipitación se extrajo información nueva y significativa a partir de los datos originales. Usualmente el análisis espacial se ha realizado con la integración del Sistema de Información Geográfica (SIG). para calcular estadísticas de los rasgos y realizar actividades de geoprocesamiento como la interpolación de datos estadísticos a partir de esto se creó superficies de distribución de la precipitación. Utilizando la información mostrada en la tabla 49. y con la herramienta (Inverse Distance Weighted) de Interpolate to Raster del módulo Spatial Analyst del software ArcGIS se ha generado la distribución espacial de la precipitación para cada periodo de retorno.

Para la generación de los mapas de Isoyetas se ha empleado la herramienta Contour de Surface Analysis del módulo Spatial Analyst del software ArcGIS, cuyos resultados se muestra en la figura 49. A partir de los mapas de Isoyetas para cada periodo de retorno se ha estimado la precipitación máxima para el área de la cuenca delimitada para el punto base (Candarave).

Tabla 42. Resumen de precipitaciones dentro de la cuenca

Periodos	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Pmax (mm)	4427.52	4429.48	9359.12	11073.77

Fuente: Elaboración propia

Las precipitaciones máximas incrementan en función al incremento del periodo de retorno.

Tabla 43. Valores delta tabular y teórico de las distribuciones de frecuencia

Modelo	D Teórico	D Tabular
Normal	0.117	0.3051
LogNormal	0.109	0.3015
Exponencial	0.1214	0.3512
Gamma	0.0885	0.3016
Pearson III	0.09648	0.3016
Gumbel	0.0748	0.3016
LogPerson III	no	no

Fuente: Elaboración propia.

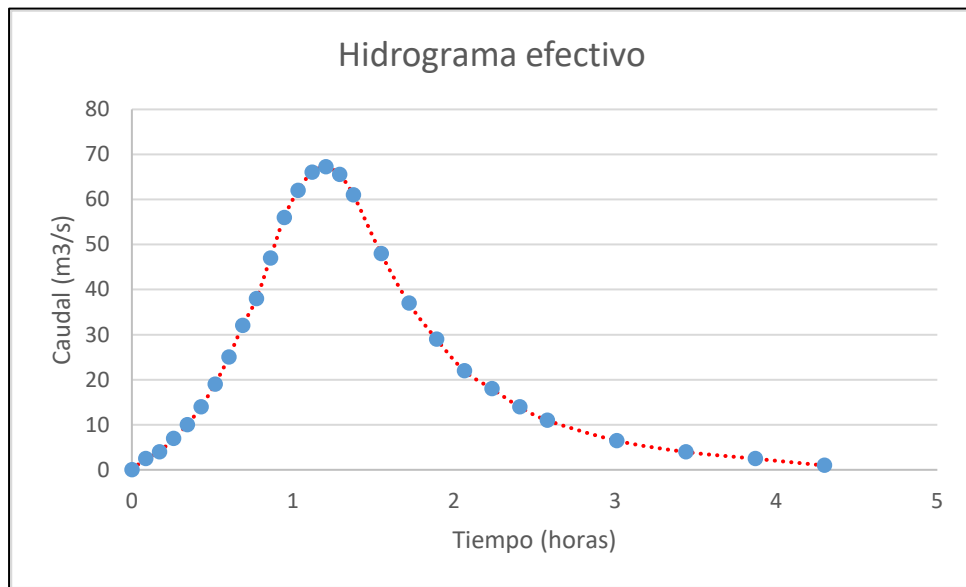


Figura 23. Hidrograma unitario adimensional

Fuente: Elaboración propia

Siendo el caudal pico $67.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y el tiempo pico 16.18 horas

4.6. CAUDAL GENERADO POR EL MODELO HEC HMS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

A continuación, se resume los valores de los parámetros ingresados al modelo HEC HMS en el en el proceso de cálculo de caudales máximos.

Tabla 44. Parámetros de la sub cuencas para el análisis del HEC HMS

Longitud del cauce principal =	34.5038	km
Pendiente =	0.1177	mm/mm
Área de la cuenca =	276.6992	km ²
Diferencia de cotas =	104	mm/mm
Kirpich Tc=	0.07	h
Temez =	3.15	h
Pasini Tc =	6.55	h
Tiempo de concentración adoptado =	24.57	h
Tiempo de retardo (Lag Time) =	885	min
Numero de curva (CN) =	63	

Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico se observa el escritorio de trabajo de simulación del software HEC-HMS.

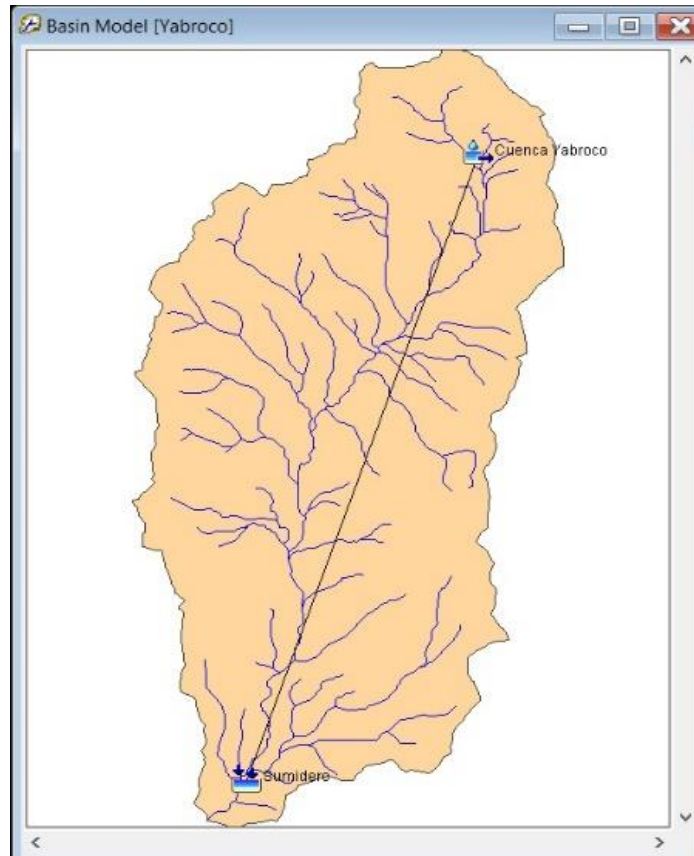


Figura 24. Planteamiento para el HEC HMS

Fuente: Villon (2009).

4.6.1. Determinación del hietograma de diseño

Para determinar la distribución temporal de la tormenta se utilizó el método del Hietograma de diseño. SCS de conservación de suelos, El Soil Conservation Service del U.S. Department of Agriculture (1986) en el cual se describe de los hietogramas sintéticos de tormentas con una duración de tormenta de 6 y 24 horas.(Villon, 2009).



Tabla 45. Método de hietograma de diseño y distribución de lluvias

Tormenta de 6 horas		
Hora t	t/6	Pt / P6
0.00	0.00	0.00
0.60	0.10	0.04
1.20	0.20	0.10
1.50	0.25	0.14
1.80	0.30	0.19
2.10	0.35	0.31
2.28	0.38	0.44
2.40	0.40	0.53
2.52	0.42	0.60
2.64	0.44	0.63
2.76	0.46	0.66
3.00	0.50	0.70
3.30	0.55	0.75
3.60	0.60	0.79
3.90	0.65	0.83
4.20	0.70	0.86
4.50	0.75	0.89
4.80	0.80	0.91
5.40	0.90	0.96
6.00	1.00	1.00

Fuente: Hidrología aplicada de Chow (1998).

La distribución temporal que se visualiza en la tabla 58, en el que se presentan las láminas de precipitación para un evento de duración de 540 minutos para 100 años de periodo de retorno.



