

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales
máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi,
Ayacucho 2025**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Gabriel Ronaldino VENTURA CUBA

ASESOR:

Dr. Richard Alex OSCCO PECEROS

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, por brindarme salud, sabiduría y fortaleza para llevarlo a cabo.

A mi madre y a mi hermana, por su amor incondicional, su apoyo constante y su fortaleza diaria. Gracias por acompañarme en cada paso, por creer en mí y darme la fuerza necesaria para no rendirme.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma máter, por las valiosas enseñanzas que fortalecieron mi formación profesional.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y permitirme formar parte de su comunidad universitaria.

Al Dr. Richard Alex Oscco Peceros, asesor de la presente investigación, por su guía, acompañamiento y dedicación para el logro de este trabajo académico.

A los miembros del jurado, PhD. Sandra del Águila Ríos y Ing. Efraín Chuchón Prado, así como también al Dr. Juan Charapaqui Anccasi por sus oportunas recomendaciones que permitieron mejorar significativamente la calidad de esta investigación.

A mi madre, Alejandrina Cuba Gómez y mi hermana Flor Vanessa Ventura Cuba, por su amor incondicional, fortaleza y constante apoyo, siendo el principal motor que impulsó mi crecimiento personal y profesional.

Finalmente, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por los conocimientos y enseñanzas transmitidas durante mi formación universitaria, que hoy me permiten culminar esta etapa con éxito.

Resumen

Se evaluaron dos métodos para representar la variabilidad temporal de las precipitaciones: las curvas de Huff y Dyck Peschke, que discretizan la lluvia de diseño y la expresan a través de hietogramas. Las curvas de Huff ubican el máximo de intensidad al principio de la tormenta, lo que da lugar a distribuciones asimétricas y más realistas; por otro lado, el método Dyck Peschke produce hietogramas de forma más simétrica, en los que la intensidad va aumentando hasta llegar a un punto máximo y luego disminuye. El propósito fue establecer qué metodología calcula de manera más precisa los caudales máximos en comparación con la realidad. Se calcularon caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años utilizando modelamiento en HEC-HMS. Con el método de Dyck Peschke se obtuvieron caudales máximos de 7.28, 29.54, 52.95 y 125.71 m³/s; al ser contrastados con el caudal máximo aforado después de una máxima avenida de 41.471 m³/s, se determinó una diferencia de 11.479 m³/s durante la década correspondiente. Y con las curvas de Huff, se determinaron caudales de 1.67, 20.04, 42.48 y 101.42 m³/s, con una diferencia con el valor observado de solo 1.009 m³/s; esto señala que hubo un ajuste más favorable para el período de retorno de diez años. Por lo tanto, se determina que el método de las curvas de Huff es más fiable y preciso cuando se trata de estimar los caudales máximos y la distribución temporal de las lluvias.

Palabras clave: curvas de Huff, Dyck Peschke, HEC-HMS y máxima avenida.

Abstract

Two methods for representing the temporal variability of precipitation were evaluated: Huff and Dyck-Peschke curves, which discretize design rainfall and express it through hyetographs. Huff curves place the maximum intensity at the beginning of the storm, resulting in asymmetric and more realistic distributions; on the other hand, the Dyck-Peschke method produces more symmetrical hyetographs, in which the intensity increases to a maximum point and then decreases. The purpose was to determine which methodology calculates peak flows more accurately compared to reality. Peak flows were calculated for return periods of 2, 5, 10, and 50 years using HEC-HMS modeling. With the Dyck-Peschke method, peak flows of 7.28, 29.54, 52.95, and 125.71 m³/s were obtained; When compared to the maximum flow recorded after a peak flood of 41,471 m³/s, a difference of 11,479 m³/s was found during the corresponding decade. Using Huff curves, flows of 1.67, 20.04, 42.48, and 101.42 m³/s were determined, with a difference from the observed value of only 1,009 m³/s; this indicates a more favorable fit for the ten-year return period. Therefore, the Huff curve method is determined to be more reliable and accurate when estimating peak flows and the temporal distribution of rainfall.

Keywords: Huff curves, Dyck Peschke, HEC-HMS and maximum flood.

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Resumen.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de tablas	ix
Índice de figuras.....	xii
Lista de acrónimos.....	xix
Introducción	20
Capítulo I.....	24
1. Marco teórico	24
1.1 Antecedentes	24
1.2 Hidrología.....	26
1.3 Ciclo hidrológico.....	26
1.4 Precipitación	27
1.4.1 Medición de la precipitación.....	28
1.5 Métodos de cálculo de precipitación.....	29
1.5.1 Promedio aritmético	29
1.5.2 Polígono de Thiessen	30
1.5.3 Isoyetas	31
1.5.4 Método Kriging.....	32
1.6 Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia.....	32
1.6.1 Método Dyck Peschke	33
1.7 Cuenca hidrográfica	33
1.7.1 Geomorfología de la cuenca hidrográfica.....	34
1.7.2 Parámetros de forma de la cuenca	34
1.7.3 Parámetros de relieve de la cuenca hidrográfica.....	34
1.7.4 Parámetros de la red hidrográfica	36
1.8 Estación hidrométrica	37
1.9 Periodo de retorno.....	38
1.10 Distribución de probabilidades.....	38
1.10.1 Distribución normal	38
1.10.2 Distribución log normal 2 parámetros	39
1.10.3 Distribución log normal 3 parámetros.....	39
1.10.4 Distribución gamma 2 parámetros.....	39

1.10.5	<i>Distribución gamma 3 parámetros</i>	39
1.10.6	<i>Distribución log Pearson tipo III</i>	40
1.10.7	<i>Distribución Gumbel</i>	40
1.10.8	<i>Distribución log Gumbel</i>	41
1.10.9	<i>Pruebas de bondad de ajuste</i>	41
1.10.10	<i>Prueba de Kolmogórov-Smirnov</i>	42
1.11	Tormenta de diseño	42
1.12	Hietogramas de tormentas de diseño	43
1.13	Curvas de Huff	44
1.14	Modelación hidrológica	46
1.15	Hidrogramas	47
1.16	Caudales máximos	48
1.17	Métodos de estimación de caudales máximos	48
1.17.1	<i>Método racional</i>	48
1.17.2	<i>Método del hidrograma unitario</i>	49
1.17.3	<i>Modelo hidrológico distribuido</i>	49
1.18	Modelo HEC – HMS	49
1.19	Número de Curva	50
1.20	Método de Muskingum	51
Capitulo II		52
2.	Materiales y métodos	52
2.1	Ubicación	52
2.1.1	<i>Ubicación hidrográfica</i>	52
2.1.2	<i>Ubicación geográfica</i>	53
2.1.3	<i>Ubicación política</i>	54
2.2	Vías de acceso	54
2.3	Materiales y Software	55
2.3.1	<i>Materiales para el aforo del río</i>	55
2.3.2	<i>Software de hidrología</i>	55
2.4	Desarrollo de la investigación	56
2.4.1	<i>Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke</i>	56
2.4.2	<i>Distribución de lluvias mediante curvas de Huff</i>	62
2.4.3	<i>Modelación hidrológica HEC-HMS</i>	64
Capítulo III		69
3.	Resultados y discusiones	69

3.1. Del primer objetivo específico: Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke.....	69
3.1.1 <i>Resultado de las características morfométricas de las cuencas.....</i>	69
3.1.2 <i>Discusión de los parámetros morfológicos obtenidos.....</i>	72
3.1.3 <i>Resultado de la data de precipitaciones máximas en 24 horas.....</i>	73
3.1.4 <i>Discusión del método Kriging.....</i>	75
3.1.5 <i>Resultado de la identificación de datos atípicos.....</i>	76
3.1.6 <i>Discusión de los datos atípicos.....</i>	80
3.1.7 <i>Resultado de las pruebas de hipótesis.....</i>	80
3.1.8 <i>Discusión de pruebas de hipótesis.....</i>	84
3.1.9 <i>Resultado de las funciones de distribución de probabilidades.....</i>	84
3.1.10 <i>Discusión de distribuciones de probabilidad.....</i>	111
3.1.11 <i>Cálculo de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia.....</i>	111
3.1.12 <i>Discusión de las curvas IDF.....</i>	115
3.1.13 <i>Resultado de hietogramas de diseño por Dyck Peschke.....</i>	115
3.1.14 <i>Discusión de hietogramas de diseño por Dyck Peschke.....</i>	128
3.2 Del segundo objetivo específico: Distribución temporal de lluvias mediante curvas de Huff.....	128
3.2.1 <i>Hietogramas de diseño de curvas de Huff.....</i>	128
3.2.2 <i>Discusión de los hietogramas de diseño por curvas de Huff.....</i>	141
3.3 Del tercer objetivo específico: Modelamiento hidrológico HEC-HMS..	141
3.3.1 <i>Comparación de caudales máximos obtenidos.....</i>	141
3.3.2 <i>Discusión de la comparación de caudales máximos obtenidos.....</i>	145
3.3.3 <i>Discusión del modelamiento hidrológico de Dyck Peschke.....</i>	146
3.3.4 <i>Discusión del modelamiento hidrológico de curvas de Huff.....</i>	146
3.3.5 <i>Resultado del caudal máximo aforado.....</i>	147
3.3.6 <i>Discusión del caudal máximo aforado.....</i>	148
Conclusiones.....	149
Recomendaciones.....	150
Referencias.....	151
Anexos.....	155

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Clasificación de pendiente en cuencas hidrográficas</i>	35
Tabla 2	<i>Vía de acceso al punto de aforo</i>	54
Tabla 3	<i>Ubicación de las estaciones meteorológicas</i>	58
Tabla 4	<i>Formato Excel multi estación para el software Hydraccess</i>	59
Tabla 5	<i>Valores Kn para la prueba de datos atípicos</i>	60
Tabla 6	<i>Coefficientes de duración adimensional de curvas de Huff</i>	63
Tabla 7	<i>Parámetros de las subcuencas del río Cachi para el modelo HEC HMS</i>	66
Tabla 8	<i>Parámetros morfométricos de las subcuencas</i>	70
Tabla 9	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Apacheta</i>	73
Tabla 10	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Chicllarazo</i>	74
Tabla 11	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Cachi</i>	75
Tabla 12	<i>Evaluación de observaciones atípicas subcuenca Chicllarazo</i>	76
Tabla 13	<i>Evaluación de observaciones atípicas subcuenca Apacheta</i>	77
Tabla 14	<i>Evaluación de observaciones atípicas subcuenca Cachi</i>	78
Tabla 15	<i>Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Chicllarazo</i>	107
Tabla 16	<i>Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Apacheta</i>	108
Tabla 17	<i>Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Cachi</i>	109
Tabla 18	<i>Consolidado de precipitaciones máximas (mm) de diseño</i>	110
Tabla 19	<i>Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuenca Chicllarazo</i>	112
Tabla 20	<i>Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuenca Apacheta</i>	113
Tabla 21	<i>Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuenca Cachi</i>	114
Tabla 22	<i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR en la subcuenca Chicllarazo</i>	116

Tabla 23 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR en la subcuenca Chicllarazo</i>	117
Tabla 24 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR en la subcuenca Chicllarazo</i>	118
Tabla 25 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Chicllarazo</i>	119
Tabla 26 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR en la subcuenca Apacheta</i>	120
Tabla 27 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR en la subcuenca Apacheta</i>	121
Tabla 28 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR en la subcuenca Apacheta</i>	122
Tabla 29 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Apacheta</i>	123
Tabla 30 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR de la subcuenca Cachi</i>	124
Tabla 31 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR de la subcuenca Cachi</i>	125
Tabla 32 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR de la subcuenca Cachi</i>	126
Tabla 33 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Cachi</i>	127
Tabla 34 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) para Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo</i>	129
Tabla 35 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) para Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo</i>	130
Tabla 36 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo</i>	131
Tabla 37 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo</i>	132
Tabla 38 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (2 años) subcuenca Apacheta</i>	133

Tabla 39 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (5 años) subcuenca Apacheta</i>	134
Tabla 40 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuenca Apacheta</i>	135
Tabla 41 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuenca Apacheta</i>	136
Tabla 42 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (2 años) subcuenca Cachi</i>	137
Tabla 43 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (5 años) subcuenca Cachi</i>	138
Tabla 44 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuenca Cachi</i>	139
Tabla 45 <i>Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuenca Cachi</i>	140
Tabla 46 <i>Comparación de caudales máximos (m³/s) subcuenca Chicllarazo</i>	142
Tabla 47 <i>Comparación de los caudales máximos (m³/s) en la subcuenca Apacheta</i> .	142
Tabla 48 <i>Comparación de los caudales máximos (m³/s) en la subcuenca Cachi</i>	143
Tabla 49 <i>Comparación de los caudales máximos (m³/s) en el punto de aforo</i>	144
Tabla 50 <i>Datos de campo del aforo del rio Cachi</i>	147

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ciclo hidrológico del agua</i>	27
Figura 2 <i>Proceso de formación de la precipitación</i>	28
Figura 3 <i>Pluviómetro para medir la precipitación</i>	28
Figura 4 <i>Pluviógrafo</i>	29
Figura 5 <i>Polígono de Thiessen</i>	31
Figura 6 <i>Isoyetas de precipitaciones</i>	31
Figura 7 <i>Método Kriging</i>	32
Figura 8 <i>Cuenca hidrográfica</i>	33
Figura 9 <i>Clasificación de la curva hipsométrica</i>	35
Figura 10 <i>Esquemización del número de orden en un río</i>	37
Figura 11 <i>Estaciones hidrométricas</i>	37
Figura 12 <i>Hietograma de diseño</i>	43
Figura 13 <i>Representación gráfica de un hietograma de diseño</i>	44
Figura 14 <i>División de tormentas a partir del tiempo mínimo inter – eventos</i>	45
Figura 15 <i>Curvas de Huff para los grupos de cuartiles de clasificación</i>	46
Figura 16 <i>Representación gráfica de un hidrograma unitario</i>	48
Figura 17 <i>Interfaz del software HEC-HMS</i>	50
Figura 18 <i>Variables del método de abstracciones de precipitación SCS</i>	51
Figura 19 <i>tránsito del paso de caudal en el río</i>	51
Figura 20 <i>Mapa de ubicación hidrológica de la cuenca del río Cachi</i>	53
Figura 21 <i>Imagen satelital de la cuenca del río Cachi</i>	53
Figura 22 <i>Mapa de ubicación de la cuenca del río Cachi</i>	54
Figura 23 <i>Vista satelital del acceso hacia el punto de aforo</i>	55
Figura 24 <i>Clasificación de la duración de eventos de tormentas pluviométricas a nivel nacional</i>	56
Figura 25 <i>Representación del Modelo digital de elevación en 3D de la cuenca Cachi</i> 57	
Figura 26 <i>Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas usadas</i>	58
Figura 27 <i>Carga de datos en el software Hydracces</i>	59
Figura 28 <i>Curvas de Huff para diferentes cuartiles</i>	63

Figura 29	<i>Esquematación del modelo HEC-HMS</i>	65
Figura 30	<i>Mapa del número curva para la cuenca del río Cachi</i>	65
Figura 31	<i>Características morfométricas de las subcuencas del río Cachi</i>	66
Figura 32	<i>Parámetros del método de pérdidas por SCS CN</i>	66
Figura 33	<i>Parámetros para el método de transformación de lluvia en escorrentía del SCS hidrograma unitario</i>	67
Figura 34	<i>Características del río Cachi</i>	67
Figura 35	<i>Parámetros del método de Muskingum para el río Cachi</i>	68
Figura 36	<i>Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Apacheta</i>	71
Figura 37	<i>Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Chicllarazo</i>	71
Figura 38	<i>Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Cachi</i>	72
Figura 39	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Chicllarazo</i>	77
Figura 40	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Apacheta</i>	78
Figura 41	<i>Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Cachi</i>	80
Figura 42	<i>Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Chicllarazo</i>	81
Figura 43	<i>Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Apacheta</i>	81
Figura 44	<i>Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Cachi</i>	81
Figura 45	<i>Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuenca Chicllarazo</i>	82
Figura 46	<i>Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuenca Apacheta</i>	82
Figura 47	<i>Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuenca Cachi</i>	82
Figura 48	<i>Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Chicllarazo</i>	83
Figura 49	<i>Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Apacheta</i>	83
Figura 50	<i>Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Cachi</i>	83
Figura 51	<i>Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	85
Figura 52	<i>Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	85
Figura 53	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	85
Figura 54	<i>Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	86

Figura 55 <i>Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	86
Figura 56 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	87
Figura 57 <i>Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	87
Figura 58 <i>Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	88
Figura 59 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	88
Figura 60 <i>Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	89
Figura 61 <i>Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	89
Figura 62 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	89
Figura 63 <i>Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	90
Figura 64 <i>Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	90
Figura 65 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	91
Figura 66 <i>Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	91
Figura 67 <i>Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	92
Figura 68 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	92
Figura 69 <i>Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	93
Figura 70 <i>Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	93
Figura 71 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	93

Figura 72	<i>Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	94
Figura 73	<i>Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	94
Figura 74	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	95
Figura 75	<i>Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	95
Figura 76	<i>Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i> .	96
Figura 77	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	96
Figura 78	<i>Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	97
Figura 79	<i>Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	97
Figura 80	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	97
Figura 81	<i>Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	98
Figura 82	<i>Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	98
Figura 83	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	99
Figura 84	<i>Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	99
Figura 85	<i>Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	100
Figura 86	<i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	100
Figura 87	<i>Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	101
Figura 88	<i>Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	101

Figura 89 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo</i>	101
Figura 90 <i>Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	102
Figura 91 <i>Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	102
Figura 92 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta</i>	103
Figura 93 <i>Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	103
Figura 94 <i>Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	104
Figura 95 <i>Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi</i>	104
Figura 96 <i>Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Chicllarazo</i>	105
Figura 97 <i>Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Apacheta</i>	105
Figura 98 <i>Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Cachi</i>	105
Figura 99 <i>Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Chicllarazo</i>	106
Figura 100 <i>Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Apacheta</i>	106
Figura 101 <i>Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Cachi</i>	106
Figura 102 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Chicllarazo</i>	107
Figura 103 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Apacheta</i>	108
Figura 104 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Cachi</i>	109
Figura 105 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Chicllarazo</i>	110
Figura 106 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Apacheta</i>	110
Figura 107 <i>Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Cachi</i>	111
Figura 108 <i>Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Chicllarazo</i>	112
Figura 109 <i>Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Apacheta</i>	113

Figura 110	<i>Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Cachi</i>	.....114
Figura 111	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo</i>	....116
Figura 112	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo</i>	....117
Figura 113	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo</i>	..118
Figura 114	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo</i>	..119
Figura 115	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Apacheta</i>	.....120
Figura 116	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Apacheta</i>	.....121
Figura 117	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Apacheta</i>	....122
Figura 118	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Apacheta</i>	....123
Figura 119	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Cachi</i>	.....124
Figura 120	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Cachi</i>	.....125
Figura 121	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Cachi</i>	.....126
Figura 122	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Cachi</i>	.....127
Figura 123	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo</i>	...129
Figura 124	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo</i>	...130
Figura 125	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo</i>	.131
Figura 126	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo</i>	.132
Figura 127	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Apacheta</i>	....133
Figura 128	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Apacheta</i>	....134
Figura 129	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuenca Apacheta</i>	...135
Figura 130	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuenca Apacheta</i>	...136
Figura 131	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Cachi</i>	.....137
Figura 132	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Cachi</i>	.....138
Figura 133	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuenca Cachi</i>	.....139
Figura 134	<i>Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuenca Cachi</i>	.....140
Figura 135	<i>Variación de caudales máximos (m³/s) subcuenca Chicllarazo</i>	.....142
Figura 136	<i>Variación de caudales máximos (m³/s) subcuenca Apacheta</i>	.....143
Figura 137	<i>Variación de caudales máximos (m³/s) subcuenca Cachi</i>	.....144
Figura 138	<i>Variación de caudales máximos (m³/s) punto de aforo</i>	.....145
Figura 139	<i>Resultados del modelamiento HEC-HMS</i>	.....145

Figura 140 *Aforo durante el tránsito de una máxima avenida del rio Cachi con el correntómetro*.....148

Lista de acrónimos

AAA	: Autoridad Administrativa del Agua
ALA	: Autoridad Local del Agua
GPS	: Sistema de Posicionamiento Global
H1	: Hipótesis alternativa
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HO	: Hipótesis Nula
IDF	: Intensidad duración frecuencia
MINAM	: Ministerio del Ambiente del Perú
NC	: Número de curva
OPEMAN	: Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico
SAM	: System for Automated Hydrological Modeling
SCS	: Servicio de conservación de suelos
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
TC	: Tiempo de concentración
TP	: Tormentas pluviométricas
TR	: Periodo de retorno
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería.
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS84	: World Geodetic System 1984

Introducción

Gil (2018) señala que los Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos por las Naciones Unidas en 2015, tienen una agenda global que busca movilizar acciones colectivas con metas compartidas. Estos objetivos persiguen combatir la pobreza extrema y abarcan tres aspectos esenciales del desarrollo sostenible: el económico, el ambiental y el social. Su propósito es coordinar la creación de políticas a nivel mundial. No obstante, la insuficiencia se debe a la complejidad de la arquitectura en la que fue diseñado; son limitaciones técnicas para lograr las metas propuestas de construir un futuro más prometedor para las generaciones venideras en el planeta.

La investigación actual ayuda a un desarrollo sostenible en el ámbito de la hidrología, enfocándose en asegurar que la calidad y la disponibilidad del agua sean óptimas para todos los habitantes. El análisis de las avenidas máximas posibilita la implementación de acciones de mitigación ante los peligros que suponen las inundaciones y los desastres naturales, que tienen un impacto constante en las áreas vulnerables.

Back (2021) llevó a cabo su estudio sobre las curvas de variación temporal en Santa Catarina, donde se analizaron las lluvias intensas y se individualizaron para establecer distribuciones adimensionales por cuartiles. Se registraron 1039 eventos en Lages y 658 en Sao Joaquín, encontrando que las precipitaciones tipo I son las más comunes, seguidas por las de tipo II, IV y III. Así, se utilizaron curvas anuales de distribución temporal con una probabilidad del 50 %.

Silveira (2024) evidenció que hay procedimientos para la aplicación de las curvas de distribución temporal, las cuales descomponen el valor máximo de precipitación en una serie cronológica con intervalos cortos. Esto lo hizo a través de curvas SCS con duraciones de 6 y 24 horas y curvas de Huff. También señala que existe otro enfoque diferente, que se basa en derivar la distribución temporal por medio de métodos hietográficos, como el método Chicago y bloques alternos, los cuales se fundamentan en las curvas IDF. Por lo tanto, su objetivo principal fue desarrollar ecuaciones universales al combinar estas perspectivas y ajustar las curvas de precipitaciones.

Castillo et al. (2023) señala que los patrones de distribución temporal de las lluvias son empleados para crear tormentas de diseño; por esta razón, se llevó a cabo un estudio sobre 243 eventos pluviales ocurridos en la estación Yabú en Cuba, cuyo principal objetivo era elaborar hietogramas sintéticos utilizando el método de Huff. Estos fueron clasificados en tres grupos: SC-T1, SC-T2 y SC-T3, fundamentadas en

la correlación entre la duración y el tiempo de intensidades. Finalmente, consiguió curvas IDF para cada clase de lluvia y los coeficientes de correlación de Pearson resultaron ser positivos. Por consiguiente, llegó a la conclusión de que los hietogramas producidos representan correctamente el fenómeno de las lluvias.

Con el objetivo de desarrollar una metodología que derive las curvas IDF de precipitaciones en Perú, Montesinos et al. (2023) realizaron una investigación para el SENAMHI. Para tal fin, llevaron a cabo un análisis de las lluvias extremas con el objetivo de determinar la profundidad de las tormentas en diferentes períodos de retorno. Estas profundidades se distribuyeron a través del tiempo junto con hietogramas sintéticos creados por el método de curvas de Huff, que simbolizan profundidades acumuladas de tormentas sin dimensiones. De esta manera, evidenciaron la capacidad de medir los impactos del cambio climático en relación con la frecuencia y magnitud de acontecimientos vinculados a las precipitaciones máximas extremas.

El uso de tablas adimensionales de coeficientes de duración mediante las curvas de Huff aún es poco común y presenta limitada aplicación en los estudios hidrológicos. Las metodologías empleadas para representar la distribución temporal de la lluvia incluyen el método de Dyck Peschke y las curvas de Huff, a partir de los cuales se elaboran hietogramas de diseño para distintos periodos de retorno, permitiendo estimar caudales máximos.

Fernández (2022) afirma que el agua es el componente que impacta la vida y que es fundamental prever su comportamiento para nuestro beneficio, ya que es un bien esencial para vivir. También sostiene que poder canalizarla es importante para controlarla y prevenir catástrofes. Por lo tanto, es esencial entender el comportamiento y actuar, porque en todas las obras, aunque sean muy pequeñas, es crucial examinar el diseño para su adecuado desarrollo. Esto se debe a que las corrientes de agua ocupan un espacio determinado por su topografía y porque se puede prever cada cuántos años superarán un caudal específico.

Díaz et al. (2017) afirmaron que, cuando se presentan situaciones críticas de emergencia invernal, emplear un modelo hidrológico permite determinar los caudales más altos que puede alcanzar una quebrada como sector hidrológico. Se convierte en un estudio útil para hacer predicciones hidrológicas y para identificar escenarios de riesgo, con el fin de ejecutar acciones preventivas y de control en proyectos futuros. También sirve para advertir a la población ante una amenaza inminente.

Allado et al. (2009) sostienen que la tormenta de diseño es un modelo de precipitación que se puede utilizar para diseñar estructuras hidráulicas, por ejemplo, presas y bocatomas. Estas tormentas se basan en datos históricos de lluvias en un lugar determinado y se construyen considerando las características específicas de la precipitación en diferentes áreas. Esta aplicación abarca desde la aplicación de valores puntuales de precipitaciones, que se usan para calcular caudales mediante el método racional, hasta el uso de hietogramas de tormentas, que son empleados como insumos en la modelación lluvia - escorrentía.

La estimación de caudales máximos en la cuenca del río Cachi mediante el método Dyck Peschke presenta limitaciones, ya que tiende a sobredimensionar los caudales debido a que es una metodología tradicional y antigua, desarrollada y validada en una cuenca con características distintas a las de Cachi. Por ello, resulta fundamental comparar sus resultados con otra metodología de estimación basada en una distribución temporal de lluvia que represente de manera más realista el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Dado que los caudales máximos son un dato fundamental para el diseño seguro de obras hidráulicas, es crucial investigar y crear nuevos métodos apropiados para su determinación. Para resistir los efectos del cambio climático, que aumentan la frecuencia de sucesos extremos incontrolables, estas estructuras deben ser dimensionadas adecuadamente. Si no se tiene una estimación precisa, es posible que ocurran graves consecuencias, como desastres naturales, daños estructurales y pérdidas humanas; por lo tanto, este asunto debe ser tratado con responsabilidad técnica y rigor.

La cuenca del río Cachi enfrenta una limitada disponibilidad de registros hidrométricos históricos de caudales máximos debido a la inoperatividad y falta de mantenimiento de estaciones de medición. Esta carencia de información dificulta el diseño hidráulico en proyectos orientados al sector agrícola y reduce la confiabilidad en la estimación de caudales extremos mediante modelos hidrológicos. Además, los efectos del cambio climático han intensificado la variabilidad de los patrones de lluvia y la recurrencia de huaycos, lo que evidencia la necesidad de metodologías más precisas y representativas del comportamiento real del río.

Por ello, la presente investigación evalúa los caudales máximos mediante dos metodologías distintas de distribución temporal de lluvia aplicadas en la cuenca Cachi, con el fin de identificar la alternativa más adecuada para la construcción de

hietogramas de diseño que representen de manera realista los eventos extremos y eviten la sobredimensión de resultados. La determinación de la metodología más precisa será fundamental para futuros estudios hidrológicos y para el cálculo confiable de caudales máximos en proyectos de infraestructura hidráulica. En este contexto, se plantearon los siguientes objetivos.

Objetivo general

- Estimar caudales máximos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, empleando las metodologías de Dyck Peschke y las curvas de Huff para determinar la distribución temporal de lluvias más adecuada y representativa del comportamiento hidrológico real.

Objetivos específicos

- Construir hietogramas de diseño mediante el método de Dyck Peschke, con el fin de representar la distribución temporal de las lluvias en la cuenca Cachi.
- Elaborar hietogramas de diseño empleando las curvas de Huff, establecidas a partir de estudios de tormentas pluviométricas en el Perú, para representar la distribución temporal de lluvias en la cuenca Cachi.
- Modelamiento de caudales máximos mediante el modelo HEC-HMS mediante hietogramas de diseño que representan diferentes distribuciones de lluvias, para la calibración del caudal máximo.

Capítulo I

1. Marco teórico

1.1 Antecedentes

Lozano (2023) llevó a cabo una investigación acerca de la "Generación de hietogramas diversos para el diseño de simulaciones de crecidas en la subcuenca Guanca Huaycu", situada en Quito, Ecuador. Su objetivo fue modelar un evento con precipitaciones extremas utilizando hietogramas sintéticos, con el fin de examinar su efecto tanto en diferentes métodos como en términos del volumen de los caudales simulados a través de modelación hidrológica en HEC-HMS. En lo que respecta al método de ISWS, Llegó a la conclusión de que este estableció valores cercanos a la máxima intensidad y tiempo pico en comparación con los generados; por otro lado, el método AVM de Pilgrim y Cordey estimó un caudal máximo similar al que se obtuvo usando información sobre precipitaciones, con un coeficiente de correlación de 0.30, e indicó que se deben emplear las curvas de Huff si no hay datos de precipitaciones disponibles, además de usar hietogramas triangulares.

Con el objetivo de crear hietogramas sintéticos significativos a través del método de Huff, Castillo et al. (2023) realizaron un estudio de 243 casos de lluvia convectiva (precipitación mayor a 25 mm), que ocurrieron entre 1989 y 2019 en la estación meteorológica Yabú, Villa Clara (Cuba). Las tormentas se clasificaron en tres tipos (SC-T1, SC-T2 y SC-T3) según la relación que existe entre la duración del evento y el momento en que ocurren las intensidades máximas. Utilizando curvas de masa adimensionales, se ajustaron modelos paramétricos (los de Wenzel, Sherman y uno propio), logrando coeficientes de correlación de Pearson elevados y un mejor desempeño con el modelo propio. Los hallazgos mostraron que los hietogramas adimensionales logrados reflejan con precisión el comportamiento de lluvias

convectivas en la región estudiada, lo que posibilita derivar curvas IDF particulares por tipo de aguacero y probabilidad de ocurrencia.

En su tesis "Caracterización de eventos de tormenta pluviométricas útiles para el diseño hidráulico en Perú", Quijada (2020) examinó los fenómenos de tormentas pluviométricas a lo largo y ancho del país, dividiéndolos en cuartiles de precipitaciones máximas durante 24 horas según el SENAMHI. Con esta metodología, se lograron perfilar las tormentas o curvas de Huff para 27 regiones, que se utilizaron para estimar las tormentas de diseño.

Espinoza (2024), en su investigación titulada "Estimación de las intensidades máximas de precipitaciones y su representación conceptual a través de mapas de la cuenca del río Cachi - Ayacucho – 2021", calculó las intensidades más altas de lluvias en un periodo de 24 horas para intervalos de retorno que van desde los 10 hasta los 500 años, incluyendo los valores intermedios. Estos datos se mostraron gráficamente mediante mapas.

En 2019, Avellaneda et al. realizaron un estudio titulado "Análisis comparativo de los métodos racional modificado Témez, hidrogramas unitarios SCS, Clark y Snyder para determinar caudales máximos en las subcuencas Cañad y Alto Chancay Lambayeque - Cuenca Chancay Lambayeque". A través de la información pluviométrica acerca de las precipitaciones máximas que sucedieron en un lapso de 24 horas y con diferentes períodos de retorno, se utilizó el método ILA-SENAMHI-UNI en 32 subcuencas ya divididas. Como resultado del estudio, concluyeron que el método H.U. SCS y el racional modificado Temez tienden a sobredimensionar los caudales máximos; por otro lado, el método Snyder produce caudales máximos intermedios y el de Clark obtiene caudales máximos más bajos pero con un buen ajuste a periodos de retorno altos.

Bautista (2022) calculó hidrogramas de crecida para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años en la cuenca Puytooc, como parte de su investigación "Determinación del hidrograma de crecida para diferentes periodos de retorno en la cuenca Puytooc - Chiara - Huamanga - Ayacucho – 2021". Los hietogramas de diseño que se emplearon fueron modelados en HEC-HMS utilizando el método de bloques alternos. Se halló que el caudal aforado fue de 10.15 m³/s, lo que coincide con un periodo de retorno de 2 años y una diferencia de 0.55 m³/s, al comparar los caudales máximos obtenidos con la huella hídrica registrada en el punto de aforo de la cuenca.

1.2 Hidrología

Lozano (2023) establece que la hidrología es una ciencia que se enfoca en estudiar la disponibilidad de agua en el mundo, poniendo énfasis en el ciclo del agua debido a que este recurso es limitado. Esta ciencia ha evolucionado desde tiempos antiguos, por medio de filósofos y pensadores que se esforzaron por describir el comportamiento del agua en el ciclo hidrológico.

De acuerdo con Villón (2002), la hidrología es una ciencia natural que tiene como objetivo estudiar el agua, tomando en cuenta su existencia, distribución y circulación a lo largo del planeta. Asimismo, analiza sus características físicas y químicas, así como su conexión con el medioambiente y los seres vivos. La importancia de la hidrología para un hidrólogo se encuentra en que ofrece métodos efectivos para el desarrollo, la planificación y el funcionamiento de las estructuras hidráulicas.

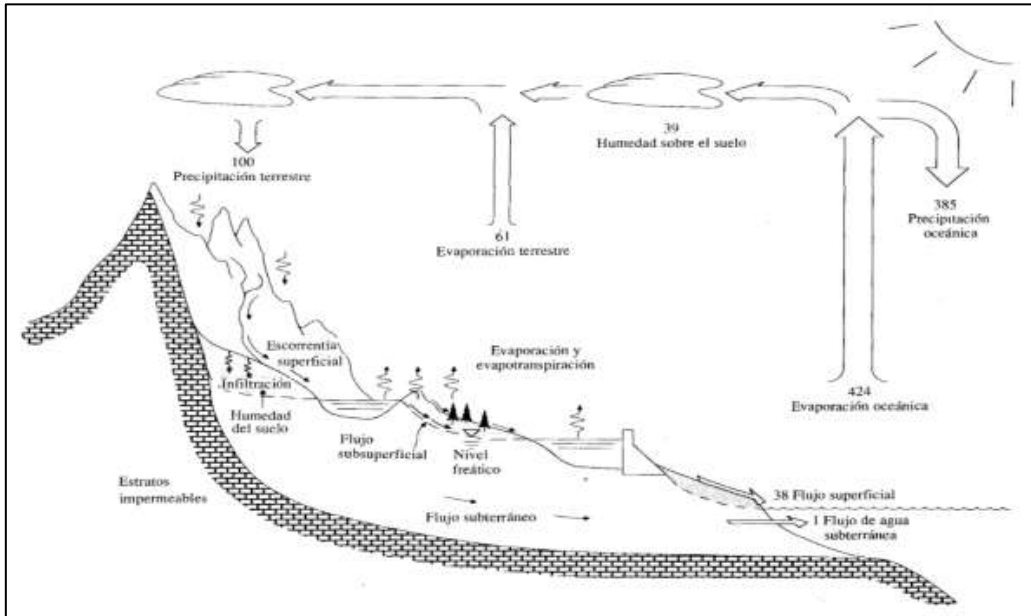
1.3 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es la secuencia mediante la cual el agua experimenta diversos estados, transita desde la superficie hacia la atmósfera en estado de vapor y vuelve posteriormente en forma líquida o sólida (Fattorelli et al., 2011). La evaporación directa ocurre cuando el agua se traslada desde la superficie a la atmósfera en estado de vapor.

De acuerdo con Villón (2002), el agua experimenta varias transformaciones, que incluyen estados (sólido, líquido y gaseoso) y formas (subterránea y superficial). Con el propósito de mostrar las numerosas maneras y estados en los que se manifiesta el agua, hay varias ilustraciones que representan el ciclo hidrológico.

De acuerdo con Chow et al. (1994), en su libro "Hidrología aplicada", el ciclo hidrológico es un núcleo esencial sin principio ni fin, cuyos procesos suceden de forma constante. Nos muestra la siguiente ilustración, donde se describen todos los procesos por los que pasa el agua.

Figura 1
Ciclo hidrológico del agua



Nota. Extraído del libro de Hidrología aplicada de Ven te Chow (1994)

1.4 Precipitación

Villon (2002) explica que la precipitación proviene de las nubes y llega al suelo como lluvia, granizo, nevadas o aguaceros. Desde un enfoque de ingeniería hidrológica, se considera que la precipitación es la fuente principal del agua. Las mediciones y análisis de esta son el punto inicial para los estudios relacionados con su utilización y control.

De acuerdo con Chow et al. (1994), la precipitación incluye la lluvia, la nieve, el granizo y otros sucesos que conducen a que el agua se deposite en el suelo terrestre. Para que se produzca precipitación, una masa de agua tiene que elevarse a la atmósfera, enfriarse y así permitir la condensación de su humedad. Los tres procesos que hacen que las masas de aire se eleven son la orográfica, la convectiva y la frontal. En el primero, el aire caliente asciende por encima del frío; en el segundo, una masa de aire cruza una cadena montañosa; en el tercero, se eleva el aire por la acción convectiva, tal como ocurre en las celdas de tormentas eléctricas.

Figura 2
Proceso de formación de la precipitación.



Nota. Imagen extraída del libro de libro de Hidrología aplicada de Ven te Chow (1994)

1.4.1 Medición de la precipitación

Villón (2002), menciona que existen dos categorías para medir; los cuales son mecánicos y por sensores remotos que están en la tierra o en el satélite.

Estos aparatos de medición son:

- **Pluviómetro**

Según Villón (2002), el pluviómetro es un instrumento que tiene la forma de un cilindro con 20 cm de diámetro y 60 cm de altura, al cual se le conecta una probeta en la tapa. Esta probeta tiene una sección transversal más grande que la del cilindro. La cual mide la lluvia con exactitud, donde un milímetro de lluvia equivale a un centímetro en la probeta, logrando así mediciones precisas cada día.

Figura 3
Pluviómetro para medir la precipitación



Nota. Imagen referencial extraído del siguiente enlace

https://www.meteorologiaenred.com/pluviometro.html#google_vignette

- **Pluviógrafo**

Este instrumento mide la altura de las lluvias en el tiempo, lo que posibilita determinar su intensidad, según Villón (2002). Este dispositivo está formado por: un flotador que se conecta a un recipiente, un estilete que se desplaza por el papel registrador y un reloj que supervisa cada registro.

Figura 4
Pluviógrafo



Nota. La imagen referencia fue extraído del siguiente enlace

<https://www.tutiempo.net/meteorologia/articulos/pluviometro-y-pluviografo.html>

1.5 Métodos de cálculo de precipitación

La altitud en donde llega a caer la precipitación, tiene mucha importancia.

Según Villón (2002), existen tres procedimientos ampliamente utilizados para calcular la precipitación media.

1.5.1 Promedio aritmético

Villon (2002) menciona que calcular, como su nombre indica, consiste en determinar el promedio aritmético de las alturas de las precipitaciones registradas en una zona concreta. La exactitud del cálculo está fuertemente influenciada por la cantidad de estaciones en las que se encuentran y la distribución de la lluvia. Por lo tanto, es un método muy sencillo, pero puede ser eficaz si se cuenta con más pluviómetros. Y está definida por la ecuación siguiente.

$$P_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \dots\dots\dots (Ec. 01)$$

Del cual:

P_{med} : precipitación media de la cuenca.

P_i : precipitación de la estación.

n : número de estaciones.

1.5.2 Polígono de Thiessen

Villon (2002) es un procedimiento que necesita el conocimiento de la ubicación de las estaciones en la zona de estudio ya establecida. Esta técnica consiste en situar estaciones dentro y fuera de la delimitación de la cuenca, unir las para crear triángulos y dibujar mediatrices a lo largo de los lados del triángulo; estas se cruzarán en un punto que se halla dentro del triángulo. Por último, se delimita el área de influencia de cada estación para que quede circunscrita por líneas. El área de influencia de la estación estará compuesta por el área delimitada por los polígonos de Thiessen y la cuenca, quedando solamente por determinar su tamaño.

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i \dots\dots\dots (Ec. 02)$$

Donde:

P_{med} : es la precipitación media.

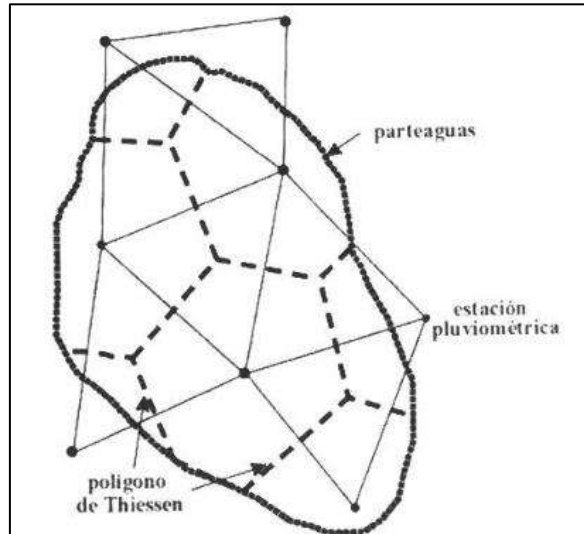
A_T : es el área de la cuenca

A_i : área del polígono de Thiessen.

P_i : la precipitación de la estación.

n : número de estaciones

Figura 5
Polígono de Thiessen

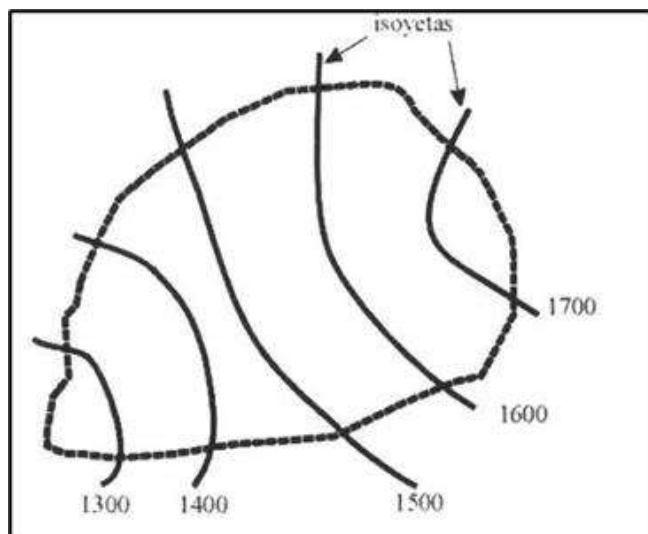


Nota. Extraído del libro de Hidrología de Villón (2002)

1.5.3 Isoyetas

Este método, de acuerdo con Villón (2002), requiere un plano de isoyetas de las precipitaciones registradas en la zona estudiada, que consiste en curvas que unen puntos con la misma cantidad de precipitación. Esto lo transforma en un método exacto, dado que las precipitaciones deben seguir patrones parecidos a los contornos y la precisión aumentará en la medida en que haya más estaciones meteorológicas en la zona estudiada.

Figura 6
Isoyetas de precipitaciones



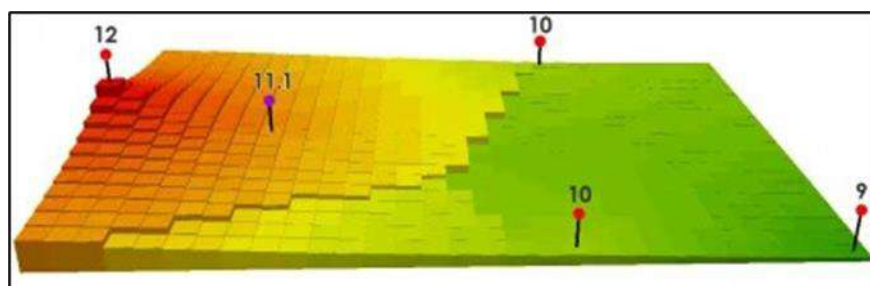
Nota. Extraído del libro de Hidrología de Villón (2002)

1.5.4 Método Kriging

La técnica geoestadística del Kriging, según lo expuesto por Chilès et al. (2012), permite calcular el valor de una variable en localizaciones no muestreadas a través de datos que se conocen, considerando la distancia entre los puntos y la estructura de dependencia espacial entre estos. D.G. Krige fue quien lo ideó en un principio, y Matheron lo estableció formalmente en 1963, bajo el marco de la teoría de variables regionalizadas.

El Kriging es un método ampliamente empleado en hidrología para estimar variables espaciales continuas, como caudales medios, humedad del suelo, niveles freáticos, temperatura o precipitación, cuando se cuenta con información de un número restringido de estaciones o puntos de medición. El Kriging, a diferencia de los métodos determinísticos (como la interpolación lineal o el inverso de la distancia ponderada), brinda una estimación ideal y sin sesgos. Esto se logra al reducir la variabilidad del error de predicción, utilizando el variograma experimental, que explica cómo fluctúa la similitud entre los valores de la variable en función de la distancia.

Figura 7
Método Kriging



Nota. Extraído de Chilès et al. (2012)

1.6 Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia

Las curvas de frecuencia-intensidad-duración (IDF) son un método muy utilizado a nivel global, debido a su importancia al estimar los caudales máximos y las tormentas de diseño, según Lozano (2023). Estas curvas muestran cada área, y varían de acuerdo con la región, el clima y/o los niveles de temperatura del lugar en que se generen. Un conjunto de datos pluviométricos que se registra en estaciones es la base para la creación de estas curvas. El objetivo de esto es calcular la magnitud de tormentas de diferentes duraciones y con un intervalo y frecuencia específicos.

1.6.1 Método Dyck Peschke

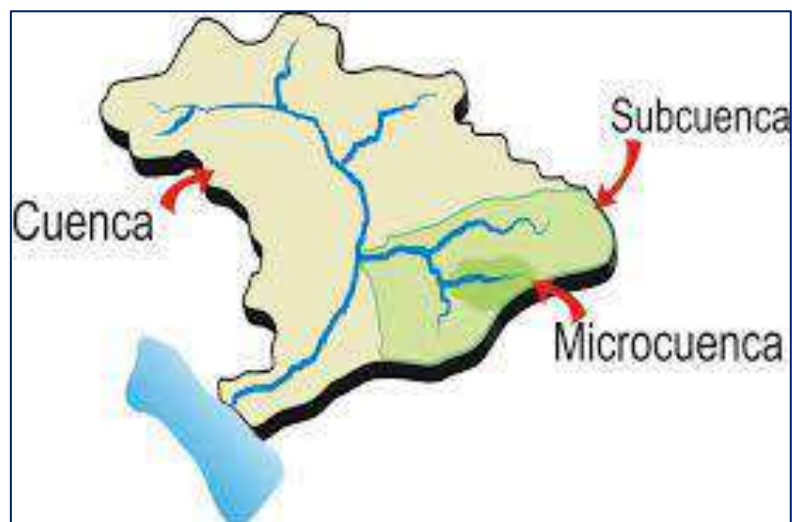
Según Mendoza (2020), el método Dieck-Peasche es una técnica que se utiliza en hidrología para calcular la precipitación media de una cuenca hidrográfica, utilizando los datos de distintas estaciones pluviométricas que se encuentran dentro o alrededor de la cuenca. Este procedimiento se fundamenta en la asignación de pesos proporcionales a la zona de influencia de cada estación, que se establecen según la localización y representatividad espacial de los pluviómetros.

Mendoza (2020) sostiene que el método Dieck-Peach, a diferencia de técnicas más elementales como la media aritmética o el método de Thiessen, incluye un análisis ponderado más minucioso. Este toma en cuenta no solo la distribución espacial de las lluvias, sino también los rasgos fisiográficos de la cuenca (como su relieve, orientación y exposición). Esto posibilita calcular un valor medio areal de la precipitación más exacto, sobre todo en zonas donde la lluvia presenta una gran variabilidad espacial.

1.7 Cuenca hidrográfica

Villon (2002) define la cuenca hidrográfica como un espacio donde el desagüe de una corriente producida por las precipitaciones se combina con todas las aguas que han caído, formando así un solo cauce.

Figura 8
Cuenca hidrográfica



Nota. Extraído del siguiente enlace https://es.123rf.com/photo_185551137_cuenca-hidrogr%C3%A1fica-como-sistema-de-cuenca-de-agua-con-diagrama-de-contorno-de-arroyos-de-r%C3%ADo-de.html

1.7.1 Geomorfología de la cuenca hidrográfica

Bateman (2007) señala que las cualidades físicas de una cuenca constituyen un conjunto significativo para establecer el comportamiento hidrológico de la misma. Estos parámetros físicos de la cuenca hidrográfica tienen el potencial de transmitir información sobre cómo reacciona el sistema hídrico de una cuenca.

1.7.2 Parámetros de forma de la cuenca

Bateman (2007) sostiene que la forma tiene relevancia y afecta el tiempo que tarda la lluvia en llegar a la salida de la cuenca, para lo cual se requieren múltiples índices o medidas.

Estos criterios son:

- **Área (A)**

Según Bateman (2007), la superficie de drenaje del sistema de escurrimientos que fluye por un cauce natural es lo que se conoce como "bateman".

- **Perímetro (P)**

Según Bateman (2007), la divisoria de aguas recorre una longitud horizontal. La unidad de medida se expresa en longitud, ya sea utilizando kilómetros o metros.

- **Perímetro (P)**

Según Bateman (2007), la divisoria de aguas recorre una longitud horizontal. La unidad de medida se expresa en longitud, ya sea utilizando kilómetros o metros.

- **Longitud de la cuenca (L)**

La longitud horizontal se describe, según Bateman (2007), como la distancia desde el drenaje de la cuenca y las aguas arriba hasta el curso principal del río, hasta que se cruza con la curva de nivel de una cuenca.

- **Ancho de la cuenca (B)**

Bateman (2007), es la relación entre la superficie de una cuenca y su longitud.

1.7.3 Parámetros de relieve de la cuenca hidrográfica

- **Pendiente de la cuenca (S)**

Bolaños et al. (2024) describe la manera en que se establece la relación entre la pendiente media de una cuenca, donde elementos como el drenaje superficial, infiltración, captación, humedad del suelo y aguas subterráneas del caudal son relevantes. La siguiente tabla muestra la clasificación, que se calcula de manera rápida y precisa mediante programas informáticos de ingeniería.

Tabla 1

Clasificación de pendiente en cuencas hidrográficas

Pendiente (%)	Tipo de terreno
2	Plano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado medio
25	Fuertemente accidentado
20	Escarpado
>50	Muy escarpado

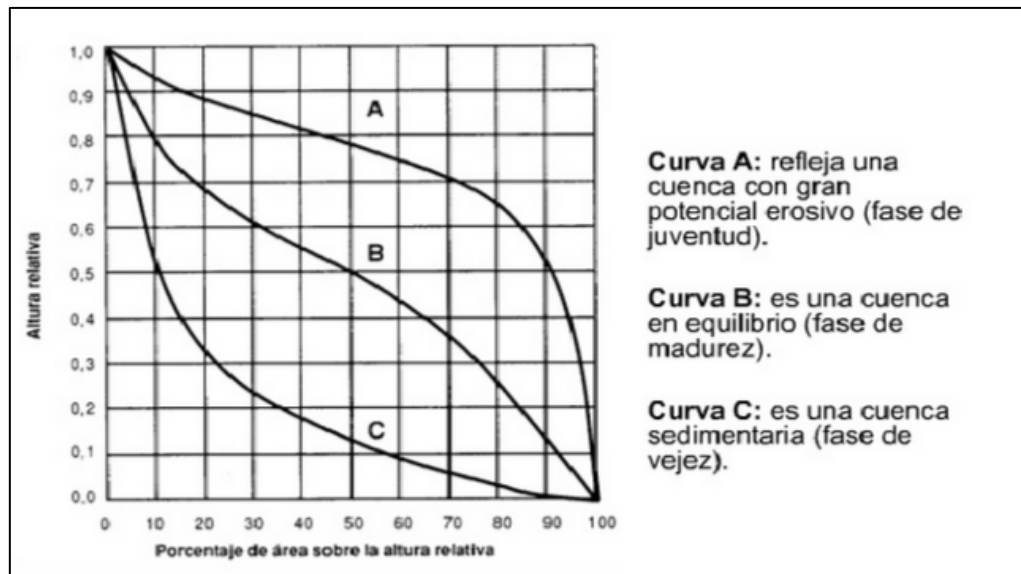
Nota. Extraído de Bolaños (2024)

- **Curva hipsométrica**

Bolaños et al. (2024) describen que es una curva que ilustra el perfil longitudinal de la cuenca hidrográfica y tiene relevancia en términos de altitud porque esta variable es esencial en la hidrología a nivel regional.

Figura 9

Clasificación de la curva hipsométrica



Nota. Extraído del siguiente enlace <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>

- **Pendiente media de la cuenca**

Según Bolaños et al. (2024), este parámetro es importante debido a la conexión que tiene con el comportamiento hidráulico del drenaje en una cuenca, y también está directamente relacionado con la magnitud de las avenidas máximas. El sistema del rectángulo equivalente se utiliza para calcular este parámetro.

- **Tiempo de concentración**

Según Cahuana et al. (2009), es el tiempo que tarda una partícula de agua en recorrer la distancia desde el lugar más distante de la cuenca hasta alcanzar el punto de captación o salida.

Formula de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \dots\dots\dots (Ec. 03)$$

Del cual:

T_c : Tiempo de concentración (h)

L : Longitud del cauce (m)

S : Pendiente de la cuenca (m/m)

Formula de Temez:

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \dots\dots\dots (Ec. 04)$$

Del cual:

T_c : Tiempo de concentración (h)

L : Longitud máxima de recorrido del agua (km)

J : Pendiente del recorrido más largo

1.7.4 Parámetros de la red hidrográfica

Bolaños y otros (2024) explican que la cantidad de orden de un cauce es indicativa del nivel de ramificación que tiene una red de drenaje. Los estándares de drenaje en la cuenca están gobernados por:

Sistema Horton (Figura a):

- Arroyos de primer orden (1) sin afluyentes.
- Arroyos de segundo orden (2) con afluyentes de primer orden.
- Corrientes de tercer orden (3) son afectados por primer y segundo orden.
- Cauce de orden n recibirá afluyente hasta del primer orden. Que implica atribuir rango superior a la longitud del río primario, desde la salida hasta la cabecera de la cuenca.

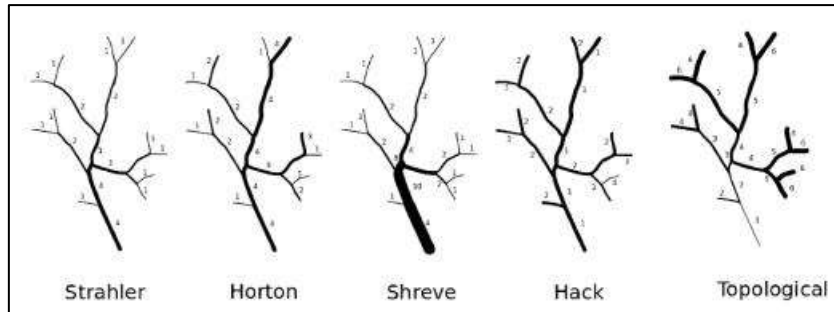
Sistema Strahler (Figura b):

Evitando subjetividad en cabeceras de cuenca, se designa como:

- Los cursos de agua serán afluyentes, donde las cabeceras son ríos principales.
- El río no mantiene un mismo orden a lo largo de su recorrido.
- Orden de la cuenca se determina por el orden del río principal.

Figura 10

Esquemmatización del número de orden en un río.



Nota. Extraído de “Análisis de tránsito de máximas avenidas en el lago Chinchaycocha usando el software HEC-HMS para estudiar el comportamiento de futuras inundaciones”, por Bolaños (2024)

1.8 Estación hidrométrica

ANA (2016) señala que las estaciones son responsables de medir la disponibilidad de agua, en términos de su distribución geográfica y cómo varía a través del tiempo. Las posiciones de las mismas se determinan considerando ciertos rasgos topográficos y climáticos. Sin embargo, actualmente existe una falta de estaciones hidrométricas en todo el país. Estas estaciones registran el caudal del registro hídrico que fluye a través de la sección transversal de un río o quebrada y su medición se obtiene por medio de aforos. La velocidad del agua y la sección transversal por la que pasa la corriente determinan el valor del caudal.

Figura 11

Estaciones hidrométricas



Nota. Extraído del siguiente enlace, <https://enertekglobal.com/espanol-post-es/estaciones-hidrometricas-que-son-importancia-tipos-y-funcionamiento/>

1.9 Periodo de retorno

El MTC (2008) establece que el periodo de retorno, o "Tr", es el tiempo medio en años, durante el cual se iguala o supera la crecida máxima de un determinado caudal al menos una vez cada "T" años. Bajo la suposición de sucesos anuales independientes, es factible calcular la probabilidad de que ocurra un fallo a lo largo de una vida útil de n años (p.23).

Y el riesgo de fallo en relación al tiempo de retorno y a la vida útil de una obra se determina por medio del siguiente cálculo:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \dots\dots\dots (\text{Ec. 05})$$

Donde:

R : Es el riesgo de falla.

T : Es el periodo de retorno.

n : La vida útil en años.

1.10 Distribución de probabilidades

El análisis de frecuencias busca determinar, a través de modelos probabilísticos (ya sean discretos o continuos), la precipitación, la intensidad o los caudales máximos en varias ventanas de retorno (MTC, 2008, p. 25).

Hay varias funciones de distribución de probabilidades teóricas en estadística. Las que están más recomendadas son:

1.10.1 Distribución normal

Su función densidad se define como:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{S}\right)^2} \dots\dots\dots (\text{Ec. 06})$$

Donde:

f(x) : es la función densidad de x.

x : viene a ser la variable independiente.

u : es el parámetro de localización.

S : parámetro de escala.

1.10.2 Distribución log normal 2 parámetros

$$f(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\left(\frac{-(x - \bar{X})^2}{2S^2}\right)} dx \dots\dots\dots (\text{Ec. 07})$$

Donde:

X y S : son parámetros de la distribución

1.10.3 Distribución log normal 3 parámetros

La función densidad es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_o)\sqrt{2\pi S_y}} e^{-1/2 \left(\frac{\ln(x - x_o) - u_y}{S_y} \right)^2} \dots\dots\dots (\text{Ec. 08})$$

Valido para $x > x_0$

Donde:

Xo : es el parámetro de posición.

Uy : parámetro de escala.

Sy2 : parámetro de forma o varianza.

1.10.4 Distribución gamma 2 parámetros

Con la siguiente función densidad:

$$f(x) = \frac{(x - x_o)^{\gamma - 1} e^{-\frac{(x - x_o)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 09})$$

Valido para: $x_o \leq x \leq \infty; -\infty \leq x_o \leq \infty; 0 \leq \beta \leq \infty$ y $0 \leq \gamma \leq \infty$

Y : parámetro de forma

β : parámetro de escala

1.10.5 Distribución gamma 3 parámetros

Con la siguiente función densidad:

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 10})$$

Valido para: $x_0 \leq x \leq \infty$; $-\infty \leq x_0 \leq \infty$; $0 \leq \beta \leq \infty$ y $0 \leq \gamma \leq \infty$

Donde:

X_0 : parámetro de posición

γ : parámetro de forma

β : parámetro de escala

1.10.6 Distribución log Pearson tipo III

Con la siguiente función densidad:

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x \beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 11})$$

Valido para: $x_0 \leq x \leq \infty$; $-\infty \leq x_0 \leq \infty$; $0 \leq \beta \leq \infty$ y $0 \leq \gamma \leq \infty$

Donde:

X_0 : parámetro de posición

γ : parámetro de forma

β : parámetro de escala

1.10.7 Distribución Gumbel

Tiene la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$F(x)$: parámetro de concentración.

x : parámetro de localización.

β : parámetro de escala

1.10.8 Distribución log Gumbel

Se define como:

$$y = \frac{\ln x - \mu}{\alpha} \dots\dots\dots (\text{Ec. 13})$$

Donde:

x : variable positiva (caudal, precipitación)

μ : parámetro de posición

α : parámetro de escala

1.10.9 Pruebas de bondad de ajuste

Según MTC (2008), son pruebas de hipótesis que se utilizan para analizar los datos de una muestra independiente, seleccionada a partir de la distribución escogida.

Algunas de las pruebas más conocidas son:

- Kolmogorov-Smirnov.
- Análisis de Chi cuadrado

En su investigación, Vela (2023) afirma que esta prueba se basa en el cálculo de frecuencias observadas y esperadas, considerando una cantidad determinada de intervalos. Se emplea para calcular el grado de discrepancia entre las frecuencias observadas y las esperadas, que puede ser provocada por un error de muestreo o por azar. Su expresión es:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i} \dots\dots\dots (\text{Ec. 14})$$

Del cual se tiene que:

x_c^2 : es el valor calculado de la prueba.

θ_i : es el número de valores observados para un intervalo de clase i .

e_i : es el número de valores esperados para un intervalo de clase i .

k : es el número de intervalos

Este valor determinado se compara con las tablas tabulares, del cual se encuentran dos casos:

El primer caso es si el valor de la prueba calculado es menor o igual al valor tabular, conlleva a que el ajuste será bueno al nivel de significancia elegido.

$$x_c^2 \leq x_t^2 \dots\dots\dots (\text{Ec. 15})$$

El segundo caso es cuando el valor de la prueba calculado es mayor al valor tabular, conlleva a que el ajuste es malo, recomendándose volver a probar con otra distribución de probabilidad.

$$x_t^2 \leq x_c^2 \dots\dots\dots (\text{Ec. 16})$$

Esta prueba es recomendable aplicar a las distribuciones normal y log normal con dos y tres parámetros.

1.10.10 Prueba de Kolmogórov-Smirnov

De acuerdo con Vela (2023), el fundamento de esta prueba es la comparación entre las probabilidades empíricas de los datos muestreados y su probabilidad teórica; además, escoge el valor máximo en términos absolutos en relación a la diferencia con el valor observado. Cabe destacar que esta prueba no presupone la distribución de los datos, lo cual permite su aplicación a cualquier conjunto de datos.

$$\Delta = \max [F(x) - P(x)] \dots\dots\dots (\text{Ec. 17})$$

Del cual se tiene que:

Δ : es el estadístico de Smirnov Kolmogórov, con un valor igual a una diferencia máxima existente entre probabilidad ajustada y empírica.

$F(x)$: viene a ser la probabilidad de la distribución teórica.

$P(x)$: viene a ser la probabilidad experimental, denominada frecuencia acumulada.

Previo a esto se determina la probabilidad empírica mediante la fórmula de Weibull:

$$P(x) = \frac{M}{N + 1} \dots\dots\dots (\text{Ec. 18})$$

Del cual se tiene que:

$P(x)$: Es la probabilidad empírica

M : viene a ser el número de orden.

N : viene a ser el número de datos.

1.11 Tormenta de diseño

Lozano (2023) señala que una tormenta se caracteriza por ser un conjunto de intervalos de lluvia que surgen a partir de un sistema meteorológico. Se eligieron las

variables cuantitativas significativas que describen y/o definen una tormenta a lo largo del tiempo, incluyendo la duración, la intensidad y la magnitud.

