

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE MÁXIMAS AVENIDAS PARA
EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LAMINACIÓN EN LA
CUENCA DEL RÍO MALA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

JOSELYN TIFFANNY GAMARRA CHURA

LIMA – PERÚ

2022

Document Information

Analyzed document	T_007_N°70046485_T_17-02-2023.docx (D158946256)
Submitted	2023-02-17 23:37:00
Submitted by	LIA RAMOS FERNANDEZ
Submitter email	liarf@lamolina.edu.pe
Similarity	13%
Analysis address	liarf.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TESIS.BORRADOR.FINAL.COMPLETO.pdf Document TESIS.BORRADOR.FINAL.COMPLETO.pdf (D156199681) Submitted by: msanchez@lamolina.edu.pe Receiver: msanchez.unalm@analysis.arkund.com	 2
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TSP-Gamarra Joselyn.rev.docx Document TSP-Gamarra Joselyn.rev.docx (D157737614) Submitted by: liarf@lamolina.edu.pe Receiver: liarf.unalm@analysis.arkund.com	 2
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis_Anderson Gómez Veliz.pdf Document Tesis_Anderson Gómez Veliz.pdf (D158549264) Submitted by: msanchez@lamolina.edu.pe Receiver: msanchez.unalm@analysis.arkund.com	 4
SA	2A_ROQUE TAPIA_GISELA MERCEDES_TITULO.docx Document 2A_ROQUE TAPIA_GISELA MERCEDES_TITULO.docx (D112832319)	 3
SA	Proyecto de grado_Carlos_Cortes.pdf Document Proyecto de grado_Carlos_Cortes.pdf (D109541287)	 1
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis_FRANKPALOMINO.docx Document Tesis_FRANKPALOMINO.docx (D141991740) Submitted by: rapaclla@lamolina.edu.pe Receiver: rapaclla.unalm@analysis.arkund.com	 3
SA	Borrador.pdf Document Borrador.pdf (D108055782)	 1
W	URL: https://docplayer.es/168518903-Universidad-nacional-agraria-la-molina.html Fetched: 2022-09-01 18:14:40	 4
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TESIS_IVAN_MANUEL_TRUJILLO_LEIVA_14.12.2022.docx Document TESIS_IVAN_MANUEL_TRUJILLO_LEIVA_14.12.2022.docx (D153435405) Submitted by: rapaclla@lamolina.edu.pe Receiver: rapaclla.unalm@analysis.arkund.com	 3
SA	Tesis_López F._Rázuri B..docx Document Tesis_López F._Rázuri B..docx (D147293824)	 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE MÁXIMAS AVENIDAS
PARA EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LAMINACIÓN EN LA
CUENCA DEL RÍO MALA”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. JOSELYN TIFFANNY GAMARRA CHURA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EUSEBIO MERCEDES INGOL BLANCO
Presidente

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesor

Mg. Sc. CAYO LEONIDAS RAMOS TAIPE
Miembro

Mg. Sc. WENDY LU ARAMAYO ALONSO
Miembro

LIMA – PERU

2022

DEDICATORIA

A mis padres Máximo y Elsa por los sacrificios que han hecho para que nunca nos falte nada a mis hermanos y a mí, por confiar siempre en nosotros. Cada logro es de ustedes también, los amo.

A mis hermanos Maycoll, Max y Enzo, porque me han acompañado y apoyado cuando lo necesitaba.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por ser mi hogar durante cinco años, a su Facultad de Ingeniería Agrícola, sus profesores y en especial a mis amigos de la promoción 2014-I, quienes se convirtieron en una familia, por compartir muchas alegrías y aventuras.

Un especial agradecimiento a María Herranz, quien ha sido un ejemplo de liderazgo y compromiso, un modelo de inspiración para mi crecimiento profesional.

A mi asesora Lía Ramos, quien tuvo la predisposición de ayudarme y darme el soporte necesario para finalizar esta etapa.

. A las amistades que Dios me ha permitido conocer en todo este camino lleno de retos y alegrías, todo suma para alcanzar los sueños.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Análisis de precipitación máxima diaria	3
2.1.1. Prueba de datos dudosos	3
2.1.2. Análisis de Frecuencia.....	4
2.1.3. Prueba de Bondad de Ajuste.....	4
2.1.4. Periodo de retorno (Tr)	6
2.1.5. Tormenta de diseño para 24 horas	7
2.1.6. Polígonos de Thiessen	8
2.2. Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS.....	9
2.2.1. Arquitectura del modelo hidrológico.....	9
2.2.2. Modelo de las abstracciones hidrológicas	10
2.2.3. Número de Curva.....	11
2.2.4. Transformación precipitación neta en escorrentía	13
2.2.5. Modelo de tránsito del hidrograma.....	14
2.3. Modelización de la laminación de avenidas con HEC-HMS	15
2.3.1. Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME)	17
2.3.2. Curvas característica cota / volumen - cota / área	17
2.3.3. Estructuras de desagüe.....	17
2.4. Antecedentes	18
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	19
3.1. Ubicación del proyecto.....	19
3.2. Materiales	20
3.2.1. Información Cartográfica.....	20
3.2.2. Información Meteorológica y Pluviométrica.....	20
3.2.3. Tipo de Suelo.....	22
3.2.4. Cobertura Vegetal.....	22
3.3. Metodología.....	23

3.3.1. Análisis de precipitación máxima diaria.....	23
3.3.2. Modelamiento hidrológico situación actual.....	26
3.3.3. Modelamiento hidrológico con estructuras de LAMINACIÓN.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. Información de partida	29
4.1.1. Delimitación de la cuenca.....	29
4.1.2. Información pluviométrica e hidrométrica	31
4.1.3. Parámetros morfológicos	33
4.1.4. Tipo de suelo.....	33
4.1.5. Cobertura vegetal.....	33
4.2. Análisis de precipitación máxima diaria	36
4.2.1. Análisis y validación de datos	36
4.2.2. Análisis de frecuencias	37
4.2.3. Prueba de bondad de ajuste.....	37
4.2.4. Tormenta de diseño.....	41
4.2.5. Distribución espacial de la precipitación	41
4.3. Modelamiento hidrológico situación actual	46
4.3.1. Datos de entrada	46
4.3.2. Curva numero	48
4.3.3. Calibración del modelo.....	49
4.3.4. Caudales máximos	51
4.4. Modelamiento hidrológico con estructuras de laminación.....	53
4.4.1. Ubicación de embalses para laminación.....	53
4.4.2. Vaso de laminación.....	55
4.4.3. Curvas característica cota / volumen	56
4.4.4. Estructuras de descarga.....	57
4.4.5. Simulación de tránsito de avenidas para cada alternativa.....	58
4.4.6. Evaluación de las alternativas de laminación	70
4.4.7. Selección de alternativa	71
V. CONCLUSIONES.....	74
VI. RECOMENDACIONES.....	76
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
VIII. ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Riesgo de por lo menos una excedencia del evento de diseño durante la vida útil.....	7
Figura 2: Distribución de lluvia de 24 horas del SCS	8
Figura 3: Polígono de Thiessen	9
Figura 4: Ejemplo de análisis de laminación mediante estructuras de detención	15
Figura 5: División en sectores para definir la forma de la cuenca.....	17
Figura 6: Ubicación de la Cuenca del Río Mala y subcuencas.....	19
Figura 7: Modelo digital del terreno para la cuenca Mala.....	20
Figura 8: Ubicación de estaciones meteorológicas.....	22
Figura 9: Proceso de obtención de subcuencas y líneas de drenaje de la Cuenca del Río Mala	29
Figura 10: Cuenca Mala y subcuencas	30
Figura 11: Clasificación del tipo de suelo y nivel de escorrentía en la cuenca del río Mala.....	34
Figura 12: Clasificación del uso del suelo en la cuenca del río Mala.	35
Figura 13: Isoyetas de Pmax 24 horas - T50 y T100.....	42
Figura 14: Isoyetas de Pmax 24 horas – T500.....	42
Figura 15: Hietogramas de diseño a Tr=10 años para cada estación.....	43
Figura 16: Hietogramas de diseño a Tr=100 años para cada estación.....	44
Figura 17: Hietogramas de diseño a Tr=500 años para cada estación.....	45
Figura 18: Modelo HEC-HMS de la Cuenca del río Mala	46
Figura 19: Zonificación del número de curva obtenido para la cuenca del Río Mala.....	49
Figura 20: Hidrogramas del modelo para T 500 años - Desembocadura	51
Figura 21: Hidrogramas del modelo para T 100 años - Desembocadura	52
Figura 22: Ubicación de las estructuras de laminación preseleccionadas	53
Figura 23: Modelo hidrológico HMS con Alternativa N°1	54
Figura 24: Vista de planta del área de vaso almacenamiento de las estructuras.....	55
Figura 25: Relación cota / volumen de las estructuras de laminación.....	56
Figura 26: Definición de los órganos de desagüe en el modelo de almacenamiento del modelo HMS para la Alterativa N ° 1.....	57
Figura 27: Modelo HEC-HMS incluyendo las estructuras de laminación en la Cuenca	

del río Mala.....	59
Figura 28: Hidrogramas laminados en el tramo de referencia M7-M8	70
Figura 29: Hidrograma en régimen natural y laminado en el tramo de referencia M7-M8.	71
Figura 30: Hidrograma en régimen natural y laminado en el tramo de referencia M7-M8.	72
Figura 31: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (2014-2019).....	80
Figura 32: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Tanta (1993-2006).....	80
Figura 33: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Tanta (2008-2019).....	81
Figura 34: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (1996-1999)	81
Figura 35: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (2001-2014)	82
Figura 36: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (2015-2019)	82
Figura 37: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huarochirí (1997-2010)	83
Figura 38: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huarochirí (2011-2019)	83
Figura 39: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (1980-1993)	84
Figura 40: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (1994-2007)	84
Figura 41: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (2008-2019)	85
Figura 42: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (1986-1999)	85
Figura 43: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (2000-2013)	86
Figura 44: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (2014-2019)	86
Figura 45: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1964-1969).....	87

Figura 46: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1971-1980).....	87
Figura 47: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1986-1999)	88
Figura 48: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (2000-2013).....	88
Figura 49: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escomarca (1972 -1974).....	89
Figura 50: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escomarca (1976 -1989).....	89
Figura 51: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escomarca (1990 -2003).....	90
Figura 52: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escomarca (2004-2017).....	90
Figura 53: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escomarca (2018-2019).....	91
Figura 54: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huañec (1993-2006).....	91
Figura 55: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huañec (2006-2019).....	92
Figura 56: Registro Fotográfico – Puente Dorado.....	93
Figura 57: Registro Fotográfico – Estación La Capilla.....	93
Figura 58: Curva de distribución – Estación Ayaviri	94
Figura 59: Curva de distribución – Estación	95
Figura 60: Curva de distribución - Estación Huañec.....	96
Figura 61: Curva de distribución – Estación Huarochirí.....	97
Figura 62: Curva de distribución – Estación La Capilla	98
Figura 63: Curva de distribución - Estación San Lázaro de Escomarca	99
Figura 64: Curva de distribución – Estación San Pedro de Pilas	100
Figura 65: Curva de distribución - Estación Tanta.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de valores Kn para prueba de datos dudosos.....	4
Tabla 2: Valores críticos de la prueba Smirnov Kolmogorov a diferentes valores de N y niveles de significación α	6
Tabla 3: Valores recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje	6
Tabla 4: Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana(condiciones antecedentes de humedad II, Ia = 0.2s).....	11
Tabla 5: Condiciones de humedad precedentes del SCS.....	12
Tabla 6: Estaciones meteorológicas de la cuenca de Mala.....	21
Tabla 7: Registro de meses faltantes Pmáx24Hrs por estación	24
Tabla 8: Elementos para el modelo HEC-HMS de la Cuenca del río Mala	26
Tabla 9: Relación de subcuencas y parámetros hidrográficos.....	31
Tabla 10: Precipitación Máxima Diaria en 24 horas	32
Tabla 11: Parámetros morfológicos de la cuenca Mala.....	33
Tabla 12: Resultados de análisis de calidad de datos dudosos pluviométricos	37
Tabla 13: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Ayaviri	38
Tabla 14: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Huancata	38
Tabla 15: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Huañec	39
Tabla 16: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – Huarochirí.....	39
Tabla 17: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – La Capilla 2	39
Tabla 18: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – Tanta.....	40
Tabla 19: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – San Lázaro de Escomarca.....	40
Tabla 20: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – San Pedro de Pilas	40
Tabla 21: Precipitación Máximas Anuales en 24 horas (PMA) para diferentes periodos de recurrencia en cada estación pluviométrica	41
Tabla 22: Obtención del tiempo de retardo (Tlag)	47
Tabla 23: Obtención de los parámetros del modelo de propagación.....	47
Tabla 24: Valores de número de curva en cada subcuenca	48
Tabla 25: Ajuste estadístico de caudal máximo puntual anual para la estación de La Capilla.....	49
Tabla 26: Calibración de los parámetros hidrológicos de las subcuencas.....	50

Tabla 27: Calibración de los parámetros hidrológicos del cauce	50
Tabla 28: Resultados de la calibración del modelo	51
Tabla 29: Resultados de caudales máximos para elementos HEC-HMS	52
Tabla 30: Síntesis de las alternativas de laminación planteadas.....	54
Tabla 31: Relación cota / volumen de las estructuras de laminación	56
Tabla 32: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 0	60
Tabla 33: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 1	60
Tabla 34: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 02	61
Tabla 35: Resultados HEC-HMS Alternativa N°03	62
Tabla 36: Resultados HEC-HMS Alternativa N°04	63
Tabla 37: Resultados HEC-HMS Alternativa N°05	65
Tabla 38: Resultados HEC-HMS Alternativa N°06	67
Tabla 39: Resultados HEC-HMS Alternativa N°07	69
Tabla 40: Impacto en la laminación de los caudales máximos de cada escenario.....	70
Tabla 41: Caudales máximos laminados simulados por HEC-HMS	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: REGISTROS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS	80
ANEXO 2: REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	93
ANEXO 3: CURVA DE DISTRIBUCIÓN.....	94

RESUMEN

Debido a que la ocurrencia de fenómenos climáticos ha generado inundaciones en la cuenca del río Mala, desencadenando destrucción de edificaciones, miles de damnificados y muertes humanas; se ha visto necesario implementar soluciones para reducir la vulnerabilidad a la que están expuestas la población, bienes y medio ambiente. En ese sentido, una de las alternativas que se propone son la construcción obras hidráulicas para protección de avenidas, las cuales son diseñadas a partir de la simulación de eventos meteorológicos extremos. Por este motivo, en el presente trabajo se estimó los caudales máximos de 100 y 500 años de período de retorno en la cuenca del río Mala a partir del análisis hidrológico con el HEC-HMS que incluyó alternativas de laminación. Al respecto, se simuló un primer escenario en situación actual de la cuenca, con lo cual se caracterizó el área de estudio, se estimó las tormentas de lluvia a partir del tratamiento de la información pluviométrica máxima en 24 horas, se aplicó el método del hidrograma sintético del SCS (1986) para estimar los caudales máximos, y se calibró el modelo con los datos de la estación La Capilla. Luego se realizó el modelamiento hidrológico incluyendo las alternativas de laminación; de los resultados obtenidos se concluye que la alternativa N°1, que considera la estructura de laminación, EL-4, con una corona de 45m, es la opción económica e hidráulicamente viable porque laminó el 60% del caudal máximo.

Palabras clave: avenidas, modelamiento hidrológico, HEC-HMS, cuenca del río Mala, alternativas de laminación, calibración, estación La Capilla.

ABSTRACT

Due to the occurrence of climatic phenomena that have caused flooding in the Mala River basin, resulting in the destruction of buildings, thousands of victims and human deaths, it has become necessary to implement solutions to reduce the vulnerability to which the population, property and the environment are exposed. In this sense, one of the alternatives proposed is the construction of hydraulic works for flood protection, which are designed based on the simulation of extreme meteorological events. For this reason, this study estimated the maximum flows of 100 and 500-year return period in the Mala River basin based on the hydrological analysis with the HEC-HMS, which included lamination alternatives. In this regard, a first scenario was simulated in the basin's current situation, with which the study area was characterized, rainstorms were estimated based on the processing of the maximum 24-hour rainfall information, the SCS (1986) synthetic hydrograph method was applied to estimate maximum flows, and the model was calibrated with data from the La Capilla station. The hydrological modeling was then performed including the lamination alternatives; from the results obtained, it was concluded that alternative N°1, which considers the lamination structure, EL-4, with a crown height of 45m, is the economically and hydraulically viable option because it laminates 60% of the maximum flow.

Keywords: floods, hydrologic modeling, HEC-HMS, Mala river basin, lamination alternatives, calibration, La Capilla station.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

La temporada de lluvias en el Perú alcanza su mayor intensidad entre los meses de diciembre a marzo, período durante el que suceden eventos meteorológicos extremos que desencadenan inundaciones y movimientos de masa (huaico, derrumbe, deslizamientos, etc.). Tal es el caso del 2017, ya que hubo un incremento de la temperatura en la superficie del mar en la costa central y norte, se instalaron grandes masas de aire húmedas a lo largo de la costa y vertientes de la Cordillera de los Andes, en consecuencia, generó intensas precipitaciones pluviales, y desencadenó múltiples inundaciones en la costa peruana, evento también conocido como el Niño del 2017.

En consecuencia, una de las zonas más afectadas del departamento de Lima fue la provincia de Cañete, que producto del desborde del río Mala se desencadenó devastadoras inundaciones desde el puente Calango hacia aguas abajo, siendo los distritos de San Pedro de Mala y San Antonio los más perjudicados, de acuerdo con el INEI (2017) se produjo grandes daños en la población, su capacidad productiva, la infraestructura, sus servicios públicos y privados.

Frente esta problemática en la cuenca, en el presente trabajo se busca prevenir las acciones negativas de futuros eventos extremos a partir con propuestas de estructuras de laminación para el control inundaciones. Dentro de ese marco, con el desarrollo del modelamiento hidrológico de máximas avenidas incluyendo estructuras de laminación de diferentes condiciones, se podrá cuantificar con cierto grado de aproximación la laminación de las descargas, con esto se busca analizar y seleccionar aquella alternativa que logre reducir los caudales máximos aguas debajo de la zona de Calango.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar el análisis de las alternativas de estructuras de laminación con la simulación de máximas avenidas en la cuenca del Rio Mala empleando el HEC-HMS.

1.2.2. Objetivos específicos

- Generar las tormentas de lluvia a diferentes períodos de retorno, para cada subcuenca a partir de la recolección y tratamiento de la información pluviométrica máxima en 24 horas.
- Calibrar el modelo hidrológico en situación actual del HEC-HMS con el resultado del análisis estadístico de caudales máximos anuales de la estación hidrométrica La Capilla.
- Calcular con el modelo hidrológico en HEC-HMS incluyendo el tránsito de avenida con las estructuras de laminación propuestas, los caudales máximos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Análisis de precipitación máxima diaria

La precipitación es toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre, siendo la precipitación máxima diaria el total de lluvia en 24 horas aquel registro de la estación meteorológica o pluviométrica y corresponde a la precipitación ocurrida entre las 07 horas de un cierto día y las 07 horas del día siguiente, período que se conoce como día pluviométrico.

2.1.1. Prueba de datos dudosos

De acuerdo con Water Resources Council (1981), los datos dudosos son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante, siendo de esta forma que la retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas. Los procedimientos para tratar los datos dudosos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas.

Si la asimetría de la estación es mayor que +0.4, se consideran primero las pruebas para detectar datos dudosos altos; si la asimetría de estación es menor que -0.4, primero se consideran pruebas para detectar datos dudosos bajos. Cuando la asimetría de la estación está entre ± 0.4 , deben aplicarse pruebas para detectar datos dudosos altos y bajos antes de eliminar cualquier dato dudoso del conjunto de datos (Water Resources Council, 1981). La siguiente ecuación de frecuencia puede utilizarse para detectar datos dudosos:

$$y_H = \bar{y} \pm K_n * S_y \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde y_H es el umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas y K_n es tal como se da en la Tabla 1, extraída de la bibliografía de referencia “Hidrología aplicada de Ven Te Chow” para un tamaño de muestra n .

Tabla 1: Tabla de valores K_n para prueba de datos dudosos

Tamaño de muestra n	K_n						
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	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	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	3.000
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	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Fuente: U. S. Water Resources Council, 1981. Esta tabla contiene valores de K_n de un lado con un nivel de significancia del 10% para la distribución normal.

FUENTE: U.S. Water Resources Council (1982). Extraído del libro Hidrología Aplicada de Ven Te Chow (1994)

2.1.2. Análisis de Frecuencia

Existen multitud de funciones estadísticas de distribución aplicables al cálculo de eventos extremos en la hidrología, de los distintos estudios y manuales realizados a nivel internacional y de bibliografía de referencia hidrológica se deducen las principales funciones aplicables a este tipo de trabajos. Como señala Aliaga (1985) en su libro de Hidrología Estadística, las distribuciones más comunes que se emplean para este tipo de análisis son la normal, log-normal, Pearson, entre otros; sin embargo, actualmente existen variedad de distribuciones de frecuencia que puede estimar de forma teórica en función de la probabilidad de ocurrencia que se designe; y que con la prueba de bondad se comprobará la que mejor se ajuste.

2.1.3. Prueba de Bondad de Ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste consisten en comprobar, gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada se ajusta a una determinada función de probabilidades teórica seleccionada a priori, con los parámetros estimados, con base en los valores de muestra.

Las pruebas estadísticas tienen por objeto medir la certidumbre que se obtiene al hacer una

hipótesis estadística sobre una población; es decir, calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria se distribuya según una cierta función de probabilidades.

Las pruebas más comúnmente utilizadas son: ajuste gráfico y ajuste estadístico con Chi-Cuadrado y Smirnov-Kolmogorov, siendo de esta manera que antes de realizar el ajuste estadístico es recomendable juzgar y comparar gráficamente el histograma de la serie con la función densidad teórica. Asimismo, Aliaga (1985) nos indica que la prueba Chi Cuadrado se aplica para ajustes a la distribución normal, a diferencia de la prueba Kolmogorov – Smirnov que es aplicable a cualquier distribución teórica.

La prueba estadística para la bondad del ajuste de Kolmogorov – Smirnov, consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia “D” entre la función de distribución de probabilidad observada $F_0(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$ con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula.

$$D = \max|F_0(x_m) - F(x_m)| \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- D: es el estadístico de Smirnov – Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la probabilidad empírica.
- $F_0(x_m)$: probabilidad de la distribución de ajuste.
- $F(x_m)$: probabilidad de los datos no agrupados, denominado también frecuencia acumulada.

En primer lugar, se obtiene la desviación máxima entre la probabilidad de la distribución empírica $F(x_m)$ y la distribución ajustada según la ecuación. Se obtiene la desviación máxima, y se obtiene el valor crítico del estadístico “d” el cual se encuentra tabulado en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2: Valores críticos de la prueba Smirnov Kolmogorov a diferentes valores de N y niveles de significación α

Tamaño Muestral N	NIVEL DE SIGNIFICACION α			
	0.20	0.10	0.05	0.01
5	0.45	0.51	0.56	0.67
10	0.32	0.37	0.41	0.49
15	0.27	0.30	0.34	0.40
20	0.23	0.26	0.29	0.36
25	0.21	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.20	0.23	0.27
40	0.17	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.18	0.20	0.24
50	0.15	0.17	0.19	0.23
N > 50	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

FUENTE: (Yevjevich, 1972). Extraído del libro Hidrología estadística de 1985.

2.1.4. Periodo de retorno (Tr)

El intervalo promedio de tiempo en años (T), de que una precipitación máxima de 24 horas cualquiera (X) sea igualada o excedido por lo menos una vez, tiene una probabilidad (P) de ocurrencia de 1 en T casos, es decir:

$$P(X \geq x) = 1/T \text{ y/o } T = 1/P(X \geq x) \quad \text{Ecuación 2}$$

De acuerdo con el Manual de hidrología, hidráulica y drenaje del Perú, las diferentes obras propuestas en los perfiles de pre-inversión se dimensionarán en base al periodo de retorno de referencia mínimo, el cual vendrá definido en función del riesgo y el periodo útil de las mismas (MTC, 2008) (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Valores recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje

TIPO DE OBRA	RIESGO ADMISIBLE (**) (%)
Puentes (*)	22
Alcantarillas de paso de quebradas importantes y badenes	39
Alcantarillas de paso quebradas menores y descarga de agua de cunetas	64
Drenaje de la plataforma (a nivel longitudinal)	64
Subdrenes	72
Defensas Ribereñas	22

(*) - Para obtención de la luz y nivel de aguas máximas extraordinarias.
- Se recomienda un período de retorno T de 500 años para el cálculo de socavación.

(**) - Vida Útil considerado n=25 años.
- Se tendrá en cuenta, la importancia y la vida útil de la obra a diseñarse.
- El Propietario de una Obra es el que define el riesgo admisible de falla y la vida útil de las obras.

FUENTE: MTC (2008).

Para el cálculo del periodo de retorno, si se dispone de la información de la vida útil de la obra, así como del riesgo asumible en base a la información disponible en el manual y expuesta anteriormente, se ajustarán a las siguientes leyes de distribución de la Figura 1.

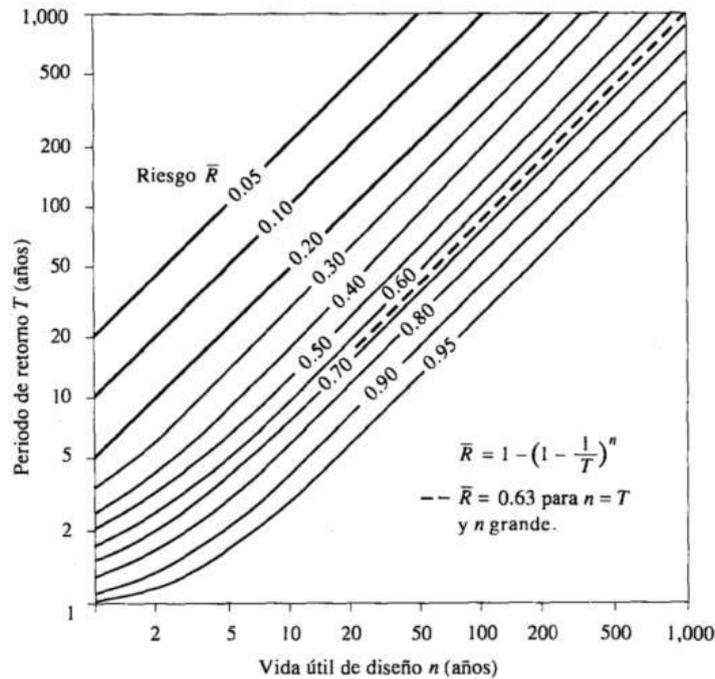


Figura 1: Riesgo de por lo menos una excedencia del evento de diseño durante la vida útil

FUENTE: Ven Te Chow (1994).

Dado a que el tiempo de retorno está en función del riesgo de fallo y la vida útil de la obra, existe un rango muy amplio de simulaciones de los procesos de precipitación-escorrentía, asociados a los tiempos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100, 500, 1.000 y 10.000 años, de forma que abarque los requerimientos técnicos para el diseño de las distintas obras de protección.

2.1.5. Tormenta de diseño para 24 horas

El cálculo de las tormentas de diseño, es decir, la distribución temporal de la P_{24} , se realiza con la metodología propuesta por el Soil Conservation Service del U. S. Department of Agriculture (1986) revisar en la bibliografía de referencia.

En el cual, el SCS desarrolló hietogramas sintéticos de tormentas con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. El hietograma de 24 horas de duración tiene cuatro tipologías,

esto es Tipo I, Tipo IA, Tipo II y Tipo III, como se observa en la Figura 2. Las regiones de Perú se integran dentro de la cuenca del Pacífico, por lo que, salvadas las diferencias climáticas, sus similitudes regionales se correspondería con la región del Pacífico Sur de los Estados Unidos de América. Por lo tanto, preliminarmente, la distribución temporal que mejor se adecuaría regionalmente sería la curva Tipo I del SCS.

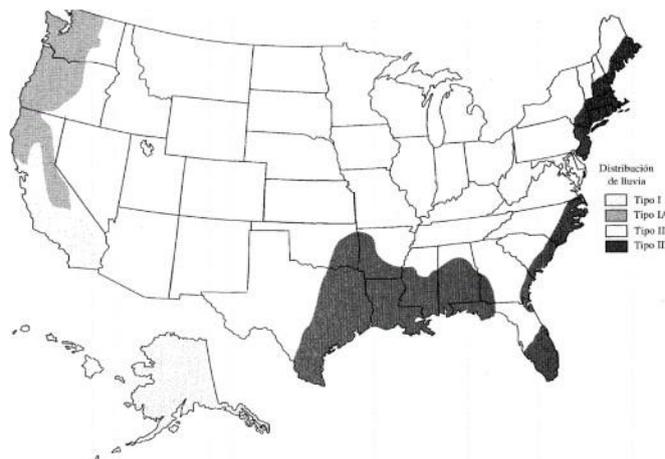


FIGURA 14.3.3
Localización en los Estados Unidos para la aplicación de los histogramas de lluvia de 24 horas del SCS. (Fuente: U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1986).

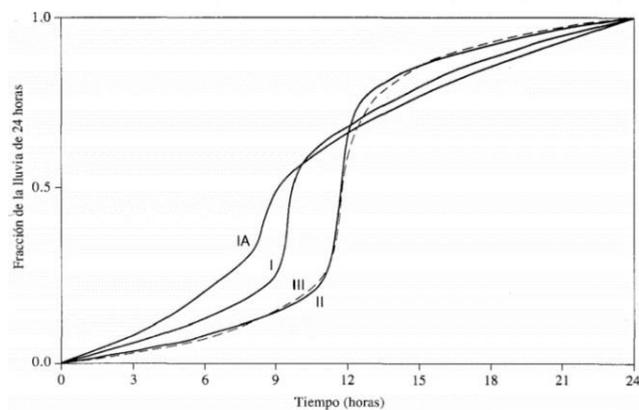


Figura 2: Distribución de lluvia de 24 horas del SCS

FUENTE: Ven Te Chow (1994).

2.1.6. Polígonos de Thiessen

Un método para hacer la distribución espacial de las estaciones pluviométricas para el periodo considerado es el método de Polígonos de Thiessen (ver Figura 3) el cual consiste en que cada estación se rodea de un polígono y supone que todo el polígono trazado recibe la misma información que el punto central, siendo el trazo de los polígonos es mediante mediatrices, perpendicular al punto medio, de los segmentos que unen las diversas estaciones pluviométricas (Román, 2022).

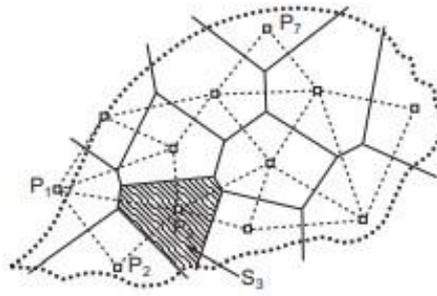


Figura 3: Polígono de Thiessen

FUENTE: Román (2022).

El cálculo del polígono actualmente se realiza digitalmente a través de herramientas GIS (sistema de información geográfica), que permite obtener el área de influencia de cada estación de acuerdo con su ubicación geográfica.

2.2. Modelamiento Hidrológico con HEC-HMS

La modelización de máximas avenidas se lleva a cabo mediante la construcción de un modelo hidrológico en HEC-HMS, software desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. HEC-HMS es un modelo hidrológico semi-distribuido que permite:

- Modelización de las abstracciones.
- Métodos agregados de transformación de la esorrentía distribuida
- Modelización de tránsito de avenidas a lo largo de la red de drenaje
- Modelización de producción y propagación de sedimentos

La modelización hidrológica en el software HEC-HMS calcula el hidrograma producido por una cuenca a partir de los datos e información pluviométrica de la cuenca, a su vez permite establecer varias subcuencas. Para el análisis de máximas avenidas se desarrolla los tres primeros puntos.