Tabla 46. Hietograma de diseño y distribución de lluvias para un T de 100 años

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	17.53	1.46	1.46	17.53	17.53	210.38
10	12.07	2.01	0.55	12.07	5.46	65.49
15	9.71	2.43	0.41	9.71	2.37	28.40
20	8.32	2.77	0.34	8.32	1.39	16.70
25	7.38	3.07	0.30	7.38	0.94	11.29
30	6.69	3.34	0.27	6.69	0.69	8.27
35	6.15	3.59	0.25	6.15	0.53	6.39
40	5.73	3.82	0.23	5.73	0.43	5.12
45	5.38	4.03	0.21	5.38	0.35	4.22
50	5.08	4.23	0.20	5.08	0.30	3.55
55	4.83	4.42	0.19	4.83	0.25	3.05
60	4.60	4.60	0.18	4.60	0.22	2.65

Fuente: Elaboración propia

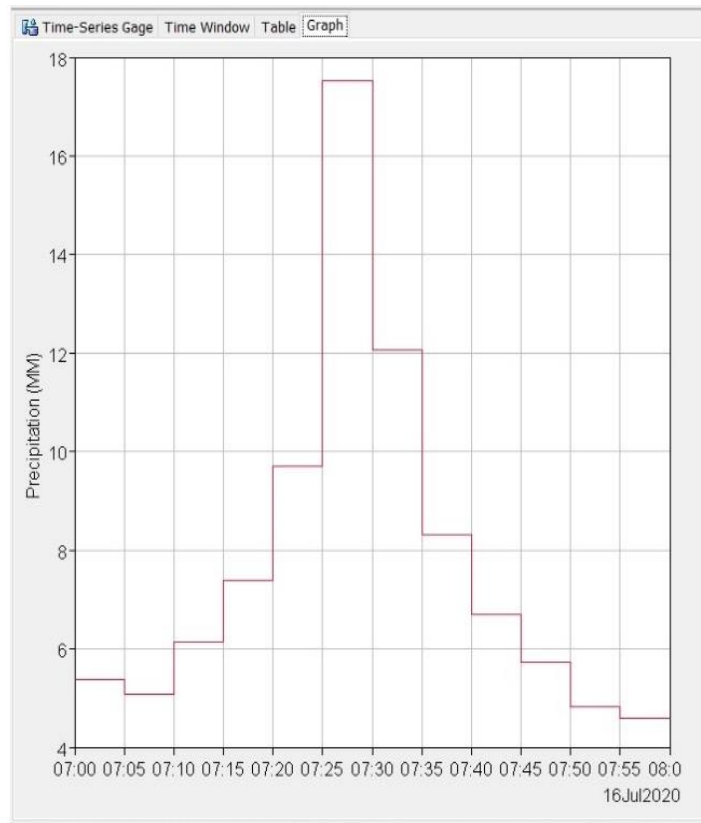


Figura 25. Hietograma para T=100 años

El siguiente gráfico muestre el hidrograma de crecida obtenida como resultado de la simulación realizada con el software HEC-HMS, para un periodo de retorno (T) de 100 años en la confluencia.

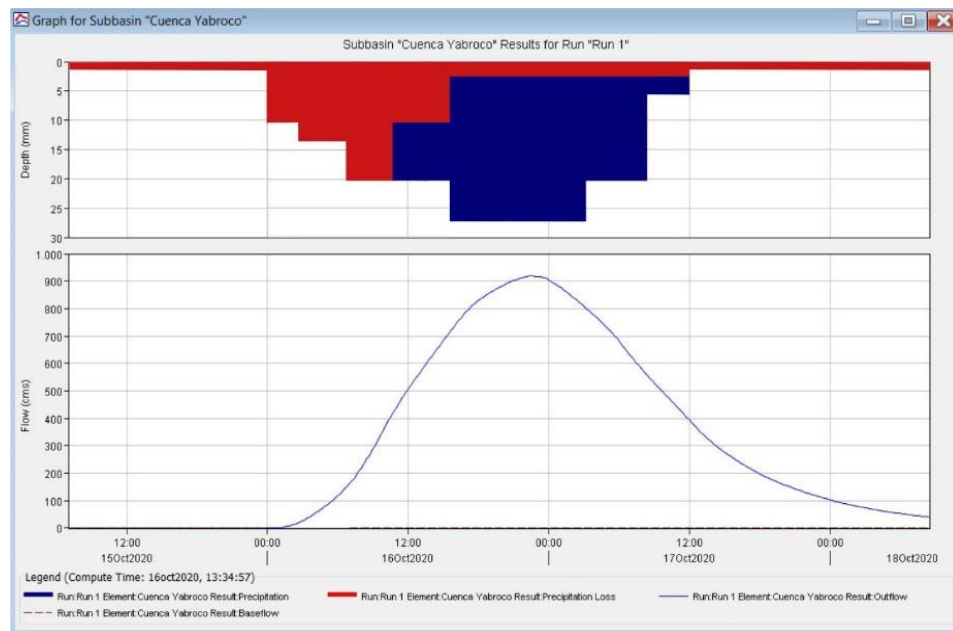


Figura 26. Confluencia de crecidas para T= 100 años

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en el gráfico, considerando un periodo de retorno (T) de 100 años, los resultados son de 212.1 m³/s con un volumen de 14.66 mm.

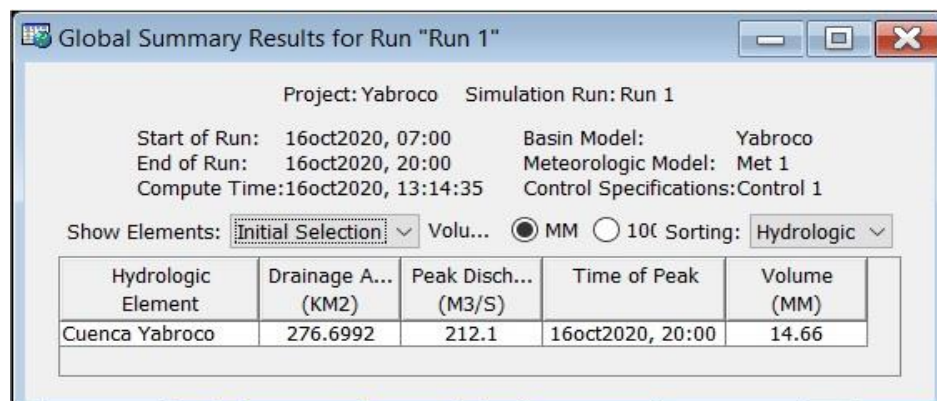


Figura 27. Determinación del caudal máximo

Fuente: Elaboración propia



Los resultados obtenidos mediante este criterio de información Akaike son más confiables a comparación con otros métodos de evaluación de máxima verosimilitud por lo que se tomó como aceptable para el presente trabajo de investigación.

Los modelos de distribución de probabilidad en este trabajo se evaluaron utilizando el criterio de información de Akaike y adicionalmente el criterio de información bayesiano. Los que permitieron comparar la bondad de ajuste a las distintas distribuciones (Khaddor et al., 2021), teniendo en cuenta el número de sus parámetros, ya que los mejores ajustes debían corresponder a los valores mínimos de estos criterios (Mutua, 1994; Langat et al., 2019; Rahman, et, 2013). Diversos autores emplearon esta misma técnica con resultados aceptables y con correcciones de la misma (Alahmadi et al, 2014). Que tienen mucha utilidad en el diseño y construcción de obras hidráulicas.

El uso de este criterio información Akaike AIC permite generar confiabilidad a la hora de determinar caudales máximos con poca información, siendo información básica para la aplicación del modelo HEC HMS considerando los márgenes de seguridad, el especialista en el área de Hidrología puede realizar estudios y compararlos con otros métodos siendo muy confiables.

De los resultados de las precipitaciones máximas para el presente trabajo de investigación, se puede concretar que el pluviómetro en realidad casi siempre carece de información, puesto que SENAMHI algunas veces nos proporciona información de precipitaciones máximas de 24 horas, así mismo como es la información de la cuenca Yabroco, no se pudo obtener la precipitación total diaria.



Con la información obtenida también se puede construir las curvas de intensidad duración frecuencia, para diferentes periodos de retorno, obteniendo de esta forma la información necesaria para cualquier diseño de tormenta para una cuenca determinada.



V. CONCLUSIONES

Se determinó los coeficientes no paramétricos utilizando el criterio de información Akaike (AIC), para lo cual se evaluó la aplicabilidad de cinco modelos probabilísticos correspondientes a las funciones Normal, Weibull, Log-Normal, Gamma, Pearson tipo III, de los que se pudo obtener que la máxima verosimilitud más confiable es de la estación Candarave con una precipitación de 345.621 mm siendo la distribución más confiable y aceptable según el criterio de información Akaike (AIC), la función Pearson Tipo III, el cual permite predecir el comportamiento futuro de la precipitación en el sitio de interés, a partir de la información histórica encontrada de registros de precipitación máxima 24 horas. Se determinó que la mayor precipitación para un periodo de retorno de 100 años se encuentra en la estación Candarave, con una precipitación de 345.621 mm y la más baja en la estación Aricota con una precipitación de 18.422 mm.