- **Tamaño**

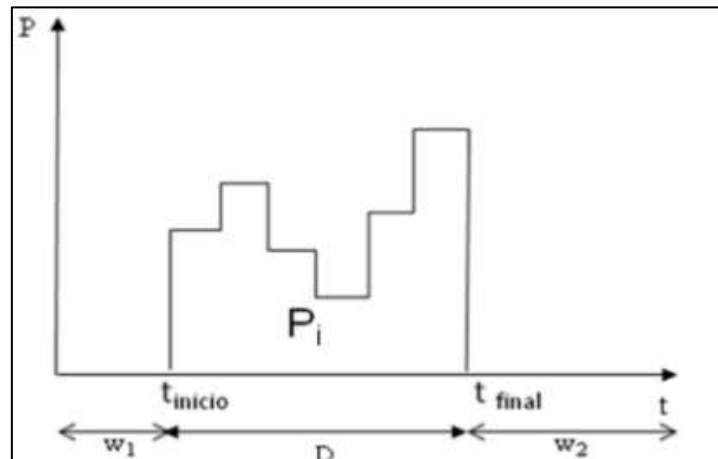
Según Lozano (2023), la duración de la tormenta se discretiza en intervalos de tiempo, y las precipitaciones correspondientes a cada uno de estos intervalos se suman.

- **Duración**

Lozano (2023) lo describe como la duración de un evento o tormenta, que tiene un intervalo temporal en el que es necesario conocer las características de la tormenta, incluyendo su intensidad, precipitación y caudal, entre otras.

Figura 12

Hietograma de diseño



Nota. Extraído de Lozano (2023)

- **Intensidad**

Lozano (2023) señala que la cantidad de precipitación en un lapso de tiempo se obtiene dividiendo la precipitación por intervalo y se mide en mm/h.

1.12 Hietogramas de tormentas de diseño

Según MTC (2008), las tormentas de diseño se caracterizan por ser un tipo de patrón de precipitación. Se emplean valores específicos de precipitación por el método racional para calcular los caudales máximos en alcantarillas de aguas pluviales y cunetas en carreteras.

Según Paoli et al. (2001), el resultado de los caudales por tormentas de diseño se establece utilizando modelos de transformación lluvia-caudal o métodos

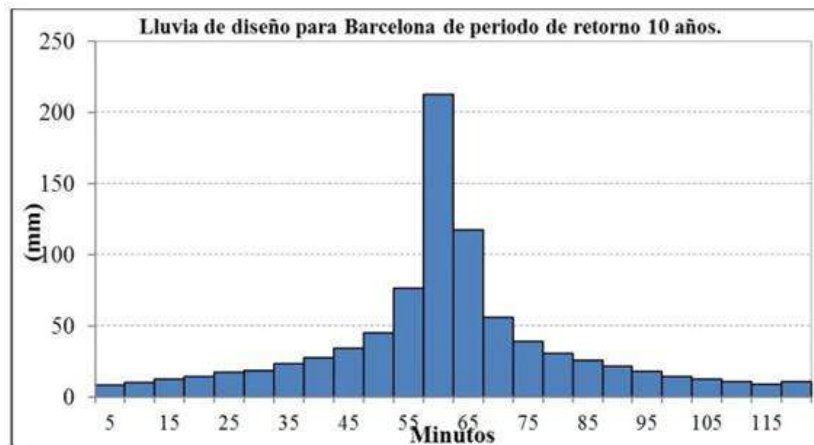
semiempíricos, mediante los cuales una tormenta seleccionada es convertida en un hidrograma del proyecto o en caudal máximo.

También es indispensable contar con información de un pluviógrafo o una estación meteorológica automática que provean información instantánea, con lo cual se calculan tormentas de diseño.

Mendoza (2020) señala que los hietogramas de tormentas de diseño son métodos distintos, siendo los más comunes y la mayoría de ellos hietogramas o patrones temporales de diseño, que se originan a partir de las curvas IDF. Sin embargo, estos propósitos de superar las limitaciones observadas en las tormentas a partir de dichas curvas durante las décadas del 70 y 80 del siglo pasado llevaron a la propuesta de nuevos modelos alternativos que representen la verdadera visión de los datos reales sobre precipitación. Estos métodos se agrupan en una segunda clasificación con hietogramas obtenidos mediante patrones temporales observados en registros relacionados con la precipitación. La tercera clasificación son métodos basados en simulaciones de lluvias estocásticas las cuales presentan inconvenientes de una parametrización extensa que lo convierten en poco prácticos para realizar un diseño estándar.

Figura 13

Representación gráfica de un hietograma de diseño



Nota. Extraído del siguiente enlace <http://sudsostenible.com/las-comparaciones-son-odiosas/>

1.13 Curvas de Huff

Las curvas de Huff se desarrollaron en Illinois en 1967, utilizando una base de datos que abarcaba 12 años. 49 pluviómetros cubrieron una superficie de 1,037 km² (Lozano, 2023). Estas curvas son hietogramas acumulativos sin dimensiones, con

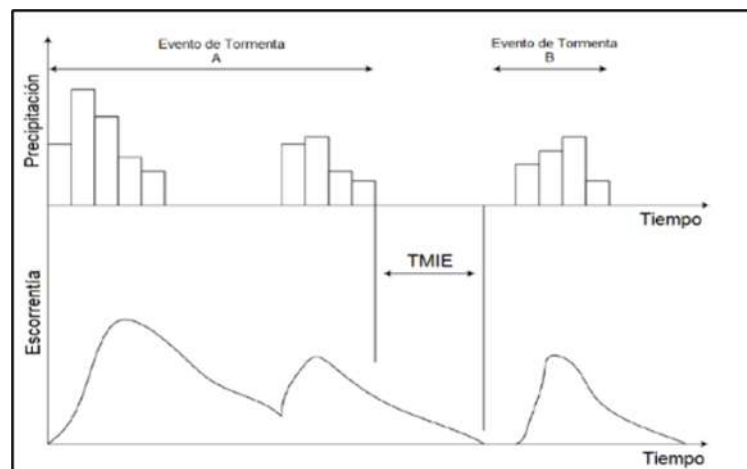
una probabilidad específica de suceder. Al principio, estas curvas se emplearon para caracterizar las precipitaciones a través del tiempo. Luego, se ampliaron para simular hietogramas de lluvia, que son provechosos como información inicial en los modelos de lluvia y escorrentía.

Huff (1967) elaboró un conjunto de curvas con el fin de mostrar la distribución temporal de los fenómenos tormentosos, empleando hietogramas adimensionales. Para ello, se basó en 49 estaciones meteorológicas ubicadas en una región de 400 millas cuadradas en Illinois, EE. UU.

Huff (1967) informó que se eliminaron los eventos de tormenta independientes y después se clasificaron en cuartiles según la intensidad máxima observada. Para establecer un evento de tormenta independiente, se tomó en cuenta que el evento durara un mínimo de tres horas y que el intervalo entre eventos fuera de seis horas. Además, se determinó que la precipitación total de este evento debía ser mayor a 12.7 mm. Se identificaron y eliminaron 261 eventos de precipitación independientes con estos criterios.

Figura 14

División de tormentas a partir del tiempo mínimo inter – eventos



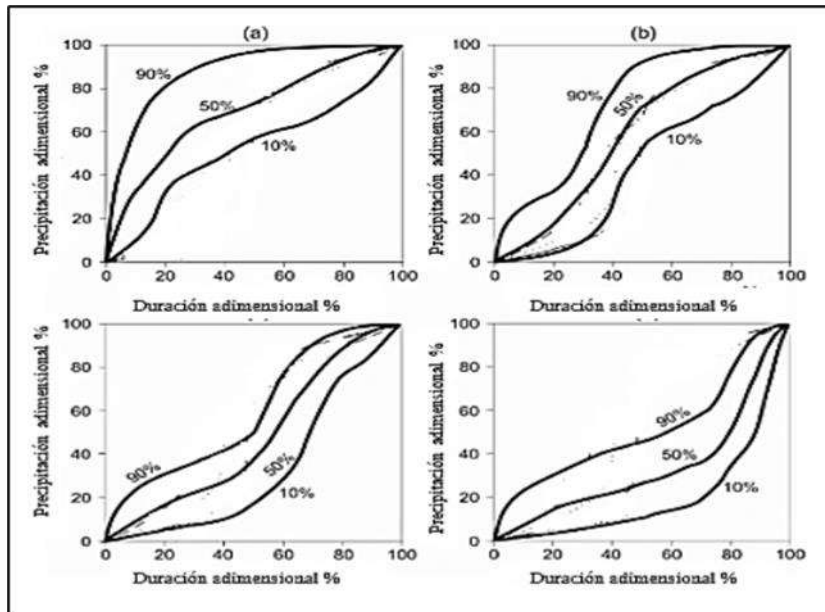
Nota. Extraído de “caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú”, Quijada (2020)

Huff (1967) agrupó los sucesos de precipitación en cuatro cuartiles, que se establecieron como categorías que representan el 25% del tiempo total que dura un evento. Los sucesos cuya duración abarcaba del 0% al 25% del total se colocaron en el primer cuartil; los que abarcaban entre el 25% y el 50%, en el segundo cuartil; aquellos que comprendían entre el 50% y el 75%, en el tercer cuartil; y, finalmente, los eventos que iban del 75% hasta el final, en el cuarto cuartil. Se utilizó esta

categorización en cuartiles porque se notó que una porción importante de la precipitación sucedía dentro de un rango específico del evento, sin importar el tiempo total de la tormenta o la lluvia promedio. La distribución resultante mostró una tendencia a que los eventos de mayor duración se concentraran en el cuarto cuartil, mientras que los eventos de corta duración predominaban en el primer y segundo cuartil.

Figura 15

Curvas de Huff para los grupos de cuartiles de clasificación



Nota. Extraído de “caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú”, Quijada (2020)

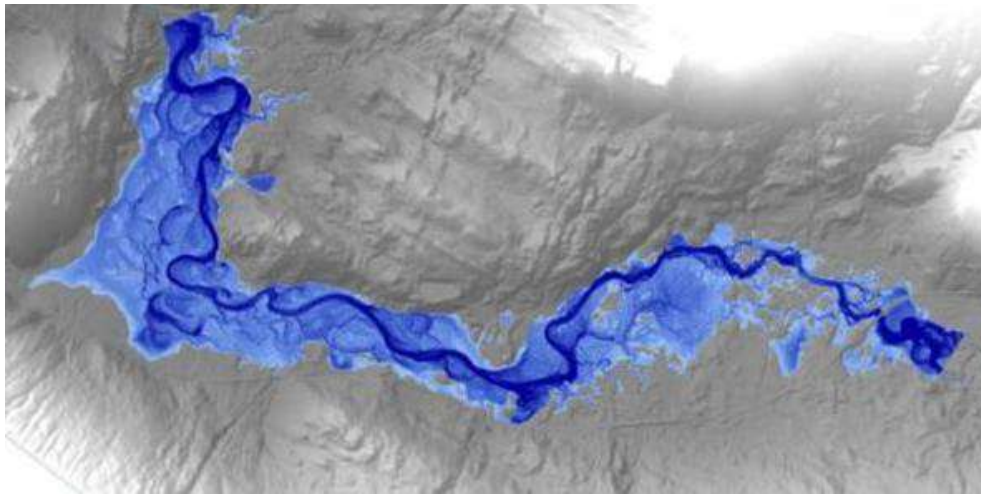
1.14 Modelación hidrológica

Según Mendoza (2020), la modelación es un instrumento que permite, mediante un prototipo, expresar la realidad hidrológica de problemas vinculados a la calidad y cantidad de la oferta hídrica. Los problemas de erosión, sequía e inundaciones, así como la contaminación producida por el sector económico y el desarrollo social en un país (p.18).

Según Mendoza (2020), la modelación hidrológica es una herramienta que intenta describir, a través de un modelo lo más parecido posible, la realidad hidrológica en relación con los problemas ambientales relacionados con el volumen y la calidad del agua disponible. En los lugares donde se producen inundaciones, erosiones, sequías y contaminación puntual o difusa, se requiere una gran demanda de desafíos en torno a la modelación hidrológica para obtener resultados. Estos problemas son

particularmente relevantes en las áreas de desarrollo social y económico de un país y necesitan que la toma de decisiones sea proactiva para contribuir a la creación de soluciones.

Según Del Águila (2021), el propósito fundamental de la modelación hidrológica es adquirir datos que faciliten la gestión de los recursos hídricos. Otros usos posibles son estimar variables hidrológicas en cuencas sin información, lo cual permite llevar a cabo proyectos con diseños hidráulicos. El modelo hidrológico contribuye a la sistematización y organización de datos hidrometeorológicos con el objetivo de crear información a partir de un escaso número de datos, como para extender o completar aquellos que falten.

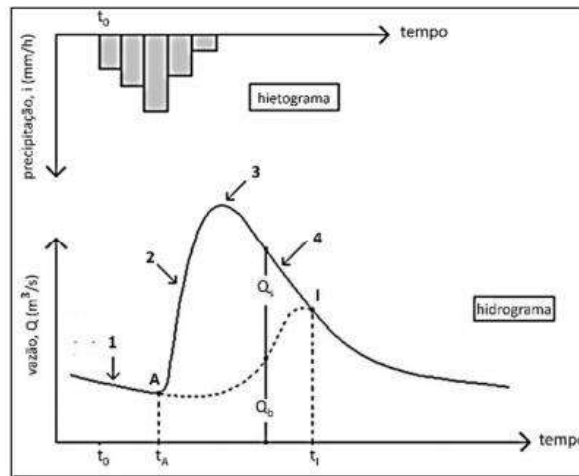


Nota. Extraído del siguiente enlace <https://www.ididactia.com/2016/01/26/como-especializarte-en-modelado-hidraulico-de-rios/>

1.15 Hidrogramas

Los hidrogramas, de acuerdo con Avellaneda et al. (2019), son diagramas que representan la variación del caudal a través de un determinado tiempo, dependiendo de la duración de una tormenta específica que ocurre en la cuenca hidrográfica. Su importancia se debe a que se pueden analizar factores como el caudal pico y el flujo base, así como la cantidad de descarga generada después de una tormenta.

Figura 16
Representación gráfica de un hidrograma unitario



Nota. Extraído del siguiente enlace <https://www.qconcursos.com/questoes-de-concursos/questoes/d96b8fbf-3a>

1.16 Caudales máximos

Villon (2002) señala que los valores calculados para el diseño de un cauce, vertederos, aliviaderos y sistemas que incorporan drenaje (ciudades, carreteras y zonas agrícolas), así como defensas ribereñas que protegen áreas agrícolas y comunidades, son asignados con un periodo de retorno específico en función de su relevancia y duración útil de la obra. Este periodo se utiliza para calcular el caudal de diseño.

1.17 Métodos de estimación de caudales máximos

1.17.1 Método racional

Fernández (2022) señala que uno de los métodos más usuales para determinar el caudal máximo en cuencas pequeñas, es decir, aquellas con una superficie inferior a 50 km², se establece mediante la fórmula siguiente (p.31).

$$Q_T = \frac{I(T, t_C) \cdot C \cdot A \cdot K_t}{3.6} \dots\dots\dots (\text{Ec. 19})$$

Del cual:

- Qt : Caudal de avenida respecto a un periodo de retorno (m³/s).
- I(T,tc) : Es la intensidad de lluvia en una duración de lluvia y periodo de retorno (mm/h).
- C : Coeficiente de escorrentía.

- A : Superficie de la cuenca (km²).
- Kt : Es el coeficiente de uniformidad durante la distribución temporal de precipitación.
- 3.6 : Factor de corrección de unidades.

1.17.2 Método del hidrograma unitario

Herrera (2024) explica que es una herramienta que modela la reacción de la cuenca frente a una lluvia unitaria, como sería un acontecimiento de 1 mm de precipitación distribuido uniformemente por toda la cuenca durante un período específico. El cual se fundamenta en la superposición de hidrogramas unitarios que calculan el caudal máximo a partir de eventos con mayor cantidad de precipitación, y se utiliza para cuencas medianas y grandes (p.39).

1.17.3 Modelo hidrológico distribuido

Herrera (2024) posibilita la ejecución de simulaciones exactas de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica. Estos modelos utilizan datos sobre la infiltración, el flujo base, las precipitaciones y la escorrentía superficial para simular el comportamiento hidrológico de una cuenca en diversos contextos. En el ámbito de la simulación de caudales máximos para el diseño hidráulico que puedan soportar situaciones extremas, el HEC-HMS es una herramienta valiosa.

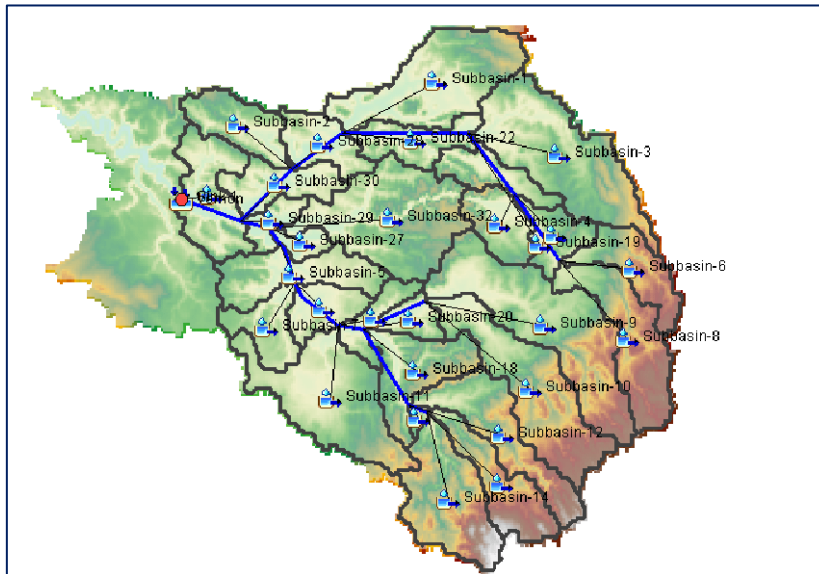
Según Del Águila (2024), la modelización distribuida puede ser más factible gracias a la herramienta GIS, debido a que es común emplear modelos distribuidos para analizar la variabilidad espacial, así como la resolución temporal y espacial. De esta manera, el contenido informativo y la calibración se hacen más visibles.

1.18 Modelo HEC – HMS

Villon (2002) señala que este sistema de simulación hidrológica está orientado a calcular la escorrentía de precipitación en una cuenca con un sistema de componentes hidráulicos e hidrológicos. Se necesitan parámetros para cada componente que detallen las propiedades de este y sus vínculos matemáticos que describen el proceso físico. En el HEC-HMS, se escogen estos elementos: modelos de cuenca, meteorológicos, detalles de control y datos de entrada. Una vez establecidos estos componentes, se lleva a cabo la simulación, en la que se determina el valor del caudal máximo y se calcula la respuesta de relación entre precipitación y escorrentía.

El HEC-HMS, de acuerdo con Mendoza (2020), es un software que se utiliza para ejecutar simulaciones hidrológicas semi distribuidas. En sus inicios, fue creado para modelar sucesos; sin embargo, se le añadió la modelación continua más tarde. Esta tiene como finalidad calcular los hidrogramas de salida de una cuenca o subcuencas. Estos posibilitan el cálculo de los caudales máximos y los tiempos pico en situaciones extremas de lluvia. Para ello, es necesario aplicar técnicas para calcular hietogramas de diseño, así como medir el flujo base, las pérdidas por infiltración y la conversión a escorrentía directa. El modelo ha adquirido popularidad últimamente en Estados Unidos y en otros países donde su empleo es esencial.

Figura 17
Interfaz del software HEC-HMS



Nota. Extraído del siguiente enlace <http://www.gef-ecohidrologia.org/decaacutelogo-para-el-modelaje-hidroloacutegico-con-hec-hms-y-geo-hms.html>

1.19 Número de Curva

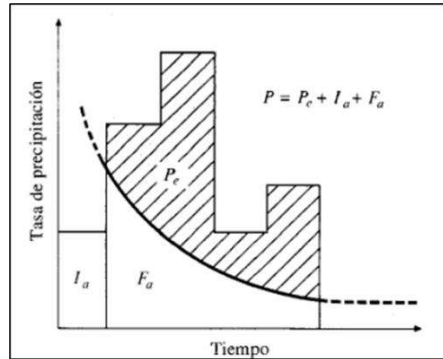
El SCS (Servicio de Conservación de Suelos) desarrolló el parámetro número curva (NC), que consiste en la estimación directa de la escorrentía superficial de las lluvias, utilizando las características del suelo y la cobertura vegetal. Así lo señalan Avellaneda et al. (2019).

Se conoce como abstracción inicial (I_a) a la parte de P que queda retenida en el suelo y no produce escorrentía directa. Por otro lado, a la parte de la precipitación que sí provoca escorrentía directa se le llama precipitación efectiva o neta (P_e), cuyo valor es igual o inferior al de la precipitación (P). De manera similar, después de que

comienza la escorrentía, la profundidad en la que el agua queda retenida en la cuenca (F_a) es igual o menor a las retenciones potenciales (S).

Figura 18

Variables del método de abstracciones de precipitación SCS



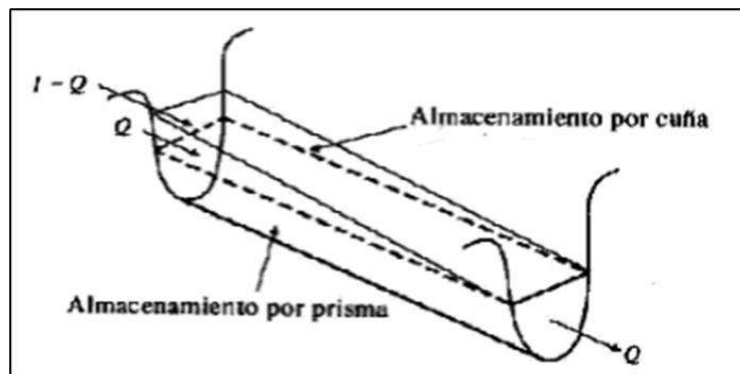
Nota. Extraído de Hidrología aplicada de Ven te Chow (1994)

1.20 Método de Muskingum

Conforme a lo que expresó García (2015), el método Muskingum fue creado en 1934 y se fundamenta en el principio de una crecida de ondas que viaja por un río. Esta es atenuada por la fricción con el fondo del río y también por los reservorios naturales presentes en las zonas inundables. Su ecuación se formula considerando el almacenamiento en una sección específica de un río, que se toma como un prisma en su primera parte; este depende de las salidas que ocurran. Su almacenamiento se verifica con el ejemplo de un vaso. La otra parte del tramo del río recibe el nombre de cuña, debido a la inclinación de la superficie del agua del caudal, es así que su pendiente depende de sus entradas y salidas tomando en cuenta una función lineal.

Figura 19

tránsito del paso de caudal en el río



Nota. Extraído de García (2015)

Capítulo II

2. Materiales y métodos

2.1 Ubicación

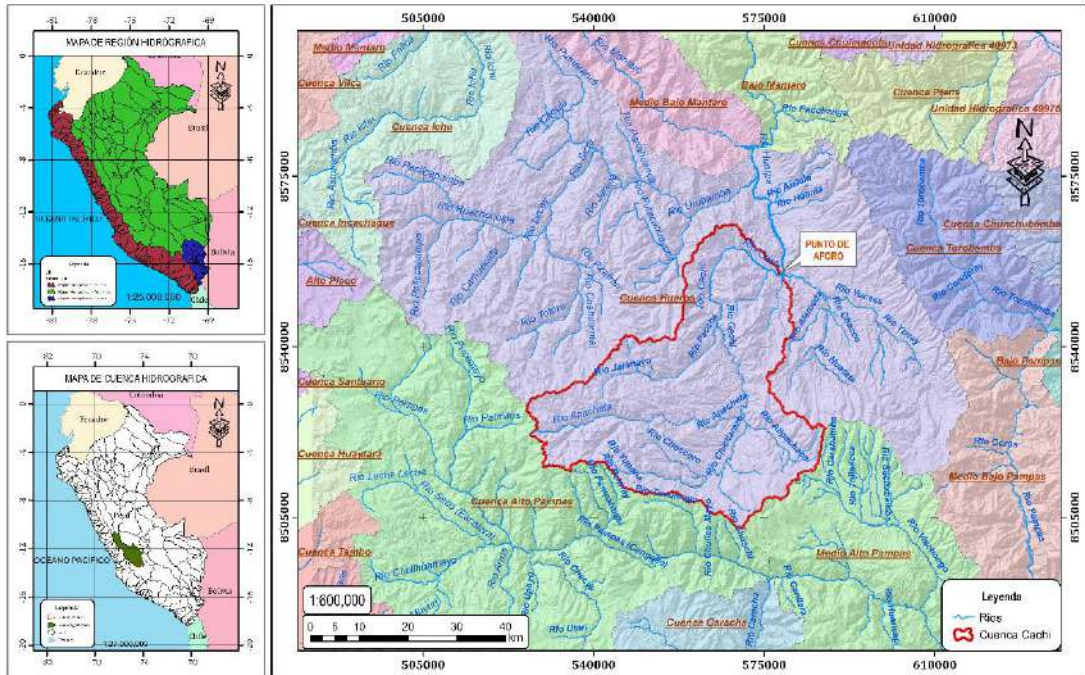
2.1.1 *Ubicación hidrográfica*

La cuenca Cachi se encuentra dentro de las siguientes unidades hidrográficas:

- Unidad hidrográfica 01 : Región hidrográfica Amazonas.
- Unidad hidrográfica 02 : Alto Amazonas.
- Unidad hidrográfica 03 : Ucayali.
- Unidad hidrográfica 04 : Cuenca Mantaro.
- Unidad hidrográfica 05 : Sub cuenca Huarpa.
- AAA : Mantaro.
- ALA : Ayacucho.

Figura 20

Mapa de ubicación hidrológica de la cuenca del río Cachi



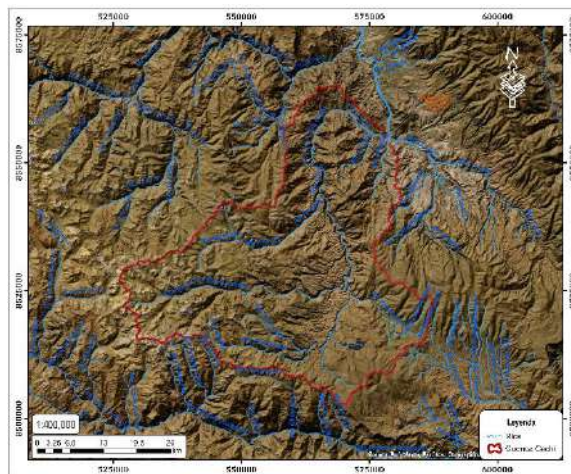
2.1.2 Ubicación geográfica

La ubicación geográfica del punto de salida de la cuenca del río Cachi se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas UTM WGS-84 zona 18 L:

- Este : 578,689.00 m.
- Norte : 8'554,814.00 m.
- Altitud : 2,416.88 m.s.n.m.

Figura 21

Imagen satelital de la cuenca del río Cachi



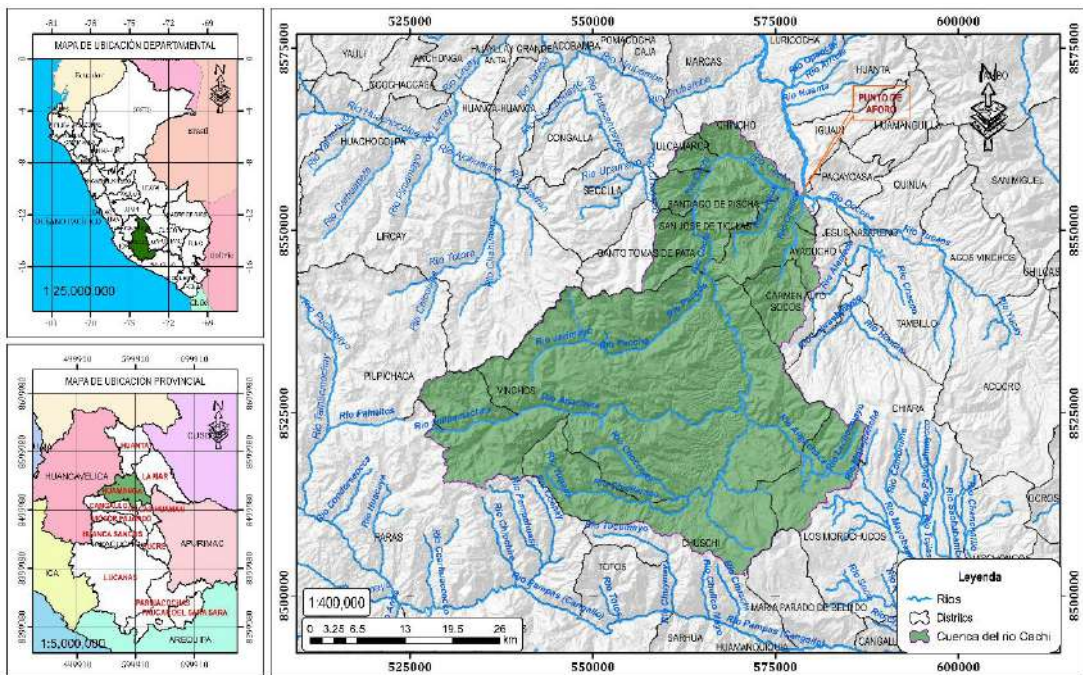
2.1.3 Ubicación política

Los límites políticos de la cuenca Cachi se encuentran situados en:

- Departamentos : Huancavelica.
- Provincia : Angaraes.
- Distrito : Chincho.

Figura 22

Mapa de ubicación de la cuenca del río Cachi.



2.2 Vías de acceso

Se empieza el recorrido desde la ciudad de Ayacucho, por la carretera longitudinal de la sierra sur – carretera 3S, pasando por la ciudad de Huanta hasta llegar al punto de salida de la cuenca Cachi.

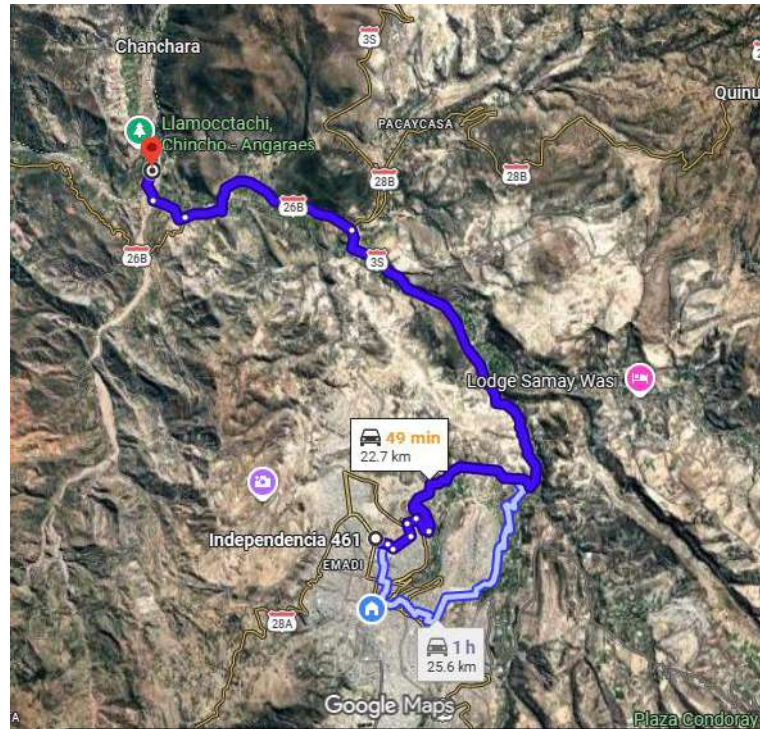
Tabla 2

Vía de acceso al punto de aforo

Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo	Estado
Huamanga a puente Chincho	22.7 km	49 min	Asfalto	Bueno
Total	22.7 km	49 min		

Figura 23

Vista satelital del acceso hacia el punto de aforo



2.3 Materiales y Software

2.3.1 Materiales para el aforo del río

- Wincha de 100m.
- Correntómetro Global Water a Xylem brand, Model Name/Number: FP111
- Flexómetro.
- Cámara fotográfica.
- Libreta de campo.
- Gps.

2.3.2 Software de hidrología

- ArcMap 10.3.1.
- HEC-HMS 4.12.
- Hyfran Plus 1.2.
- Hydraccess 6.2.

La investigación se inició con una fase de gabinete enfocada en la recopilación y procesamiento de información hidrológica, cuyos procedimientos se describen en las secciones siguientes. Posteriormente, los datos obtenidos fueron comparados y utilizados para la calibración del caudal máximo con base en la información recolectada en la fase de campo.

2.4 Desarrollo de la investigación

2.4.1 Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke

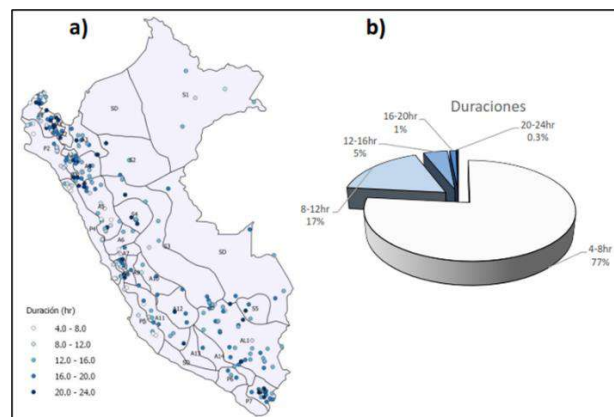
La primera técnica se basó en la representación de la distribución temporal de las precipitaciones máximas en la cuenca del río Cachi, utilizando el método Dyck–Peschke. Este método discretiza la lluvia mediante hietogramas diseñados, que se crean por medio del método de bloques alternos.

Para este primer objetivo, fue necesario establecer la duración característica de una tormenta en la cuenca. Esta se determinó a partir de la figura que presenta las duraciones de tormentas pluviométricas para distintas regiones del país. De acuerdo con dicha información, la cuenca del río Cachi se ubica en la región A12, clasificación propuesta por Tupac (2017) en su tesis “**Regionalización de las precipitaciones máximas en el Perú**”, en la que se definen intervalos de duración de tormentas a nivel nacional.

En esta regionalización, la región A12 tiene una duración típica de entre 12 y 16 horas. Por eso, en este análisis se ha tomado como representativa de una tormenta en la cuenca Cachi una duración de 12 horas. Para la discretización de la distribución temporal de la lluvia, que se utiliza para elaborar el hietograma de diseño, este valor es esencial.

Figura 24

Clasificación de la duración de eventos de tormentas pluviométricas a nivel nacional



Nota. Extraído de Tupac (2017)

A continuación, se describen los procedimientos empleados para la estimación de la precipitación máxima de diseño mediante el método de Dyck–Peschke.

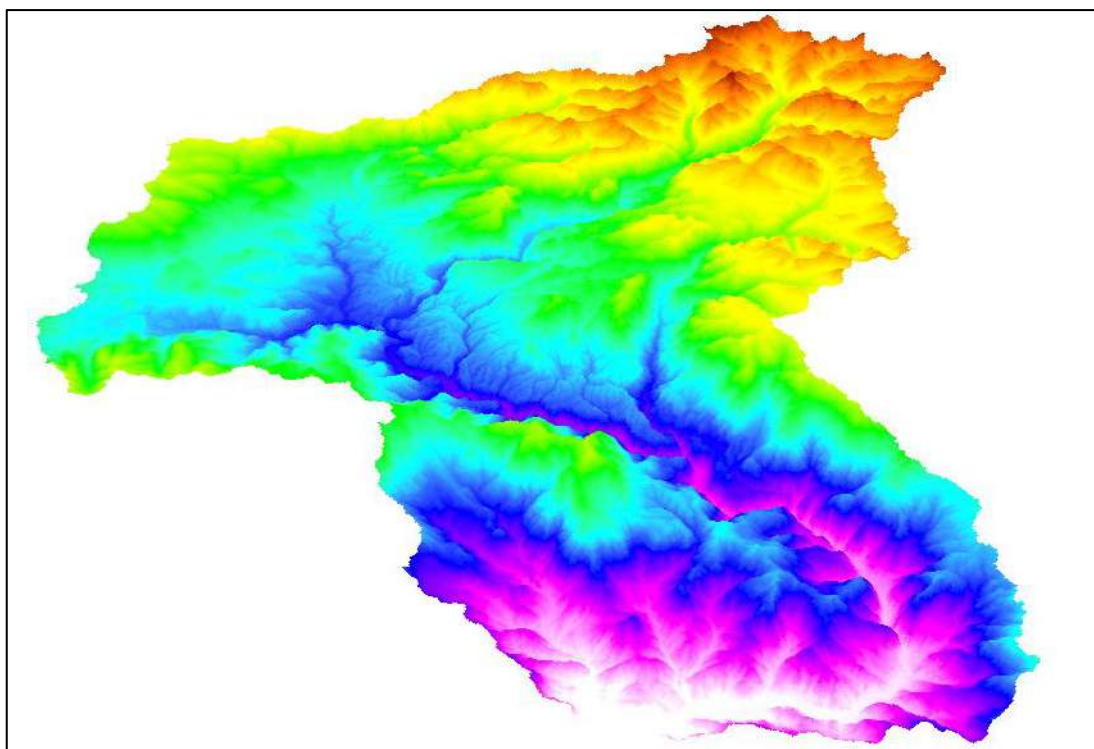
A. Delimitación y obtención de parámetros morfológicos.

Los parámetros morfométricos de las subcuencas que conforman el río Cachi se determinaron a partir de la delimitación hidrológica realizada mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM) de tipo ráster obtenido del satélite ALOS PALSAR (disponible en <https://search.asf.alaska.edu/>), con una resolución espacial de 12.5 metros por 12.5 metros, con el cual se delimito el divortium aquarum de cada subcuenca como se muestra en la Figura 25.

Una vez delimitadas las subcuencas, se determinaron sus parámetros morfológicos, entre los que destacan: área, perímetro, longitud del cauce principal, pendiente media, coeficiente de compacidad, factor de forma, densidad de drenaje y orden de cauces. Estos parámetros se obtuvieron mediante herramientas específicas de ArcMap y fueron posteriormente procesados en hojas de cálculo de Excel, constituyendo la base morfométrica fundamental para el desarrollo de la metodología hidrológica aplicada en la presente investigación.

Figura 25

Representación del Modelo digital de elevación en 3D de la cuenca Cachi



B. Recolección de datos meteorológicos

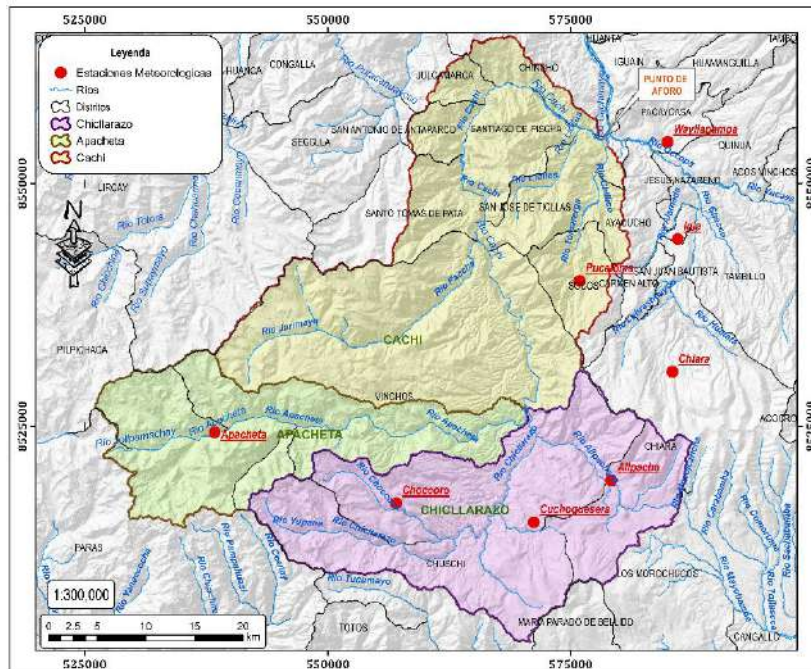
En la cuenca del río Cachi se identificó una limitada disponibilidad de datos pluviométricos, por lo que fue necesario utilizar registros de estaciones meteorológicas locales de los últimos años. No obstante, dicha información presenta vacíos temporales significativos, principalmente debido a la falta de operatividad y mantenimiento por parte del OPEMAN y del SENAMHI.

Las estaciones recopiladas y empleadas en el presente estudio son las siguientes:

Tabla 3
Ubicación de las estaciones meteorológicas

N°	Estaciones	Propiedad	Ubicación geográfica			Ubicación política			Extensión de datos
			Latitud	Longitud	Longitud	Depart	Prov.	Distr	
1	ALLPACHACA	OPEMAN- GRA	13° 23' 29" S	74° 16' 7.82" W	3550 msnm	Ayacucho	Huamanga	Chiara	1996 - 2025
2	APACHETA	OPEMAN- GRA	13° 20' 51" S	74° 38' 44" W	4150 msnm	Ayacucho	Cangallo	Paras	2005 - 2025
3	CHIARA	OPEMAN- GRA	13° 17' 25,56" S	74° 12' 39,54" W	3587 msnm	Ayacucho	Huamanga	Chiara	1996 - 2025
4	CHOCORO	OPEMAN- GRA	13° 24' 48" S	74° 28' 23" W	4025 msnm	Ayacucho	Cangallo	Chuschi	2000 - 2025
5	CUCHOQUESERA	OPEMAN- GRA	13° 25' 50,22" S	74° 20' 32,42" W	3724 msnm	Ayacucho	Cangallo	Chuschi	1996 - 2025
6	INIA	OPEMAN- GRA	13° 10' 00,06" S	74° 12' 22,92" W	2756 msnm	Ayacucho	Huamanga	Andres A. Caceres	1996 - 2025
7	PUCALOMA	OPEMAN- GRA	13° 12' 21,48" S	74° 17' 57,48" W	3490 msnm	Ayacucho	Huamanga	Socos	1996 - 2025
8	WAYLLAPAMPA	OPEMAN- GRA	13° 4' 35,4" S	74° 12' 59,4" W	2470 msnm	Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	1999 - 2025

Figura 26
Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas usadas



C. Selección de la precipitación máxima de 24 horas

Se utilizó el método de interpolación espacial Kriging para calcular los valores representativos de precipitación máxima en 24 horas a lo largo de toda la cuenca del río Cachi. Este método posibilita una estimación más exacta de cómo se distribuye espacialmente la precipitación, basándose en los datos que las estaciones meteorológicas tienen disponibles. El programa Hydraccess fue el utilizado para la implementación.

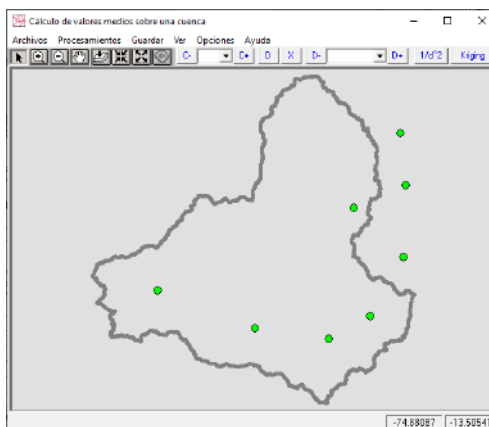
Se elaboró una base de datos de precipitaciones anuales para todas las estaciones, que se estructuró en un formato Excel multi-estación compatible con Hydraccess, antes de la interpolación. Además, se cargó el polígono de la cuenca en formato Shapefile y con georreferenciación adecuada. La información fue procesada por el software utilizando estos insumos, como se muestra en la Tabla 4 que sigue.

Tabla 4
Formato Excel multi estación para el software Hydraccess

Nom	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
Id_Station	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
Captur	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm	MPm
Unité	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Table	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies	Pluies
Latitude	-13.391389	-13.347500	-13.290278	-13.413333	-13.430611	-12.927417	-13.166683	-13.555278	-13.205967	-13.460556	-13.295556	-13.055472	-13.218528	-13.076389
Longitude	-74.268833	-74.645556	-74.210972	-74.473056	-74.342222	-74.268278	-74.206367	-74.184444	-74.299306	-74.100556	-74.025833	-74.141583	-74.1063	-74.216389
Date	Alpacha	Apacheta	Chiara	Choccoro	Cuchoquesi	Huanta	Inia	Pampa Can	Pucaloma	Sachabani	San Pedro	La Quinua	Tambillo	Wayllapampa
1/01/1992 00.00	45.70				27	26.471502					25.7	16.199988	35.3	18.4
1/01/1993 00.00	57.40		31		31.1	31.662763					24.3	37.299992	37.9	14.199999
1/01/1994 00.00	35.90		30.3		27	31.662763	17.5				31.1	36.699988	52.2	15.5
1/01/1995 00.00	34.50		22.4		39.8	51.558428	42	37.8	22	53.6	30.7	35.199988	24.5	17.699988
1/01/1996 00.00	38.10		27.9		35.2	29.494041	29	27.3	31.3	38.5	34.9	29.699988	28.3	19.1
1/01/1997 00.00	28.30		23.7		28.4	38.734682	23.2	29.8	56.3	51.7	26.9	37.799988	41.7	25.399999
1/01/1998 00.00	35.20		23.9		27	39.677604	27.3	30.6	29.8	29.2	25.8	43.599988	31.2	22.4
1/01/1999 00.00	21.10		24.4		42.5	42.601261	24.8	35.4	26.6	24.4	20.6	28.399999	28.6	26.199988
1/01/2000 00.00	41.90		19.111	47.45	43.94	35.315308	35.2	25.09	36.12	25.996	27.3104	26.699988	41.47	34.200001
1/01/2001 00.00	28.50		37.9584	44.2	37.856	26		28.6		42.21	27.04	28.700001	48.49	23.199988
1/01/2002 00.00	28.50		27.2826	79	39.3432	22.7	27.6	47.58	28.32	79.998	36.7744	26.99981	41.08	31
1/01/2003 00.00	25.4		34.8	25.3	23.3	32.5	30	29.9	26.16	37.9	31.6	32.399999	38.4	50.399999
1/01/2004 00.00	36		32.62	35.5	30.3	25.2		27.4		29.6	18.1	23	27.9	40.299992
1/01/2005 00.00	27.6	18.5	27.3	32	30.6	55.12		25.5	25	30.7	24.2	32.699982	47	21.5

La Figura 27 presenta la interfaz de Hydraccess mostrando la carga de los registros pluviométricos de las estaciones meteorológicas y el polígono de la cuenca del río Cachi, configurada para ejecutar la interpolación espacial mediante Kriging.

Figura 27
Carga de datos en el software Hydraccess



Después de aplicar Kriging para interpolar espacialmente las precipitaciones, se procesó y limpió la serie histórica de 29 años (1996-2025) con el objetivo de realizar posteriormente un análisis estadístico.

D. Identificación de datos dudosos o atípicos

Se tuvieron en cuenta los datos que se excedieron de un límite definido sobre la profundidad máxima de lluvia esperada para detectar la existencia de outliers en la serie de precipitación. Estos valores se detectaron mediante la siguiente ecuación:

$$Y_L = \bar{Y} \pm K_n S_Y \dots\dots\dots (Ec. 20)$$

Del cual se tiene que: Y_L , viene a ser el límite del logaritmo del atípico más alto o más bajo, \bar{Y} y S_Y vienen a ser el promedio y la desviación estándar de los logaritmos y finalmente K_n representa al valor crítico según el tamaño de la muestra de datos n , para el presente proyecto este valor se tomó a partir de la siguiente tabla, donde el valor usado es de 2.549 para 29 años de registro de precipitaciones.

Tabla 5
Valores K_n para la prueba de datos atípicos

Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.7	80	2.94
15	2.247	29	2.549	43	2.71	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.76	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.65	55	2.804		

Nota. Extraído de Ven Te Chow (1994)

E. Selección de la mejor distribución de probabilidades

Mediante el software Hyfran Plus, se ajustaron las precipitaciones máximas en 24 horas a las siguientes distribuciones de probabilidad: Weibull, Log-Normal, Normal, Gamma y Log-Pearson III. El análisis de bondad de ajuste determinó que la mejor distribución que presentó el mejor ajuste, esta se seleccionara teniendo en cuenta quien supere la prueba de chi-cuadrado, por lo que se aceptó la hipótesis nula (H_0) con un nivel de significancia del 5%.

Con base en este resultado, los valores estimados mediante la distribución de Gumbel se adoptaron como precipitaciones máximas de diseño para los períodos de retorno de 2, 5, 10, y 50 años.

F. Construcción de hietogramas de diseño mediante bloques alternos

Para la construcción del hietograma de diseño se empleó el método de Dyck Peschke, el cual se fundamenta en el uso de las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

Como primer paso, se determinaron las precipitaciones máximas (en mm) mediante la siguiente ecuación:

$$P_d = P_{P_{\max 24 hr}} \times 24 hr \times \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \dots\dots\dots (Ec. 21)$$

Donde las variables se definen de la siguiente manera:

Pd corresponde a la precipitación máxima para una duración específica; D es la duración de la precipitación, expresada en minutos; y Ppmax-24h representa la precipitación máxima de diseño en 24 horas.

De manera similar, para determinar la intensidad de la lluvia (mm/h) se empleó la siguiente expresión:

$$I = \frac{P_d \times 60}{D} \dots\dots\dots (\text{Ec. 22})$$

Donde las variables se definen de la siguiente manera: Pd es la precipitación máxima para una duración específica y D corresponde a la duración de la precipitación, expresada en minutos.

Tomando en cuenta una duración promedio de tormenta de 12 horas (720 minutos), se establecieron las lluvias máximas mediante el uso de ecuaciones aplicadas, lo cual es característico de eventos extremos en la región serrana. Luego, se desarrollaron los hietogramas de diseño y la curva intensidad-duración-frecuencia (IDF) para los períodos de retorno estudiados, utilizando el método de bloques alternos para su representación.

2.4.2 Distribución de lluvias mediante curvas de Huff

A. Metodología de obtención de tablas de coeficiente de duración adimensional

Para representar la distribución temporal de las precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del río Cachi, se adoptó la metodología propuesta en el proyecto “Caracterización de tormentas pluviométricas (TP) del Perú”. En dicho estudio, el autor analizó eventos de tormentas pluviométricas a escala nacional utilizando datos de 286 estaciones automáticas del SENAMHI, considerando variables como duración, estacionalidad, volumen total de lluvia, intensidades y ciclo diario.

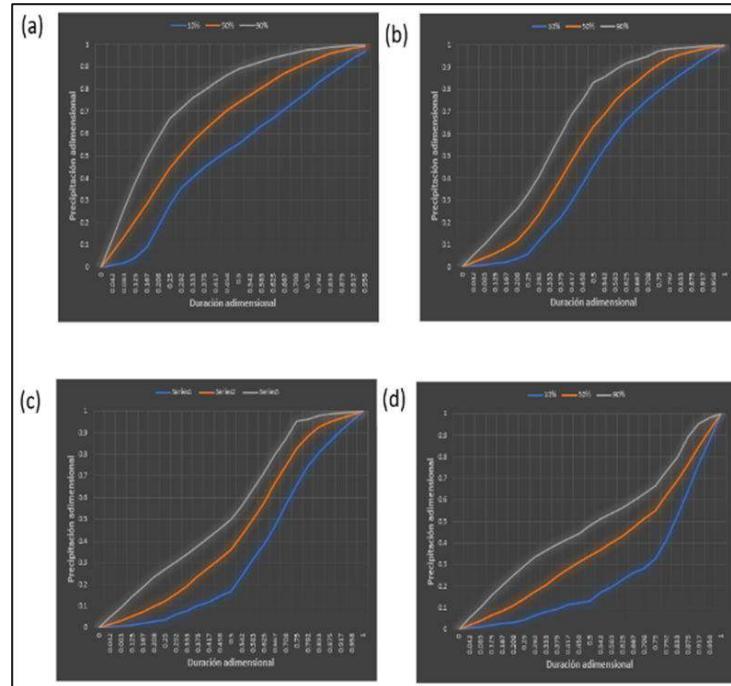
Para caracterizar el perfil temporal de las tormentas, se clasificaron los eventos según cuartiles y se aplicó la metodología de las curvas de Huff para describir el patrón temporal de la precipitación en cada evento. Los resultados indicaron que los eventos del segundo cuartil son los más predominantes en gran parte del territorio nacional.

A partir de este análisis, el autor definió perfiles de tormenta (curvas de Huff) para 27 regiones del país, basándose en las precipitaciones máximas en 24 horas registradas en las estaciones del SENAMHI. Esta regionalización permitió adaptar la metodología

a las condiciones específicas de la cuenca Cachi, asegurando una representación temporal más realista de los eventos extremos.

Figura 28

Curvas de Huff para diferentes cuartiles



Nota. Extraído de Quijada (2020)

B. Construcción de hietogramas de diseño con curvas de Huff

Se emplearon las tablas de coeficientes adimensionales de duración de las curvas de Huff, que fueron creadas para 27 regiones a nivel nacional. Para la cuenca Cachi, se utilizaron los valores de las tablas de coeficientes adimensionales de las curvas Huff que pertenecen a la región A12 y fueron creados por Quijada en 2020. Se considera el segundo cuartil, ya que es el patrón temporal más común durante los eventos de tormentas pluviales en el país.

Se elaboraron hietogramas para los diferentes escenarios de precipitación estudiados, utilizando estos coeficientes para representar la distribución temporal de la lluvia.

Tabla 6

Coefficientes de duración adimensional de curvas de Huff

REGION A12												
Duración	Cuartil I			Cuartil II			Cuartil III			Cuartil IV		
(%)	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.042	0.007	0.075	0.14	0.004	0.021	0.056	0.005	0.017	0.044	0.004	0.017	0.045
0.083	0.018	0.15	0.272	0.008	0.043	0.112	0.009	0.033	0.089	0.008	0.034	0.091
0.125	0.042	0.226	0.405	0.012	0.066	0.167	0.014	0.05	0.133	0.012	0.051	0.135
0.167	0.091	0.305	0.51	0.02	0.091	0.22	0.019	0.069	0.179	0.017	0.068	0.17
0.208	0.184	0.377	0.611	0.036	0.124	0.278	0.03	0.093	0.222	0.029	0.085	0.196
0.25	0.277	0.455	0.681	0.055	0.17	0.339	0.038	0.118	0.267	0.034	0.107	0.222
0.292	0.359	0.52	0.717	0.121	0.24	0.427	0.07	0.158	0.305	0.056	0.152	0.241
0.333	0.407	0.58	0.77	0.186	0.324	0.52	0.095	0.192	0.345	0.059	0.175	0.261
0.375	0.448	0.627	0.803	0.245	0.417	0.625	0.114	0.231	0.389	0.06	0.2	0.303
0.417	0.483	0.67	0.842	0.304	0.51	0.713	0.137	0.278	0.435	0.089	0.229	0.338
0.458	0.521	0.715	0.875	0.388	0.585	0.797	0.156	0.315	0.475	0.11	0.248	0.376
0.5	0.55	0.75	0.909	0.469	0.667	0.866	0.182	0.355	0.509	0.125	0.286	0.455
0.542	0.587	0.785	0.921	0.541	0.728	0.889	0.265	0.426	0.572	0.129	0.33	0.47
0.583	0.618	0.812	0.935	0.601	0.787	0.919	0.339	0.5	0.656	0.156	0.356	0.485
0.625	0.667	0.842	0.948	0.652	0.828	0.936	0.43	0.583	0.734	0.163	0.382	0.5
0.667	0.709	0.875	0.961	0.704	0.86	0.948	0.481	0.667	0.812	0.17	0.407	0.524
0.708	0.74	0.899	0.969	0.748	0.894	0.962	0.588	0.761	0.887	0.186	0.426	0.569
0.75	0.781	0.924	0.979	0.792	0.923	0.979	0.67	0.839	0.954	0.192	0.486	0.611
0.792	0.829	0.948	0.986	0.842	0.947	0.985	0.759	0.883	0.962	0.32	0.537	0.681
0.833	0.873	0.968	0.991	0.881	0.961	0.99	0.817	0.933	0.979	0.456	0.613	0.746
0.875	0.916	0.979	0.994	0.912	0.974	0.993	0.872	0.952	0.985	0.592	0.708	0.867
0.917	0.944	0.987	0.996	0.941	0.983	0.996	0.915	0.968	0.99	0.728	0.807	0.911
0.958	0.972	0.994	0.998	0.971	0.991	0.998	0.957	0.984	0.995	0.864	0.903	0.965
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Extraído de Quijada (2020)

2.4.3 Modelación hidrológica HEC-HMS

A. Características del modelo hidrológico

El modelo HEC-HMS requiere varios componentes para iniciar la simulación hidrológica: el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico, las especificaciones de control y los datos de entrada. Durante la simulación, el programa realiza la transformación de lluvia en caudal para la cuenca de estudio.

Por ello, los datos de entrada, como el tiempo de simulación y las tablas de parámetros hidrológicos, son fundamentales para la correcta configuración del modelo de la cuenca.

Para la cuenca del río Cachi, la estructura del modelo está conformada por los siguientes elementos hidrológicos:

- Subcuencas (Subbasins)
- Tramos de río (Routing Reaches)
- Uniones (Junctions)
- Sumidero o punto de salida del sistema (Sink)

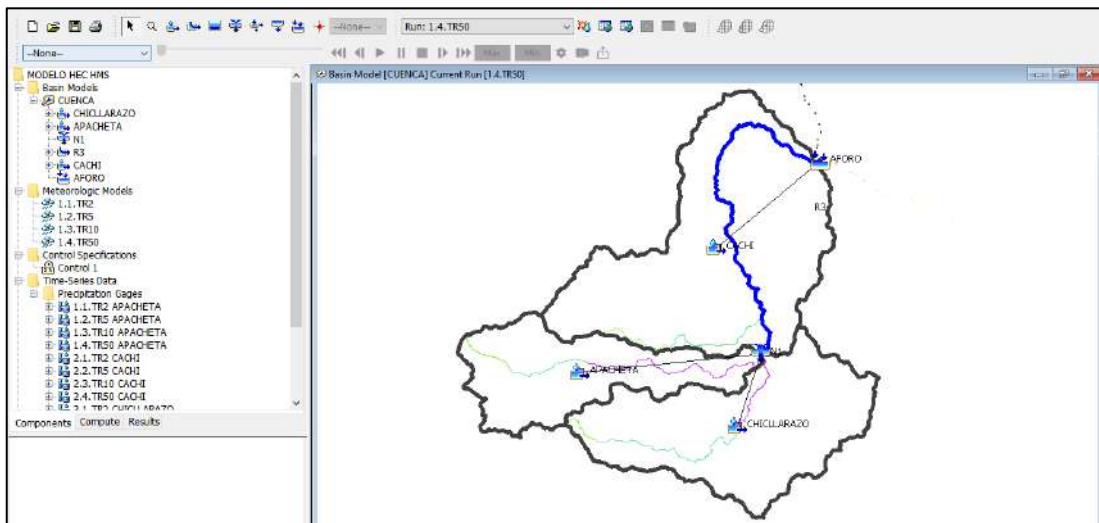
B. Selección de métodos

Para las pérdidas, se empleó el proceso Loss Method utilizando el método SCS Curve Number (Soil Conservation Service), con el cual se estimó la infiltración y el exceso de lluvia (escorrentía directa) a partir de la precipitación. Este método incorpora variables como el tipo de suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad antecedente de cada subcuenca.

Asimismo, se aplicó el proceso Transform Method mediante el SCS Unit Hydrograph, que permite transformar la lluvia efectiva (exceso de lluvia) en caudales dentro de un intervalo determinado, representados posteriormente en un hidrograma.

Estos métodos requieren parámetros definidos de manera indirecta, como el tiempo de concentración, necesario para estimar el tiempo de retraso (lag time) en la respuesta hidrológica.

Figura 29
Esquematización del modelo HEC-HMS



Para aplicar el método SCS del Número de Curva (CN) en cada subcuenca, se obtuvieron los valores de CN a partir de una base de datos geoespacial disponible en formato Shapefile en el portal GeoGPS Perú (<https://www.geogpsperu.com/2019/04/numero-de-curva-descargar-mapa.html>). Este recurso, elaborado por el SENAMHI, contiene la distribución espacial del CN a nivel nacional.

En el mapa siguiente se muestra la ubicación de la cuenca Cachi dentro de dicha clasificación, mientras que en la Tabla 7 se presentan los datos de CN considerados para cada una de las subcuencas de estudio.

Figura 30
Mapa del número curva para la cuenca del río Cachi

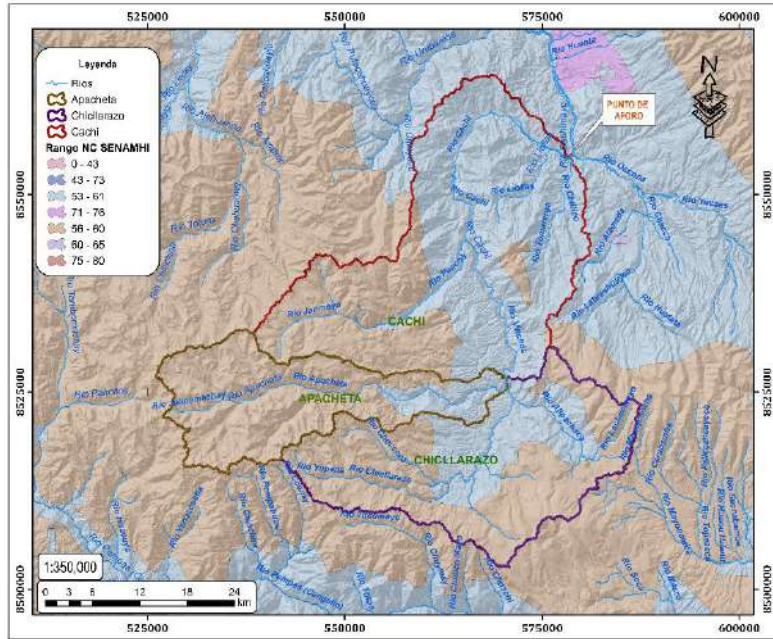


Tabla 7
Parámetros de las subcuencas del río Cachi para el modelo HEC HMS

Subcuenca	NC	L (km)	J (m/m)	Tc (min)	Tlag (min)	Tlag (hr)
Chicllarazo	62.35	53.10	0.037	255.60	86.8	1.45
Apacheta	62.55	58.70	0.040	264.00	83.1	1.39
Cachi	60.95	89.37	0.030	402.00	114	1.14

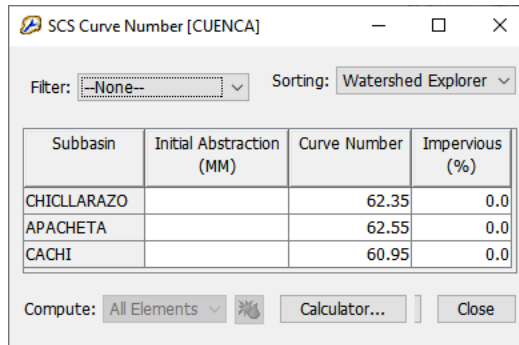
Las características de las subcuencas se determinaron mediante el modelo HEC HMS, a partir del cual se obtuvieron los parámetros que se muestra en la Figura 31.