2.2.1. Arquitectura del modelo hidrológico

La representación física de una cuenca hidrográfica se realiza a través de un modelo conceptual de cuenca. Los elementos hidrológicos están conectados en una red dendrítica para simular procesos de producción, transformación y tránsito de esorrentía a lo largo del sistema hidrológico.

Para ello, el sistema se encuentra modelizado por elementos los siguientes elementos conceptuales:

- Subcuencas: asumen condiciones hidrológicas homogéneas, por lo que cuanto más discretizado se encuentre el sistema, el modelo se aproximará más a un modelo distribuido. Es el elemento donde se simulan las abstracciones para la producción de precipitación neta y su transformación en escorrentía, con el fin de simular los hidrogramas en los puntos de concentración de cada subcuenca.
- Nodos: Puntos de confluencia donde se definen unidades de concentración de caudales.
- Tramos: entre dos nodos se simula el flujo hidráulico abierto en ríos y arroyos y se computa los tránsitos de los hidrogramas de forma progresiva hasta la salida de la cuenca.
- Reservorios: Estos elementos pueden modelizar, a través de subrutinas, infraestructuras hidráulicas intercaladas en el cauce y determinar su efecto laminador.
- Otros elementos como: reservorios; desvíos; fuentes y sumideros.

Por lo tanto, el modelo HEC-HMS incorpora todas las capacidades y potencialidades para la agregación de submodelos de transformación de precipitación en escorrentía y el traslado de hidrogramas a través de la cuenca y la red de cauces, simulando de esta manera la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de precipitación.

La suma o combinación de hidrogramas parciales, se lleva a cabo tras efectuar el tránsito del hidrograma desde un punto hasta otro situado aguas abajo, obteniendo el efecto de laminación, en el cauce, cuyas características y geometrización constituyen un dato de entrada, utilizándose en este caso el método de Muskingum.

2.2.2. Modelo de las abstracciones hidrológicas

La modelización de las abstracciones hidrológicas se refiere al proceso de conversión de lluvia a lluvia eficaz o neta, siendo esta última como la parte de la precipitación total del aguacero que realmente contribuye a la generación de caudales de escorrentía. La modelización de las abstracciones trata de descontar de la lluvia caída sobre una cuenca todas aquellas pérdidas que se deben a factores tales como la interceptación, retención e infiltración.

2.2.3. Número de Curva

El método del Número de Curva (NC) del Soil Conservation Service (SCS), es el método que mejor se ajusta para cuencas de la región de la Costa Central, donde la representación de la precipitación (P) y precipitación efectiva (Pe) se obtiene en base a un número adimensional, NC, que varía de 1 a 100 según sea el grado de escurrimiento directo. El valor de este parámetro igual a 1 indica que toda la lluvia infiltra y a 100 representa el escurrimiento total de la precipitación

Los valores de Numero de Curva de las subcuencas son calculadas a partir de los mapas de uso y tipo de suelo donde el valor final resulta de la ponderación de los valores individuales distribuidos espacialmente. A partir de la zonificación obtenida en base a la clasificación del grupo hidrológico del suelo, y la clasificación de los usos del suelo según el SCS, se cruzan ambas clasificaciones para obtener el número de curva según el Hydrology National Engineering Handbook (USDA 2004) (Ver Tabla 4).

Tabla 4: Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana(condiciones antecedentes de humedad II, Ia = 0.2s)

USO DE SUELO	Condición hidrológica	GRUPO			
		A	B	C	D
Agricultural land - Grassland Fair	Fair	49	69	79	84
Agricultural land - Rotation meadow	Good	55	69	78	83
Agricultural land - Rotation meadow	Poor	64	75	83	85
Agricultural land - Woods-grass	Poor	57	73	82	86
Semiarid - Desert shrub	Poor	63	77	85	88
Semiarid - Desert shrub	Fair	55	72	81	86
Semiarid - Desert shrub	Good	49	68	79	84
Semiarid - Herbaceous	Fair	-	71	81	89
Semiarid - sage - grass	Fair	-	51	63	70
Lake	-	100	100	100	100
Glacier	-				
Residential 1/8	-	77	85	90	92

FUENTE: USDA (2004).

Los criterios para cada grupo hidrológico son los siguientes:

- Clase A: Son suelos con bajo potencial de escurrimiento por su alta permeabilidad y elevada capacidad de infiltración, aun cuando están húmedos. En la zona de estudio, se han asociado materiales del Cuaternario formados por depósitos aluviales y coluviales, así como a depósitos fluvio-glaciares, de texturas gruesas (arenosa o

areno-limosa).

- Clase B: Son suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. En la cuenca del Río Mala, se han asociado a depósitos glaciares de alta montaña de texturas que pueden variar de franca, franco-arenosa o arenosa.
- Clase C: Suelos de escasa capacidad de infiltración una vez saturados. En la zona de estudio se han relacionado con formaciones pelíticas o vulcano-sedimentarias con niveles pelíticos.
- Clase D: Suelos con elevado potencial de escurrimiento y, por tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. En la zona de estudio se han asociado a suelos jóvenes de escaso espesor sobre rocas plutónicas del batolito de la costa.

EL Soil Conservation Service (SCS) define tres condiciones de humedad antecedentes: medias (CNII), secas (CNI) y húmedas (CNIII), en función de las precipitaciones registradas en los cinco días anteriores. Ver Tabla 5.

Tabla 5: Condiciones de humedad precedentes del SCS

Condición	Lluvia total durante los cinco días anteriores (mm)	
	Período húmedo	Período seco
I	Menos de 12.5	Menos de 35.5
II	De 12.5 a 28.0	De 35.5 a 53.0
II	Más de 28.0	Más de 53.0

FUENTE: Soil Conservation Service

Los números de curva obtenidos se calculan para condiciones precedentes de humedad normales (CNII), si queremos calcular los números para condiciones secas (CNI) y condiciones húmedas (CNIII) hay que emplear las siguientes expresiones desarrolladas por Hawkins:

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058CN(II)} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13CN(II)} \quad \text{Ecuación 4}$$

2.2.4. Transformación precipitación neta en escorrentía

La modelización de la transformación del exceso de precipitación en la subcuenca con escorrentía directa en la salida del hidrograma se realiza mediante el modelo del hidrograma unitario del Servicio de Conservación del Suelo (SCS), de forma que se determina el tiempo de distribución de la escorrentía, incluyendo el caudal máximo, una vez estimado el volumen de escorrentía resultante de una precipitación (modelización de las abstracciones).

Este método define un hidrograma unitario curvilíneo estableciendo primero el porcentaje de escorrentía unitaria que se produce antes del caudal máximo (NRCS, 2007), de modo que un hidrograma triangular puede ajustarse al mismo para que se pueda calcular la duración base del hidrograma unitario.

El tiempo de retardo es dependiente del tiempo de concentración, que se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la cuenca estén aportando agua de escorrentía al punto de desagüe, es decir, estará en función del punto más alejado de la cuenca de estudio. Su cálculo es mediante dos metodologías empíricas, el método de California y el de Kirpich. La formulación de ambos métodos es la siguiente:

Método de California:

$$T_c = 0,95 \left[\frac{L^3}{H} \right]^{0,385} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- T_c : tiempo de concentración (h)
- L : longitud del curso de agua más largo (m)
- H : diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)

Método de Kirpich

$$T_c = 0,06628 \left[\frac{L^{0,77}}{J^{0,385}} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- t_c : tiempo de concentración (h)

- L: longitud del curso de agua más largo (km)
- J: pendiente del cauce definido (m/m)

2.2.5. Modelo de tránsito del hidrograma

Para la modelización del tránsito del hidrograma en la red de drenaje uno de los métodos que se recomienda utilizar es el método hidrológico de Muskingum, ya que computa tanto el traslado de la onda de avenida como su atenuación, más o menos pronunciada según las características del cauce.

El método de Muskingum se utiliza en tramos de pendientes mayores del 2‰, en los que los términos de aceleración local, convectiva y de gradiente de presión, son despreciables frente al efecto de la pendiente del terreno. Siendo este método la mejor alternativa, y uno de los más empleados en la mayoría de los modelos hidrológicos. Este método asume una relación lineal entre el volumen almacenado en el tramo y los caudales entrantes y salientes, mediante tres parámetros K, X y N.

El parámetro X se refiere a la forma de almacenamiento y es una constante que varía entre 0 y 0,5. Siendo 0 para un almacenamiento tipo embalse donde se produce el mayor efecto de atenuación, hasta 0,5 donde se produce una simple traslación de la onda sin variación de la punta. En corrientes naturales se encuentra entre 0,0 y 0,3 con un valor medio cercano a 0,20; asimismo, no necesita una gran precisión en la determinación de X debido a que los resultados del método son relativamente insensibles al valor de este parámetro. Para los modelos hidrológicos se empleará en todas las cuencas un valor de 0,20.

El parámetro K tiene dimensiones de tiempo y nos indica lo que tarda la onda de la avenida en desplazarse por el tramo de río considerado, para su estimación se calculará el tiempo de concentración de las subcuencas asociadas a cada tránsito, tomando como longitud máxima la del cauce del río.

El número de subtramos (N) en que se divide cada tránsito dependerá de los dos parámetros anteriores: K y X, del tiempo de cálculo del modelo (5 minutos) y de las condiciones que deben mantener todos entre sí para que el dimensionado del tránsito sea adecuado. Una vez

asignado un valor a X y hallado el tiempo de concentración del tramo, se estima el valor de N mediante la relación:

$$N = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2(1-X)} + \frac{1}{2X} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

2.3. Modelización de la laminación de avenidas con HEC-HMS

La laminación de avenidas se resuelve generalmente mediante una estructura de detención transversal al cauce, como un reservorio temporal, que mitiga los impactos adversos del exceso de agua al mantenerla y liberarla progresivamente, de modo que no cause daños aguas abajo del lugar de implantación de la estructura, es así que el HEC-HMS es una herramienta conveniente para usar en la modelización.

A partir del hidrograma estimado en un punto o elemento conceptual concreto de la cuenca, se establece un caudal objetivo que no causa daños aguas abajo. Para reducir el caudal pico al caudal máximo admisible resulta necesario proporcionar almacenamiento instantáneo al sistema mediante estructuras de retención, la cual funcionan únicamente cuando el caudal en el cauce es mayor que dicho caudal admisible. A continuación, en la Figura 4 se muestra un ejemplo de la operación de una estructura de laminación.

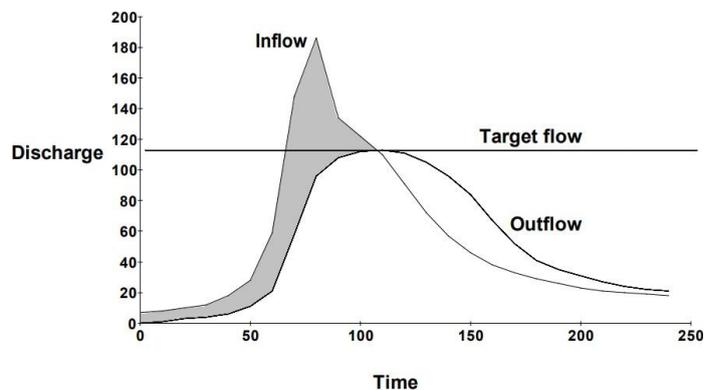


Figura 4: Ejemplo de análisis de laminación mediante estructuras de detención

FUENTE: HEC-HMS Technical Reference Manual.

El volumen de agua representado por el área sombreada se almacena y luego se libera gradualmente. El volumen del hidrograma resultante es el mismo, pero la distribución del tiempo de la avenida es alterada por implementación de un elemento que produce

almacenamiento en el sistema.

El modelo del almacenamiento y laminación implementado en HMS se resuelve mediante la aproximación del modelo Modificado de Puls (Modified Puls Method), donde se establece la entrada y la salida de un reservorio y donde el volumen de agua almacenada se calcula mediante la superficie de agua horizontal que ocupa. Para ello, el modelo discretiza el tiempo de simulación, dividiendo el tiempo total de análisis en intervalos iguales de duración Δt y aplicando continuidad:

$$I_{avg} - O_{avg} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde:

- I_{avg} = Caudal medio de entrada durante el intervalo de tiempo;
- O_{avg} = Caudal medio de salida durante el intervalo de tiempo;
- ΔS = Variación de la superficie horizontal ocupada por el agua;

Considerando una aproximación de diferencias finitas, la ecuación se concibe de la siguiente forma:

$$\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{O_t + O_{t+1}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde

- t = índice de discretización temporal;
- I_t y I_{t+1} = caudal de entrada al inicio y al final de cada intervalo de discretización temporal;
- O_t y O_{t+1} = caudal de salida al inicio y al final de cada intervalo de tiempo;
- S_t y S_{t+1} = Valores de almacenamiento correspondientes.

El modelo de laminación que se incluye HMS es apropiado para simular el comportamiento de las estructuras de laminación bajo la hipótesis de “Inlet control”, esto es, que el flujo de salida está únicamente controlado por flujo de entrada. Es decir, el flujo de salida es una función del flujo ascendente con la cota de la superficie del agua.

2.3.1. Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME)

Se define como el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición, que implica la operación a su máxima eficiencia del aliviadero de demasías. (ANA, 2016).

2.3.2. Curvas característica cota / volumen - cota / área

Las curvas cota / área son las relaciones que integran el modelo del almacenamiento de los reservorios dentro del modelo hidrológico semidistribuido construido en HEC-HMS mediante la aproximación del Modelo modificado de Puls.

Con las curvas cota/superficie se obtiene la relación cota/volumen, y mediante la integración de éstas se define el volumen del vaso de cada estructura de laminación. El esquema que se presenta en la Figura 5 permite definir con mayor claridad el proceso seguido.

$$V = \frac{S_{i+1} + S_i}{2} (Z_{i+1} - Z_i)$$

Ecuación 10

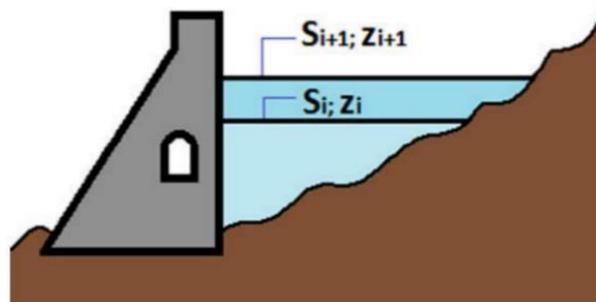


Figura 5: División en sectores para definir la forma de la cuenca

FUENTE: MTC (2008).

2.3.3. Estructuras de desagüe

La modelización de los órganos de desagüe se realiza en función de lo que el proyectista considere para las estructuras de laminación, así como las dimensiones de las galerías de salida no controladas se modelizan a partir de una sección hidráulica aproximada que es objeto de calibración ante cada uno de los escenarios planteados.

La simulación de los órganos de desagüe en caso se considere como orificios de descarga, conlleva a asumir la hipótesis de sumergencia total de los órganos de desagüe desde el inicio de la avenida. Asimismo, se considera una sección hidráulica equivalente a las dimensiones de los órganos de desagüe y un coeficiente de descarga adimensional que engloba las pérdidas de energía a la entrada y salida, así como las pérdidas que se producen a lo largo de dichas estructuras de desagüe. En este sentido, si la salida se encuentra totalmente sumergida y el caudal puede calcularse mediante la ecuación del orificio.

En donde:

$$O = KA\sqrt{2gH} \qquad \text{Ecuación 11}$$

- Q = caudal trasegado a través del órgano de desagüe;
- K = Coeficiente de descarga
- A= Sección hidráulica de descarga
- H = Altura total de energía

2.4. Antecedentes

Hasta la actualidad se han realizado diferentes estudios en la cuenca de estudio, siendo que se contó con las siguientes referencias:

- Evaluación de Recursos Hídricos en las cuencas de Mala, Omas y Chilca. Elaborado por Grupo INCLAM Perú para la Agencia Nacional del Agua (2015).
- Evaluación de recursos hídricos de la cuenca del río Mala. Elaborado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) (2007).
- Identificación y control de zonas críticas en el cauce del río Mala. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) (2014).
- Resumen ejecutivo de la temporada de lluvias 2016-2017. INDECI
- Fortaleciendo la respuesta ante desastres en el Perú: Lecciones Aprendidas del Fenómeno El Niño Costero 2017 en el Perú. INDECI-Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Informe Final del Estudio de Máximas Avenidas en las Cuencas de la Zona Centro de la Vertiente el Pacífico. Publicado por Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (diciembre, 2010).

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Ubicación del proyecto

El área de estudio es en la cuenca del río Mala, está ubicada en la parte central de Perú, junto a la costa de la vertiente Pacífica, donde vierte directamente las aguas de escorrentía. Limita por el norte con la cuenca del río Lurín, por el este con la cuenca del río Mantaro, por el sur con la cuenca del río Cañete, y por el oeste con el Océano Pacífico. La extensión del río Mala es de aproximadamente 2'320 km. La Cuenca Mala identificada con el código 137552 pertenece al ámbito territorial de la AAA Cañete – Fortaleza y tiene una extensión de 2'319.7 km² según el ANA (2009) (Ver Figura 6).



Figura 6: Ubicación de la Cuenca del Río Mala y subcuencas

FUENTE: ANA (2009).

3.2. Materiales

3.2.1. Información cartográfica

Para determinar la extensión de la cuenca, así como la división en subcuencas, se utiliza el software de procesamiento geográfico gratuito, QGis, y se emplea el Modelo Digital del Terreno (MDT) ALOS PALSAR DEM. Este fue desarrollado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y dispone de una versión re muestreada con precisión de alta definición de 12,5 metros (Ver Figura 7).

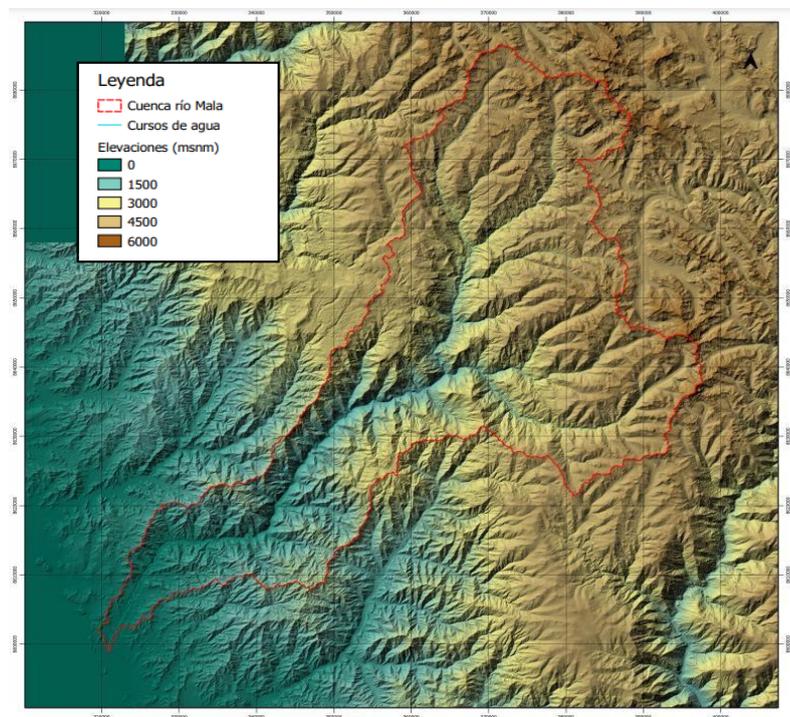


Figura 7: Modelo digital del terreno para la cuenca Mala

FUENTE: JAXA (2019).

3.2.2. Información meteorológica y pluviométrica

Se obtiene de la red de nacional de estaciones meteorológicas del Perú, que es controlada y administrada por el SENAMHI, entidad oficial encargada del manejo de la información climática. Para la cuenca de estudio se ubican un total de cinco estaciones meteorológicas dentro de la delimitación de la propia cuenca, también se han localizado un total de tres estaciones periféricas adicionales que se considerarán como estaciones de cobertura y una estación hidrométrica en la parte baja de la cuenca (Ver Tabla 6).

Tabla 6: Estaciones meteorológicas de la cuenca de Mala

Nombre	Ubicación Política		Coordenadas geográficas			Cuenca	Tipo	Registro
	Provincia	Distrito	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)			
Huarocharí	Huarocharí	Huarocharí	76° 14'1	12° 08'1	3154	Mala	Meteorológico	1963-2019
La Capilla2	Cañete	Calango	76°29'46"	12°31'18.9"	442	Mala	Hidrométrica Meteorológico	1938-2019 1964-2019
Huañec	Yauyos	Huañec	76° 08'23.73	12° 17'30.98	3205	Mala	Pluviométrica	1964-2019
Ayaviri	Yauyos	Ayaviri	76° 08'1	12° 23'1	3228	Mala	Pluviométrica	1963-2019
Huancata	Huarocharí	San Lorenzo de Quinti	76° 13'1	12° 13'1	2700	Mala	Pluviométrica	1980-2019
San Pedro de Pilas	Cañete	Calango	76° 13'1	12° 27'1	4323	Cañete	Pluviométrica	1964-2018
Tanta	Yauyos	Tanta	76° 01'1	12° 07'1	2600	Omas	Pluviométrica	1980-2010
San Lázaro de Escomarca	Huarocharí	Langa	76° 21' 7.46"	12° 10' 51"	3600	Lurín	Meteorológico	1964-2018

FUENTE: SENAMHI

Cabe destacar que se tienen datos registrados desde el año 1938 hasta la actualidad; sin embargo, para el presente estudio realizado en el 2019 se dispone de información completa hasta el año 2018. La distribución de las estaciones se observa en la Figura 8.

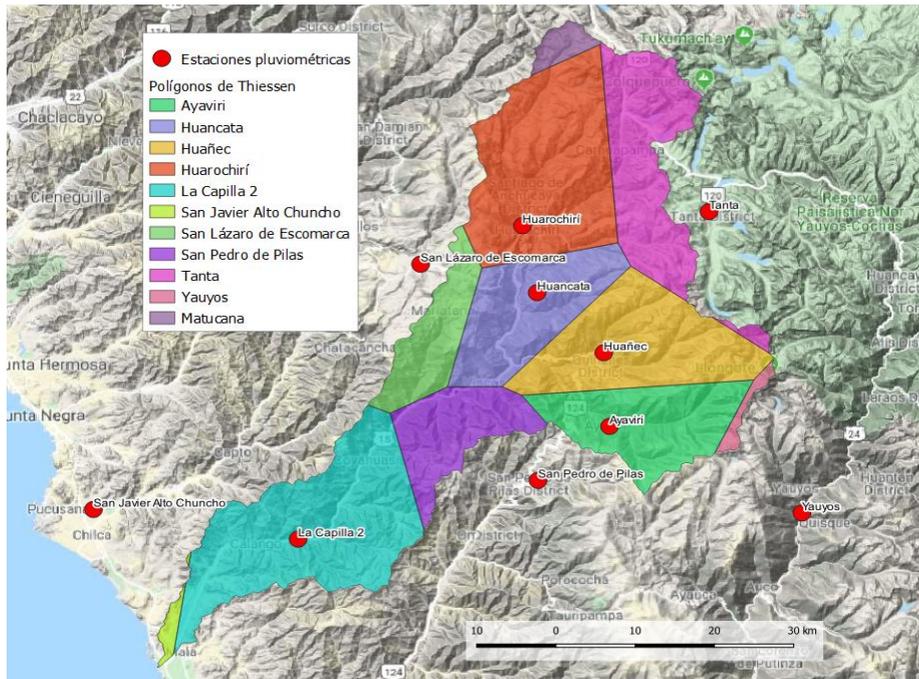


Figura 8: Ubicación de estaciones meteorológicas

3.2.3. Tipo de suelo

La determinación del grupo hidrológico, que determina la permeabilidad relativa del suelo, se ha realizado en base al SCS (2007), según el cual el suelo se puede clasificar en cuatro clases hidrológicas (A, B, C, D) para la cuenca Mala.

3.2.4. Cobertura vegetal

Se utiliza como fuente de información los mapas de cobertura vegetal dispuestos del estudio de Evaluación de Recursos Hídricos en las cuencas Mala, Omas y Chilca realizado en 2015, cuya información ha sido relacionada con las unidades de cobertura establecidas por el capítulo 9 del Hydrology National Engineering Handbook, “Hidrologic Soil-Cover Complexes, del United States Department of Agriculture “USDA” (2004), tal como establece el “Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transporte y Comunicación del Perú (MTC), a partir del cual se realiza la reclasificación para el mapa de cobertura vegetal.

3.3. Metodología

3.3.1. Análisis de precipitación máxima diaria

Se obtiene la información pluviométrica de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones seleccionadas certificada por el SENAMHI. Esta información se procesa para determinar la precipitación máxima diaria por día, luego se calcula el valor máximo diario anual. La información adquirida se adjunta en el Anexo 1.

a. Análisis de calidad de datos dudosos

En primera instancia para el análisis de calidad de los datos se establece un umbral de meses máximos faltantes en la recopilación de los datos, este se ha establecido en 4 meses ya que es el período mínimo en el cual se desarrollan tormentas de alta intensidad en la zona costera del Perú, en ese sentido, los años que tengan un registro inferior a 8 meses se considerarán dudosos y podrán no ser considerados para el cálculo de avenidas.

Los registros del año 2019 se encuentran incompletos ya que es el año en curso a la fecha de edición del estudio; por lo tanto, se eliminará este año del cálculo estadístico, mientras que las celdas vacías corresponden a que se encuentra la información completa. Asimismo, se observa que a excepción de los años que están completamente vacíos, todos los años registrados tienen un número de meses completos igual o superior a 8 meses, por lo que se consideran válidos en este primer tanteo de la calidad de los registros, salvo en el año 2019 como hemos indicado. En la Tabla 7 se observa los meses vacíos de datos de precipitación máxima en 24hr.

En segundo lugar, se realiza la prueba de la calidad de los datos para la eliminación de los datos dudosos con el método propuesto por el Water Resources Council.

Tabla 7: Registro de meses faltantes Pmáx24Hrs por estación

Año	Ayaviri	Huancata	Huañec	Huarochirí	La CapillaII	Tanta	San Pedro dePilas	San Lázaro de Escomarca
1964		12	12	12	12	12	12	12
1965		12	12	12	12	12	12	12
1966		12	12	12	12	12	12	
1967	3	12	12	12	12	12	12	
1968		12	12	12	12	12	12	
1969	3	12	12	12	12	12	12	
1970	12	12	12	12	12	12	12	12
1971		12	12	12	12	12	12	12
1972		12	12	12	12	12	12	3
1973		12	12	12	12	12	12	2
1974		12	12	12	12	12	12	1
1975		12	12	12	12	12	12	12
1976		12	12	12	12	12	12	
1977		12	12	12	12	12	12	2
1978		12	12	12	12	12	12	
1979		12	12	12	12	12	12	
1980	4		12	12	12	12	12	3
1981	12		12	12	12	12	12	1
1982	12		12	12	12	12	12	1
1983	12		12	12	12	12	12	1
1984	12		12	12	12	12	12	1
1985	12		12	12	12	12	12	
1986		2	12	12	12	12		
1987			12	12	12	12		
1988			12	12	12	12		
1989			12	12	12	12		
1990		1	12	12	12	12	1	
1991			12	12	12	12		
1992			12	12	12	12		1
1993				12	12			1
1994				12	12			1
1995				12	12		1	
1996				12	1			
1997				2	1			
1998								
1999								
2000					12			
2001				1	1			
2002	1		1	1	1		1	1
2003								
2004	2			1	1			1
2005				1	1			2
2006	4	1	1	1			1	
2007	1			2	3	2		
2008	2			1	2	1		1
2009	2	2						
2010	2							
2011				1				
2012	2			1				
2013								
2014								
2015								
2016			1				1	
2017								
2018								
2019	8	8	4	8	8	6	6	6

FUENTE: SENAMHI

b. Período de retorno

Para el presente trabajo considerando la estructura de laminación se considera una vida útil aproximada de 100 años, que corresponde un caudal de diseño equivalente a un periodo de retorno de 500 años.

c. Distribución de Frecuencia y prueba de bondad de ajuste

En esta etapa se hace uso de la aplicación informática de libre distribución “HYDROGNOMON” desarrollada por NTUA (National Technical University of Athens) con el cual se calcula las funciones estadísticas de distribución aplicables al cálculo de eventos extremos para cada una de las estaciones pluviométricas, con el mismo luego se realiza la prueba de la bondad de ajuste con el método de Smirnov – Kolmogorov.

d. Tormenta de diseño

Se partió de la hipótesis que la precipitación máxima en 24 horas no se distribuye de manera uniforme a lo largo del día, sino que se adecuará a una distribución temporal teórica (tormenta de diseño). En ese sentido para la estimación de la tormenta de diseño, es decir, la distribución temporal de la P24, se sigue la metodología propuesta por el SCS, empleando hietogramas sintéticos de tormentas con duraciones de tormentas 24 horas propuesto por el Soil Conservation Service del U. S. Department of Agriculture (1986).

Para seguir con este método se asigna una curva predefinida de distribución temporal de precipitaciones en 24 horas en base a la ubicación de la cuenca de estudio, al respecto se considera que la cuenca de Mala se asimila a la costa del Pacífico sur de los Estados Unidos de América, por sus similitudes climáticas con la zona de estudio y con una duración de 24 horas, por ello le corresponde una distribución según la curva Tipo I del SCS.

e. Distribución espacial de la precipitación

Para el modelo hidrológico en HEC-HMS, las distribuciones de las tormentas de lluvia de forma horaria se calculan para cada subcuenca, es así que empleando el

método de Thiessen se extrapola la información de las estaciones meteorológicas al resto de la cuenca, luego esta información se ingresa al modelo como Time-Series Gage.

3.3.2. Modelamiento hidrológico situación actual

a. Datos para el modelo hidrológico

La modelización de máximas avenidas se lleva a cabo mediante la construcción de un modelo hidrológico en HEC-HMS, que tuvo en cuenta todos los elementos hidrológicos, a escala de microcuenca, que están conectados en una red dendrítica para simular procesos de producción, transformación y tránsito de escorrentía a lo largo del sistema hidrológico. La arquitectura del modelo de la Cuenca del río Mala se realiza considerando los siguientes elementos de la Tabla 8.

Tabla 8: Elementos para el modelo HEC-HMS de la Cuenca del río Mala

Elemento	Descripción	Elemento	Descripción
Saraico	Subcuenca	Q2-M6	Tramo
Tantara	Subcuenca	M2-M3	Tramo
Aguaquiri	Subcuenca	M4-M5	Tramo
Quinches Alto	Subcuenca	Q1-Q2	Tramo
Cruz	Subcuenca	M1-M2	Tramo
Ululuma	Subcuenca	M3-M4	Tramo
Acacache	Subcuenca	M5-M6	Tramo
Churchuquia	Subcuenca	M6-M7	Tramo
Canyaca y Pacura	Subcuenca	M7-M8	Tramo
Quinches Bajo	Subcuenca	M8-M9	Tramo
Huampara	Subcuenca	M9-M10	Tramo
Laran	Subcuenca	M10-DES	Tramo
Huagnec	Subcuenca	Q1	Nodo
Mala Alta	Subcuenca	Q2	Nodo
Pacomanta	Subcuenca	M1	Nodo
Mala Medio	Subcuenca	M2	Nodo
Mariatana	Subcuenca	M3	Nodo
Mala Media-Baja	Subcuenca	M4	Nodo
Huancani	Subcuenca	M5	Nodo
De Huito	Subcuenca	M6	Nodo
Mala Baja	Subcuenca	M7	Nodo
Desembocadura	Desembocadura	M8	Nodo
		M9	Nodo
		M10	Nodo

En el modelo del HEC-HMS se emplea el modelo del hidrograma unitario del SCS,

que como resultados se obtienen hidrogramas completos en cada una de las subcuencas, cuyo parámetro de entrada es el tiempo de retardo, Tlag, que se define como la duración de tiempo entre el centroide de la masa de precipitación y el caudal máximo del hidrograma resultante.

b. Curva Número (CN)

El cálculo de las abstracciones hidrológicas de la cuenca se realiza a través del método del número de curva (CN), propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, calculado a partir de la información del tipo y el uso de suelo en el área de estudio.

c. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo hidrológico se realiza un análisis estadístico de los datos hidrométricos obtenidos del SENAMHI en la estación hidrométrica de La Capilla, en comparación con los resultados de caudales máximos simulados en el modelo hidrológico del HEC-HMS que corresponden al Junction M9 (de la arquitectura del modelo de HEC-HMS) por su proximidad en terreno.