Se determinó el caudal máximo generado por el modelo Hec Hms para un periodo de retorno de 100 años a partir de la información morfométrica, con la estadística y apoyándonos del hidrograma unitario SCS, se obtuvo un caudal máximo de 212.1 m³/s este valor puede ser usado para diseñar estructuras hidráulicas, entre otros.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar datos de precipitación más actualizados para poder obtener mayores resultados y más confiables
- Se recomienda validar la información obtenida y generada en la cuenca, mediante la implementación del criterio de información Akaike.AIC
- Para el caso del análisis realizado en este trabajo el mayor número de registros en la estación estudiada abarca 48 años, datos suficientes para la realización del análisis estadístico, con los cuales se han determinado caudales máximos anuales para periodos de retorno desde 5 hasta 1000 años.
- Se recomienda realizar la calibración con datos históricos de caudales aforados, para compararlos con los caudales obtenidos del modelo hidrológico, para determinar si el modelo seleccionado es confiable y es el más apropiados para el cálculo de caudales máximos.
- Se recomienda que estas cinco distribuciones se comparen como mínimo en aplicaciones prácticas al hacer la selección final de la distribución de probabilidad de mejor ajuste en una aplicación dada en la cuenca Yabroco.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723.
- Akaike, Hirotogu. (1998). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In E. Parzen, K. Tanabe, & G. Kitagawa (Eds.), *Selected Papers of Hirotugu Akaike. Springer Series in Statistics (Perspectives in Statistics): Vol. I* (Issue 1973, pp. 610-624 Pag.). Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15
- Alahmadi et al. (2014). Arid Hidrological Modeling Atwadi Alaqiq, Madinah, Saudi Arabia. *Journal Teknologi*, 7(june), 51-58 pag.
- Alcántara, A., Montalvo, N., Mejía, A., & Ingol, E. (2016). Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 17(33), 7-17 Pag.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v17i33.11492>
- Alfaro, R. (2011). *Erosion y Transporte de Sedimentos*. Unidad de Impresion, Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Alfaro, R., & Gonzales, V. (2008). *Estadística y probabilidades para ingenieros* (1st ed.). UNA Puno.
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Segunda re). LIMUSA Noriega Editores. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ayu Lestari, S., & Armayah, M. (2016). *Integracion de herramientas SIG con Modelos*



- Hidrologicos*. 8(3), 6-10 Pag.
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013a). Efectos del cambio climático en la temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(4), 15–24.
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013b). Influencia del cambio climático en los elementos climáticos de la cuenca del río Coata-Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 35–54.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607224>
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., & Huyvaert, K. P. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: Some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1), 23–35.
<https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6>
- Castillo, I. (2008). Hydrological Frequency Analysis Procedure for Stormwater Design Hyfran. *AMEC Environment & Infrastructure*, I(April), 46 Pag.
- Chow, V. te. (1994). *Hidrologia Aplicada* (13ra Ed.). MacGRAW-HILL.
- Correa Morales, J. C., & Salazar Uribe, J. C. (2016). *Introducción a los Modelos mixtos*.
- Di Baldassarre, G., Laio, F., & Montanari, A. (2009). Design flood estimation using



- model selection criteria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(10), 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.10.066>
- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología* (Primera ed). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ford, D., Pingel, N., & Devries, J. J. (2008). *Hydrologic Modeling System Applications Guide: HMS*.
- Gonzales, V. A. G., & Alejo, R. A. (2008). *Desarrollo de cuencas de alta montaña*. UNA Puno.
- Khaddor, I., Achab, M., Soumali, M. R., Benjbara, A., & Alaoui, A. H. (2021). The Impact of the Construction of a Dam on Flood Management. *Civil Engineering Journal*, 7(2), 343–356.
- Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Identification of the Most Suitable Probability Distribution Models for Maximum, Minimum, and Mean Streamflow. In *Water* (Vol. 11, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/w11040734>
- Mejia Marcacuzco, J. A. (2012). *Hidrología Aplicada*. (No. P10 M41).
- Motulsky, H., & Christopoulos, A. (2004). *Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: a practical guide to curve fitting*. Oxford University Press.
- Mutua, F. M. (1994). The use of the Akaike Information Criterion in the identification of an optimum flood frequency model. *Hydrological Sciences Journal*, 39(3), 235–244. <https://doi.org/10.1080/02626669409492740>
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology – Principles and Practices*. Prentice Hall.



- Rahman, et. al. (2013). Evaluation of the best fit distribution for partial duration series of daily rainfall in Madinah, western Saudi Arabia. *Understanding, Predicting and Managing Water Society Interactions*, 364(June), 159-163 Pag. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-159-2014>
- Reyes-Olvera, A. L., & Gutierrez-González, E. (2016). Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(2), 99–114.
- Takahashi, K., Felipe, O., Acuña, J., Metzger, L., & Casaverde, M. (2017). Modelamiento hidrológico para pronóstico estacional de caudales del río Ramis. In *Senamhi Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*.
- Traverso, K., Mamani, J. A., & Alfaro, R. (2019). Generation of monthly average flow rates from the hydrological characteristics in the Huancane river basin. *38th IAHR World Congress*, 4682–4691. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-1617>
- Vásquez, Villanueva, A. (2000). *Manejo y Gestión de Cuencas hidrograficas* (Issue 506, p. 709 pag.). Lima: Fondo Editorial-UNALM. 2016; 646 p.
- Vásquez, Villanueva, A. (2009). Manejo y Gestión de Cuencas hidrograficas. In *Universidad Agraria la Molina* (Vol. 45, Issue 3). Lima: Fondo Editorial-UNALM. 2016; 646 p. <https://doi.org/10.1029/2007WR006666>
- Victor Olaya. (2014). *Sistemas De Información Geográfica*. España: Creative Commons.
- Villon, Bejar, M. (2009). hidrologia estadistica. *Instituto Tecnologico de Costa Rica*, pag(L), 217.
- Villón Béjar, M. (2002). Cálculos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Hidrográficas. *Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza, I(L)*, 72 pag.



Villón, M. (2006). *Hidrología estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.



ANEXOS

Anexo 1. Tablas de registro de precipitaciones de las estaciones meteorológicas

Tabla 47. Registro de precipitación máxima 24 horas, estación Susapaya

PRECIPITACION MAXIMA DE 24 HORAS (mm)														
ESTACION		SUSAPAYA						CODIGO				1911106		
DISTRITO		Susapaya		ESTE		394956		CUENCA				Sama		
PROVINCIA		Tarata		NORTE		8102391		RIO						
DEPARTAMENTO		Tacna		ALITUD		3309		TIPO DE ESTACION				PLU		
N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1	1964	12.4	14.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	14.2
2	1965	7.8	7.5	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	7.8
3	1966	3.5	24.2	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.2
4	1967	11.8	21.6	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.6
5	1968	14.8	12.3	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	4.0	14.8
6	1969	0.0	9.4	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	0.0	3.2	9.4
7	1970	7.8	9.4	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	4.5	9.4
8	1971	9.3	25.5	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	5.9	0.0	28.1	28.1
9	1972	16.7	10.4	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.9	0.0	16.7
10	1973	18.4	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	4.1	18.4
11	1974	3.8	14.3	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	14.3
12	1975	21.0	7.6	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	3.0	0.0	0.0	3.2	21.0
13	1976	17.0	7.9	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	3.0	17.0
14	1977	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9
15	1978	7.7	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	4.0	7.7
16	1979	4.0	0.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	1.4	4.0
17	1980	2.6	12.8	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	12.8
18	1981	6.2	7.3	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	3.9	7.3
19	1982	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5
20	1983	12.8	12.2	4.7	0.0	0.0	0.7	0.0	6.2	0.0	10.5	9.4	0.0	12.8
21	1984	17.1	16.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	0.0	12.3	17.1
22	1985	11.3	24.4	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	23.3	24.4
23	1986	24.2	22.2	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	23.9	24.2
24	1987	21.5	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	13.8	0.0	0.0	21.5
25	1988	11.3	0.2	14.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	14.1
26	1989	10.2	26.4	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.4
27	1990	12.2	13.9	6.5	0.3	0.3	0.2	0.6	0.7	1.1	1.4	0.9	5.6	13.9
28	1991	0.0	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	7.6
29	1992	9.9	10.4	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	0.0	0.0	0.0	5.3	10.4
30	1993	7.8	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	8.3
31	1994	10.9	12.5	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	12.5
32	1995	2.4	6.4	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	6.4
33	1996	23.4	6.3	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	23.4
34	1997	17.5	13.5	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	30.6	0.0	0.0	4.3	30.6
35	1998	21.7	25.5	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	10.2	25.5
36	1999	20.0	35.0	18.9	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	2.8	0.0	5.9	35.0
37	2000	40.2	11.9	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	40.2
38	2001	16.0	51.4	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	11.6	51.4
39	2002	9.5	13.6	7.7	0.0	0.0	5.2	23.0	0.0	0.0	8.4	1.7	5.6	23.0
40	2003	9.7	9.7	10.4	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	10.4
41	2004	9.4	19.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.9	0.6	19.7
42	2005	16.8	32.4	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0	2.1	7.0	32.4
43	2006	16.5	13.1	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	5.6	16.5
44	2007	15.2	10.4	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	7.7	15.2
45	2008	23.2	17.7	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	2.6	23.2
46	2009	14.2	22.2	5.8	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	22.2
47	2010	4.1	21.5	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	21.5
48	2011	16.3	24.5	0.0	6.4	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	12.1	24.5
PROMEDIO		14.8	17.1	7.6	0.5	0.3	0.4	1.1	0.7	1.5	1.2	0.8	6.0	21.5
STD		8.1	10.8	8.0	1.3	1.4	1.2	4.5	1.8	5.9	3.1	1.4	4.8	10.6
MAX		40.2	51.4	32.8	6.4	7.0	5.2	23.0	7.0	30.6	13.8	5.3	23.9	51.4
MIN		0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4