Figura 31
Características morfométricas de las subcuencas del río Cachi

Subbasin	Longest Flowpath Length (KM)	Longest Flowpath Slope (M/M)	Centroidal Flowpath Length (KM)	Centroidal Flowpath Slope (M/M)	10-85 Flowpath Length (KM)	10-85 Flowpath Slope (M/M)	Basin Slope (M/M)	Basin Relief (M)	Relief Ratio	Elongation Ratio	Drainage Density (KM/KM ²)
CHICLLARAZO	53.09628	0.03047	15.44456	0.01360	39.82221	0.02466	0.24961	1635.00000	0.03079	0.52587	0.02972
APACHETA	58.69622	0.02832	34.77200	0.01901	44.02216	0.02247	0.34112	1822.00000	0.03104	0.38347	0.08178
CACHI	89.37441	0.02448	39.19445	0.01380	67.03081	0.02090	0.34941	2477.00000	0.02771	0.38150	0.07091

Para calcular las pérdidas, se utilizó el método del Número de Curva (CN) del SCS, que está integrado en el modelo HEC-HMS. Como se ilustra en la Figura 32, este método necesita los valores de la curva número para cada subcuenca.

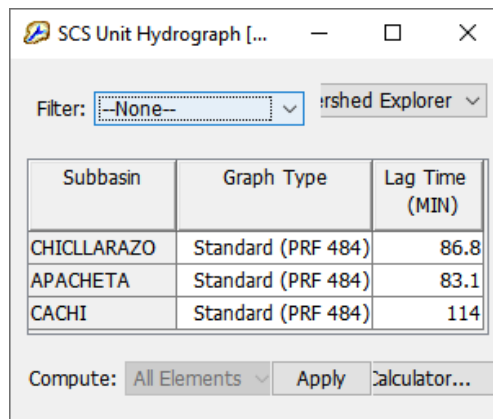
Figura 32
Parámetros del método de perdidas por SCS CN



El hidrograma unitario, que es un método que se incluye por defecto en el modelo HEC-HMS, fue el método usado para convertir la lluvia en escorrentía directa. Los valores tenidos en cuenta se presentan en la Figura 33.

Figura 33

Parámetros para el método de transformación de lluvia en escorrentía del SCS hidrograma unitario



Para la propagación de caudales en ríos se empleó el método de Muskingum, un modelo hidrológico basado en el almacenamiento y tránsito de flujos en canales, ampliamente utilizado para la simulación de hidrogramas de salida a partir de hidrogramas de entrada en tramos fluviales, los cuales se presentan en la Figura 34 y Figura 35.

Figura 34

Características del río Cachi

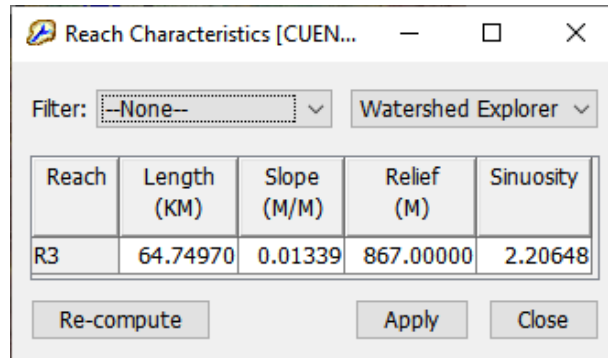
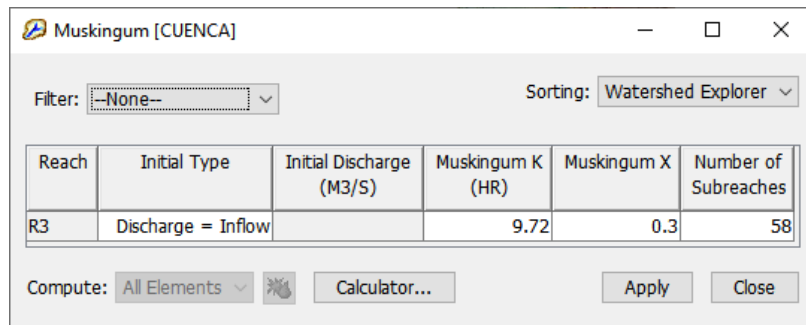


Figura 35
Parámetros del método de Muskingum para el río Cachi



C. Modelamiento hidrológico HEC-HMS

Se recurrió a lluvias de diseño para diversos períodos de retorno y se aplicaron las técnicas Dyck Peschke (bloques alternos) y curvas de Huff (región A12, segundo cuartil) para discretizarlas en términos temporales, con el fin de modelar hidrológicamente la cuenca Cachi.

D. Aforo de caudal del río Cachi

Se realizó un aforo in situ en el punto de salida de la cuenca del río Cachi mediante el uso de un correntómetro, aplicando el método área-velocidad. Este procedimiento consistió en medir la velocidad del flujo en diferentes puntos a lo largo de una sección transversal del cauce principal, así como en determinar el área hidráulica mediante el levantamiento de perfiles en tramos de corta longitud a lo ancho del encauzamiento. Los datos obtenidos permitieron calcular el caudal a partir de la ecuación de continuidad.

Capítulo III

3. Resultados y discusiones

3.1. Del primer objetivo específico: Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke

3.1.1 *Resultado de las características morfométricas de las cuencas*

En la Tabla 8 se determinaron las características morfométricas (factor de forma, parámetros de relieve y parámetros de la red hidrográfica) de las subcuencas consideradas en la cuenca del río Cachi mediante el procesamiento de un Modelo Digital de Elevación (DEM) en el ArcMap.

La cuenca del río Cachi está conformada por las subcuencas Apacheta, Chicllarazo y Cachi, las cuales presentan diferencias importantes en sus características fisiográficas, morfológicas y de drenaje que influyen directamente en el comportamiento hidrológico.

En términos de extensión, la subcuenca Cachi es la de mayor área con 1266.58 km², seguida por Chicllarazo con 612.31 km² y Apacheta con 398.73 km², lo que indica que Cachi tiene mayor capacidad potencial para generar escorrentía superficial. Asimismo, el perímetro de las subcuencas muestra una mayor extensión en Cachi (246.58 km), evidenciando una cuenca más extensa y compleja.

Respecto a los parámetros de forma, los valores del coeficiente de compacidad de Gravelius (2.48 para Apacheta, 1.94 para Cachi y 2.14 para Chicllarazo) indican que las tres subcuencas presentan formas alargadas e irregulares, alejadas de una forma circular. Esto se confirma con los valores bajos del radio de circularidad (0.16, 0.26 y 0.22 respectivamente) y del factor de forma, especialmente en la subcuenca Cachi (0.05). Estas características sugieren que las cuencas tienden a distribuir el escurrimiento en el tiempo, reduciendo la probabilidad de crecidas súbitas.

Tabla 8

Parámetros morfométricos de las subcuencas

Subcuencas de la cuenca del río Cachi							
Parámetros		Unidad	Apacheta	Cachi	Chicllarazo		
Área de la cuenca		Km²	398.73	1266.58	612.31		
Perímetro		Km	175.70	246.58	188.80		
Parámetros de forma	Factor De Cuenca	Coefficiente de Compacidad (Gravelius)	-	2.48	1.94	2.14	
		Factor De Forma	Longitud (// al curso más largo)	Km	25.61	156.11	69.44
			Ancho Medio	Km	15.54	8.11	8.82
			Radio de Circularidad	Coef.	0.16	0.26	0.22
			Factor de Forma	Coef.	0.61	0.05	0.13
			Relación de elongación	Coef.	0.88	0.26	0.40
			Coefficiente de redondez	Coef.	1.29	15.11	6.19
			Rectángulo Equivalente	Lado Mayor	Km	83.06	111.98	87.39
	Lado Menor	Km		4.79	11.31	7.01	
	Longitud total de los ríos de diferentes grados	Orden 1	Km	76.76	250.33	106.54	
		Orden 2	Km	7.84	50.32	33.79	
		Orden 3	Km	43.32	23.29	3.31	
		Orden 4	Km	-	20.62	-	
	Parámetros de relieve	Curva Hipsométrica	-	-	-	-	
Polígono de Frecuencia		-	-	-	-		
Altitud Máxima de la Cuenca		m.s.n.m.	5182.00	4492.00	4947.00		
Altitud Mínima de la Cuenca		m.s.n.m.	3312.00	2445.00	3312.00		
Desnivel total de la Cuenca		Km	1.87	2.05	1.64		
Altitud de Frecuencia Media		m.s.n.m.	4445.86	3598.62	4097.06		
Altitud Media de la Cuenca		m.s.n.m.	4396.64	3511.09	4006.03		
Altura más frecuente		m.s.n.m.	4714.50	4184.50	3720.50		
Pendiente de la cuenca		%	17.34	9.90	12.47		
Pendiente de la cuenca (Reporte GIS)	m/m	0.18	0.16	0.14			
Parámetros de la red hidrográfica	Tipo de corriente	-	Perenne	Perenne	Perenne		
	Densidad de drenaje	Km/Km²	0.32	0.27	0.23		
	Pendiente media del río principal	m/m	0.04	0.03	0.04		
	Altitud Mínima del cauce	m.s.n.m.	3312.00	2445.00	3312.00		
	Tiempo de concentración	hrs.	2.50	9.95	5.13		
	Grado de ramificación	-	3.00	4.00	3.00		

En la Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se muestran las curvas hipsométricas y los polígonos de frecuencia del cual se clasificaron las subcuencas en tres tipos: A (jóvenes y erosionables: al cual pertenece la subcuenca Apacheta), B (en equilibrio: conformada por las subcuencas Chicllarazo y Cachi).

Figura 36

Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Apacheta

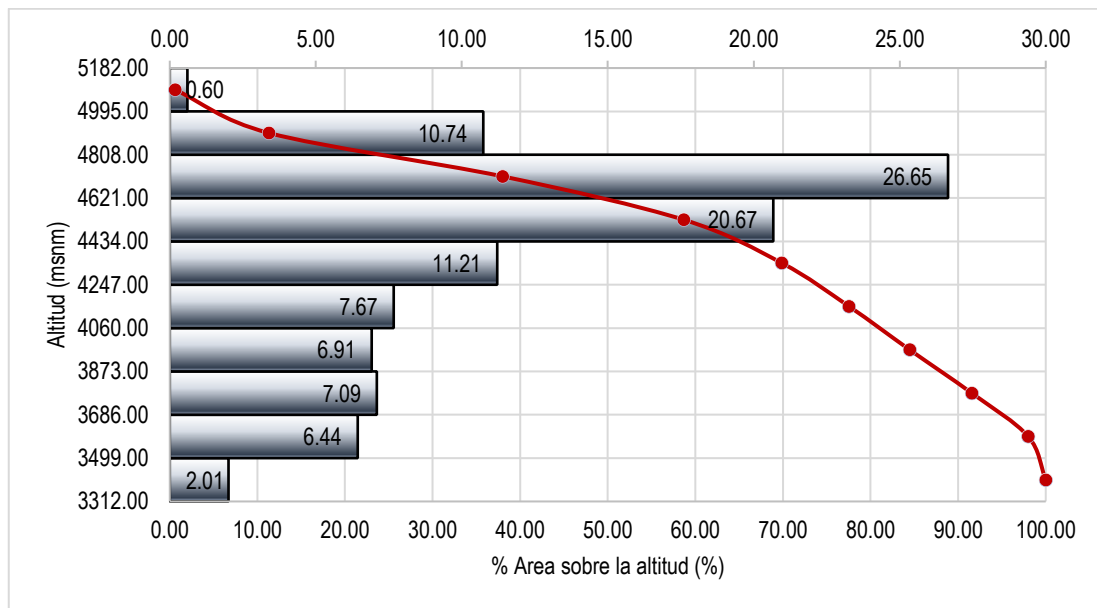


Figura 37

Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Chicllarazo

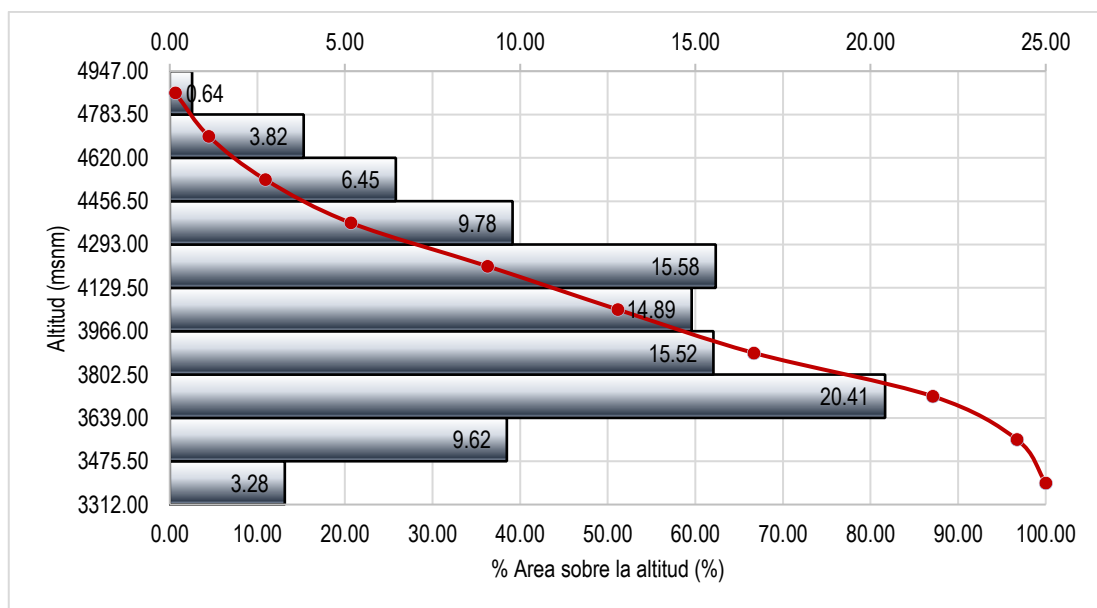
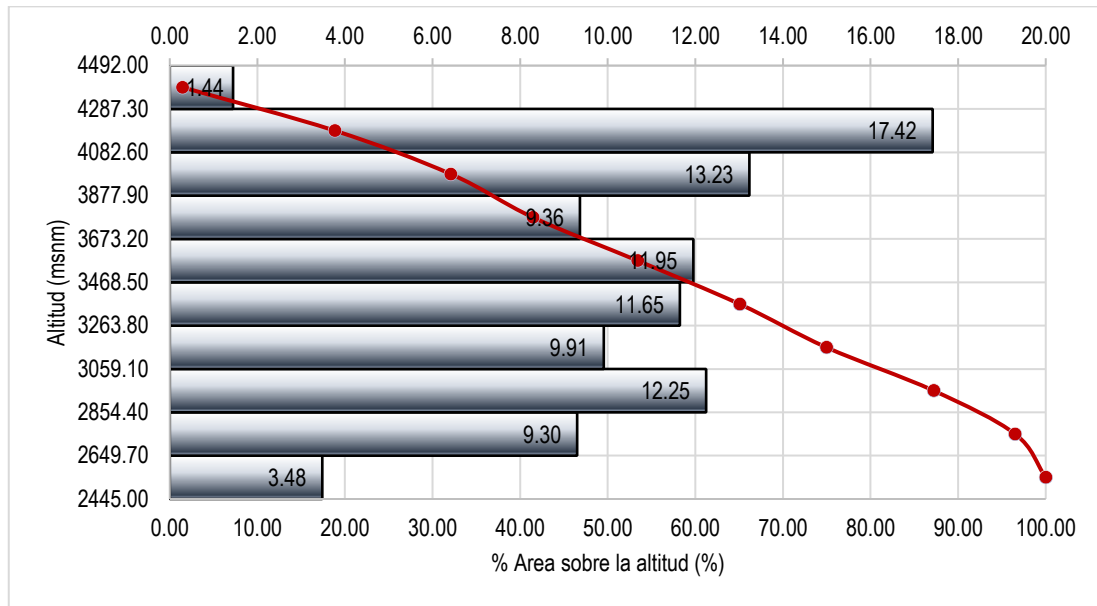


Figura 38

Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Cachi



3.1.2 Discusión de los parámetros morfológicos obtenidos

La discusión de los resultados muestra que las subcuencas Apacheta, Cachi y Chicllarazo presentan diferencias morfométricas que influyen en su comportamiento hidrológico. La subcuenca Cachi, al poseer la mayor área y longitud, presenta un tiempo de concentración más alto, lo que indica una respuesta más lenta ante eventos de precipitación.

En contraste, Apacheta, con menor extensión, pero mayor pendiente y mayor densidad de drenaje, muestra un tiempo de concentración menor, lo que favorece una respuesta hidrológica más rápida y mayor potencial de escorrentía. Por su parte, Chicllarazo presenta valores intermedios en la mayoría de los parámetros. Asimismo, los coeficientes de forma y circularidad evidencian que las tres subcuencas tienen formas alargadas, lo que tiende a distribuir el flujo en el tiempo y disminuir la posibilidad de crecidas repentinas.

En cuanto al relieve, las diferencias altitudinales y pendientes reflejan una topografía montañosa característica de zonas altoandinas, la cual condiciona el desarrollo de la red de drenaje y el comportamiento del escurrimiento superficial. En conjunto, estos parámetros evidencian que la dinámica hidrológica de cada subcuenca depende principalmente de su tamaño, forma, pendiente y densidad de drenaje.

3.1.3 Resultado de la data de precipitaciones máximas en 24 horas

Se recopiló información histórica de precipitaciones máximas en 24 horas proveniente de estaciones meteorológicas locales operados por la OPEMAN. La base de datos abarca un registro de 29 años (1996–2025) y constituye la fuente fundamental para el análisis estadístico de extremos requerido en la determinación de las lluvias de diseño.

Para la presente investigación determinó la precipitación máxima en 24 horas a partir de los registros históricos de cada estación meteorológica. La estimación espacial se realizó mediante el método de interpolación Kriging, implementado con el software Hydraccess.

Considerando las estaciones incluidas y la delimitación de la cuenca Cachi, se generó la distribución espacial de la precipitación máxima de 24 horas en toda el área de estudio, cuyos resultados se presentan a continuación.

Tabla 9

Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Apacheta

Año	Apacheta	Pp max 24hr
2005	33.98	33.98
2006	18.00	18.00
2007	28.18	28.18
2008	20.22	20.22
2009	32.70	32.70
2010	27.90	27.90
2011	36.20	36.20
2012	42.30	42.30
2013	35.90	35.90
2014	38.50	38.50
2015	30.70	30.70
2016	31.60	31.60
2017	45.00	45.00
2018	40.20	40.20
2019	24.58	24.58
2020	24.42	24.42
2021	25.98	25.98
2022	24.59	24.59
2023	23.93	23.93
2024	29.87	29.87
2025	31.89	31.89

Tabla 10*Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Chicllarazo*

Año	Allpachaca	Choccoro	Cuchoquesera	Apacheta	Pp max 24hr
1996	38.10		35.20	35.20	36.10
1997	28.30		28.40	28.40	28.40
1998	35.20		27.00	27.00	29.50
1999	21.10		42.60	42.60	35.90
2000	41.90	47.45	43.94	43.94	44.80
2001	28.50	44.20	37.86	37.86	37.80
2002	28.50	79.00	39.34	39.34	33.82
2003	25.40	25.30	23.30	23.30	24.70
2004	36.00	35.50	30.30	30.30	34.00
2005	27.60	32.00	30.60	30.60	30.30
2006	28.20	31.70	36.00	36.00	32.10
2007	43.50	35.80	25.20	25.20	34.60
2008	28.90	52.01	26.20	26.20	37.40
2009	28.00	29.70	21.80	21.80	26.70
2010	37.40	30.40	28.40	28.40	31.70
2011	41.30	32.80	34.00	34.00	35.60
2012	45.20	49.90	40.30	40.30	45.60
2013	27.20	25.00	55.60	55.60	35.20
2014	28.00	41.70	28.00	28.00	33.60
2015	27.00	32.80	42.00	42.00	34.10
2016	23.00	46.00	28.40	28.40	34.00
2017	31.20	41.90	43.40	43.40	39.40
2018	20.70	38.00	26.00	26.00	29.40
2019	27.28	36.48	27.97	27.97	31.20
2020	23.26	38.68	26.98	26.98	30.70
2021	25.17	28.21	26.02	26.02	26.70
2022	32.23	39.71	30.06	30.06	34.60
2023	24.57	30.35	31.14	31.14	29.00
2024	30.19	39.55	28.42	28.42	33.40
2025	25.40	24.14	28.39	28.39	25.80

Tabla 11*Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Cachi*

Año	Apacheta	Pucaloma	Chiara	Inia	Allpachaca	Wayllapampa	Pp max 24hr
1996		31.30	27.90	29.00	38.10	19.10	30.30
1997		56.30	23.70	23.20	28.30	25.40	52.00
1998		29.80	23.90	27.30	35.20	22.40	31.50
1999		26.60	24.40	24.80	21.10	26.20	30.00
2000		76.86	19.11	35.20	41.90	34.20	59.00
2001		30.49	37.96	24.69	28.50	23.20	33.50
2002		28.32	27.28	27.60	28.50	31.00	42.90
2003		34.46	34.80	30.00	25.40	50.40	33.10
2004		20.99	32.62	21.77	36.00	40.30	27.90
2005	33.98	33.66	27.30	37.12	27.60	21.50	35.50
2006	18.00	69.50	26.00	22.59	28.20	32.30	45.80
2007	28.18	19.10	22.00	20.60	43.50	26.99	24.70
2008	20.22	25.40	18.40	31.50	28.90	23.00	26.40
2009	32.70	19.10	24.00	29.60	28.00	29.00	25.50
2010	27.90	41.00	28.10	24.50	37.40	18.70	32.50
2011	36.20	35.93	40.00	46.70	41.30	32.30	32.80
2012	42.30	23.20	25.00	24.70	45.20	27.60	30.70
2013	35.90	20.30	24.00	23.60	27.20	37.70	27.80
2014	38.50	75.00	71.50	23.10	28.00	34.40	53.40
2015	30.70	42.20	22.00	29.20	27.00	33.35	37.30
2016	31.60	30.30	20.00	28.80	23.00	33.10	31.90
2017	45.00	26.20	23.00	28.40	31.20	23.80	32.00
2018	40.20	36.51	22.00	20.92	20.70	25.80	36.20
2019	24.58	29.96	21.87	31.03	27.28	21.90	28.30
2020	24.42	45.45	22.82	21.81	23.26	22.91	36.20
2021	25.98	21.67	20.59	24.53	25.17	22.70	24.00
2022	24.59	26.03	24.39	21.74	32.23	28.94	28.00
2023	23.93	35.32	21.84	22.50	24.57	28.80	31.10
2024	29.87	35.11	24.99	22.78	30.19	21.12	33.30
2025	31.89	24.68	21.95	23.88	25.40	25.12	26.90

3.1.4 Discusión del método Kriging

Se elaboró la gráfica de variación histórica anual de las precipitaciones máximas registradas en cada estación meteorológica. El análisis conjunto de estas series, junto con los resultados de la interpolación Kriging, evidenció que los valores estimados mediante este método presentan un mejor ajuste espacial y representan de manera más precisa los valores máximos en la cuenca Cachi.

Por esta razón, se adoptaron dichos valores como precipitaciones máximas representativas en 24 horas, utilizándose posteriormente en el estudio hidrológico y en la generación de hietogramas de diseño.

3.1.5 Resultado de la identificación de datos atípicos

Se compararon los límites superior e inferior de las precipitaciones máximas calculadas mediante Kriging para comprobar la validez de los valores interpolados, con el fin de determinar su capacidad para representar correctamente las condiciones de la cuenca y su coherencia en términos espaciales.

Tabla 12

Evaluación de observaciones atípicas subcuenca Chicllarazo

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	36.10	1996	3.59	Verificado
2	28.40	1997	3.35	Verificado
3	29.50	1998	3.38	Verificado
4	35.90	1999	3.58	Verificado
5	44.80	2000	3.80	Verificado
6	37.80	2001	3.63	Verificado
7	33.82	2002	3.52	Verificado
8	24.70	2003	3.21	Verificado
9	34.00	2004	3.53	Verificado
10	30.30	2005	3.41	Verificado
11	32.10	2006	3.47	Verificado
12	34.60	2007	3.54	Verificado
13	37.40	2008	3.62	Verificado
14	26.70	2009	3.28	Verificado
15	31.70	2010	3.46	Verificado
16	35.60	2011	3.57	Verificado
17	45.60	2012	3.82	Verificado
18	35.20	2013	3.56	Verificado
19	33.60	2014	3.51	Verificado
20	34.10	2015	3.53	Verificado
21	34.00	2016	3.53	Verificado
22	39.40	2017	3.67	Verificado
23	29.40	2018	3.38	Verificado
24	31.20	2019	3.44	Verificado
25	30.70	2020	3.42	Verificado
26	26.70	2021	3.28	Verificado
27	34.60	2022	3.54	Verificado

28	29.00	2023	3.37	Verificado
29	33.40	2024	3.51	Verificado
30	25.80	2025	3.25	Verificado
Promedio	33.20	Media Ln	3.49	
Desv. Est	4.91	Desvió Ln	0.15	
		Kn	2.563	
		Lim Superior	3.865	
		Lim Inferior	3.119	

Figura 39

Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Chicllarazo

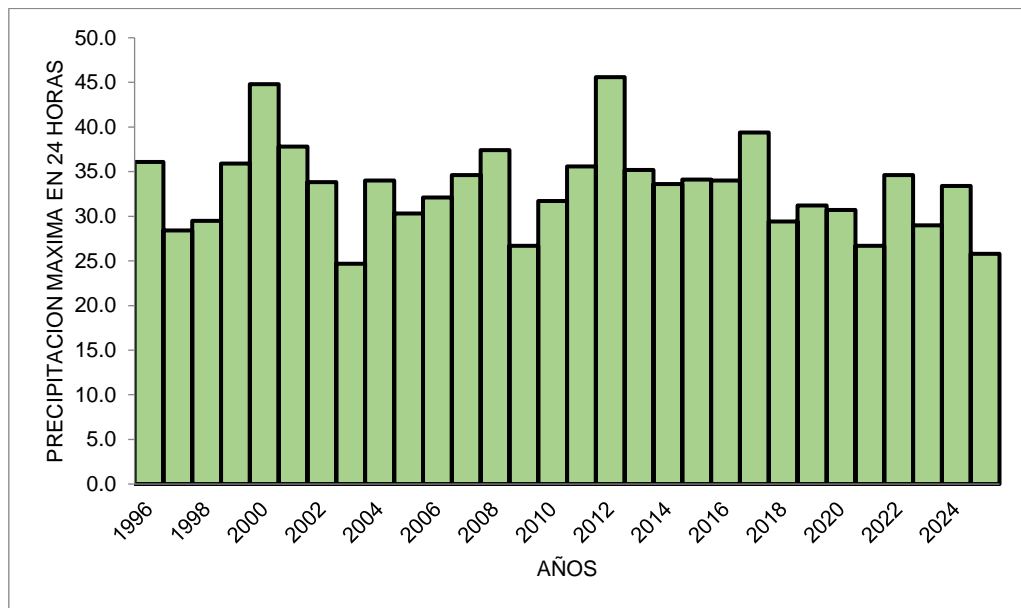


Tabla 13

Evaluación de observaciones atípicas subcuena Apacheta

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	33.98	2005	3.53	Verificado
2	18.00	2006	2.89	Verificado
3	28.18	2007	3.34	Verificado
4	20.22	2008	3.01	Verificado
5	32.70	2009	3.49	Verificado
6	27.90	2010	3.33	Verificado
7	36.20	2011	3.59	Verificado
8	42.30	2012	3.74	Verificado
9	35.90	2013	3.58	Verificado
10	38.50	2014	3.65	Verificado
11	30.70	2015	3.42	Verificado

12	31.60	2016	3.45	Verificado
13	45.00	2017	3.81	Verificado
14	40.20	2018	3.69	Verificado
15	24.58	2019	3.20	Verificado
16	24.42	2020	3.20	Verificado
17	25.98	2021	3.26	Verificado
18	24.59	2022	3.20	Verificado
19	23.93	2023	3.18	Verificado
20	29.87	2024	3.40	Verificado
21	31.89	2025	3.46	Verificado
Promedio	30.79	Media Ln	3.40	
Desv. Est	7.19	Desvió Ln	0.24	
		Kn	2.408	
		Lim Superior	3.977	
		Lim Inferior	2.824	

Figura 40

Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Apacheta

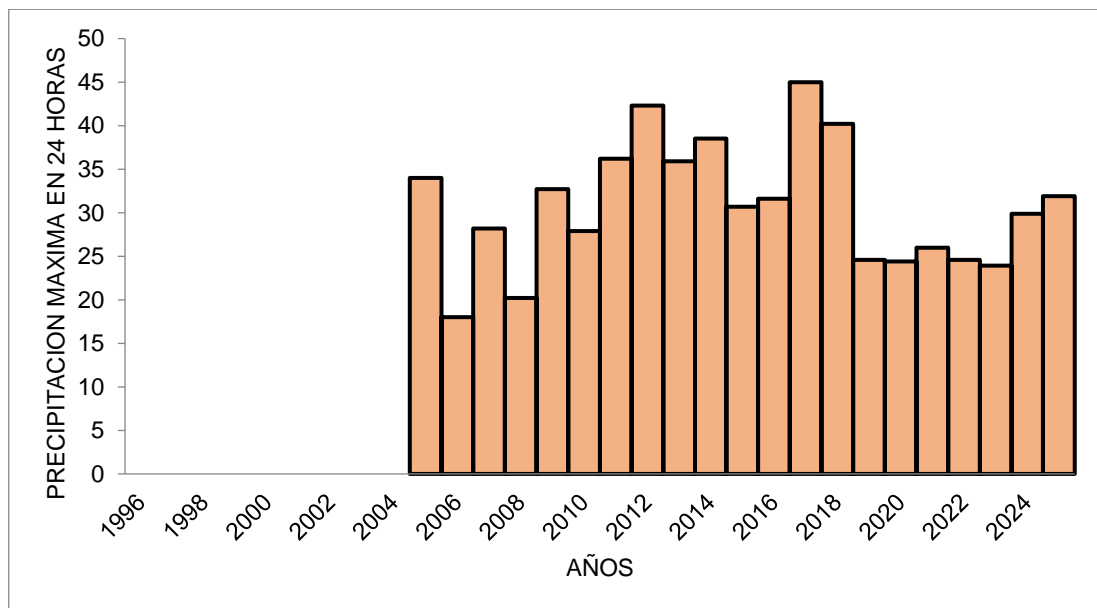


Tabla 14

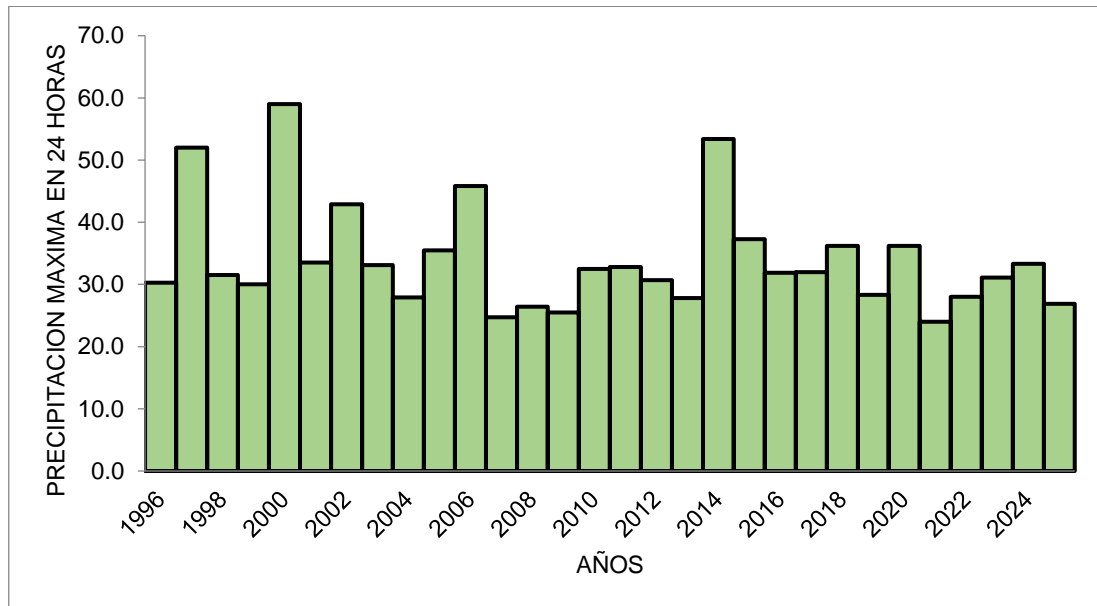
Evaluación de observaciones atípicas subcuena Cachi

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	30.30	1996	3.41	Verificado
2	52.00	1997	3.95	Verificado
3	31.50	1998	3.45	Verificado
4	30.00	1999	3.40	Verificado

5	59.00	2000	4.08	Verificado
6	33.50	2001	3.51	Verificado
7	42.90	2002	3.76	Verificado
8	33.10	2003	3.50	Verificado
9	27.90	2004	3.33	Verificado
10	35.50	2005	3.57	Verificado
11	45.80	2006	3.82	Verificado
12	24.70	2007	3.21	Verificado
13	26.40	2008	3.27	Verificado
14	25.50	2009	3.24	Verificado
15	32.50	2010	3.48	Verificado
16	32.80	2011	3.49	Verificado
17	30.70	2012	3.42	Verificado
18	27.80	2013	3.33	Verificado
19	53.40	2014	3.98	Verificado
20	37.30	2015	3.62	Verificado
21	31.90	2016	3.46	Verificado
22	32.00	2017	3.47	Verificado
23	36.20	2018	3.59	Verificado
24	28.30	2019	3.34	Verificado
25	36.20	2020	3.59	Verificado
26	24.00	2021	3.18	Verificado
27	28.00	2022	3.33	Verificado
28	31.10	2023	3.44	Verificado
29	33.30	2024	3.51	Verificado
30	26.90	2025	3.29	Verificado
Promedio	34.02	Media Ln	3.50	
Desv. Est	8.60	Desvió Ln	0.23	
		Kn	2.563	
		Lim Superior	4.078	
		Lim Inferior	2.923	

Figura 41

Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas Cachi



3.1.6 Discusión de los datos atípicos

Se llevó a cabo una verificación para encontrar posibles valores atípicos en la serie de precipitaciones máximas, y esta verificación corroboró que no había datos cuestionables, lo que validó la confiabilidad de los mismos.

3.1.7 Resultado de las pruebas de hipótesis

Las pruebas de hipótesis se realizaron mediante el software Hyfran Plus, el cual emplea tres métodos de análisis para las pruebas de los datos independientes, los cuales se describen a continuación:

A. Test de rachas de Wald – Wolfowitz

El resultado de la prueba estadística indica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, por lo que se asume que ambos grupos muestrales proceden de poblaciones con la misma distribución continua.

Figura 42

Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Chicllarazo

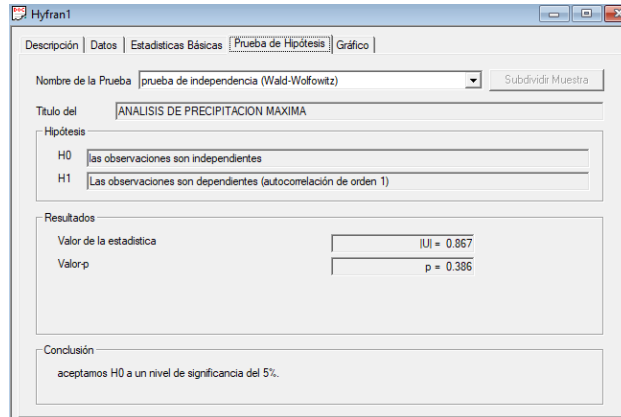


Figura 43

Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Apacheta

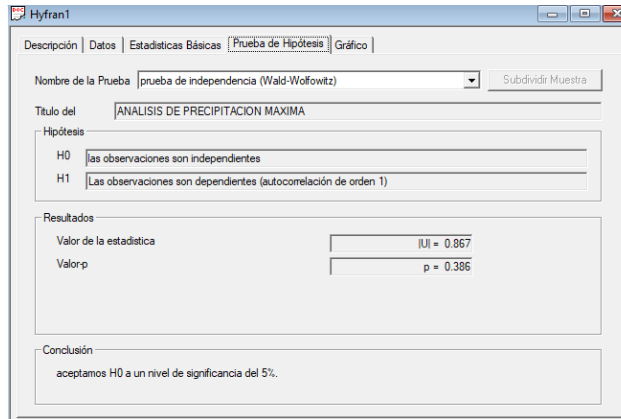
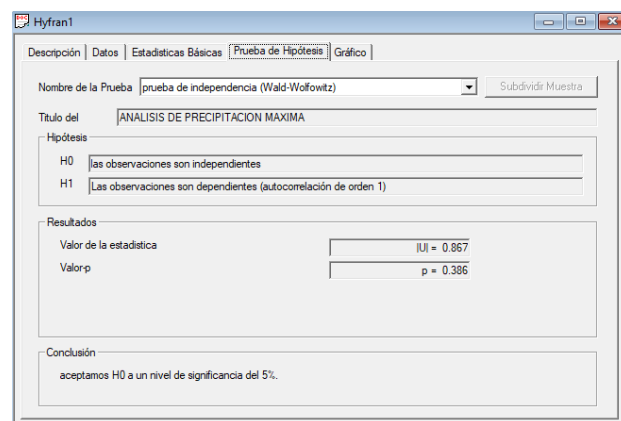


Figura 44

Test de racha de Wald – Wolfowitz para la subcuenca Cachi



B. Prueba de estacionalidad Kendal

El análisis de tendencias mediante la prueba de Mann–Kendall no detectó cambios significativos a lo largo de la serie temporal, validando la estabilidad del registro de observaciones utilizado en el estudio.

Figura 45

Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuena Chicllarazo

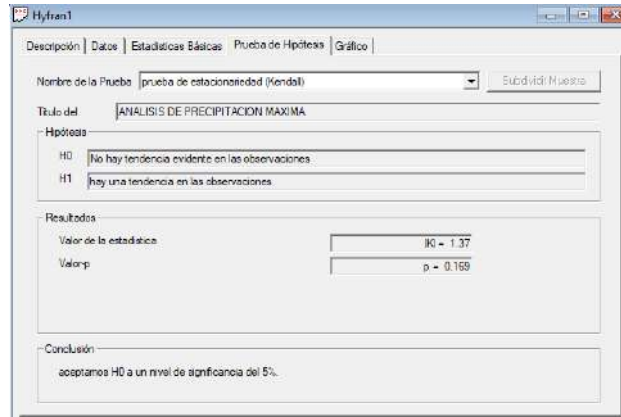


Figura 46

Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuena Apacheta

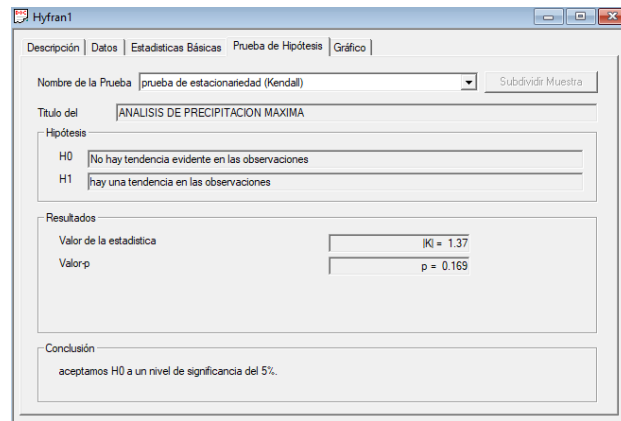
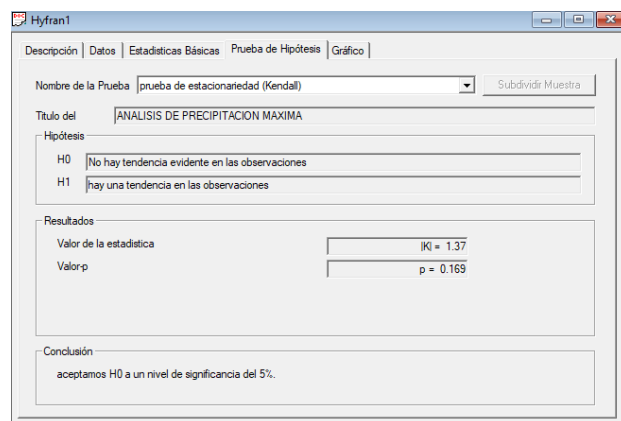


Figura 47

Prueba de estacionalidad del Kendal para la subcuena Cachi



C. Homogeneidad de prueba a escala anual Wilcoxon

La prueba estadística no encontró evidencia suficiente para afirmar que las medias de los dos grupos difieren, por lo que se asume que provienen de poblaciones con el mismo valor promedio.

Figura 48

Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Chicllarazo

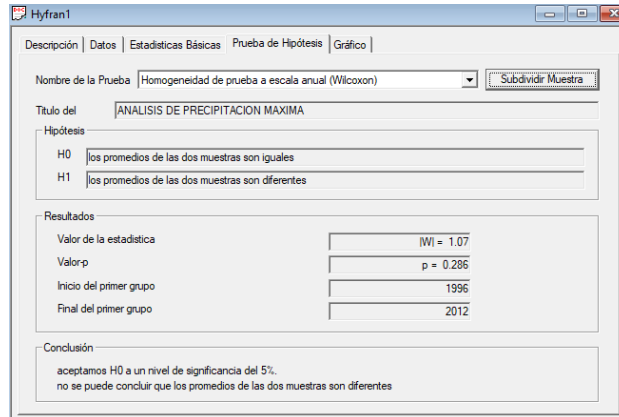


Figura 49

Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Apacheta

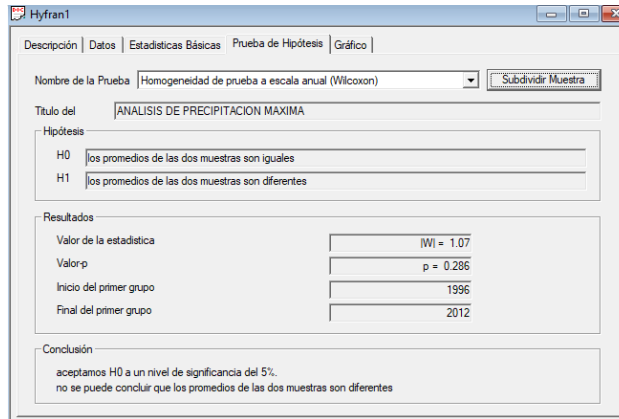
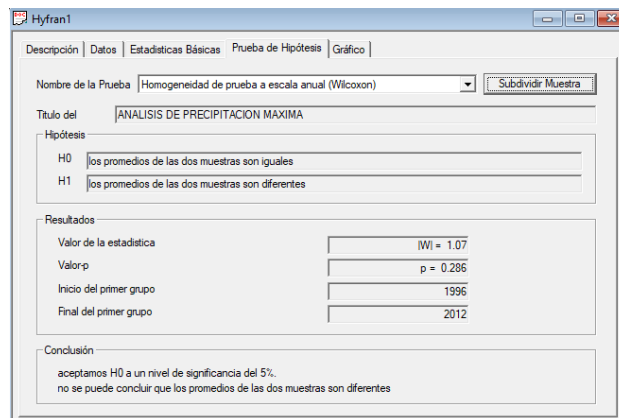


Figura 50

Prueba a escala anual del Wilcoxon para la subcuenca Cachi



3.1.8 *Discusión de pruebas de hipótesis*

Cada prueba estadística se estructura bajo un marco de hipótesis contrastadas: la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1), evaluadas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo que define el umbral para la aceptación o rechazo de H_0 .

3.1.9 *Resultado de las funciones de distribución de probabilidades*

Para evaluar el mejor ajuste a los datos, se consideraron las distribuciones de probabilidad más utilizadas en hidrología: Weibull, Lognormal, Normal, Gamma y Log-Pearson Tipo III.

A. *Distribución Weibull (máxima verosimilitud)*

La subcuenca Chicllarazo se benefició de la distribución Weibull. La prueba de chi-cuadrado ($p = 0.5358 > 0.05$) muestra que no hay pruebas estadísticamente significativas para negar la hipótesis nula, lo cual quiere decir que el modelo se acomoda bien a los datos observados.

Figura 51
Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

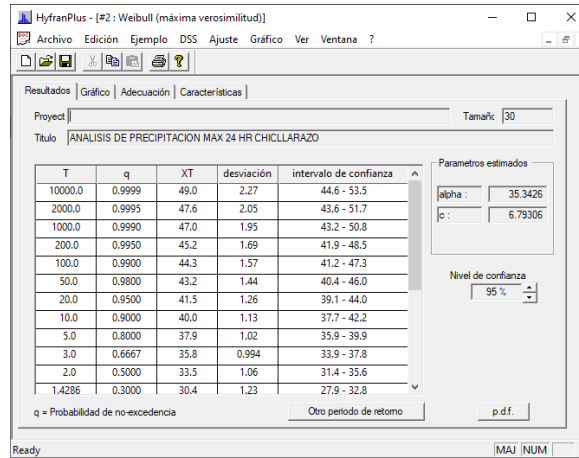


Figura 52
Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

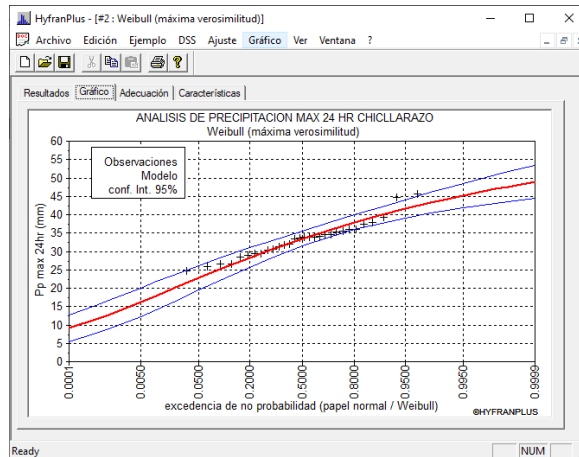
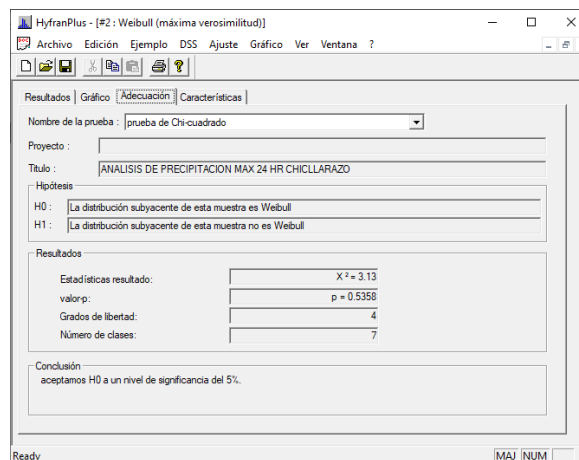


Figura 53
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo



La subcuenca Apacheta fue objeto de la aplicación de la distribución Weibull. La prueba de chi cuadrado ($p = 0.5433 > 0.05$) revela que no hay evidencia estadística relevante para descartar la hipótesis nula, lo cual demuestra que el modelo tiene un buen ajuste a los datos observados.

Figura 54

Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

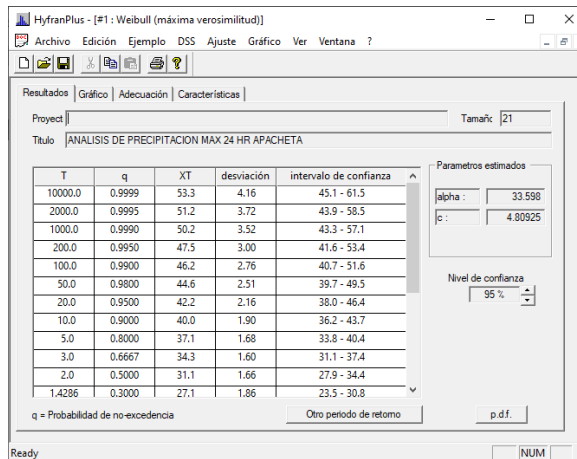


Figura 55

Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

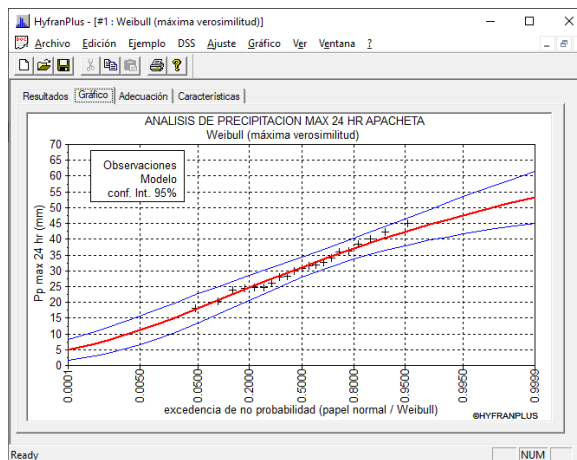
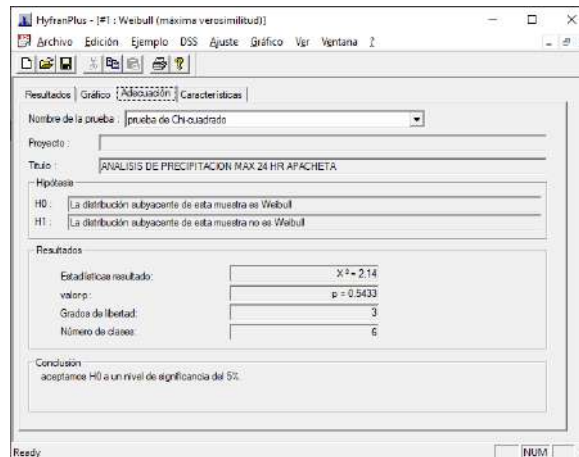


Figura 56

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta



La subcuenca Cachi fue sometida a la distribución de Weibull. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.0063 > 0.01$) muestran que no hay pruebas significativas desde el punto de vista estadístico para descartar la hipótesis nula, lo cual indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos observados.

Figura 57

Resultado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

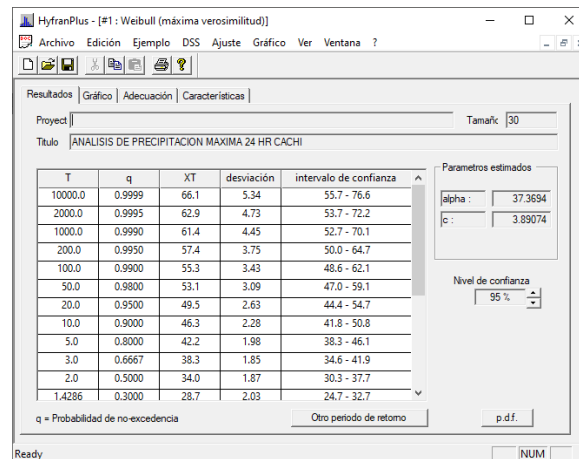


Figura 58

Curva de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

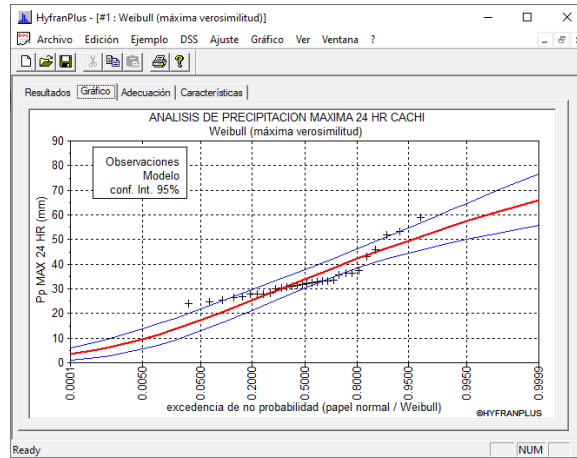
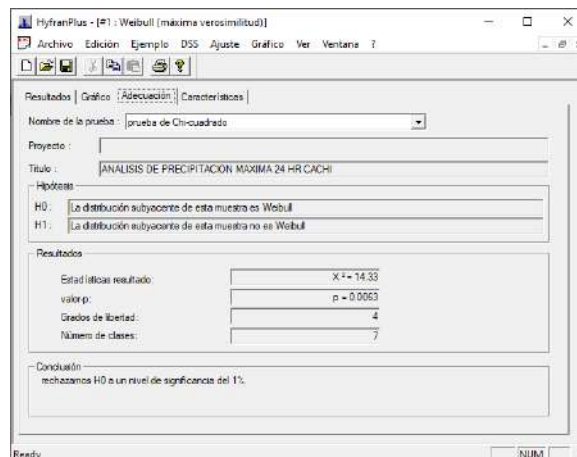


Figura 59

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Weibull (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi



B. Distribución Lognormal (máxima verosimilitud)

La subcuenca Chicllarazo se benefició de la distribución Weibull. La hipótesis nula no puede ser rechazada debido a que los resultados de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.3971 > 0.05$) no muestran evidencia estadísticamente significativa; por lo tanto, el modelo tiene un buen ajuste a los datos observados.

Las siguientes figuras, producidas con el programa Hyfran Plus, ilustran los resultados de los análisis estadísticos que se llevaron a cabo.

Figura 60
Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

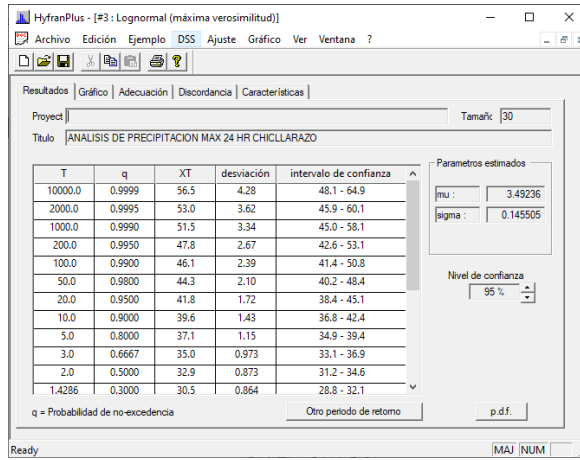


Figura 61
Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

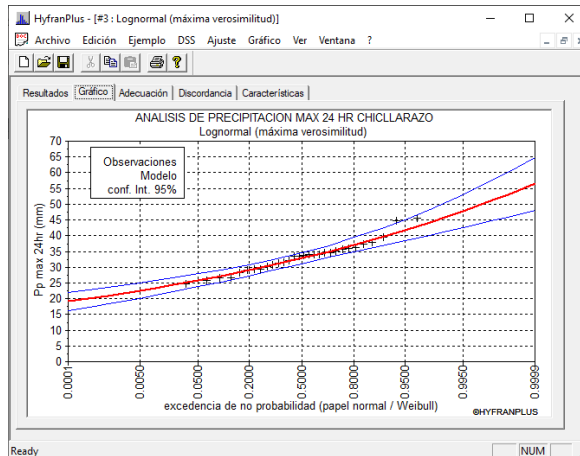
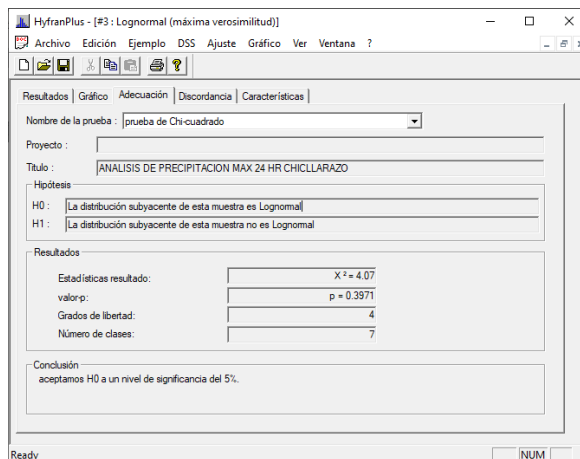


Figura 62
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo



Se utilizó la distribución lognormal en la subcuenca Apacheta. Los datos de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.6659 > 0.05$) señalan que no hay pruebas estadísticamente relevantes para descartar la hipótesis nula, así que el modelo se ajusta bien a los datos observados.

Figura 63

Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

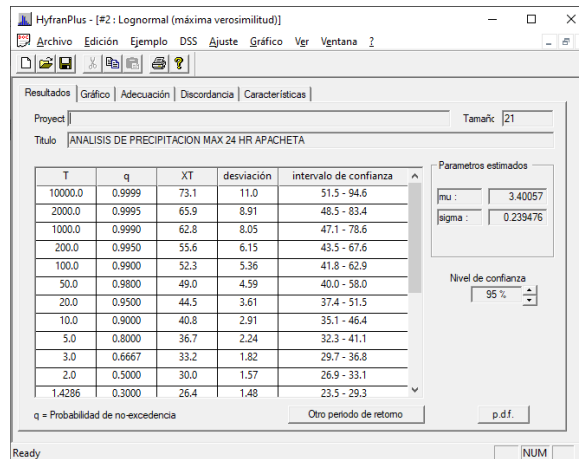


Figura 64

Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

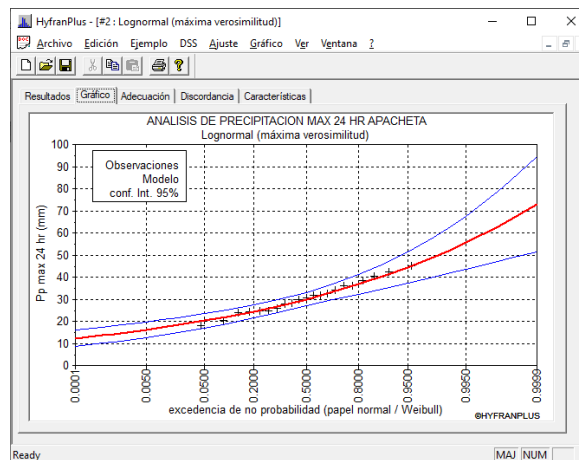
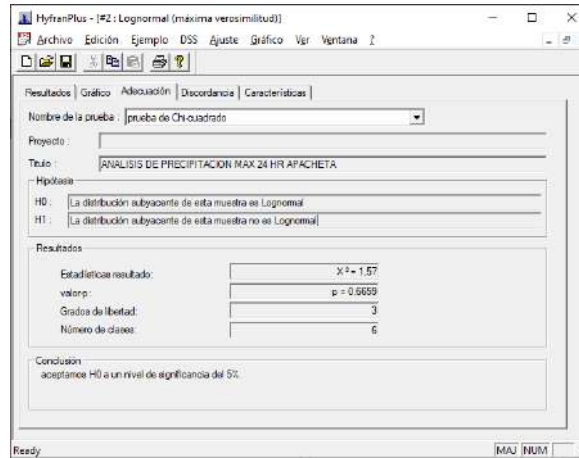


Figura 65
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta



La distribución lognormal fue utilizada en la subcuenca Cachi. Los resultados del test de chi-cuadrado ($p = 0.1159 > 0.05$) señalan que no hay una evidencia estadísticamente significativa para desechar la hipótesis nula, por lo cual el modelo tiene un adecuado ajuste a los datos analizados.

Figura 66
Resultado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

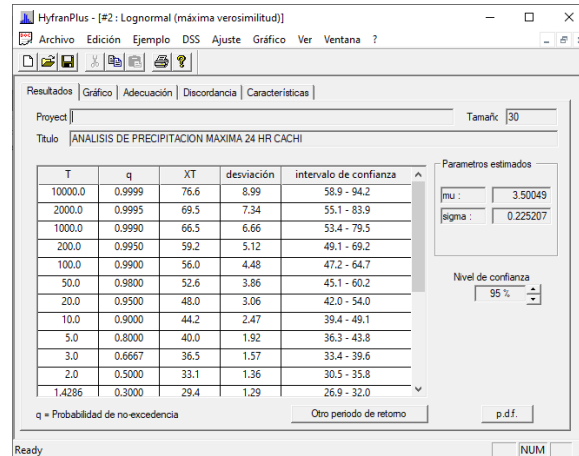


Figura 67
Curva de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

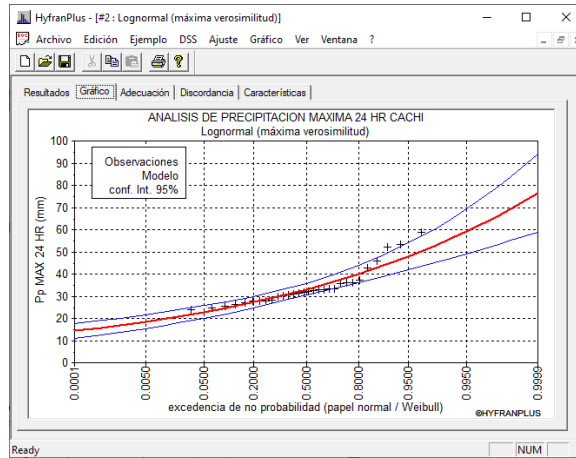
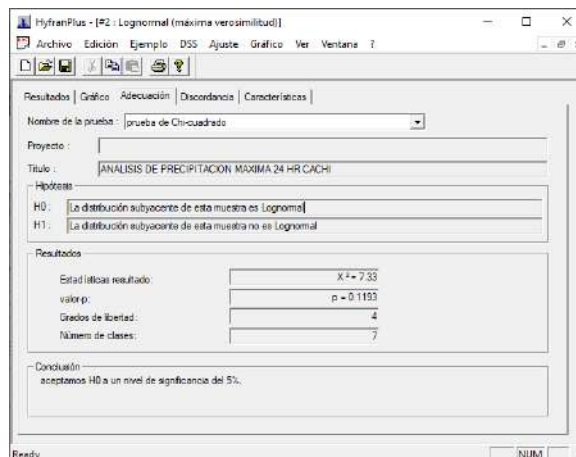


Figura 68
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Lognormal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi



C. Distribución Normal (máxima verosimilitud)

La subcuenca de Chicllarazo fue objeto de la distribución normal. El modelo se ajusta adecuadamente a los datos observados, ya que los resultados del test chi cuadrado ($p = 0.9270 > 0.05$) demuestran que no hay evidencia estadística significativa para rechazar la hipótesis nula.