3.3.3. Modelamiento hidrológico con estructuras de LAMINACIÓN

a. Alternativas de laminación

La propuesta de ubicación de las estructuras de laminación se realiza a partir de visitas de campo, siendo validado con información de los estudios de geología, geotécnico, topográfico y social obtenida en la cuenca de estudio.

El planteamiento de las alternativas se propuso como solución tentativa estructural de laminación de caudales que abarcan desde la implementación de una única estructura hasta la implementación de un número variable de estructuras en serie a lo largo del cauce, que, conjugados, se estimó que mejora la capacidad de laminación.

A partir de la ubicación de los emplazamientos potenciales de las estructuras recomendadas, se plantea diferentes escenarios de laminación de cara a la reducción de la creciente, los cuales tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Altura de coronación máxima de la estructura de laminación.
- Alternativas de ubicación del emplazamiento recomendadas por los diferentes especialistas.
- La eficiencia de laminación, a partir del cálculo de la relación entre el volumen de almacenamiento del vaso respecto a la altura de coronación de la estructura, parámetro que se obtiene a partir de las curvas hipsométricas del NAME de cada estructura estudiada.

Las alternativas preliminares planteadas según la ubicación de los embalses y la combinación más adecuada desde el punto de vista hidrológico se encuentran definidos a continuación:

- ALTERNATIVA 0: Considera una (1) estructura de laminación en la ubicación del embalse nº4, con una altura de coronación de 50 metros
- ALTERNATIVA 1: Considera una (1) estructura de laminación en la ubicación del embalse nº4, con una altura de coronación de 45 metros
- ALTERNATIVA 2: Considera dos (2) estructuras de laminación en serie en el cauce del río Mala.
- ALTERNATIVA 3: Considera tres (3) estructuras de laminación en el cauce del río Mala con una cota de coronación máxima de 30 metros en todas ellas.
- ALTERNATIVA 4: Considera cuatro (4) estructuras de laminación en el cauce del río Mala con una cota de coronación máxima de 30 metros en todas ellas.
- ALTERNATIVA 5: Considera tres (3) estructuras de laminación en el cauce del río Mala con una cota de coronación máxima de 35 metros.

El análisis de los escenarios se lleva a cabo introduciendo las curvas cota/área de cada reservorio, así como modelando los órganos de desagüe de cada estructura para cada alternativa planteada de forma que el almacenamiento agote la altura de coronación de la estructura para el hidrograma de diseño considerado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Información de partida

4.1.1. Delimitación de la cuenca

El procesamiento del terreno se realizó con diversos módulos de análisis hidrológico implementado en QGis, lo que permitió delimitar con exactitud la morfología de la zona de estudio y obtener una gran cantidad de parámetros de carácter hidrológico necesarios para poder realizar posteriormente un modelo hidrológico semi distribuido (Ver Figura 9).



Figura 9: Proceso de obtención de subcuencas y líneas de drenaje de la Cuenca del Río Mala

La primera segregación obtenida da como resultado un elevado número de subcuencas, por lo que se realizó una redistribución de estas con el fin de homogeneizar las mismas según sus características hidrológicas y orográficas. Además de este criterio, la agregación de subcuencas se tuvo en cuenta los ríos y quebradas, así como aquellos puntos de interés que serán de utilidad para la modelización, en los cuales es fundamental disponer del hidrograma de salida del subsistema hidrológico. El resultado de las subcuencas se observa en la Figura 10.

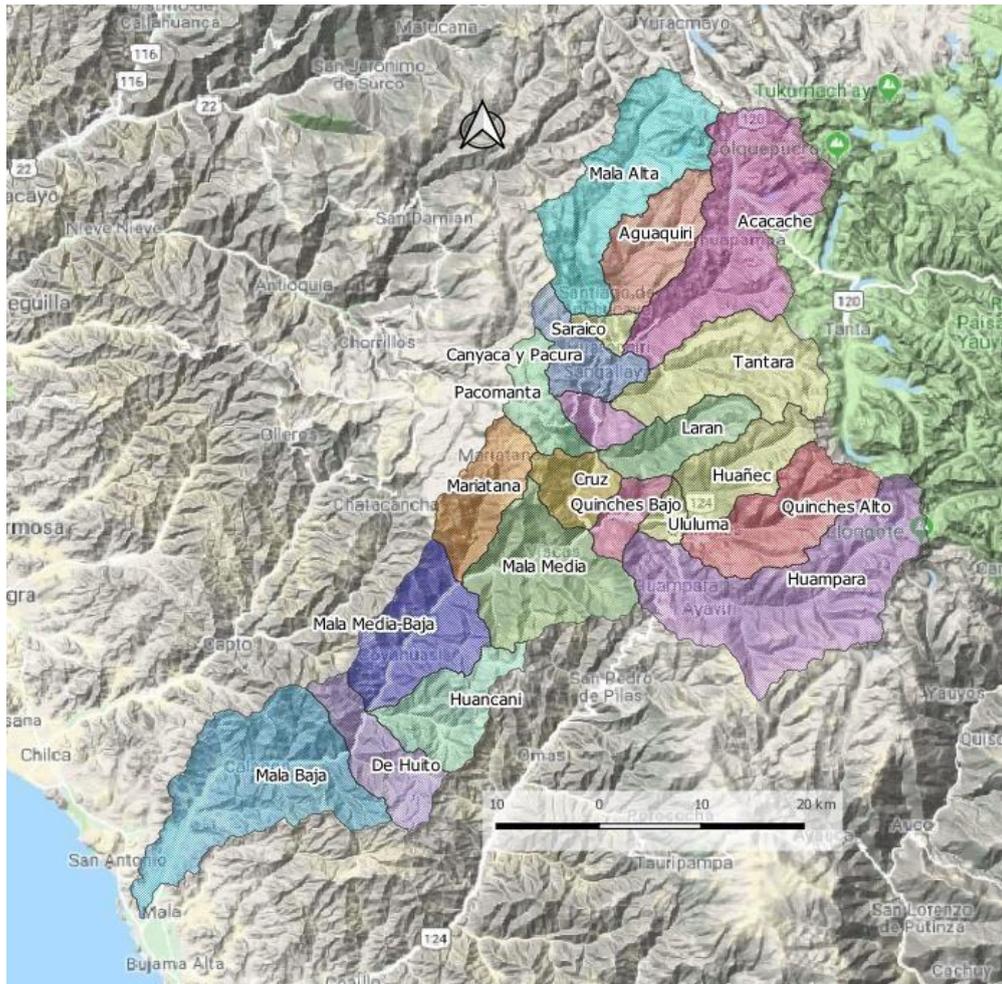


Figura 10: Cuenca Mala y subcuencas

Asimismo, se define el orden hidrológico de los cursos de agua basado en la cantidad de afluentes que recibe el cauce principal, de forma que se pueden inferir algunas características de los cursos de agua simplemente conociendo el orden que ocupa en la red de drenaje.

La definición hidrográfica de la Cuenca del río Mala tiene en cuenta un total de 21 subcuencas, que incluyen 10 quebradas principales de la cuenca, 5 ríos secundarios que se constituyen como afluentes principales al río Mala, y las diferentes subcuencas que drena directamente sobre el río Mala (Ver Tabla 9).

Tabla 9: Relación de subcuencas y parámetros hidrográficos

Subcuenca	Área (Km ²)	Longitud Max. (m)	Ríos / Quebradas	Longitud (km)	Tipo
Acacache	243,6	41'217	Acacache	30,706	Río
Aguaquiri	90,7	22'304	Aguaquiri	14,856	Río
Canyaca y Pacura	63,1	20'415	Canyaca y Pacura	12,294	Quebrada
Churchuquia	29,3	11'356	Churchuquia	5,832	Quebrada
Cruz	49,8	14'625	Cruz	9,984	Quebrada
De Huito	84,8	16'481	De Huito	9,7	Quebrada
Huampara	302,2	43'151	Huañec	13,743	Quebrada
Huancani	90,0	26'285	Huampara	37,134	Río
Huañec	82,9	20'233	Huancani	17,225	Quebrada
Laran	68,6	20'742	Laran	11,305	Quebrada
Mala Alta	193,6	36'619	Mala Alta	29,258	Río
Mala Baja	247,8	43'912	Mala Baja	36,147	Río
Mala Media	160,3	23'982	Mala Media-Baja	18,99	Río
Mala Media-Baja	131,3	25'091	Mala Media	16,089	Río
Mariatana	83,8	21'400	Mariatana	14,295	Quebrada
Pacomanta	53,3	21'611	Pacomanta	13,185	Río
Quinches Alto	129,3	24'982	Quinches Alto	18,671	Río
Quinches Bajo	35,4	12'538	Quinches Bajo	6,358	Río
Saraico	17,1	8'127	Saraico	5,002	Quebrada
Tantara	149,1	30'263	Tantara	22,41	Río
Ululuma	19,5	9'537	Ululuma	6,004	Quebrada

4.1.2. Información pluviométrica e hidrométrica

La selección de estaciones pluviométricas para el presente estudio se realizó luego de hacer uso la distribución espacial de las estaciones en superficie empleando los polígonos de Thiessen de manera que se pueda observar la afección de cada una de las estaciones a la cuenca del río Mala. Del análisis se observó que las estaciones de Tanta, San Lázaro de Escomarca y San Pedro de Pilas sí afectan a la cuenca en un alto grado, por lo que se tomaron en cuenta porque nos permitirán tener mejor caracterizada la cuenca media, ya que en esta zona existe una escasez de información pluviométrica.

Con las estaciones marcadas se realizará el tratamiento de la información y los cálculos meteorológicos. Se recopiló la información de precipitación máxima en 24 horas por cada estación seleccionada del SENAMHI y se obtuvo el valor máximo anual. Cabe resaltar, que en la cuenca de Mala no existes datos hidrométricos fiables que registren avenidas por lo que este parámetro se ha estimado en base a la información de lluvias máximas (precipitaciones máximas en 24 horas) que se han registrado dentro de la cuenca de estudio, y se observan en la Tabla 10.

Tabla 10: Precipitación Máxima Diaria en 24 horas

AÑO	Ayaviri	Huancata	Huañec	Huarochirí	La Capilla II	Tanta	San Lázaro de Escomarca	San Pedro de Pilas
1963								
1964	12.0							
1965	13.0							
1966	28.5						37.5	
1967	32.1						41.0	
1968	19.7						17.1	
1969	33.5						25.0	
1970								
1971	22.7							
1972	33.0						49.1	
1973	37.6						31.2	
1974	30.5						18.2	
1975	34.8							
1976	16.1						20.0	
1977	34.4						21.0	
1978	33.4						33.3	
1979	11.2						27.9	
1980	29.0	13.9					34.4	
1981		17.0					32.1	
1982		23.2					21.0	
1983		31.6					30.0	
1984		25.1					20.5	
1985		27.2					19.8	
1986	32.7	21.8					15.5	16.0
1987	31.9	13.6					20.9	21.9
1988	23.8	8.6					30.0	17.7
1989	39.4	14.1					12.2	15.5
1990	25.6	12.5					15.0	12.4
1991	27.4	6.9					10.1	18.5
1992	29.9	10.5					10.0	10.5
1993	29.7	12.0				41.6	12.6	44.0
1994	30.2	12.0	20.6			26.4	21.0	19.0
1995	30.2	15.3	15.0			27.0	15.0	23.4
1996	24.6	20.3	20.0		4.2	31.7	26.0	12.8
1997	46.2	33.0	19.3	22.5	0.0	27.4	43.0	15.2
1998	32.4	25.3	15.6	38.6	3.8	41.8	12.0	30.1
1999	23.1	17.7	20.3	28.7	1.2	24.5	16.5	24.7
2000	35.4	16.3	18.2	29.4		28.9	11.8	11.2
2001	24.0	19.6	7.3	24.8	2.5	22.7	34.6	15.3
2002	28.7	20.1	9.4	19.6	0.6	28.2	25.5	23.5
2003	18.2	18.4	13.3	25.1	1.7	28.0	25.2	13.1
2004	29.2	19.2	15.2	30.0	2.6	32.9	27.5	8.7
2005	21.0	19.3	14.3	18.6	1.0	22.0	34.9	9.7
2006	26.5	25.0	16.4	22.8	3.8	29.5	74.0	32.1
2007	34.2	17.0	17.5	23.5	1.7	33.6	22.0	15.7
2008	30.4	40.3	23.8	23.6	0.9	27.8	21.5	27.7
2009	12.7	24.0	20.8	38.5	4.0	69.2	21.5	26.1
2010	16.8	17.0	20.2	29.3	4.3	32.5	32.3	42.2
2011	20.0	12.2	19.3	22.0	1.0	23.3	13.2	10.0
2012	24.5	26.5	22.8	24.3	9.2	28.7	27.8	40.5
2013	24.3	14.0	22.8	22.5	1.0	38.6	30.4	23.5
2014	25.5	15.5	22.1	20.4	3.4	25.3	43.8	22.3
2015	27.8	24.7	22.3	26.9	4.5	33.2	35.8	23.9
2016	35.2	48.5	21.5	18.8	3.2	31.0	24.2	14.4
2017	36.1	38.7	20.5	30.2	5.3	38.6	32.4	25.4
2018	21.3	20.0	32.4	33.0	1.0	17.3	34.7	13.2

FUENTE: SENAMHI (2019).

4.1.3. Parámetros morfológicos

Los valores de los parámetros morfológicos para el modelo hidrológico del HEC-HMS se observan en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros morfológicos de la cuenca Mala

Subcuenca	Área (Km2)	Longitud Max. (m)	Cotas (m)	
			Hmax (m)	Hmin (m)
Acacache	243.6	41,217	5,416	2,645
Aguaquiri	90.7	22,304	4,894	2,894
Canyaca y Pacura	63.1	20,415	4,673	2,275
Churchuquia	29.3	11,356	4,300	1,960
Cruz	49.8	14,625	3,942	1,569
De Huito	84.8	16,481	2,513	518
Huampara	302.2	43,151	5,303	2,017
Huancani	90.0	26,285	3,517	643
Huañec	82.9	20,233	5,165	2,522
Laran	68.6	20,742	5,028	1,960
Mala Alta	193.6	36,619	5,263	2,894
Mala Baja	247.8	43,912	2,263	35
Mala Media	160.3	23,982	3,940	1,149
Mala Media-Baja	131.3	25,091	3,302	643
Mariatana	83.8	21,400	4,213	1,149
Pacomanta	53.3	21,611	4,444	1,960
Quinches Alto	129.3	24,982	5,513	2,522
Quinches Bajo	35.4	12,538	4,510	1,571
Saraico	17.1	8,127	4,447	2,645
Tantara	149.1	30,263	5,224	2,275
Ululuma	19.5	9,537	4,499	2,017

4.1.4. Tipo de suelo

A partir de la clasificación de unidades geológicas a escala 1:100.000 realizada por el INGEMMET, se ha realizado la reclasificación y zonificación de grupo hidrológico, dando como resultado el mapa de la Figura 11.

4.1.5. Cobertura vegetal

La clasificación del tipo de cobertura vegetal de la Figura 12 se realizó a partir de la reclasificación del mapa de usos del suelo (uso artificial y natural) elaborado por el Ministerio del Ambiente y Medio Ambiente (MINAM) en el 2019.

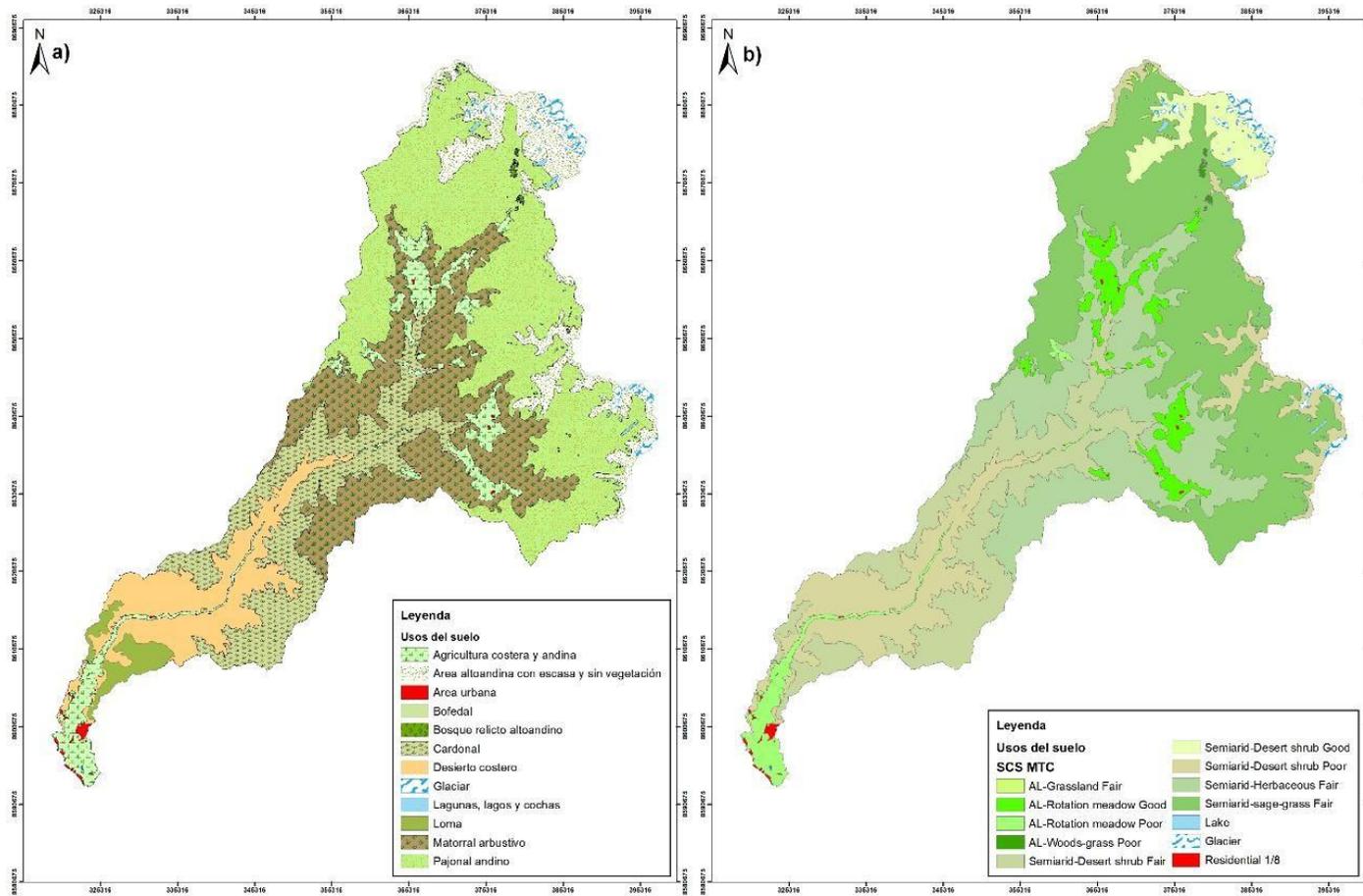


Figura 12: Clasificación del uso del suelo en la cuenca del río Mala.

Nota: a) Usos del suelo (artificial + natural) 2019, b) Usos del suelo clasificación Hydrologic Soil-Cover Complex

FUENTE: USDA (2004).

4.2. Análisis de precipitación máxima diaria

4.2.1. Análisis y validación de datos

Para la generación de la precipitación máxima diaria por cada estación se realizó un primer control de calidad de los datos estableciendo un umbral de meses máximos faltantes. Este umbral para efectos de la investigación se ha establecido en 4 meses, es decir, los años que tengan un registro inferior a 8 meses se considerarán dudosos y podrán no ser considerados para el cálculo de avenidas. A continuación, se muestra en la Tabla 12, los meses vacíos de datos de precipitación máxima en 24hr suministrados por el SENAMHI:

Salvo los años que están completamente vacíos, todos los años registrados tienen un número de meses completos igual o superior a 8, por lo que se consideran válidos en este primer tanteo de la calidad de los registros, salvo registros del año 2019 se encuentran incompletos ya que es el año en curso a la fecha de edición del presente estudio. Por lo tanto, se eliminó este año del cálculo estadístico. Las celdas vacías corresponden a que se encuentra la información completa.

Es de importante valor conservar los valores de los registros del 1997 – 1998 así como del 2017 que corresponden al evento del “El Niño”, evento de gran intensidad de lluvia acontecido en Perú y que ha sido denominado por el SENAMHI como “Meganiño”.

En segundo lugar, se realizó la prueba de la calidad de los datos para la eliminación de los dudosos con el método propuesto por el Water Resources Council. Los datos dudosos son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas.

De acuerdo con el Water Resources Council (1981), cuando la asimetría de la estación está entre ± 0.4 , deben aplicarse pruebas para detectar datos dudosos altos y bajos antes de eliminar cualquier dato dudoso del conjunto de datos.

Tabla 12: Resultados de análisis de calidad de datos dudosos pluviométricos

Estaciones	Numero de datos n	Kn	Máximo	Mínimo	Umbral de datos dudosos altos (xH)	Umbral de datos dudosos bajos (xL)	Conclusión
Ayaviri	49	2.760	46.2	11.2	62.9797	10.8677	No existen datos dudosos.
Huancata	39	2.671	48.5	6.9	56.9	6.2	No existen datos dudosos.
Huañec	26	2.50	32.40	7.30	39.2389	8.5451	Presenta datos dudosos.
Huarocharí	22	2.429	38.6	18.6	42.3	15.4	No existen datos dudosos
La Capilla II	22	2.429	9.2	0.0	13.3	0.4	Presenta datos dudosos.
Tanta	26	2.502	69.2	17.3	58.3	15.5	Presenta datos dudosos.
San Pedro de Pílas	33	2.604	44.0	8.7	58.2	6.1	No existen datos dudosos.
San Lázaro de Escomarca	50	2.768	74.0	10.0	79.7	7.2	No existen datos dudosos

En la Tabla 12 se observa los resultados de la prueba de datos dudosos, en el cual en caso exista un valor elevado se verifica por cada estación a qué evento del año corresponden. En ese sentido, del análisis realizado se eliminan el dato de 69.2mm en la estación Tanta correspondiente al 2008, en el cual se evidenció que no corresponde a ningún evento de tormenta de lluvia. Por otro lado, para el objeto del presente estudio, para las estaciones Huañec y La Capilla se decidió conservar los valores que estén por debajo del umbral, ya que no afectará en los resultados para el cálculo de precipitación máxima diaria a diferentes probabilidades de ocurrencia.

4.2.2. Análisis de frecuencias

La estimación de las precipitaciones máximas se realizó a partir de las curvas de frecuencia, empleando el software Hydrognomon, para cada estación, por ello se emplea multitud de funciones estadísticas de distribución, luego se realiza las pruebas de bondad de ajuste para comprobar gráfica y estadísticamente. En el Anexo 3 se adjunta las curvas de distribución que mejor ajuste a nivel gráfico tienen para períodos de retorno de 100 y 500 años.

4.2.3. Prueba de bondad de ajuste

Para la prueba de bondad de ajuste se utilizó la prueba de Smirnov-Kolmogorov con el uso también del software Hydrognomon, el cual consiste en comparar la máxima diferencia entre la función teórica y la distribución empírica. En este proceso de selección es importante complementar con el ajuste visual, ya que a veces los test estadísticos no proporcionan los

mejores ajustes para tiempos de retorno de alta probabilidad, por ello la combinación de los dos métodos proporciona el mejor resultado. A partir de los resultados se realizó la selección de la función de distribución que mejor ajuste gráfico y que sean aceptadas para los diferentes niveles de significancia del 1, 5 y 10 %. El resultado se tiene en las siguientes Tablas 13 hasta la 20.

Tabla 13: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Ayaviri

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.049
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4%	0.061
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.0%	0.080
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.9%	0.080
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	73.5%	0.098
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	52.9%	0.115
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	35.0%	0.133
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.6%	0.147
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.0%	0.150
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.5%	0.187
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.4%	0.187
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	REJECT	REJECT	5.0%	0.194
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	4.2%	0.198
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	3.4%	0.203
Exponential	ACCEPT	REJECT	REJECT	3.4%	0.204
EV2-Max	ACCEPT	REJECT	REJECT	3.4%	0.204

Tabla 14: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Huancata

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.039
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.049
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.050
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.051
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	100.0%	0.052
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9%	0.057
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.062
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.062
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4%	0.064
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.1%	0.075
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.4%	0.086
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.3%	0.096
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.6%	0.097
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.2%	0.130
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	46.9%	0.132
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	46.6%	0.133

Tabla 15: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov - Huañec

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.6%	0.092
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.5%	0.095
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.3%	0.096
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	79.0%	0.120
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.7%	0.124
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74.0%	0.127
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	61.9%	0.141
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	42.7%	0.165
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	42.5%	0.165
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.3%	0.191
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19.9%	0.205
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19.2%	0.206
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19.0%	0.207
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	16.5%	0.213
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	11.5%	0.229
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	11.1%	0.230

Tabla 16: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – Huarochiri

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.076
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.5%	0.077
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4%	0.078
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3%	0.079
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.0%	0.082
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.8%	0.084
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.3%	0.091
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.0%	0.104
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.4%	0.105
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.2%	0.108
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89.4%	0.111
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.5%	0.122
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.0%	0.123
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.4%	0.132
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.3%	0.132
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	45.7%	0.171

Tabla 17: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – La Capilla 2

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	86.5%	0.118
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	85.7%	0.119
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	85.1%	0.120
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.5%	0.123
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.6%	0.127
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	79.9%	0.128
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	79.1%	0.129
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.2%	0.135
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	72.3%	0.139
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	71.7%	0.139
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	68.9%	0.143
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	50.3%	0.168
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	39.1%	0.184
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	30.1%	0.199
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	14.7%	0.237
EV2-Max	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.3%	0.313

Tabla 18: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – Tanta

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9%	0.065
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.8%	0.069
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.072
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.072
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6%	0.072
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.5%	0.073
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4%	0.075
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3%	0.075
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.2%	0.091
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.1%	0.091
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.2%	0.093
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.1%	0.098
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.8%	0.101
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.0%	0.103
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.8%	0.118
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	56.5%	0.148

Tabla 19: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – San Lázaro de Escomarca

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9%	0.053
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4%	0.060
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.1%	0.062
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.9%	0.063
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.5%	0.071
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.0%	0.074
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.3%	0.075
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.4%	0.078
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	79.0%	0.092
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	72.5%	0.098
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	70.2%	0.100
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64.0%	0.105
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	57.8%	0.110
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.7%	0.136
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	30.7%	0.137
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	15.0%	0.161

Tabla 20: Análisis de la bondad del ajuste Kolmogorov-Smirnov – San Pedro de Pilas

Función de Distribución	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Dmax
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.9%	0.085
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.5%	0.086
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.2%	0.086
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.8%	0.089
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.3%	0.090
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.9%	0.090
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89.4%	0.094
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	88.5%	0.096
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	81.4%	0.105
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	76.6%	0.110
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	70.5%	0.117
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	66.4%	0.121
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	56.7%	0.131
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	53.0%	0.135
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	36.7%	0.154
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.8%	0.175

Se realizó la selección para obtener la función de distribución de mejor ajuste, el cual ha sido una importante labor debido a que requiere el realizar correctamente el ajuste visual, por ello la combinación de los dos métodos proporciona el mejor ajuste. Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones analizadas se observan en la Tabla 21.

Tabla 21: Precipitación Máximas Anuales en 24 horas (PMA) para diferentes periodos de recurrencia en cada estación pluviométrica

Estación	Distribución	Período de retorno (años)								
		2	10	25	50	100	200	500	1000	10000
Ayaviri	Gamma	26.7	37.4	41.9	45	47.9	50.7	54.2	56.8	64.7
Huancata	Exponential (L-Moments)	17.5	32.9	41.6	48.2	54.8	61.4	70.1	76.8	98.7
Huañec	Log Pearson III	18.4	26.3	30.9	34.5	38.3	42.4	48.3	53.1	71.7
Huarocharí	Pearson III	25.2	33.6	37.4	40.1	42.7	45.1	48.3	50.6	58.0
La Capilla 2	Log Pearson III	2.3	5.9	8.3	10.4	12.7	15.3	19.2	22.4	35.7
Tanta	Log Pearson III	28.8	38.1	42.6	45.8	49.0	52.2	56.4	59.6	70.7
San Lázaro	Log Pearson III	24	41.8	51.2	58.4	65.8	73.3	83.6	91.6	120.4
San Pedro de Pilas	Pearson III	19.0	33.1	39.7	44.4	49.0	53.4	59.0	63.2	76.8

4.2.4. Tormenta de diseño

A continuación, en las siguientes Figura 15, 16 y 17 se muestran los Hietogramas de lluvia generados para un periodo de recurrencia de 10, 100 y 500 años correspondientemente con una tormenta de lluvia de 24 horas para cada estación.

4.2.5. Distribución espacial de la precipitación

Se realizó la distribución de la precipitación mediante polígonos de Thiessen, donde se observó que la cuenca baja está principalmente influida por la precipitación de la estación de La Capilla II, la cuenca media por la de San Lázaro de Escomarca, San Pedro de Pilas y parte de Huancata, y la cuenca alta por las estaciones de Huarocharí, el resto de Huancata, Huañec, Ayaviri y Tanta.

Para la distribución espacial en cada subcuenca se generó las curvas de isoyetas de las precipitaciones máximas en 24 horas para los diferentes periodos de recurrencia en base a la distribución areal explicada en este apartado. Esto se observa en las figuras 13 y 14.