Fuente: SENAMHI

Tabla 48. Registro de precipitación máxima 24 horas, estación Vilacota

PRECIPITACION MAX DE 24 H (mm)														
ESTACION		VILACOTA						CODIGO			19151103			
DISTRITO		Susapaya		ESTE		395175.007		CUENCA			Maure			
PROVINCIA		Tarata		NORTE		8118784.69		RIO						
DEPARTAMENTO		Tacna		ALTITUD		4390		TIPO ESTACION			PLU			
N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MAX
1	1964	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1966	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1967	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	1969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1971	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	25.0	25.0
9	1974	0.0	0.0	13.2	0.0	0.0	0.2	0.0	15.2	0.0	0.0	3.1	23.2	23.2
10	1975	22.1	22.1	19.6	0.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	23.1	23.1
11	1976	26.4	34.3	18.6	16.2	5.2	0.0	0.5	0.6	8.3	0.0	0.0	16.5	34.3
12	1977	18.2	18.3	26.4	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	8.3	26.4
13	1978	34.2	27.3	12.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	34.2
14	1979	0.0	0.0	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	18.3	32.3
15	1980	0.0	0.6	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.3	0.0	0.0	19.3
16	1981	23.4	25.8	23.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	25.8
17	1982	18.6	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6
18	1983	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.2	13.2
19	1984	22.3	22.3	17.3	0.6	0.0	0.9	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	12.2	22.3
20	1985	9.5	12.1	7.2	9.8	0.3	0.5	0.7	0.5	0.4	0.0	0.0	9.9	12.1
21	1986	14.0	21.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.5	9.9	21.0
22	1987	5.3	15.0	8.3	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	5.8	5.5	0.0	15.0
23	1988	8.2	3.5	6.7	2.5	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	0.0	2.9	8.2
24	1989	13.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	16.0
25	1995	0.0	20.2	12.6	15.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	15.0	4.7	20.2
26	1996	4.8	9.5	4.6	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	2.0	9.6	9.6
27	1997	8.7	10.3	4.1	10.7	2.1	0.0	0.0	7.0	14.0	0.0	3.3	13.0	14.0
28	1998	27.7	9.2	6.8	0.9	0.9	0.7	0.0	0.0	0.0	1.7	3.7	8.9	27.7
29	1999	18.1	22.2	19.0	14.3	1.2	0.0	0.0	0.0	9.7	8.2	0.0	4.6	22.2
30	2000	28.3	11.6	15.0	9.3	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	2.4	10.2	28.3
31	2001	13.8	20.2	20.7	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	3.5	3.5	1.3	20.7
32	2002	7.7	15.1	7.3	6.0	1.8	0.0	3.5	0.0	0.0	2.6	7.2	18.2	18.2
33	2003	9.8	37.2	12.3	4.0	2.1	0.0	2.9	0.4	0.0	3.0	7.1	25.2	37.2
34	2004	14.4	14.0	9.5	3.0	0.0	0.5	6.8	3.5	1.0	0.0	0.0	11.1	14.4
35	2005	12.5	8.2	11.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.9	7.5	14.6	14.6
36	2006	9.5	25.0	14.1	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.0	2.5	23.0	25.0
37	2007	12.0	10.0	13.0	3.2	3.2	0.0	0.0	0.0	2.0	3.5	9.2	11.0	13.0
38	2008	15.0	6.7	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	13.0	15.0
39	2009	34.9	26.9	7.8	12.8	0.0	0.0	0.6	0.0	2.7	0.0	7.5	9.5	34.9
40	2010	20.0	11.5	19.4	19.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
PROMEDIO		10.1	10.6	9.4	3.9	0.9	0.1	0.8	0.8	1.0	2.2	2.1	9.2	17.6
STD		11.0	11.5	10.2	3.9	2.1	0.2	3.2	3.2	1.7	4.4	1.4	8.9	12.19
MAX		34.2	34.3	32.3	16.2	8.5	0.9	15.3	15.2	8.3	19.3	5.5	25.0	34.3
MIN		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

Fuente: SENAMHI

Tabla 49. Registro de precipitación máxima 24 horas, estación Candarave

PRECIPITACION MAX 24H (mm)														
ESTACION		CANDARAVE						CODIGO				19101102		
DISTRITO		Candarave		ESTE		362012.894		CUENCA				Locumba		
PROVINCIA		Candarave		NORTE		8109977.23		RIO						
DEPARTAMENTO		Tacna		ALTITUD		3 415		TIPO ESTACION				PLU		
N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MAX
1	1964	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1965	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	1.2	6.8
3	1966	0.0	6.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	2.5	0.0	6.8
4	1967	3.8	19.7	17.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	19.7
5	1968	9.4	7.3	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0
6	1969	0.0	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	20.6
7	1970	5.1	20.6	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	2.8	20.6
8	1971	19.8	6.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	9.5	19.8
9	1972	8.4	9.0	21.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	6.5	21.0
10	1973	14.2	24.5	7.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.5
11	1974	7.8	14.5	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	5.0	14.5
12	1975	14.0	16.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	16.0
13	1976	16.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.0	0.0	0.0	5.0	16.0
14	1977	13.5	15.5	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	4.2	2.0	4.0	15.5
15	1978	12.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	12.5
16	1979	11.3	1.5	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	11.3
17	1980	2.0	3.0	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	15.2
18	1981	16.8	20.6	10.0	6.2	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	1.0	5.5	20.6
19	1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1983	20.2	50.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	50.4
21	1984	60.0	40.0	90.7	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	90.7
22	1985	2.3	20.2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	8.0	20.2
23	1986	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	16.6	16.6
24	1987	24.0	5.4	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0
25	1988	9.3	0.0	3.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	9.3
26	1989	2.8	10.3	1.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3
27	1990	4.5	5.9	7.3	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	35.2	35.2
28	1991	0.0	0.4	15.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4
29	1992	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	35.2	35.2
30	1993	12.6	6.5	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	3.9	12.6
31	1994	17.4	27.5	0.9	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	5.1	27.5
32	1995	11.3	0.0	14.5	2.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	5.3	14.5
33	1996	17.8	7.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	1.1	17.8
34	1997	5.4	10.3	18.7	0.0	0.2	0.0	0.0	1.4	13.1	0.0	0.0	4.7	18.7
35	1998	16.1	9.7	1.6	2.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	3.2	16.1
36	1999	7.9	20.1	12.4	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	7.4	20.1
37	2000	11.1	18.0	11.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	18.0
38	2001	8.5	22.3	5.2	3.2	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	6.1	22.3
39	2002	6.9	9.4	9.8	1.4	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	2.4	1.5	8.1	9.8
40	2003	8.1	3.7	24.1	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	24.1
41	2004	8.1	22.5	0.5	0.0	0.0	0.0	3.9	0.3	0.0	0.0	0.0	1.0	22.5
42	2005	12.4	5.3	7.5	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.9	3.4	12.4
43	2006	6.8	9.2	9.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	9.2
44	2007	10.6	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	23.4
45	2008	2.0	4.5	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	12.0
46	2009	2.3	23.0	5.2	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
47	2010	2.9	12.0	1.7	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	12.0
48	2011	10.2	9.9	2.1	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2
PROMEDIO		9.89	12.06	8.22	0.93	0.08	0.16	0.12	0.37	0.55	0.64	0.99	5.00	19.06
STD		9.67	11.05	13.92	1.63	0.07	0.71	0.63	1.60	2.14	1.63	2.27	7.51	13.87
MAX		60.0	50.4	90.7	6.2	0.4	4.0	3.9	10.5	13.1	6.8	12.0	35.2	90.7
MIN		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