Figura 69
Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

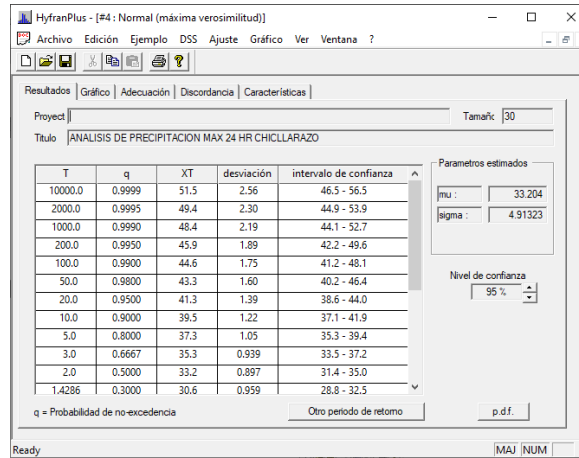


Figura 70
Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

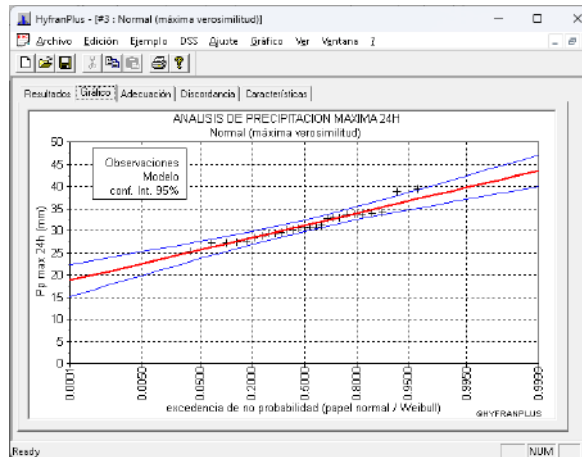
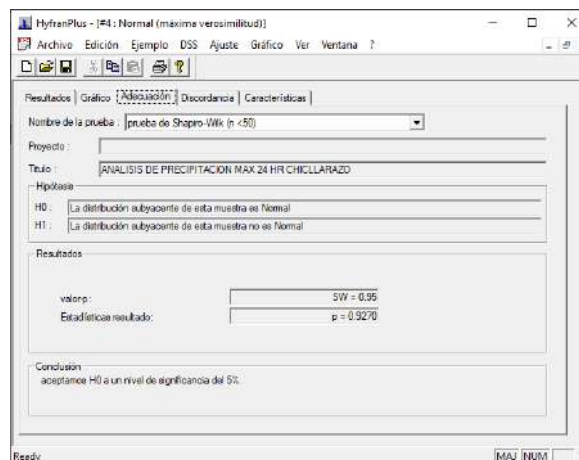


Figura 71
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo



Se utilizó la distribución normal en la subcuenca Apacheta. Los datos del test de chi-cuadrado ($p = 0.6659 > 0.05$) indican que no existen pruebas estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula; por lo tanto, el modelo se acomoda apropiadamente a los datos observados.

Figura 72

Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

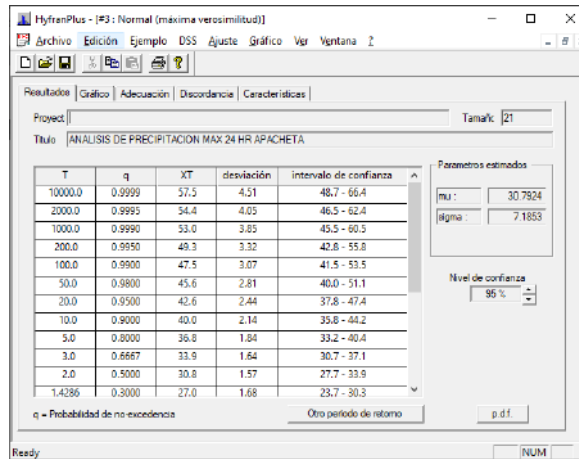


Figura 73

Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

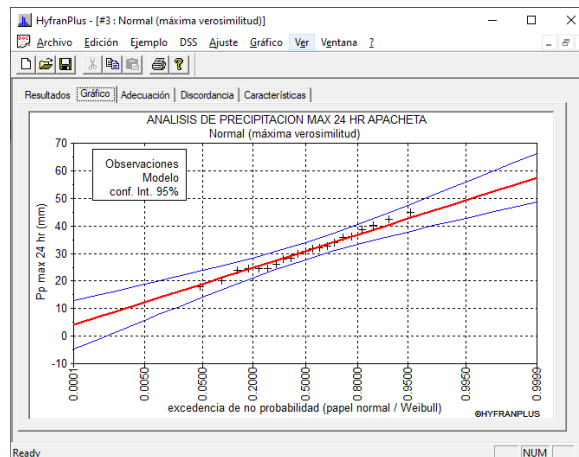
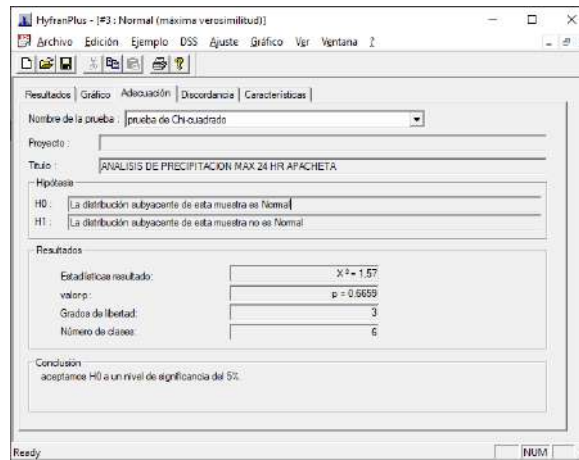


Figura 74

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta



La subcuenca Cachi fue sometida a la distribución normal. Los datos de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.0823 > 0.05$) indican que no existen pruebas estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula, lo cual sugiere que el modelo se ajusta bien a los datos observados.

Figura 75

Resultado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

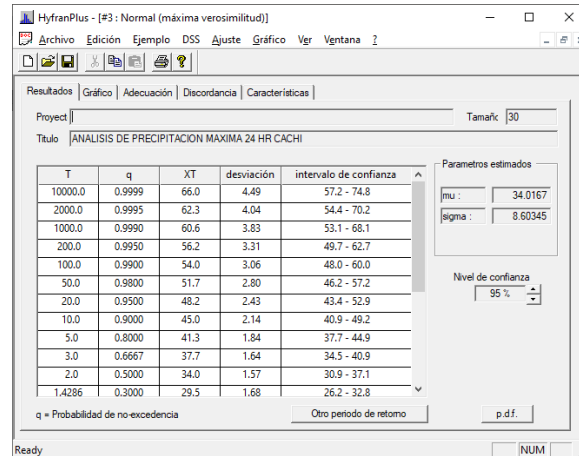


Figura 76

Curva de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

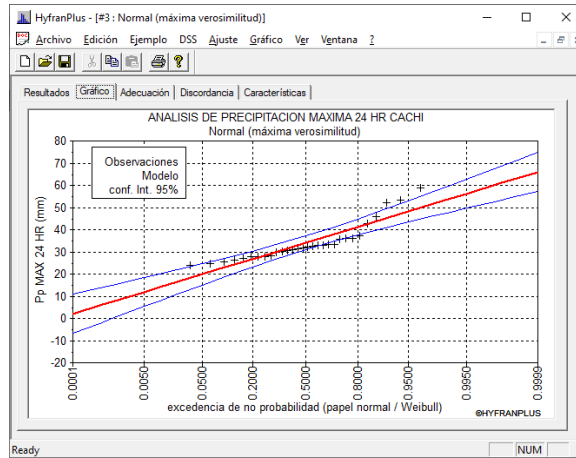
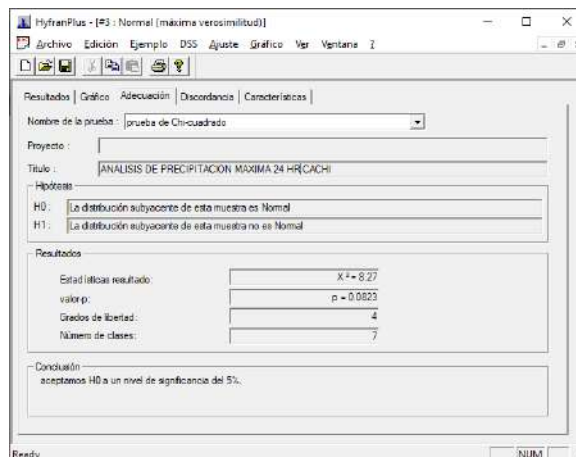


Figura 77

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Normal (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi



D. Distribución Gamma (máxima verosimilitud)

La subcuenca Chicllarazo fue objeto de la aplicación de la distribución gamma. Los datos de la prueba chi-cuadrado ($p = 0.6151 > 0.05$) señalan que no hay pruebas significativas desde el punto de vista estadístico para descartar la hipótesis nula, por lo cual el modelo se ajusta adecuadamente a los datos observados.

Figura 78
Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

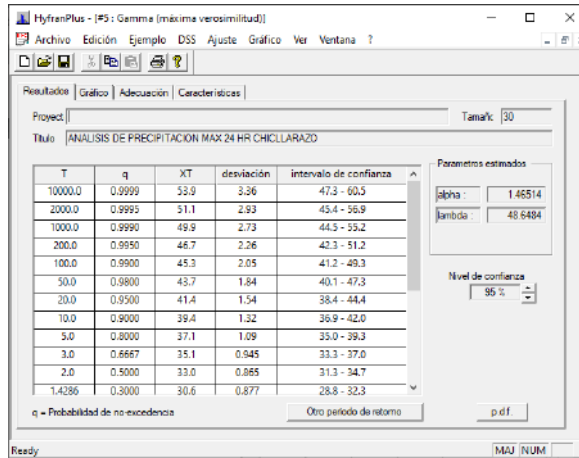


Figura 79
Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

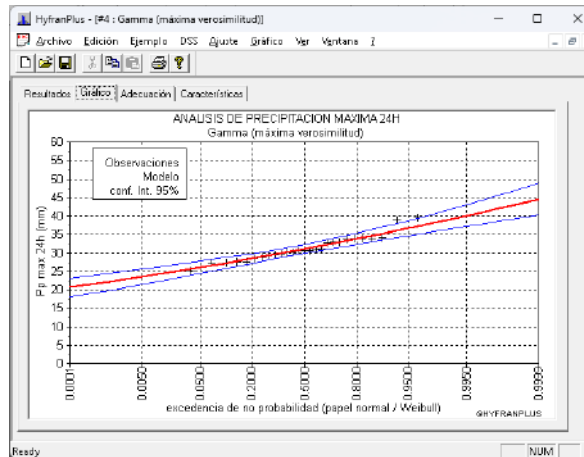
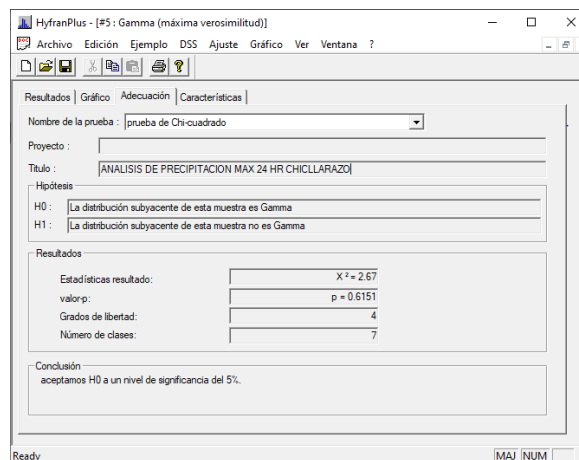


Figura 80
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo



Se utilizó la distribución Gamma en la subcuenca Apacheta. Los datos de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.6659 > 0.05$) señalan que no hay pruebas estadísticamente relevantes para descartar la hipótesis nula, así que el modelo se ajusta bien a los datos observados.

Figura 81

Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

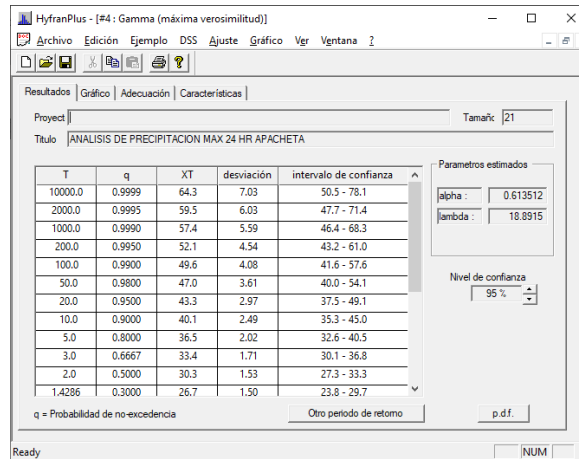


Figura 82

Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

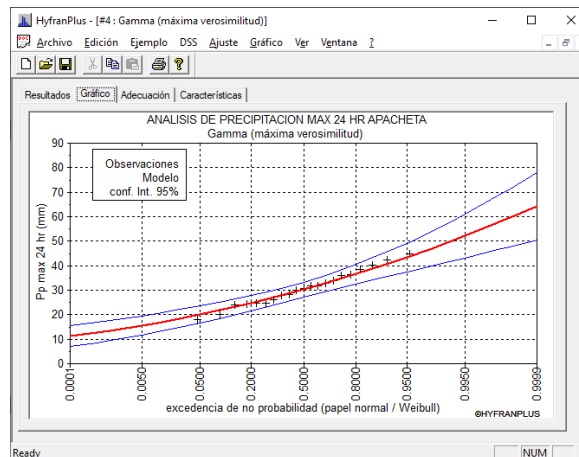
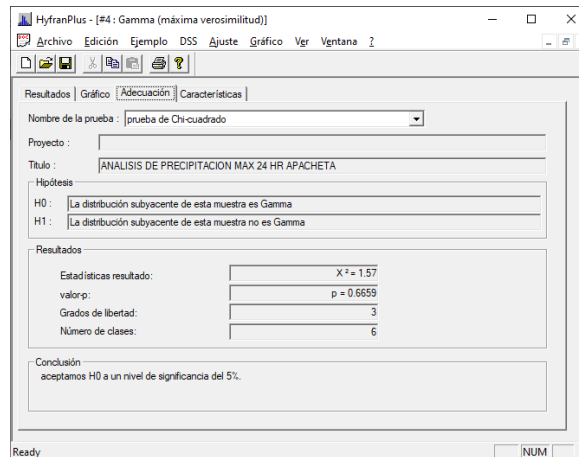


Figura 83

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta



La distribución gamma se aplicó a la subcuenca Cachi. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.1193 > 0.05$) indican que no existe evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula, por lo que el modelo presenta un buen ajuste a los datos observados.

Figura 84

Resultado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

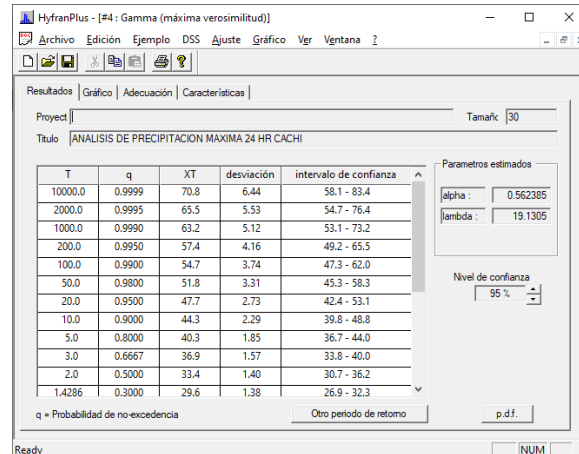


Figura 85

Curva de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

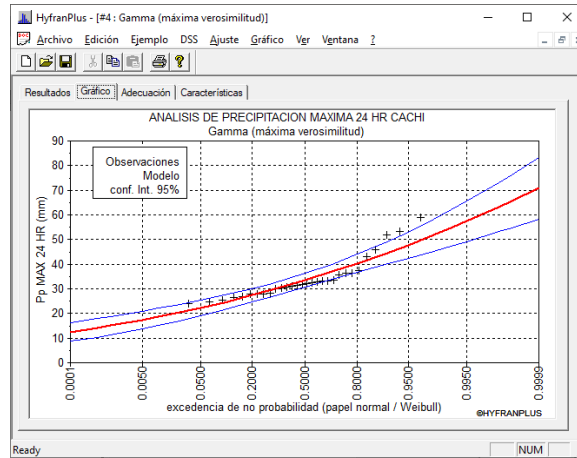
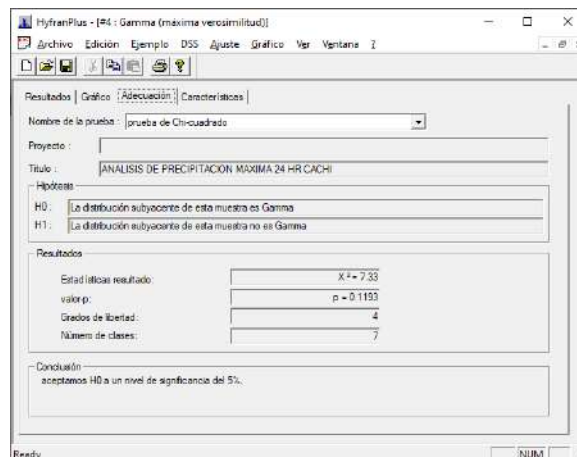


Figura 86

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Gamma (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi



E. Distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud)

La subcuenca Chicllarazo fue objeto de la distribución de Pearson T-III. Los hallazgos de la prueba chi-cuadrado ($p = 0.4459 > 0.05$) sugieren que no hay pruebas estadísticamente significativas para descartar la hipótesis nula, lo que indica que el modelo se ajusta bien a los datos observados.

Figura 87
Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

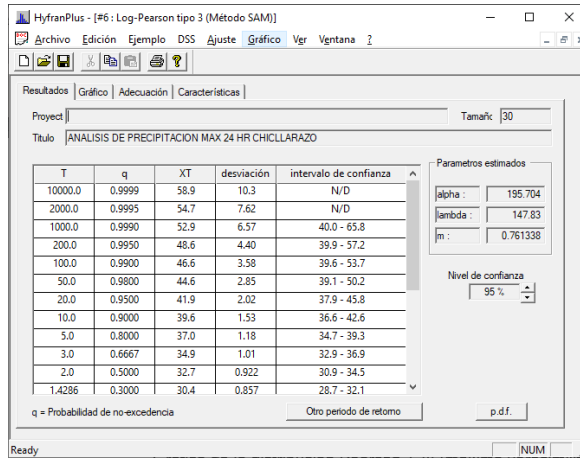


Figura 88
Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo

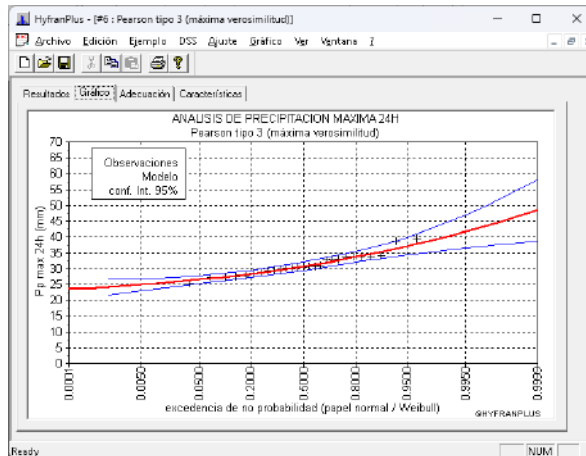
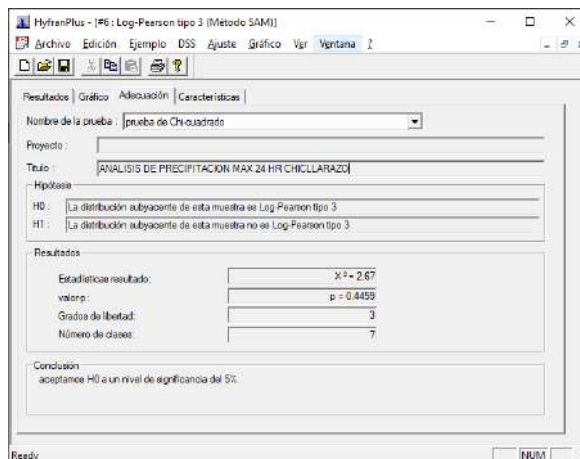


Figura 89
Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Chicllarazo



Se aplicó la distribución de Pearson T-III a la subcuenca Apacheta. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.4459 > 0.05$) indican que no existe evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula, por lo que el modelo presenta un buen ajuste a los datos observados.

Figura 90

Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

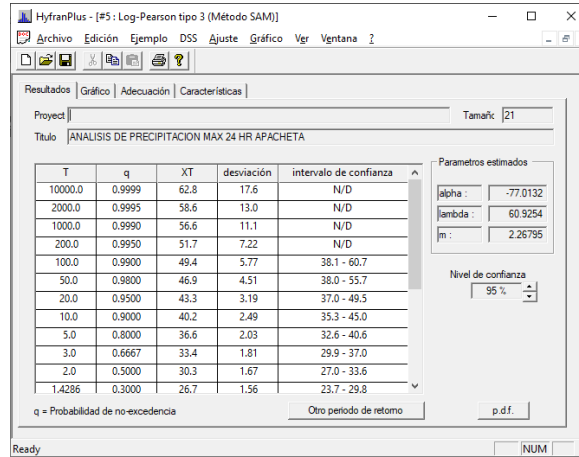


Figura 91

Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta

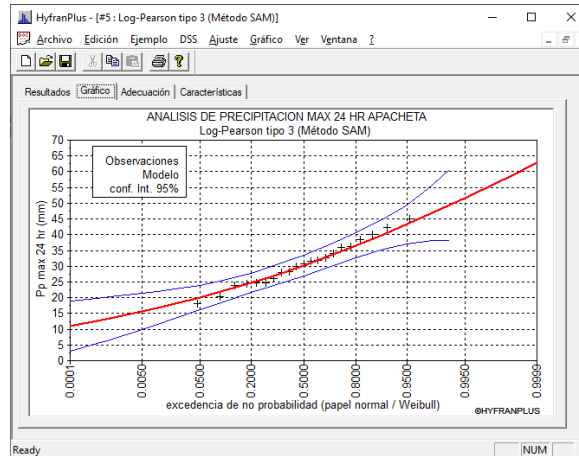
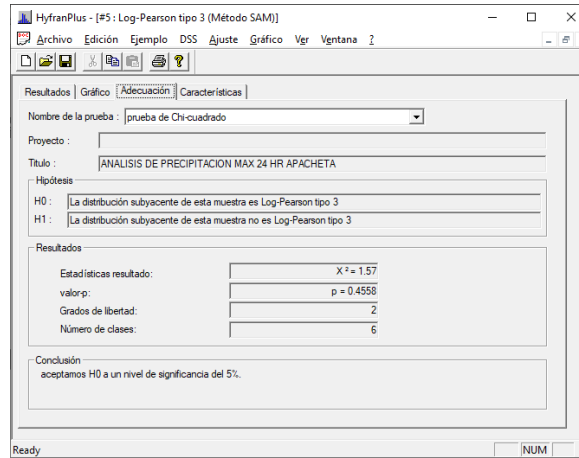


Figura 92

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Apacheta



Se aplicó la distribución de Pearson T-III a la subcuenca Cachi. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado ($p = 0.0937 > 0.05$) indican que no existe evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula, por lo que el modelo presenta un buen ajuste a los datos observados.

Figura 93

Resultado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

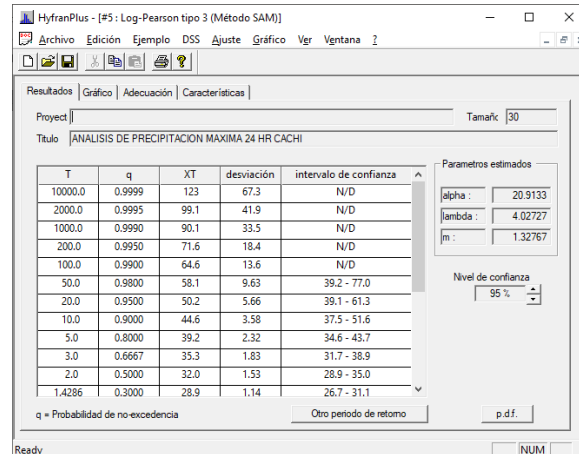


Figura 94

Curva de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi

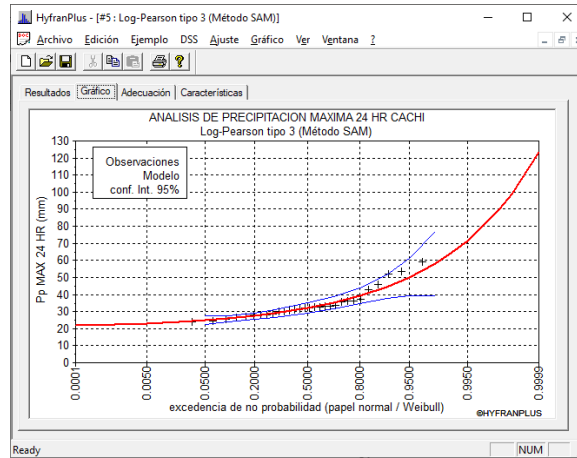
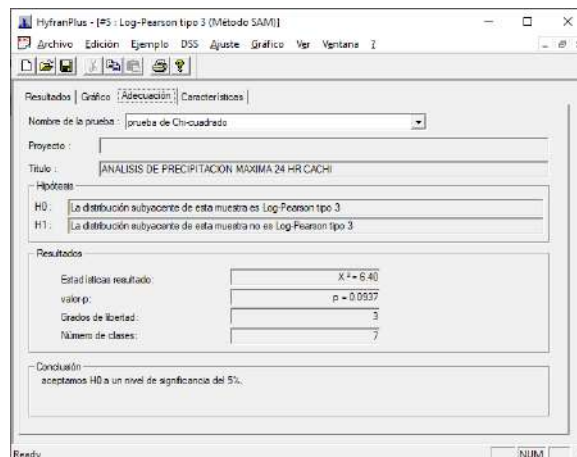


Figura 95

Prueba Chi-cuadrado de la distribución Pearson T-III (máxima verosimilitud) subcuenca Cachi



F. Selección de la mejor distribución de probabilidad

Tras el análisis estadístico realizado con el software Hyfran Plus, se determinó que la distribución Gamma tiene un mejor ajuste para la subcuenca Chicllarazo y la subcuenca Cachi, mientras que para la subcuenca Apacheta el que mejor se adecua es la distribución Norma, los cuales se analizaron por el método de máxima verosimilitud, presenta el mejor ajuste a la serie de precipitaciones máximas en 24 horas. Por lo tanto, estas distribuciones fueron seleccionada para la estimación de precipitaciones e intensidades máximas correspondientes a cada período de retorno considerado en el estudio.

Figura 96

Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Chicllarazo

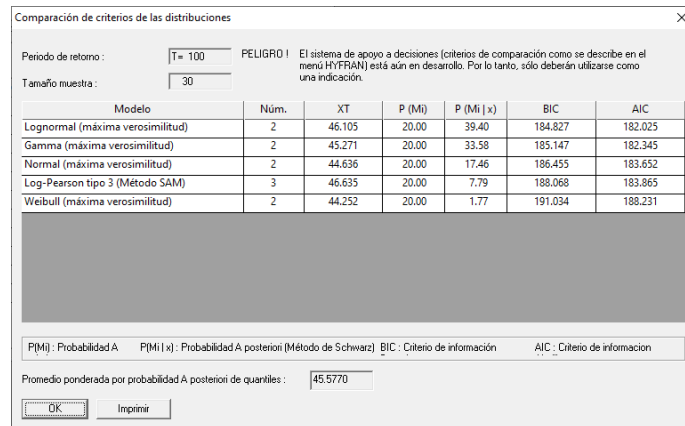


Figura 97

Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Apacheta

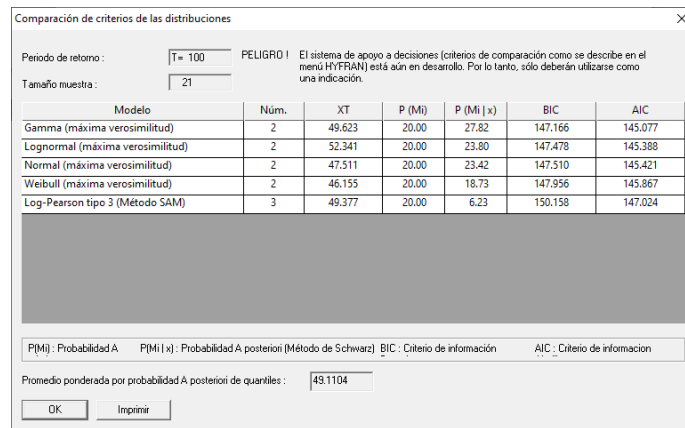


Figura 98

Evaluación y comparación de la distribución de probabilidad más óptima en la subcuenca Cachi

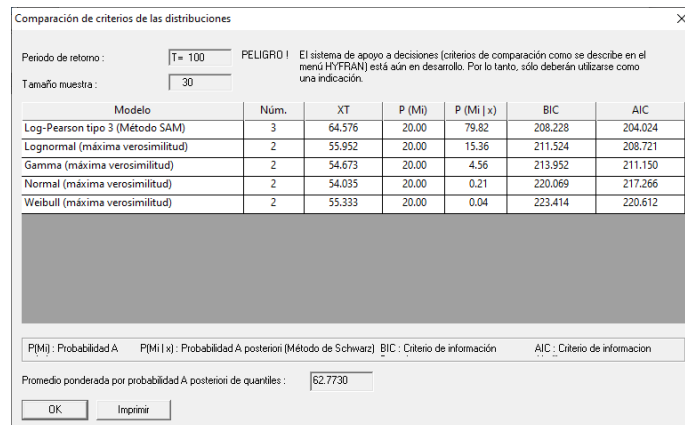


Figura 99

Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Chicllarazo

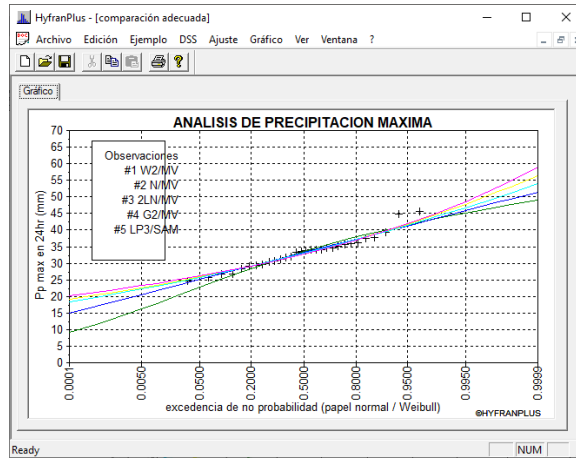


Figura 100

Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Apacheta

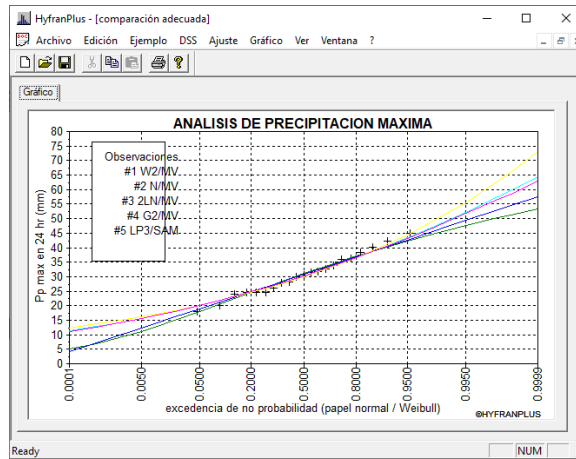


Figura 101

Ajuste de las probabilidades distribuidas en la subcuenca Cachi

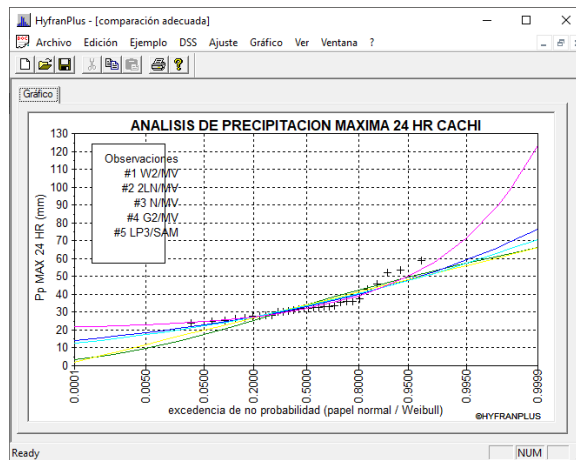


Tabla 15*Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Chicllarazo*

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	49.0	56.5	51.5	53.9	58.9
2000	47.6	53.0	49.4	51.1	54.7
1000	47.0	51.5	48.4	49.9	52.9
200	45.2	47.8	45.9	46.7	48.6
100	44.3	46.1	44.6	45.3	46.6
50	43.2	44.3	43.3	43.7	44.6
20	41.5	41.8	41.3	41.4	41.9
10	40.0	39.6	39.5	39.4	39.6
5	37.9	37.1	37.3	37.1	37.0
3	35.8	35.0	35.3	35.1	34.9
2	33.5	32.9	33.2	33.0	32.7
1.4286	30.4	30.5	30.6	30.6	30.4
1.25	28.3	29.1	29.1	29.1	29.1
1.1111	25.4	27.3	26.9	27.3	27.4
1.0526	22.8	25.9	25.1	25.8	26.2
1.0204	19.9	24.4	23.1	24.2	24.8
1.0101	18.0	23.4	21.8	23.1	24.0
1.005	16.2	22.6	20.5	22.2	23.2
1.001	12.8	21.0	18.0	20.4	21.8
1.0005	11.5	20.4	17.0	19.8	21.3
1.0001	9.1	19.1	14.9	18.4	20.3
10000	49.0	56.5	51.5	53.9	58.9

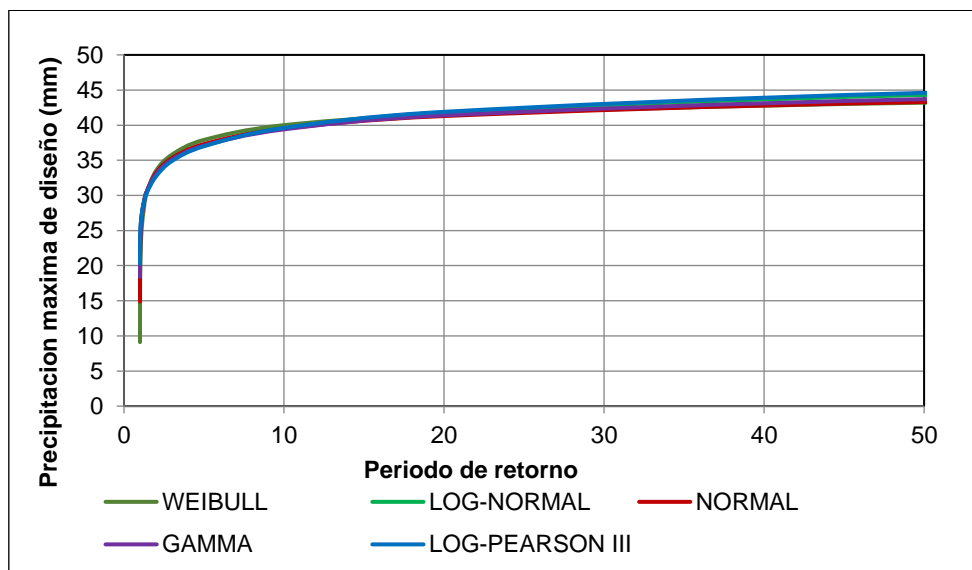
Figura 102*Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Chicllarazo*

Tabla 16

Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Apacheta

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	53.3	73.1	57.5	64.3	62.8
2000	51.2	65.9	54.4	59.5	58.6
1000	50.2	62.8	53.0	57.4	56.6
200	47.5	55.6	49.3	52.1	51.7
100	46.2	52.3	47.5	49.6	49.4
50	44.6	49.0	45.6	47.0	46.9
20	42.2	44.5	42.6	43.3	43.3
10	40.0	40.8	40.0	40.1	40.2
5	37.1	36.7	36.8	36.5	36.6
3	34.3	33.2	33.9	33.4	33.4
2	31.1	30.0	30.8	30.3	30.3
1.4286	27.1	26.4	27.0	26.7	26.7
1.25	24.6	24.5	24.7	24.7	24.7
1.1111	21.0	22.1	21.6	22.1	22.1
1.0526	18.1	20.2	19.0	20.1	20.1
1.0204	14.9	18.3	16.0	18.0	18.0
1.0101	12.9	17.2	14.1	16.7	16.7
1.005	11.2	16.2	12.3	15.6	15.5
1.001	8.0	14.3	8.6	13.5	13.4
1.0005	6.9	13.6	7.2	12.8	12.6
1.0001	5.0	12.3	4.1	11.3	11.0
10000	53.3	73.1	57.5	64.3	62.8

Figura 103

Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Apacheta

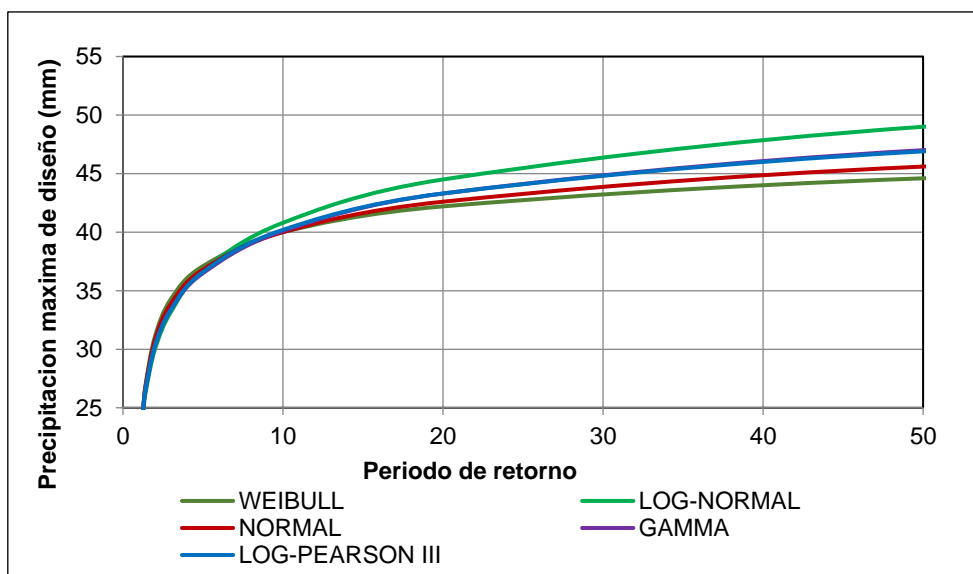


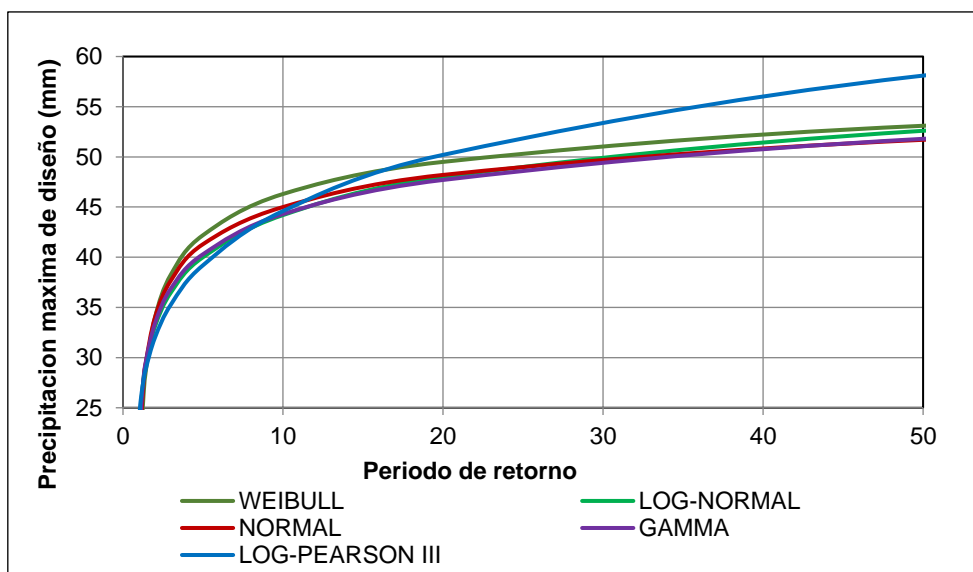
Tabla 17

Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Cachi

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	66.1	76.6	66.0	70.8	123.0
2000	62.9	69.5	62.3	65.5	99.1
1000	61.4	66.5	60.6	63.2	90.1
200	57.4	59.2	56.2	57.4	71.6
100	55.3	56.0	54.0	54.7	64.6
50	53.1	52.6	51.7	51.8	58.1
20	49.5	48.0	48.2	47.7	50.2
10	46.3	44.2	45.0	44.3	44.6
5	42.2	40.0	41.3	40.3	39.2
3	38.3	36.5	37.7	36.9	35.3
2	34.0	33.1	34.0	33.4	32.0
1.4286	28.7	29.4	29.5	29.6	28.9
1.25	25.4	27.4	26.8	27.4	27.4
1.1111	21.0	24.8	23.0	24.5	25.8
1.0526	17.4	22.9	19.9	22.3	24.8
1.0204	13.7	20.9	16.3	20.0	23.8
1.0101	11.5	19.6	14.0	18.6	23.3
1.005	9.6	18.5	11.9	17.3	22.9
1.001	6.3	16.5	7.4	15.0	22.3
1.0005	5.3	15.8	5.7	14.2	22.1
1.0001	3.5	14.3	2.0	12.5	21.8
10000	66.1	76.6	66.0	70.8	123.0

Figura 104

Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Cachi



G. Precipitaciones máximas de diseño

La Tabla 18, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se resume los períodos de retorno considerados y las correspondientes precipitaciones de diseño, derivadas del ajuste estadístico mediante las distribuciones de Gamma y Normal los cuales tuvieron un mejor ajuste.

Tabla 18

Consolidado de precipitaciones máximas (mm) de diseño

Tr (Años)	Pp24 máx. (mm)		
	Chicllarazo	Apacheta	Cachi
2	33	30.8	33.4
5	37.1	36.8	40.3
10	39.4	40	44.3
50	43.7	45.6	51.8

Figura 105

Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Chicllarazo

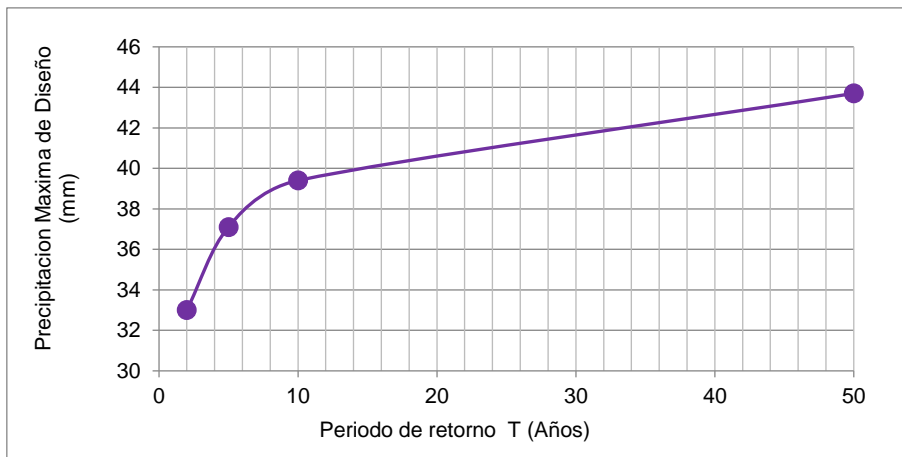


Figura 106

Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Apacheta

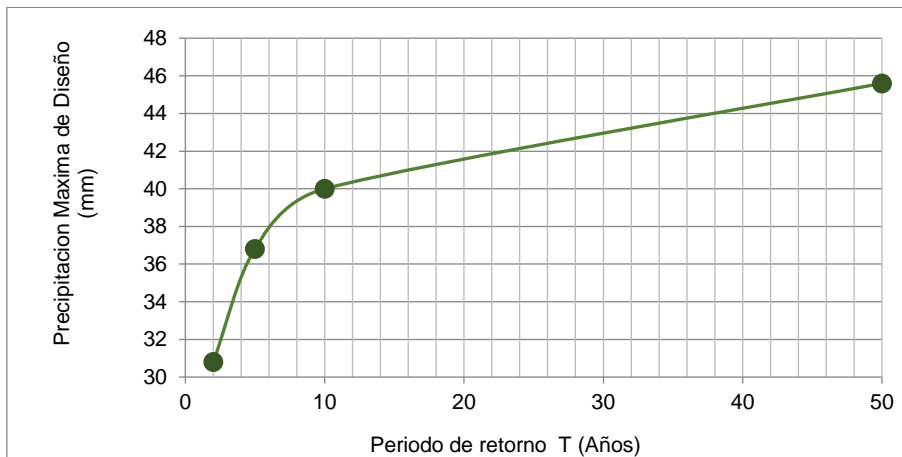
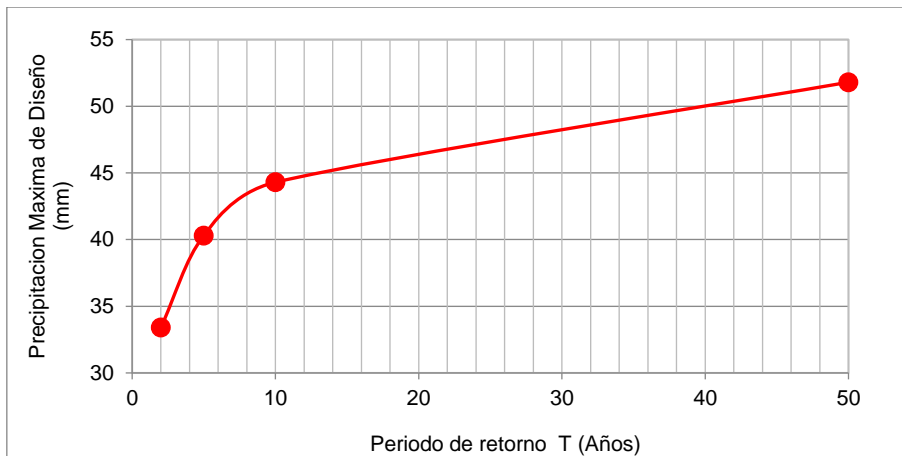


Figura 107

Precipitaciones de diseño (mm) subcuenca Cachi



3.1.10 Discusión de distribuciones de probabilidad

El análisis de bondad de ajuste realizado en Hyfran Plus permitió evaluar diversas distribuciones de probabilidad aplicadas a las series de precipitaciones máximas anuales registradas en la cuenca del río Cachi. Mediante la prueba Chi-cuadrado con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, se identificó que la distribución que presentó el mejor ajuste a los datos observados fue aquella que obtuvo el menor valor del estadístico de contraste, cumpliendo simultáneamente con el criterio de aceptación dentro del límite crítico establecido. Este resultado evidencia que dicha distribución representa con mayor fidelidad el comportamiento extremo de la precipitación en las subcuencas del río Cachi.

3.1.11 Cálculo de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

Estos trazos curvos son una parte del diseño que conecta la probabilidad de ocurrencia con la duración, frecuencia e intensidad de las lluvias. El método de Dyck Peschke se usa en este momento para representar la manera en que las lluvias se distribuyen a lo largo del tiempo.

Tabla 19

Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuenca Chicllarazo

T (Años)	2	5	10	50	Duración (min)
Ppmax 24h	33.00	37.10	39.40	43.70	
PRECIPITACIÓN (mm)	12.54	14.09	14.97	16.60	30
	14.91	16.76	17.80	19.74	60
	16.50	18.55	19.70	21.85	90
	17.73	19.93	21.17	23.48	120
	18.75	21.08	22.38	24.83	150
	19.62	22.06	23.43	25.98	180
	20.39	22.93	24.35	27.01	210
	21.09	23.70	25.17	27.92	240
	21.72	24.41	25.93	28.76	270
	22.29	25.06	26.62	29.52	300
	22.83	25.67	27.26	30.24	330
	23.33	26.23	27.86	30.90	360
	23.81	26.76	28.42	31.53	390
	24.25	27.26	28.95	32.11	420
	24.67	27.74	29.46	32.67	450
	25.07	28.19	29.94	33.20	480
	25.46	28.62	30.39	33.71	510
25.82	29.03	30.83	34.20	540	
26.18	29.43	31.25	34.66	570	
26.51	29.81	31.66	35.11	600	
26.84	30.17	32.04	35.54	630	
27.15	30.53	32.42	35.96	660	
27.46	30.87	32.78	36.36	690	
27.75	31.20	33.13	36.75	720	

Figura 108

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Chicllarazo

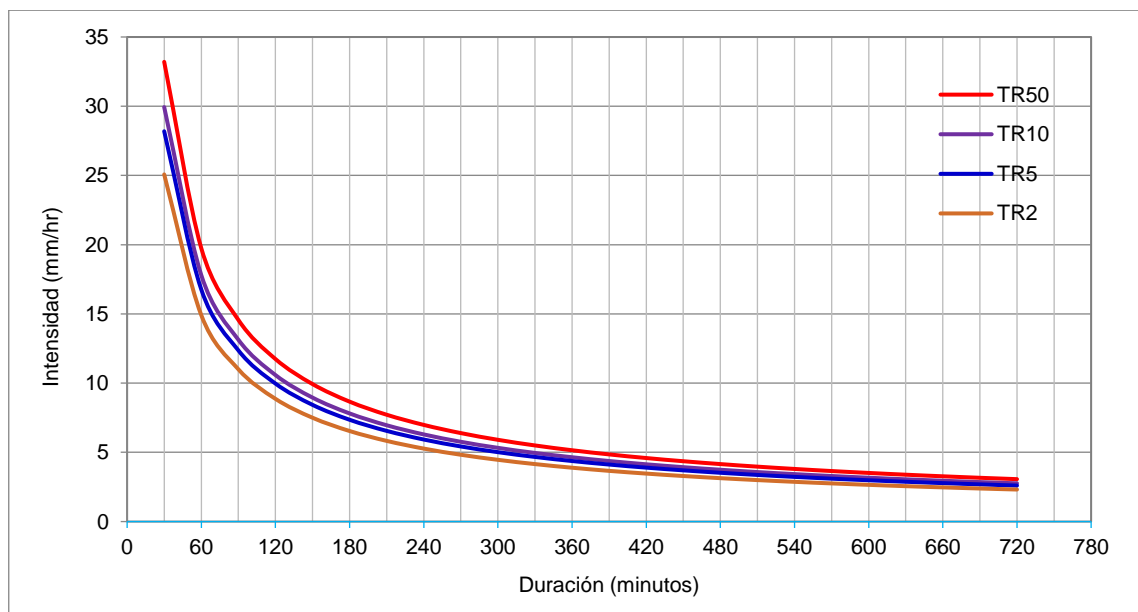


Tabla 20

Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuena Apacheta

T (Años) Pmax 24h	2	5	10	50	Duración (min)
	11.70	13.98	15.20	17.32	30
	13.92	16.63	18.07	20.60	60
	15.40	18.40	20.00	22.80	90
	16.55	19.77	21.49	24.50	120
	17.50	20.91	22.72	25.91	150
	18.31	21.88	23.78	27.11	180
	19.03	22.74	24.72	28.18	210
	19.68	23.51	25.56	29.14	240
	20.27	24.22	26.32	30.01	270
	20.81	24.86	27.02	30.81	300
	21.31	25.46	27.68	31.55	330
	21.78	26.02	28.28	32.24	360
	22.22	26.55	28.86	32.90	390
	22.63	27.04	29.40	33.51	420
	23.03	27.51	29.91	34.09	450
	23.40	27.96	30.39	34.65	480
	23.76	28.39	30.86	35.18	510
	24.10	28.80	31.30	35.68	540
	24.43	29.19	31.73	36.17	570
	24.75	29.57	32.14	36.64	600
	25.05	29.93	32.53	37.09	630
	25.34	30.28	32.91	37.52	660
	25.63	30.62	33.28	37.94	690
	25.90	30.94	33.64	38.34	720

PRECIPITACIÓN (mm)

Figura 109

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuena Apacheta

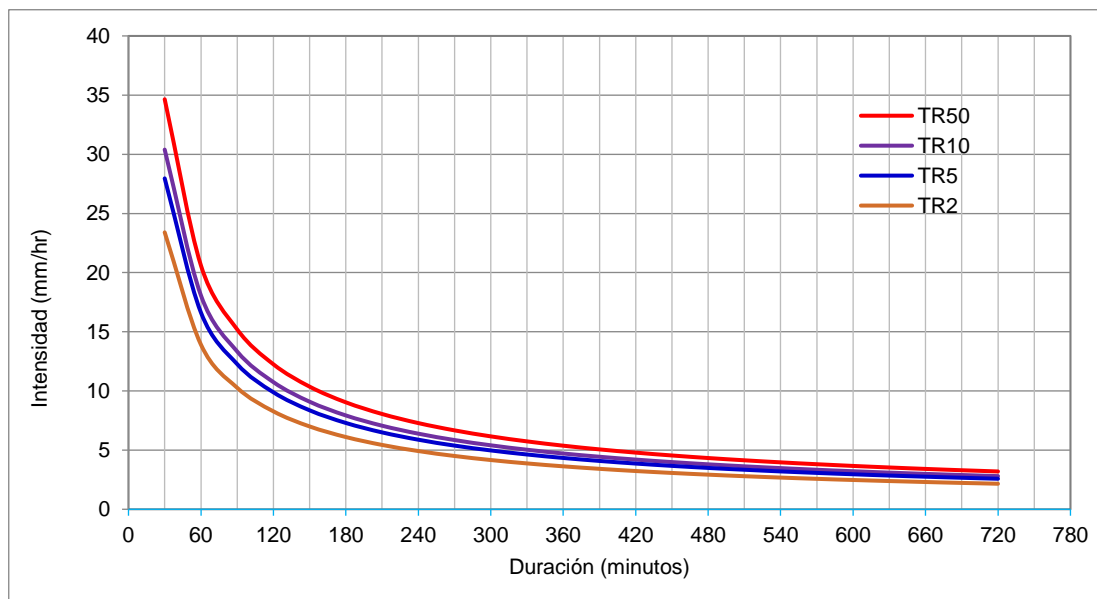


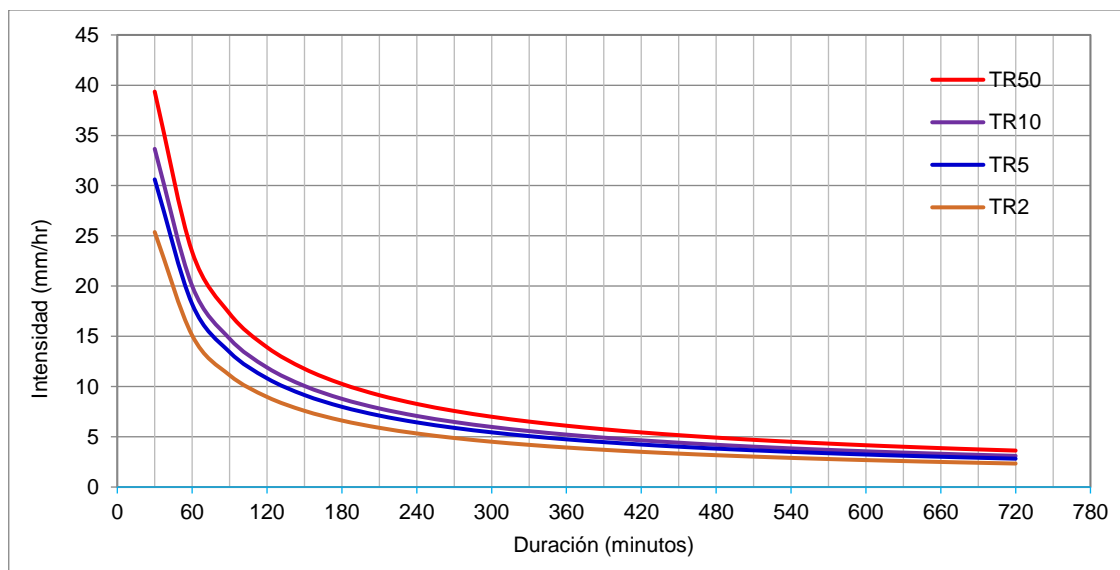
Tabla 21

Intensidad – Duración – Frecuencia por el método Dyck Peschke subcuenca Cachi

T (Años) Pmax 24h	2	5	10	50	Duración (min)
	12.69	15.31	16.83	19.68	30
	15.09	18.21	20.01	23.40	60
	16.70	20.15	22.15	25.90	90
	17.95	21.65	23.80	27.83	120
	18.97	22.89	25.17	29.43	150
	19.86	23.96	26.34	30.80	180
	20.64	24.90	27.38	32.01	210
	21.34	25.75	28.31	33.10	240
	21.98	26.52	29.15	34.09	270
	22.57	27.23	29.93	35.00	300
	23.11	27.88	30.65	35.84	330
	23.62	28.50	31.32	36.63	360
	24.09	29.07	31.96	37.37	390
	24.55	29.62	32.56	38.07	420
	24.97	30.13	33.12	38.73	450
	25.38	30.62	33.66	39.36	480
	25.77	31.09	34.17	39.96	510
	26.14	31.54	34.67	40.54	540
	26.49	31.97	35.14	41.09	570
	26.83	32.38	35.59	41.62	600
	27.16	32.78	36.03	42.13	630
	27.48	33.16	36.45	42.62	660
	27.79	33.53	36.86	43.10	690
	28.09	33.89	37.25	43.56	720

Figura 110

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Cachi



3.1.12 *Discusión de las curvas IDF*

Se determinaron las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para períodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años, aplicando la metodología empírica de Dyck Peschke. Como base se utilizó una duración de tormenta de 12 horas (720 minutos), considerada representativa frente a la ocurrencia de eventos extremos en la cuenca del río Cachi.

Dado que describen la relación entre la frecuencia de ocurrencia y la intensidad de lluvia, estas curvas IDF obtenidas se convierten en un insumo clave para el análisis hidrológico. Además, son fundamentales para calcular los caudales máximos en el modelamiento hidrológico posterior.

3.1.13 *Resultado de hietogramas de diseño por Dyck Peschke*

Los hietogramas de diseño obtenidos a través del método Dyck Peschke muestran la distribución de la precipitación a lo largo de los períodos analizados, que abarcan 2, 5, 10 y 50 años. Este método se fundamenta en una formulación empírica tradicional que organiza la lluvia en bloques alternados de intensidades cada vez menores, generando de esta manera una estructura temporal frecuentemente simétrica en relación al centro del suceso. Las precipitaciones de diseño se discretizaron en intervalos uniformes para representar con precisión la intensidad y el desarrollo acumulativo a lo largo de eventos extremos.

Las siguientes gráficas resultantes muestran una distribución temporal con picos de intensidad alternados, característica propia del método Dyck Peschke. Esta configuración genera una mayor concentración de lluvia en varios intervalos a lo largo del evento, produciendo hietogramas con intensidades relativamente altas y repetitivas, particularmente notorias en los períodos de retorno más elevados.