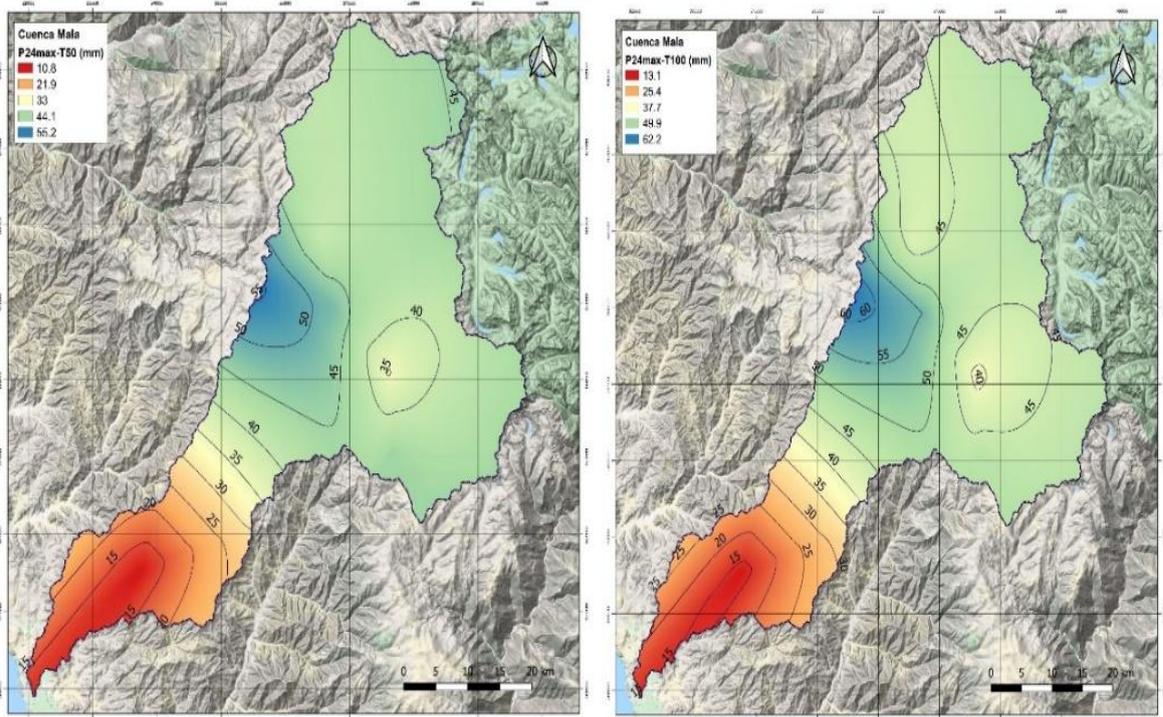


Figura 13: Isoyetas de Pmax 24 horas - T50 y T100

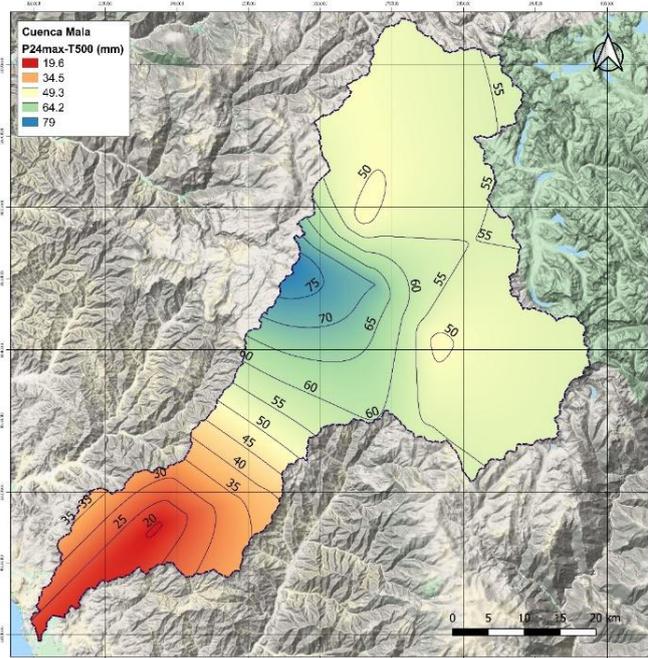


Figura 14: Isoyetas de Pmax 24 horas – T500

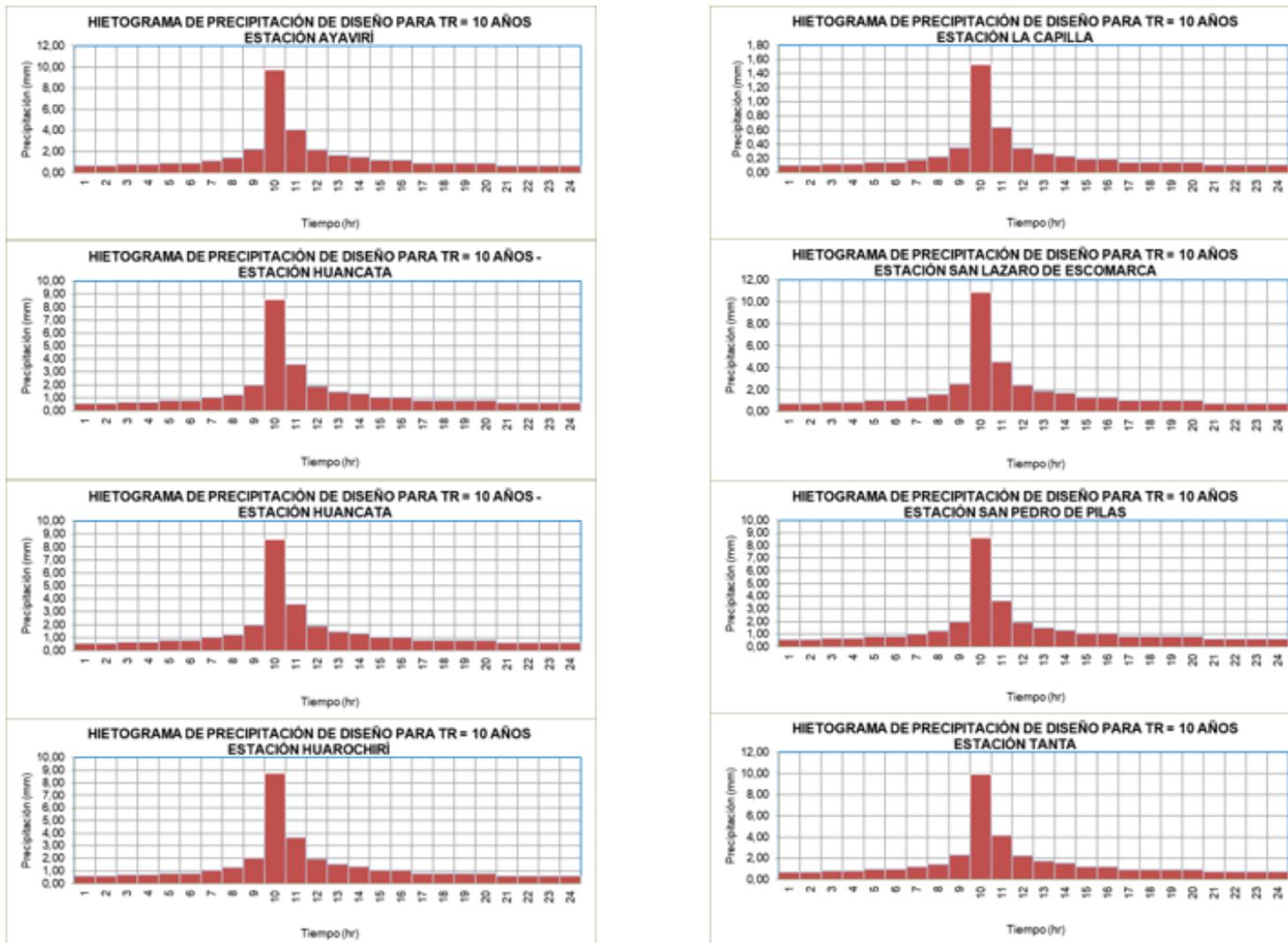


Figura 15: Hietogramas de diseño a Tr=10 años para cada estación

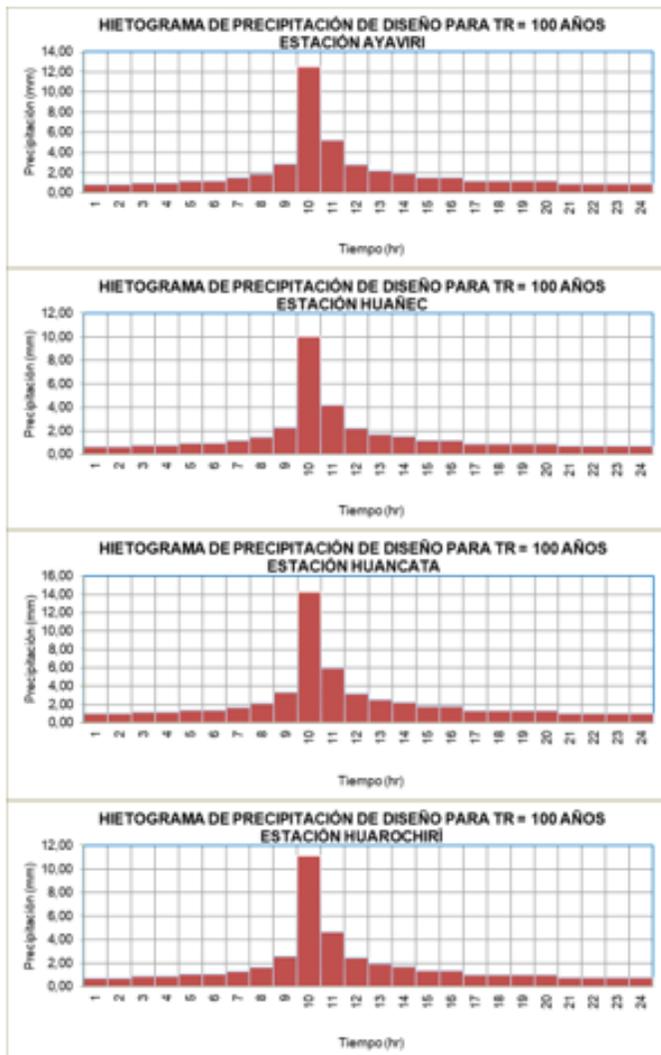


Figura 16: Hietogramas de diseño a Tr=100 años para cada estación

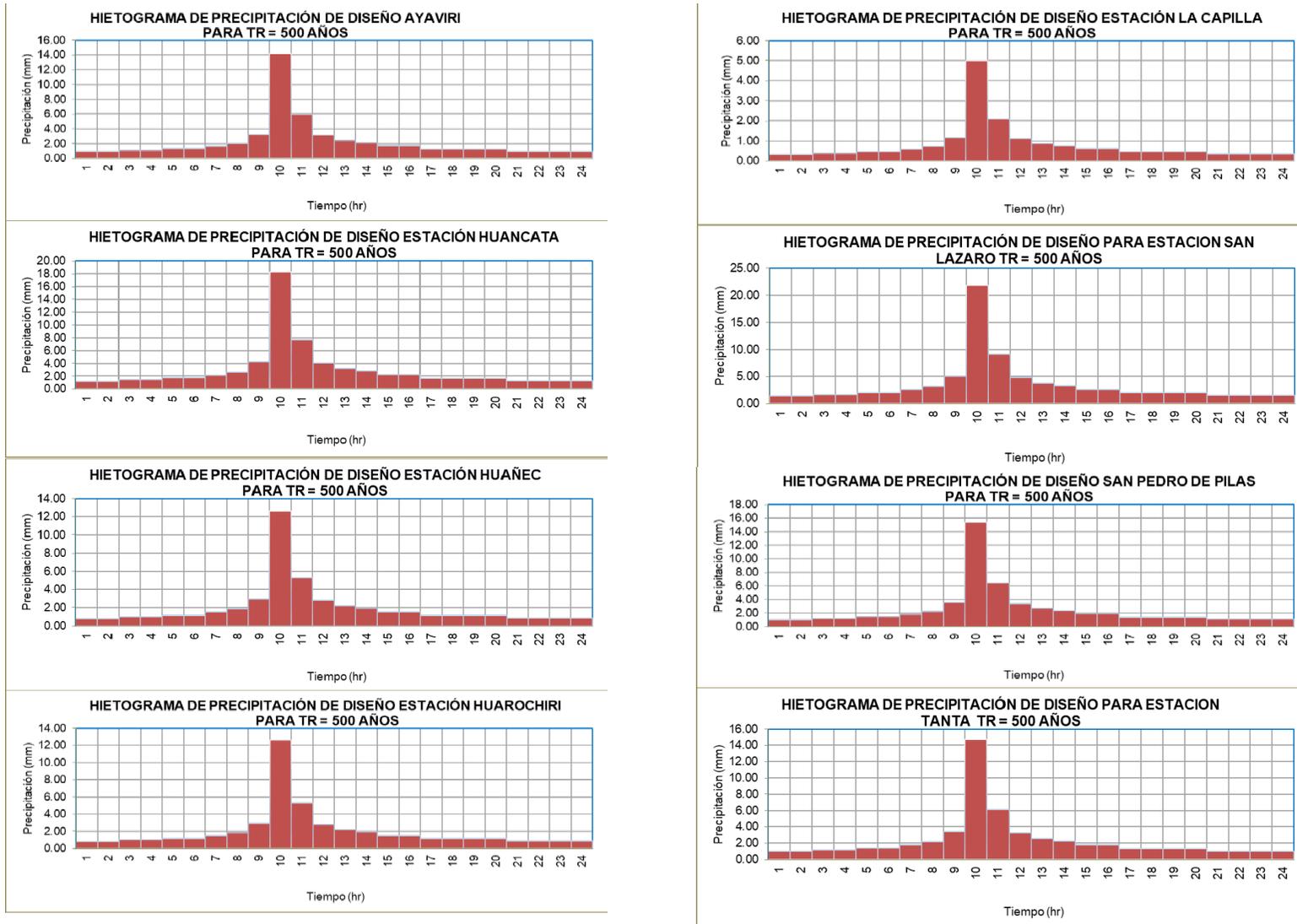


Figura 17: Hietogramas de diseño a Tr=500 años para cada estación

No obstante, para objeto de este estudio se hace uso de la distribución espacial utilizando los polígonos de Thiessen, puesto que esto nos permite hacer la distribución de tormenta en 24 horas para cada subcuenca a partir de asignación de proporcionalidad a los histogramas de cada estación pluviométrica.

4.3. Modelamiento hidrológico situación actual

4.3.1. Datos de entrada

A partir de los elementos hidrológicos identificados en la Cuenca Río Mala, se arma el modelo hidrológico en HEC-HMS. Esta arquitectura del modelo se encuentra definida en el siguiente esquema de la Figura 18 en donde se incluye todos los elementos hidrológicos situación actual.

Los datos de entrada para el modelo hidrológico son los parámetros expuestos en la tabla 22, que han sido calculados en función de las características físicas de las subcuencas, y que se han introducido en el modelo hidrológico para cada una de las unidades definidas en su arquitectura. En el mismo se calculó el tiempo de retardo con dos metodologías California y Kirpich, ambas proporcionan resultados muy similares, pero lo que se ha adoptado el uso de la fórmula de California ya que está adaptada a cuencas montañosas.



Figura 18: Modelo HEC-HMS de la Cuenca del río Mala

Tabla 22: Obtención del tiempo de retardo (Tlag)

Subcuenca	J (m/m)	Tc(h)		Tlag0.6*Tc (min)
	J=(Hmax- Hmin)/Long	California.	Kirpich	
Acacache	0.067	3.29	3.28	118.58
Aguaquiri	0.090	1.84	1.83	66.15
Canyaca y Pacura	0.117	1.55	1.54	55.69
Churchuquia	0.206	0.79	0.79	28.55
Cruz	0.162	1.06	1.05	38.04
De Huito	0.121	1.30	1.29	46.68
Huampara	0.076	3.25	3.24	117.09
Huancani	0.109	1.93	1.93	69.55
Huañec	0.131	1.47	1.47	53.09
Laran	0.148	1.43	1.43	51.59
Mala Alta	0.065	3.05	3.04	109.88
Mala Baja	0.051	3.85	3.84	138.76
Mala Media	0.116	1.76	1.75	63.27
Mala Media-Baja	0.106	1.89	1.88	67.91
Mariatana	0.143	1.49	1.48	53.51
Pacomanta	0.115	1.63	1.62	58.67
Quinches Alto	0.120	1.79	1.79	64.58
Quinches Bajo	0.234	0.81	0.81	29.33
Saraico	0.222	0.60	0.59	21.46
Tantara	0.097	2.25	2.24	81.03
Ululuma	0.260	0.63	0.63	22.82

Para el modelo de tránsito en el cauce se empleó el método hidrológico de Muskingum, en el cual calcula el tránsito de la onda de avenida a partir de características geométricas del cauce. Este método se usa en tramos de pendientes mayores del 2‰, en los que los términos de aceleración local, convectiva y de gradiente de presión, son despreciables frente al efecto de la pendiente del terreno, siendo este método la mejor alternativa, y uno de los más empleados en la mayoría de los modelos hidrológicos. Los valores X, K, y N obtenidos se indican en la Tabla 23.

Tabla 23: Obtención de los parámetros del modelo de propagación

Nodo	Subcuenca	Longitud tramo (m)	Elev.max (msnm)	Elev min. (msnm)	K (Hr)	X	Nº Reaches	
M1	M2	Saraico	5002.0	2894	2645	0.437	0.2	4
M2	M3	Canyaca y Pacura	5969.9	2645	2275	0.461	0.2	2
M3	M4	Churchuquia	5832.2	2275	1960	0.477	0.2	4
M4	M5	Cruz	849.2	1960	1959	0.472	0.2	8
M5	M6	Cruz	9983.6	1959	1569	0.818	0.2	3
M6	M7	Mala Medio	16088.7	1569	1149	1.379	0.2	4
M7	M8	Mala Medio-Bajo	18990.0	1149	643	1.554	0.2	4
M8	M9	De Huito	5292.5	643	518	0.609	0.2	5
M9	M10	Mala Baja	23968.7	518	147	2.292	0.2	3
M10	M11	Mala Baja	12177.0	147	35	1.662	0.2	10

La obtención de los tiempos de simulación requeridos se realizó a partir de iteraciones con el fin obtener los hidrogramas completos en cada uno de los elementos del modelo, así como dotarle de una correcta estabilidad. De las iteraciones realizadas se obtuvo que el tiempo de simulación necesario para simular el hidrograma completo es 48 horas con un intervalo de cálculo en 5 minutos.

4.3.2. Curva numero

Una vez obtenida la zonificación de la clasificación del grupo hidrológico del suelo, y la clasificación de los usos del suelo según el SCS, se han cruzado ambas clasificaciones para obtener el número de curva de la cuenca del Río Mala según el Hydrology National Engineering Handbook (USDA, 2004).

Los números de curva obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 24.

Tabla 24: Valores de número de curva en cada subcuenca

SUBCUENCA	CN (I)	CN (II)	CN (III)
Acacache	41.89	63.19	79.79
Aguaquiri	37.92	59.25	76.98
Canyaca y Pacura	36.73	58.02	76.07
Churchuquia	42.11	63.40	79.93
Cruz	47.04	67.89	82.94
De Huito	54.25	73.85	86.66
Huagnec	40.72	62.06	79.00
Huampara	41.31	62.63	79.40
Huancani	55.25	74.62	87.11
Laran	41.71	63.02	79.67
Mala Alta	38.86	60.21	77.68
Mala Baja	50.21	70.60	84.67
Mala Media-Baja	54.12	73.75	86.60
Mala Medio	50.89	71.16	85.02
Mariatana	48.70	69.33	83.87
Pacomanta	39.83	61.18	78.38
Quinches Alto	41.31	62.63	79.40
Quinches Bajo	48.05	68.77	83.51
Saraico	38.86	60.21	77.68
Tantara	38.48	59.83	77.40
Ululuma	47.25	68.08	83.07

En este ámbito de estudio se propone emplear el Número de Curva tipo II con el fin de considerar unas condiciones medias de humedad previas a los eventos hidrológicos extremos estudiados, y que se observa en la Figura 22.

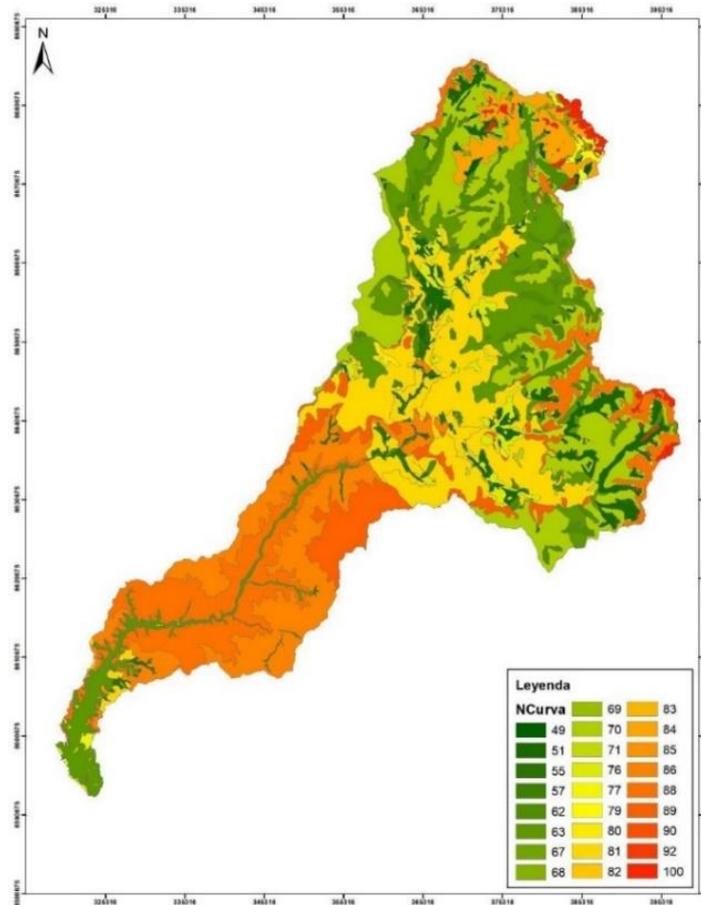


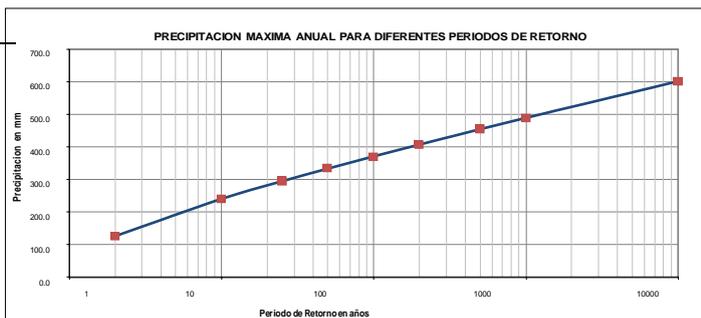
Figura 19: Zonificación del número de curva obtenido para la cuenca del Río Mala

4.3.3. Calibración del modelo

Para la obtención de los caudales máximos se realizó un análisis estadístico empleando distribución de la frecuencia Log Pearson III, ya que es la función que mejor ajusta en la extrapolación de caudales, se obtuvo los siguientes valores para los diferentes tiempos de retorno (Ver Tabla 25).

Tabla 25: Ajuste estadístico de caudal máximo puntual anual para la estación de La Capilla

T (años)	Q _{MAX} m ³ /s
2	105.7
10	219.5
25	293.9
50	357.4
100	428.2
200	507.3
500	626.1
1000	728.2
10000	1158.8



Para la cuenca, los parámetros de calibración han sido el tiempo de retardo (Tlag), las abstracciones iniciales, y el parámetro temporal K del modelo de Muskingum. La calibración fue proceso iterativo de ajuste de estos parámetros de forma que los caudales simulados coincidieran con los caudales registrados en la estación hidrométrica de La Capilla.

Bajo el marco del proyecto del Plan de Control de Inundaciones, y de los resultados obtenidos en las iteraciones, se obtuvo una desviación menor al 2%, de lo observado en la estación La Capilla en comparación con lo simulado por las precipitaciones máximas diarias del modelo HEC-HMS. En las tablas 27 y 28 se tienen los resultados del ajuste de los parámetros en la calibración y verificación del modelo hidrológico.

Tabla 26: Calibración de los parámetros hidrológicos de las subcuencas

Parámetros Subcuenca	Inicial			Calibrado		
	Tlag SCS (min)	Ia	NC	Tlag SCS (min)	Ia	NC
Acacache	118.58	0	63.2	118.6	4.1	65.5
Aguaquiri	66.15	0	59.3	66.1	4.1	61.4
Canyaca y Pacura	55.69	0	58	55.7	4.1	60.1
Churchuquia	28.55	0	63.4	28.6	4.1	65.7
Cruz	38.04	0	67.9	38	4.1	70.3
De Huito	46.68	0	73.9	46.7	4.1	76.5
Huampara	117.09	0	62.6	117.1	4.1	64.9
Huancani	69.55	0	74.6	69.5	4.1	77.3
Huañec	53.09	0	62.1	53.1	4.1	64.3
Laran	51.59	0	63	51.6	4.1	65.3
Mala Alta	109.88	0	60.2	109.9	4.1	62.4
Mala Baja	138.76	0	70.6	138.8	4.1	73.2
Mala Media	63.27	0	71.2	63.3	4.1	73.7
Mala Media-Baja	67.91	0	73.8	67.9	4.1	76.4
Mariatana	53.51	0	69.3	53.5	4.1	71.8
Pacomanta	58.67	0	61.2	58.7	4.1	63.4
Quinches Alto	64.58	0	62.6	64.6	4.1	64.9
Quinches Bajo	29.33	0	68.8	29.3	4.1	71.3
Saraico	21.46	0	60.2	21.5	4.1	62.4
Tantara	81.03	0	59.8	81	4.1	62
Ululuma	22.82	0	68.1	22.8	4.1	70.5

Tabla 27: Calibración de los parámetros hidrológicos del cauce

Parámetros			Inicial			Calibrado		
Nodo	Subcuenca		K (Hr)	X	N	K (Hr)	X	N
M1	M2	Saraico	0.437	0.2	4	0.656	0.2	4
M2	M3	Canyaca y Pacura	0.461	0.2	2	0.692	0.2	2
M3	M4	Churchuquia	0.477	0.2	4	0.716	0.2	4
M4	M5	Cruz	0.472	0.2	8	0.708	0.2	8
M5	M6	Cruz	0.818	0.2	3	1.227	0.2	3
M6	M7	Mala Medio	1.379	0.2	4	2.069	0.2	4
M7	M8	Mala Medio-Bajo	1.554	0.2	4	2.331	0.2	4
M8	M9	De Huito	0.609	0.2	5	0.914	0.2	5
M9	M10	Mala Baja	2.292	0.2	3	3.438	0.2	3
M10	DES	Mala Baja	1.662	0.2	10	2.493	0.2	10
Q1	Q2	Ululuma	0.411	0.2	5	0.617	0.2	5
Q2	M6	Quinches Bajo	0.461	0.2	3	0.692	0.2	3

La calibración conseguida para los tiempos de retorno de 10, 100 y 500 años, según la probabilidad de ocurrencia establecida asociados a un peligro alto, medio y bajo de inundaciones, se expresa en la siguiente Tabla 28.

Tabla 28: Resultados de la calibración del modelo

Caudal (m3/s)	Período de retorno (años)		
	10	100	500
Observado (estación La Capilla)	219.9	428.2	626.1
Simulado (modelo HEC-HMS)	224.1	433.2	628.4
Desviación	1.91%	1.82%	0.21%

4.3.4. Caudales máximos

Luego de simular los eventos hidrológicos máximos asociados a un periodo de retorno de 10, 100, 500 años, se obtuvo el caudal instantáneo en cada uno de los elementos conceptuales del modelo hidrológico, tales como subcuencas, nudos y tramos o junction, teniendo en cuenta los procesos de generación de esorrentía y tránsito de hidrogramas. A continuación, se muestra a modo de resumen, los hidrogramas generados en la desembocadura del río Mala para los periodos de retorno de 100 y 500 años. Como se observa en la Figura 20 el caudal pico en la desembocadura para T100 de 433.2 m³. s-1 y en la Figura 21 para T500 es de 628.4 m³.s-1.

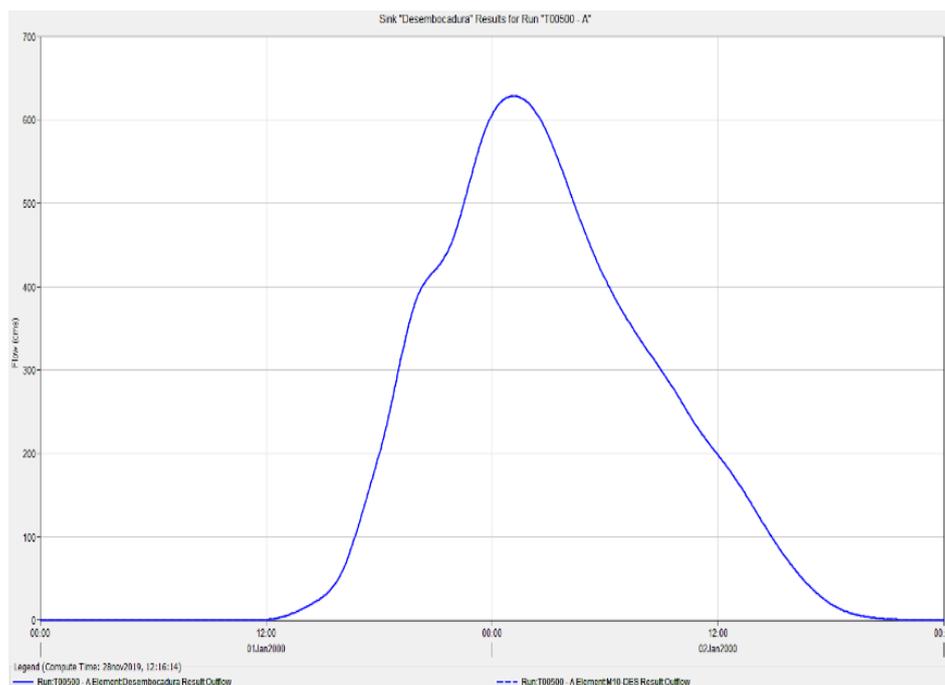


Figura 20: Hidrogramas del modelo para T 500 años - Desembocadura

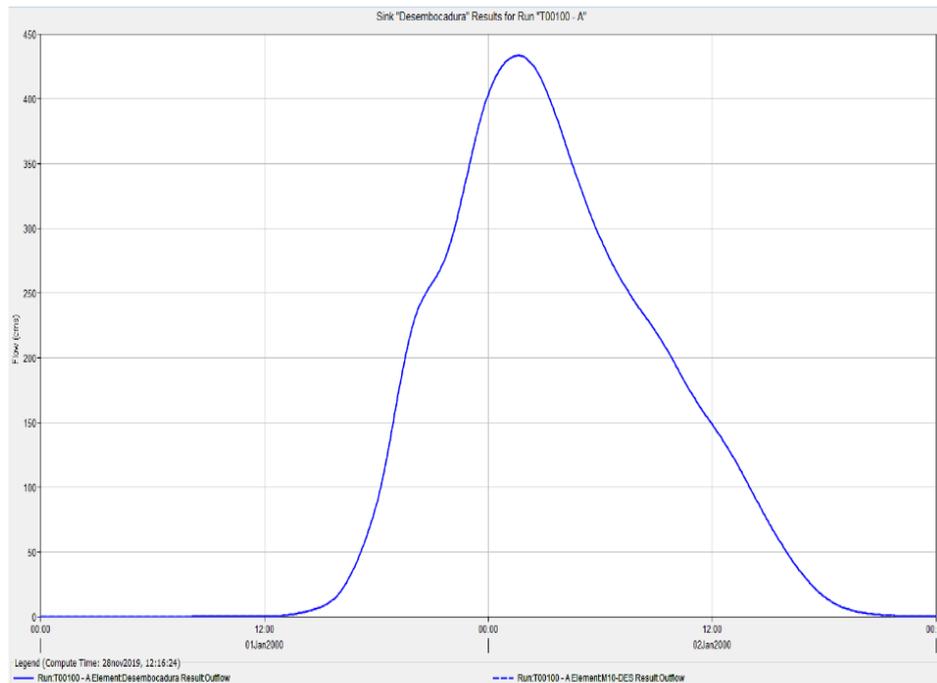


Figura 21: Hidrogramas del modelo para T 100 años - Desembocadura

La magnitud de los caudales máximos en cada uno de los elementos conceptuales del modelo hidrológico para los tiempos de retorno simulados se dispone a continuación en la Tabla 29.

Tabla 29: Resultados de caudales máximos para elementos HEC-HMS

TR /Q (m3/s)	T100	T500	TR /Q (m3/s)	T100	T500
ACACACHE	87.6	115	M1	76.9	99.4
AGUAQUIRI	28.9	37.5	M1-M2	76.1	98.4
CANYACA Y PACURA	21.2	28.1	M10	435.4	631.1
CHURCHUQUIA	24.5	39.3	M10-DES	433.2	628.4
CRUZ	45.9	73.2	M2	166.2	216.6
DE HUITO	2.4	8.6	M2-M3	164.2	213.9
DESEMBOCADURA	433.2	628.4	M3	217.8	288.3
HUAGNEC	26.5	42.3	M3-M4	215.7	285.7
HUAMPARA	100.8	134.8	M4	239	321.2
HUANCANI	16.1	79.7	M4-M5	237.2	318.8
LARAN	38.3	62.1	M5	251.6	341.1
MALA ALTA	52.5	67.9	M5-M6	248.8	337.6
MALA BAJA	4.2	14.4	M6	366	506.2
MALA MEDIA-BAJA	31.1	55.8	M6-M7	363.6	504.1
MALA MEDIO	119.3	175.7	M7	423.9	592.5
MARIATANA	99.9	153.9	M7-M8	421.1	590.6
PACOMANTA	36.2	56.4	M8	435.7	625.1
QUINCHES ALTO	39.8	62.9	M8-M9	434.8	624.5
QUINCHES BAJO	23.7	38.1	M9	436	627.4
SARAICO	8.2	10.6	M9-M10	432.8	624.4
TANTARA	61.3	86.9	Q1	65.7	104.2
ULULUMA	10	16.2	Q1-Q2	64.4	102
			Q2	165.3	236.9
			Q2-M6	163.1	233.9

4.4. Modelamiento hidrológico con estructuras de laminación

4.4.1. Ubicación de embalses para laminación

Luego del análisis y las consideraciones tenidas en el ítem 3.3.3.1., se selecciona la ubicación de las cinco (05) diques de retención preseleccionadas sobre el cauce del río Mala que son el objeto del estudio de alternativas, en la siguiente Figura 24 se observa la ubicación de la E.L-1, E.L-2, E.L-3, E.L-4 y E.L-5.