Fuente: SENAMHI

Tabla 50. Registro de precipitación máxima 24 horas, estación Sitajara

PRECIPITACION MAX 24H (mm)														
ESTACION		SUSAPAYA							CODIGO			19111106		
DISTRITO		Susapaya		ESTE		394956.461			CUENCA			Sama		
PROVINCIA		Tarata		NORTE		8102391.4			RIO					
DEPARTAMENTO		Tacna		ALTITUD		3309			TIPO ESTACION			PLU		
N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MAX
1	1964	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
3	1966	0.0	24.2	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.2
4	1967	11.8	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0
5	1968	0.0	12.3	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	4.0	12.3
6	1969	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	0.0	3.2	7.8
7	1970	7.8	3.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	4.5	7.8
8	1971	9.3	25.5	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	5.9	0.0	27.5	27.5
9	1972	16.7	10.4	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	16.7
10	1973	18.4	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	4.1	18.4
11	1974	3.8	14.3	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	14.3
12	1975	21.0	7.6	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	3.0	0.0	0.0	3.2	21.0
13	1976	17.0	7.9	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	3.0	17.0
14	1977	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9
15	1978	7.7	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	4.0	7.7
16	1979	4.0	0.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	1.4	4.0
17	1980	2.6	12.8	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	12.8
18	1981	6.2	3.4	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	3.9	7.0
19	1982	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5
20	1983	5.2	12.2	4.7	0.0	0.0	0.7	0.0	6.2	0.0	10.5	9.4	0.0	12.2
21	1984	7.3	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	0.0	12.3	16.3
22	1985	11.3	15.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	23.3	23.3
23	1986	10.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	10.2
24	1987	8.1	0.0	10.2	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	10.2
25	1988	3.8	12.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7
26	1989	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
27	1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	7.2
29	1992	9.9	0.6	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	0.0	0.0	0.0	5.3	9.9
30	1993	7.8	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	7.9
31	1994	10.9	0.0	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	11.9
32	1995	2.4	3.2	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	6.2
33	1996	13.8	8.2	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	23.4	0.0	0.0	4.3	23.4
34	1997	12.5	11.4	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	7.2	12.5
35	1998	10.3	13.8	18.9	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.9	0.0	4.4	18.9
36	1999	14.6	9.8	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	14.6
37	2000	5.8	35.7	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	35.7
38	2001	9.4	8.7	3.0	0.0	0.0	5.2	10.6	0.0	0.0	0.0	1.7	2.8	10.6
39	2002	5.2	6.2	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	6.8
40	2003	9.4	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	13.9
41	2004	12.5	31.5	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	2.1	5.9	31.5
42	2005	5.2	8.6	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	11.3
43	2006	16.5	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.5	16.5
44	2007	13.6	7.2	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	13.6
45	2008	2.8	23.2	2.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	23.2
46	2009	0.3	10.2	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	3.6	10.2
47	2010	13.2	21.5	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	21.5
PROMEDIO		7.9	8.3	5.4	0.05	0.14	0.15	0.35	0.57	1.00	1.09	0.60	4.0	12.9
STD		5.6	8.6	5.7	0.25	0.90	0.80	1.70	1.64	3.71	2.65	1.62	5.6	8.0
MAX		21.0	35.7	19.3	1.30	6.00	5.20	10.60	6.20	23.40	10.50	9.40	27.5	35.7
MIN		0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0

Fuente: SENAMHI

Tabla 51. Registro de precipitación máxima 24 horas, estación Aricota

PRECIPITACION MAXIMA DE 24 HORAS (mm)														
ESTACION		ARICOTA					CODIGO			117054				
DISTRITO		Quilahuani		ESTE		368967		CUENCA			Locumba			
PROVINCIA		candarave		NORTE		8091307		RIO						
DEPARTAMENTO		Tacna		ALTITUD		2850		TIPO DE ESTACION			PLU			
Nº	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX
1	1964	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	1965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
3	1966	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
4	1967	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
5	1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
6	1969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
7	1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	# 0
8	1971	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
9	1972	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
10	1973	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
11	1974	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
12	1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
13	1976	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
14	1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
15	1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
16	1979	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
17	1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
18	1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
19	1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
20	1983	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
21	1984	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
22	1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
23	1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
24	1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
25	1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
26	1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
27	1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
28	1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
29	1992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
30	1993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
31	1994	2.8	7.5	2.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	6.8	7.5
32	1995	2.3	6.8	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.7	6.8
33	1996	3.1	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.2	2.2	6.4
34	1997	2.6	6.5	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.3	0.5	1.6	2.4	6.5
35	1998	1.6	2.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.8	2.1	2.3
36	1999	2.4	5.4	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	1.8	5.4
37	2000	7.6	5.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.8	4.0	7.6
38	2001	2.5	1.7	3.5	2.2	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.7	1.7	3.5
39	2002	1.2	3.1	2.1	0.2	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	1.8	3.4	3.4
40	2003	1.2	2.2	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.8	2.2
41	2004	2.1	5.3	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.5	5.3
42	2005	1.8	2.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.7	1.2	1.6	2.7
43	2006	0.7	1.5	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.3	1.5
44	2007	1.6	2.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.0	2.4
45	2008	5.7	6.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.5	2.7	4.5	6.8
46	2009	1.3	2.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	2.3
47	2010	0.4	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.7
48	2011	7.2	4.7	3.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	6.5	7.2
PROMEDIO		1.0	1.5	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	1.0	1.7
STD		1.8	2.4	1.5	0.4	0.0	0.0	0.1	0.4	0.2	0.3	0.8	1.7	2.6
MAX		7.6	7.5	6.4	2.2	0.0	0.0	0.8	2.2	1.3	1.3	2.8	6.8	7.6
MIN		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: SENAMHI