Tabla 22

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR en la subcuenca Chicllarazo

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	25.07	12.54	12.54	0-30	0.36
60	14.91	14.91	2.37	30-60	0.39
90	11.00	16.50	1.59	60-90	0.42
120	8.87	17.73	1.23	90-120	0.46
150	7.50	18.75	1.02	120-150	0.50
180	6.54	19.62	0.87	150-180	0.56
210	5.83	20.39	0.77	180-210	0.64
240	5.27	21.09	0.69	210-240	0.75
270	4.83	21.72	0.63	240-270	0.92
300	4.46	22.29	0.58	270-300	1.21
330	4.15	22.83	0.54	300-330	1.89
360	3.89	23.33	0.50	330-360	14.91
390	3.66	23.81	0.47	360-390	2.82
420	3.46	24.25	0.45	390-420	1.46
450	3.29	24.67	0.42	420-450	1.04
480	3.13	25.07	0.40	450-480	0.82
510	3.00	25.46	0.38	480-510	0.69
540	2.87	25.82	0.37	510-540	0.60
570	2.76	26.18	0.35	540-570	0.53
600	2.65	26.51	0.34	570-600	0.48
630	2.56	26.84	0.33	600-630	0.44
660	2.47	27.15	0.31	630-660	0.40
690	2.39	27.46	0.30	660-690	0.37
720	2.31	27.75	0.29	690-720	0.35

Figura 111

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo

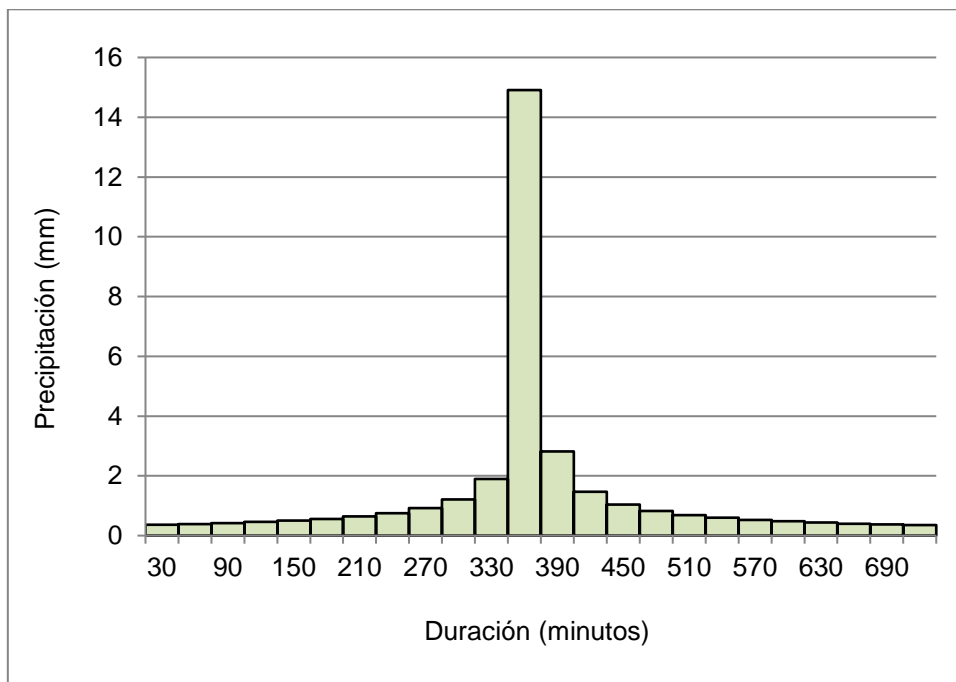


Tabla 23

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR en la subcuenca Chicllarazo

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	28.19	14.09	14.09	0-30	0.41
60	16.76	16.76	2.67	30-60	0.44
90	12.37	18.55	1.79	60-90	0.47
120	9.97	19.93	1.38	90-120	0.51
150	8.43	21.08	1.14	120-150	0.56
180	7.35	22.06	0.98	150-180	0.63
210	6.55	22.93	0.87	180-210	0.72
240	5.93	23.70	0.78	210-240	0.84
270	5.43	24.41	0.71	240-270	1.03
300	5.01	25.06	0.65	270-300	1.36
330	4.67	25.67	0.60	300-330	2.13
360	4.37	26.23	0.56	330-360	16.76
390	4.12	26.76	0.53	360-390	3.17
420	3.89	27.26	0.50	390-420	1.64
450	3.70	27.74	0.47	420-450	1.17
480	3.52	28.19	0.45	450-480	0.93
510	3.37	28.62	0.43	480-510	0.77
540	3.23	29.03	0.41	510-540	0.67
570	3.10	29.43	0.40	540-570	0.60
600	2.98	29.81	0.38	570-600	0.54
630	2.87	30.17	0.37	600-630	0.49
660	2.78	30.53	0.35	630-660	0.45
690	2.68	30.87	0.34	660-690	0.42
720	2.60	31.20	0.33	690-720	0.39

Figura 112

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo

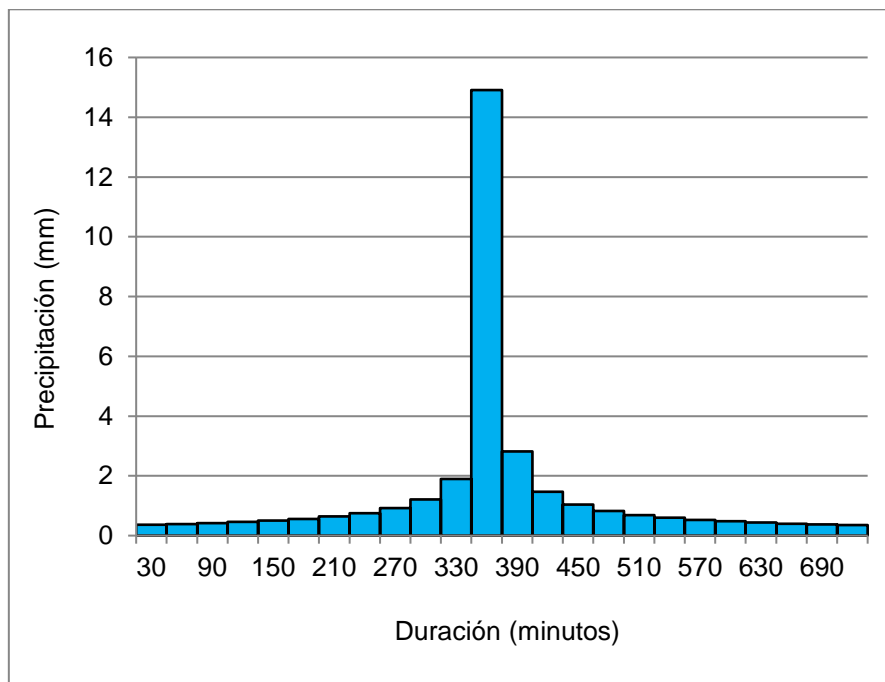


Tabla 24

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR en la subcuenca Chicllarazo

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	29.94	14.97	14.97	0-30	0.43
60	17.80	17.80	2.83	30-60	0.46
90	13.13	19.70	1.90	60-90	0.50
120	10.58	21.17	1.47	90-120	0.54
150	8.95	22.38	1.21	120-150	0.60
180	7.81	23.43	1.04	150-180	0.67
210	6.96	24.35	0.92	180-210	0.76
240	6.29	25.17	0.83	210-240	0.89
270	5.76	25.93	0.75	240-270	1.09
300	5.32	26.62	0.69	270-300	1.44
330	4.96	27.26	0.64	300-330	2.26
360	4.64	27.86	0.60	330-360	17.80
390	4.37	28.42	0.56	360-390	3.37
420	4.14	28.95	0.53	390-420	1.75
450	3.93	29.46	0.50	420-450	1.24
480	3.74	29.94	0.48	450-480	0.98
510	3.58	30.39	0.46	480-510	0.82
540	3.43	30.83	0.44	510-540	0.71
570	3.29	31.25	0.42	540-570	0.63
600	3.17	31.66	0.40	570-600	0.57
630	3.05	32.04	0.39	600-630	0.52
660	2.95	32.42	0.37	630-660	0.48
690	2.85	32.78	0.36	660-690	0.45
720	2.76	33.13	0.35	690-720	0.42

Figura 113

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo

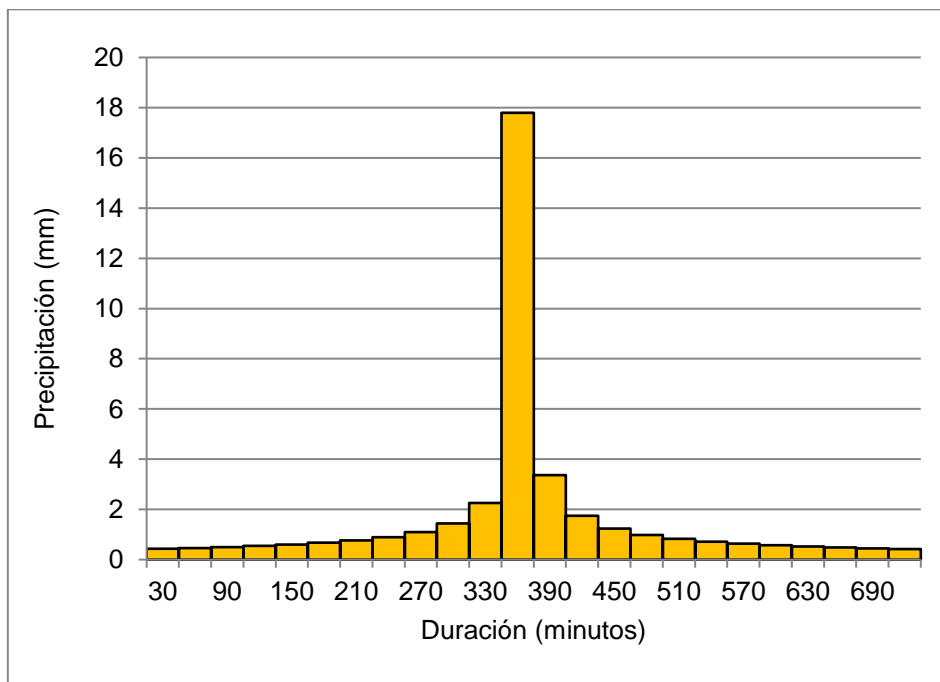


Tabla 25

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Chicllarazo

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	33.20	16.60	16.60	0-30	0.48
60	19.74	19.74	3.14	30-60	0.51
90	14.57	21.85	2.11	60-90	0.55
120	11.74	23.48	1.63	90-120	0.60
150	9.93	24.83	1.35	120-150	0.66
180	8.66	25.98	1.16	150-180	0.74
210	7.72	27.01	1.02	180-210	0.85
240	6.98	27.92	0.92	210-240	0.99
270	6.39	28.76	0.83	240-270	1.21
300	5.90	29.52	0.77	270-300	1.60
330	5.50	30.24	0.71	300-330	2.50
360	5.15	30.90	0.66	330-360	19.74
390	4.85	31.53	0.62	360-390	3.74
420	4.59	32.11	0.59	390-420	1.94
450	4.36	32.67	0.56	420-450	1.38
480	4.15	33.20	0.53	450-480	1.09
510	3.97	33.71	0.51	480-510	0.91
540	3.80	34.20	0.49	510-540	0.79
570	3.65	34.66	0.47	540-570	0.70
600	3.51	35.11	0.45	570-600	0.63
630	3.38	35.54	0.43	600-630	0.58
660	3.27	35.96	0.42	630-660	0.53
690	3.16	36.36	0.40	660-690	0.49
720	3.06	36.75	0.39	690-720	0.46

Figura 114

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo

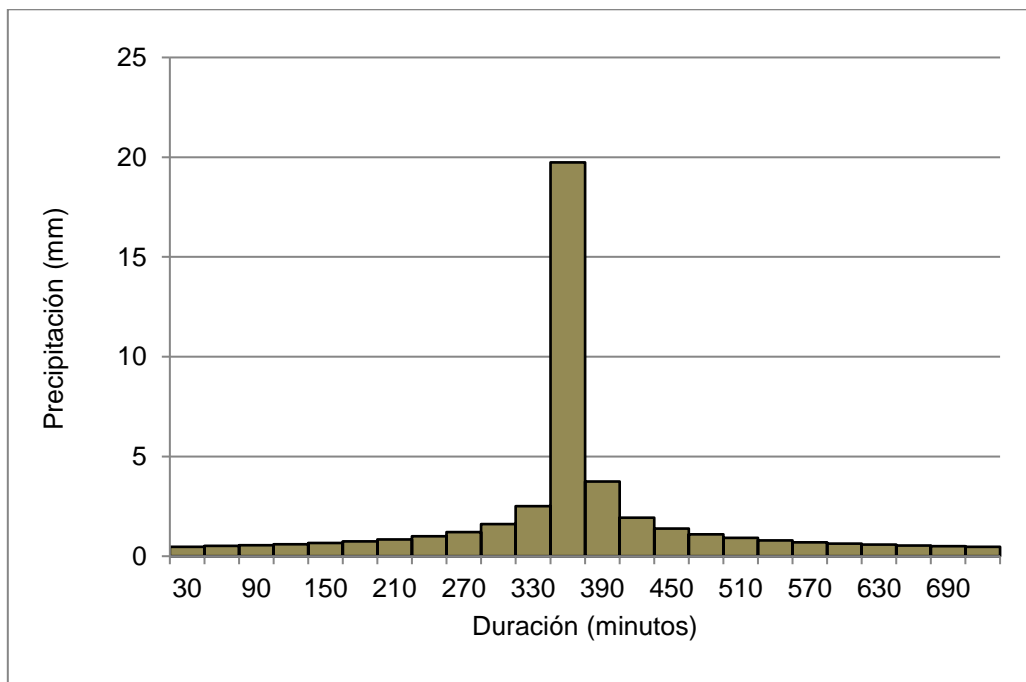


Tabla 26

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR en la subcuenca Apacheta

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	23.40	11.70	11.70	0-30	0.34
60	13.92	13.92	2.21	30-60	0.36
90	10.27	15.40	1.48	60-90	0.39
120	8.27	16.55	1.15	90-120	0.43
150	7.00	17.50	0.95	120-150	0.47
180	6.10	18.31	0.82	150-180	0.52
210	5.44	19.03	0.72	180-210	0.60
240	4.92	19.68	0.65	210-240	0.70
270	4.50	20.27	0.59	240-270	0.86
300	4.16	20.81	0.54	270-300	1.13
330	3.87	21.31	0.50	300-330	1.77
360	3.63	21.78	0.47	330-360	13.92
390	3.42	22.22	0.44	360-390	2.63
420	3.23	22.63	0.42	390-420	1.37
450	3.07	23.03	0.39	420-450	0.97
480	2.93	23.40	0.37	450-480	0.77
510	2.80	23.76	0.36	480-510	0.64
540	2.68	24.10	0.34	510-540	0.56
570	2.57	24.43	0.33	540-570	0.49
600	2.47	24.75	0.32	570-600	0.45
630	2.39	25.05	0.30	600-630	0.41
660	2.30	25.34	0.29	630-660	0.37
690	2.23	25.63	0.28	660-690	0.35
720	2.16	25.90	0.27	690-720	0.33

Figura 115

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Apacheta

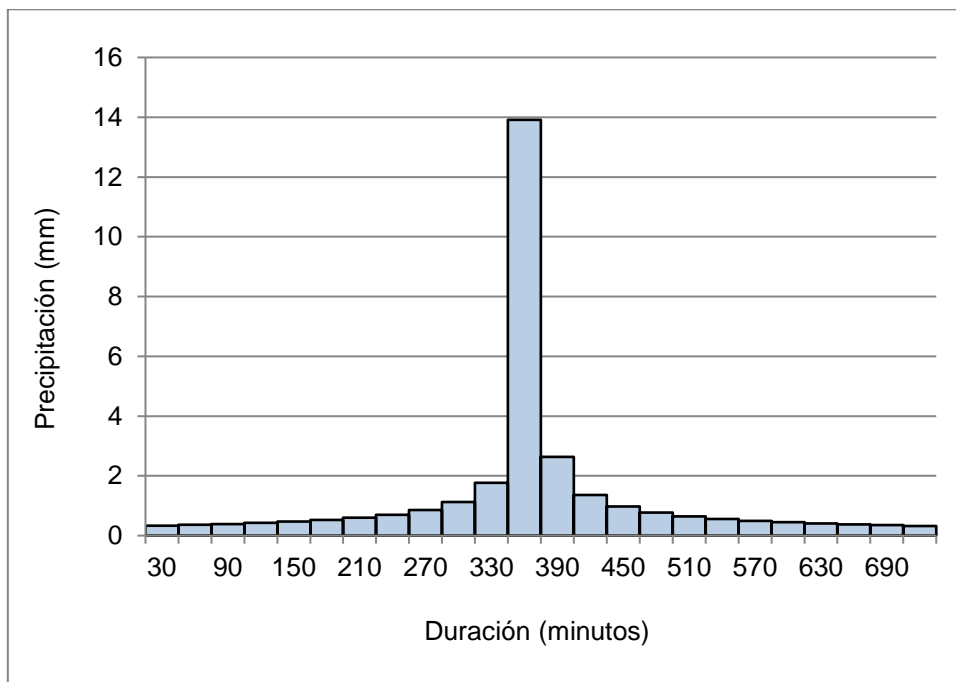


Tabla 27

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR en la subcuenca Apacheta

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	27.96	13.98	13.98	0-30	0.40
60	16.63	16.63	2.65	30-60	0.43
90	12.27	18.40	1.77	60-90	0.47
120	9.89	19.77	1.37	90-120	0.51
150	8.36	20.91	1.13	120-150	0.56
180	7.29	21.88	0.97	150-180	0.63
210	6.50	22.74	0.86	180-210	0.71
240	5.88	23.51	0.77	210-240	0.84
270	5.38	24.22	0.70	240-270	1.02
300	4.97	24.86	0.65	270-300	1.35
330	4.63	25.46	0.60	300-330	2.11
360	4.34	26.02	0.56	330-360	16.63
390	4.08	26.55	0.53	360-390	3.15
420	3.86	27.04	0.50	390-420	1.63
450	3.67	27.51	0.47	420-450	1.16
480	3.50	27.96	0.45	450-480	0.92
510	3.34	28.39	0.43	480-510	0.77
540	3.20	28.80	0.41	510-540	0.67
570	3.07	29.19	0.39	540-570	0.59
600	2.96	29.57	0.38	570-600	0.53
630	2.85	29.93	0.36	600-630	0.49
660	2.75	30.28	0.35	630-660	0.45
690	2.66	30.62	0.34	660-690	0.42
720	2.58	30.94	0.33	690-720	0.39

Figura 116

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Apacheta

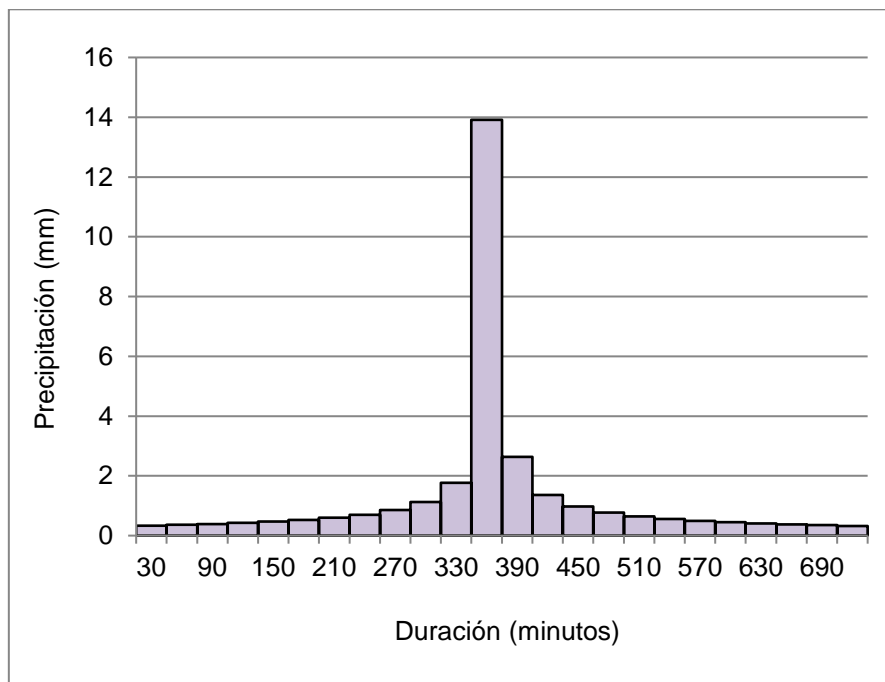


Tabla 28

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR en la subcuenca Apacheta

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	30.39	15.20	15.20	0-30	0.44
60	18.07	18.07	2.88	30-60	0.47
90	13.33	20.00	1.93	60-90	0.51
120	10.75	21.49	1.49	90-120	0.55
150	9.09	22.72	1.23	120-150	0.61
180	7.93	23.78	1.06	150-180	0.68
210	7.06	24.72	0.93	180-210	0.77
240	6.39	25.56	0.84	210-240	0.91
270	5.85	26.32	0.76	240-270	1.11
300	5.40	27.02	0.70	270-300	1.47
330	5.03	27.68	0.65	300-330	2.29
360	4.71	28.28	0.61	330-360	18.07
390	4.44	28.86	0.57	360-390	3.42
420	4.20	29.40	0.54	390-420	1.77
450	3.99	29.91	0.51	420-450	1.26
480	3.80	30.39	0.49	450-480	1.00
510	3.63	30.86	0.46	480-510	0.84
540	3.48	31.30	0.44	510-540	0.72
570	3.34	31.73	0.43	540-570	0.64
600	3.21	32.14	0.41	570-600	0.58
630	3.10	32.53	0.39	600-630	0.53
660	2.99	32.91	0.38	630-660	0.49
690	2.89	33.28	0.37	660-690	0.45
720	2.80	33.64	0.36	690-720	0.42

Figura 117

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Apacheta

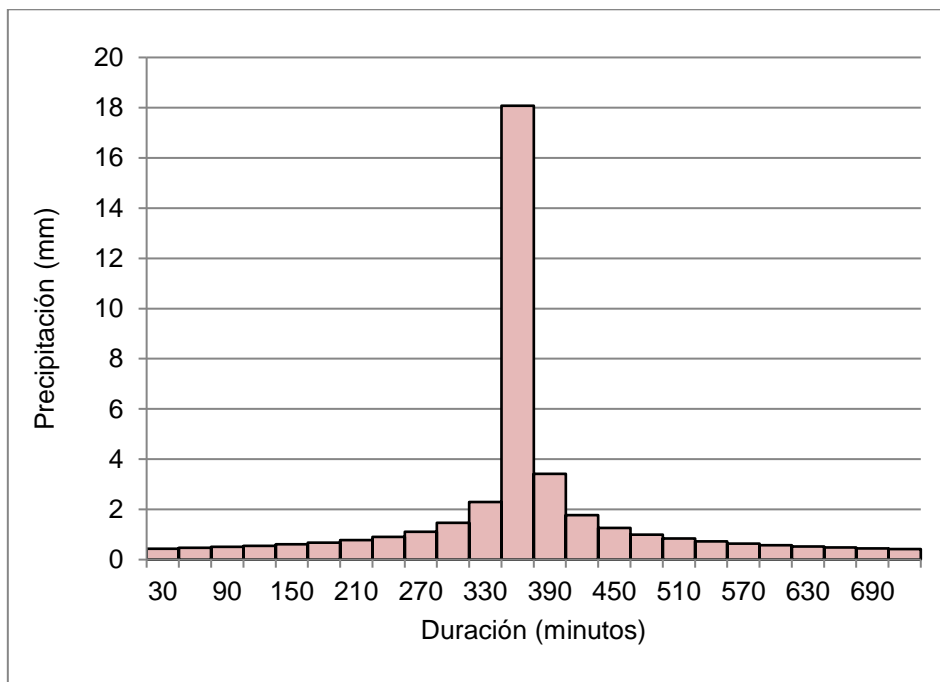


Tabla 29

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Apacheta

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	34.65	17.32	17.32	0-30	0.50
60	20.60	20.60	3.28	30-60	0.53
90	15.20	22.80	2.20	60-90	0.58
120	12.25	24.50	1.70	90-120	0.63
150	10.36	25.91	1.41	120-150	0.69
180	9.04	27.11	1.21	150-180	0.78
210	8.05	28.18	1.07	180-210	0.88
240	7.28	29.14	0.96	210-240	1.04
270	6.67	30.01	0.87	240-270	1.27
300	6.16	30.81	0.80	270-300	1.67
330	5.74	31.55	0.74	300-330	2.61
360	5.37	32.24	0.69	330-360	20.60
390	5.06	32.90	0.65	360-390	3.90
420	4.79	33.51	0.62	390-420	2.02
450	4.55	34.09	0.58	420-450	1.44
480	4.33	34.65	0.55	450-480	1.14
510	4.14	35.18	0.53	480-510	0.95
540	3.96	35.68	0.51	510-540	0.83
570	3.81	36.17	0.49	540-570	0.73
600	3.66	36.64	0.47	570-600	0.66
630	3.53	37.09	0.45	600-630	0.60
660	3.41	37.52	0.43	630-660	0.56
690	3.30	37.94	0.42	660-690	0.52
720	3.20	38.34	0.41	690-720	0.48

Figura 118

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Apacheta

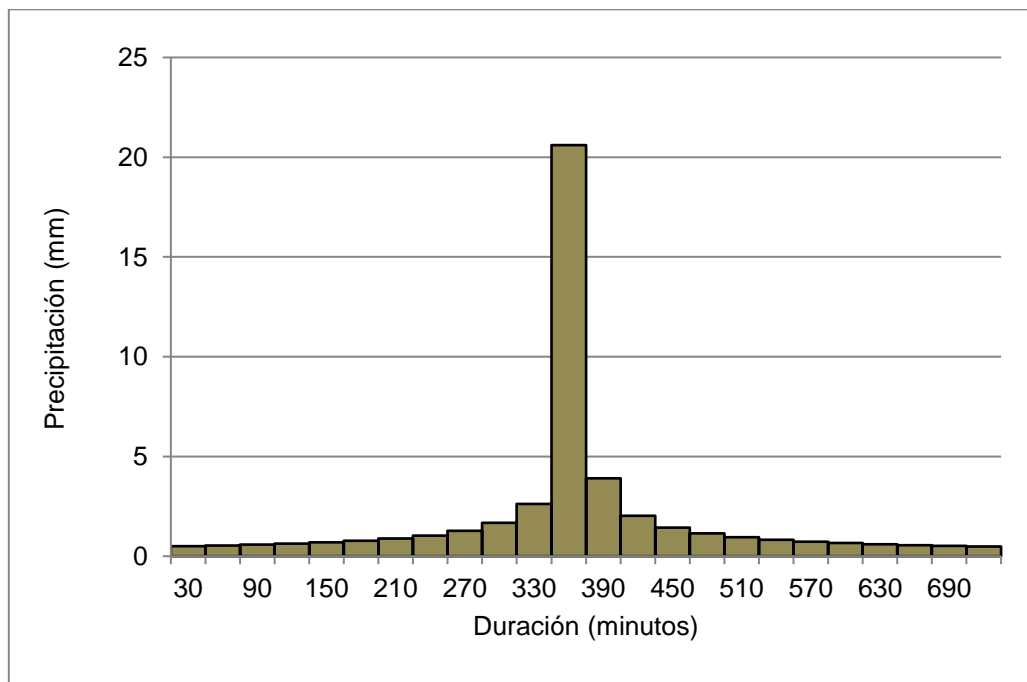


Tabla 30

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 2 años de TR de la subcuenca Cachi

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	25.38	12.69	12.69	0-30	0.37
60	15.09	15.09	2.40	30-60	0.39
90	11.13	16.70	1.61	60-90	0.42
120	8.97	17.95	1.25	90-120	0.46
150	7.59	18.97	1.03	120-150	0.51
180	6.62	19.86	0.88	150-180	0.57
210	5.90	20.64	0.78	180-210	0.65
240	5.34	21.34	0.70	210-240	0.76
270	4.88	21.98	0.64	240-270	0.93
300	4.51	22.57	0.59	270-300	1.22
330	4.20	23.11	0.54	300-330	1.91
360	3.94	23.62	0.51	330-360	15.09
390	3.71	24.09	0.48	360-390	2.86
420	3.51	24.55	0.45	390-420	1.48
450	3.33	24.97	0.43	420-450	1.05
480	3.17	25.38	0.41	450-480	0.83
510	3.03	25.77	0.39	480-510	0.70
540	2.90	26.14	0.37	510-540	0.60
570	2.79	26.49	0.36	540-570	0.54
600	2.68	26.83	0.34	570-600	0.48
630	2.59	27.16	0.33	600-630	0.44
660	2.50	27.48	0.32	630-660	0.41
690	2.42	27.79	0.31	660-690	0.38
720	2.34	28.09	0.30	690-720	0.35

Figura 119

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Cachi

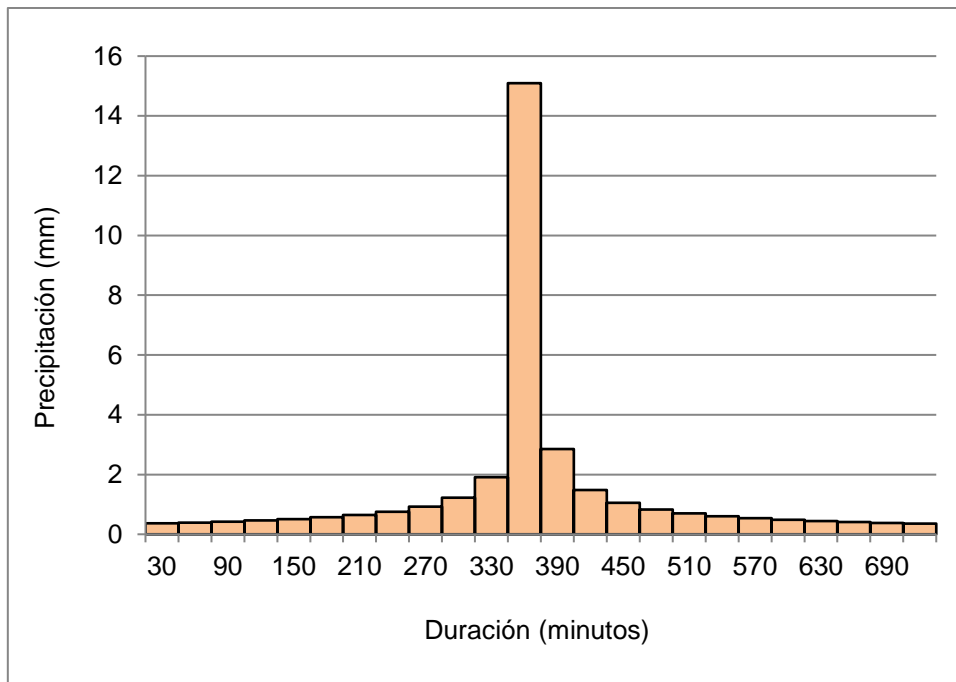


Tabla 31

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 5 años de TR de la subcuenca Cachi

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	30.62	15.31	15.31	0-30	0.44
60	18.21	18.21	2.90	30-60	0.47
90	13.43	20.15	1.94	60-90	0.51
120	10.83	21.65	1.50	90-120	0.56
150	9.16	22.89	1.24	120-150	0.61
180	7.99	23.96	1.07	150-180	0.68
210	7.12	24.90	0.94	180-210	0.78
240	6.44	25.75	0.85	210-240	0.92
270	5.89	26.52	0.77	240-270	1.12
300	5.45	27.23	0.71	270-300	1.48
330	5.07	27.88	0.66	300-330	2.31
360	4.75	28.50	0.61	330-360	18.21
390	4.47	29.07	0.58	360-390	3.45
420	4.23	29.62	0.54	390-420	1.79
450	4.02	30.13	0.52	420-450	1.27
480	3.83	30.62	0.49	450-480	1.01
510	3.66	31.09	0.47	480-510	0.84
540	3.50	31.54	0.45	510-540	0.73
570	3.36	31.97	0.43	540-570	0.65
600	3.24	32.38	0.41	570-600	0.58
630	3.12	32.78	0.40	600-630	0.53
660	3.01	33.16	0.38	630-660	0.49
690	2.92	33.53	0.37	660-690	0.46
720	2.82	33.89	0.36	690-720	0.43

Figura 120

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años) subcuenca Cachi

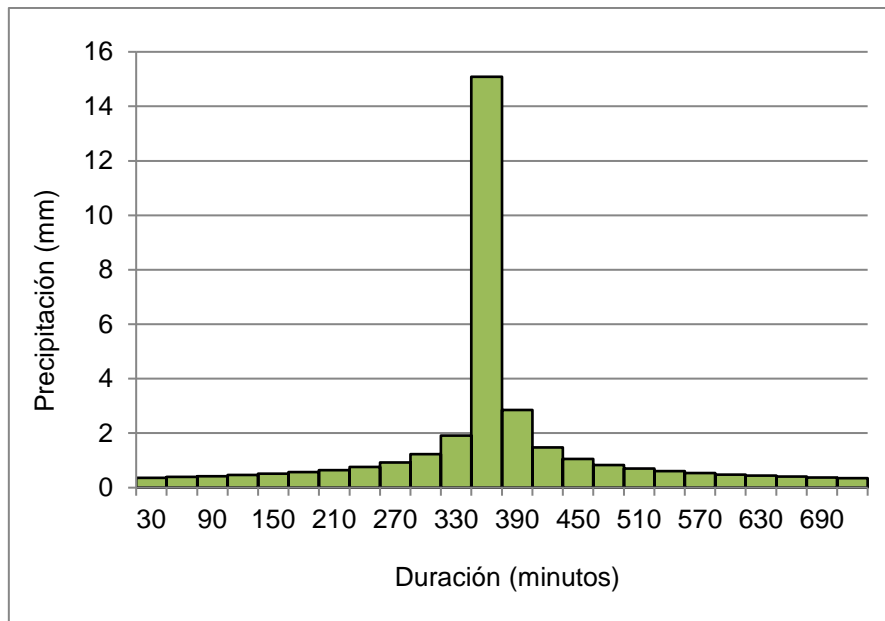


Tabla 32

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 10 años de TR de la subcuenca Cachi

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	33.66	16.83	16.83	0-30	0.48
60	20.01	20.01	3.18	30-60	0.52
90	14.77	22.15	2.14	60-90	0.56
120	11.90	23.80	1.65	90-120	0.61
150	10.07	25.17	1.37	120-150	0.67
180	8.78	26.34	1.17	150-180	0.75
210	7.82	27.38	1.03	180-210	0.86
240	7.08	28.31	0.93	210-240	1.01
270	6.48	29.15	0.85	240-270	1.23
300	5.99	29.93	0.78	270-300	1.62
330	5.57	30.65	0.72	300-330	2.54
360	5.22	31.32	0.67	330-360	20.01
390	4.92	31.96	0.63	360-390	3.79
420	4.65	32.56	0.60	390-420	1.96
450	4.42	33.12	0.57	420-450	1.40
480	4.21	33.66	0.54	450-480	1.11
510	4.02	34.17	0.51	480-510	0.93
540	3.85	34.67	0.49	510-540	0.80
570	3.70	35.14	0.47	540-570	0.71
600	3.56	35.59	0.45	570-600	0.64
630	3.43	36.03	0.44	600-630	0.58
660	3.31	36.45	0.42	630-660	0.54
690	3.20	36.86	0.41	660-690	0.50
720	3.10	37.25	0.39	690-720	0.47

Figura 121

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años) subcuenca Cachi

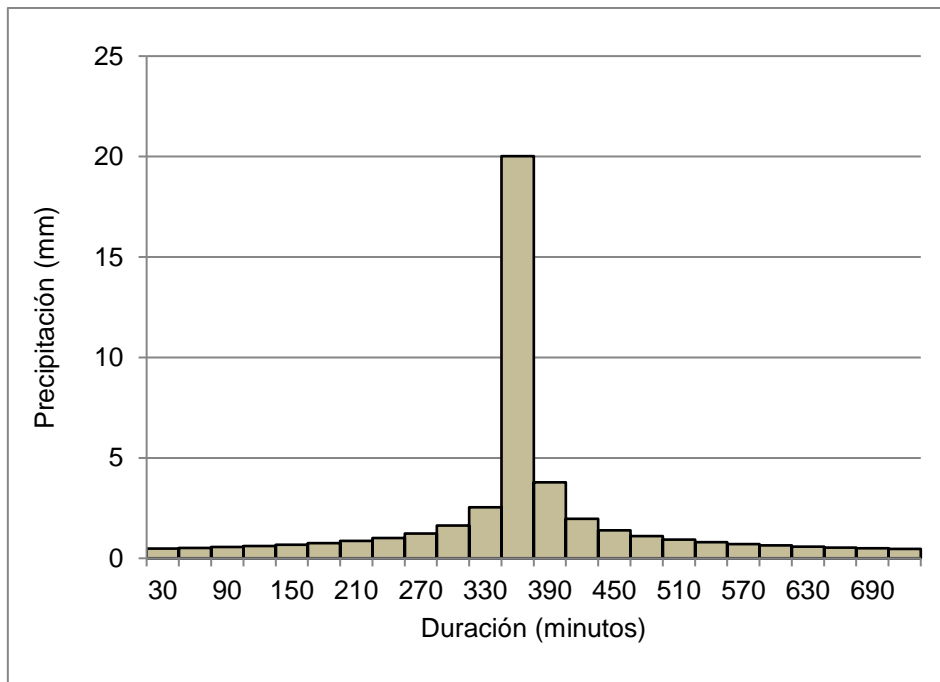


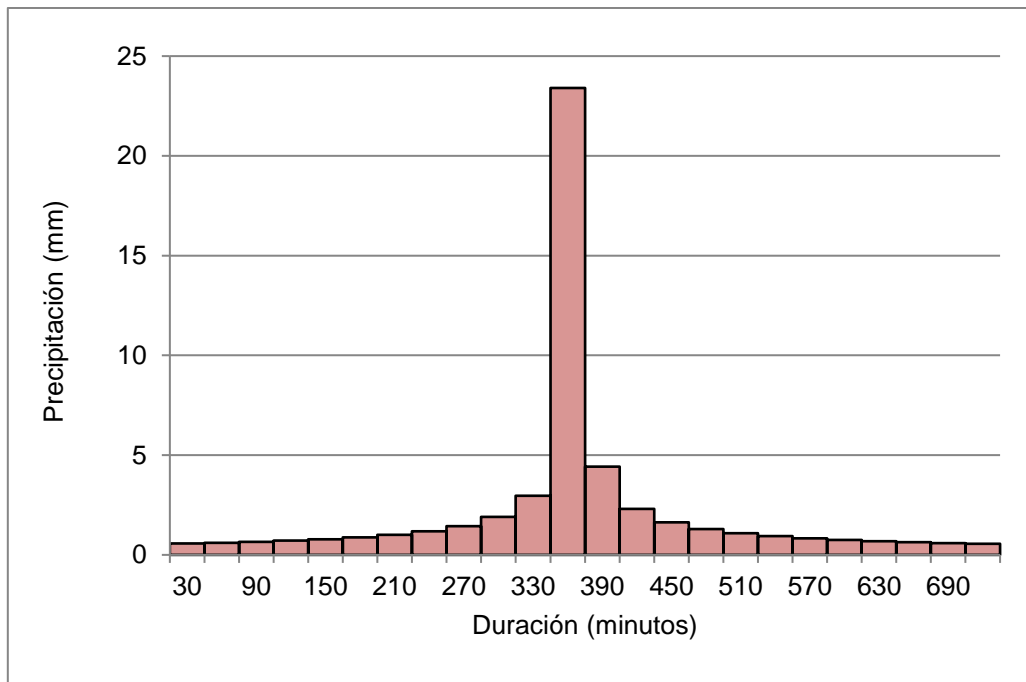
Tabla 33

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo I para 50 años de TR en la subcuenca Cachi

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
30	39.36	19.68	19.68	0-30	0.57
60	23.40	23.40	3.72	30-60	0.61
90	17.27	25.90	2.50	60-90	0.66
120	13.92	27.83	1.93	90-120	0.71
150	11.77	29.43	1.60	120-150	0.79
180	10.27	30.80	1.37	150-180	0.88
210	9.15	32.01	1.21	180-210	1.00
240	8.27	33.10	1.09	210-240	1.18
270	7.57	34.09	0.99	240-270	1.44
300	7.00	35.00	0.91	270-300	1.90
330	6.52	35.84	0.84	300-330	2.97
360	6.10	36.63	0.79	330-360	23.40
390	5.75	37.37	0.74	360-390	4.43
420	5.44	38.07	0.70	390-420	2.30
450	5.16	38.73	0.66	420-450	1.63
480	4.92	39.36	0.63	450-480	1.29
510	4.70	39.96	0.60	480-510	1.08
540	4.50	40.54	0.58	510-540	0.94
570	4.32	41.09	0.55	540-570	0.83
600	4.16	41.62	0.53	570-600	0.75
630	4.01	42.13	0.51	600-630	0.68
660	3.87	42.62	0.49	630-660	0.63
690	3.75	43.10	0.48	660-690	0.59
720	3.63	43.56	0.46	690-720	0.55

Figura 122

Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años) subcuenca Cachi



3.1.14 *Discusión de hietogramas de diseño por Dyck Peschke*

Se aplicó el método de bloques alternos para discretizar la lluvia por el método de Dyck Peschke y así poder elaborar hietogramas, este método se fundamenta en una estructura temporal simétrica y predefinida, que organiza la lluvia en intervalos de intensidad decreciente de manera alternada. Si bien esta metodología ha sido ampliamente utilizada en proyectos de ingeniería hidrológica por su sencillez operativa y reproducibilidad, su rigidez temporal presenta limitaciones significativas al momento de representar la variabilidad real de eventos extremos en la cuenca del río Cachi.

Para facilitar la comparación entre metodologías, se adoptó la siguiente clasificación:

- Hietograma Tipo I: Corresponde al método de bloques alternos de Dyck y Peschke.
- Hietograma Tipo II: Se asocia a las curvas de Huff del segundo cuartil, perteneciente a la tabla de la región A12.

3.2 Del segundo objetivo específico: Distribución temporal de lluvias mediante curvas de Huff

3.2.1 *Hietogramas de diseño de curvas de Huff*

Los hietogramas de diseño obtenidos mediante la metodología de curvas de Huff representaron a la distribución temporal de la precipitación asociada a eventos máximos de tormenta en la cuenca del río Cachi. Para su elaboración, las lluvias de diseño asignadas a cada periodo de retorno fueron discretizadas en intervalos porcentuales de duración, lo cual permitió identificar la variación temporal de la intensidad de la lluvia dentro de un evento extremo.

Las gráficas obtenidas muestran que los hietogramas presentan una estructura característica de intensidad creciente hacia el intervalo central del evento, correspondiente al segundo cuartil de las tablas de los coeficientes de duración adimensional tomadas para la región A12, seleccionado por ser el más representativo según el estudio de tormentas pluviométricas, desarrollado por Quijada en el año 2020, quien identificó que la mayor concentración de lluvia ocurre típicamente en la mitad del evento para condiciones hidrometeorológicas del territorio peruano. Esta distribución temporal realista permitió construir una lluvia efectiva más consistente y ajustada al comportamiento observado en campo.

Tabla 34*Distribución de lluvia de diseño (mm) para Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.04	0.02	30.00	0.69	0.69
0.08	0.04	60.00	1.42	0.73
0.13	0.07	90.00	2.18	0.76
0.17	0.09	120.00	3.00	0.83
0.21	0.12	150.00	4.09	1.09
0.25	0.17	180.00	5.61	1.52
0.29	0.24	210.00	7.92	2.31
0.33	0.32	240.00	10.69	2.77
0.38	0.42	270.00	13.76	3.07
0.42	0.51	300.00	16.83	3.07
0.46	0.59	330.00	19.31	2.48
0.50	0.67	360.00	22.01	2.71
0.54	0.73	390.00	24.02	2.01
0.58	0.79	420.00	25.97	1.95
0.63	0.83	450.00	27.32	1.35
0.67	0.86	480.00	28.38	1.06
0.71	0.89	510.00	29.50	1.12
0.75	0.92	540.00	30.46	0.96
0.79	0.95	570.00	31.25	0.79
0.83	0.96	600.00	31.71	0.46
0.88	0.97	630.00	32.14	0.43
0.92	0.98	660.00	32.44	0.30
0.96	0.99	690.00	32.70	0.26
1.00	1.00	720.00	33.00	0.30

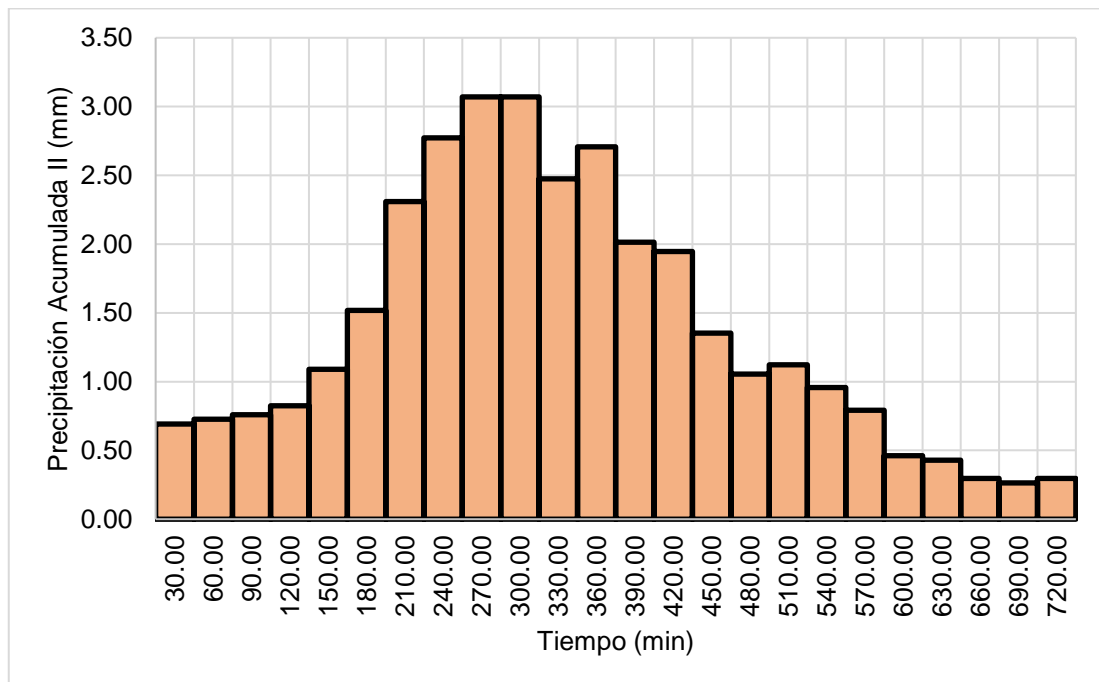
Figura 123*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo*

Tabla 35*Distribución de lluvia de diseño (mm) para Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.78	0.78
0.083	0.043	60	1.60	0.82
0.125	0.066	90	2.45	0.85
0.167	0.091	120	3.38	0.93
0.208	0.124	150	4.60	1.22
0.25	0.17	180	6.31	1.71
0.292	0.24	210	8.90	2.60
0.333	0.324	240	12.02	3.12
0.375	0.417	270	15.47	3.45
0.417	0.51	300	18.92	3.45
0.458	0.585	330	21.70	2.78
0.5	0.667	360	24.75	3.04
0.542	0.728	390	27.01	2.26
0.583	0.787	420	29.20	2.19
0.625	0.828	450	30.72	1.52
0.667	0.86	480	31.91	1.19
0.708	0.894	510	33.17	1.26
0.75	0.923	540	34.24	1.08
0.792	0.947	570	35.13	0.89
0.833	0.961	600	35.65	0.52
0.875	0.974	630	36.14	0.48
0.917	0.983	660	36.47	0.33
0.958	0.991	690	36.77	0.30
1	1	720	37.10	0.33

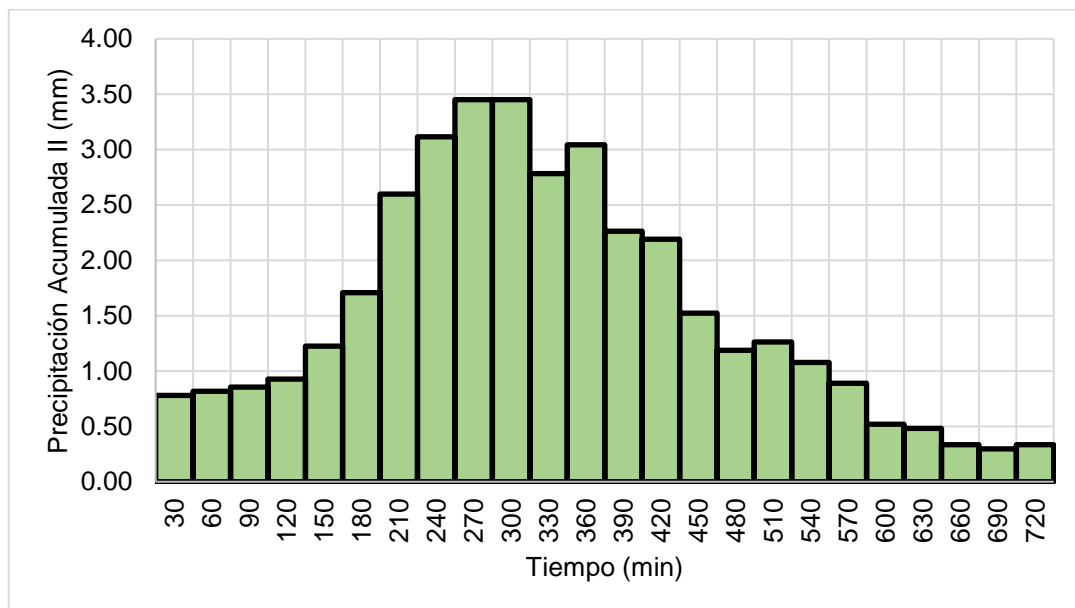
Figura 124*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Chicllarazo*

Tabla 36

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.83	0.83
0.083	0.043	60	1.69	0.87
0.125	0.066	90	2.60	0.91
0.167	0.091	120	3.59	0.99
0.208	0.124	150	4.89	1.30
0.25	0.17	180	6.70	1.81
0.292	0.24	210	9.46	2.76
0.333	0.324	240	12.77	3.31
0.375	0.417	270	16.43	3.66
0.417	0.51	300	20.09	3.66
0.458	0.585	330	23.05	2.96
0.5	0.667	360	26.28	3.23
0.542	0.728	390	28.68	2.40
0.583	0.787	420	31.01	2.32
0.625	0.828	450	32.62	1.62
0.667	0.86	480	33.88	1.26
0.708	0.894	510	35.22	1.34
0.75	0.923	540	36.37	1.14
0.792	0.947	570	37.31	0.95
0.833	0.961	600	37.86	0.55
0.875	0.974	630	38.38	0.51
0.917	0.983	660	38.73	0.35
0.958	0.991	690	39.05	0.32
1	1	720	39.40	0.35

Figura 125

Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuenca Chicllarazo

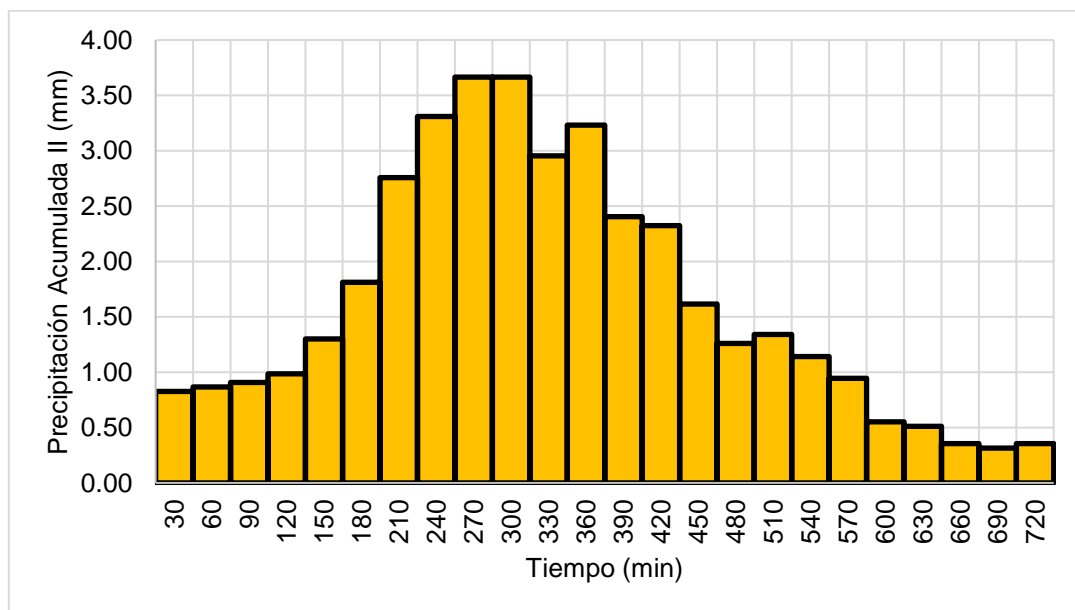


Tabla 37

Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.92	0.92
0.083	0.043	60	1.88	0.96
0.125	0.066	90	2.88	1.01
0.167	0.091	120	3.98	1.09
0.208	0.124	150	5.42	1.44
0.25	0.17	180	7.43	2.01
0.292	0.24	210	10.49	3.06
0.333	0.324	240	14.16	3.67
0.375	0.417	270	18.22	4.06
0.417	0.51	300	22.29	4.06
0.458	0.585	330	25.56	3.28
0.5	0.667	360	29.15	3.58
0.542	0.728	390	31.81	2.67
0.583	0.787	420	34.39	2.58
0.625	0.828	450	36.18	1.79
0.667	0.86	480	37.58	1.40
0.708	0.894	510	39.07	1.49
0.75	0.923	540	40.34	1.27
0.792	0.947	570	41.38	1.05
0.833	0.961	600	42.00	0.61
0.875	0.974	630	42.56	0.57
0.917	0.983	660	42.96	0.39
0.958	0.991	690	43.31	0.35
1	1	720	43.70	0.39

Figura 126

Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuenca Chicllarazo

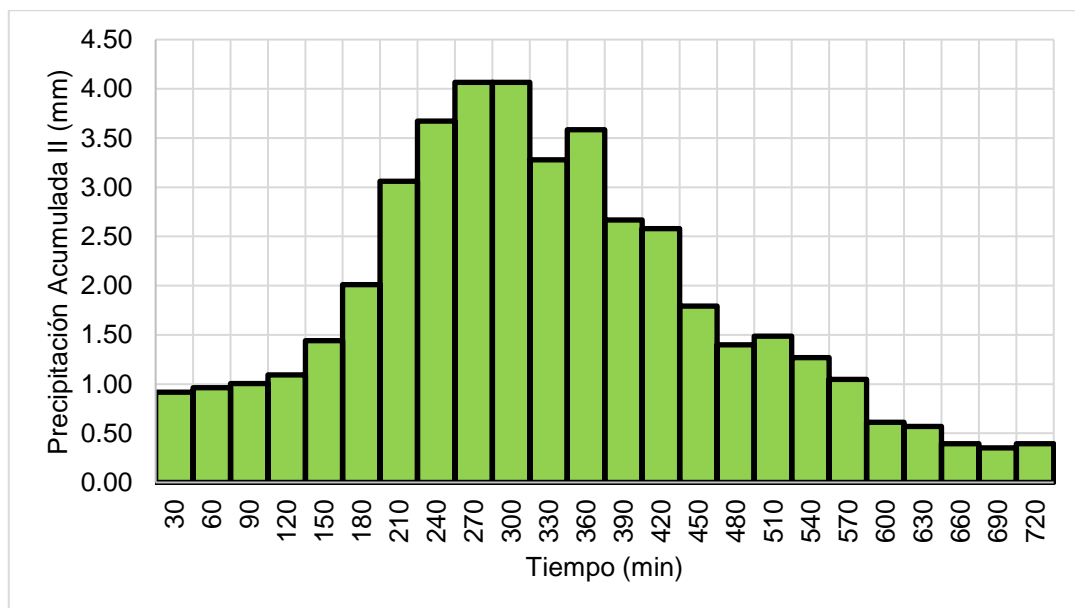


Tabla 38*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (2 años) subcuenca Apacheta*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.65	0.65
0.083	0.043	60	1.32	0.68
0.125	0.066	90	2.03	0.71
0.167	0.091	120	2.80	0.77
0.208	0.124	150	3.82	1.02
0.25	0.17	180	5.24	1.42
0.292	0.24	210	7.39	2.16
0.333	0.324	240	9.98	2.59
0.375	0.417	270	12.84	2.86
0.417	0.51	300	15.71	2.86
0.458	0.585	330	18.02	2.31
0.5	0.667	360	20.54	2.53
0.542	0.728	390	22.42	1.88
0.583	0.787	420	24.24	1.82
0.625	0.828	450	25.50	1.26
0.667	0.86	480	26.49	0.99
0.708	0.894	510	27.54	1.05
0.75	0.923	540	28.43	0.89
0.792	0.947	570	29.17	0.74
0.833	0.961	600	29.60	0.43
0.875	0.974	630	30.00	0.40
0.917	0.983	660	30.28	0.28
0.958	0.991	690	30.52	0.25
1	1	720	30.80	0.28

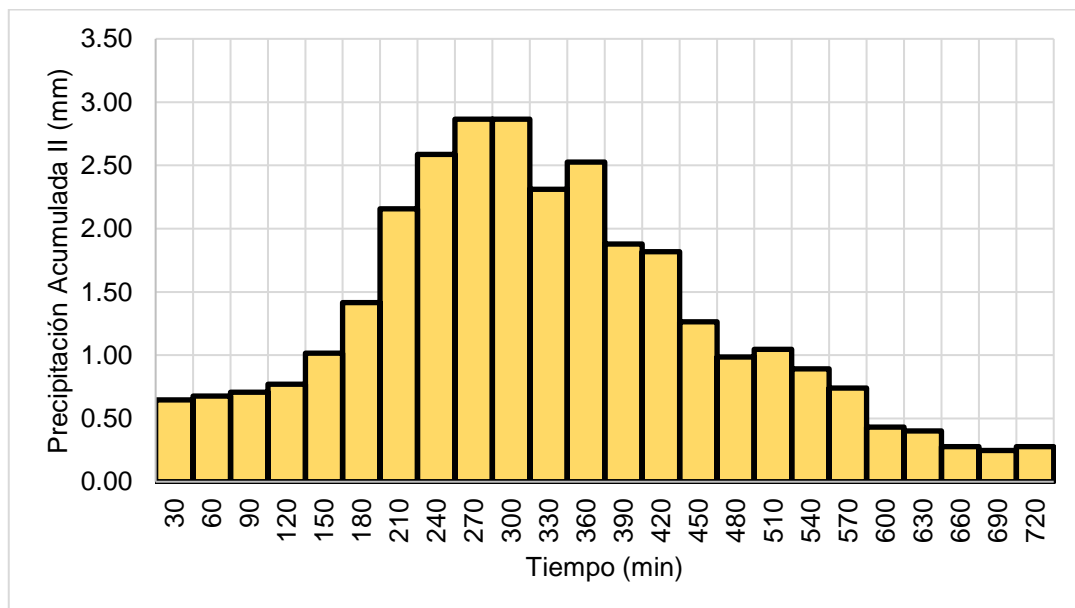
Figura 127*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Apacheta*

Tabla 39*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (5 años) subcuenca Apacheta*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.77	0.77
0.083	0.043	60	1.58	0.81
0.125	0.066	90	2.43	0.85
0.167	0.091	120	3.35	0.92
0.208	0.124	150	4.56	1.21
0.25	0.17	180	6.26	1.69
0.292	0.24	210	8.83	2.58
0.333	0.324	240	11.92	3.09
0.375	0.417	270	15.35	3.42
0.417	0.51	300	18.77	3.42
0.458	0.585	330	21.53	2.76
0.5	0.667	360	24.55	3.02
0.542	0.728	390	26.79	2.24
0.583	0.787	420	28.96	2.17
0.625	0.828	450	30.47	1.51
0.667	0.86	480	31.65	1.18
0.708	0.894	510	32.90	1.25
0.75	0.923	540	33.97	1.07
0.792	0.947	570	34.85	0.88
0.833	0.961	600	35.36	0.52
0.875	0.974	630	35.84	0.48
0.917	0.983	660	36.17	0.33
0.958	0.991	690	36.47	0.29
1	1	720	36.80	0.33

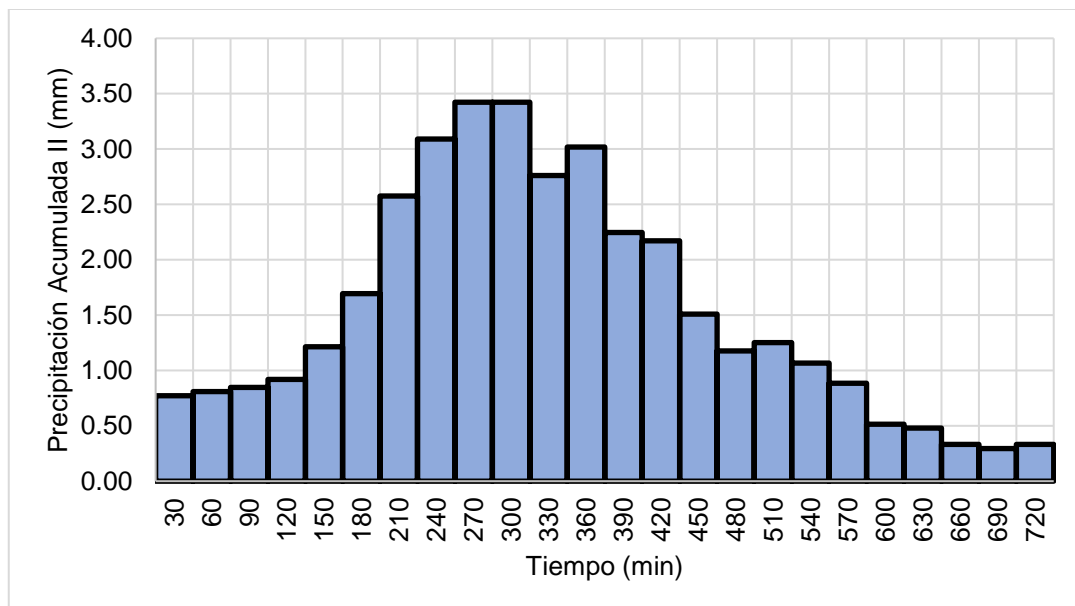
Figura 128*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Apacheta*

Tabla 40*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuena Apacheta*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.84	0.84
0.083	0.043	60	1.72	0.88
0.125	0.066	90	2.64	0.92
0.167	0.091	120	3.64	1.00
0.208	0.124	150	4.96	1.32
0.25	0.17	180	6.80	1.84
0.292	0.24	210	9.60	2.80
0.333	0.324	240	12.96	3.36
0.375	0.417	270	16.68	3.72
0.417	0.51	300	20.40	3.72
0.458	0.585	330	23.40	3.00
0.5	0.667	360	26.68	3.28
0.542	0.728	390	29.12	2.44
0.583	0.787	420	31.48	2.36
0.625	0.828	450	33.12	1.64
0.667	0.86	480	34.40	1.28
0.708	0.894	510	35.76	1.36
0.75	0.923	540	36.92	1.16
0.792	0.947	570	37.88	0.96
0.833	0.961	600	38.44	0.56
0.875	0.974	630	38.96	0.52
0.917	0.983	660	39.32	0.36
0.958	0.991	690	39.64	0.32
1	1	720	40.00	0.36

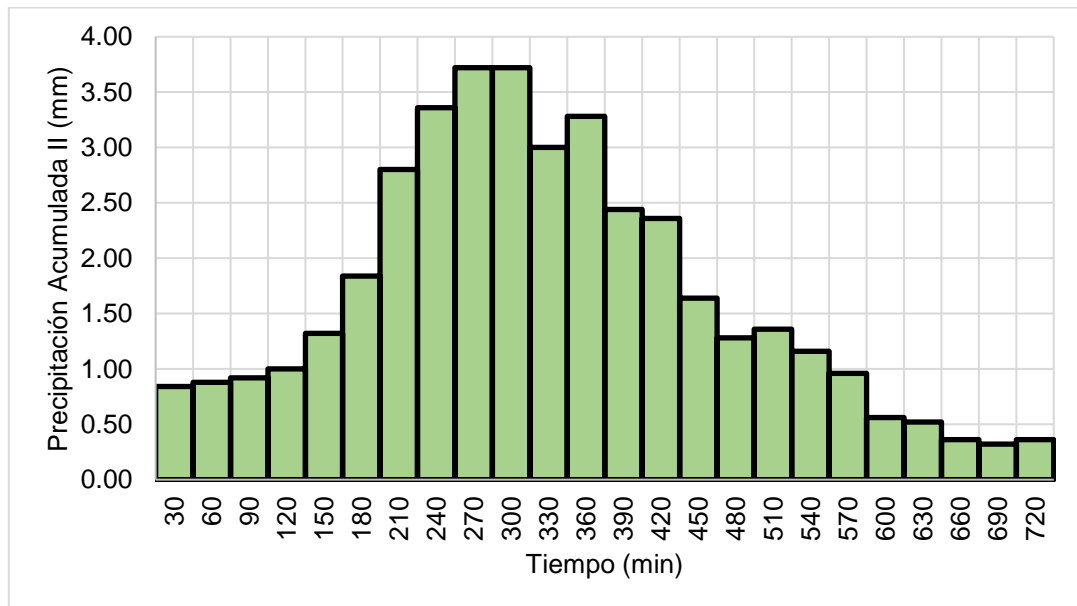
Figura 129*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuena Apacheta*

Tabla 41*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuena Apacheta*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.96	0.96
0.083	0.043	60	1.96	1.00
0.125	0.066	90	3.01	1.05
0.167	0.091	120	4.15	1.14
0.208	0.124	150	5.65	1.50
0.25	0.17	180	7.75	2.10
0.292	0.24	210	10.94	3.19
0.333	0.324	240	14.77	3.83
0.375	0.417	270	19.02	4.24
0.417	0.51	300	23.26	4.24
0.458	0.585	330	26.68	3.42
0.5	0.667	360	30.42	3.74
0.542	0.728	390	33.20	2.78
0.583	0.787	420	35.89	2.69
0.625	0.828	450	37.76	1.87
0.667	0.86	480	39.22	1.46
0.708	0.894	510	40.77	1.55
0.75	0.923	540	42.09	1.32
0.792	0.947	570	43.18	1.09
0.833	0.961	600	43.82	0.64
0.875	0.974	630	44.41	0.59
0.917	0.983	660	44.82	0.41
0.958	0.991	690	45.19	0.36
1	1	720	45.60	0.41

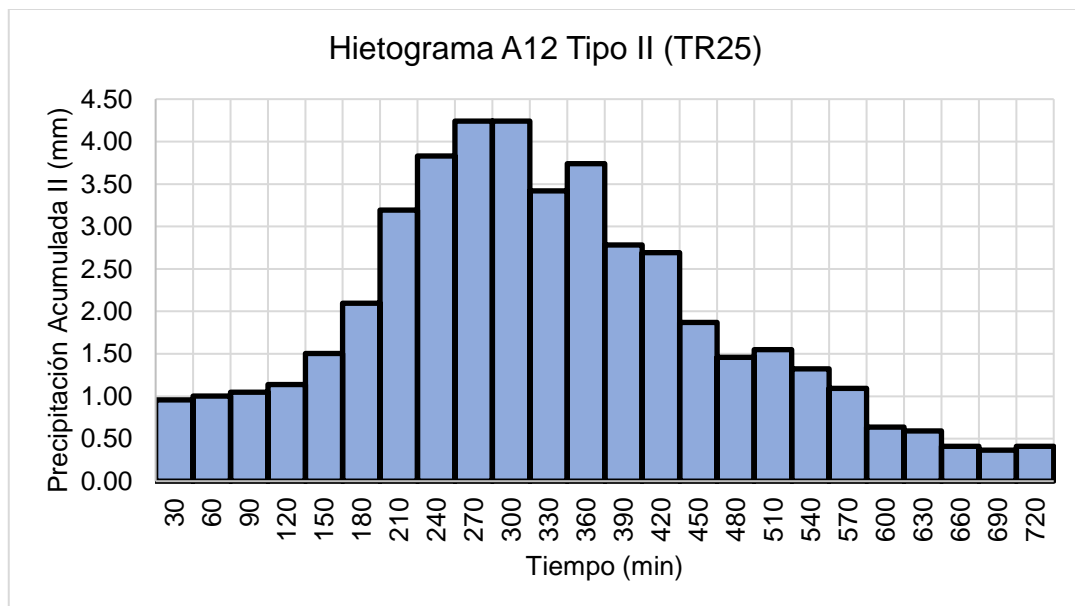
Figura 130*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuena Apacheta*