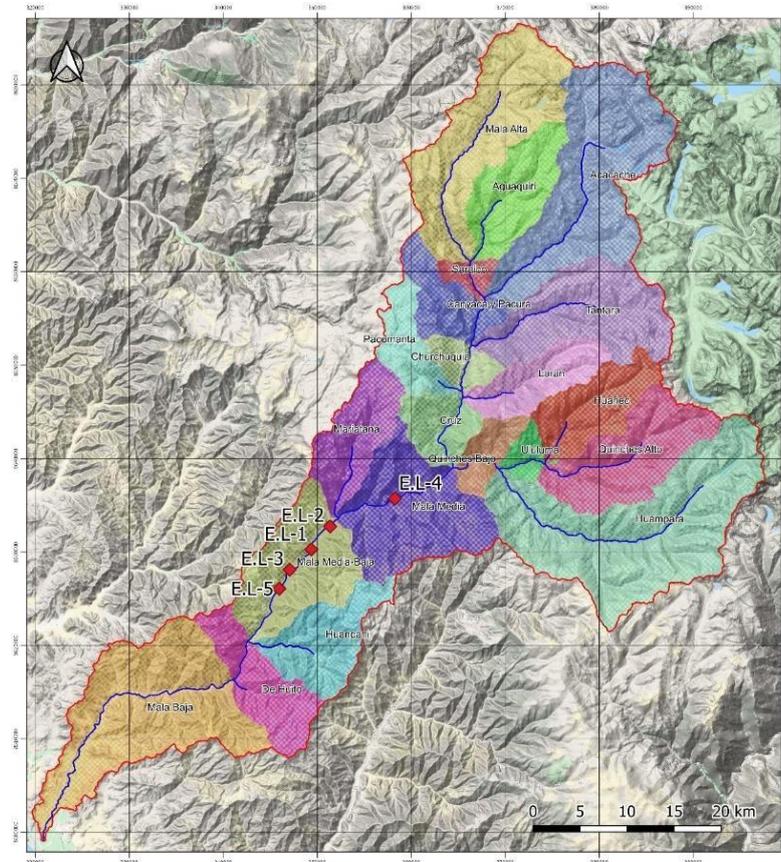


Figura 22: Ubicación de las estructuras de laminación preseleccionadas

A partir de ello, se generó alternativas de solución según la ubicación de embalses. La combinación más adecuada desde el punto de vista hidrológico se encuentra expuestos en la Tabla 30.

Tabla 30: Síntesis de las alternativas de laminación planteadas

Alternativa	N.º de estructuras	Ubicación de la presa	Altura de coronación (m.)
A0	1	EL-4	50
A1	1	EL-4	45
A2	2	EL-4	45
A3	3	EL-2	35
		EL-4	30
		EL-1	30
A4	4	EL-4	30
		EL-3	30
		EL-2	30
		EL-1	30
A5	3	EL-4	35
		EL-2	35
		EL-1	35
A6	4	EL-4	35
		EL-3	35
		EL-2	35
		EL-1	35
A7	2	EL-4	40
		EL-4	40

Para el desarrollo de la laminación en HEC-HMS se insertan las estructuras de laminación en el modelo hidrológico (ver Figura 23), de igual forma se hace para cada alternativa.

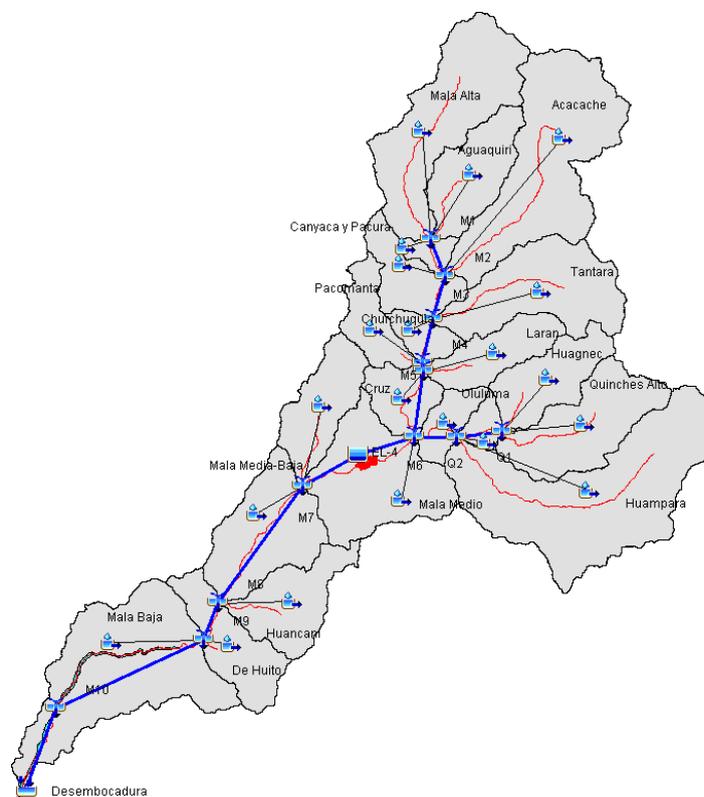


Figura 23: Modelo hidrológico HMS con Alternativa N°1

4.4.2. Vaso de laminación

Para la modelización de las diferentes alternativas de laminación, se consideró un rango de altura de coronación de 30 a 45 metros, para una avenida equivalente a 500 años de periodo de retorno, donde los órganos de desagüe de fondo se han ajustado de tal forma que el vaso de la estructura de laminación sea capaz de agotar toda la altura de la estructura sin necesidad de verter ni una sola gota por coronación.

En las siguientes figuras se observan los diferentes vasos de laminación para los cinco puntos de ubicación en donde se emplazarían las estructuras de laminación (Ver Figura 24).

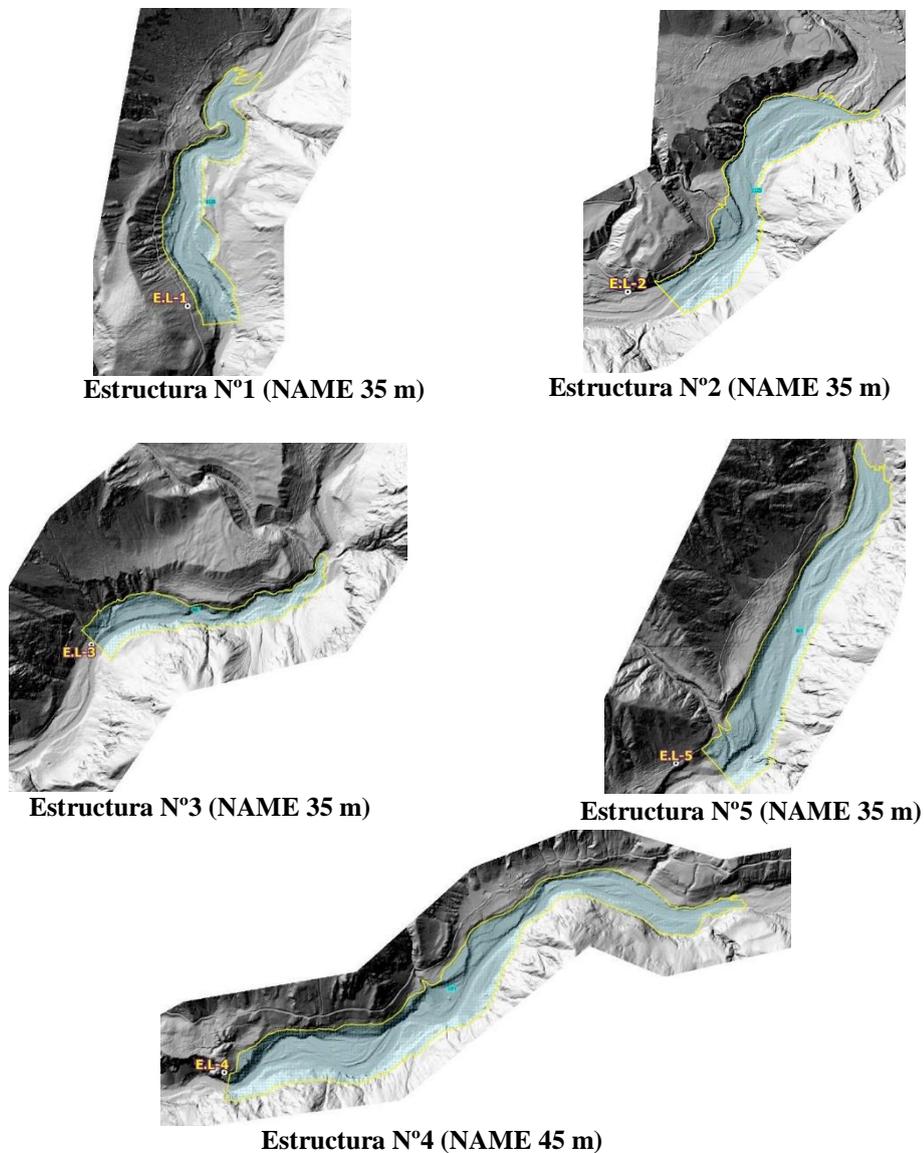


Figura 24: Vista de planta del área de vaso almacenamiento de las estructuras

4.4.3. Curvas característica cota / volumen

A partir del Modelo Digital del Terreno derivado del levantamiento LIDAR y mediante el apoyo de herramientas GIS (QGIS), se obtuvo las curvas hipsométricas para cada una de las estructuras de laminación consideradas. Dichas curvas representan una relación superficie acumulada por cada cota que se eleva sobre el lecho del cuerpo de la estructura. En la Figura 25 se observan las curvas del embalse que relaciona el volumen con la cota del nivel de agua.

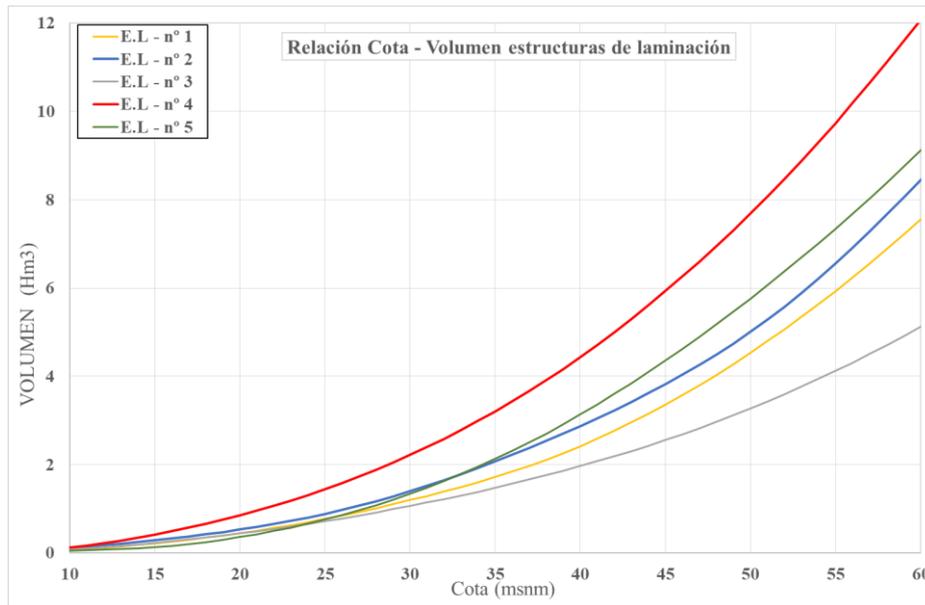


Figura 25: Relación cota / volumen de las estructuras de laminación

Las curvas cota / área son las relaciones que integran el modelo del almacenamiento de los reservorios dentro del modelo hidrológico semi-distribuido construido en HEC-HMS mediante la aproximación del Modelo modificado de Plus. En la Tabla 31 se tienen los valores de la curva cota/volumen para las cinco estructuras de laminación.

Tabla 31: Relación cota / volumen de las estructuras de laminación

Cota (m)	V (Hm3)				
	E.L n° 1	E.L n° 2	E.L n° 3	E.L n° 4	E.L n° 5
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
15	0.2	0.3	0.2	0.4	0.1
20	0.5	0.5	0.4	0.8	0.4
25	0.8	0.9	0.7	1.4	0.8
30	1.2	1.4	1.1	2.2	1.3
35	1.7	2.1	1.5	3.2	2.1
40	2.4	2.9	2.0	4.4	3.1
45	3.4	3.8	2.6	5.9	4.4
50	4.5	5.0	3.3	7.7	5.8

4.4.4. Estructuras de descarga

Para el presente estudio se consideró el vertimiento como orificios de descarga, en donde se asumió la hipótesis de sumergencia total de los órganos de desagüe desde el inicio de la avenida. Asimismo, se tomó en cuenta una sección hidráulica equivalente a las dimensiones de la descarga y un coeficiente de descarga adimensional que engloba las pérdidas de energía a la entrada y salida, así como las pérdidas que se producen a lo largo de dichas estructuras de desagüe.

Al respecto, no fue necesario modelizar aliviaderos de superficie, ya que el dimensionamiento de las estructuras de desagüe evita superar el nivel de coronación de la estructura y, por ende, no se producirá sobrevertido para el caudal de diseño. De esta forma, bajo la hipótesis de descarga a través de un orificio, el modelo establece una apertura de cada una de las galerías de descarga de 9.33 m², por lo que la sección hidráulica equivalente ascendería a 18.66 m².

Estas dimensiones definirían dos galerías (orificios) de una dimensión mínima de la citada sección hidráulica, lo cual sería equivalente a dos galerías de 2.5 metros de ancho por 3.73 metros de anchura (Ver Figura 26).

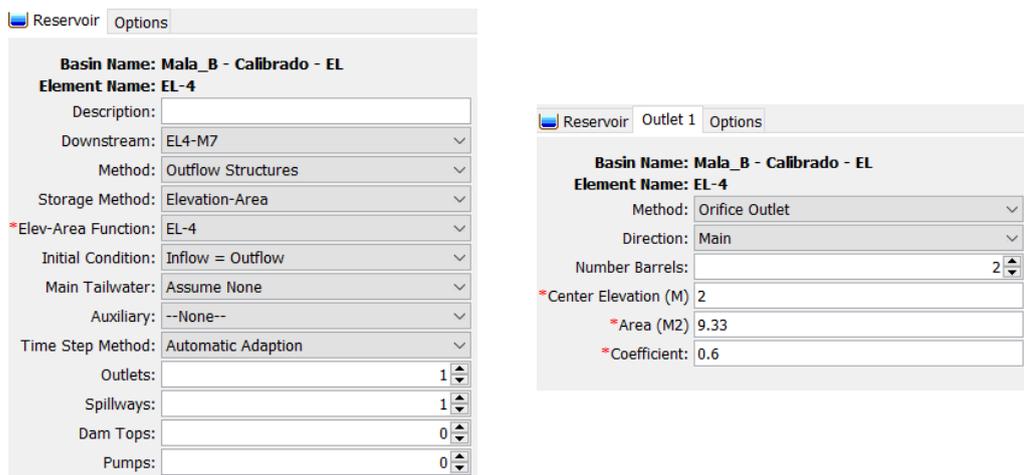


Figura 26: Definición de los órganos de desagüe en el modelo de almacenamiento del modelo HMS para la Alternativa N° 1

4.4.5. Simulación de tránsito de avenidas para cada alternativa

Se realizó la simulación en HEC-HMS incluyendo las estructuras de laminación, en el cual se consideró lo siguiente:

- Ubicación de la estructura de laminación. Cada ubicación de la presa tiene una relación cota / área, la cual modeliza el almacenamiento que se produce en el vaso de la presa;
- Nivel máximo de aguas extraordinarias (NAME). Coincide con la cota máxima de coronación de cada uno de los escenarios planteados para cada ubicación de las presas;
- Sección hidráulica de los órganos de desagüe (A_H). Define las dimensiones de cada una de las dos galerías de desagüe modelizadas al pie de la estructura requeridas para conseguir agotar la altura de la estructura planteada;
- Caudal máximo de entrada en la estructura de laminación (Q_{MAX-IN}). Refleja el máximo caudal que entra a la estructura de regulación, siendo en régimen natural cuando no existen estructuras de laminación aguas arriba, o en régimen alterado, cuando existen estructuras en serie;
- Caudal máximo de salida en la estructura de laminación ($Q_{MAX-OUT}$). Define el caudal de salida laminado a través de los órganos de desagüe de fondo de la estructura y por ende la magnitud del caudal laminado;
- Porcentaje de laminación de la estructura. Representa la relación entre el caudal laminado de salida a través de los órganos de desagüe respecto al caudal máximo de entrada en dicha estructura. Indica la eficacia en la laminación de cada una de las estructuras planteadas.

De esta forma, en el modelo HEC-HMS se insertó las características de cada alternativa de solución, tal como se observa en la Figura 27.

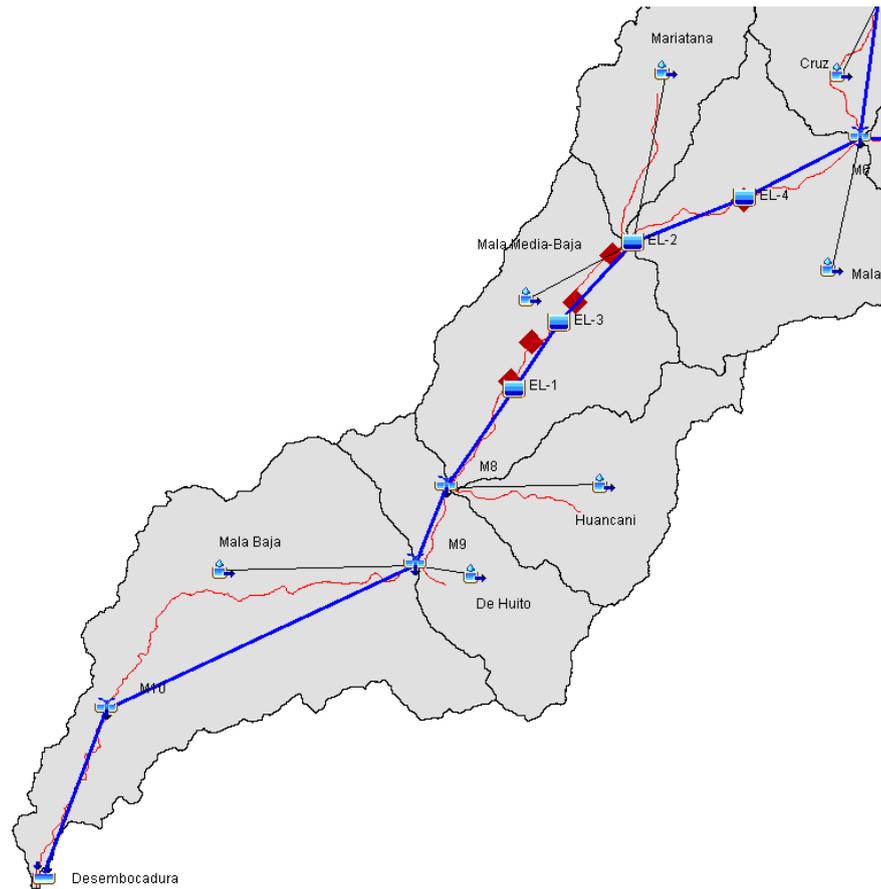


Figura 27: Modelo HEC-HMS incluyendo las estructuras de laminación en la Cuenca del río Mala

Del modelamiento de avenidas con los embalses se tienen los resultados de la simulación para las siete alternativas propuestas, en las tablas 32 hasta 39.

Tabla 32: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 0

ALTERNATIVA N°0					
Presas	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4	50	545.7	273.5	50.1	7.43

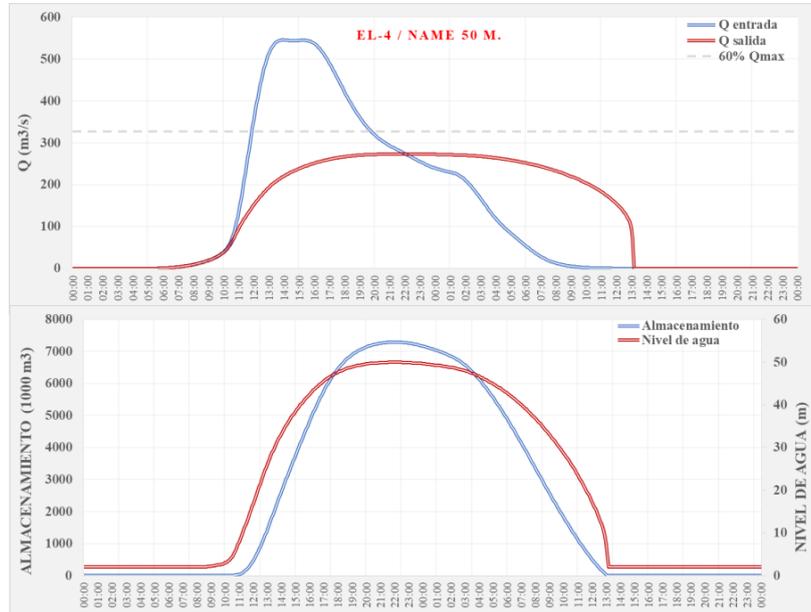


Tabla 33: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 1

ALTERNATIVA N° 1					
Presas	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4	45	545.7	325.1	59.6	9.33

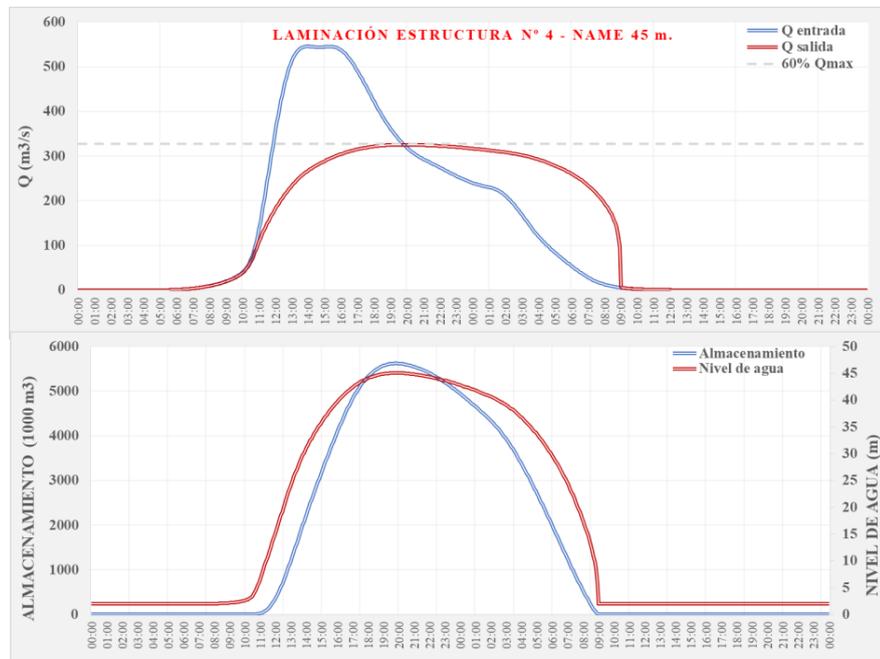
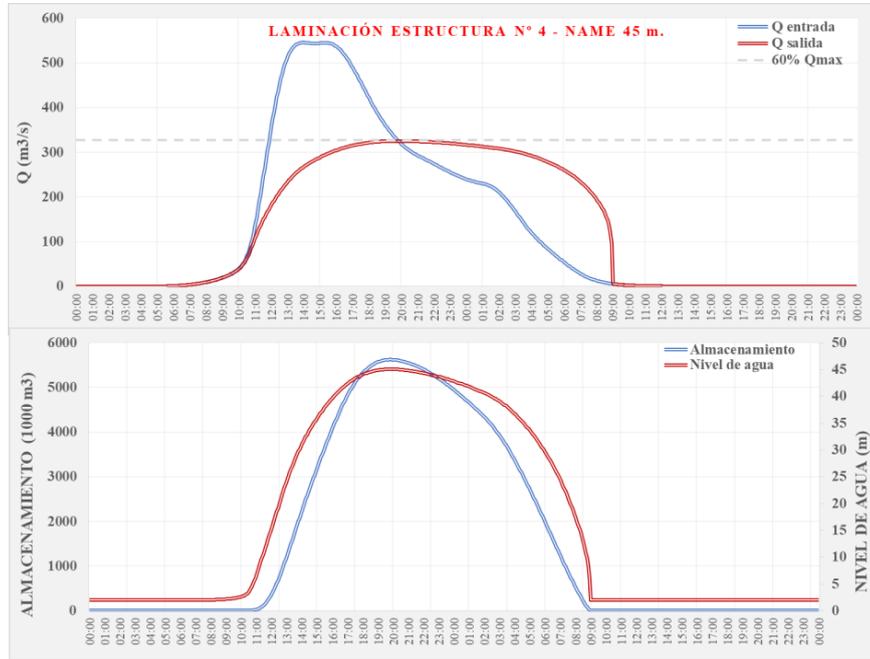


Tabla 34: Resultados HEC-HMS Alternativa N° 02

ALTERNATIVA N° 2					
Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4	45	545.7	325.1	59.6	9.33



Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-2	35	367.8	342.3	93.1	11.22

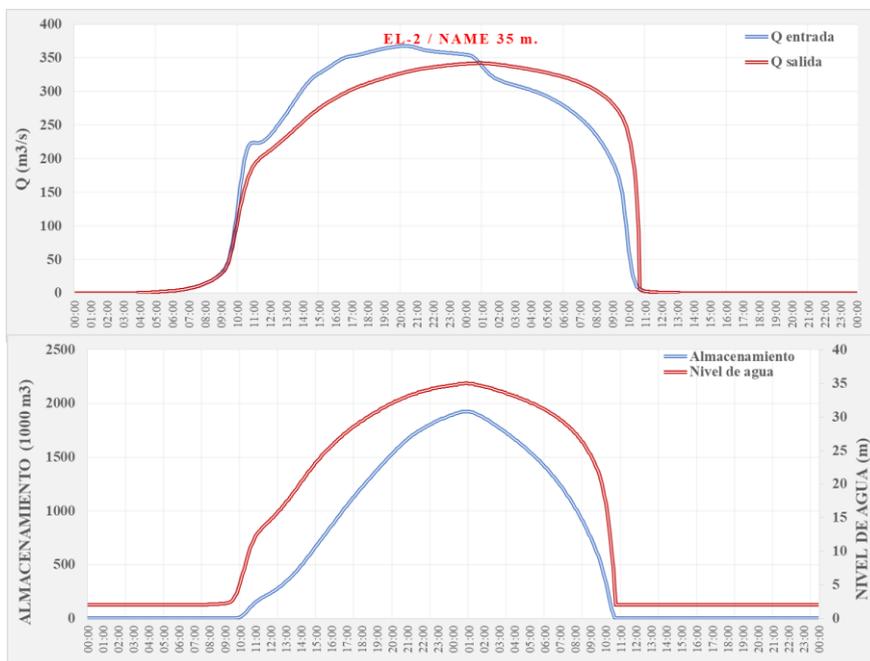
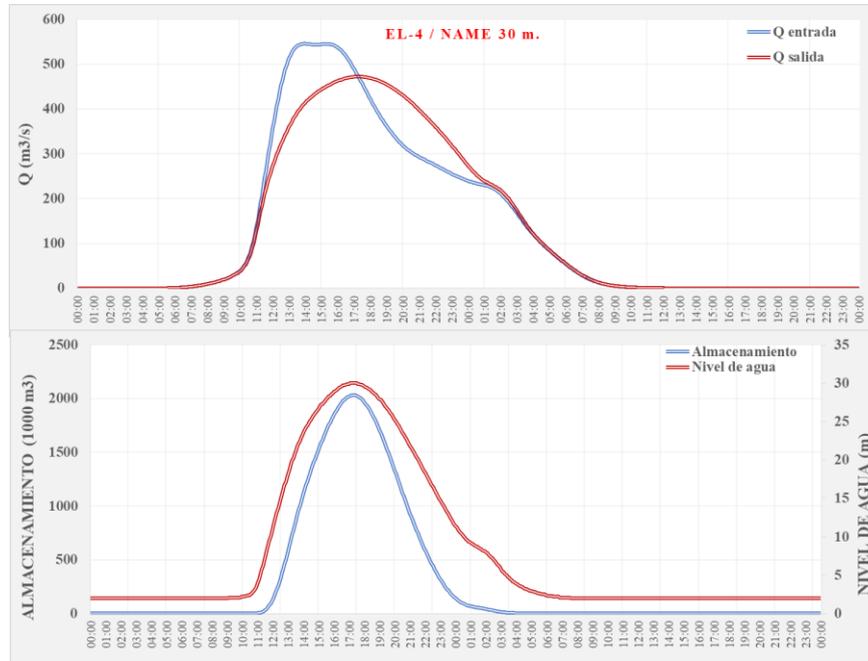
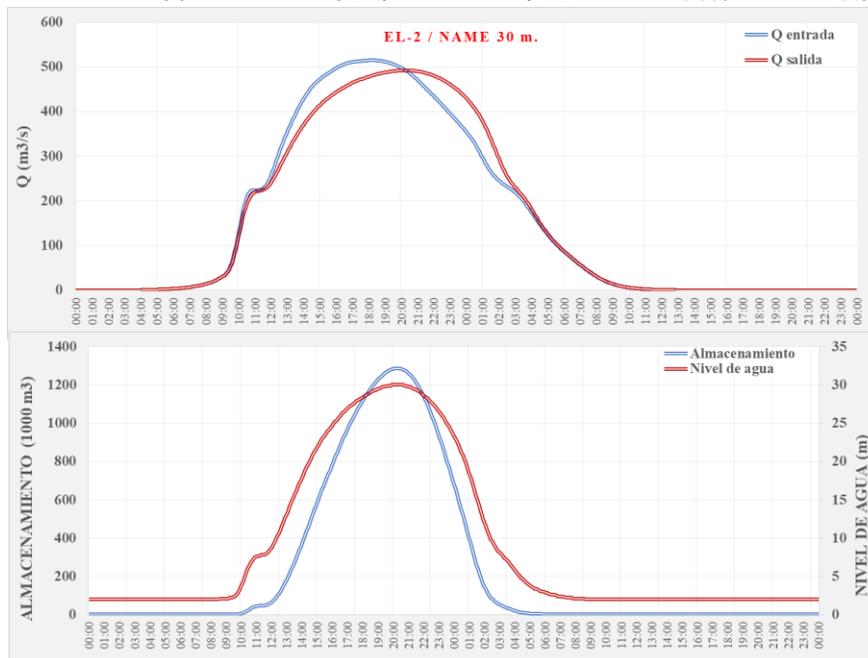


Tabla 35: Resultados HEC-HMS Alternativa N°03

ALTERNATIVA N° 3					
Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	ΔH (m)
EL-4	30	545.7	472.4	86.6	16.8



Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	ΔH (m)
EL-2	30	514.9	492.2	95.6	17.50