Anexo 2. Mapa de la delimitación de la cuenca en estudio

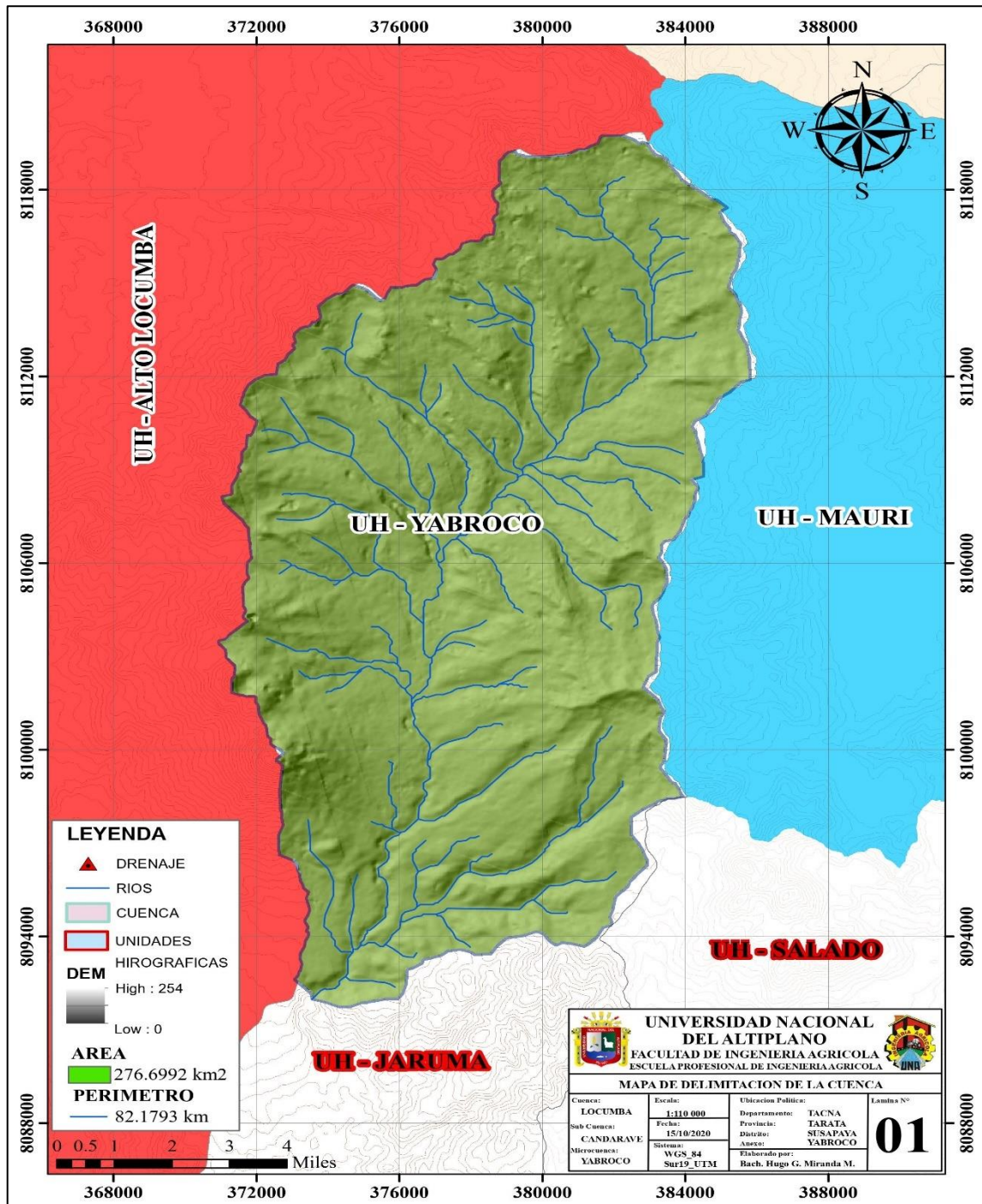


Figura 28. Mapa de la delimitación de la cuenca hidrográfica

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas

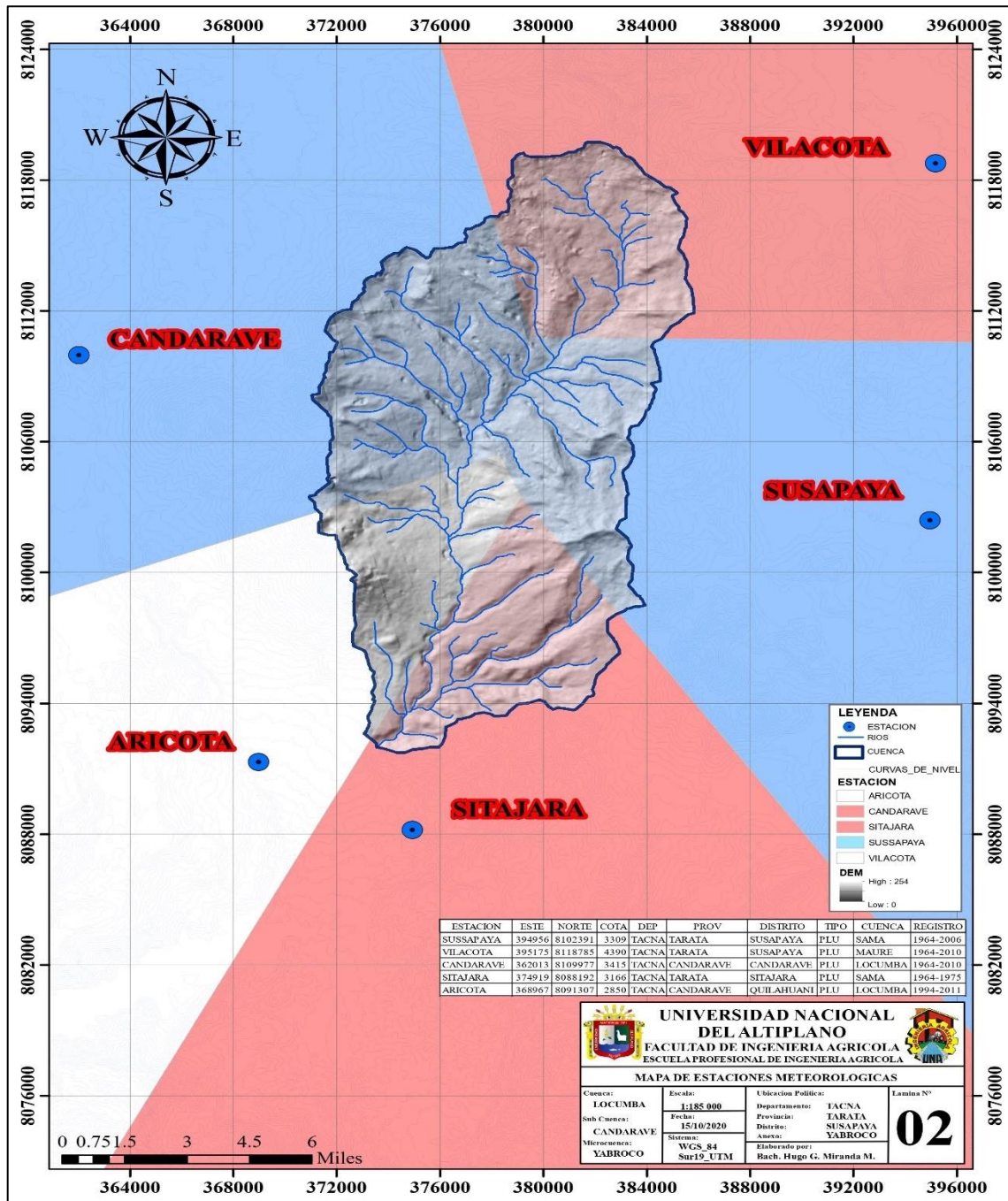


Figura 29. Mapa de ubicación de estaciones hidrográficas

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Mapa de distribución de precipitación utilizando el método de isoyetas

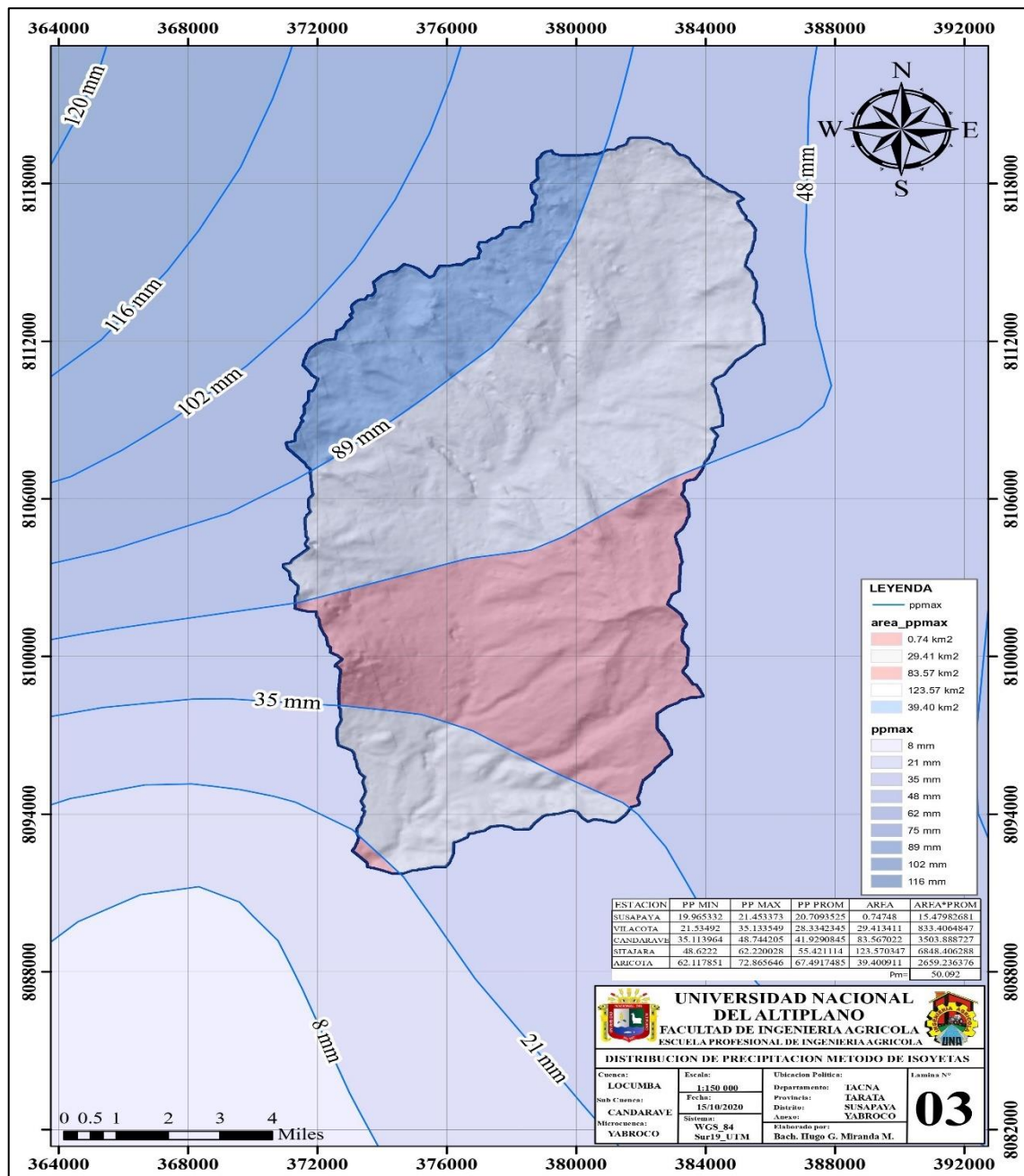


Figura 30. Mapa de Isoyetas de precipitación máximas para un T =100 años

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Mapa de distribución de precipitación por el método del polígono Thiessen