Tabla 42*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (2 años) subcuenca Cachi*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.70	0.70
0.083	0.043	60	1.44	0.73
0.125	0.066	90	2.20	0.77
0.167	0.091	120	3.04	0.84
0.208	0.124	150	4.14	1.10
0.25	0.17	180	5.68	1.54
0.292	0.24	210	8.02	2.34
0.333	0.324	240	10.82	2.81
0.375	0.417	270	13.93	3.11
0.417	0.51	300	17.03	3.11
0.458	0.585	330	19.54	2.51
0.5	0.667	360	22.28	2.74
0.542	0.728	390	24.32	2.04
0.583	0.787	420	26.29	1.97
0.625	0.828	450	27.66	1.37
0.667	0.86	480	28.72	1.07
0.708	0.894	510	29.86	1.14
0.75	0.923	540	30.83	0.97
0.792	0.947	570	31.63	0.80
0.833	0.961	600	32.10	0.47
0.875	0.974	630	32.53	0.43
0.917	0.983	660	32.83	0.30
0.958	0.991	690	33.10	0.27
1	1	720	33.40	0.30

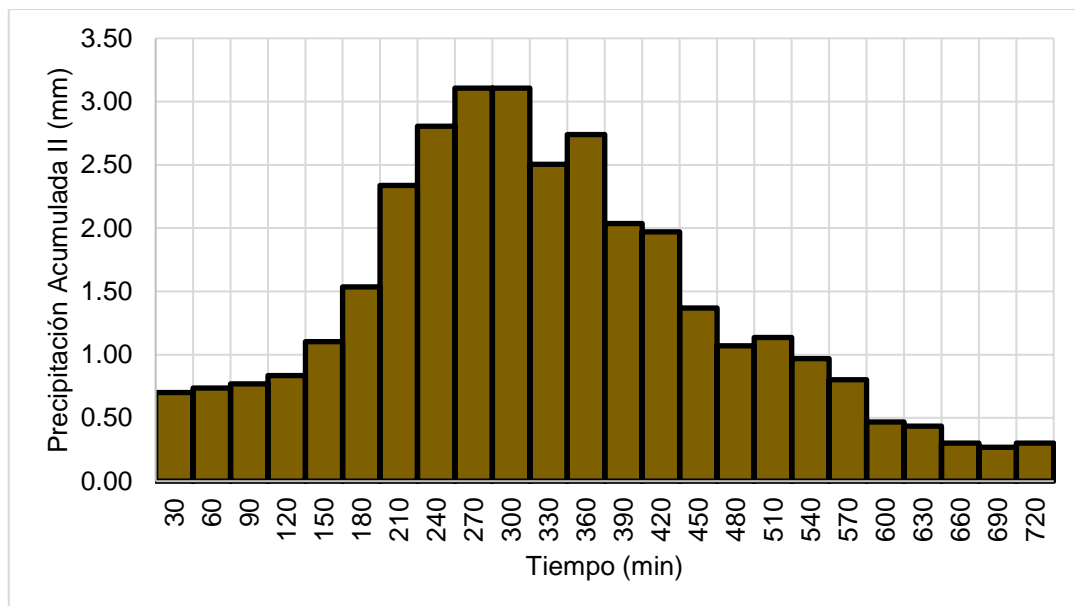
Figura 131*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años) subcuenca Cachi*

Tabla 43*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (5 años) subcuenca Cachi*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.85	0.85
0.083	0.043	60	1.73	0.89
0.125	0.066	90	2.66	0.93
0.167	0.091	120	3.67	1.01
0.208	0.124	150	5.00	1.33
0.25	0.17	180	6.85	1.85
0.292	0.24	210	9.67	2.82
0.333	0.324	240	13.06	3.39
0.375	0.417	270	16.81	3.75
0.417	0.51	300	20.55	3.75
0.458	0.585	330	23.58	3.02
0.5	0.667	360	26.88	3.30
0.542	0.728	390	29.34	2.46
0.583	0.787	420	31.72	2.38
0.625	0.828	450	33.37	1.65
0.667	0.86	480	34.66	1.29
0.708	0.894	510	36.03	1.37
0.75	0.923	540	37.20	1.17
0.792	0.947	570	38.16	0.97
0.833	0.961	600	38.73	0.56
0.875	0.974	630	39.25	0.52
0.917	0.983	660	39.61	0.36
0.958	0.991	690	39.94	0.32
1	1	720	40.30	0.36

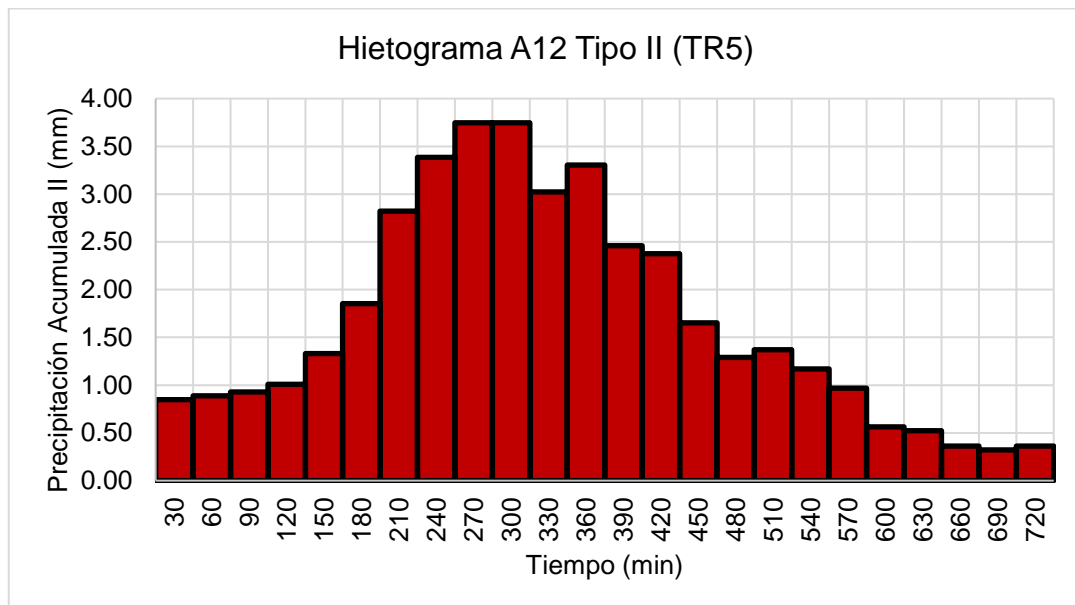
Figura 132*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años) subcuenca Cachi*

Tabla 44*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (10 años) subcuenca Cachi*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	0.93	0.93
0.083	0.043	60	1.90	0.97
0.125	0.066	90	2.92	1.02
0.167	0.091	120	4.03	1.11
0.208	0.124	150	5.49	1.46
0.25	0.17	180	7.53	2.04
0.292	0.24	210	10.63	3.10
0.333	0.324	240	14.35	3.72
0.375	0.417	270	18.47	4.12
0.417	0.51	300	22.59	4.12
0.458	0.585	330	25.92	3.32
0.5	0.667	360	29.55	3.63
0.542	0.728	390	32.25	2.70
0.583	0.787	420	34.86	2.61
0.625	0.828	450	36.68	1.82
0.667	0.86	480	38.10	1.42
0.708	0.894	510	39.60	1.51
0.75	0.923	540	40.89	1.28
0.792	0.947	570	41.95	1.06
0.833	0.961	600	42.57	0.62
0.875	0.974	630	43.15	0.58
0.917	0.983	660	43.55	0.40
0.958	0.991	690	43.90	0.35
1	1	720	44.30	0.40

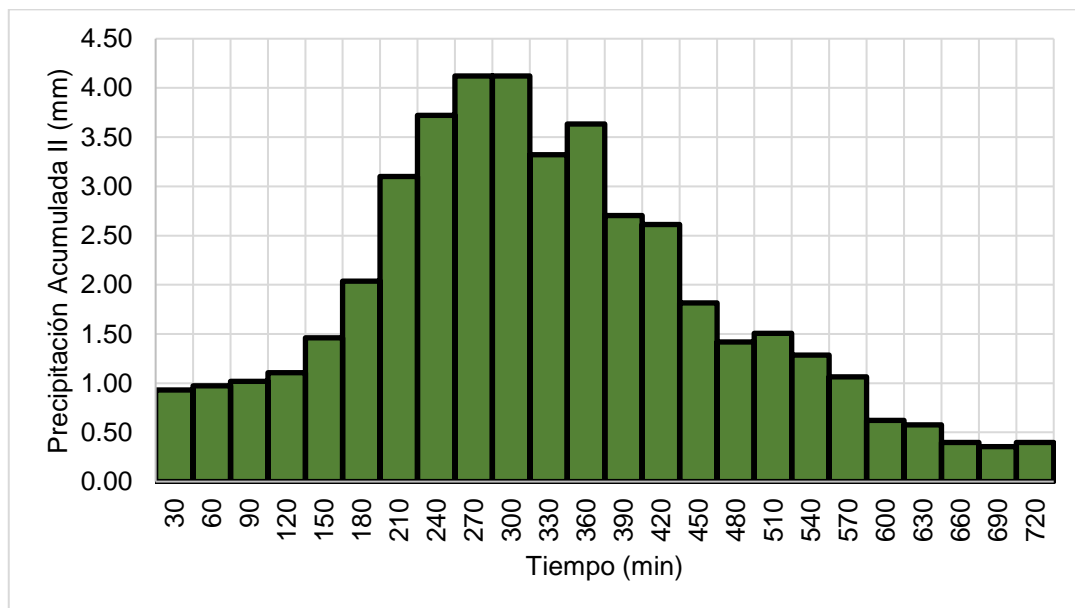
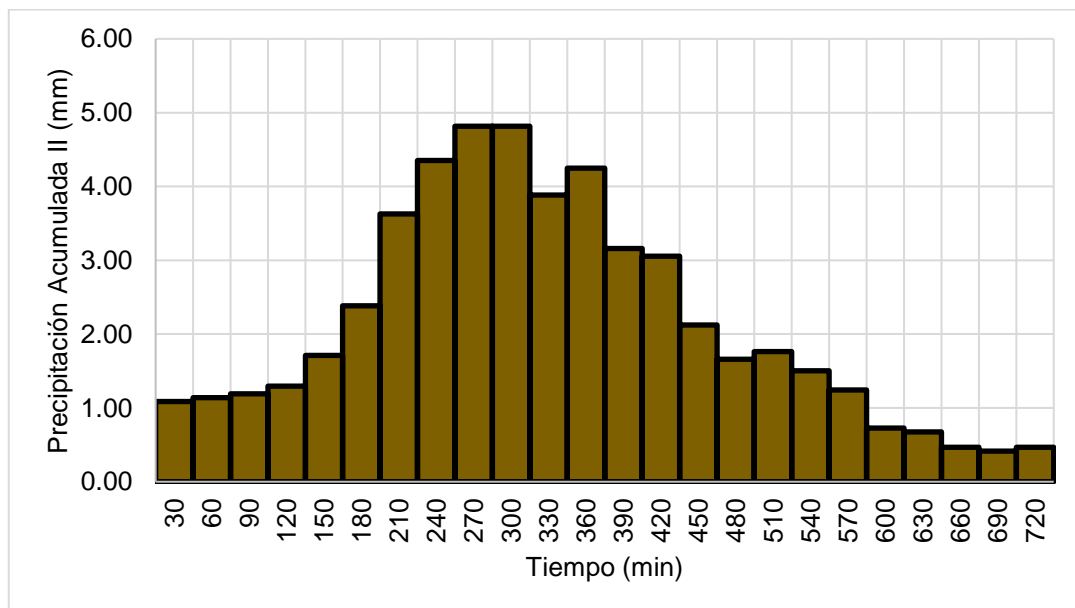
Figura 133*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años) subcuenca Cachi*

Tabla 45*Distribución de lluvia de diseño (mm) tipo II para Tr (50 años) subcuenca Cachi*

Duración (%)	Cuartil II 50%	Tiempo (min)	Precipitación Acumulada II (mm)	Hietograma II
0	0	0	0.00	0.00
0.042	0.021	30	1.09	1.09
0.083	0.043	60	2.23	1.14
0.125	0.066	90	3.42	1.19
0.167	0.091	120	4.71	1.30
0.208	0.124	150	6.42	1.71
0.25	0.17	180	8.81	2.38
0.292	0.24	210	12.43	3.63
0.333	0.324	240	16.78	4.35
0.375	0.417	270	21.60	4.82
0.417	0.51	300	26.42	4.82
0.458	0.585	330	30.30	3.89
0.5	0.667	360	34.55	4.25
0.542	0.728	390	37.71	3.16
0.583	0.787	420	40.77	3.06
0.625	0.828	450	42.89	2.12
0.667	0.86	480	44.55	1.66
0.708	0.894	510	46.31	1.76
0.75	0.923	540	47.81	1.50
0.792	0.947	570	49.05	1.24
0.833	0.961	600	49.78	0.73
0.875	0.974	630	50.45	0.67
0.917	0.983	660	50.92	0.47
0.958	0.991	690	51.33	0.41
1	1	720	51.80	0.47

Figura 134*Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años) subcuenca Cachi*

3.2.2 *Discusión de los hietogramas de diseño por curvas de Huff*

De los antecedentes consultados, la investigación desarrollada por Quijada (2020), demostró que la caracterización de eventos de tormentas pluviométricas a partir del análisis de la distribución temporal de la precipitación permite representar con mayor precisión el comportamiento real de las lluvias intensas. Su estudio destacó que el uso de metodologías basadas en información pluviométrica regional, como las curvas de Huff, ofrece una alternativa más adecuada frente a métodos empíricos tradicionales, al reflejar la variabilidad temporal y espacial de la lluvia en eventos extremos y mejorar la estimación de caudales pico.

Es por ello que se usaron sus tablas de coeficientes adimensionales para discretizar la lluvia de diseño y poder representar la distribución de la lluvia en toda la cuenca del río Cachi como se muestra en las gráficas para los diferentes periodos de retorno.

3.3 Del tercer objetivo específico: Modelamiento hidrológico HEC-HMS

3.3.1 *Comparación de caudales máximos obtenidos.*

A través del modelamiento hidrológico en HEC-HMS, se generaron hidrogramas de salida para cada subcuenca utilizando cada método de distribución de lluvias. De estos, se creó una tabla comparativa que muestra los diferentes periodos de retorno analizados. También se elaboraron los gráficos comparativos correspondientes, que muestran la manera en que varían los caudales y cómo está distribuido cada uno de ellos en las subcuencas. Estos gráficos se observan en la representación de los hidrogramas para los periodos de retorno a 2, 5, 10 y 50 años, que se exponen a continuación.

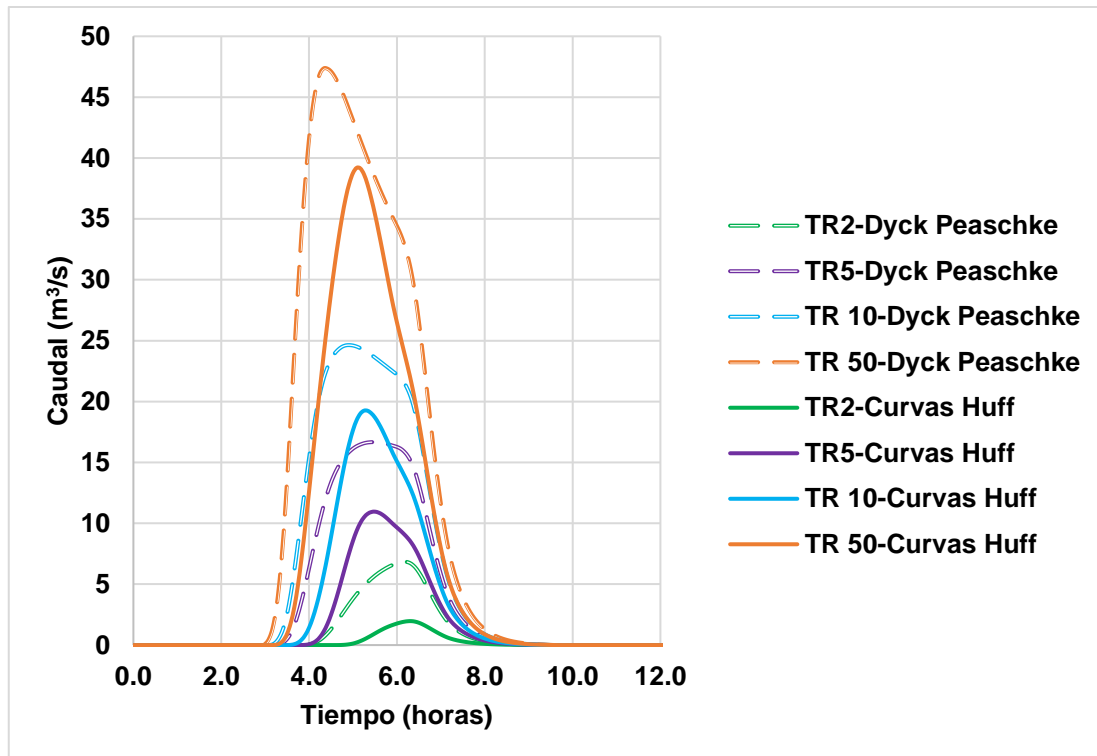
Tabla 46

Comparación de caudales máximos (m^3/s) subcuenca Chicllarazo

Método	Caudales máximos (m^3/s) Cuenca Chicllarazo			
	Periodo de retorno			
	2	5	10	50
Dyck Peschke	6.85	16.67	24.64	47.36
curvas de Huff	1.97	10.96	19.25	39.19

Figura 135

Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuenca Chicllarazo

**Tabla 47**

Comparación de los caudales máximos (m^3/s) en la subcuenca Apacheta

Método	Caudales máximos (m^3/s)			
	Periodo de retorno			
	2	5	10	50
Dyck Peschke	1.48	9.58	16.67	37.78
curvas de Huff	0.06	7.17	15.12	33.58

Figura 136

Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuenca Apacheta

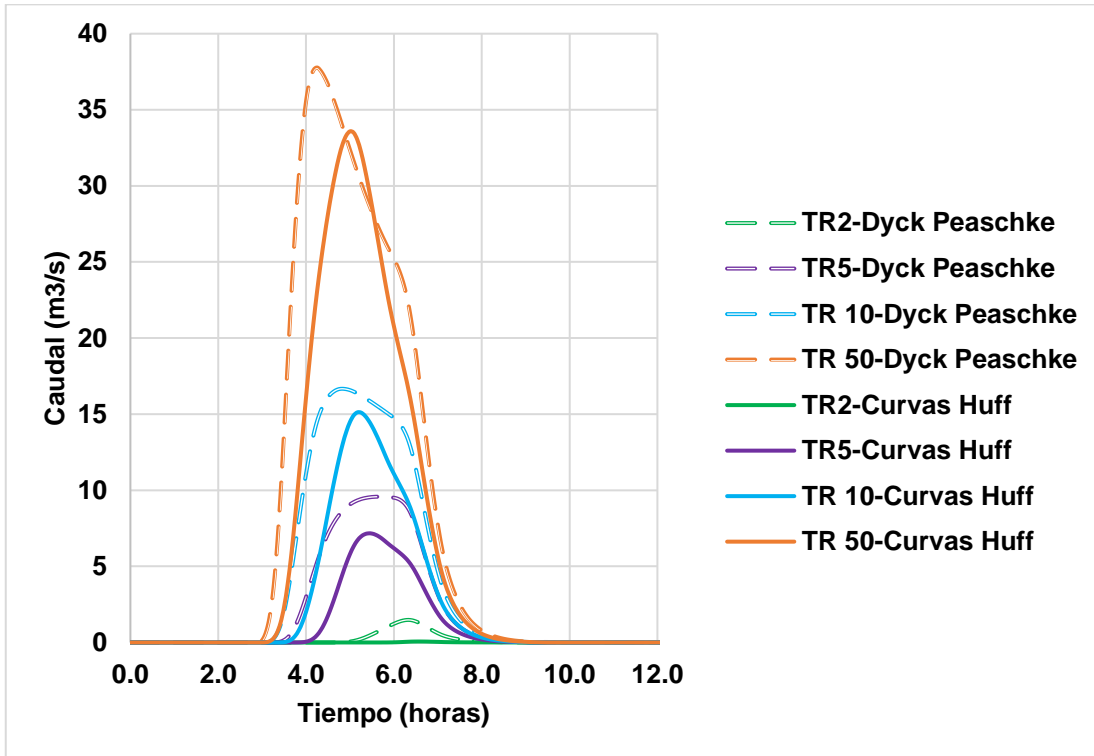


Tabla 48

Comparación de los caudales máximos (m^3/s) en la subcuenca Cachi

Método	Caudales máximos (m^3/s)			
	Periodo de retorno			
	2	5	10	50
Dyck Peschke	5.50	29.54	52.95	125.71
curvas de Huff	0.43	20.04	42.48	101.42

Figura 137

Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuenca Cachi

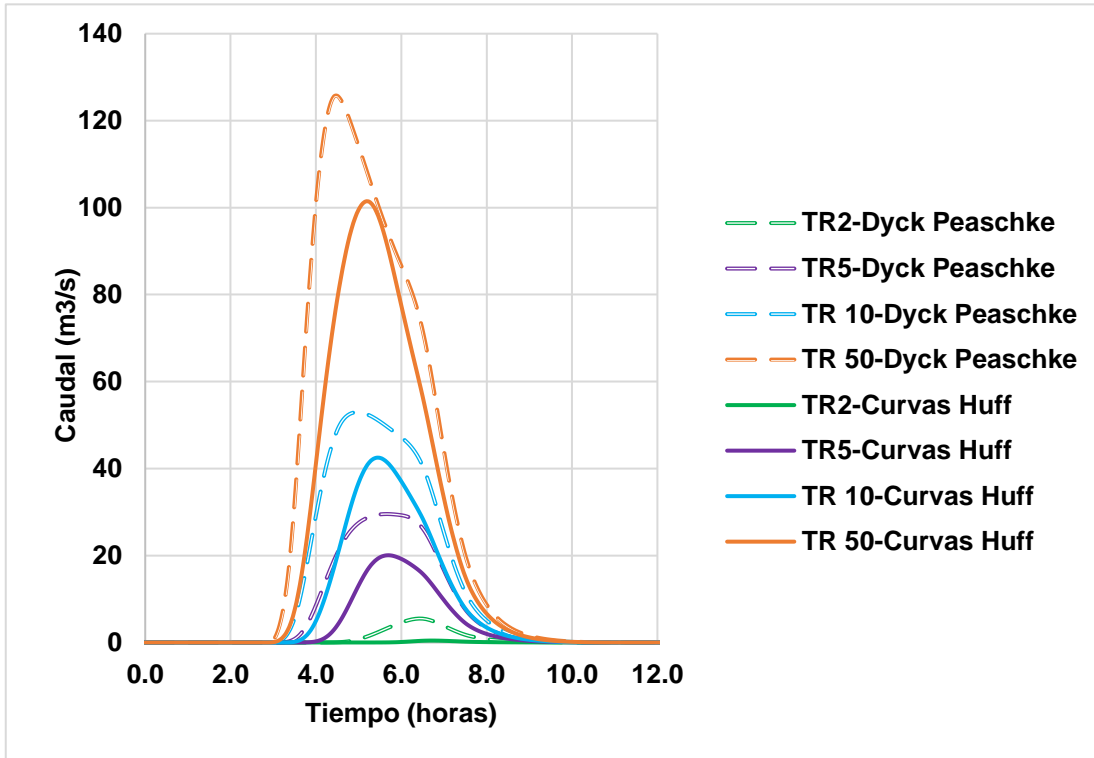


Tabla 49

Comparación de los caudales máximos (m^3/s) en el punto de aforo

Método	Caudales máximos (m^3/s)			
	Periodo de retorno			
	2	5	10	50
Dyck Peschke	7.28	29.54	52.95	125.71
curvas de Huff	1.67	20.04	42.48	101.42

Figura 138

Variación de caudales máximos (m^3/s) punto de aforo

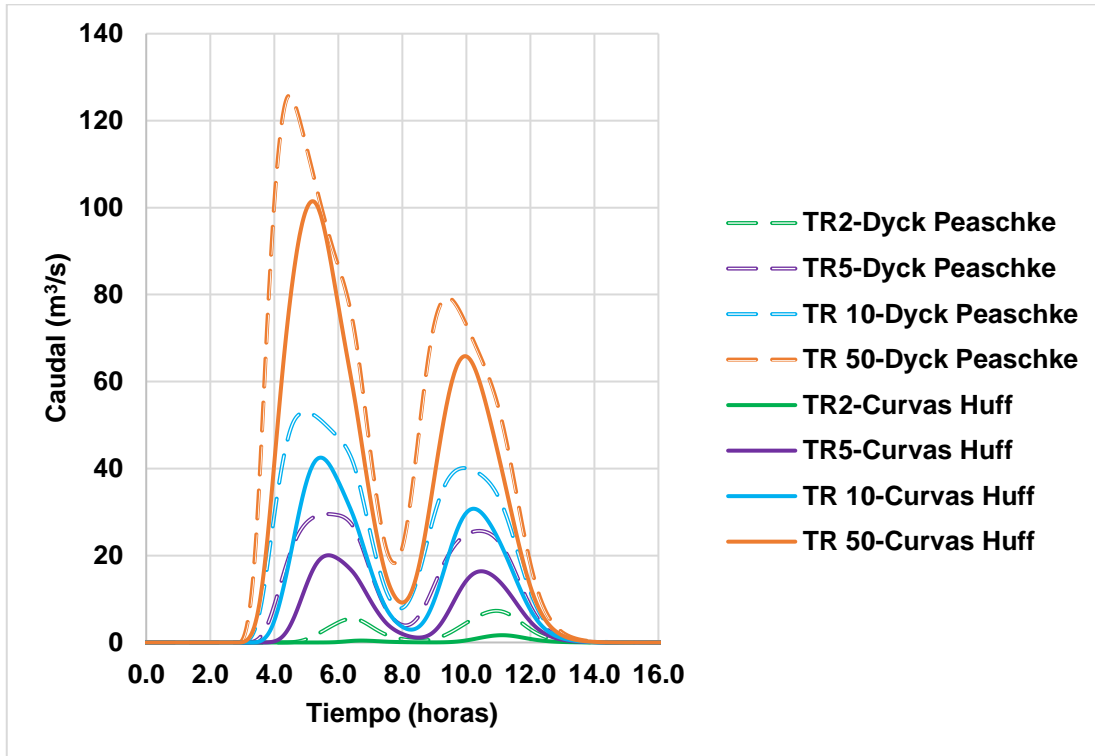
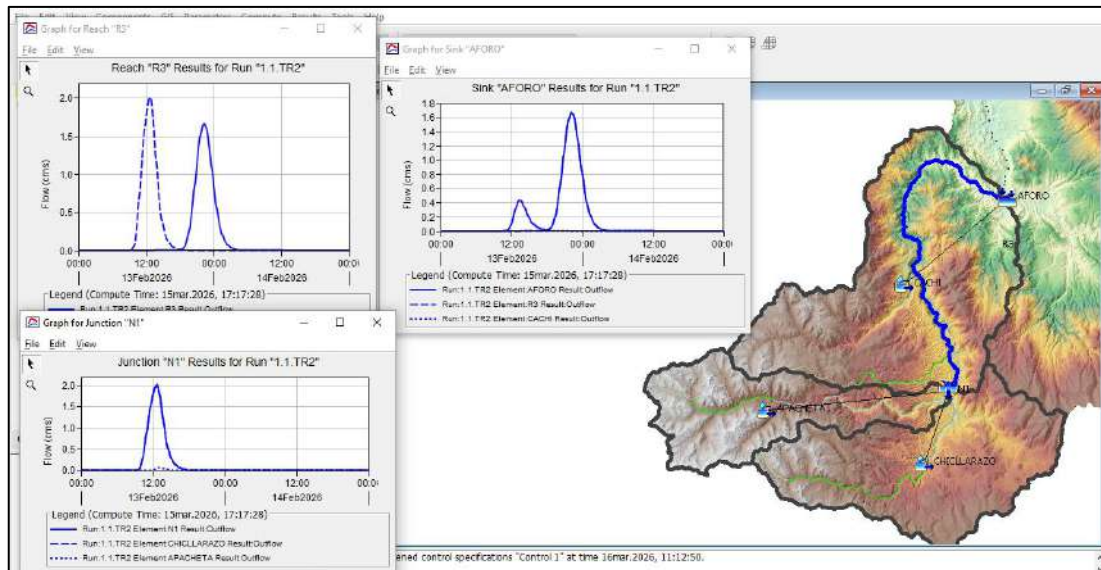


Figura 139

Resultados del modelamiento HEC-HMS



3.3.2 Discusión de la comparación de caudales máximos obtenidos

Fernández (2022) comparó, en su trabajo de investigación, los caudales máximos que se obtuvieron con tres procedimientos diferentes. Para eso, empleó el método de bloques alternos como lluvia sintética. El escritor indica que, aunque este método

se usa extensamente debido a su simpleza operativa, tiende a producir valores altos que podrían resultar en un sobredimensionamiento. Esto aumenta la incertidumbre en el diseño hidráulico y pone en peligro la exactitud de la administración del riesgo frente a acontecimientos extremos.

No obstante, los resultados que se han obtenido en la investigación actual a través de la metodología de Dyck y Peschke van en contra de esa conclusión, pues los caudales calculados fueron parecidos a los valores calibrados, con un mínimo margen de error.

Fernández (2022) empleó el método de bloques alternos para modelar sucesos de lluvia sintética y el método de Huff para analizar eventos de lluvia real en su investigación. El autor determinó que el método de bloques alternos distribuye el caudal pico a lo largo de la mitad del hietograma y luego se alterna ordenadamente. Los resultados que alcanzó no se apartan significativamente de los que Huff obtuvo al estudiar tormentas reales.

Los resultados de este estudio muestran con precisión cómo se distribuye la lluvia en la cuenca Cachi, gracias al uso del método de las curvas de Huff. Para ello, se emplearon los coeficientes de duración adimensional que fueron elaborados por Quijada (2020). Gracias a la modificación de los métodos, se logró crear hidrogramas ideales que cumplen correctamente con las condiciones reales de la cuenca. Esto valida así la importancia y viabilidad local de la estrategia que Huff propuso.

3.3.3 *Discusión del modelamiento hidrológico de Dyck Peschke*

Se utilizó el método de pérdidas SCS Número de Curva (CN) en el modelado efectuado con HEC-HMS para calcular la infiltración y, a partir de la precipitación, determinar la escorrentía directa. El método SCS hidrograma unitario, que posibilita la generación del hidrograma de salida de la cuenca, se utilizó para convertir la lluvia efectiva en caudal.

De igual manera, se empleó el método de Muskingum para simular apropiadamente la atenuación y el desplazamiento del hidrograma a lo largo del cauce en los tramos del río.

3.3.4 *Discusión del modelamiento hidrológico de curvas de Huff*

Para el modelamiento hidrológico con la metodología de las curvas de Huff empleando hietogramas de diseño de tipo II, se utilizaron los mismos parámetros del

modelo HEC-HMS aplicados en la simulación con Dyck Peschke, asegurando consistencia metodológica. Estos incluyen:

- Estimación de pérdidas: mediante el método Curve Number (CN).
- Transformación de lluvia en escorrentía: mediante el método del Hidrograma Unitario.

Ambos componentes, integrados en HEC-HMS, se configuraron con iguales valores para ambas metodologías, lo que permite una comparación directa y confiable de los resultados obtenidos.

3.3.5 Resultado del caudal máximo aforado

Se realizó el aforo del caudal máximo mediante el correntómetro en la salida de la cuenca del río Cachi, el cual fue llevado a cabo el día 16 de febrero de 2026, donde se obtuvieron los siguientes de la Tabla 50, con los cuales se obtuvo el caudal de avenida máxima transitada.

Tabla 50

Datos de campo del aforo del río Cachi

ID	Estación		Velocidad (m/s)			Área (m ²)	Caudal Parcial (m ³ /s)
	Distancia respecto al punto inicial (m)	Profundidad H (m)	0.2H	0.8H	0.6H		
1	0.00	0.56			0.8	0.0	0.00
2	1.00	0.58			0.8	0.6	0.46
3	2.00	0.88			1.8	0.7	1.31
4	6.00	0.98			2.3	3.7	8.56
5	8.50	0.78			1.4	2.2	3.08
6	11.50	0.38			0.8	1.7	1.39
7	15.00	0.68			1.6	1.9	2.97
8	19.20	0.58			1.9	2.6	5.03
9	22.80	1.18			2.1	0.0	0.00
10	26.10	1.08			2.4	3.7	8.95
11	31.00	1.18			1.5	5.5	8.31
12	34.10	0.98			0.4	3.3	1.42
Caudal total aforado (m³/s)							41.471

Figura 140

Aforo durante el tránsito de una máxima avenida del río Cachi con el correntómetro



La estimación del caudal máximo del río Cachi se muestra en la Tabla 50, que fue calculada manualmente con el Correntómetro Global Water de la marca Xylem, nombre y número de modelo: FP111, que se utilizó para determinar las velocidades en distintos tramos y tomando como referencia el 60% de la altura, permitió calcular un caudal máximo de 41.471 m³/s después de una tormenta.

3.3.6 *Discusión del caudal máximo aforado*

Los hallazgos del aforo efectuado en la salida de la cuenca del río Cachi revelan un caudal máximo de 41.471 m³/s. Este valor se determinó a través de un correntómetro, el cual fue utilizado en varias verticales de la sección transversal del río. En los anexos se detallan las especificaciones técnicas del correntómetro y el comportamiento que tuvo el caudal bajo condiciones de avenidas relativamente altas durante la época lluviosa.

Conclusiones

1. Según los resultados de este estudio, las curvas de Huff y el método Dyck Peschke son métodos apropiados para mostrar la distribución de lluvias de diseño en la cuenca del río Cachi, lo que posibilita hacer estimaciones sobre los caudales máximos durante lapsos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años. Sin embargo, al observar que las curvas de Huff tienen un mejor rendimiento (sus resultados se aproximan más al caudal máximo aforado y su margen de error es menor que el del método Dyck Peschke), se aconseja utilizarlas en investigaciones hidrológicas y en la creación de obras hidráulicas.
2. La metodología de Dyck Peschke, que se apoya en la creación de hietogramas por medio del método de bloques alternos y modelada en HEC-HMS, resultó en caudales máximos de 7.28 m³/s, 29.54 m³/s, 52.95 m³/s y 125.71 m³/s durante los intervalos de retorno estudiados. No obstante, en comparación con el caudal máximo aforado de 41.471 m³/s, no se ajusta correctamente al periodo de retorno de diez años, lo que demuestra una significativa sobreestimación con una diferencia de margen de 11.479 m³/s. Esto se debe a su naturaleza empírica y a su escasa representación de la variabilidad temporal de las precipitaciones.
3. Se llega a la conclusión de que el método fundamentado en las curvas de Huff, utilizando coeficientes de duración adimensional (tabla A12 desarrollada por Quijada, 2020), posibilitó una adecuada desagregación y representación en hietogramas de las lluvias de diseño. Al implementarse en HEC-HMS, se obtuvieron caudales máximos de 1.67 m³/s, 20.04 m³/s, 42.48 m³/s y 101.42 m³/s; estos últimos muestran un ajuste preciso al compararlos con el caudal máximo aforado de 41.471 m³/s, lo que indica que la máxima avenida corresponde a un período de retorno de diez años y tiene una diferencia mínima de 1.009 m³/s.
4. El modelamiento en HEC-HMS corroboró que las curvas de Huff son mejores que el método de Dyck-Peschke, demostrando que cada técnica representa la distribución temporal de la precipitación de manera diferente. Esto tiene un impacto directo en cómo se estiman los caudales máximos. Al calibrar el modelo con el caudal aforado de 41.471 m³/s, que corresponde a la mayor avenida documentada el 16 de febrero de 2026, se corroboró que este acontecimiento se adapta más exactamente a un período de retorno de diez años calculado por medio de las curvas de Huff (42.48 m³/s).

Recomendaciones

Para calcular los caudales máximos en estudios hidrológicos futuros del río Cachi, se sugiere emplear la metodología de curvas de Huff porque ha demostrado ser más precisa y coherente con los registros reales aforados, a diferencia del método Dyck Peschke, que produjo cifras sobredimensionadas.

Para el diseño y dimensionamiento de proyectos hidráulicos que se ocupen de proteger, almacenar, desviar y controlar inundaciones en la cuenca Cachi, es conveniente considerar los valores de caudales máximos obtenidos mediante las curvas de Huff. Esto busca reducir la incertidumbre hidráulica y mejorar la seguridad estructural ante situaciones extremas.

Para proyectar y dimensionar trabajos hidráulicos que tengan como objetivo la protección, el control, el almacenamiento y la desviación de inundaciones en la cuenca de Cachi, se aconseja considerar los valores de caudales máximos que se derivan de las curvas de Huff. Lo anterior tiene como fin reducir la incertidumbre hidráulica y mejorar la seguridad estructural ante eventos extremos.

Para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de datos históricos que posibiliten una calibración y validación más exactas en modelos hidrológicos futuros, es aconsejable robustecer los sistemas de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca. Esto se puede lograr mediante el mantenimiento, instalación y operación constante de estaciones pluviómetros e hidrológicas.

Se recomienda expandir el estudio de métodos alternativos para la distribución temporal de lluvias, incluyendo análisis probabilísticos y datos reanálisis o información satelital, con el objetivo de complementar los hallazgos y disminuir la dependencia de las técnicas empíricas clásicas.

Este trabajo es un soporte técnico importante, por lo que se aconseja su uso en organizaciones del sector público y privado relacionadas con la gestión del riesgo y la planificación de infraestructura hidráulica, fomentando decisiones fundamentadas en evidencias científicas.

Referencias

- Allado, C. D. & Fuentes, L. J. (2009). *Determinación de tormentas de diseño a partir de datos pluviográficos en zona media de la cuenca de río Frio*. [Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander]. Bucaramanga. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/22816>
- Autoridad Nacional de Agua (ANA). (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos*. Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>
- Avellaneda C., A. & Montalvo E., K. M. (2019), *Análisis comparativo de los métodos racional modificado Temez, hidrogramas unitarios SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay Lambayeque – Cuenca Chancay Lambayeque*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/8601>
- Back, Á. J. (2021). *Determinação das curvas de Huff para a Região Serrana de Santa Catarina / Determination of Huff curves for the Santa Catarina Mountain Region*. Brazilian Journal of Development. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-400>
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos, GITS-UPC. <https://www.yumpu.com/es/document/view/15500665/hidrologia-basica-y-aplicada>
- Bautista, N. (2022). *Determinación del hidrograma de crecida para diferentes periodos de retorno en la cuenca Puytooc - Chiara - Huamanga - Ayacucho - 2021*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal De Huamanga]. Perú. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5819>
- Bolaños, S. T. & Castillo, S. (2024). *Análisis de tránsito de máximas avenidas en el lago Chinchaycocha usando el software HEC-HMS para estudiar el comportamiento de futuras inundaciones*. [Tesis de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Perú. <http://hdl.handle.net/10757/682919>
- Cahuana A. & Yugar W., (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233*. <https://civilmbh.files.wordpress.com/2013/11/hidrology-san-simon.pdf>
- Castillo G. C., Domínguez H. I., & Martínez G.Y. (2023). *Modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica Yabú de*

- la provincia Villa Clara, Cuba. Tecnología y ciencias del agua.*
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-04-04>
- Chilès, J. P. & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty (2nd ed.)*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118136188>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Primera edición. Editorial Nomos.Colombia.
[https://www.academia.edu/105588091/Ven Te Chow Hidrologia Aplicada](https://www.academia.edu/105588091/Ven_Te_Chow_Hidrologia_Aplicada)
- Del Águila, S. (2024). *Modelamiento hidrológico de cuencas andinas*. Primera edición digital. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho – Perú. <https://isbn.bnpp.gob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=159637>
- Díaz, U. A., Guacaneme, D. F. & Alonso, F. L. (2017). *Estimación de caudales máximos para el sector hidrológico de la quebrada el diamante, mediante modelación con HEC-HMS*. [Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos, Universidad católica de Colombia]. Bogotá. <http://hdl.handle.net/10983/15352>
- Espinoza, R. (2024). *Estimación de las intensidades máximas de precipitación y su conceptualización mediante mapas de la cuenca del río Cachi - Ayacucho – 2021*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal De Huamanga].Perú.<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/6789>
- Fattorelli, S. y Fernández, P.C. (2011). *Diseño Hidrológico*. París, Francia: Edición Digital.<https://www.yumpu.com/es/document/view/63180144/disenohidrologico>
- Fernández, G. (2022). *Comparativa entre obtención de eventos de lluvias reales y eventos sintéticas para una cuenca mediterránea. Diferencia en los inputs en el estudio hidrológico en el cálculo de avenidas*. [Tesis de Grado, Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos]. <https://hdl.handle.net/11441/130975>
- García M., Y. T. (2015). *Análisis de tránsito de crecientes en el Río Cauca, entre las estaciones La Balsa y Anacora según el método de Muskingum*. [Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Bogotá – Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/items/ebb4983f-2bbc-4957-bde1c1bb8310b831>

- Gil, C. G. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312616>
- Herrera, F. A. (2024). *Aplicación de Hietograma de diseño para la determinación de caudales máximos en la cuenca Julcán. Otuzco. La Libertad. 2022*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/87aef9a1-7819-48b8-bd7c-cec73bdc8935>
- Huff, F. (1967). *Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms*, 3(4), 1007–1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- Lozano, A.D. (2023). *Generación de diferentes hietogramas de diseño para la simulación de crecidas sobre la subcuenca Guanga Huaycu*. [Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental]. Quito -Ecuador. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24272>
- Mendoza, R. D. (2020). *Desarrollo de un modelo de tormenta de diseño para la cuenca del río quindío (Colombia)*. [Tesis de Maestría en planificación y manejo ambientas de cuencas, Universidad del Tolima]. Ibagué – Tolima. Colombia. <https://repository.ut.edu.co/handle/001/3265>
- Montesinos, C., Lavado, W., Quijada, N., Gutiérrez, L., Felipe, O., de Estudios, S., & Felipe, O. (2023). *Desarrollo de curvas pluviométricas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1114>
- MTC, M. D. (2008). *Manual de hidrología, Hidráulica y Drenaje*. MTC. Lima-Perú. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Paoli, C., Cacik, P., & Morresi, M. (2001). *Consistencia en la determinación de crecidas de diseño por transformación lluvia-caudal y análisis de frecuencia (estudio de un caso)*. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/901?articlesBySimilarityPage=43>
- Quijada, N. (2020). *Caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú*. [Tesis de Grado, Universidad San Ignacio de Loyola] Lima – Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/10051>
- Silveira, A. L. L. D. (2024). *Universal equations for rainfall distributions from SCS and Huff methods*. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230093>

- Tupac, R. (2017). *Regionalización de las precipitaciones máximas en el Perú*. Tesis de Maestría. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM]. Perú. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1370451>
- Vela P., A. J. (2023). *Comparación de las curvas intensidad-duración-frecuencia generadas a partir de las estaciones pluviométricas y del producto grillado pisco de precipitación en el departamento de Puno*. [Tesis de Grado, Universidad católica de Santa María]. Arequipa – Perú. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12672>
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. 2ª Ed. Lima: Editorial Villón. Instituto Tecnológico (Costa Rica). <https://biblioteca.unfv.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=32609>

Anexos
Panel fotográfico

Fotografía 1.

Ubicación del punto de salida de la cuenca



Fotografía 2.

Vista panorámica de las huellas históricas de máximas avenidas



Fotografía 3.

Registro de huellas históricas al margen derecho e izquierdo del río Cachi para la calibración del caudal máximo



Fotografía 4.

Ubicación de las huellas históricas



Fotografía 5.

Aforo del río en época de máxima avenida



Fotografía 8.

Correntómetro utilizado para el aforo



Fotografía 9.

Vista panorámica del río Cachi en máxima avenida



Fotografía 10.

Trabajos de campo realizados en el punto de aforo

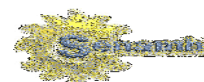


Anexos

Precipitaciones máximas en 24 horas



GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA - RED HIDROMETEOROLOGICA
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMAS EN 24 HORAS (mm)



Estación: **ALLPACHACA**

Latitud : 13° 23' 29" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24h (mm)

Longitud : 74° 16' 7.82" W

Prov. : Huamanga

Altitud : 3550 msnm

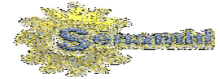
Dist. : Chiara

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Max.
1996	38.1	27.7	31.5	12.0	4.7	1.8	2.3	8.0	8.5	20.4	10.4	21.0	38.1
1997	26.1	17.0	28.3	7.8	4.2	0.0	2.5	11.0	14.2	6.0	20.2	22.8	28.3
1998	35.2	12.5	20.9	10.4	1.3	4.4	0.0	9.7	7.2	8.9	9.4	20.6	35.2
1999	21.1	18.8	14.6	11.5	7.4	3.7	3.9	14.8	20.4	7.5	13.9	11.1	21.1
2000	26.8	41.9	17.3	8.0	21.5	8.3	7.4	22.5	6.8	15.4	11.5	18.5	41.9
2001	26.5	20.5	28.5	8.8	11.7	3.0	4.9	10.6	8.1	8.1	18.2	19.3	28.5
2002	20.0	20.3	28.5	9.0	3.2	2.2	10.3	4.7	10.7	12.5	19.3	27.2	28.5
2003	25.4	12.9	19.0	12.8	14.3	0.0	2.0	6.8	11.4	4.6	8.5	24.3	25.4
2004	28.2	23.0	22.0	19.0	5.0	19.0	16.0	6.0	36.0	1.8	14.1	23.2	36.0
2005	15.6	21.2	25.8	7.9	2.5	0.0	7.0	15.2	23.7	10.5	10.5	27.6	27.6
2006	25.4	24.2	28.2	12.6	0.0	2.9	0.0	7.0	4.1	22.5	18.2	16.1	28.2
2007	17.3	30.0	43.5	8.0	12.8	0.0	3.7	0.0	5.3	8.8	10.5	28.5	43.5
2008	16.6	26.0	28.9	4.8	13.4	5.4	1.4	1.5	22.5	21.2	17.0	17.5	28.9
2009	19.1	28.0	12.8	17.3	6.0	0.0	6.0	3.0	1.5	16.3	15.0	14.8	28.0
2010	37.4	28.5	20.0	8.5	7.0	0.4	5.9	6.0	11.8	13.2	4.0	25.6	37.4
2011	23.0	41.3	13.0	20.6	4.2	0.0	10.2	2.2	7.6	6.0	13.8	11.4	41.3
2012	26.6	33.2	27.3	28.0	2.0	11.0	3.0	0.0	3.4	32.3	11.5	45.2	45.2
2013	19.2	21.2	15.0	7.0	27.2	10.2	7.0	14.0	3.0	15.1	10.5	23.6	27.2
2014	23.6	28.0	14.5	15.0	19.3	18.0	5.0	5.2	12.5	10.0	13.0	16.0	28.0
2015	13.2	13.2	12.0	10.2	18.0	6.0	27.0	18.2	0.0	26.4	11.0	26.3	27.0
2016	8.0	20.0	10.7	17.0	2.4	10.0	12.0	2.0	6.2	8.5	5.0	23.0	23.0
2017	31.2	20.0	11.7	28.7	12.2	9.3	14.0	9.0	7.7	16.0	11.2	10.5	31.2
2018	7.1	20.0	20.7	20.2	7.0	7.5	9.0	12.0	6.0	14.0	12.1	19.6	20.7
2019	25.8	27.3	23.0	18.9	4.7	5.7	7.6	5.8	13.6	12.6	10.9	18.7	27.3
2020	20.8	21.6	20.0	13.6	13.3	3.7	3.9	8.3	6.7	15.4	13.1	23.3	23.3
2021	24.1	25.2	20.5	13.0	12.6	9.8	10.3	7.6	13.1	12.4	10.7	24.2	25.2
2022	26.5	32.2	24.5	11.8	9.9	11.4	9.3	8.0	11.4	12.0	13.7	24.0	32.2
2023	20.3	24.6	21.1	17.4	3.8	16.6	6.3	5.4	8.8	16.7	12.6	19.3	24.6
2024	25.5	23.7	30.2	11.3	10.1	17.9	7.8	8.7	10.3	13.5	10.7	18.8	30.2
2025	21.2	24.2	20.0	13.9	11.3	8.7	10.1	9.6	8.2	16.7	10.3	25.4	25.4
Max.	45.7	41.9	57.4	28.7	27.2	19.0	27.0	22.5	36.0	32.3	21.4	45.7	

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA - RED HIDROMETEOROLOGICA
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMAS EN 24 HORAS (mm)



Estación: **APACHETA**

Latitud : 13° 20' 51" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24h (mm)

Longitud : 74° 38' 44" W

Prov. : Cangallo

Altitud : 4150 msnm

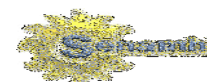
Dist. : Paras

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Max.
2005	34.0	19.0	17.8	19.5	7.5	0.0	2.5	5.5	9.5	8.0	10.0	18.5	34.0
2006	18.0	9.0	10.0	7.5	1.0	3.0	2.5	5.5	9.0	7.5	8.4	14.0	18.0
2007	17.5	18.0	15.5	13.0	9.5	2.5	0.0	6.4	7.8	28.2	12.3	25.5	28.2
2008	20.2	18.4	11.6	10.2	1.1	4.3	6.1	6.1	16.0	10.3	9.2	13.0	20.2
2009	20.6	32.7	13.9	14.2	8.3	3.8	13.4	2.8	13.4	11.7	12.3	26.2	32.7
2010	25.5	23.5	22.0	18.1	7.9	2.6	0.8	5.3	10.4	10.2	11.4	27.9	27.9
2011	20.3	36.2	17.2	18.5	3.5	1.2	10.3	4.1	7.8	8.4	13.4	27.5	36.2
2012	19.0	42.3	25.3	19.0	5.3	13.4	3.3	2.7	8.2	10.2	13.4	25.6	42.3
2013	35.9	17.7	18.6	9.0	16.3	9.8	5.2	17.5	9.6	12.5	13.8	24.2	35.9
2014	38.5	23.8	31.3	17.6	9.6	3.2	15.3	19.5	26.0	14.7	11.5	13.3	38.5
2015	24.2	22.3	30.7	17.9	6.4	11.2	5.4	9.3	15.8	14.1	12.4	21.3	30.7
2016	14.3	31.6	15.3	19.8	6.1	8.0	6.2	16.3	0.0	14.0	10.0	12.0	31.6
2017	40.2	45.0	24.2	21.4	4.2	4.8	7.4	3.8	6.2	19.5	9.0	12.6	45.0
2018	30.8	21.2	40.2	15.8	17.0	12.8	8.2	8.4	4.8	12.5	11.5	20.8	40.2
2019	19.0	24.6	23.9	14.9	7.3	4.1	6.0	5.8	11.7	14.5	10.3	16.0	24.6
2020	24.4	23.1	20.7	15.7	6.9	6.2	5.6	4.9	9.6	12.9	10.7	17.8	24.4
2021	26.0	20.9	14.3	11.7	8.0	5.6	4.3	8.7	4.6	13.1	9.9	17.1	26.0
2022	22.6	24.6	22.2	16.4	8.7	7.2	7.8	7.5	6.7	11.9	8.5	13.7	24.6
2023	23.9	23.7	19.5	13.8	6.3	3.7	7.0	7.4	9.9	6.8	7.9	14.1	23.9
2024	22.5	29.9	21.6	16.6	8.7	4.6	6.0	9.0	13.6	9.2	9.8	16.9	29.9
2025	31.9	21.5	21.0	11.5	5.3	4.2	5.9	6.8	6.9	10.6	10.1	14.4	31.9
Max.	40.2	45.0	40.2	21.4	17.0	13.4	15.3	19.5	26.0	28.2	13.8	27.9	

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA - RED HIDROMETEOROLOGICA
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMAS EN 24 HORAS (mm)



Estación: **CHOCCORO** Latitud : 13° 24' 48" S Dpto. : Ayacucho
Parámetro: Precipitación Máxima en 24h (mm) Longitud : 74° 28' 23" W Prov. : Cangallo
Altitud : 4025 msnm Dist. : Chuschi

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Max.
2000	25.5	43.0	47.5	10.4	14.5	8.5	9.1	10.4	3.9	24.7	3.3	22.1	47.5
2001	32.5	38.0	44.2	21.5	31.2	3.9	11.1	7.8	14.3	23.4	20.8	10.0	44.2
2002	39.9	79.0	27.5	25.6	5.8	0.0	9.7	6.7	8.0	8.1	14.3	26.8	79.0
2003	24.7	25.3	14.2	13.0	9.6	7.4	10.0	17.5	10.4	22.0	9.1	15.2	25.3
2004	8.0	29.5	35.5	14.5	4.0	10.5	10.0	6.5	12.0	9.5	12.0	19.5	35.5
2005	15.5	26.0	24.5	8.0	17.0	0.0	19.4	14.6	32.0	14.5	11.2	22.3	32.0
2006	31.7	29.1	20.0	11.1	6.5	4.6	0.0	9.3	8.1	20.2	19.0	16.4	31.7
2007	22.4	18.0	17.2	15.0	4.5	0.0	2.6	6.6	35.8	13.5	10.2	30.2	35.8
2008	22.9	36.2	24.3	26.0	11.5	52.0	0.5	0.0	17.8	9.7	18.6	22.5	52.0
2009	29.7	21.7	18.0	14.4	11.9	4.8	26.3	4.1	14.4	6.6	12.8	8.4	29.7
2010	23.9	20.9	30.4	16.0	10.0	1.4	1.2	2.4	8.8	6.7	9.5	29.8	30.4
2011	24.2	32.8	12.3	0.0	0.0	2.0	18.5	6.6	7.6	21.4	18.2	25.0	32.8
2012	16.8	49.9	28.9	21.2	12.7	21.5	8.8	2.8	9.4	20.2	10.0	35.5	49.9
2013	21.2	14.5	22.5	1.2	6.6	15.6	7.9	14.2	15.7	20.1	6.8	25.0	25.0
2014	41.7	30.9	21.2	9.9	9.9	5.2	10.1	23.5	24.5	11.8	20.3	15.2	41.7
2015	32.2	24.5	32.8	12.2	21.5	3.0	5.1	0.9	3.4	6.8	18.5	9.4	32.8
2016	2.0	5.1	15.7	30.8	5.8	46.0	3.5	10.5	12.7	8.4	3.6	25.5	46.0
2017	41.9	39.5	18.2	22.8	8.4	4.2	5.2	2.2	0.0	29.8	12.2	10.6	41.9
2018	38.0	32.0	25.6	12.3	10.5	15.5	8.6	8.2	14.2	13.7	13.3	20.9	38.0
2019	30.9	36.5	27.4	12.6	10.4	16.2	12.5	12.4	14.8	14.1	15.1	18.7	36.5
2020	26.1	38.7	26.3	17.6	11.5	9.8	12.5	9.1	12.6	15.6	14.0	18.6	38.7
2021	19.0	24.0	28.2	17.4	10.1	19.1	3.3	6.0	13.8	9.4	9.9	22.2	28.2
2022	31.5	39.7	31.3	20.2	13.5	11.9	3.6	6.1	8.6	13.2	14.4	19.0	39.7
2023	25.0	30.4	24.5	13.1	11.8	9.4	7.9	3.1	11.2	13.2	12.2	23.1	30.4
2024	26.6	39.6	31.0	13.6	10.3	19.2	13.1	8.5	14.9	15.4	14.9	21.0	39.6
2025	24.1	22.6	21.9	13.4	11.0	5.4	4.2	5.9	12.7	6.5	7.3	14.3	24.1
Max.	41.9	79.0	47.5	30.8	31.2	52.0	26.3	23.5	35.8	29.8	20.8	35.5	

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Gobierno Regional de Ayacucho



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERU - SENAMHI
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMA 24 HORAS (mm)



Estación: **CHIARA**

Latitud : 13° 17' 25,56" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24 horas

Longitud : 74° 12' 39,54" W

Prov. : Huamanga

Altitud : 3587 msnm

Dist. : Chiara

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	MAX
1996	14.5	21.1	27.9	21.9	1.3	1.3	5.3	6.7	7.1	8.0	4.0	11.3	27.9
1997	21.1	23.7	12.0	10.3	2.6	1.3	0.7	10.3	8.6	8.6	14.6	18.1	23.7
1998	23.9	13.8	18.5	6.6	4.9	7.9	4.4	22.8	4.0	5.3	13.2	21.1	23.9
1999	18.7	23.3	24.4	11.2	4.2	4.0	6.6	4.0	12.5	10.8	17.8	17.9	24.4
2000	19.1	14.1	13.8	2.0	3.3	5.7	13.6	7.9	3.7	16.7	6.5	14.5	19.1
2001	38.0	20.3	21.5	15.8	12.4	3.0	6.2	7.9	3.4	15.0	14.5	11.9	38.0
2002	14.4	20.3	17.8	7.1	11.9	4.2	9.1	9.6	12.9	27.3	21.6	10.0	27.3
2003	6.9	29.8	34.8	23.5	6.0	0.0	0.0	10.2	6.1	3.9	6.2	14.4	34.8
2004	12.5	32.6	15.3	10.6	8.3	5.2	11.2	7.0	8.1	4.9	14.0	22.4	32.6
2005	23.3	15.9	19.4	18.6	7.3	0.0	2.9	8.4	8.2	19.6	17.8	27.3	27.3
2006	26.0	25.5	23.1	8.6	0.0	5.5	0.0	20.0	3.5	18.0	13.0	14.0	26.0
2007	17.5	22.0	20.6	3.8	3.6	0.0	1.3	0.0	2.0	11.9	6.4	15.2	22.0
2008	17.9	18.4	9.5	13.1	4.0	2.5	0.0	2.1	8.6	18.0	4.0	18.0	18.4
2009	22.4	24.0	14.3	16.8	20.6	1.8	7.2	1.0	2.4	8.8	19.2	13.8	24.0
2010	28.1	20.0	13.2	10.8	6.2	5.2	0.0	8.8	6.5	16.0	8.0	17.0	28.1
2011	26.5	40.0	18.0	12.5	6.0	0.0	10.0	0.0	12.0	7.0	13.0	13.0	40.0
2012	14.0	25.0	24.0	15.0	3.0	8.0	5.5	2.0	10.0	19.0	12.0	23.0	25.0
2013	22.0	22.0	22.0	2.5	15.0	10.5	6.5	24.0	6.7	18.0	12.0	14.0	24.0
2014	24.0	18.5	17.0	13.0	70.0	0.0	4.0	71.5	16.0	13.6	7.0	15.0	71.5
2015	22.0	0.0	14.0	6.0	12.0	1.8	18.5	13.5	6.0	14.8	8.0	15.0	22.0
2016	14.0	17.0	10.0	10.0	20.0	2.0	9.0	3.0	1.5	7.0	3.0	9.0	20.0
2017	20.0	22.0	23.0	20.0	8.0	0.0	10.0	3.4	7.0	18.2	10.0	16.0	23.0
2018	22.0	11.0	20.0	14.0	8.4	8.2	16.0	11.8	7.1	13.5	11.4	16.1	22.0
2019	18.0	21.9	19.8	13.0	6.0	5.1	10.6	12.0	9.8	13.8	11.3	18.2	21.9
2020	21.5	21.0	22.8	13.0	11.2	2.5	5.6	11.9	7.9	14.1	12.2	16.3	22.8
2021	20.6	16.5	17.5	13.4	8.8	1.7	11.0	3.9	7.8	12.4	9.4	13.7	20.6
2022	22.6	24.4	21.8	14.8	12.7	6.9	8.3	3.4	6.7	10.5	9.9	16.7	24.4
2023	21.8	19.7	18.5	11.1	6.2	9.3	6.3	7.3	4.8	11.2	10.5	15.3	21.8
2024	25.0	22.1	22.6	15.7	7.8	5.4	12.9	16.9	7.2	14.4	13.9	16.7	25.0
2025	22.0	19.4	15.1	9.1	8.1	5.2	4.1	4.3	6.7	12.7	5.3	12.3	22.0
MAX	38.0	40.0	34.8	23.5	70.0	10.5	18.5	71.5	16.5	27.3	31.0	27.3	71.5

Fuente: Base de datos - Autoridad Nacional del Agua



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERU - SENAMHI
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMA 24 HORAS (mm)



Estación: **PUCALOMA**

Latitud : 13° 12' 21,48" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24h (mm)

Longitud : 74° 17' 57,48" W

Prov. : Huamanga

Altitud : 3490 msnm

Dist. : Socos

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	MAX
1996	31.3	17.5	28.2	14.2	0.2	0.0	3.8	6.6	12.8	12.7	8.5	25.7	31.3
1997	28.8	56.3	21.1	8.4	1.8	0.0	0.0	9.0	10.0	9.0	29.5	22.2	56.3
1998	25.7	29.8	18.6	3.7	2.2	3.1	0.0	1.6	7.3	10.2	5.3	13.4	29.8
1999	25.4	26.6	21.4	9.0	3.5	6.0	2.0	0.0	18.2	12.1	11.5	12.7	26.6
2000	19.2	36.1	21.4	7.2	13.2	5.5	0.0	1.4	13.5	7.1	76.9	36.3	76.9
2001	18.6	16.0	13.0	15.2	10.0	0.9	5.4	30.5	13.9	9.5	11.4	22.1	30.5
2002	16.2	28.3	8.2	6.8	4.2	2.2	9.6	4.7	5.8	7.4	7.1	7.3	28.3
2003	15.4	26.2	23.4	21.4	4.2	2.2	0.6	4.4	4.6	8.2	21.9	34.5	34.5
2004	21.0	15.4	20.4	15.2	3.7	9.6	0.1	0.0	6.8	4.2	13.4	17.4	21.0
2005	19.2	33.7	7.9	9.1	1.9	0.0	5.5	2.5	10.5	9.0	13.0	25.0	33.7
2006	26.2	26.0	20.5	12.0	0.0	5.3	0.0	3.5	0.7	69.5	13.0	20.4	69.5
2007	19.1	18.3	19.0	9.6	0.0	1.5	0.2	0.0	4.5	8.5	5.2	14.0	19.1
2008	17.3	14.3	10.6	3.8	12.7	4.4	0.0	0.0	9.1	13.4	6.0	25.4	25.4
2009	13.8	19.1	13.0	7.5	18.5	0.0	6.5	1.5	1.5	15.1	14.8	12.8	19.1
2010	16.1	41.0	25.3	1.8	4.0	0.0	0.0	5.5	11.0	9.4	9.3	21.5	41.0
2011	30.3	27.0	23.0	8.5	6.5	0.0	8.0	0.0	3.2	5.6	13.4	35.9	35.9
2012	13.5	19.2	20.2	14.0	3.1	0.0	1.5	12.0	5.4	3.5	7.0	23.2	23.2
2013	18.5	19.3	20.3	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	13.5	17.8	20.3
2014	24.8	13.4	17.5	10.4	10.3	2.5	5.0	0.0	7.9	3.0	75.0	12.0	75.0
2015	24.8	13.4	11.6	9.8	10.1	8.0	0.0	22.5	6.2	4.3	30.0	42.2	42.2
2016	20.2	30.3	14.6	22.2	10.2	10.4	1.9	0.0	5.6	25.2	15.4	11.1	30.3
2017	10.8	18.5	14.2	20.4	12.5	3.0	5.0	0.9	11.6	7.9	16.0	26.2	26.2
2018	20.4	14.9	18.4	8.4	1.8	1.4	13.5	0.4	11.7	6.9	17.3	36.5	36.5
2019	22.0	23.3	17.6	9.1	8.5	2.3	1.3	0.4	7.9	11.5	15.6	30.0	30.0
2020	22.1	28.8	20.9	8.9	6.8	8.0	5.2	5.8	9.4	8.6	45.5	22.9	45.5
2021	21.7	17.4	16.7	9.3	6.8	1.2	0.5	6.2	8.6	5.1	11.5	18.9	21.7
2022	22.3	25.1	19.4	8.6	5.8	8.3	6.3	4.0	6.3	11.4	23.1	26.0	26.0
2023	20.7	35.3	19.3	9.6	6.3	4.2	3.6	1.5	8.5	19.9	29.0	20.9	35.3
2024	18.0	24.5	20.0	12.3	3.3	6.4	1.8	6.0	8.9	9.2	35.1	21.3	35.1
2025	22.3	24.7	19.3	12.9	9.5	3.5	0.3	2.4	5.3	13.0	14.7	20.0	24.7
MAX	31.3	56.3	28.2	22.2	18.5	10.4	13.5	30.5	18.2	69.5	76.9	42.2	76.9