ALTERNATIVA N° 3

Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	ΔH (m)
EL-1	30	491.9	477.7	97.1	17

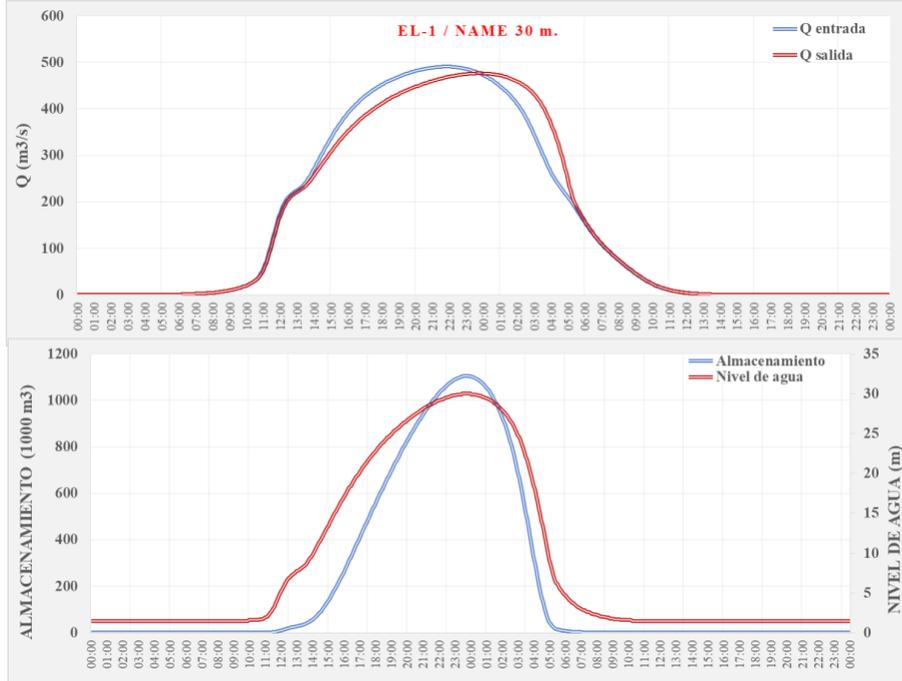
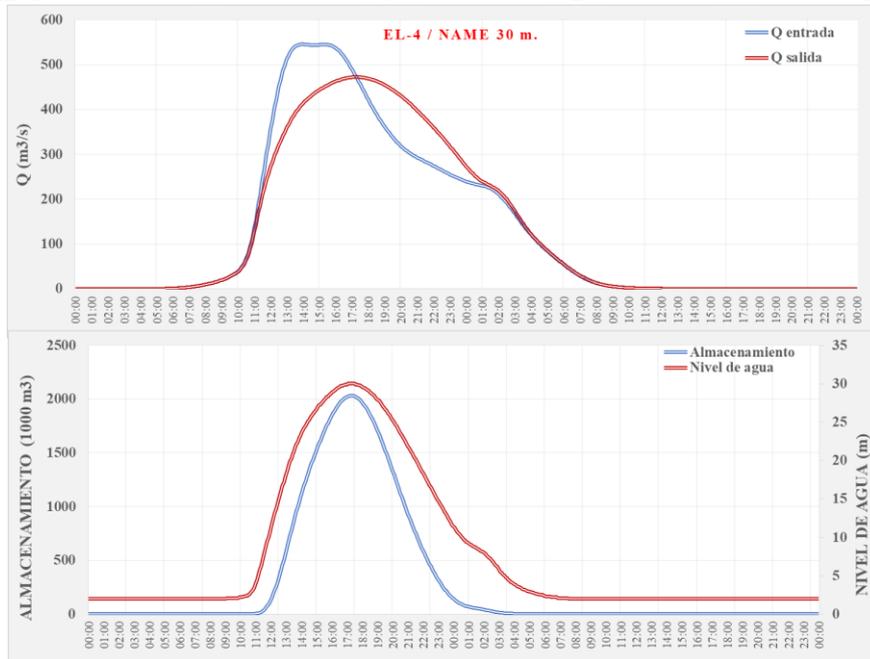


Tabla 36: Resultados HEC-HMS Alternativa N°04

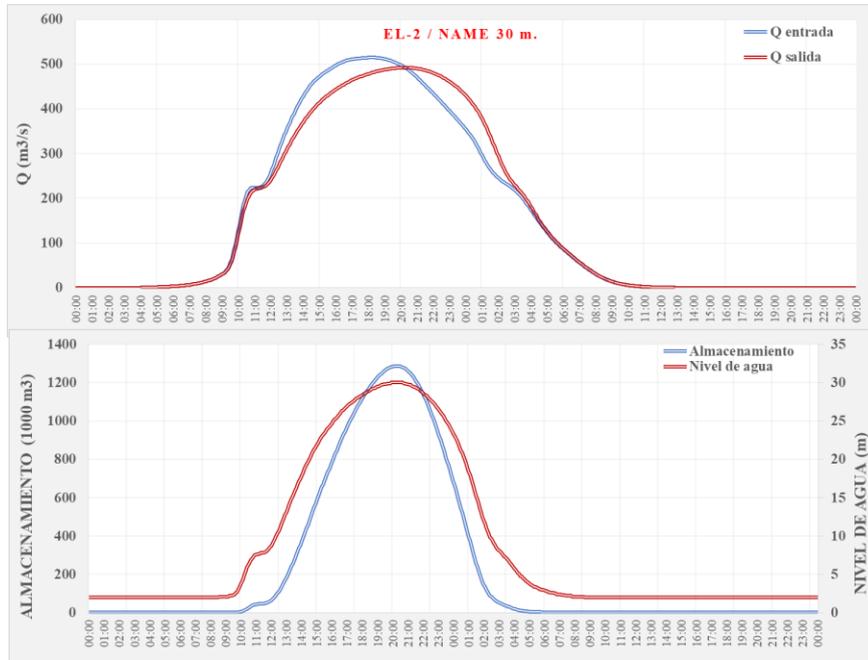
ALTERNATIVA N° 4

Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	ΔH (m)
EL-4	30	545.7	472.4	86.6	16.8

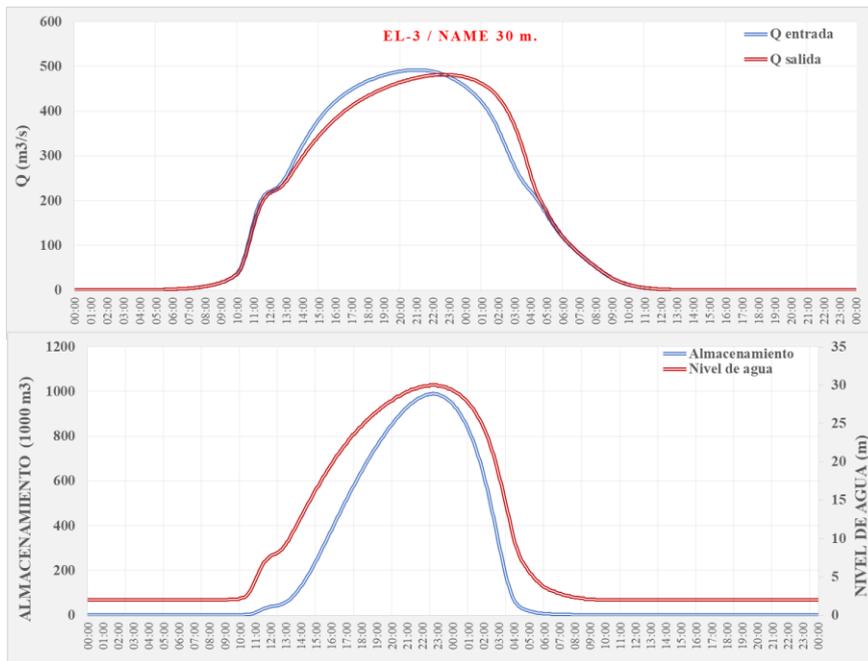


ALTERNATIVA N° 4

Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-2	30	514.9	492.2	95.6	17.50



Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-3	30	492	481.5	97.9	17.13



ALTERNATIVA N° 4					
Presas	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-1	30	481.3	468.5	97.3	16.65

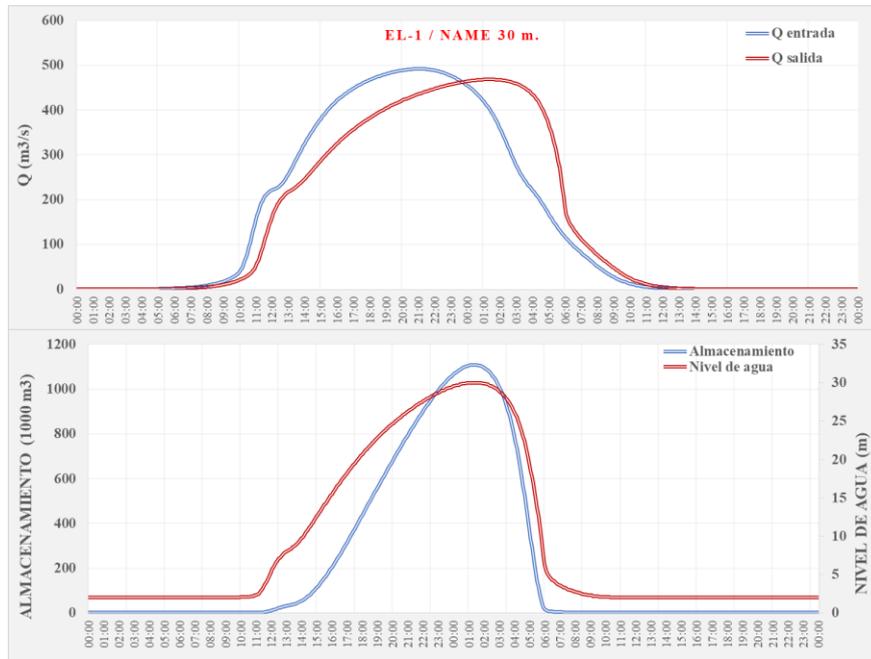
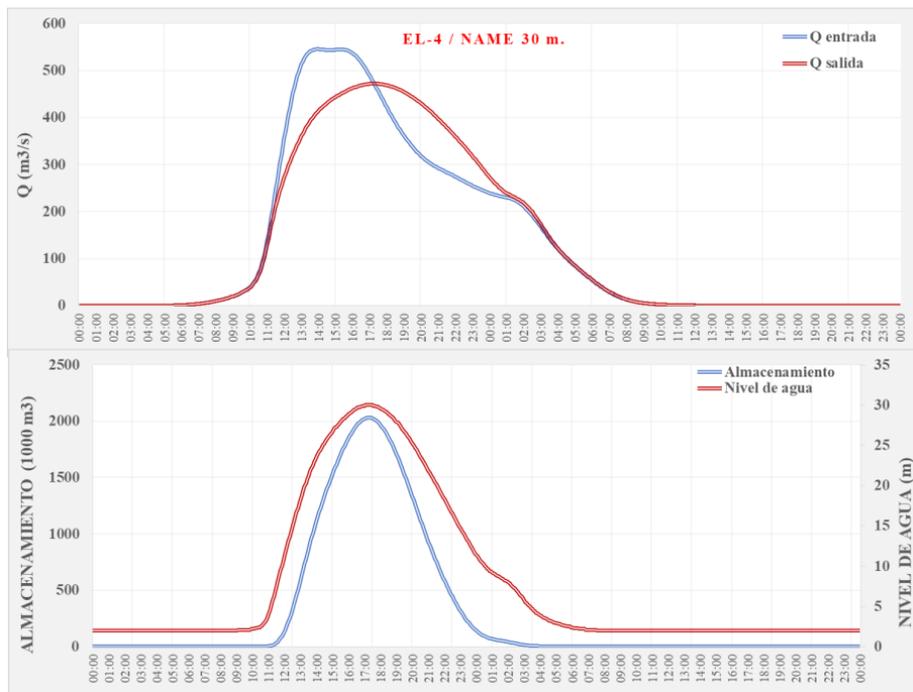


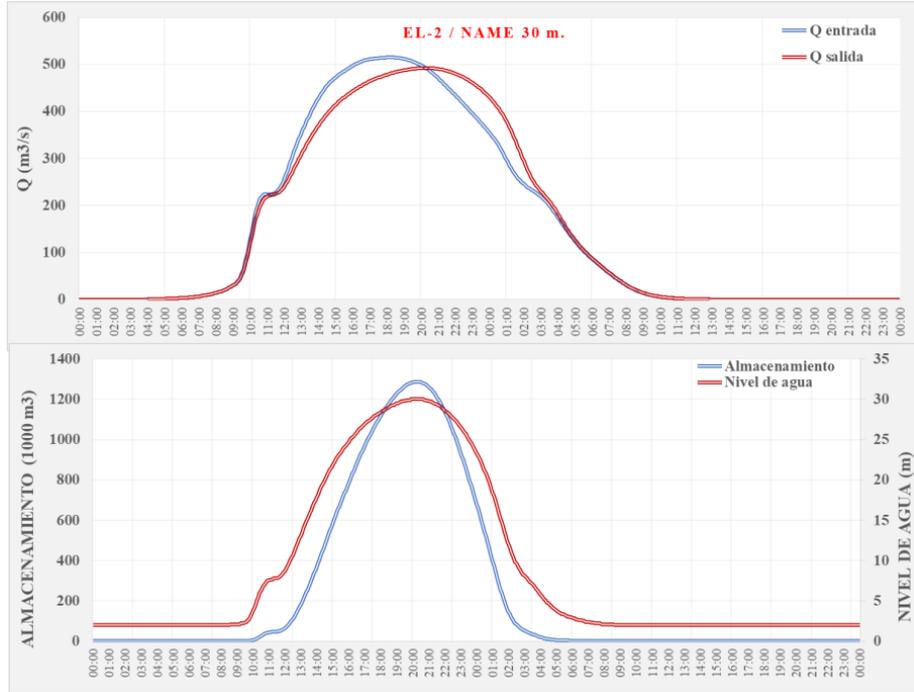
Tabla 37: Resultados HEC-HMS Alternativa N°05

ALTERNATIVA N° 5					
Presas	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4	35	545.7	430.4	86.6	14.1



ALTERNATIVA N° 5

Presa	NAME (m)	Q _{max} In	Q _{max} out	% lam.	A _H (m)
EL-2	35	472.8	437.9	92.6	14.35



Presa	NAME (m)	Q _{max} In	Q _{max} out	% lam.	A _H (m)
EL-1	35	437.7	420.6	96.1	13.78

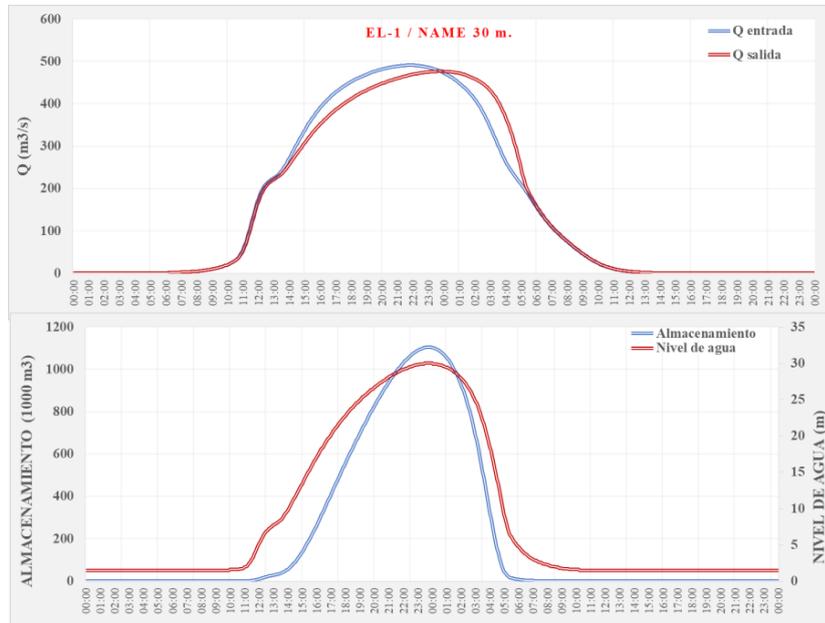
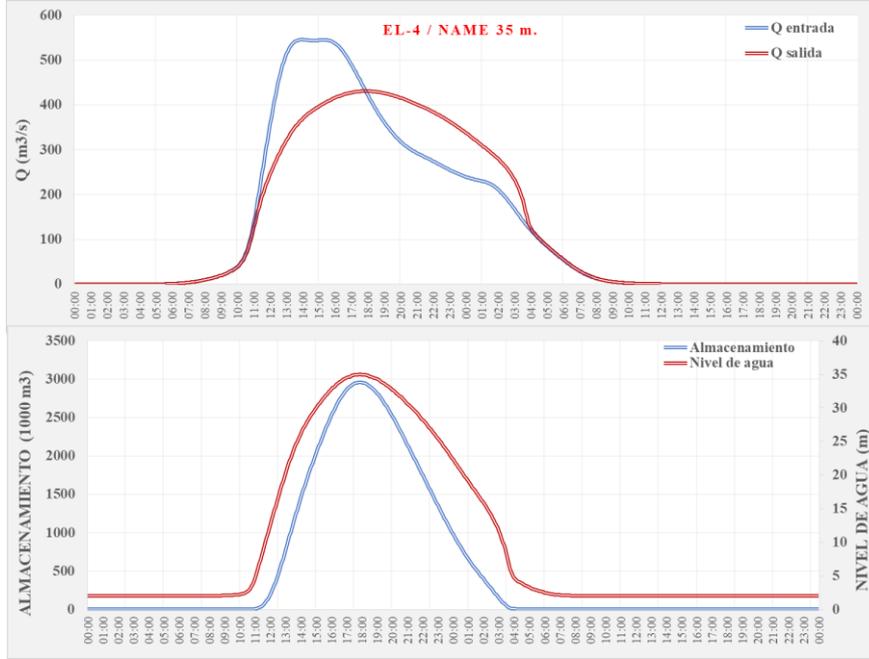
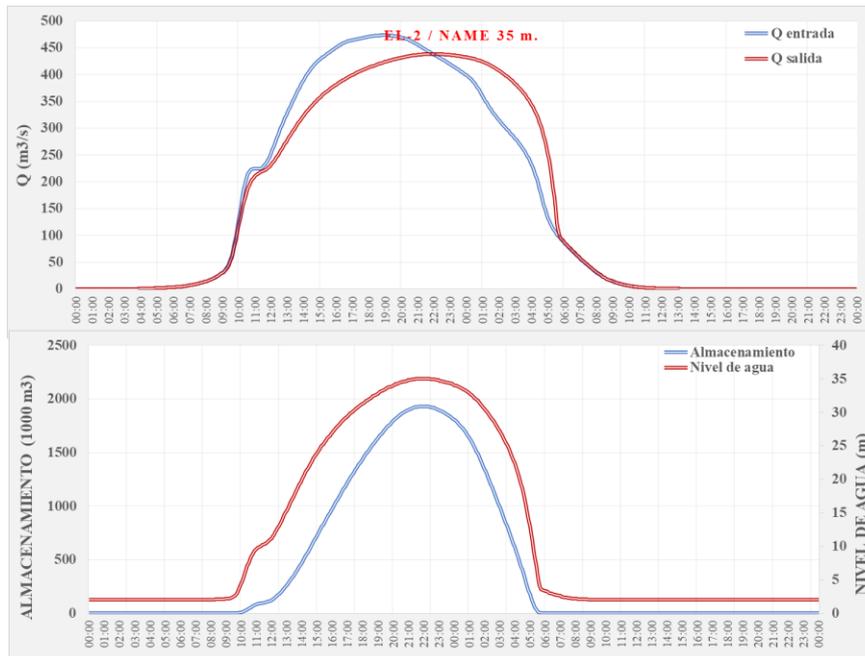


Tabla 38: Resultados HEC-HMS Alternativa N°06

ALTERNATIVA N° 6					
Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4	35	545.7	430.8	78.9	14.12

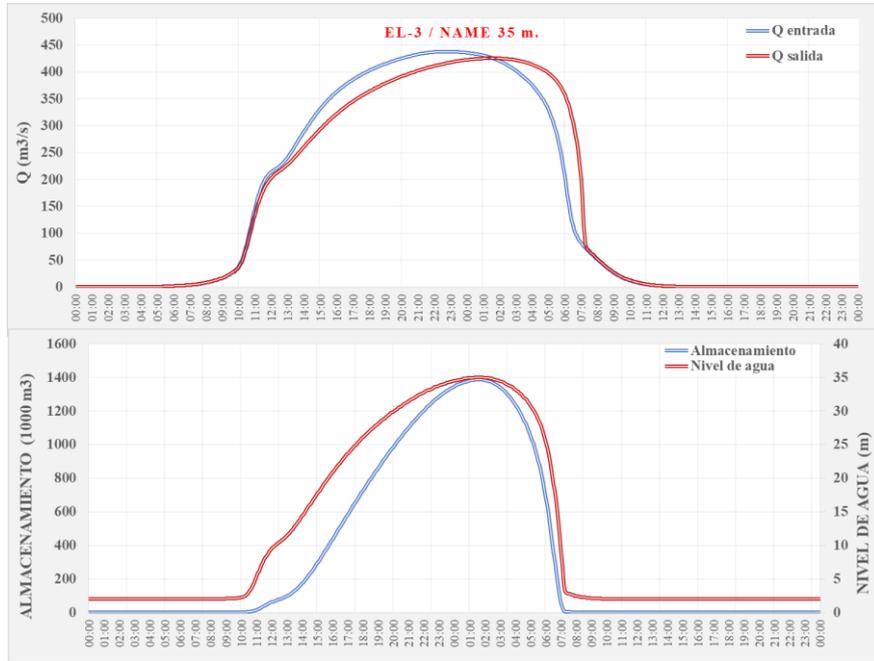


Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-2	35	473.2	438.1	92.6	14.35



ALTERNATIVA N° 6

Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-3	35	438	425.7	97.2	13.95



Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-1	35	425.6	410.1	96.4	13.43

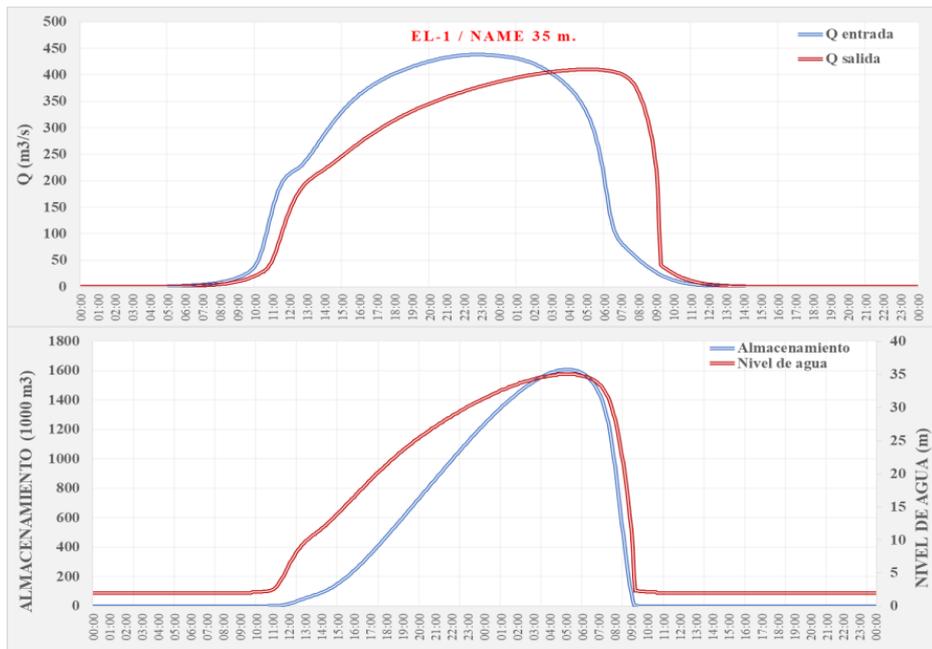
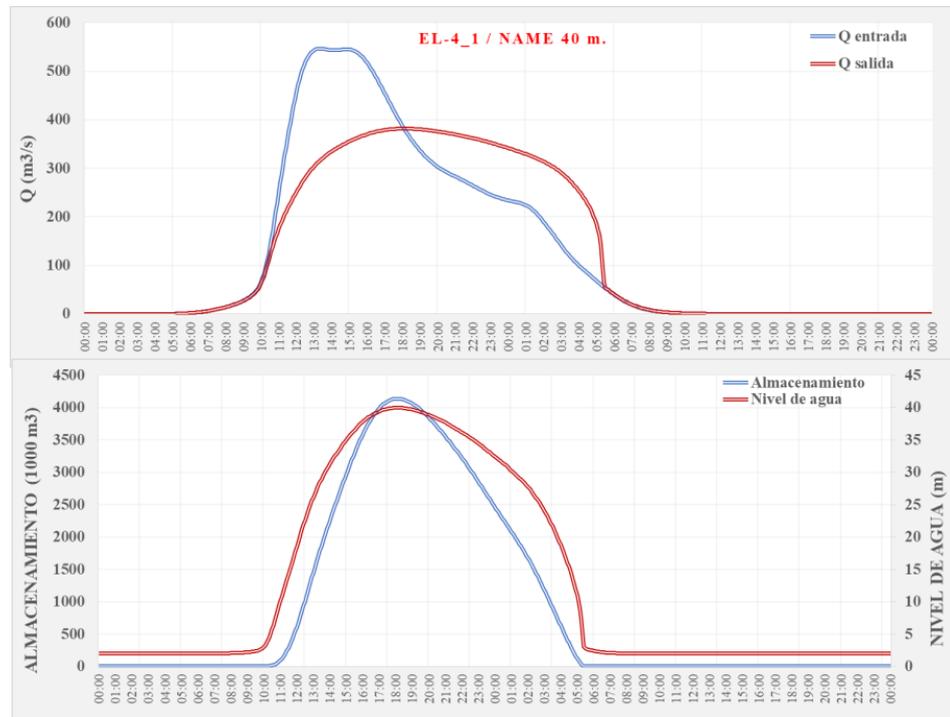
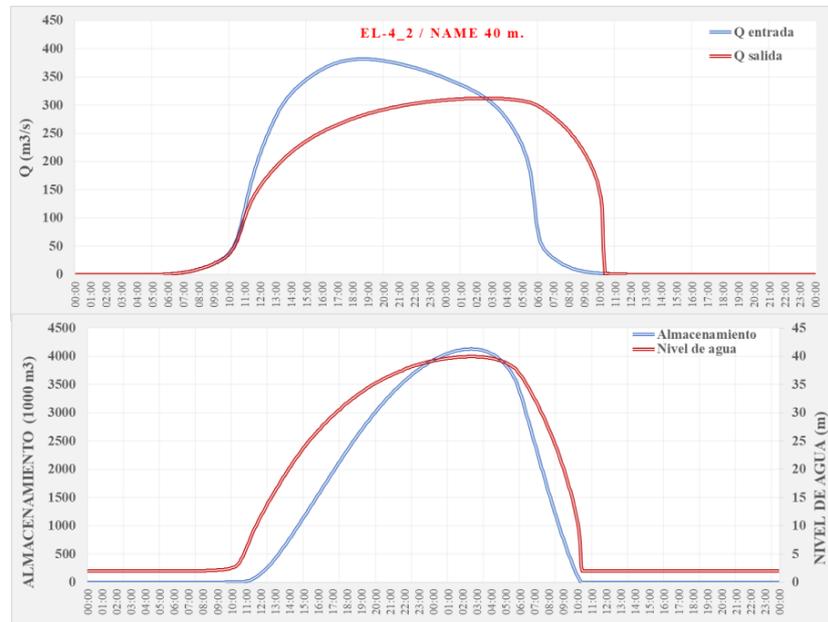


Tabla 39: Resultados HEC-HMS Alternativa N°07

ALTERNATIVA N° 7					
Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4_1	40	546.6	381.6	69.8	11.65



Presa	NAME (m)	Qmax In	Qmax out	% lam.	A _H (m)
EL-4_2	40	381.6	312.1	81.8	9.53



4.4.6. Evaluación de las alternativas de laminación

Se realizó el análisis del impacto en cada uno de los escenarios de laminación del sistema hidrológico, con la comparación del porcentaje de laminación generado en el tramo M7- M8 del modelo hidrológico respecto a su estado en régimen natural. Al respecto, el porcentaje de laminación mínimo que se buscó es del 60% ya que permite atenuar las avenidas y reducir los riesgos de inundación, los valores por debajo de lo expresado no generaban un impacto en la reducción de los riesgos. En la Tabla 40 se recopila los resultados, y se resalta la alternativa N°01 porque cumple con el objetivo.

Tabla 40: Impacto en la laminación de los caudales máximos de cada escenario

ESCENARIOS		Q MAX M7-M8	% LAMINACIÓN
REGIMEN NATURAL		601.8	-
ALTERNATIVA 0	EL-4(50m)	313.2	52.0
ALTERNATIVA 1	EL4(45m)	367.1	61.0
ALTERNATIVA 2	EL-4(45m) + EL-2(35m)	342.2	56.9
ALTERNATIVA 3	EL-4+EL-2+EL-1 (30m)	477.5	79.3
ALTERNATIVA 4	EL-4+EL-2+EL-1+EL-3 (30m)	468.3	77.8
ALTERNATIVA 5	EL-4+EL-2+EL-1 (35m)	420.5	69.9
ALTERNATIVA 6	EL-4+EL-2+EL-1+EL-3 (35m)	410.0	68.1
ALTERNATIVA 7	2xEL-4 (40m)	339.9	56.5

Como se puede apreciar en la Figura 28, los escenarios que cumplen los objetivos de laminación son las Alternativas 0, 2 y 7. La alternativa 1 se encuentra justo en el límite de laminación, mientras que el resto de las alternativas no cumplen los objetivos requeridos.

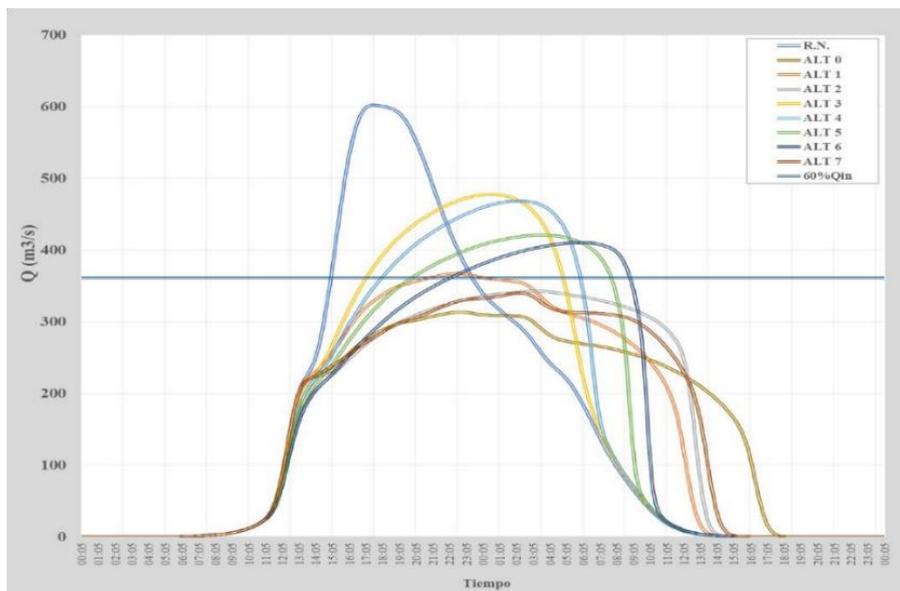


Figura 28: Hidrogramas laminados en el tramo de referencia M7-M8

4.4.7. Selección de alternativa

Se tiene como resultado que la alternativa N°1, de EL-4 con una altura de coronación de 45m, es la óptima, ya que dentro del marco del Plan Integral de Control de Inundaciones en la Cuenca del Río Mala incluye otras alternativas de mitigación de inundación como reforestación, reservorios temporales, entre otras, que generará el impacto suficiente para que la laminación se ajuste al valor del rango admisible de 60%.