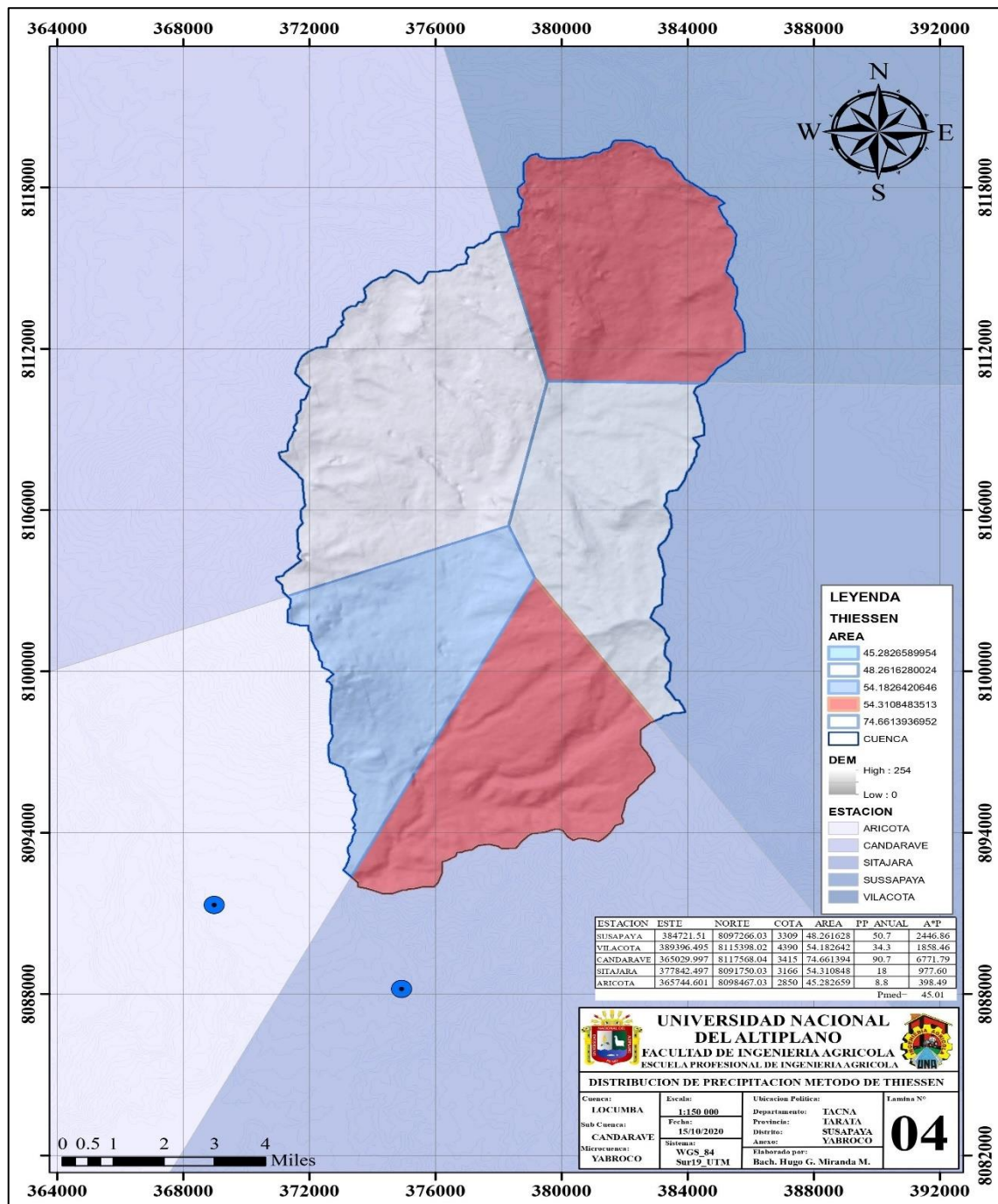


Figura 31. Mapa de polígono de Thiessen para un T=100 años

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Elaboración para la determinación del orden de la red de drenaje

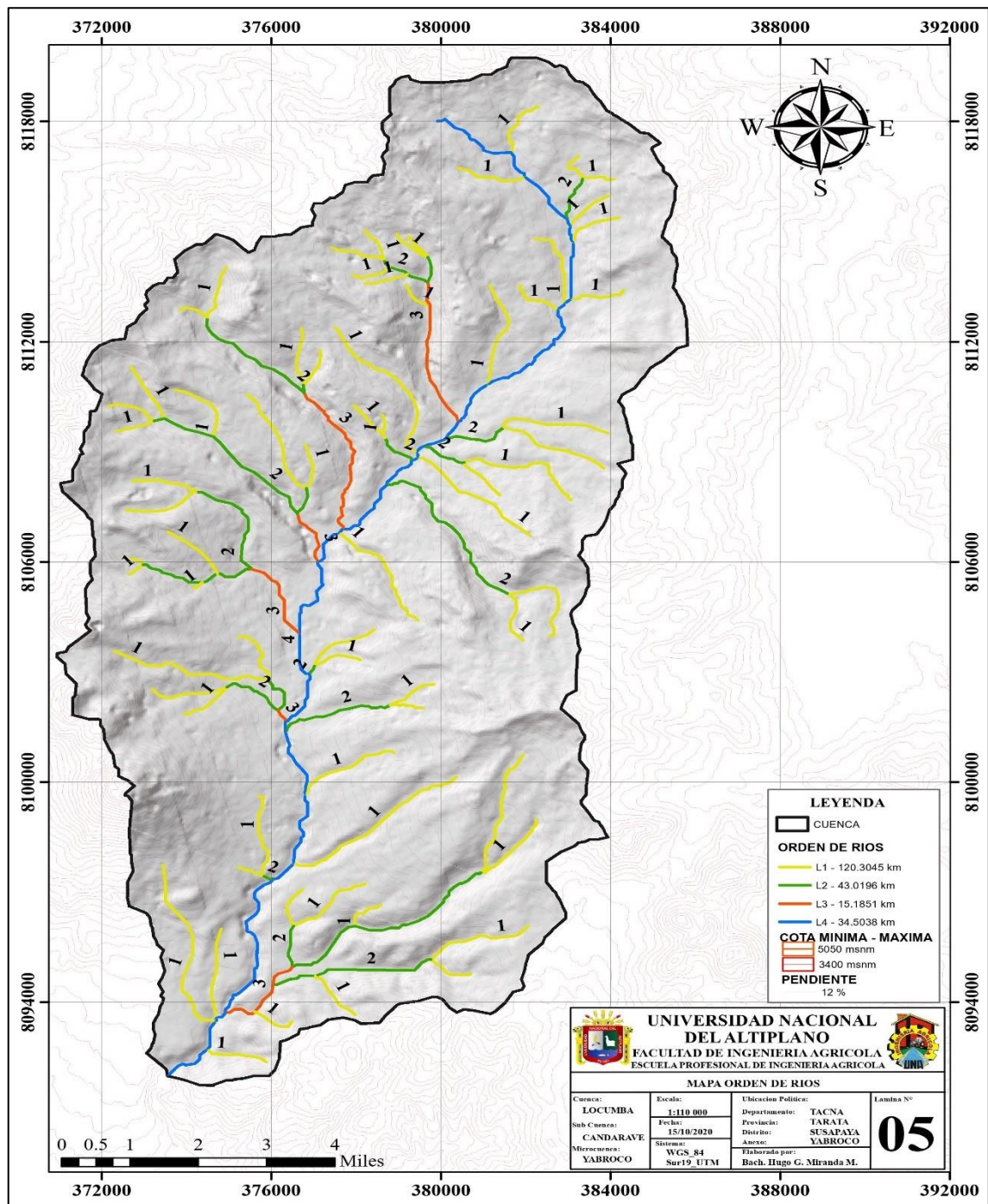


Figura 32. Mapa de orden de ríos de la cuenca hidrográfica

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Mapa de la pendiente de red de drenaje principal

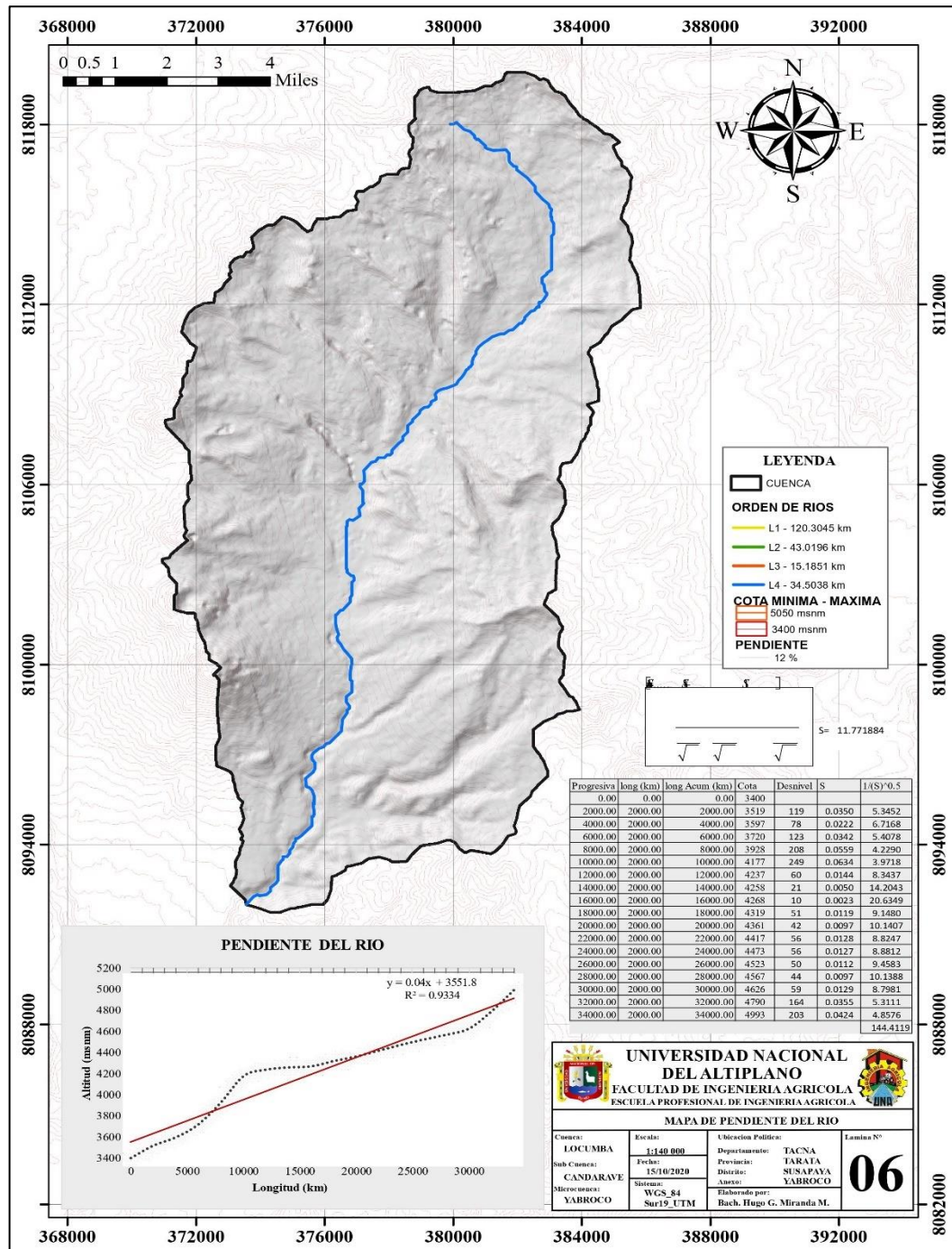


Figura 33. Mapa de la pendiente del cauce principal

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Mapa de la delimitación de la pendiente de la cuenca