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERU - SENAMHI
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMA 24 HORAS (mm)



Estación: **INIA**

Latitud : 13° 10' 00.06" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24 horas

Longitud : 74° 12' 22.92" W

Prov. : Huamanga

Altitud : 2756 msnm

Dist. : Andres A. Caceres

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	MAX
1996	11.2	14.1	29.0	19.5	1.4	0.0	0.0	4.5	9.5	7.9	11.2	12.5	29.0
1997	22.2	22.1	23.2	4.8	1.7	0.0	2.0	8.3	11.0	5.6	13.2	20.5	23.2
1998	24.5	27.3	17.8	2.8	0.4	2.7	0.0	1.5	16.8	13.0	10.7	14.4	27.3
1999	20.8	20.1	11.2	6.8	1.4	0.4	3.2	0.0	13.0	4.6	24.8	16.8	24.8
2000	25.6	35.2	14.1	2.4	1.8	5.6	10.5	8.5	7.7	13.8	20.2	21.3	35.2
2001	24.7	24.0	21.7	8.6	12.0	2.1	1.9	0.4	16.4	12.1	12.7	21.6	24.7
2002	27.6	16.9	19.2	4.4	7.4	3.2	7.0	3.6	18.1	4.7	11.8	22.5	27.6
2003	16.7	30.0	20.6	27.4	13.2	0.0	0.0	9.5	4.9	8.9	11.9	13.7	30.0
2004	18.6	12.2	18.3	6.9	4.6	2.7	0.0	11.6	10.3	4.7	16.2	21.8	21.8
2005	30.8	37.1	21.2	15.6	6.3	0.7	1.5	1.5	15.1	7.8	17.8	22.4	37.1
2006	17.4	16.9	22.6	5.3	2.2	0.8	8.5	2.5	11.6	9.7	18.4	11.8	22.6
2007	14.6	15.8	20.6	3.6	16.0	0.0	0.0	1.1	4.9	11.2	17.0	17.5	20.6
2008	18.0	15.2	14.8	7.6	7.0	8.0	0.0	0.0	31.5	5.0	20.8	17.0	31.5
2009	24.4	29.6	18.2	11.0	8.0	0.0	3.8	1.0	2.8	6.2	20.7	21.9	29.6
2010	24.4	24.5	17.7	7.2	9.1	0.0	0.7	6.0	11.3	13.1	11.6	19.5	24.5
2011	20.5	46.7	18.7	10.6	10.1	0.3	5.7	0.6	11.9	10.3	19.4	10.3	46.7
2012	12.8	19.0	24.7	19.1	1.8	9.6	1.6	1.6	11.6	13.9	13.4	17.8	24.7
2013	23.6	17.4	15.2	4.4	8.3	1.0	4.2	15.1	10.5	11.5	16.4	20.7	23.6
2014	18.8	9.5	23.1	13.5	8.5	0.0	1.6	3.1	14.0	11.6	13.8	16.4	23.1
2015	29.2	20.8	14.4	4.8	2.2	0.0	4.0	5.5	8.0	16.5	8.3	19.6	29.2
2016	14.8	28.8	11.1	8.8	9.8	0.0	4.7	4.5	5.6	10.1	9.2	20.0	28.8
2017	23.5	20.4	28.4	15.0	6.0	0.0	11.8	4.4	6.8	12.7	5.9	17.4	28.4
2018	19.4	11.6	12.4	7.4	5.4	3.9	15.5	15.6	4.1	7.0	20.9	14.9	20.9
2019	23.8	31.0	17.7	13.7	6.0	22.4	3.9	5.7	7.0	9.7	14.8	18.2	31.0
2020	21.8	17.9	19.5	10.6	2.1	0.2	8.2	6.8	10.4	10.4	13.1	17.3	21.8
2021	20.5	24.5	20.9	8.0	5.6	7.2	11.8	5.5	17.0	10.5	14.4	18.3	24.5
2022	20.7	21.7	18.9	8.1	6.7	12.8	3.2	3.1	13.7	11.0	15.8	16.1	21.7
2023	22.5	17.8	20.5	14.6	5.5	17.2	3.3	5.8	10.6	11.1	17.6	19.0	22.5
2024	22.8	17.3	19.5	6.2	6.1	0.7	4.2	8.4	9.6	8.9	14.9	19.9	22.8
2025	23.9	23.6	15.2	7.0	6.3	0.7	17.0	4.1	13.6	11.5	12.8	18.8	23.9
MAX	42.0	46.7	29.0	27.4	16.0	37.4	20.3	15.6	31.5	16.5	24.8	22.5	46.7

Fuente: Base de datos - Autoridad Nacional del Agua



SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERU - SENAMHI
REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMA 24 HORAS (mm)



Estación: **WAYLLAPAMPA**

Latitud : 13° 4' 35.4" S

Dpto. : Ayacucho

Parámetro: Precipitación Máxima en 24 horas

Longitud : 74° 12' 59.4" W

Prov. : Huamanga

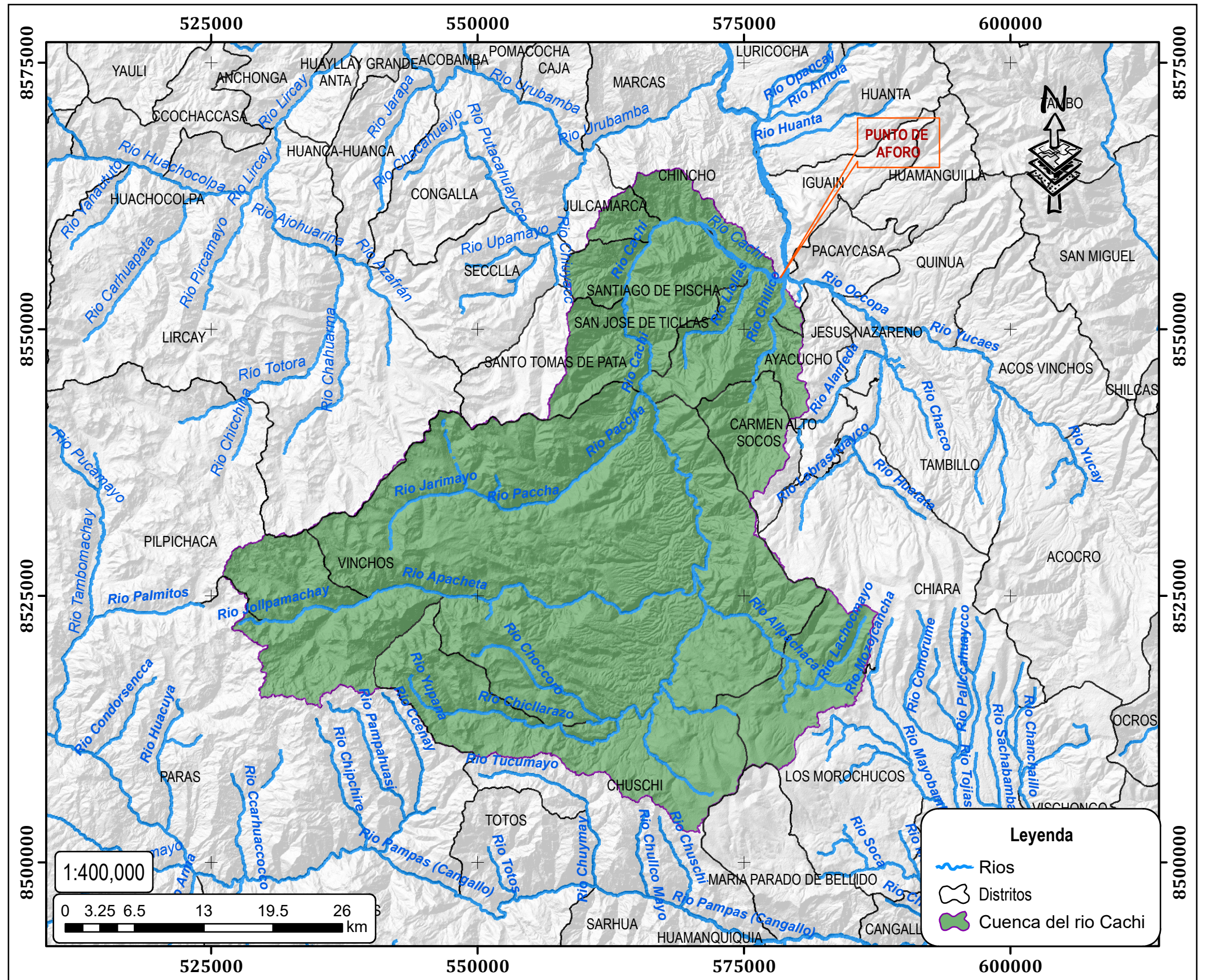
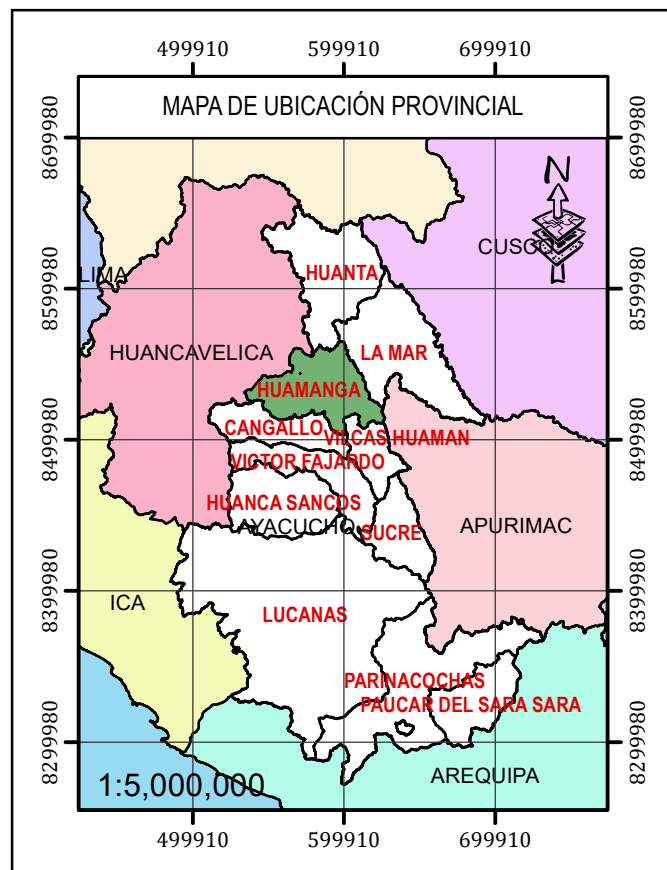
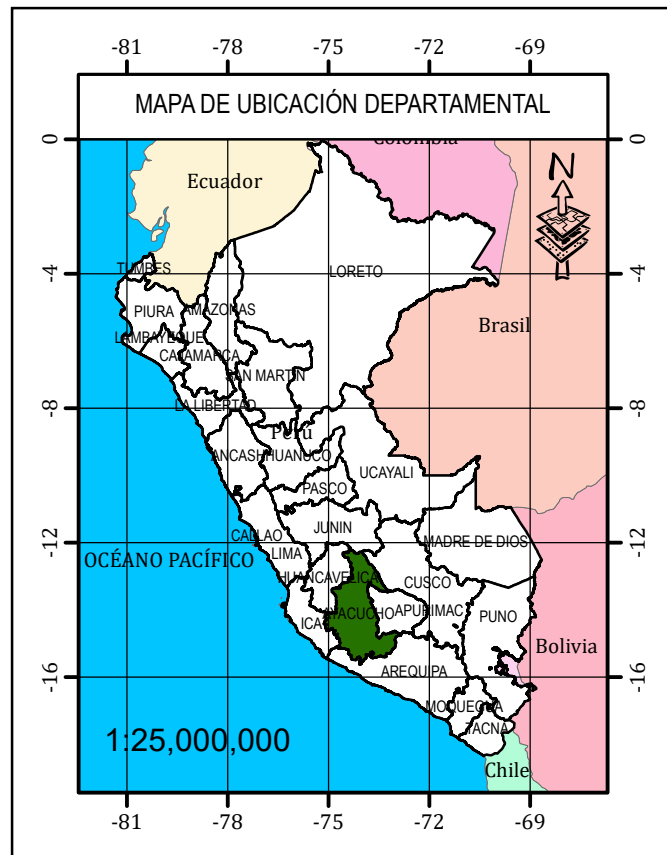
Altitud : 2470 msnm

Dist. : Pacaycasa

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	MAX
1996	14.2	15.5	12.5	9.0	3.0	4.0	3.2	4.0	14.2	13.9	18.4	19.1	19.1
1997	25.4	12.2	12.4	13.2	1.2	0.0	2.3	6.8	11.0	0.4	12.2	18.4	25.4
1998	22.4	19.2	19.2	5.4	0.0	1.2	0.0	1.2	1.2	11.1	4.0	9.3	22.4
1999	16.3	26.2	15.1	5.3	0.0	0.0	1.8	0.0	16.4	3.4	22.7	17.4	26.2
2000	23.8	34.2	16.6	3.2	10.2	8.0	12.0	3.8	3.5	5.0	5.0	17.7	34.2
2001	17.6	23.2	18.3	9.8	8.3	2.0	15.2	6.4	7.0	12.3	12.6	8.8	23.2
2002	19.4	15.3	31.0	11.2	6.7	2.2	12.4	7.2	10.4	5.2	13.2	17.4	31.0
2003	10.0	50.4	22.2	31.4	3.7	1.0	0.0	6.2	5.4	0.0	11.0	17.2	50.4
2004	40.3	14.8	9.1	3.0	3.3	3.2	8.2	5.7	6.0	13.0	7.2	17.3	40.3
2005	21.5	19.0	9.1	4.1	17.0	0.0	2.5	4.9	1.9	16.0	10.5	11.0	21.5
2006	32.3	15.8	16.8	7.6	6.5	2.1	2.3	6.2	12.5	18.5	13.7	16.0	32.3
2007	13.9	18.5	19.6	14.4	14.5	9.6	3.2	4.4	3.9	17.9	27.0	13.1	27.0
2008	15.0	23.0	12.7	6.0	13.3	2.7	0.0	3.0	7.3	5.0	9.7	16.8	23.0
2009	27.3	25.7	10.0	11.9	9.0	0.4	2.2	4.0	3.2	18.0	14.0	29.0	29.0
2010	18.7	17.1	9.9	12.7	3.3	0.0	2.1	2.9	7.6	7.4	5.7	18.0	18.7
2011	22.4	32.3	26.8	10.0	8.8	0.1	4.7	0.5	13.3	11.4	26.0	17.0	32.3
2012	15.1	19.7	15.6	20.3	27.6	7.2	9.5	1.3	16.8	13.2	19.3	24.8	27.6
2013	18.9	17.9	30.4	8.1	3.7	1.2	3.1	24.3	19.4	37.7	18.9	14.8	37.7
2014	20.8	13.5	28.2	8.5	5.4	0.0	1.3	4.0	11.3	20.2	7.2	34.4	34.4
2015	33.4	18.9	17.0	11.0	7.3	4.2	15.2	5.9	4.0	16.6	20.3	15.4	33.4
2016	25.2	33.1	25.2	8.9	6.7	0.1	4.4	9.7	10.0	12.4	22.0	16.0	33.1
2017	21.7	19.2	23.8	11.4	8.9	0.0	8.1	9.8	15.8	7.5	20.4	17.0	23.8
2018	19.2	25.0	19.3	6.1	4.8	3.0	15.9	14.4	9.9	18.6	25.8	11.8	25.8
2019	21.9	19.2	14.0	7.6	8.8	1.7	3.3	7.4	5.0	14.3	17.9	14.8	21.9
2020	20.1	22.9	21.4	12.0	9.2	7.4	10.9	6.5	6.0	11.2	11.8	16.7	22.9
2021	22.7	21.6	18.8	9.1	7.0	0.8	7.7	5.4	8.0	6.5	13.6	16.1	22.7
2022	21.2	28.9	20.2	13.1	10.1	3.5	6.8	8.0	14.4	11.2	17.9	16.2	28.9
2023	28.8	17.8	19.2	6.0	5.6	6.9	6.6	4.9	5.9	11.1	15.5	11.9	28.8
2024	15.9	21.1	19.4	10.8	8.5	1.0	4.8	4.2	10.4	16.0	12.8	15.8	21.1
2025	21.1	25.1	18.3	14.2	8.5	2.6	6.2	4.1	8.7	11.4	14.1	17.8	25.1
MAX	40.3	50.4	31.0	31.4	27.6	27.1	16.8	24.3	19.4	37.7	27.0	34.4	50.4

Fuente: Base de datos - Autoridad Nacional del Agua

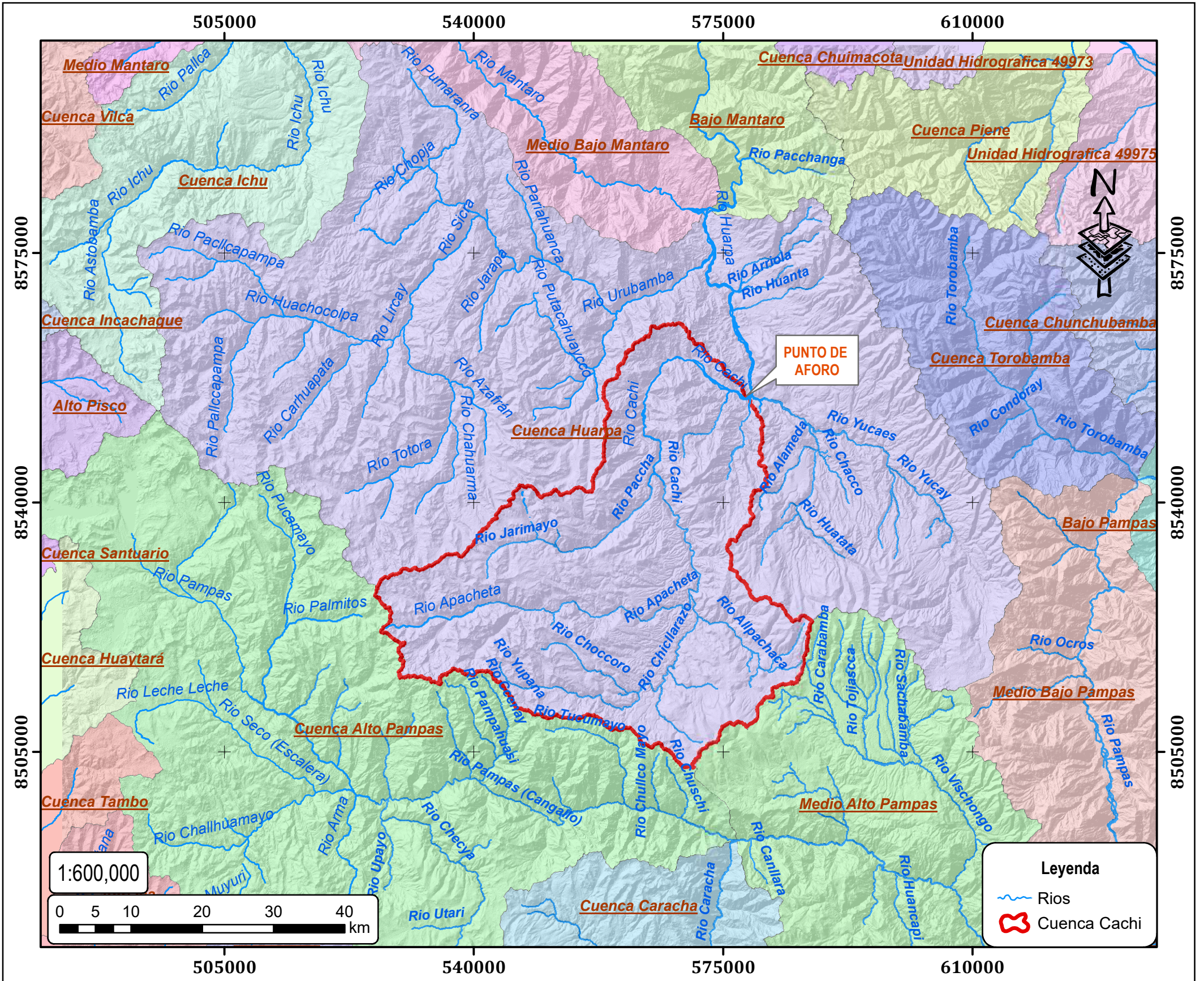
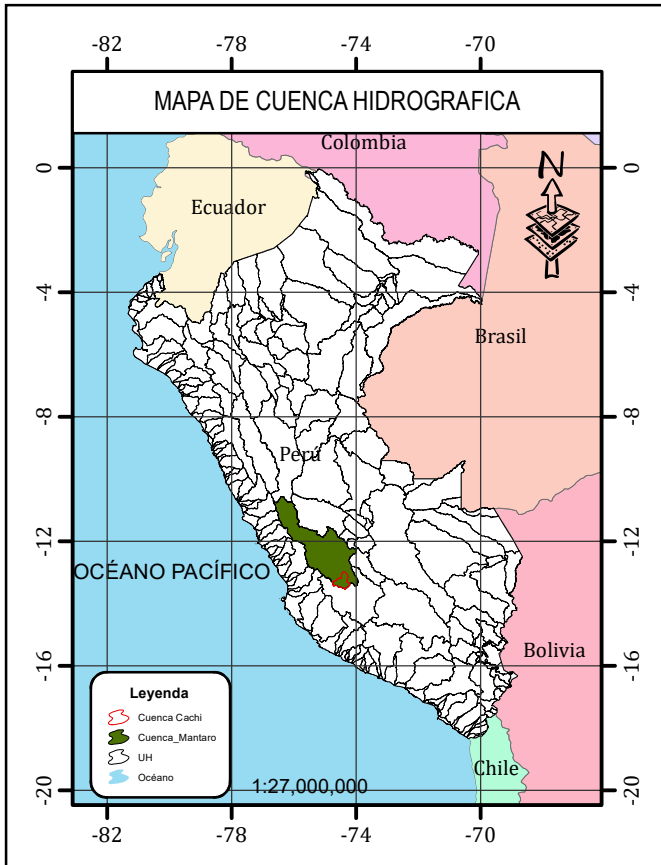
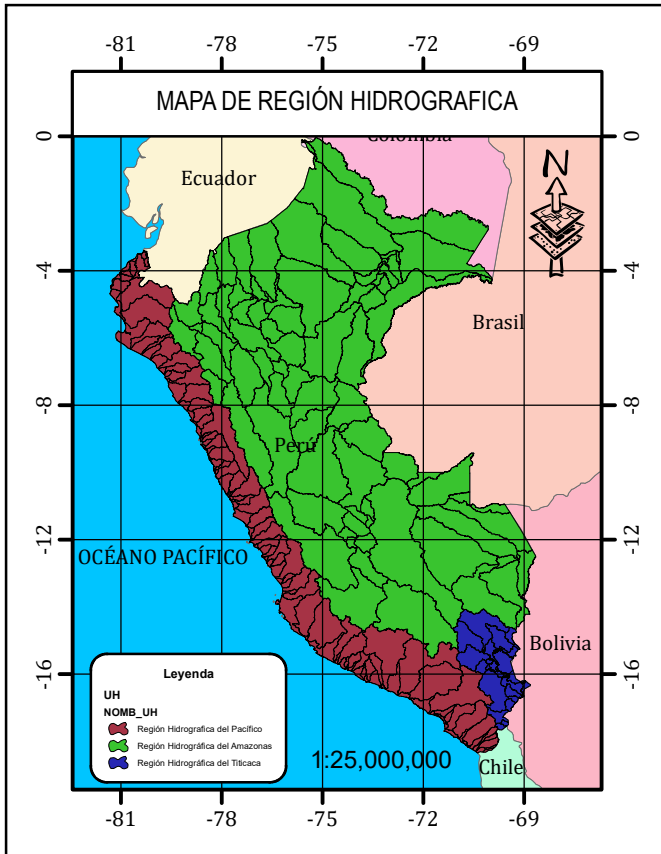
Anexos
Mapas temáticos



Legenda

- Rios
- Distritos
- Cuenca del rio Cachi

	Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025	Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S	MAPA: UBICACIÓN	UBICACIÓN: DEP : AYACUCHO PROV : HUAMANGA DISTR : PACAYCASA	Asesor: Dr. Richard Alex Oscco Peceros	Tesista: Bach. Ing. Gabriel R. Ventura Cuba	LAMINA: MT-01
		Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984		Escala: Indicada	Fecha: Set - 2025		
		Datum: D_WGS_1984					



Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Datum: D_WGS_1984

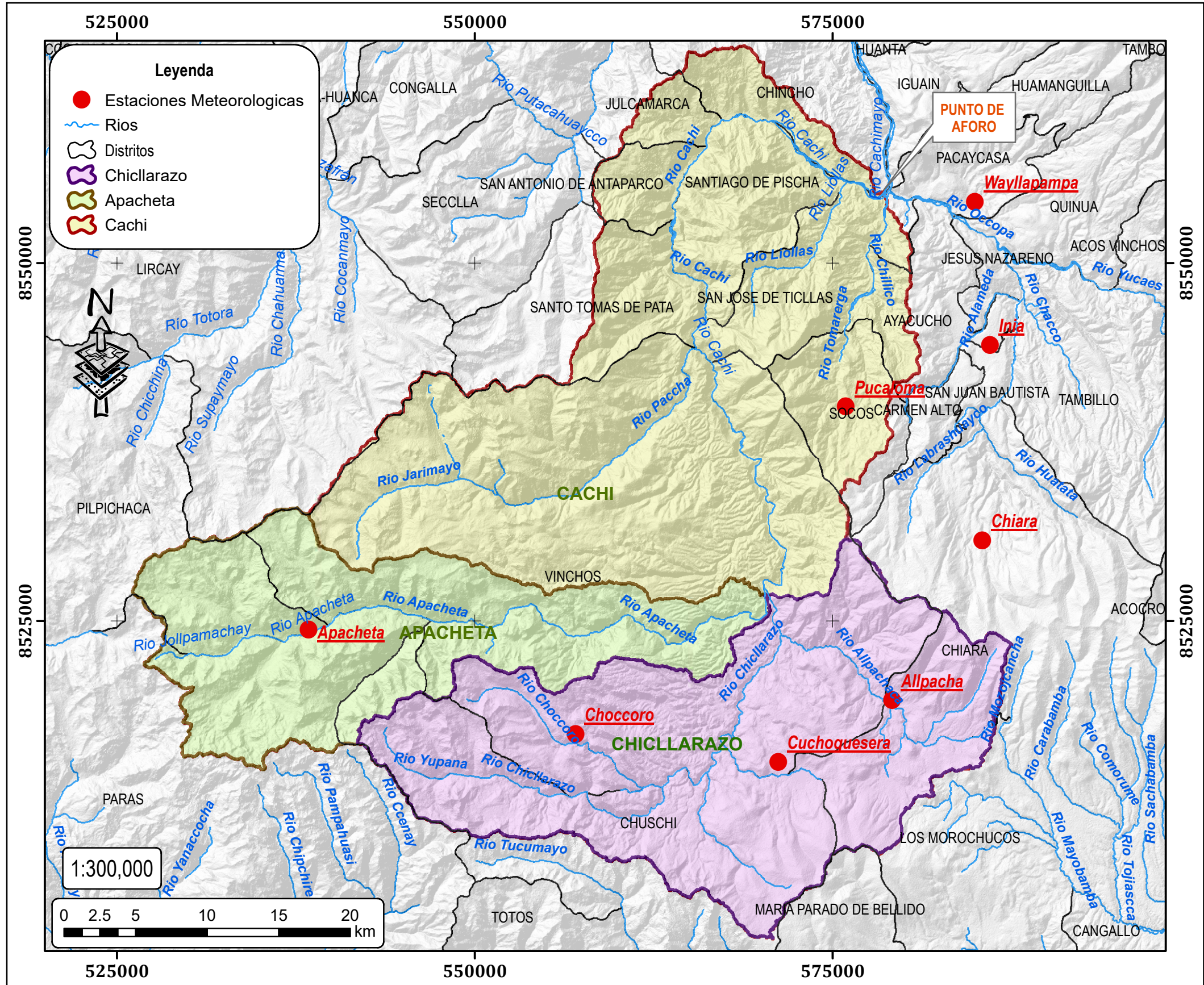
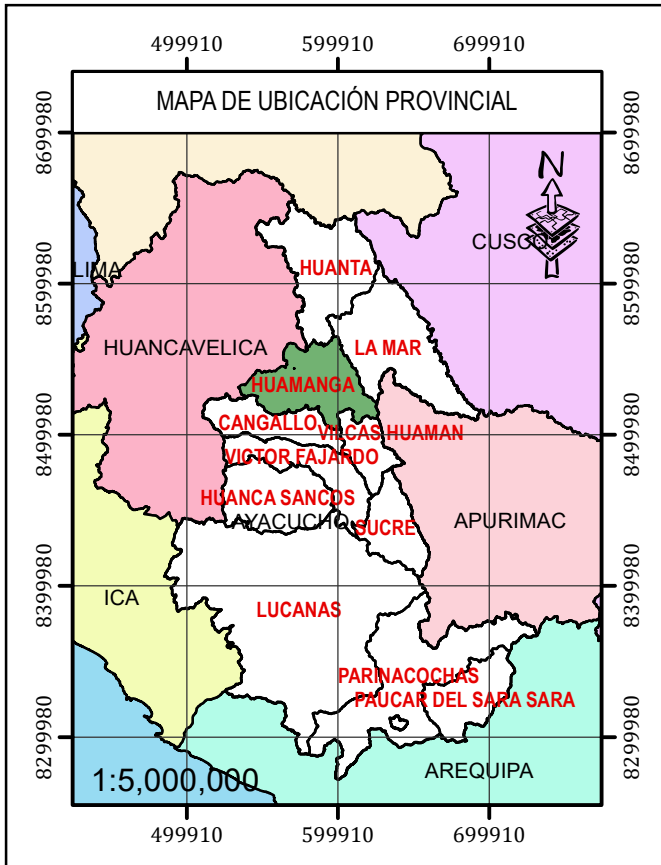
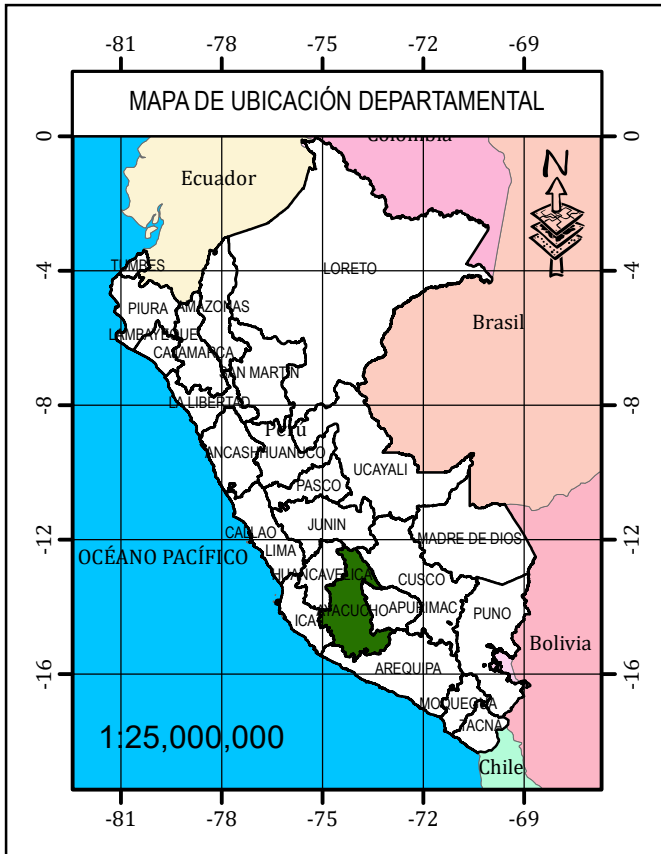
MAPA:
 UBICACION
 HIDROGRAFICA

UBICACIÓN:
 DEP : AYACUCHO
 PROV : HUAMANGA
 DISTR : PACAYCASA

Asesor:
 Dr. Richard Alex
 Oscco Peceros
Escala:
 Indicada

Tesista:
 Bach. Ing. Gabriel R.
 Ventura Cuba
Fecha:
 Set - 2025

LAMINA:
 MT-02



Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Datum: D_WGS_1984

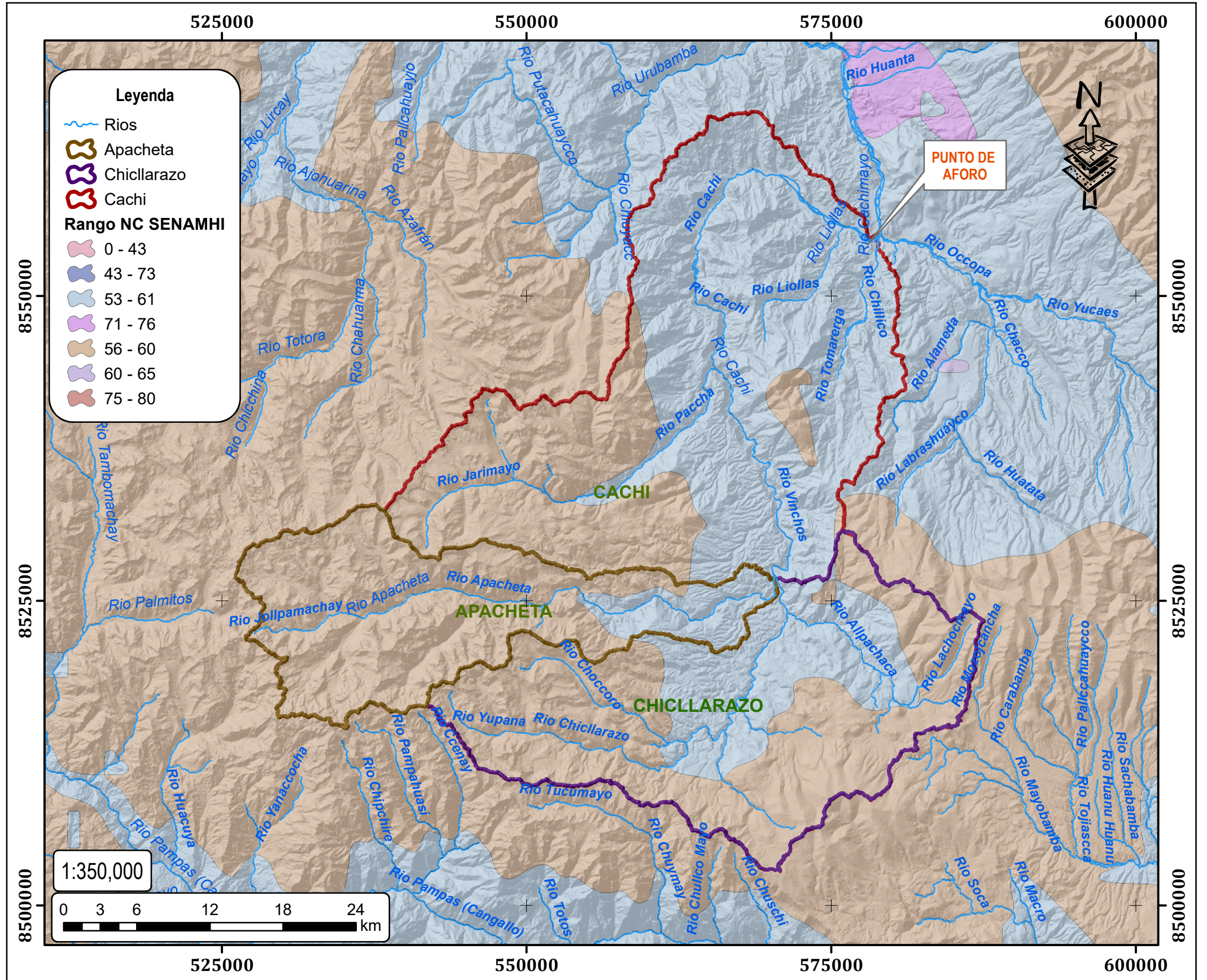
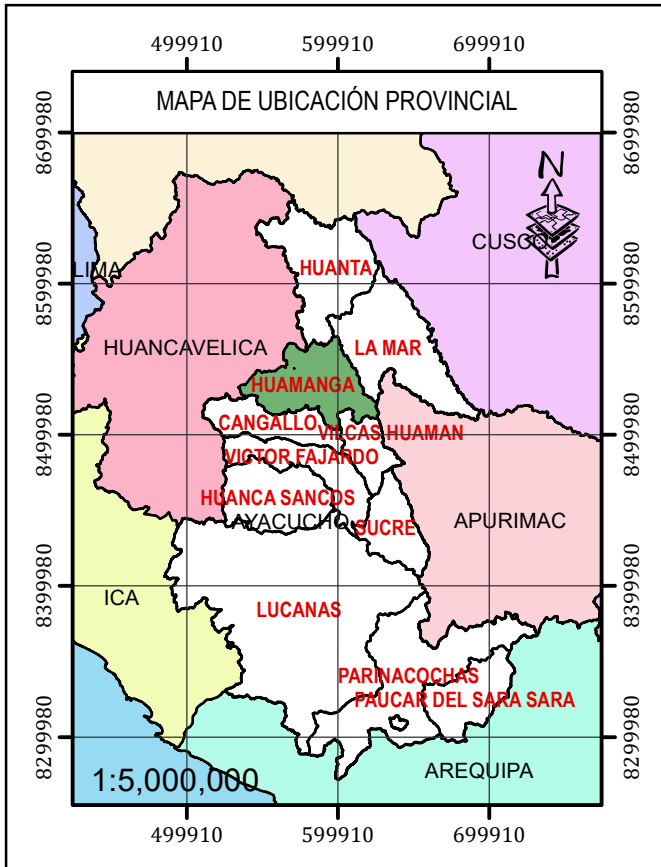
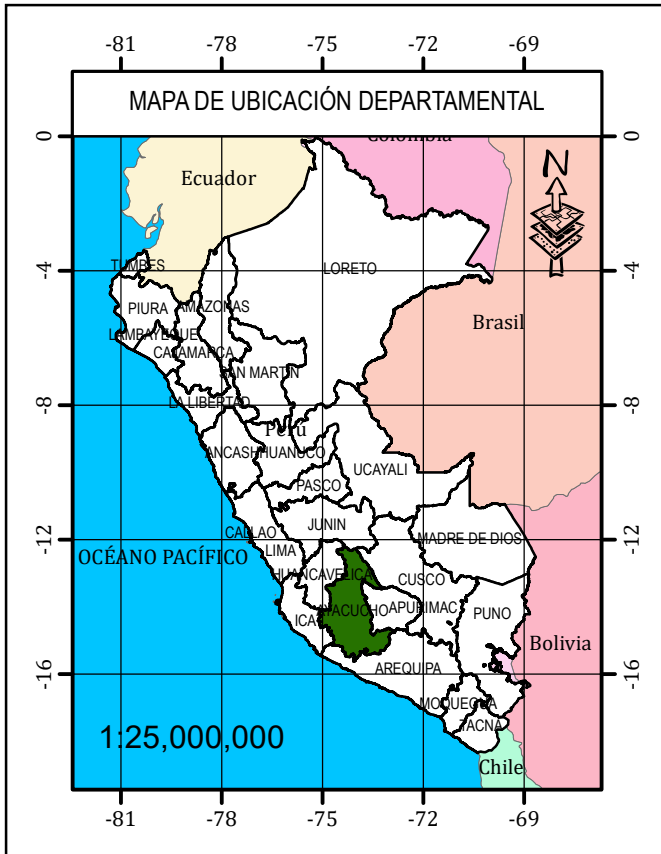
MAPA:
 ESTACIONES METEOROLOGICAS

UBICACIÓN:
 DEP : AYACUCHO
 PROV : HUAMANGA
 DISTR : PACAYCASA

Asesor:
 Dr. Richard Alex Oscco Peceros
Escala:
 Indicada

Tesista:
 Bach. Ing. Gabriel R. Ventura Cuba
Fecha:
 Set - 2025

LAMINA:
 MT-03



Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Datum: D_WGS_1984

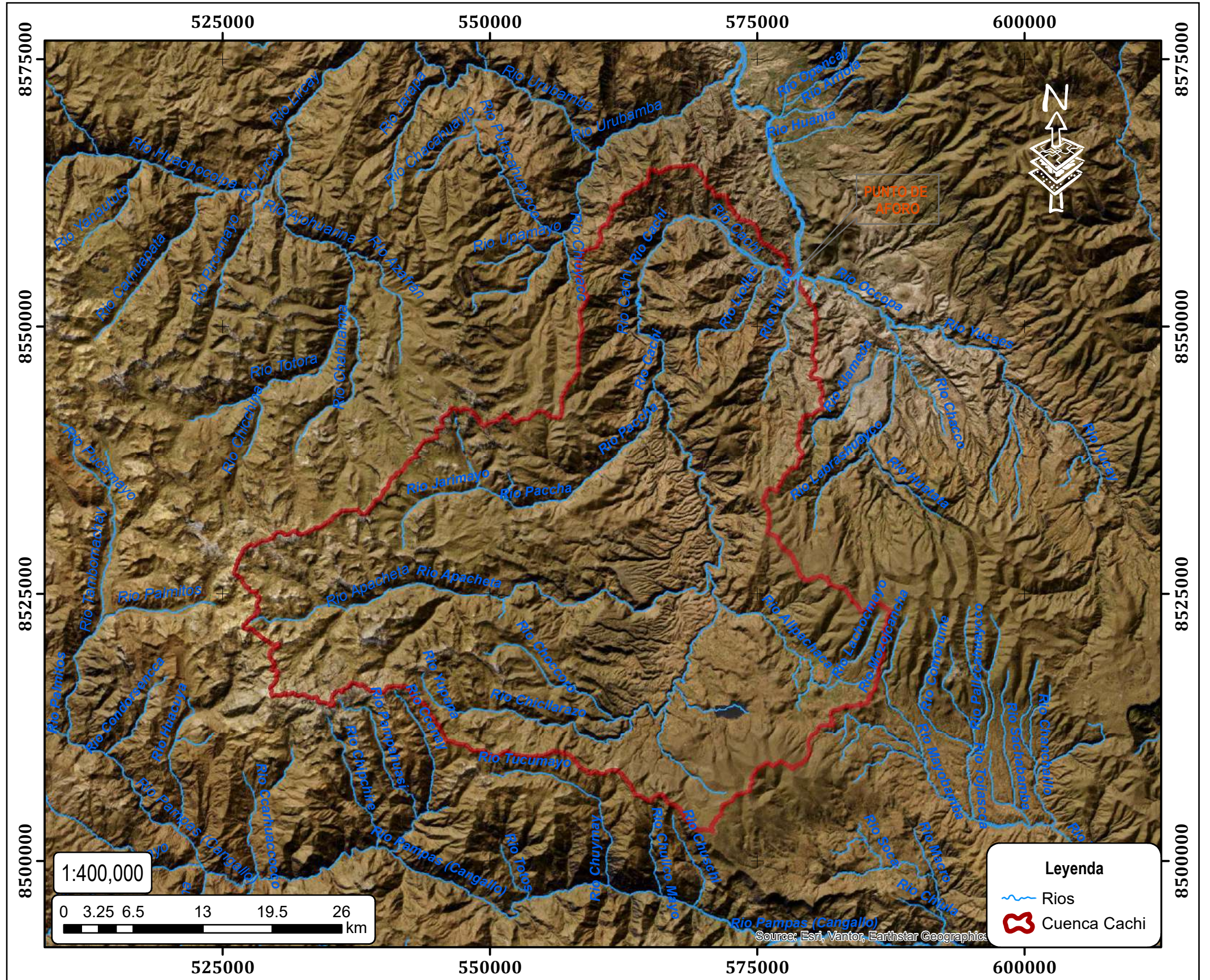
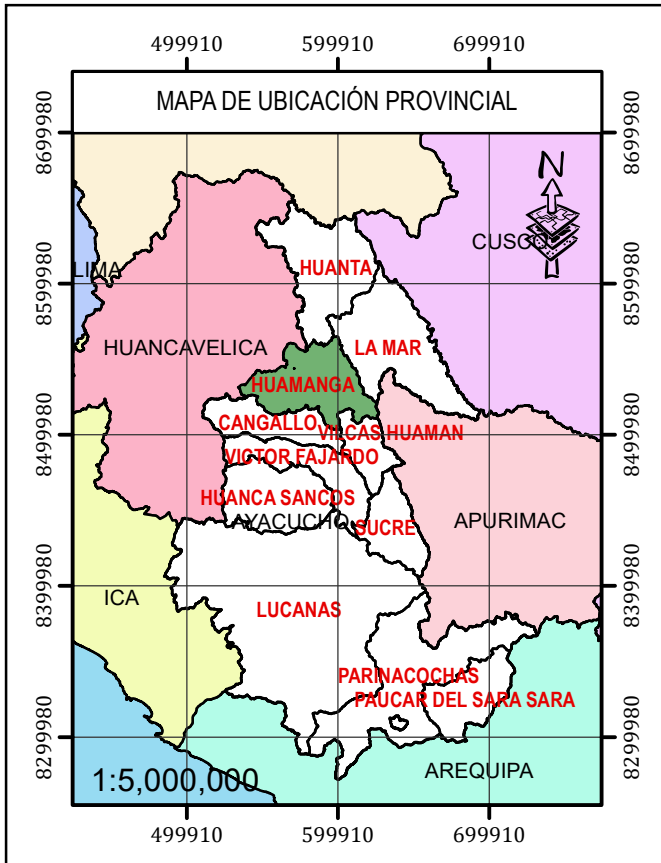
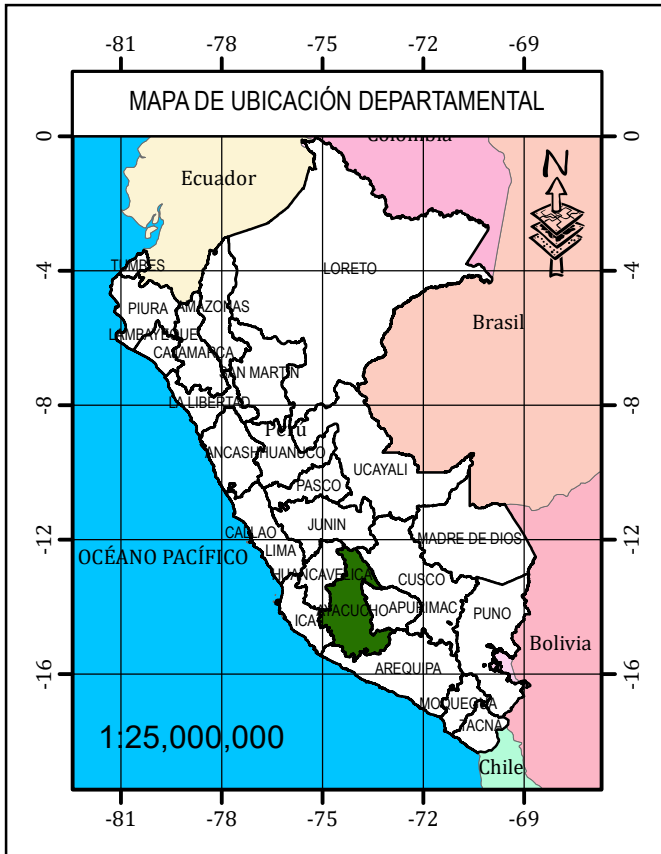
MAPA:
 NUMERO
 CURVA

UBICACIÓN:
 DEP : AYACUCHO
 PROV : HUAMANGA
 DISTR : PACAYCASA

Asesor:
 Dr. Richard Alex
 Oscco Peceros
 Escala:
 Indicada

Tesista:
 Bach. Ing. Gabriel R.
 Ventura Cuba
 Fecha:
 Set - 2025

LAMINA:
 MT-04



Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Datum: D_WGS_1984

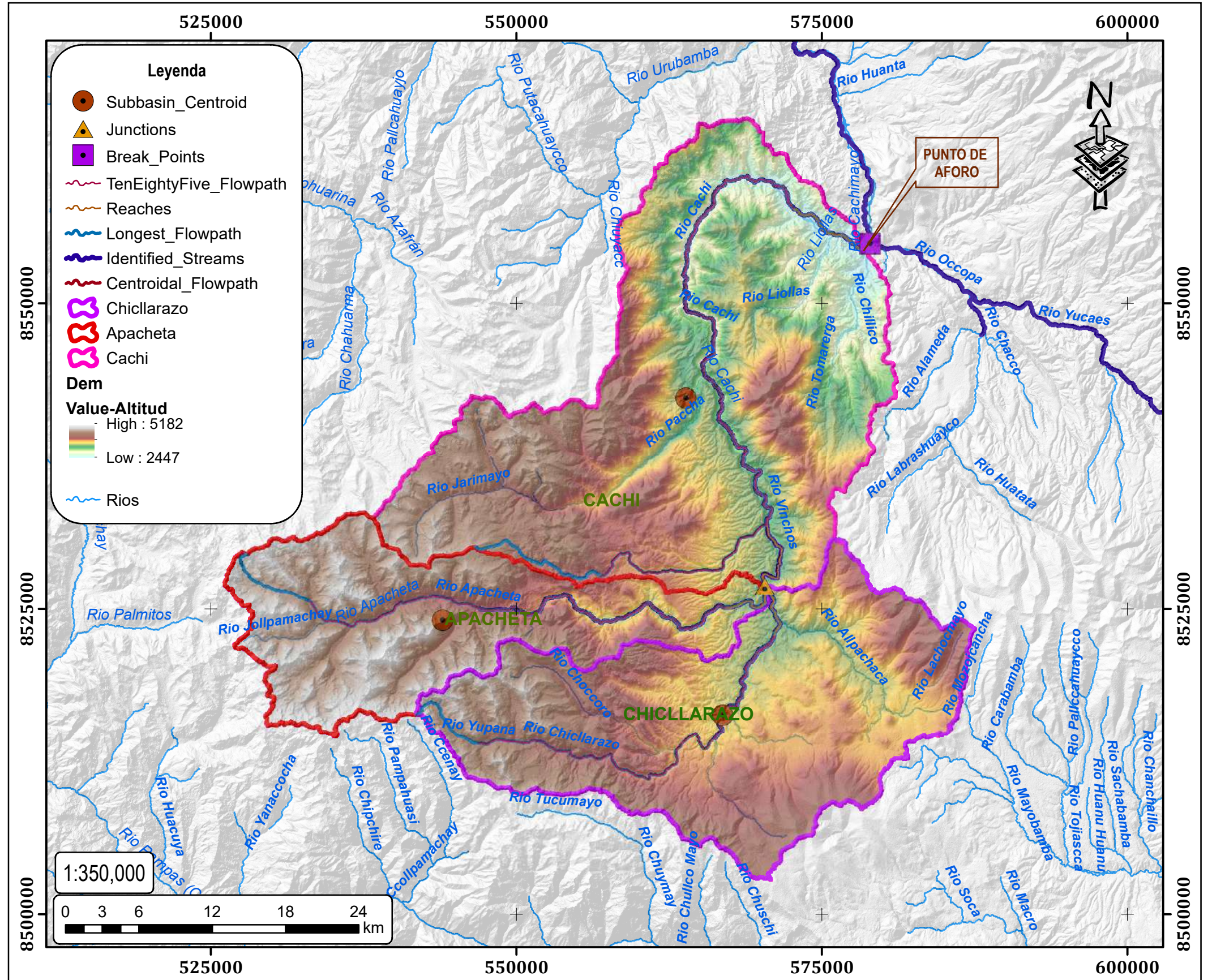
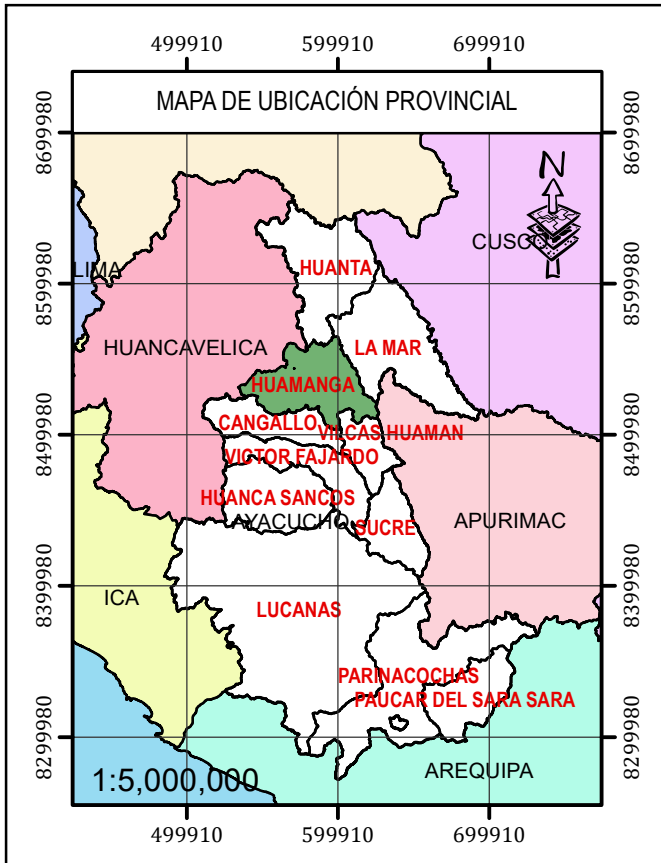
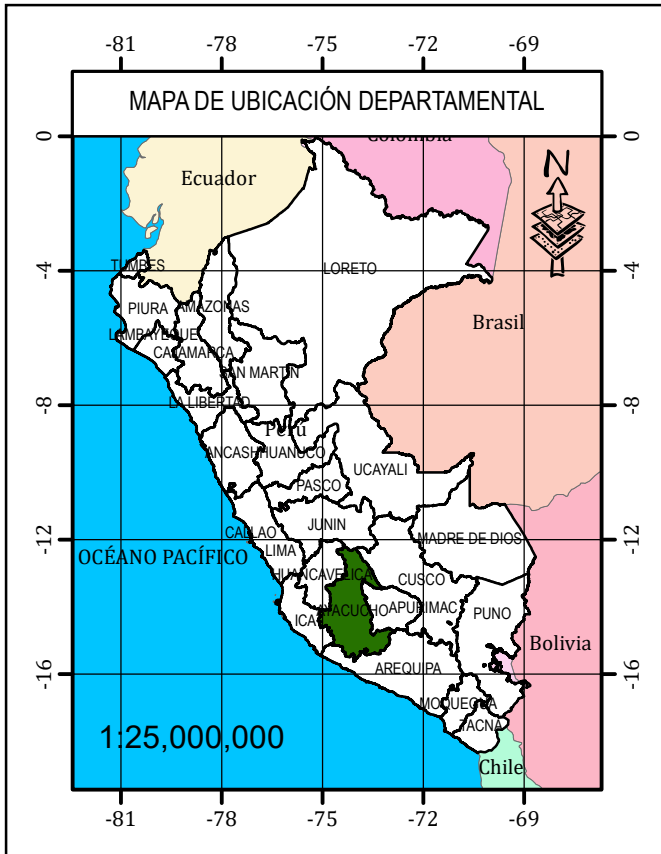
MAPA:
 SATELITAL

UBICACIÓN:
 DEP : AYACUCHO
 PROV : HUAMANGA
 DISTR : PACAYCASA

Asesor:
 Dr. Richard Alex
 Oscco Peceros
 Escala:
 Indicada

Tesista:
 Bach. Ing. Gabriel R.
 Ventura Cuba
 Fecha:
 Set - 2025

LAMINA:
 MT-05



Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Projected Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_18S
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Datum: D_WGS_1984

MAPA:
 MODELAMIENTO
 HEC HMS

UBICACIÓN:
 DEP : AYACUCHO
 PROV : HUAMANGA
 DISTR : PACAYCASA

Asesor:
 Dr. Richard Alex
 Oscco Peceros
Escala:
 Indicada

Tesista:
 Bach. Ing. Gabriel R.
 Ventura Cuba
Fecha:
 Set - 2025

LAMINA:
 MT-06



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. GABRIEL RONALDINO VENTURA CUBA

R.D. N° 500-2025-UNSCH-FCA-D


En la ciudad de Ayacucho a los treinta días del mes de diciembre del año dos mil veinticinco, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Dr. Juan Charapaquí Anccasi, Dr. Richard Alex Oscco Peceros como asesor, Ph.D. Sandra Del Águila Ríos y el Ing. Efraín Chuchón Prado; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **GABRIEL RONALDINO VENTURA CUBA**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberacion y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Juan Charapaquí Anccasi	16	14	15	15
Dr. Richard Alex Oscco Peceros	16	16	16	16
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos	15	14	15	15
Ing. Efraín Chuchón Prado	16	15	14	15
PROMEDIO GENERAL				15

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Dr. Juan Charapaquí Anccasi
Presidente


.....
Dr. Richard Alex Oscco Peceros
Asesor


.....
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos
Jurado


.....
Ing. Efraín Chuchón Prado
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-D; hace constar que el trabajo titulado;

Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

Autor : Gabriel Ronaldino VENTURA CUBA
Asesor : Richard Alex OSCCO PECEROS

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobando mediante de RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de siete por ciento (**7%**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 2920812434

Ayacucho, 02 de abril de 2026

.....
Angela J. Requis Quintanilla

M.Sc. en Fitopatología
E.P. Agronomía

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Modelación hidrológica HEC- HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

por Gabriel Ronaldino VENTURA CUBA

Fecha de entrega: 02-abr-2026 10:57a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2920812434

Nombre del archivo: Tesis_Gabriel_Ronaldino_Ventura_Cuba_1_.pdf (24.4M)

Total de palabras: 43349

Total de caracteres: 194358

Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net	Fuente de Internet	1%
3	repositorioacademico.upc.edu.pe	Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.ana.gob.pe	Fuente de Internet	<1%
6	es.scribd.com	Fuente de Internet	<1%
7	docplayer.es	Fuente de Internet	<1%
8	bibdigital.epn.edu.ec	Fuente de Internet	<1%

9	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	revistatyca.org.mx Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	bvpad.indeci.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
13	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
14	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ujcm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	www.hidrogis.com Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
19	Submitted to Universidad Nacional de Tumbes Trabajo del estudiante	<1 %

repositorio.lamolina.edu.pe

20

Fuente de Internet

<1 %

21

repositorio.usil.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Modelación hidrológica HEC-HMS para estimar caudales máximos mediante hietogramas de diseño en la cuenca Cachi, Ayacucho 2025

HEC-HMS hydrological modeling to estimate peak flows using design hietographs in the Cachi basin, Ayacucho 2025

Gabriel Ronaldino Ventura Cuba¹, Richard Alex Oscco Peceros²

gabriel.ventura.58@unsch.edu.pe richard.oscco@unsch.edu.pe

Área de investigación : Medio Ambiente

Línea de investigación : Hidrología

RESUMEN

Se evaluaron dos métodos para representar la variabilidad temporal de las precipitaciones: las curvas de Huff y Dyck Peschke, que discretizan la lluvia de diseño y la expresan a través de hietogramas. Las curvas de Huff ubican el máximo de intensidad al principio de la tormenta, lo que da lugar a distribuciones asimétricas y más realistas; por otro lado, el método Dyck Peschke produce hietogramas de forma más simétrica, en los que la intensidad va aumentando hasta llegar a un punto máximo y luego disminuye. El propósito fue establecer qué metodología calcula de manera más precisa los caudales máximos en comparación con la realidad. Se calcularon caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años utilizando modelamiento en HEC-HMS. Con el método de Dyck Peschke se obtuvieron caudales máximos de 7.28, 29.54, 52.95 y 125.71 m³/s; al ser contrastados con el caudal máximo aforado después de una máxima avenida de 41.471 m³/s, se determinó una diferencia de 11.479 m³/s durante la década correspondiente. Y con las curvas de Huff, se determinaron caudales de 1.67, 20.04, 42.48 y 101.42 m³/s, con una diferencia con el valor observado de solo 1.009 m³/s; esto señala que hubo un ajuste más favorable para el período de retorno de diez años. Por lo tanto, se determina que el método de las curvas de Huff es más fiable y preciso cuando se trata de estimar los caudales máximos y la distribución temporal de las lluvias.

Palabras clave: curvas de Huff, Dyck Peschke, HEC-HMS y máxima avenida

ABSTRACT

Two methods for representing the temporal variability of precipitation were evaluated: Huff and Dyck-Peschke curves, which discretize design rainfall and express it through hietographs. Huff curves place the maximum intensity at the beginning of the storm, resulting in asymmetric and more realistic distributions; on the other hand, the Dyck-Peschke method produces more symmetrical hietographs, in which the intensity increases to a maximum point and then decreases. The purpose was to determine which methodology calculates peak flows more accurately compared to reality. Peak flows were calculated for return periods of 2, 5, 10, and 50 years using HEC-HMS modeling. With the Dyck-Peschke method, peak flows of 7.28, 29.54, 52.95, and 125.71 m³/s were obtained; When compared to the maximum flow recorded after a peak flood of 41,471 m³/s, a difference of 11,479 m³/s was found during the corresponding decade. Using Huff curves, flows of 1.67, 20.04, 42.48, and 101.42 m³/s were determined, with a difference from the observed value of only 1,009 m³/s; this indicates a more favorable fit for the ten-year return period. Therefore, the Huff curve method is determined to be more reliable and accurate when estimating peak flows and the temporal distribution of rainfall.

Keywords: Huff curves, Dyck Peschke, HEC-HMS and maximum flood.

I. INTRODUCCIÓN

Castillo et al. (2023) indica que se utilizan los patrones de distribución temporal de las precipitaciones para generar tormentas de diseño; por eso, realizó un estudio de 243 eventos pluviales que sucedieron en la estación Yabú en Cuba, cuyo propósito principal era crear hietogramas sintéticos con el método de Huff. Estos se clasificaron en tres categorías: SC-T1, SC-T2 y SC-T3, basándose en la relación entre duración y tiempo de intensidades. Finalmente, logró obtener curvas IDF para cada tipo de aguacero y estas presentaron coeficientes de correlación de Pearson favorables. Por lo tanto, concluyó que los hietogramas generados reflejan adecuadamente el fenómeno pluvial.