La laminación que se produce en la estructura de laminación produce una reducción del caudal de 545,7 a 325,2 m³. s-1 en el área de influencia de la presa. Ello conlleva a que el caudal máximo en el tramo de referencia, M7-M8, se reduzca de 601,8 a 367,3 m³/s.

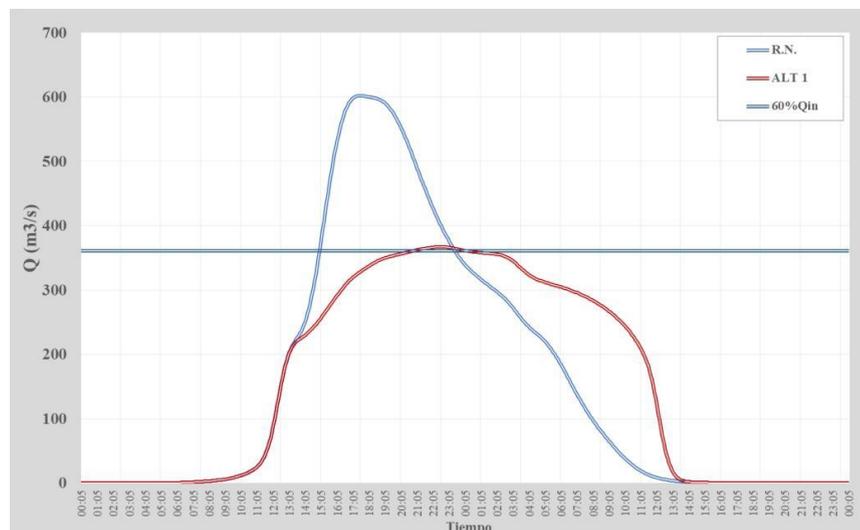


Figura 29: Hidrograma en régimen natural y laminado en el tramo de referencia M7-M8

El volumen de la avenida de diseño que queda retenida en la estructura de retención correspondiente a la EL- 4 asciende a 5.62 hm³, volumen que se almacena temporalmente durante el pico de la avenida. A continuación, en la Figura 30 se observa la evolución temporal del volumen almacenado a medida que agota la cota de coronación, establecida en 45 metros.

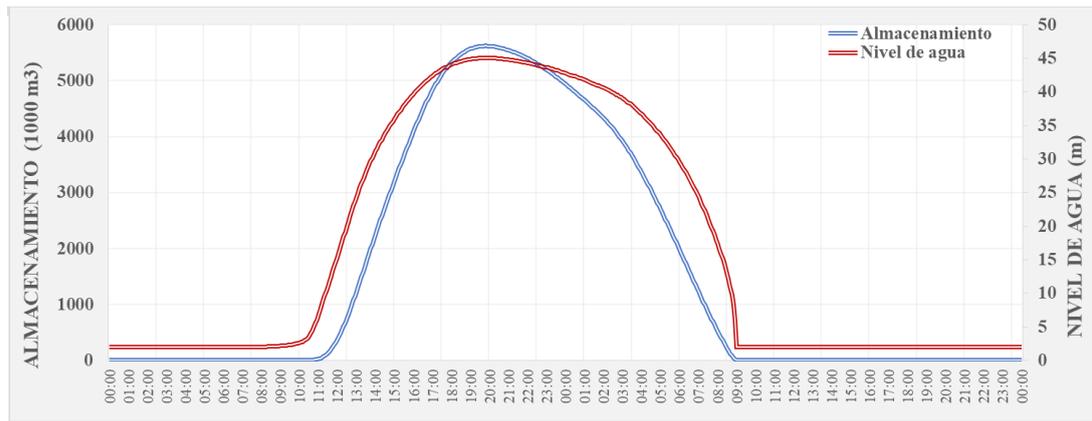


Figura 30: Hidrograma en régimen natural y laminado en el tramo de referencia M7-M8

Los resultados consecuencia de la implementación de la estructura de laminación EL-4 en el modelo hidrológico de la cuenca del río Mala se encuentran recogidos en la Tabla 41.

Tabla 41: Caudales máximos laminados simulados por HEC-HMS

Elementos hidrológicos	T100	T500
ACACACHE	81.5	107.1
AGUAQUIRI	27.1	35.1
CANYACA Y PACURA	19.8	26.3
CHURCHUQUIA	22.8	36.6
CRUZ	42.3	67.7
DE HUITO	2.2	7.9
DESEMBOCADURA	313.3	388.7
EL-4	278.8	325.2
EL-4-OUTLET-1	278.8	325.1
EL-4-SPILL-1	0.0	0.0
EL4-M7	278.6	325.1
HUAGNEC	24.7	39.4
HUAMPARA	93.8	125.5
HUANCANI	14.5	72.2
LARAN	35.6	57.8
M1	75.0	96.9
M1-M2	74.3	96.1
M10	313.7	389.0
M10-DES	313.3	388.7
M2	168.6	219.9
M2-M3	166.7	217.4
M3	215.2	287.0
M3-M4	213.3	284.5
M4	228.5	307.8

«Continuación»

M4-M5	226.8	305.5
M5	253.4	346.6
M5-M6	250.7	343.3
M6	391.2	547.7
M6-M7	389.7	545.7
M7	307.4	367.8
M7-M8	307.0	367.1
M8	311.0	381.6
M8-M9	310.9	381.4
M9	314.2	389.6
M9-M10	313.7	389.0
MALA ALTA	49.1	63.5
MALA BAJA	4.0	13.3
MALA MEDIA-BAJA	28.1	50.4
MALA MEDIO	109.1	161.2
MARIATANA	92.1	142.5
PACOMANTA	33.8	52.8
Q1	61.2	97.0
Q1-Q2	59.9	94.9
Q2	163.2	235.6
Q2-M6	161.5	233.2
QUINCHES ALTO	37.1	58.5
QUINCHES BAJO	21.8	35.0
SARAICO	7.7	9.9
TANTARA	57.3	81.3
ULULUMA	9.2	14.9

V. CONCLUSIONES

Como parte del Trabajo de Suficiencia Profesional, y en el marco del proyecto “Plan Integral de Control de Inundaciones en la Cuenca del Río Mala”, con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- La etapa del tratamiento de la información pluviométrica máxima en 24 horas se desarrolló con éxito a pesar de no contar con información pluviográfica, ya que se contó con los registros de ocho estaciones pluviométricas de la cuenca; a partir de esto, se realizó análisis de datos dudosos y se descartó aquellos valores altos que no correspondían a un evento climático extremo, luego se empleó el software Hydrognomon para la prueba de bondad de ajustes, en el cual se seleccionó las distribuciones de frecuencia para cada estación: Gamma (Ayaviri), Exponential (Huancata), Log Pearson III (Huañec, La Capilla, Tanta, San Lázaro) y Pearson III (Huarochirí y San Pedro de Pilas). Posteriormente, con el método del hietograma sintético del SCS (1986) se determinó la distribución en 24 horas de las tormentas de lluvia para 100 y 500 años de período de retorno en cada estación; y con los polígonos de Thiessen se obtuvo los valores de proporcionalidad areal, con ello se obtuvo los hietogramas para cada subcuenca, que fueron ingresados como modelo meteorológico en el HEC-HMS.
- Se logró realizar la calibración del modelo hidrológico, pese a no contar con una estación hidrométrica que tome registro de caudales instantáneos, se realizó el análisis estadístico de los caudales diarios de la estación La Capilla para obtener los caudales máximos a 100 y 500 años de período de retorno, con estos resultados se hizo la comparación con los valores de descarga en la desembocadura del modelo hidrológico a través de múltiples iteraciones en donde se ajustó el tiempo de retardo, las abstracciones iniciales y el parámetro temporal K. Al respecto, es importante señalar que dentro de los alcances del proyecto la desviación permisible es hasta el 2%,

siendo de esta manera que en la calibración se alcanzó una desviación del 1.82% y 0.21% para 100 y 500 años de período de retorno respectivamente.

- El modelamiento hidrológico en el HEC-HMS permitió obtener los caudales máximos laminados ya que se logró simular el tránsito de avenida incluyendo estructuras de laminación, por lo que, para los siete escenarios propuestos con diferentes condiciones de diseño, se obtuvo en el tramo M7 – M8 del modelo, que corresponde a la zona media en donde se iniciaron las inundaciones hasta impactar en la parte baja de la cuenca, un caudal en situación actual para 500 años de período de retorno de $601.8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; con una presa de regulación (EL) de 45m de altura de coronación, que corresponde a la alternativa 1, una descarga de $367.1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, y así sucesivamente para el resto de alternativas.
- A partir de los resultados del modelamiento hidrológico incluyendo las alternativas de laminación se calculó el porcentaje de laminación para cada uno de los siete escenarios, de cuya evaluación se concluyó que la alternativa 1 suficiente para alcanzar el 60% de laminación en complemento con otras alternativas que son parte del proyecto de Plan Integral de Control de Inundaciones, pero que no es objeto del presente estudio.

VI. RECOMENDACIONES

- Sustituir las estaciones meteorológicas existentes por estaciones automatizadas para el registro de información en tiempo real, y complementarlo con un sistema de alerta temprana (SAT) que integre y procese toda la información para la emisión de señales de alerta ante un evento meteorológico extremo.
- Frente a la escasez de registros de caudales máximos, es necesario verificar los resultados con las evidencias de la huella hídrica por los fenómenos climáticos ocurridos en el área de estudio, que ante algún evento extremo en la zona de estudio, o trabajar con información pluviométrica satelital, como el satélite TRMM o GPM que existen actualmente.
- Realizar el tratamiento de la información pluviométrica máximas a partir del procesamiento de la data espacial del satélite TRMM o GPM.
- Emplear para la simulación de caudales máximos otros modelos semi-distribuido o distribuidos y comparar los resultados obtenidos en el presente estudio.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaska Satellite Facility. *Portal de descarga de información satelital*. Obtenido de:
<https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=3.000¢er=-97.494,39.673>
- Autoridad Nacional del Agua. *Observatorio del agua online*. SNIRH (Sistema Nacional de Información de Recurso Hídricos). Obtenido de
<https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>
- Apaclla Nalvarte, R. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del pacífico*. Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/796>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*.
- Araujo, S. V. (1985). *Hidrología Estadística*. Lima.
- Béjar, M. V. (2002). *Hidrología*. Costa Rica: Editorial Villón.
- Campos Aranda, D.F. (2013). *Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra (hidrograma de salidas)*. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 14(3), 377–388. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72251-0](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72251-0)
- Chavarri, E. (2016). *Separatas de hidrología para estudiantes de ingeniería agrícola*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada*. Colombia: McGRAW-HILL.
- Consorcio Río Mala. (2021). *Apéndice N°03 Estudio de Hidrología del Plan Integral de Control de Inundaciones y Movimientos de Masa en la Cuenca del Río Mala*. Lima.
- Grupo INCLAM. (2015). *Evaluación de Recursos Hídricos en las cuencas Mala, Omas y Chilca*. Lima: Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/4>
- Hawkins, RH. (1993). *Asymptotic determination of runoff curve numbers from data*. J. *Irrigation and Drainage Engineering*.
- Hidrologic Soil-Cover Complexes. (2004). United States Department of Agriculture.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. *Portal de Sistema de Información Geológico y Catastral Minero*. Obtenido de
<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

- Instituto Nacional de Defensa Civil . (2018). *RESUMEN EJECUTIVO HISTÓRICO AL 100% DE LA TEMPORADA DE LLUVIAS 2016-2017*.
- Ministerio del Ambiente. *Geoservidor de Intercambio de Base de Datos*. Obtenido de <https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geominam>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, . (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Perú.
- Ray K., L., Kohler, M., & Joseph L.H., P. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.
- Sánchez, J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Createspace Independent Pub.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. & Karlovits, G. (2018). *User's Manual Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Hydrologic Engineering Center.
- Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología*. 2ed Editorial Villón. Lima-Perú.
- Villón Béjar, M. (2011). *Hidrología Estadística*. 4ed. Editorial Villón. Lima, Perú.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: REGISTROS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi

DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : AYAVIRI / 156104 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 22' "S"
 LONG. : 76° 8' "W"
 ALT. : 3224 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : YAUJYOS
 DIST. : AYAVIRI

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2014	25.5	18.4	16.7	19.6	2.8	0.0	0.0	0.0	3.7	5.4	9.3	11.5
2015	22.4	15.3	27.8	24.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	9.0	4.4	19.8
2016	0.0	35.2	17.3	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	21.8
2017	23.6	25.3	36.1	16.5	4.1	0.0	0.0	0.0	5.4	7.4	4.2	9.9
2018	19.2	20.3	21.3	13.2	6.7	4.2	0.0	0.0	0.0	4.1	5.0	14.0
2019	27.2	29.4	20.3	6.8	S/D							

S/D= Sin Datos

INFORMACION PREPARADA PARA: CONSORCIO RIO MALA
 LIMA, 08 de Julio de 2019

VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL

N° PRES / SOLIC. PROC: 23103630015/2019/07030001 N° IMPRESION: 5289

Figura 31: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (2014-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi

DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : TANTA / 156108 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 7' "S"
 LONG. : 76° 1' "W"
 ALT. : 4323 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : YAUJYOS
 DIST. : TANTA

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1993	22.1	41.6	30.2	25.8	7.2	5.3	4.1	3.4	7.4	14.7	15.7	17.7
1994	22.7	25.2	21.1	14.2	13.3	12.8	1.5	4.0	24.2	16.1	26.4	17.5
1995	27.0	14.2	23.9	9.4	4.0	1.4	1.7	0.0	8.5	13.3	14.0	20.0
1996	31.7	23.5	25.8	18.9	7.7	0.0	0.0	3.6	7.2	21.7	9.0	20.7
1997	18.6	27.4	5.2	7.4	2.1	0.0	0.0	6.1	15.2	10.1	16.9	14.5
1998	20.0	25.8	19.3	41.8	0.0	0.0	0.0	4.0	6.9	13.3	14.5	21.3
1999	19.0	21.1	12.6	24.5	13.8	4.1	2.3	4.7	6.0	16.7	21.0	21.1
2000	14.8	21.9	28.9	26.6	17.8	0.0	6.2	4.3	12.0	17.3	22.6	23.6
2001	21.0	19.3	22.7	7.0	7.5	0.0	2.4	0.0	7.3	7.0	19.3	10.1
2002	28.2	20.7	23.0	18.5	10.4	0.0	2.1	0.0	10.8	11.1	18.2	19.3
2003	16.6	24.8	21.8	17.1	8.8	0.0	4.0	0.0	4.4	14.8	20.0	28.0
2004	19.2	32.9	12.2	12.6	5.3	2.0	1.8	3.5	10.5	19.2	14.8	20.5
2005	20.3	18.8	17.5	18.8	3.3	0.0	0.0	0.0	2.2	7.6	9.4	22.0
2006	29.5	19.9	21.0	23.1	4.3	2.9	0.0	10.7	11.7	15.1	16.5	15.0

S/D= Sin Datos

INFORMACION PREPARADA PARA: CONSORCIO RIO MALA
 LIMA, 08 de Julio de 2019

VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL

N° PRES / SOLIC. PROC: 2019030019/2019/07030001 N° IMPRESION: 5290

Figura 32: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Tanta (1993-2006)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

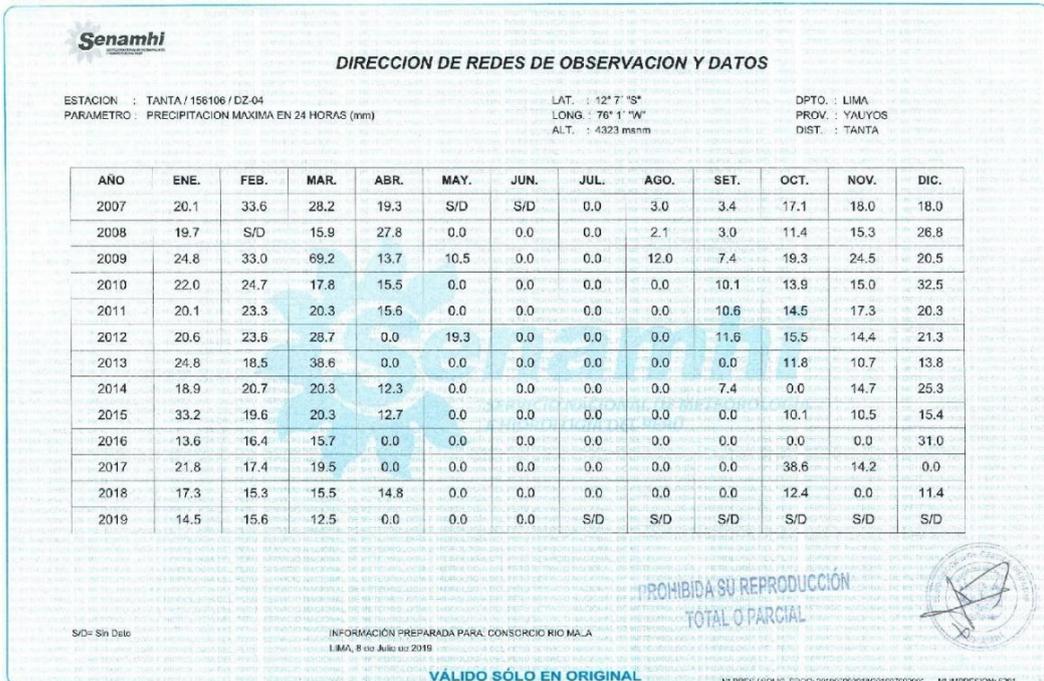


Figura 33: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Tanta (2008-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

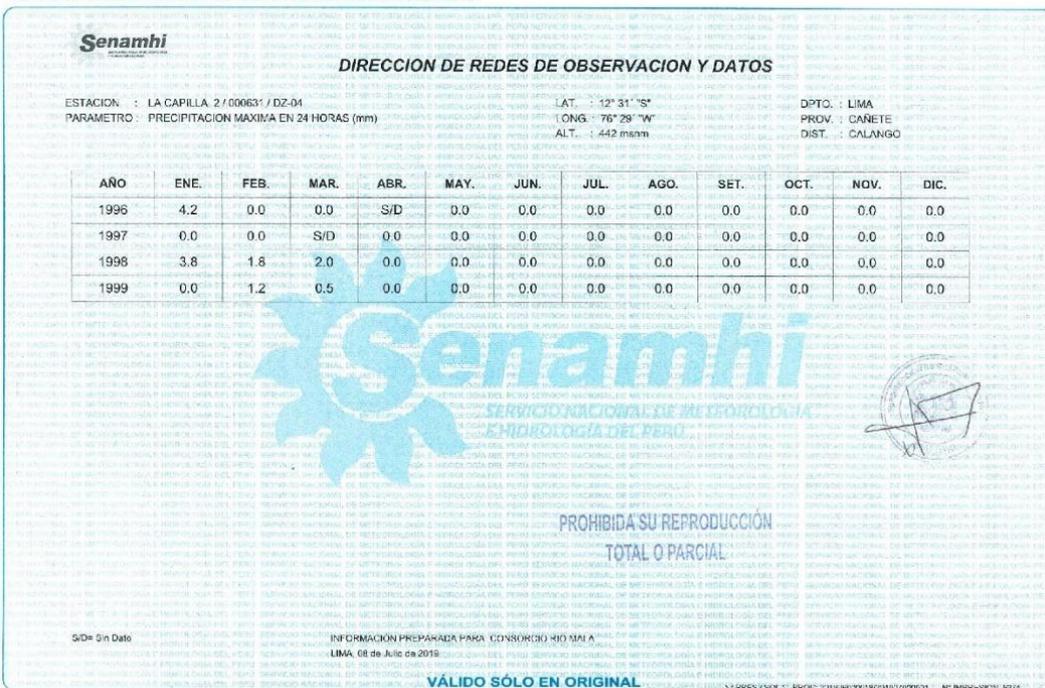


Figura 34: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (1996-1999)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : LA CAPILLA 2 / 000631 / DZ 04 LAT. : 12° 31' "S"
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm) LONG. : 76° 29' "W"
 ALT. : 442 msnm DPTO. : LIMA
 PROV. : CAÑETE
 DIST. : CALANGO

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2001	S/D	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0
2002	0.0	S/D	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	0.5	1.7	0.0	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	0.0	1.4	2.6	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2005	0.1	S/D	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
2006	3.8	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
2007	0.0	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	S/D	S/D	0.0	1.7	0.0	0.0
2008	S/D	S/D	0.5	0.0	0.0	0.9	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
2009	0.9	4.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0
2010	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
2011	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
2012	0.0	9.2	0.4	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2013	0.0	0.3	0.7	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2014	1.8	0.2	3.4	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

INFORMACION PREPARADA PARA CONSORCIO RIO MATA
 LIMA, 03 de Julio de 2019

VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL

Figura 35: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (2001-2014)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : LA CAPILLA 2 / 000631 / DZ 04 LAT. : 12° 31' "S"
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm) LONG. : 76° 29' "W"
 ALT. : 442 msnm DPTO. : LIMA
 PROV. : CAÑETE
 DIST. : CALANGO

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2015	2.0	2.6	4.5	0.0	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.9
2016	0.1	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2017	3.0	0.9	5.3	0.0	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
2018	0.0	1.0	0.4	0.0	0.0	0.6	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2
2019	2.1	1.3	0.0	0.0	S/D							

PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL

INFORMACION PREPARADA PARA CONSORCIO RIO MATA
 LIMA, 03 de Julio de 2019

VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL

Figura 36: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación La Capilla (2015-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

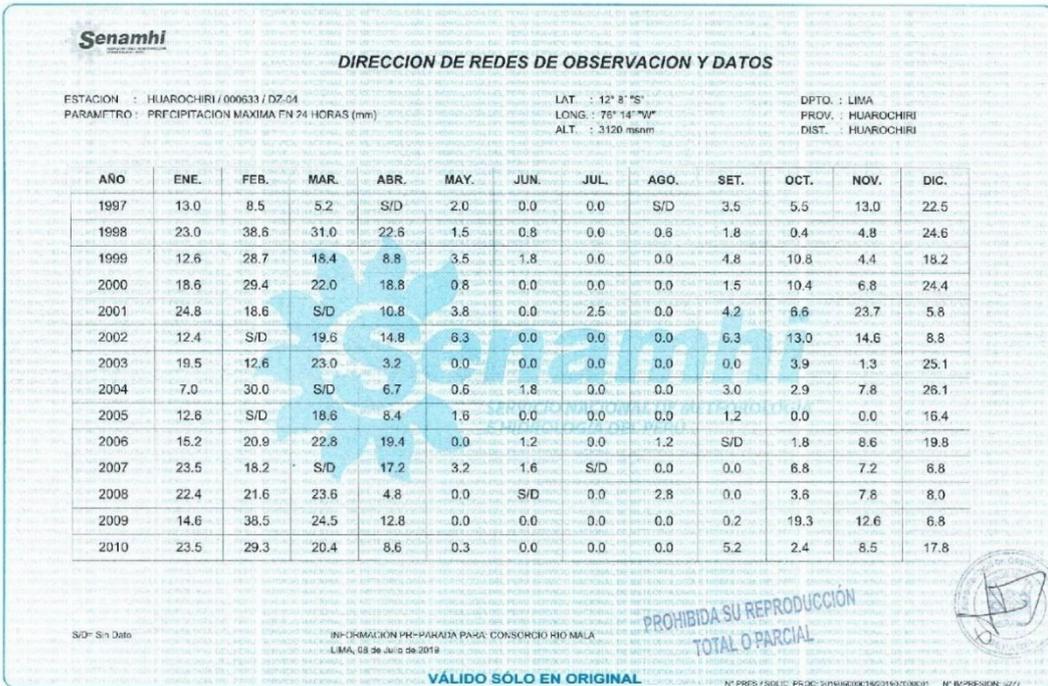


Figura 37: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huarocharí (1997-2010)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 38: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huarocharí (2011-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : HUANCATA / 151207 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 11' "S
 LONG. : 76° 14' "W
 ALT. : 2691 msnnm

DFTO. : LIMA
 PROV. : HUAROCCHI
 DIST. : SANGALLAYA

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1980	13.9	11.3	9.5	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7
1981	8.4	13.2	17.0	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
1982	10.0	23.2	12.5	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	13.5	3.4
1983	13.1	5.0	26.4	27.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6
1984	11.0	23.6	25.1	6.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	6.8	18.6
1985	7.6	27.2	15.5	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	8.0
1986	21.8	16.1	8.0	8.5	0.0	0.0	0.0	9.7	0.0	0.0	S/D	S/D
1987	8.2	13.6	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
1988	8.6	8.1	7.7	4.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
1989	10.4	14.1	12.9	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0
1990	S/D	0.0	12.5	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	6.9	4.6
1991	3.1	4.5	6.9	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	5.0	5.5
1992	10.5	5.0	6.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	1.9	2.8
1993	8.5	8.0	9.4	12.0	2.9	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	9.0	5.0

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL. INFORMACIÓN PREPARADA PARA CONSORCIO RIO MALA. LIMA, 08 de Julio de 2019. VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL. N° PRES / SOLIC. PROC.: 201908001062019700001 N° INFORMACION: 3279

Figura 39: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (1980-1993)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : HUANCATA / 151207 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 11' "S
 LONG. : 76° 14' "W
 ALT. : 2691 msnnm

DFTO. : LIMA
 PROV. : HUAROCCHI
 DIST. : SANGALLAYA

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1994	10.0	12.0	9.0	6.6	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	4.0
1995	13.0	3.5	15.3	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	10.0	13.2
1996	20.3	13.0	18.1	3.5	3.5	0.0	0.0	0.4	1.0	4.7	4.5	3.0
1997	20.6	10.8	2.8	1.5	2.5	0.0	0.0	0.3	0.5	3.2	8.4	33.0
1998	18.7	25.3	16.1	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	12.0
1999	12.3	17.7	12.3	4.2	2.7	1.7	0.0	0.0	3.0	2.5	4.5	8.5
2000	9.6	16.3	14.5	10.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	2.0	12.5
2001	19.6	18.5	15.4	7.6	1.5	0.0	0.0	0.0	0.5	2.1	6.5	0.5
2002	1.2	12.0	16.9	11.9	6.0	0.8	0.0	0.0	0.0	20.1	11.1	13.5
2003	12.1	18.4	11.0	1.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	1.0	16.0
2004	2.9	12.2	10.4	10.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	0.6	5.2	19.2
2005	15.5	19.3	12.5	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0
2006	13.0	20.8	25.0	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	12.5
2007	13.3	15.5	10.8	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	1.5	5.2

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL. INFORMACIÓN PREPARADA PARA CONSORCIO RIO MALA. LIMA, 08 de Julio de 2019. VÁLIDO SÓLO EN ORIGINAL. N° PRES / SOLIC. PROC.: 201908001062019700001 N° INFORMACION: 3280

Figura 40: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (1994-2007)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi

DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : HUANCATA / 151207 / DZ-01
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 11' "S
 LONG. : 76° 14' "W
 ALT. : 2684 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : HUARACHIRI
 DIST. : SANGALLAYA

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2008	40.3	24.0	10.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.5	2.0
2009	14.0	24.0	S/D	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	S/D	4.0
2010	10.5	17.0	12.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	14.0
2011	12.0	9.8	12.2	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	10.5
2012	7.0	26.5	19.6	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	7.8	6.4
2013	14.0	10.8	9.5	3.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	2.7	12.0
2014	15.5	11.5	10.3	2.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	11.5
2015	12.0	7.0	12.2	5.2	0.0	0.0	0.0	3.0	0.5	3.2	1.0	24.7
2016	5.7	48.5	13.0	26.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.0	13.3
2017	24.9	34.5	38.7	10.0	3.2	0.0	0.0	0.0	1.3	3.5	8.6	5.5
2018	20.0	17.4	11.4	5.2	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2	0.7	7.7
2019	13.7	17.1	13.7	0.0	S/D							

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

3D= Sin Datos

INFORMACION PREPARADA PARA: CONSORCIO RIO MALA
 LIMA, 08 de Julio de 2019

VALIDO SOLO EN ORIGINAL

N° FICSI / SOLIC. PROC. 2016/0001/00101/000001 N° IMPRESION: 0281

Figura 41: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huancata (2008-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi

DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : SAN PEDRO DE PILAS / 151212 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 27' "S
 LONG. : 76° 13' "W
 ALT. : 2707 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : YAUYOS
 DIST. : SAN PEDRO DE PILAS

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1986	4.3	16.0	7.7	5.5	1.5	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	2.4	11.1
1987	9.7	21.9	14.6	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
1988	12.2	17.7	8.8	7.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
1989	11.9	15.5	15.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0
1990	6.8	12.4	3.2	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	5.1	12.0
1991	3.1	9.7	18.5	5.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.8	10.8
1992	5.1	6.8	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0
1993	14.7	44.0	14.7	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	7.5
1994	17.7	19.0	12.2	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	1.4	17.9
1995	5.5	4.4	15.2	S/D	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	10.1	23.4
1996	11.1	10.9	12.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5
1997	13.3	5.0	4.2	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	15.2
1998	23.3	30.1	24.7	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	9.9
1999	10.4	11.4	24.7	2.6	2.7	0.0	0.0	0.0	2.2	2.6	2.3	9.7

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

3D= Sin Datos

INFORMACION PREPARADA PARA: CONSORCIO RIO MALA
 LIMA, 08 de Julio de 2019

VALIDO SOLO EN ORIGINAL

N° FICSI / SOLIC. PROC. 2016/0001/00101/000001 N° IMPRESION: 0282

Figura 42: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (1986-1999)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 43: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (2000-2013)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

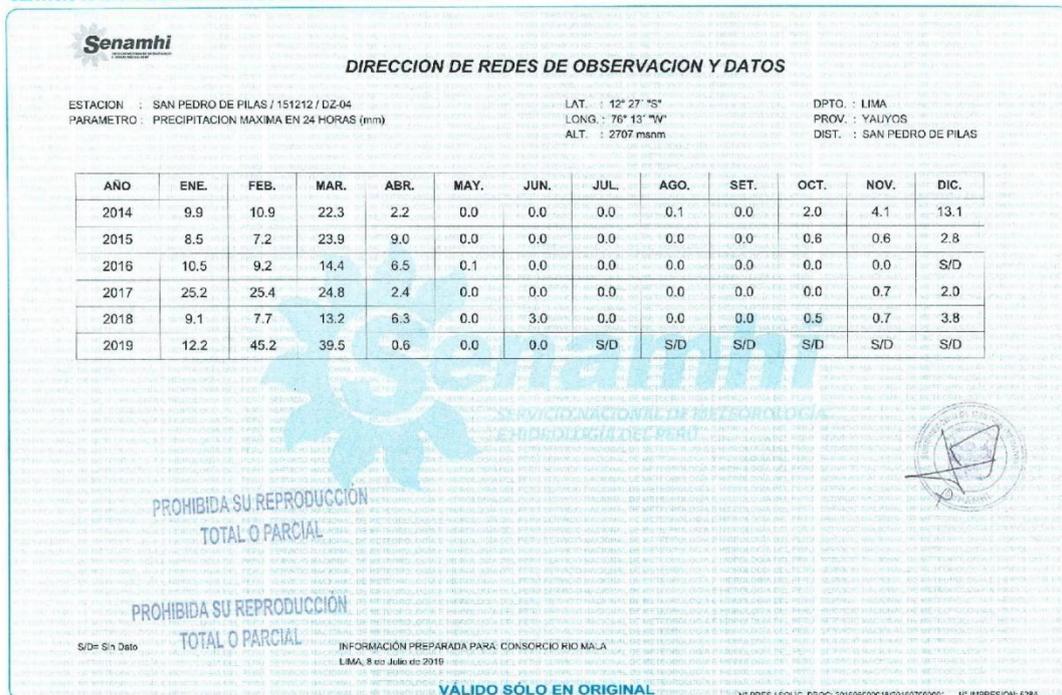


Figura 44: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Pedro de Pilas (2014-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 45: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1964-1969)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 46: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1971-1980)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : AYAVIRI / 156104 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 22' "S"
 LONG. : 76° 8' "W"
 ALT. : 3224 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : YAUYES
 DIST. : AYAVIRI