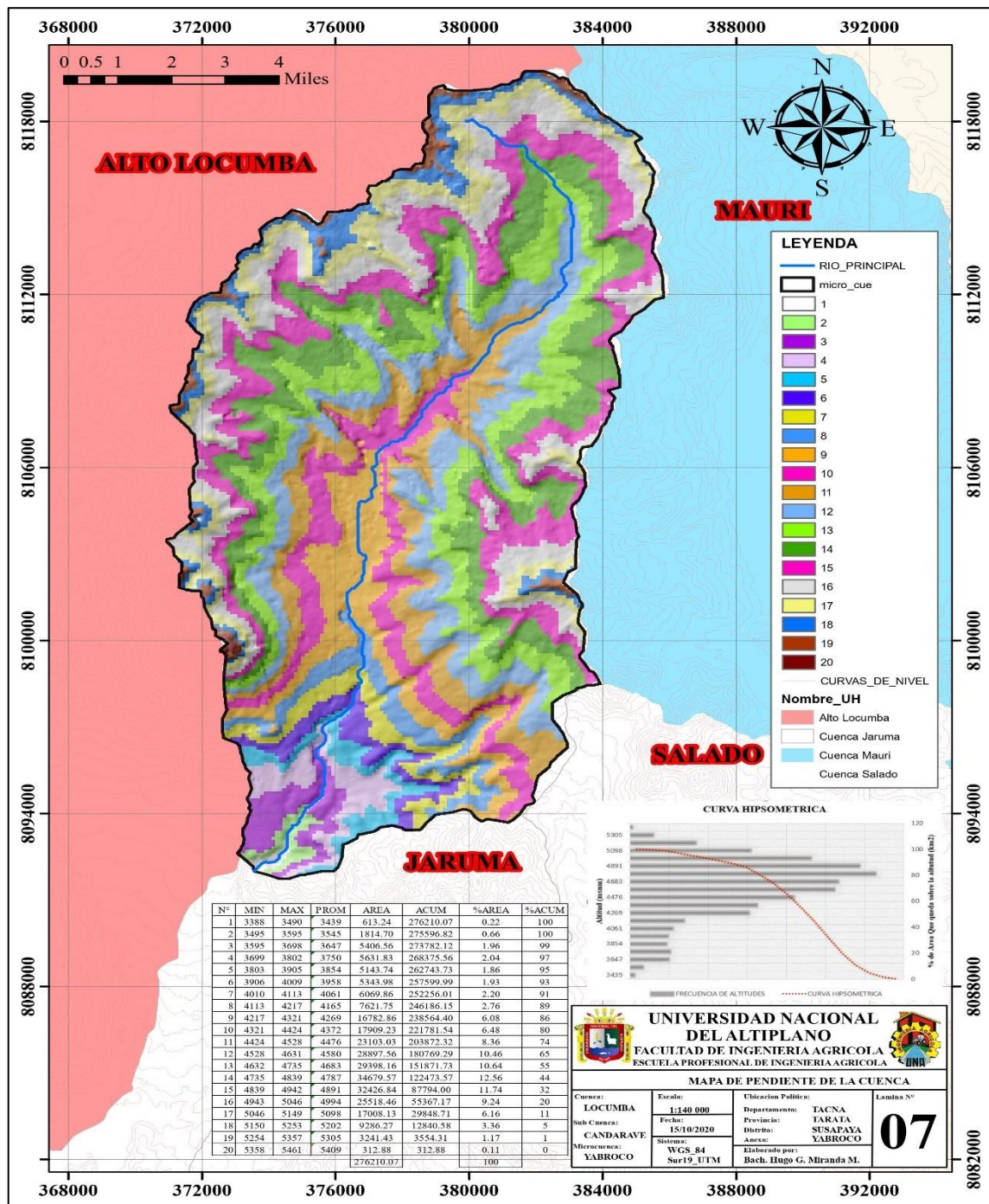


Figura 34. Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9. Mapa para la capacidad de uso mayor del suelo

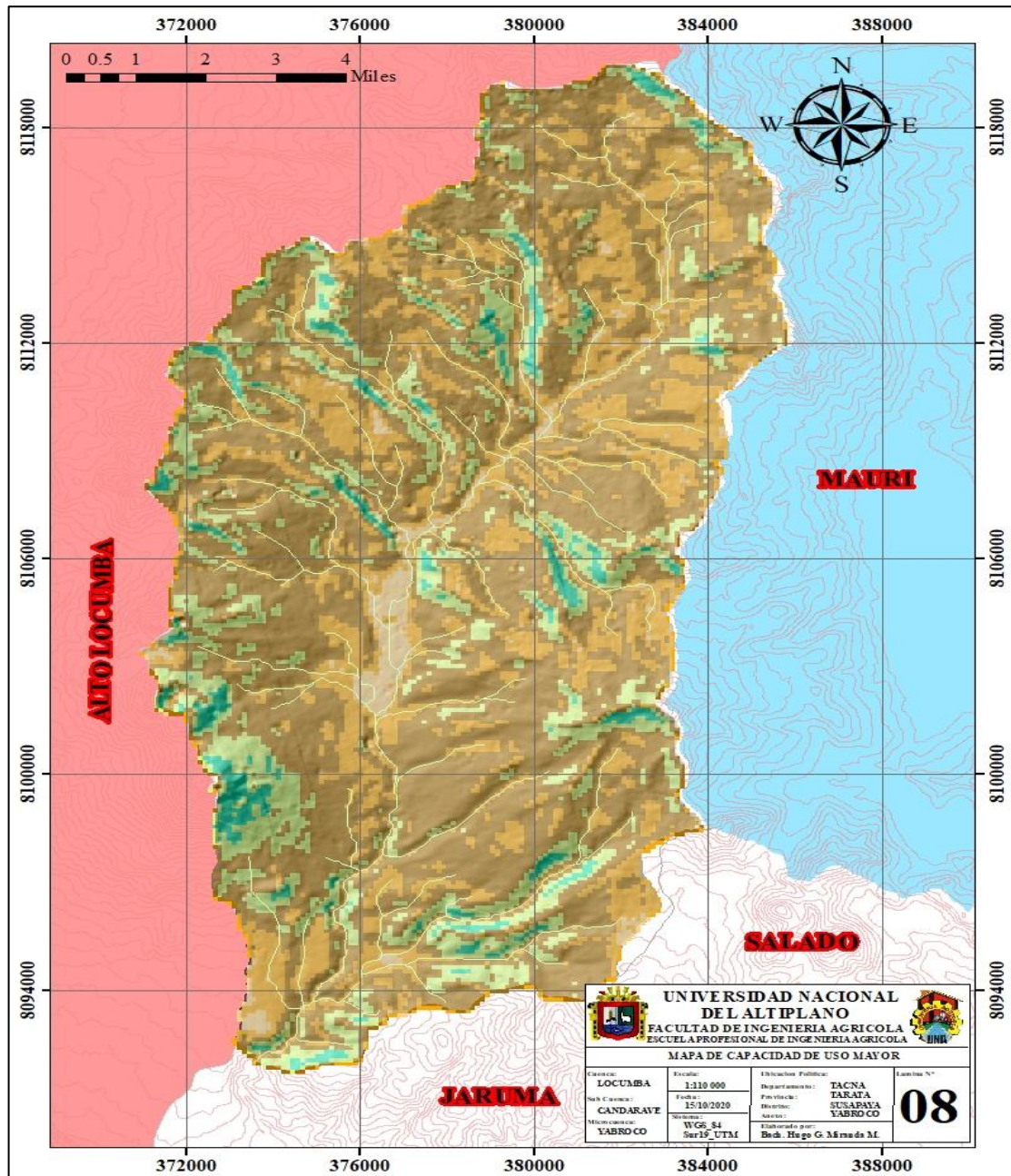


Figura 35. Mapa de capacidad de uso mayor de suelos de la cuenca hidrográfica

Fuente: Elaboración propia