Se emplearon dos métodos diferentes de distribución de lluvia en términos temporales para calcular los caudales máximos en la cuenca Cachi. El objetivo es determinar cuál es el método más apropiado para crear histogramas de diseño que reflejen con precisión los eventos extremos sin exagerar los resultados. Para los futuros estudios hidrológicos y para calcular con precisión los caudales máximos en proyectos de infraestructura hidráulica, es esencial establecer cuál es la técnica más exacta. Las metas definidas en este contexto son:

Objetivo general

Estimar caudales máximos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, mediante las metodologías de Dyck Peschke y curvas de Huff para determinar caudales máximos que representen que representen adecuadamente al comportamiento hidrológico real.

Objetivos específicos

Construir hietogramas de diseño mediante el método de Dyck Peschke, con el fin de representar la distribución temporal de las lluvias en la cuenca Cachi.

Elaborar hietogramas de diseño empleando las curvas de Huff, establecidas a partir de estudios de tormentas pluviométricas en el Perú, para representar la distribución temporal de lluvias en la cuenca Cachi.

Modelamiento de caudales máximos mediante el modelo HEC-HMS mediante hietogramas de diseño que representan diferentes distribuciones de lluvias, para la calibración del caudal máximo.

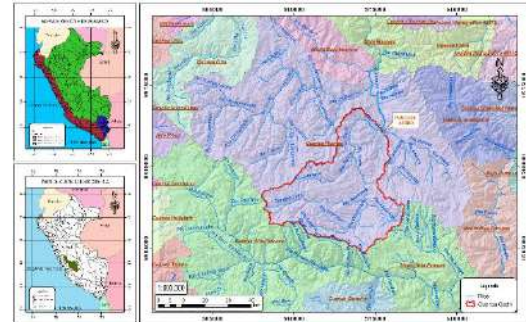
II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación

2.1.1. Ubicación hidrográfica

La cuenca del río Cachi pertenece a la subcuenca Huarpa, cuenca Mantaro y región hidrográfica Amazonas.

Figura 1
Mapa de ubicación hidrográfica

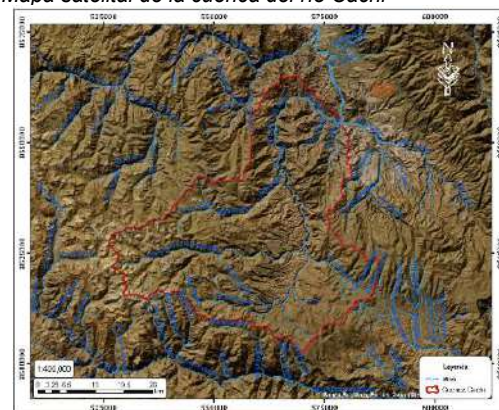


2.1.2. Ubicación geográfica

La ubicación geográfica del punto de salida de la cuenca del río Cachi se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas UTM WGS-84 zona 18 L:

- Este : 578,689.00 m.
- Norte : 8'554,814.00 m.
- Altitud : 2,416.88 m.s.n.m.

Figura 2
Mapa satelital de la cuenca del río Cachi

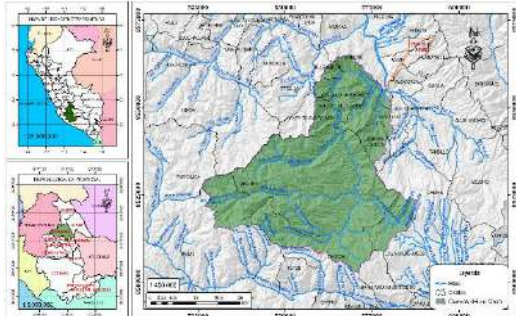


2.1.3. Ubicación política

Políticamente el punto de salida de la cuenca Cachi se encuentra ubicado en los siguientes límites:

- Departamentos : Huancavelica.
- Provincia : Angaraes.
- Distrito : Chincho.

Figura 3
Mapa de ubicación



2.2. Materiales y Software

2.2.1. Materiales para el aforo del río

- Wincha de 100m.
- Correntómetro Global Water a Xylem brand, Model Name/Number: FP111
- Flexómetro.
- Cámara fotográfica.
- Libreta de campo.
- Gps.

2.2.2. Software de hidrología

- ArcMap 10.3.1.
- HEC-HMS 4.12.
- Hyfran Plus 1.2.
- Hydraccess 6.2.

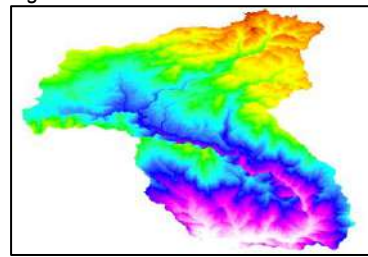
III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke

A. Delimitación y obtención de parámetros morfológicos.

Los parámetros morfométricos de las subcuencas que conforman el río Cachi se determinaron a partir de la delimitación hidrológica realizada mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM).

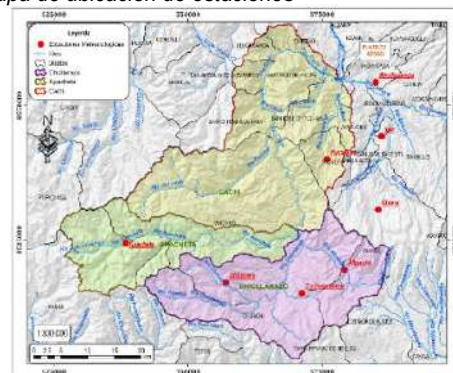
Figura 4
Modelo digital de elevación



B. Recolección de datos meteorológicos

Se identificó una limitada disponibilidad de datos pluviométricos, del cual se consideró las estaciones cercanas.

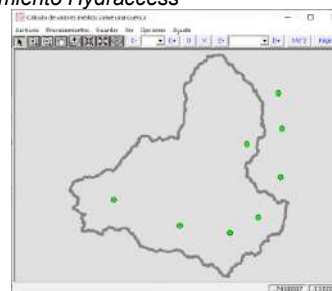
Figura 5
Mapa de ubicación de estaciones



C. Selección de la precipitación máxima de 24 horas

Para obtener valores representativos de precipitación máxima en 24 horas en toda la cuenca del río Cachi, se aplicó el método de interpolación espacial Kriging, el cual permite estimar con mayor precisión la distribución espacial de la precipitación a partir de los registros disponibles en las estaciones meteorológicas. La implementación se realizó mediante el software Hydraccess.

Figura 6
Procesamiento Hydraccess



D. Identificación de datos dudosos o atípicos

Para identificar la presencia de datos atípicos (outliers) en la serie de precipitación, se consideraron aquellos registros que superaron un umbral establecido respecto a la profundidad de lluvia máxima esperada. Estos valores se detectaron mediante la siguiente ecuación:

$$Y_L = \bar{Y} \pm K_n S_Y \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

E. Selección de la mejor distribución de probabilidades

Mediante el software Hyfran Plus, se ajustaron las precipitaciones máximas en 24 horas a las siguientes distribuciones de probabilidad: Weibull, Log-Normal, Normal, Gamma y Log-Pearson III. El análisis de bondad de ajuste determinó que la mejor distribución que presentó el mejor ajuste.

F. Construcción de hietogramas de diseño mediante bloques alternos

Para la construcción del hietograma de diseño se empleó el método de Dyck Peschke, el cual se fundamenta en el uso de las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

$$P_d = P_{P_{max\ 24\ hr}} \times 24\ hr \times \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \dots\dots (Ec. 2)$$

De manera similar, para determinar la intensidad de la lluvia (mm/h) se empleó la siguiente expresión:

$$I = \frac{P_d \times 60}{D} \dots\dots\dots (Ec. 3)$$

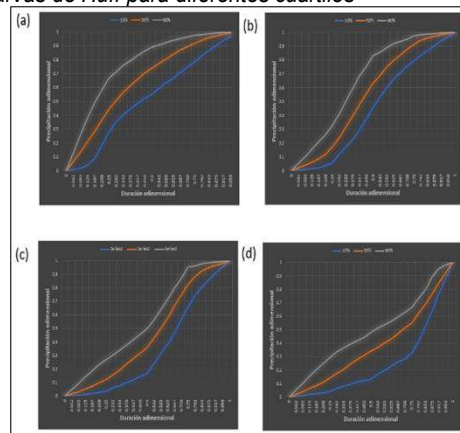
3.2. Distribución de lluvias mediante curvas de Huff

A. Metodología de obtención de tablas de coeficiente de duración adimensional

Para representar la distribución temporal de las precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del río Cachi, se adoptó la metodología propuesta en el proyecto “Caracterización de tormentas pluviométricas (TP) del Perú”. En dicho estudio, el autor analizó eventos de tormentas pluviométricas a escala nacional

utilizando datos de 286 estaciones automáticas del SENAMHI.

Figura 7
Curvas de Huff para diferentes cuartiles



Nota. Extraído de Quijada (2020)

B. Construcción de hietogramas de diseño con curvas de Huff

Se utilizaron las tablas de coeficientes adimensionales de duración de las curvas de Huff elaboradas para 27 regiones a nivel nacional. Para la cuenca Cachi se empleó los valores de las tablas de coeficientes adimensionales de las curvas de Huff correspondientes a la región A12 que fueron elaborados por Quijada (2020).

Figura 8
Coefficientes de duración adimensional de curvas de Huff

Duración (hrs)	REGIONES A11						REGIONES A12					
	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
0.062	0.087	0.079	0.14	0.060	0.021	0.056	0.069	0.017	0.044	0.004	0.017	0.045
0.062	0.010	0.12	0.272	0.060	0.067	0.122	0.069	0.020	0.059	0.000	0.004	0.091
0.129	0.042	0.226	0.403	0.012	0.066	0.147	0.014	0.03	0.133	0.012	0.001	0.145
0.167	0.098	0.268	0.31	0.02	0.091	0.22	0.019	0.040	0.179	0.017	0.008	0.17
0.206	0.104	0.377	0.411	0.008	0.124	0.278	0.02	0.099	0.222	0.029	0.003	0.196
0.22	0.279	0.401	0.401	0.009	0.17	0.336	0.038	0.110	0.207	0.014	0.107	0.222
0.262	0.209	0.52	0.717	0.121	0.24	0.427	0.07	0.100	0.303	0.004	0.152	0.241
0.335	0.407	0.51	0.77	0.196	0.324	0.572	0.095	0.192	0.343	0.079	0.175	0.268
0.379	0.460	0.627	0.803	0.240	0.417	0.630	0.104	0.234	0.369	0.06	0.2	0.289
0.417	0.463	0.67	0.842	0.261	0.21	0.713	0.117	0.270	0.433	0.089	0.229	0.330
0.456	0.523	0.719	0.875	0.260	0.21	0.767	0.126	0.281	0.475	0.11	0.260	0.376
0.5	0.57	0.77	0.909	0.409	0.407	0.846	0.142	0.337	0.509	0.123	0.296	0.437
0.542	0.507	0.761	0.911	0.561	0.728	0.889	0.206	0.420	0.572	0.174	0.373	0.47
0.583	0.610	0.812	0.930	0.601	0.707	0.919	0.219	0.3	0.606	0.156	0.356	0.488
0.625	0.667	0.840	0.940	0.620	0.620	0.936	0.41	0.643	0.714	0.143	0.342	0.5
0.667	0.709	0.875	0.951	0.704	0.86	0.948	0.481	0.607	0.812	0.17	0.407	0.524
0.708	0.74	0.899	0.959	0.740	0.894	0.962	0.588	0.761	0.917	0.186	0.426	0.569
0.75	0.768	0.914	0.979	0.792	0.923	0.979	0.677	0.824	0.946	0.192	0.446	0.611
0.792	0.829	0.940	0.986	0.842	0.947	0.983	0.789	0.883	0.962	0.22	0.377	0.643
0.833	0.875	0.960	0.991	0.881	0.967	0.99	0.917	0.933	0.979	0.246	0.412	0.706
0.875	0.910	0.979	0.994	0.915	0.974	0.993	0.972	0.937	0.988	0.302	0.706	0.807
0.917	0.944	0.987	0.996	0.941	0.983	0.996	0.963	0.966	0.99	0.326	0.697	0.841
0.959	0.972	0.994	0.998	0.971	0.991	0.998	0.987	0.968	0.999	0.364	0.903	0.965

3.3. Modelamiento hidrológico HEC-HMS

A. Características del modelo hidrológico

El modelo HEC-HMS requiere varios componentes para iniciar la simulación hidrológica: el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico, las especificaciones de control y los datos de entrada. Durante la simulación, el programa realiza la transformación de lluvia en caudal para la cuenca de estudio.

B. Selección de métodos

Para estimar las pérdidas, se utilizó el método SCS Curve Number (Soil Conservation Service), que permite calcular la infiltración y el exceso de lluvia (escorrentía directa) a partir de la precipitación. Asimismo, se aplicó el método de transformación mediante el SCS Unit Hydrograph, el cual convierte la lluvia efectiva en caudales dentro de un intervalo determinado, representados posteriormente en un hidrograma.

Figura 9
Esquematación del modelo HEC-HMS

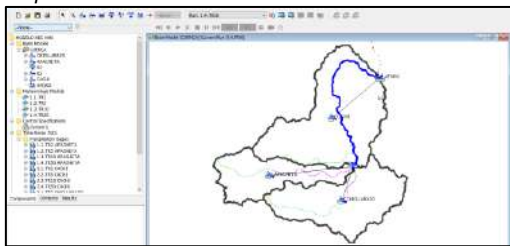


Tabla 1
Parámetros de las subcuencas del río Cachi para el modelo HEC HMS

Subcuenca	NC	L (km)	J (m/m)	Tc (min)	Tlag (min)	Tlag (hr)
Chicllarazo	62.35	53.1	0.037	255.6	86.8	1.45
Apacheta	62.55	58.7	0.04	264	83.1	1.39
Cachi	60.95	89.37	0.03	402	114	1.14

C. Aforo de caudal del río Cachi

Se realizó un aforo in situ en la salida de la cuenca del río Cachi mediante un correntómetro, aplicando el método área-velocidad, el cual consistió en medir la velocidad del flujo en distintos puntos de la sección transversal del cauce principal.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Distribución de lluvias mediante Dyck Peschke

4.1.1. Resultado de las características morfométricas de las cuencas

Se determinaron las características morfométricas como el factor de forma, los parámetros de relieve y de la red hidrográfica de las subcuencas de la cuenca del río Cachi mediante el procesamiento de un Modelo Digital de Elevación (DEM) en ArcMap.

Tabla 2
Parámetros morfométricos de las subcuencas

Subcuencas de la cuenca del río Cachi						
Parámetros	Unidad	Apacheta	Cachi	Chicllarazo		
Área de la cuenca	Km ²	398.73	1266.58	612.31		
Perímetro	Km	175.7	246.58	188.8		
Parámetros de forma	Factor De Cuenca	Coefficiente de Compacidad (Gravelius)	2.48	1.94	2.14	
		Longitud (// al curso más largo)	Km	25.61	156.11	69.44
	Factor De Forma	Ancho Medio	Km	15.54	8.11	8.82
		Radio de Circularidad	Coef.	0.16	0.26	0.22
		Factor de Forma	Coef.	0.61	0.05	0.13
		Relación de elongación	Coef.	0.88	0.26	0.4
	Rectángulo Equivalente	Lado Mayor	Km	83.06	111.98	87.39
		Lado Menor	Km	4.79	11.31	7.01
	Longitud total de los ríos de diferentes grados	Orden 1	Km	76.76	250.33	106.54
		Orden 2	Km	7.84	50.32	33.79
Orden 3		Km	43.32	23.29	3.31	
Orden 4		Km	-	20.62	-	
Parámetros de relieve	Cuna Hipsométrica	-	-	-	-	
	Polígono de Frecuencia	-	-	-	-	
	Altitud Máxima de la Cuenca	m.s.n.m.	5182	4492	4947	
	Altitud Mínima de la Cuenca	m.s.n.m.	3312	2445	3312	
	Desnivel total de la Cuenca	Km	1.87	2.05	1.64	
	Altitud de Frecuencia Media	m.s.n.m.	4445.86	3598.62	4097.06	
	Altitud Media de la Cuenca	m.s.n.m.	4396.64	3511.09	4006.03	
	Altura más frecuente	m.s.n.m.	4714.5	4184.5	3720.5	
Pendiente de la cuenca	%	17.34	9.9	12.47		
	m/m (Reporte GIS)	0.18	0.16	0.14		
Parámetros de la red hidrográfica	Tipo de corriente	-	Perenne	Perenne	Perenne	
	Densidad de drenaje	Km/Km ²	0.32	0.27	0.23	
	Pendiente media del río principal	m/m	0.04	0.03	0.04	
	Altitud Mínima del cauce	m.s.n.m.	3312	2445	3312	
	Tiempo de concentración	hrs	2.5	9.95	5.13	
Grado de ramificación	-	3	4	3		

Las subcuencas se dividieron en tres categorías basándose en los polígonos de frecuencia y las curvas hipsométricas: A (que incluye a las subcuencas Apacheta, jóvenes y erosionables) y B (que comprende a las subcuencas Chicllarazo y Cachi, en equilibrio).

Figura 10
Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Apacheta

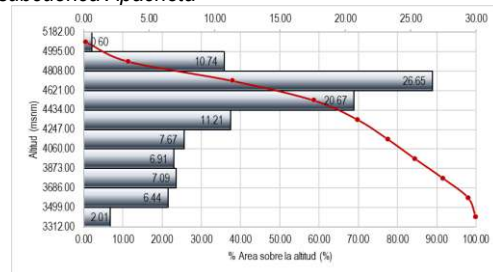


Figura 11
Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Chicllarazo

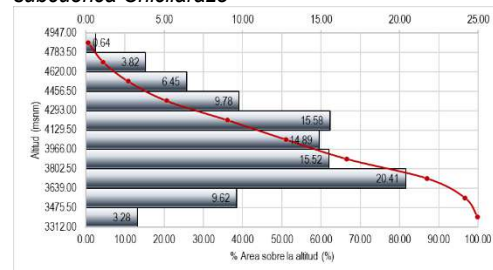
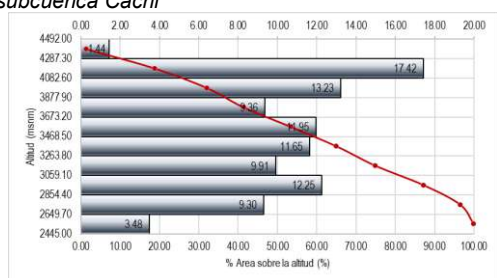


Figura 12
Polígono de frecuencia y curva hipsométrica subcuenca Cachi



4.1.2. Discusión de los parámetros morfológicos obtenidos

Por otro lado, a pesar de ser más pequeña en extensión, la subcuenca Apacheta tiene una pendiente y una densidad de drenaje más elevadas. Esto significa que su tiempo de concentración es menor, su respuesta hidrológica es más rápida y tiene un potencial de escorrentía mayor. Chicllarazo, por su parte, presenta cifras intermedias en la mayor parte de los parámetros. Además, se observa que las tres subcuencas tienen formas alargadas, según los coeficientes de circularidad y forma, lo cual tiende a disminuir la posibilidad de crecidas repentinas y distribuir el flujo a lo largo del tiempo.

4.1.3. Resultado de la data de precipitaciones máximas en 24 horas

En la investigación actual, se estableció el máximo de precipitación en 24 horas utilizando las anotaciones históricas de cada estación meteorológica. La interpolación Kriging, empleando el programa Hydraccess, fue la técnica utilizada para llevar a cabo la estimación espacial.

Tabla 3
Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Apacheta

Año	Apacheta	Pp max 24hr
2005	33.98	33.98
2006	18	18
2007	28.18	28.18
2008	20.22	20.22
2009	32.7	32.7
2010	27.9	27.9
2011	36.2	36.2
2012	42.3	42.3
2013	35.9	35.9
2014	38.5	38.5
2015	30.7	30.7
2016	31.6	31.6
2017	45	45
2018	40.2	40.2
2019	24.58	24.58
2020	24.42	24.42
2021	25.98	25.98
2022	24.59	24.59
2023	23.93	23.93
2024	29.87	29.87
2025	31.89	31.89

Tabla 4
Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Chicllarazo

Año	Allpachaca	Choccoro	Cuchoquesera	Apacheta	Pp max 24hr
1996	38.1		35.2	35.2	36.1
1997	28.3		28.4	28.4	28.4
1998	35.2		27	27	29.5
1999	21.1		42.6	42.6	35.9
2000	41.9	47.45	43.94	43.94	44.8
2001	28.5	44.2	37.86	37.86	37.8
2002	28.5	79	39.34	39.34	33.82
2003	25.4	25.3	23.3	23.3	24.7
2004	36	35.5	30.3	30.3	34
2005	27.6	32	30.6	30.6	30.3
2006	28.2	31.7	36	36	32.1
2007	43.5	35.8	25.2	25.2	34.6
2008	28.9	52.01	26.2	26.2	37.4
2009	28	29.7	21.8	21.8	26.7
2010	37.4	30.4	28.4	28.4	31.7
2011	41.3	32.8	34	34	35.6
2012	45.2	49.9	40.3	40.3	45.6
2013	27.2	25	55.6	55.6	35.2
2014	28	41.7	28	28	33.6
2015	27	32.8	42	42	34.1
2016	23	46	28.4	28.4	34
2017	31.2	41.9	43.4	43.4	39.4
2018	20.7	38	26	26	29.4
2019	27.28	36.48	27.97	27.97	31.2
2020	23.26	38.68	26.98	26.98	30.7
2021	25.17	28.21	26.02	26.02	26.7
2022	32.23	39.71	30.06	30.06	34.6
2023	24.57	30.35	31.14	31.14	29
2024	30.19	39.55	28.42	28.42	33.4
2025	25.4	24.14	28.39	28.39	25.8

Tabla 5
Precipitaciones máximas (mm) en 24 horas usadas para la subcuenca Cachi

Año	Apacheta	Pucalloma	Chiara	Itia	Allpachaca	Wayllapampa	Pp max 24hr
1996	31.3	27.9	29	38.1	19.1	30.3	
1997	56.3	23.7	23.2	28.3	25.4	52	
1998	29.8	23.9	27.3	35.2	22.4	31.5	
1999	26.6	24.4	24.8	21.1	26.2	30	
2000	76.86	16.11	35.2	41.9	34.2	59	
2001	30.49	37.96	24.69	28.5	23.2	33.5	
2002	28.32	27.28	27.6	28.5	31	42.9	
2003	34.46	34.8	30	25.4	50.4	33.1	
2004	20.99	32.62	21.77	36	40.3	27.9	
2005	33.98	33.66	27.3	37.12	27.6	35.5	
2006	18	69.5	26	22.59	28.2	45.8	
2007	28.18	19.1	22	20.6	43.5	26.99	
2008	20.22	25.4	18.4	31.5	28.9	23	
2009	32.7	19.1	24	29.6	28	29	
2010	27.9	41	28.1	24.5	37.4	18.7	
2011	36.2	35.93	40	46.7	41.3	32.3	
2012	42.3	23.2	25	24.7	45.2	27.6	
2013	35.9	20.3	24	23.6	27.2	37.7	
2014	38.5	75	71.5	23.1	28	34.4	
2015	30.7	42.2	22	29.2	27	33.35	
2016	31.6	30.3	20	28.8	23	33.1	
2017	45	26.2	23	28.4	31.2	23.8	
2018	40.2	36.51	22	20.92	20.7	25.8	
2019	24.58	29.96	21.87	31.03	27.28	21.9	
2020	24.42	45.45	22.82	21.81	23.26	22.91	
2021	25.98	21.67	20.59	24.53	25.17	22.7	
2022	24.59	26.03	24.39	21.74	32.23	28.94	
2023	23.93	35.32	21.84	22.5	24.57	28.8	
2024	29.87	35.11	24.99	22.78	30.19	21.12	
2025	31.89	24.68	21.95	23.88	25.4	25.12	

4.1.4. Discusión del método Kriging

Se creó un gráfico que muestra la variación anual de las precipitaciones máximas documentadas en cada estación meteorológica. El análisis combinado de estas series, además de los resultados de la interpolación Kriging, mostró que se lograba un ajuste espacial más preciso y una representación más exacta de los valores máximos en la cuenca del río Cachi.

4.1.5. Resultado de la identificación de datos atípicos

Se compararon los límites superior e inferior de las precipitaciones máximas que se obtuvieron por medio del Kriging con el fin de validar los valores interpolados, analizando su capacidad para representar de manera adecuada las condiciones de la cuenca y su coherencia espacial.

Tabla 6
Análisis de datos atípicos subcuenca Chicllarazo

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	36.10	1996	3.59	Verificado
2	28.40	1997	3.35	Verificado
3	29.50	1998	3.38	Verificado
4	35.90	1999	3.58	Verificado
5	44.80	2000	3.8	Verificado
6	37.80	2001	3.63	Verificado
7	33.82	2002	3.52	Verificado
8	24.70	2003	3.21	Verificado
9	34.00	2004	3.53	Verificado
10	30.30	2005	3.41	Verificado
11	32.10	2006	3.47	Verificado
12	34.60	2007	3.54	Verificado
13	37.40	2008	3.62	Verificado
14	26.70	2009	3.28	Verificado
15	31.70	2010	3.46	Verificado
16	35.60	2011	3.57	Verificado
17	45.60	2012	3.82	Verificado
18	35.20	2013	3.56	Verificado
19	33.60	2014	3.51	Verificado
20	34.10	2015	3.53	Verificado
21	34.00	2016	3.53	Verificado
22	39.40	2017	3.67	Verificado
23	29.40	2018	3.38	Verificado
24	31.20	2019	3.44	Verificado
25	30.70	2020	3.42	Verificado
26	26.70	2021	3.28	Verificado
27	34.60	2022	3.54	Verificado
28	29.00	2023	3.37	Verificado
29	33.40	2024	3.51	Verificado
30	25.80	2025	3.25	Verificado
Promedio	33.20	Media Ln	3.49	
Desv. Est	4.91	Desvió Ln	0.15	
		Kn	2.563	
		Lim Superior	3.865	
		Lim Inferior	3.119	

Tabla 7
Análisis de datos atípicos subcuenca Apacheta

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	33.98	2005	3.53	Verificado
2	18	2006	2.89	Verificado
3	28.18	2007	3.34	Verificado
4	20.22	2008	3.01	Verificado
5	32.7	2009	3.49	Verificado
6	27.9	2010	3.33	Verificado
7	36.2	2011	3.59	Verificado
8	42.3	2012	3.74	Verificado
9	35.9	2013	3.58	Verificado
10	38.5	2014	3.65	Verificado
11	30.7	2015	3.42	Verificado
12	31.6	2016	3.45	Verificado
13	45	2017	3.81	Verificado
14	40.2	2018	3.69	Verificado
15	24.58	2019	3.2	Verificado
16	24.42	2020	3.2	Verificado
17	25.98	2021	3.26	Verificado
18	24.59	2022	3.2	Verificado
19	23.93	2023	3.18	Verificado
20	29.87	2024	3.4	Verificado
21	31.89	2025	3.46	Verificado
Promedio	30.79	Media Ln	3.4	
Desv. Est	7.19	Desvió Ln	0.24	
		Kn	2.408	
		Lim Superior	3.977	
		Lim Inferior	2.824	

Tabla 8
Análisis de datos atípicos subcuenca Cachi

N	Prec. Max diaria anual	Año	Ln Max	Condición
1	30.3	1996	3.41	Verificado
2	52	1997	3.95	Verificado
3	31.5	1998	3.45	Verificado
4	30	1999	3.4	Verificado
5	59	2000	4.08	Verificado
6	33.5	2001	3.51	Verificado
7	42.9	2002	3.76	Verificado
8	33.1	2003	3.5	Verificado
9	27.9	2004	3.33	Verificado
10	35.5	2005	3.57	Verificado
11	45.8	2006	3.82	Verificado
12	24.7	2007	3.21	Verificado
13	26.4	2008	3.27	Verificado
14	25.5	2009	3.24	Verificado
15	32.5	2010	3.48	Verificado
16	32.8	2011	3.49	Verificado
17	30.7	2012	3.42	Verificado
18	27.8	2013	3.33	Verificado
19	53.4	2014	3.98	Verificado
20	37.3	2015	3.62	Verificado
21	31.9	2016	3.46	Verificado
22	32	2017	3.47	Verificado
23	36.2	2018	3.59	Verificado
24	28.3	2019	3.34	Verificado
25	36.2	2020	3.59	Verificado
26	24	2021	3.18	Verificado
27	28	2022	3.33	Verificado
28	31.1	2023	3.44	Verificado
29	33.3	2024	3.51	Verificado
30	26.9	2025	3.29	Verificado
Promedio	34.02	Media Ln	3.5	
Desv. Est	8.6	Desvió Ln	0.23	
		Kn	2.563	
		Lim Superior	4.078	
		Lim Inferior	2.923	

4.1.6. Discusión de los datos atípicos

Con el fin de detectar posibles valores atípicos en la serie de precipitaciones máximas, se realizó una verificación que confirmó la ausencia de datos dudosos, validando así la consistencia de los datos.

4.1.7. Resultado de las pruebas de hipótesis

El software Hyfran Plus se utilizó para llevar a cabo las pruebas de hipótesis. El cual utiliza tres métodos de análisis para las pruebas de datos independientes: la prueba de rachas de Wald-Wolfowitz, la prueba de homogeneidad a escala anual Wilcoxon y la prueba de estacionalidad Kendal. Estos métodos aceptaron H_0 en un nivel significativo del 5%.

4.1.8. Resultado de las funciones de distribución de probabilidades

Se tomaron en cuenta las distribuciones de probabilidad más comunes en hidrología para determinar el ajuste más adecuado a los datos: Lognormal, Weibull, log-Pearson Tipo III, normal y gamma.

Tabla 9
Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Chiclarazo

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	49	56.5	51.5	53.9	58.9
2000	47.6	53	49.4	51.1	54.7
1000	47	51.5	48.4	49.9	52.9
200	45.2	47.8	45.9	46.7	48.6
100	44.3	46.1	44.6	45.3	46.6
50	43.2	44.3	43.3	43.7	44.6
20	41.5	41.8	41.3	41.4	41.9
10	40	39.6	39.5	39.4	39.6
5	37.9	37.1	37.3	37.1	37
3	35.8	35	35.3	35.1	34.9
2	33.5	32.9	33.2	33	32.7
1.4286	30.4	30.5	30.6	30.6	30.4
1.25	28.3	29.1	29.1	29.1	29.1
1.1111	25.4	27.3	26.9	27.3	27.4
1.0526	22.8	25.9	25.1	25.8	26.2
1.0204	19.9	24.4	23.1	24.2	24.8
1.0101	18	23.4	21.8	23.1	24
1.005	16.2	22.6	20.5	22.2	23.2
1.001	12.8	21	18	20.4	21.8
1.0005	11.5	20.4	17	19.8	21.3
1.0001	9.1	19.1	14.9	18.4	20.3
10000	49	56.5	51.5	53.9	58.9

Tabla 10
Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Apacheta

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	53.3	73.1	57.5	64.3	62.8
2000	51.2	65.9	54.4	59.5	58.6
1000	50.2	62.8	53	57.4	56.6
200	47.5	55.6	49.3	52.1	51.7
100	46.2	52.3	47.5	49.6	49.4
50	44.6	49	45.6	47	46.9
20	42.2	44.5	42.6	43.3	43.3
10	40	40.8	40	40.1	40.2
5	37.1	36.7	36.8	36.5	36.6
3	34.3	33.2	33.9	33.4	33.4
2	31.1	30	30.8	30.3	30.3
1.4286	27.1	26.4	27	26.7	26.7
1.25	24.6	24.5	24.7	24.7	24.7
1.1111	21	22.1	21.6	22.1	22.1
1.0526	18.1	20.2	19	20.1	20.1
1.0204	14.9	18.3	16	18	18
1.0101	12.9	17.2	14.1	16.7	16.7
1.005	11.2	16.2	12.3	15.6	15.5
1.001	8	14.3	8.6	13.5	13.4
1.0005	6.9	13.6	7.2	12.8	12.6
1.0001	5	12.3	4.1	11.3	11
10000	53.3	73.1	57.5	64.3	62.8

Tabla 11
Consolidado de lluvias de diseño (mm) para la subcuenca Cachi

T	Weibull	Log-Normal	Normal	Gamma	Log-Pearson III
10000	66.1	76.6	66	70.8	123
2000	62.9	69.5	62.3	65.5	99.1
1000	61.4	66.5	60.6	63.2	90.1
200	57.4	59.2	56.2	57.4	71.6
100	55.3	56	54	54.7	64.6
50	53.1	52.6	51.7	51.8	58.1
20	49.5	48	48.2	47.7	50.2
10	46.3	44.2	45	44.3	44.6
5	42.2	40	41.3	40.3	39.2
3	38.3	36.5	37.7	36.9	35.3
2	34	33.1	34	33.4	32
1.4286	28.7	29.4	29.5	29.6	28.9
1.25	25.4	27.4	26.8	27.4	27.4
1.1111	21	24.8	23	24.5	25.8
1.0526	17.4	22.9	19.9	22.3	24.8
1.0204	13.7	20.9	16.3	20	23.8
1.0101	11.5	19.6	14	18.6	23.3
1.005	9.6	18.5	11.9	17.3	22.9
1.001	6.3	16.5	7.4	15	22.3
1.0005	5.3	15.8	5.7	14.2	22.1
1.0001	3.5	14.3	2	12.5	21.8
10000	66.1	76.6	66	70.8	123

Se sintetizan los períodos de retorno tomados en cuenta y las precipitaciones de diseño asociadas, obtenidas a través del ajuste estadístico por medio de las distribuciones Normal y Gamma, que resultaron ser las más adecuadas.

Tabla 12
Consolidado de precipitaciones máximas (mm) de diseño

Tr (Años)	Pp24 máx. (mm)		
	Chicllarazo	Apacheta	Cachi
2	33	30.8	33.4
5	37.1	36.8	40.3
10	39.4	40	44.3
50	43.7	45.6	51.8

4.1.9. Discusión de distribuciones de probabilidad

El análisis de bondad de ajuste que se llevó a cabo en Hyfran Plus permitió el análisis de varias distribuciones de probabilidad aplicadas a las series de precipitaciones anuales máximas registradas en la cuenca del río Cachi. Se observó que la distribución que mostró el mejor ajuste a los datos analizados fue la que alcanzó el valor más bajo en el estadístico de contraste, cumpliendo al mismo tiempo con la condición de aceptación dentro del límite crítico fijado, por medio de la prueba Chi-cuadrado con un nivel de significación $\alpha = 0.05$.

4.1.10. Cálculo de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

Estas curvas son un componente de diseño que vincula la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia con la probabilidad de ocurrencia. En este punto es donde se utiliza el método de Dyck Peschke para representar la distribución temporal de las lluvias.

Figura 13
Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Chicllarazo

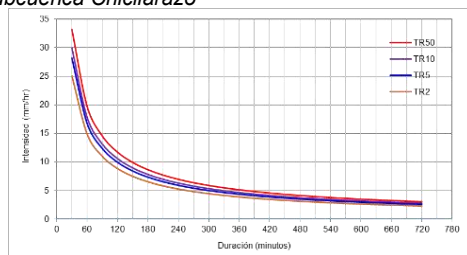


Figura 14
Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Apacheta

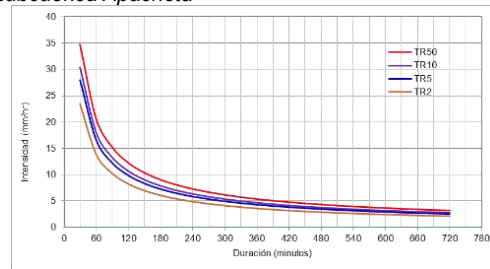
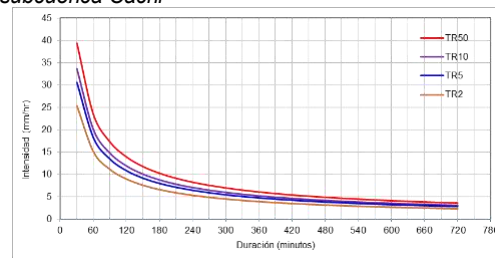


Figura 15
Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) subcuenca Cachi



4.1.11. Discusión de las curvas IDF

La metodología empírica de Dyck Peschke fue utilizada para calcular las curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia) para intervalos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años. Se tomó como base una tormenta de 12 horas (720 minutos), que se considera representativa en comparación con la aparición de sucesos extremos en la cuenca del río Cachi.

4.1.12. Resultado de hietogramas de diseño por Dyck Peschke

Las gráficas subsiguientes muestran una distribución en el tiempo con picos de intensidad alternados, que es una cualidad del método Dyck Peschke. Esta configuración produce una concentración de lluvia más alta en varios periodos durante el evento.

Figura 16
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años) subcuenca Chicllarazo

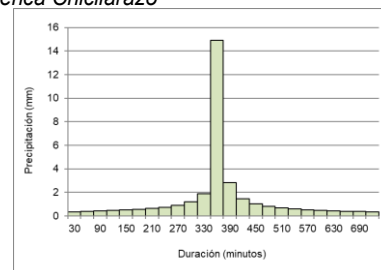


Figura 17
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años)
subcuenca Chicllarazo

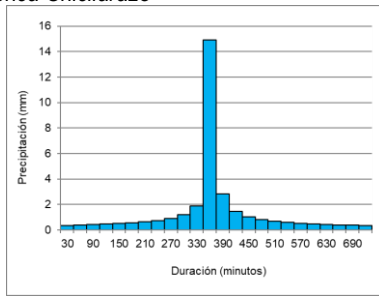


Figura 22
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años)
subcuenca Apacheta

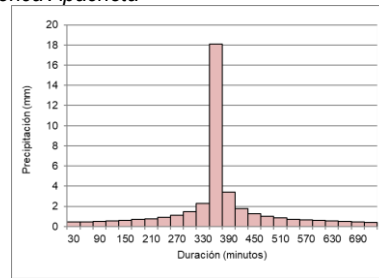


Figura 18
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años)
subcuenca Chicllarazo

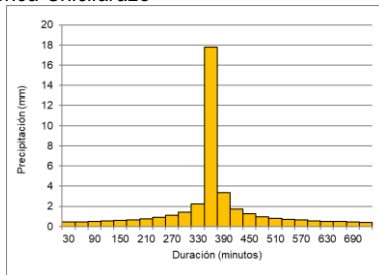


Figura 23
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años)
subcuenca Apacheta

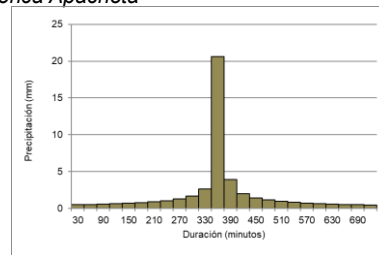


Figura 19
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años)
subcuenca Chicllarazo

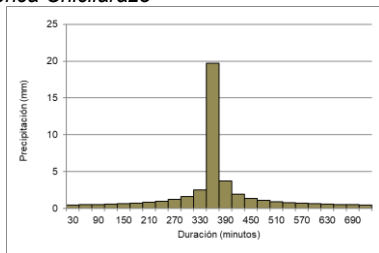


Figura 24
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años)
subcuenca Cachi

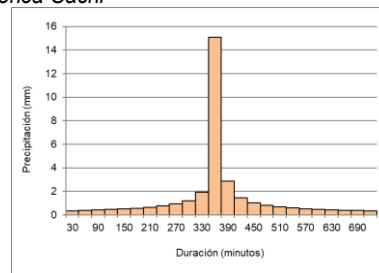


Figura 20
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (2 años)
subcuenca Apacheta

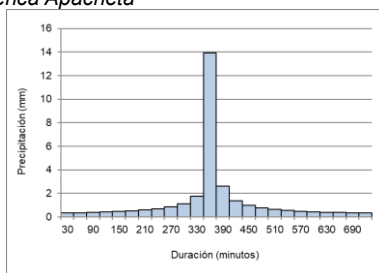


Figura 25
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años)
subcuenca Cachi

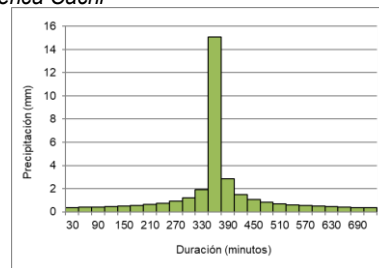


Figura 21
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (5 años)
subcuenca Apacheta

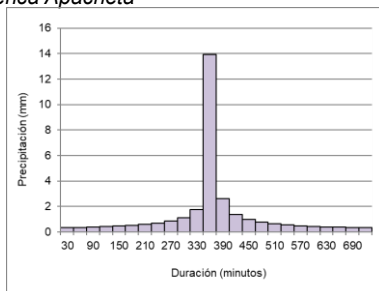


Figura 26
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (10 años)
subcuenca Cachi

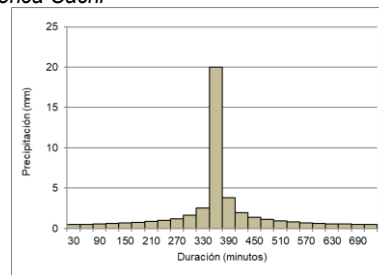
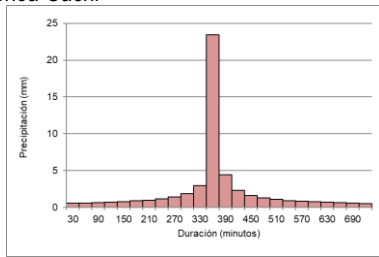


Figura 27
Hietograma de diseño (mm) tipo I Tr (50 años)
subcuenca Cachi



4.1.13. Discusión de hietogramas de diseño por Dyck Peschke

El método de bloques alternos fue utilizado para discretizar la lluvia mediante el método de Dyck Peschke y elaborar hietogramas. Esta técnica se basa en una estructura temporal simétrica y predefinida que distribuye la lluvia en intervalos de intensidad decreciente de forma alternada. A pesar de que esta metodología se ha empleado en muchos proyectos de ingeniería hidrológica por su facilidad para operar y reproducir, su rigidez temporal tiene limitaciones importantes cuando se trata de representar la variabilidad real de eventos extremos en la cuenca del río Cachi.

4.1.14. Hietogramas de diseño de curvas de Huff

Las gráficas evidencian que los hietogramas tienen una intensidad que va en aumento hacia el intervalo central del evento, que es el segundo cuartil de los coeficientes adimensionales de duración de la región A12. Esta selección, fundamentada en la investigación de Quijada (2020), se debe a que, por lo general, la lluvia en Perú se concentra más hacia la mitad del fenómeno.

Figura 28
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años)
subcuenca Chicllarazo

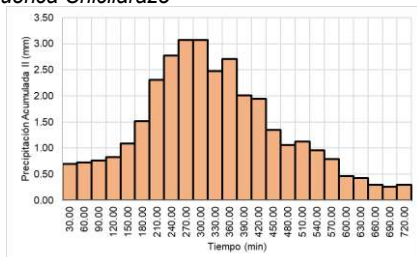


Figura 29
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años)
subcuenca Chicllarazo

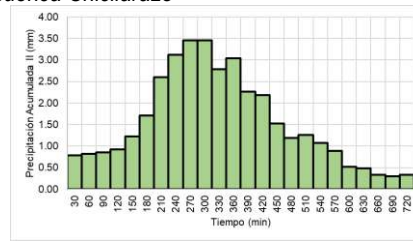


Figura 30
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años)
subcuenca Chicllarazo

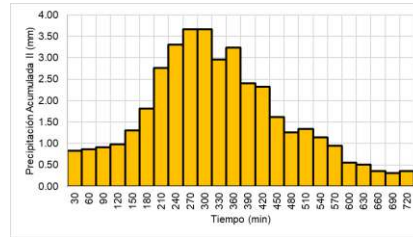


Figura 31
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años)
subcuenca Chicllarazo

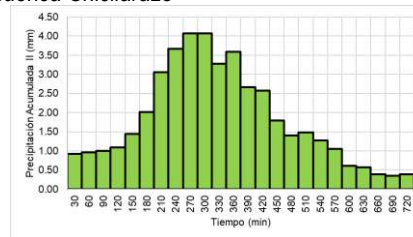


Figura 32
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años)
subcuenca Apacheta

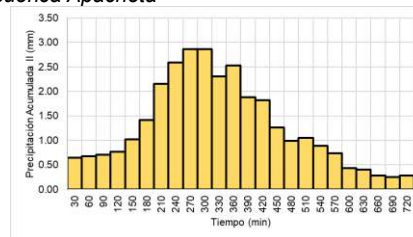


Figura 33
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años)
subcuenca Apacheta

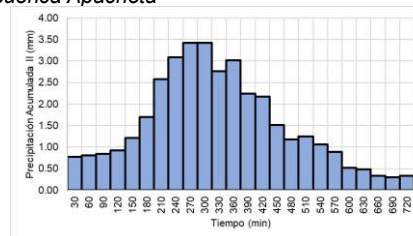


Figura 34
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años)
subcuenca Apacheta

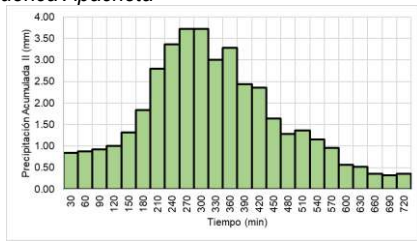


Figura 35
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años)
subcuenca Apacheta

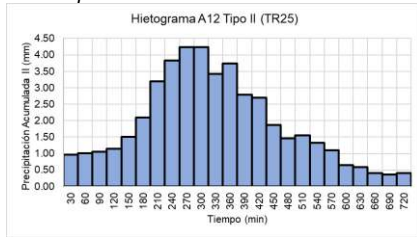


Figura 36
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (2 años)
subcuenca Cachi

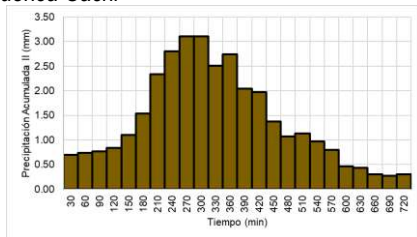


Figura 37
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (5 años)
subcuenca Cachi

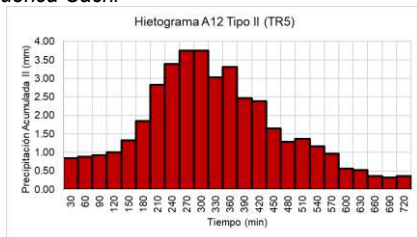


Figura 38
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (10 años)
subcuenca Cachi

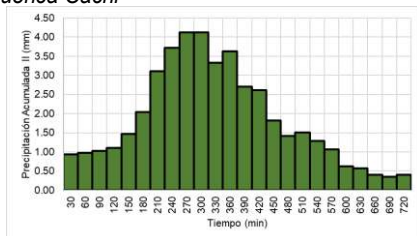
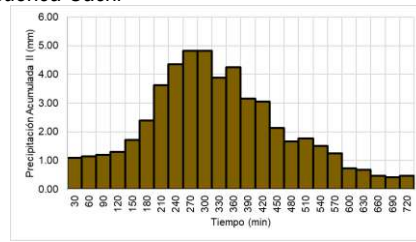


Figura 39
Hietograma de diseño (mm) tipo II Tr (50 años)
subcuenca Cachi



4.1.15. Discusión de los hietogramas de diseño por curvas de Huff

Según la investigación de Quijada (2020), que se examinó entre los antecedentes, el estudio de los patrones temporales de la precipitación posibilita representar con mayor exactitud lo que realmente ocurre con las lluvias intensas. Su investigación resaltó que, al mostrar la variabilidad de la lluvia en eventos extremos a lo largo del tiempo y el espacio y al mejorar la estimación de caudales pico, las curvas de Huff, que se basan en información pluviométrica regional, representan una alternativa más apropiada en comparación con los métodos empíricos tradicionales.

4.2. Modelamiento hidrológico HEC-HMS

4.2.1. Comparación de caudales máximos obtenidos.

A través del modelamiento hidrológico en HEC-HMS, se generaron hidrogramas de salida para cada subcuenca utilizando cada método de distribución de lluvias. De estos, se creó una tabla comparativa que muestra los diferentes periodos de retorno analizados. También se elaboraron los gráficos comparativos correspondientes, que muestran la manera en que varían los caudales y cómo está distribuido cada uno de ellos en las subcuencas. Estos gráficos se observan en la representación de los hidrogramas para los periodos de retorno a 2, 5, 10 y 50 años, que se exponen a continuación.

Figura 40
Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuena Chicllarazo

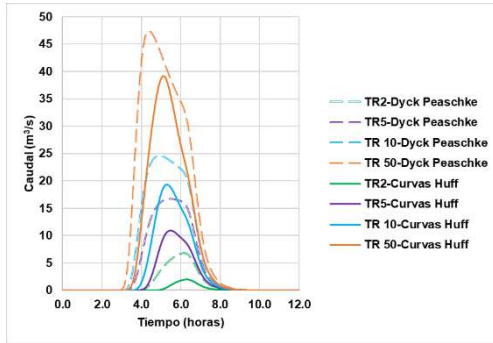


Figura 41
Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuena Apacheta

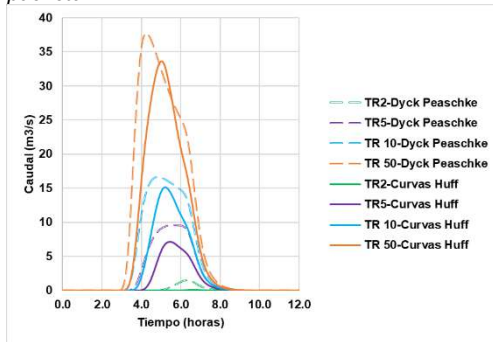


Figura 42
Variación de caudales máximos (m^3/s) subcuena Cachi

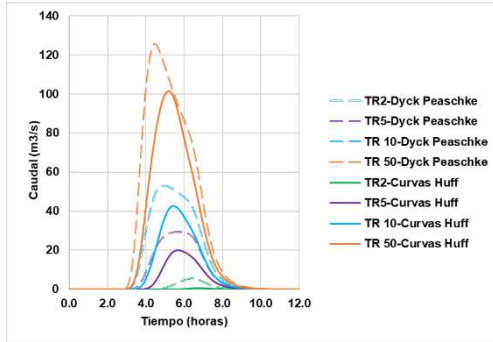


Figura 43
Variación de caudales máximos (m^3/s) punto de aforo

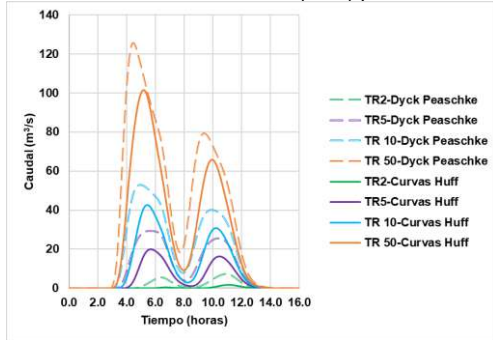
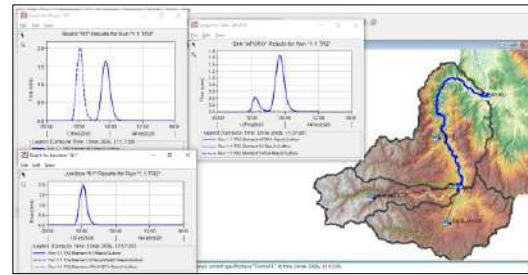


Figura 44
Resultados del modelamiento HEC-HMS



4.2.2. Discusión de la comparación de caudales máximos obtenidos

Fernández (2022) comparó, en su trabajo de investigación, los caudales máximos que se obtuvieron con tres procedimientos diferentes. Para eso, empleó el método de bloques alternos como lluvia sintética. El escritor indica que, aunque este método se usa extensamente debido a su simpleza operativa, tiende a producir valores altos que podrían resultar en un sobredimensionamiento. Esto aumenta la incertidumbre en el diseño hidráulico y pone en peligro la exactitud de la administración del riesgo frente a acontecimientos extremos.

4.2.3. Resultado del caudal máximo aforado

El aforo del caudal máximo se efectuó en la salida de la cuenca del río Cachi, usando un correntómetro. Esta actividad tuvo lugar el 16 de febrero de 2026 y permitió obtener los datos que aparecen en la Tabla 13; a partir de ellos, se determinó el caudal de avenida máxima transitada.

Tabla 13
Datos de campo del aforo del río Cachi

ID	Estación	Distancia respecto al punto inicial (m)	Profundidad H (m)	Velocidad (m/s)			Área (m ²)	Caudal Parcial (m ³ /s)
				0.2H	0.8H	0.6H		
1	0	0	0.56		0.8	0	0	
2	1	0.58		0.8	0.6	0.46		
3	2	0.88		1.8	0.7	1.31		
4	6	0.98		2.3	3.7	8.56		
5	8.5	0.78		1.4	2.2	3.08		
6	11.5	0.38		0.8	1.7	1.39		
7	15	0.68		1.6	1.9	2.97		
8	19.2	0.58		1.9	2.6	5.03		
9	22.8	1.18		2.1	0	0		
10	26.1	1.08		2.4	3.7	8.95		
11	31	1.18		1.5	5.5	8.31		
12	34.1	0.98		0.4	3.3	1.42		
Caudal total aforado (m³/s)								41.471

Figura 45
Aforo durante el tránsito de una máxima avenida del río Cachi con el correntómetro



4.2.4. Discusión del caudal máximo aforado

Los resultados del aforo realizado en la salida de la cuenca del río Cachi indican que el caudal máximo es de $41.471 \text{ m}^3/\text{s}$, cifra que fue obtenida con un correntómetro empleado en varias verticales de la sección transversal del río. el comportamiento del caudal con respecto a las avenidas relativamente altas que se han observado durante la época de lluvias.

CONCLUSIONES

Según los resultados de este estudio, las curvas de Huff y el método Dyck Peschke son métodos apropiados para mostrar la distribución de lluvias de diseño en la cuenca del río Cachi, lo que posibilita hacer estimaciones sobre los caudales máximos durante lapsos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años. Sin embargo, al observar que las curvas de Huff tienen un mejor rendimiento (sus resultados se aproximan más al caudal máximo aforado y su margen de error es menor que el del método Dyck Peschke), se aconseja utilizarlas en investigaciones hidrológicas y en la creación de obras hidráulicas.

La metodología de Dyck Peschke, que se apoya en la creación de hietogramas por medio del método de bloques alternos y modelada en HEC-HMS, resultó en caudales máximos de $7.28 \text{ m}^3/\text{s}$, $29.54 \text{ m}^3/\text{s}$, $52.95 \text{ m}^3/\text{s}$ y $125.71 \text{ m}^3/\text{s}$ durante los intervalos de retorno estudiados. No obstante, en comparación con el caudal máximo aforado de $41.471 \text{ m}^3/\text{s}$, no se ajusta correctamente al periodo de retorno de diez años, lo que demuestra una significativa sobreestimación con una diferencia de margen de $11.479 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto se

debe a su naturaleza empírica y a su escasa representación de la variabilidad temporal de las precipitaciones.

Se llega a la conclusión de que el método fundamentado en las curvas de Huff, utilizando coeficientes de duración adimensional (tabla A12 desarrollada por Quijada, 2020), posibilitó una adecuada desagregación y representación en hietogramas de las lluvias de diseño. Al implementarse en HEC-HMS, se obtuvieron caudales máximos de $1.67 \text{ m}^3/\text{s}$, $20.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $42.48 \text{ m}^3/\text{s}$ y $101.42 \text{ m}^3/\text{s}$; estos últimos muestran un ajuste preciso al compararlos con el caudal máximo aforado de $41.471 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica que la máxima avenida corresponde a un período de retorno de diez años y tiene una diferencia mínima de $1.009 \text{ m}^3/\text{s}$.

El modelamiento en HEC-HMS corroboró que las curvas de Huff son mejores que el método de Dyck-Peschke, demostrando que cada técnica representa la distribución temporal de la precipitación de manera diferente. Esto tiene un impacto directo en cómo se estiman los caudales máximos. Al calibrar el modelo con el caudal aforado de $41.471 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a la mayor avenida documentada el 16 de febrero de 2026, se corroboró que este acontecimiento se adapta más exactamente a un período de retorno de diez años calculado por medio de las curvas de Huff ($42.48 \text{ m}^3/\text{s}$).

RECOMENDACIONES

Para calcular los caudales máximos en estudios hidrológicos futuros del río Cachi, se sugiere emplear la metodología de curvas de Huff porque ha demostrado ser más precisa y coherente con los registros reales aforados, a diferencia del método Dyck Peschke, que produjo cifras sobredimensionadas.

Se recomienda tener en cuenta los valores de caudales máximos logrados a través de las curvas de Huff para el diseño y el dimensionamiento de obras hidráulicas dedicadas a proteger, almacenar, desviar y controlar inundaciones en la cuenca Cachi. Esto tiene como objetivo disminuir la incertidumbre

hidráulica y optimizar la seguridad estructural frente a eventos extremos.

Para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de datos históricos que posibiliten una calibración y validación más exactas en modelos hidrológicos futuros, es aconsejable robustecer los sistemas de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca. Esto se puede lograr mediante el mantenimiento, instalación y operación constante de estaciones pluviómetros e hidrológicas.

REFERENCIAS

- Allado, C. D. & Fuentes, L. J. (2009). *Determinación de tormentas de diseño a partir de datos pluviográficos en zona media de la cuenca de río Frio*. [Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander]. Bucaramanga. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/22816>
- Autoridad Nacional de Agua (ANA). (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos*. Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>
- Avellaneda C., A. & Montalvo E., K. M. (2019), *Análisis comparativo de los métodos racional modificado Temez, hidrogramas unitarios SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay Lambayeque – Cuenca Chancay Lambayeque*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/8601>
- Back, Á. J. (2021). *Determinação das curvas de Huff para a Região Serrana de Santa Catarina / Determination of Huff curves for the Santa Catarina Mountain Region*. Brazilian Journal of Development. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-400>
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos, GITS-UPC. <https://www.yumpu.com/es/document/view/15500665/hidrologia-basica-y-aplicada>
- Bautista, N. (2022). *Determinación del hidrograma de crecida para diferentes periodos de retorno en la cuenca Puytocc - Chiara - Huamanga - Ayacucho - 2021*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal De Huamanga]. Perú. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5819>
- Bolaños, S. T. & Castillo, S. (2024). *Análisis de tránsito de máximas avenidas en el lago Chinchaycocha usando el software HEC-HMS para estudiar el comportamiento de futuras inundaciones*. [Tesis de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Perú. <http://hdl.handle.net/10757/682919>
- Cahuana A. & Yugar W., (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología* civ-233. <https://civilmbh.files.wordpress.com/2013/11/hidrology-san-simon.pdf>
- Castillo G. C., Domínguez H. I., & Martínez G.Y. (2023). *Modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica Yabú de la provincia Villa Clara, Cuba*. Tecnología y ciencias del agua. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-04-04>
- Chilès, J. P. & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty (2nd ed.)*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118136188>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Primera edición. Editorial Nomos.Colombia.

- https://www.academia.edu/105588091/Ven_Te_Chow_Hidrologia_Aplicada
- Del Águila, S. (2024). *Modelamiento hidrológico de cuencas andinas*. Primera edición digital. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho – Perú.
<https://isbn.bn.p.gob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=159637>
- Díaz, U. A., Guacaneme, D. F. & Alonso, F. L. (2017). *Estimación de caudales máximos para el sector hidrológico de la quebrada el diamante, mediante modelación con HEC-HMS*. [Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos, Universidad católica de Colombia]. Bogotá.
<http://hdl.handle.net/10983/15352>
- Espinoza, R. (2024). *Estimación de las intensidades máximas de precipitación y su conceptualización mediante mapas de la cuenca del río Cachi - Ayacucho – 2021*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal De Huamanga]. Perú.
<https://repositorio.uns.ch.edu.pe/handle/20.500.14612/6789>
- Fattorelli, S. y Fernández, P.C. (2011). *Diseño Hidrológico*. París, Francia: Edición Digital.
<https://www.yumpu.com/es/document/view/63180144/disenohidrologico>
- Fernández, G. (2022). *Comparativa entre obtención de eventos de lluvias reales y eventos sintéticas para una cuenca mediterránea. Diferencia en los inputs en el estudio hidrológico en el cálculo de avenidas*. [Tesis de Grado, Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos].
<https://hdl.handle.net/11441/130975>
- García M., Y. T. (2015). *Análisis de tránsito de crecientes en el Río Cauca, entre las estaciones La Balsa y Anacora según el método de Muskingum*. [Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Bogotá – Colombia.
<https://repository.udistrital.edu.co/items/ebb4983f-2bbc-4957-bde1c1bb8310b831>
- Gil, C. G. (2018). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312616>
- Herrera, F. A. (2024). *Aplicación de Hietograma de diseño para la determinación de caudales máximos en la cuenca Julcán. Otuzco. La Libertad. 2022*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Trujillo].
<https://dspace.unitru.edu.pe/items/87aef9a1-7819-48b8-bd7c-cec73bdc8935>
- Huff, F. (1967). *Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms*, 3(4), 1007–1019.
<https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- Lozano, A.D. (2023). *Generación de diferentes hietogramas de diseño para la simulación de crecidas sobre la subcuenca Guanga Huaycu*. [Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental]. Quito -Ecuador.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24272>
- Mendoza, R. D. (2020). *Desarrollo de un modelo de tormenta de diseño para la cuenca del río quindío (Colombia)*. [Tesis de Maestría en planificación y manejo ambientales de cuencas, Universidad del Tolima]. Ibagué – Tolima. Colombia.
<https://repository.ut.edu.co/handle/001/3265>
- Montesinos, C., Lavado, W., Quijada, N., Gutiérrez, L., Felipe, O., de Estudios, S., & Felipe, O. (2023). *Desarrollo de*

- curvas pluviométricas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1114>
- MTC, M. D. (2008). *Manual de hidrología, Hidráulica y Drenaje*. MTC. Lima-Perú. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Paoli, C., Cacik, P., & Morresi, M. (2001). *Consistencia en la determinación de crecidas de diseño por transformación lluvia-caudal y análisis de frecuencia (estudio de un caso)*. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/901?articlesBySimilarityPage=43>
- Quijada, N. (2020). *Caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú*. [Tesis de Grado, Universidad San Ignacio de Loyola] Lima – Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/10051>
- Silveira, A. L. L. D. (2024). *Universal equations for rainfall distributions from SCS and Huff methods*. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230093>
- Tupac, R. (2017). *Regionalización de las precipitaciones máximas en el Perú*. Tesis de Maestría. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM]. Perú. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1370451>
- Vela P., A. J. (2023). *Comparación de las curvas intensidad-duración-frecuencia generadas a partir de las estaciones pluviométricas y del producto grillado pisco de precipitación en el departamento de Puno*. [Tesis de Grado, Universidad católica de Santa María. Arequipa – Perú. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12672>
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. 2ª Ed. Lima: Editorial Villón. Instituto Tecnológico (Costa Rica). https://biblioteca.unfv.edu.pe/cgi-bin/koha/opac_detail.pl?biblionumber=32609