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1986	32.7	15.9	26.8	13.2	6.5	0.0	0.0	8.9	0.0	1.4	4.1	17.6
1987	14.6	31.9	9.3	11.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	2.1
1988	11.7	15.3	18.3	23.4	23.8	0.0	0.0	1.2	0.0	0.9	0.0	2.5
1989	4.9	39.4	17.9	10.7	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	20.6	0.0	0.0
1990	25.6	9.3	14.6	8.2	7.6	0.0	0.0	0.8	2.4	1.3	6.1	5.4
1991	5.7	10.8	22.6	27.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	0.0	0.0
1992	7.1	9.4	29.9	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	4.4	6.7
1993	12.7	29.7	25.9	17.1	4.5	0.0	0.0	0.0	11.8	6.8	11.1	11.4
1994	30.2	12.3	25.6	9.3	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	9.1
1995	5.7	13.1	14.5	11.1	2.2	0.0	0.0	0.0	2.7	1.8	15.7	30.2
1996	24.6	23.4	20.1	19.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.6	4.5	0.0	5.9
1997	17.3	25.4	16.7	0.9	0.3	0.0	0.0	2.2	2.3	0.5	9.2	46.2
1998	31.9	26.1	32.4	12.5	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2	20.4
1999	14.1	23.1	19.0	14.2	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	19.7	2.3	15.1

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

VALIDO SÓLO EN ORIGINAL

N° PRES / SOLIC. PROC: 2219300001022193700001 N° IMPREGION: 3267

Figura 47: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (1986-1999)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Senamhi
DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : AYAVIRI / 156104 / DZ-04
 PARAMETRO : PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 12° 22' "S"
 LONG. : 76° 8' "W"
 ALT. : 3224 msnm

DPTO. : LIMA
 PROV. : YAUYES
 DIST. : AYAVIRI

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2000	19.9	35.4	25.8	10.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	2.5	31.1
2001	22.7	16.3	24.0	9.3	0.7	0.0	0.0	0.0	2.7	3.1	15.6	0.6
2002	14.9	17.5	28.7	12.8	3.4	0.0	0.0	0.0	13.0	S/D	8.4	15.4
2003	11.6	18.2	17.1	2.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	4.8	16.2
2004	10.6	20.4	29.2	20.5	0.0	0.0	0.0	S/D	S/D	2.6	5.5	15.8
2005	19.5	15.5	21.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	14.8
2006	26.5	13.3	19.5	14.1	0.0	S/D	0.0	S/D	S/D	S/D	4.8	13.8
2007	34.2	S/D	24.9	25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	3.2	11.8
2008	17.3	S/D	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	S/D	8.7
2009	12.7	S/D	10.5	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	S/D	12.5
2010	16.8	S/D	S/D	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	12.7
2011	18.2	11.6	14.1	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	8.8
2012	8.5	S/D	24.5	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	S/D	15.0	6.7	8.8
2013	13.8	24.3	21.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	6.1

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

VALIDO SÓLO EN ORIGINAL

N° PRES / SOLIC. PROC: 2219300001022193700001 N° IMPREGION: 3288

Figura 48: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Ayaviri (2000-2013)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

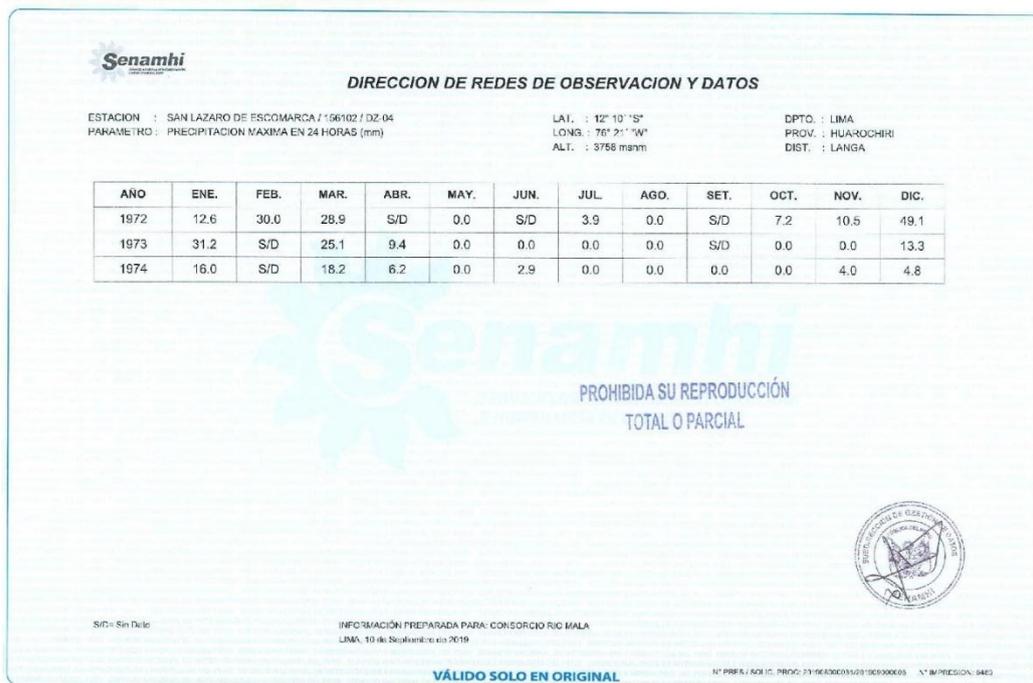


Figura 49: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escamarca (1972 -1974)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

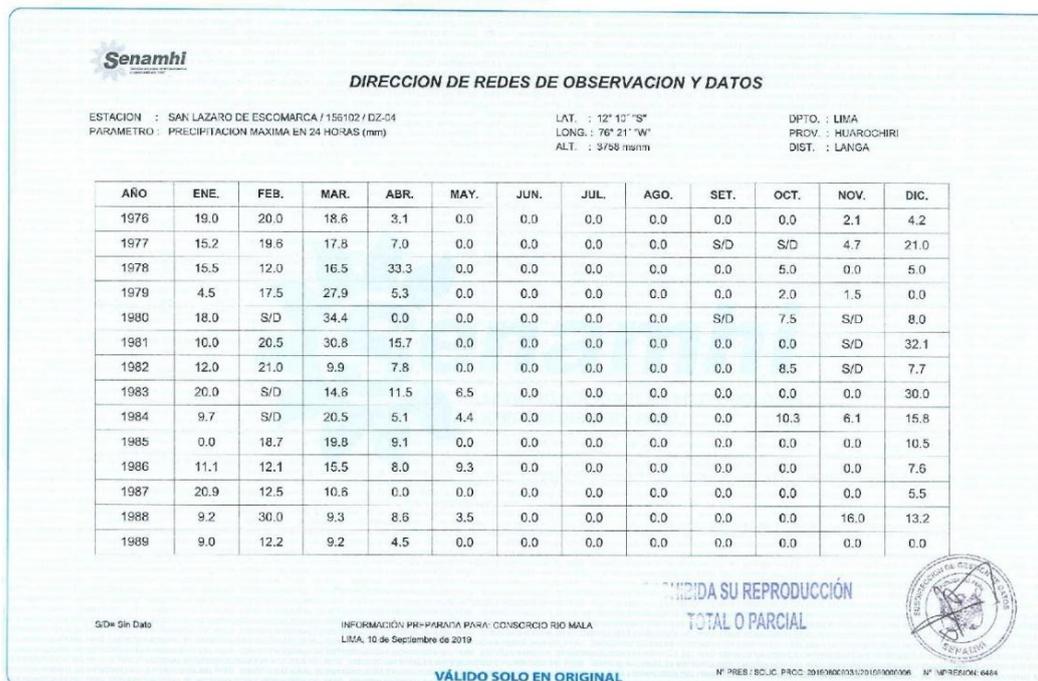


Figura 50: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escamarca (1976 -1989)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 51: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escamarca (1990 -2003)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 52: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escamarca (2004-2017)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

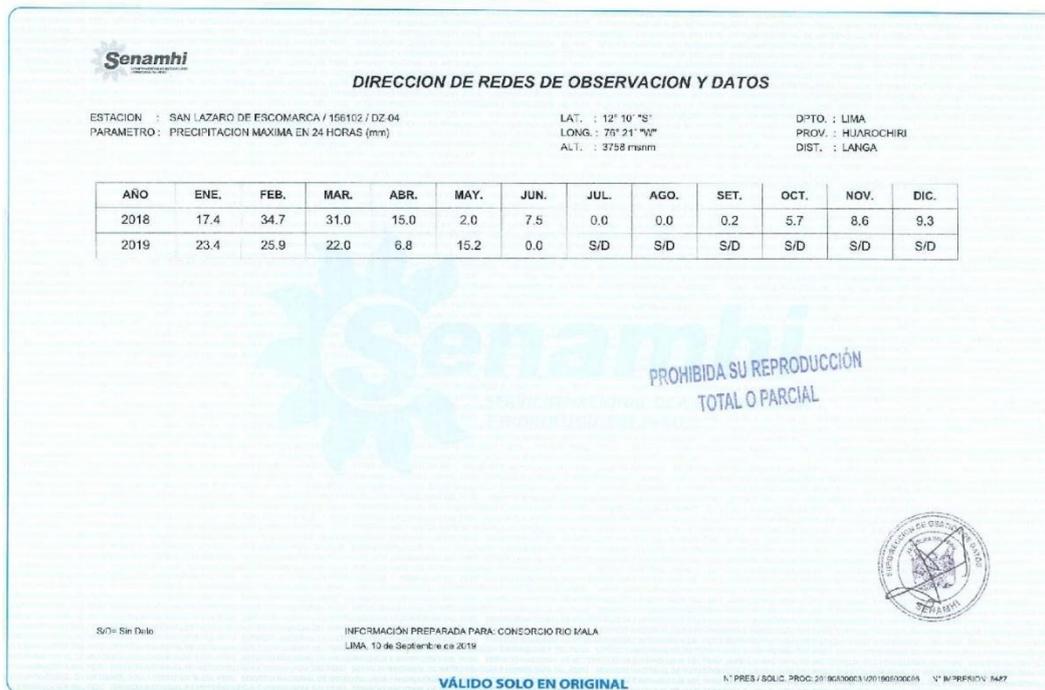


Figura 53: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación San Lázaro de Escamarca (2018-2019)

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



Figura 54: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huañec (1993-2006)

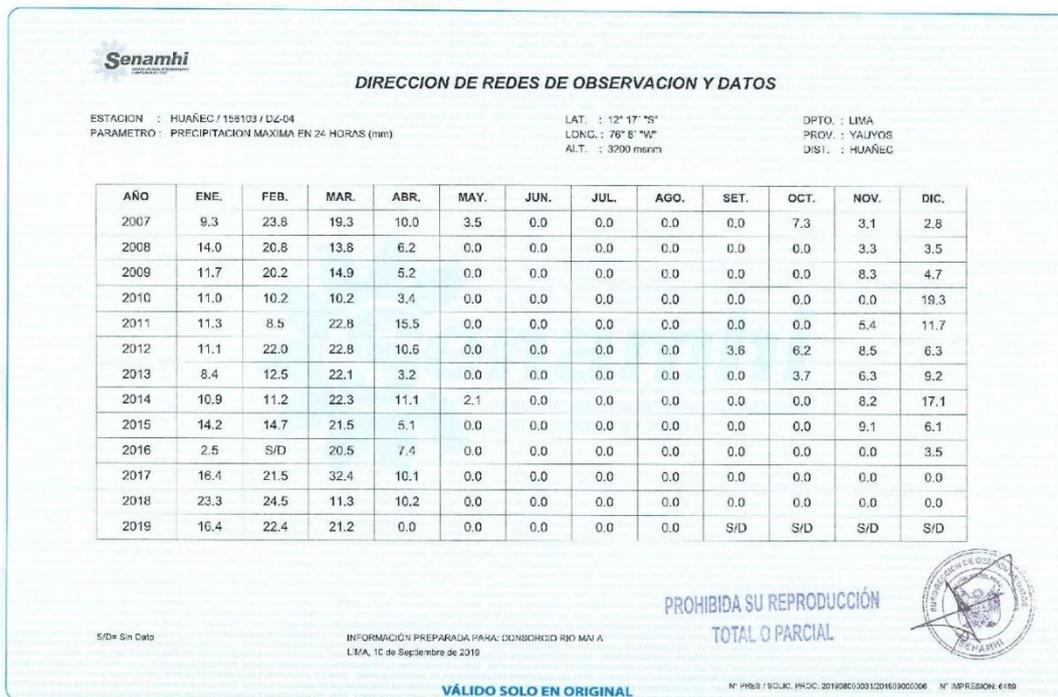


Figura 55: Registros de precipitación máxima en 24 horas de la Estación Huañec (2006-2019)

ANEXO 2: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura 56: Registro Fotográfico – Puente Dorado



Figura 57: Registro Fotográfico – Estación La Capilla

ANEXO 3: CURVA DE DISTRIBUCIÓN

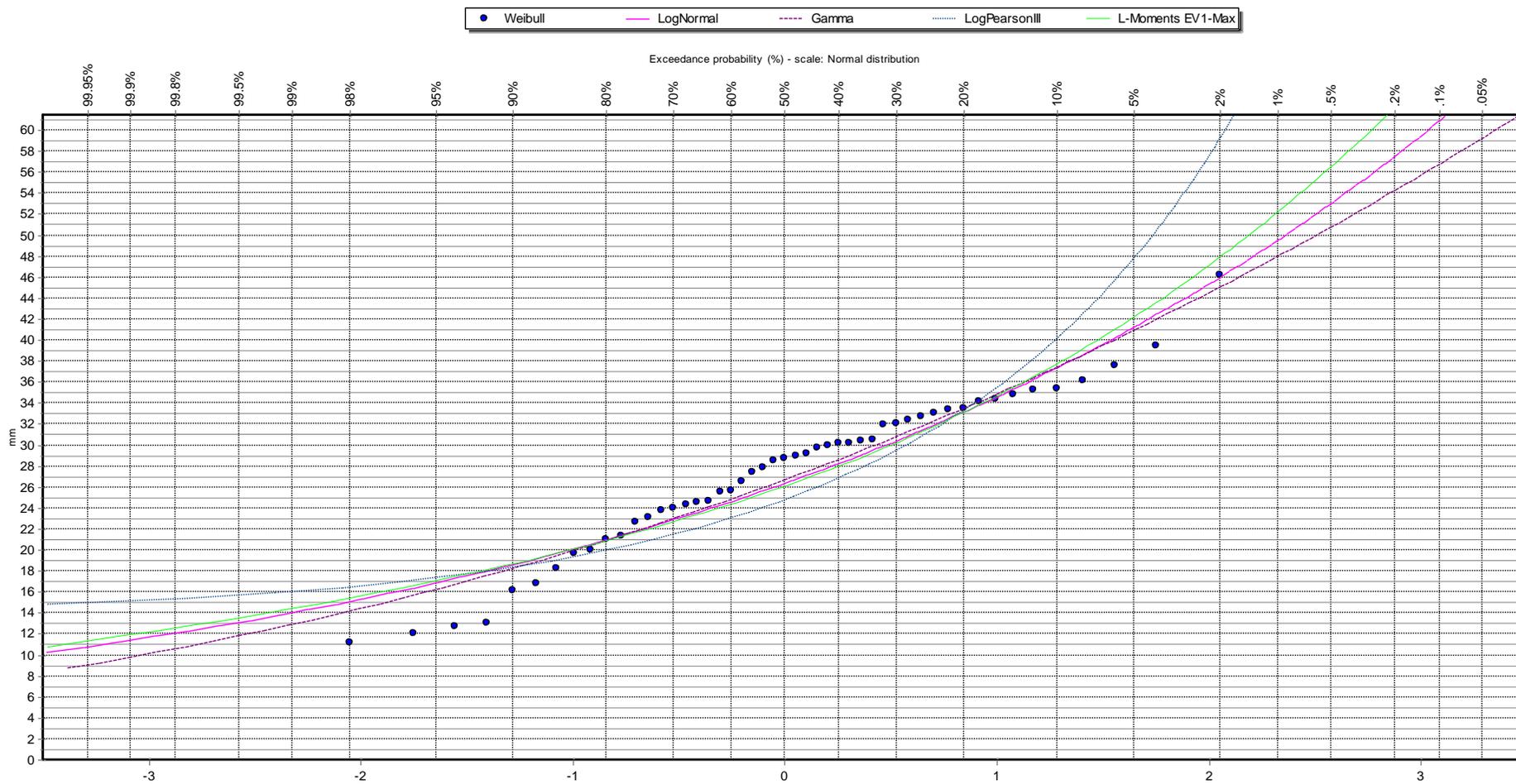


Figura 58: Curva de distribución – Estación Ayaviri

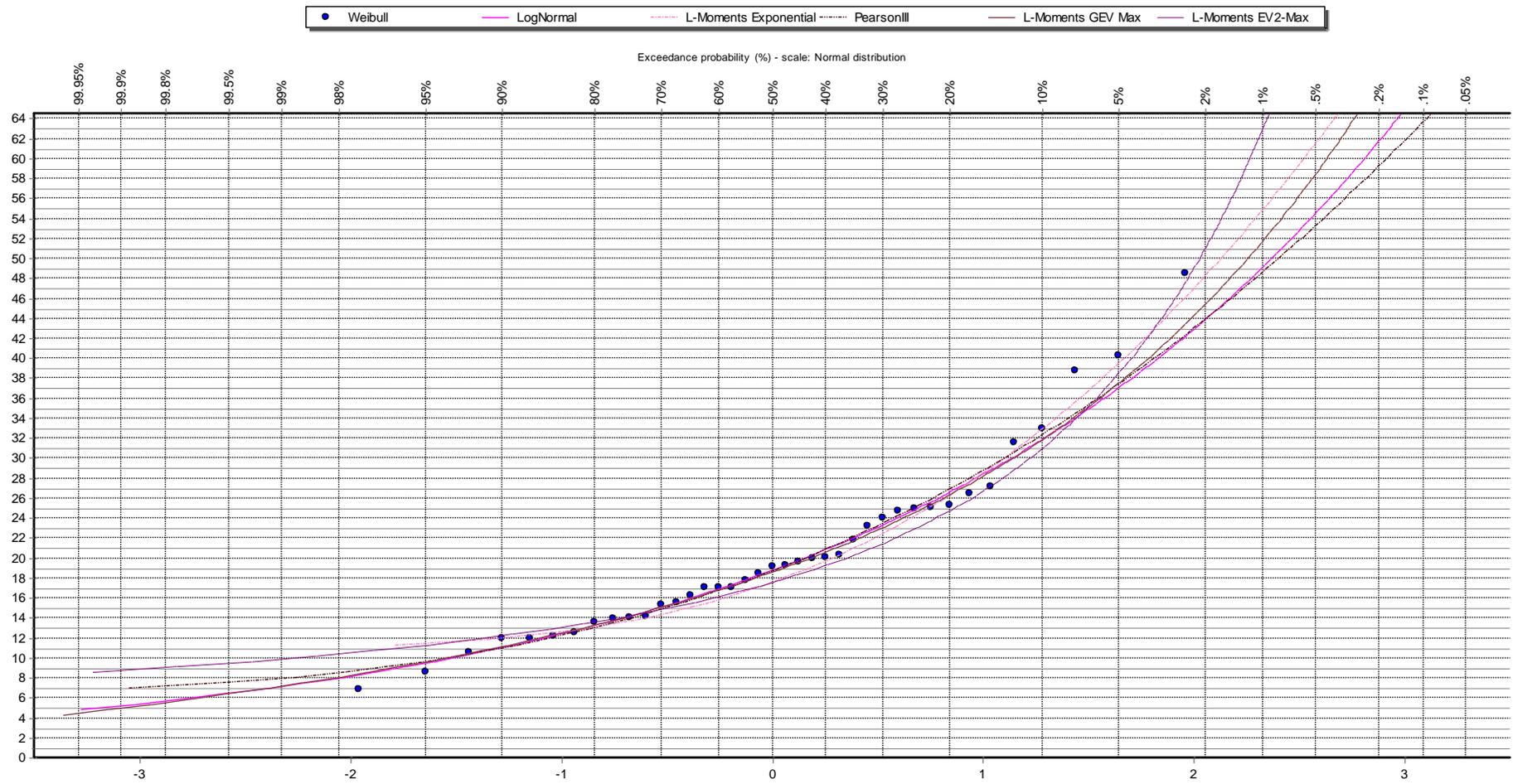


Figura 59: Curva de distribución – Estación

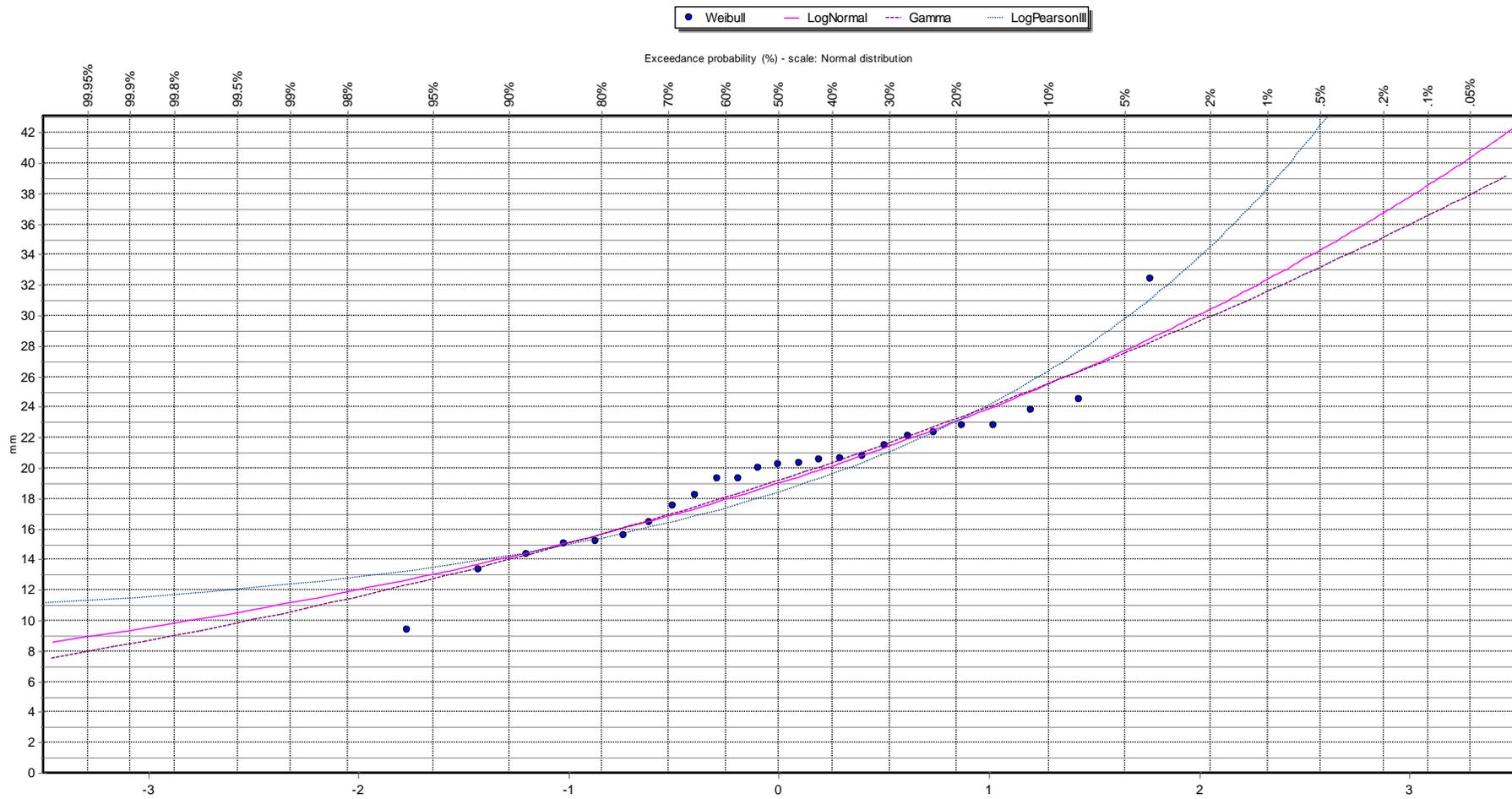


Figura 60: Curva de distribución - Estación Huañec

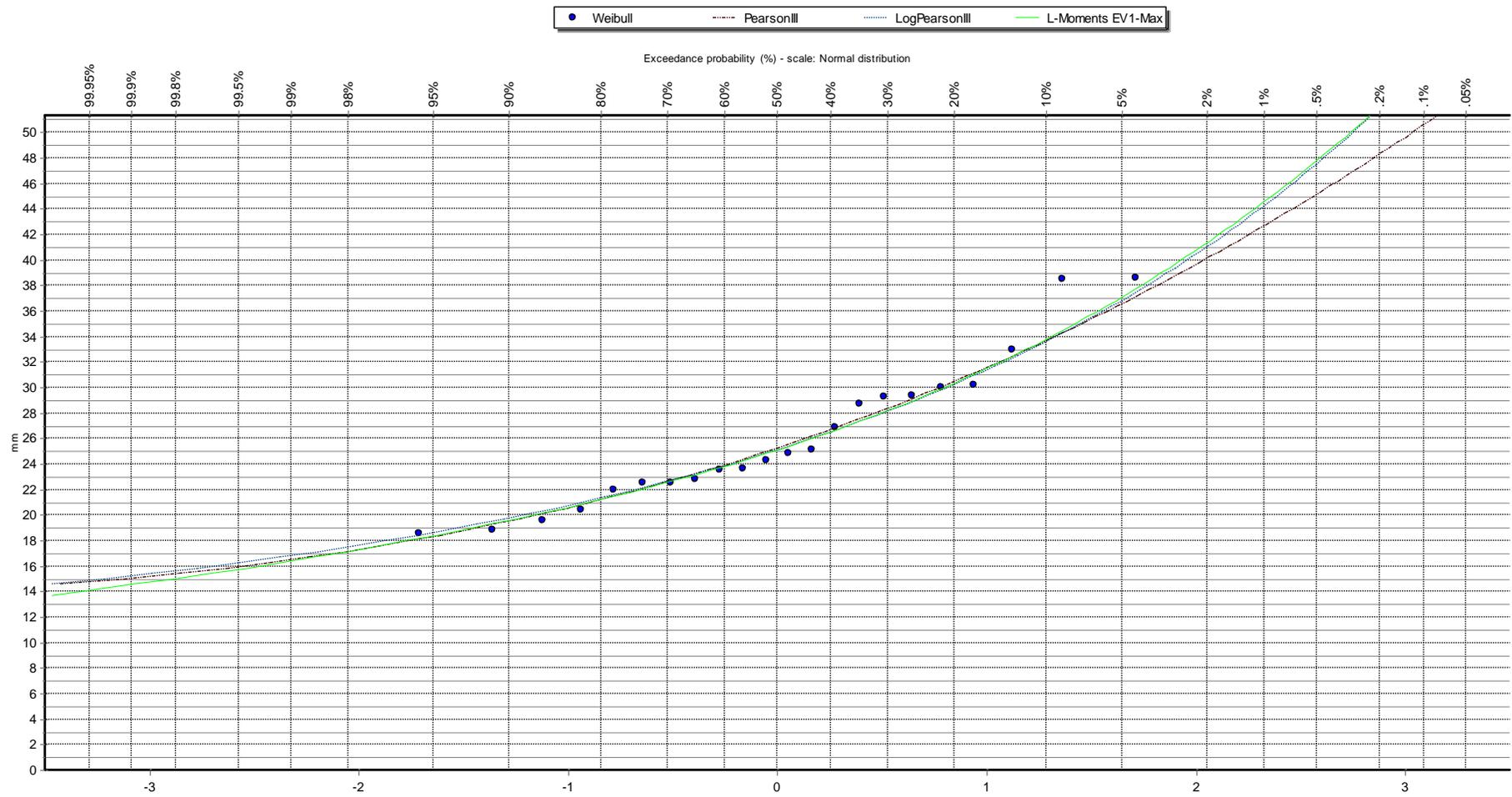


Figura 61: Curva de distribución – Estación Huarocharí

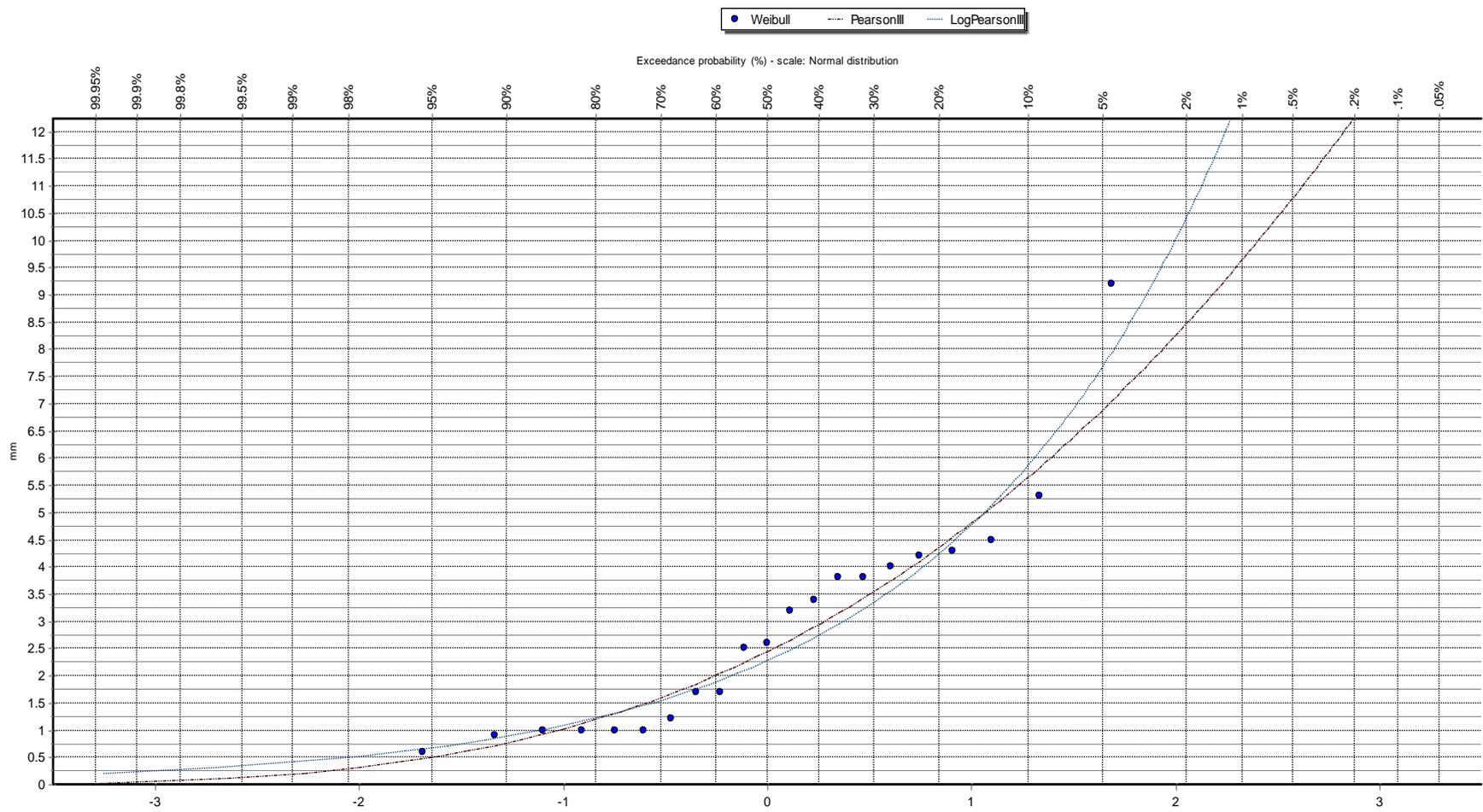


Figura 62: Curva de distribución – Estación La Capilla

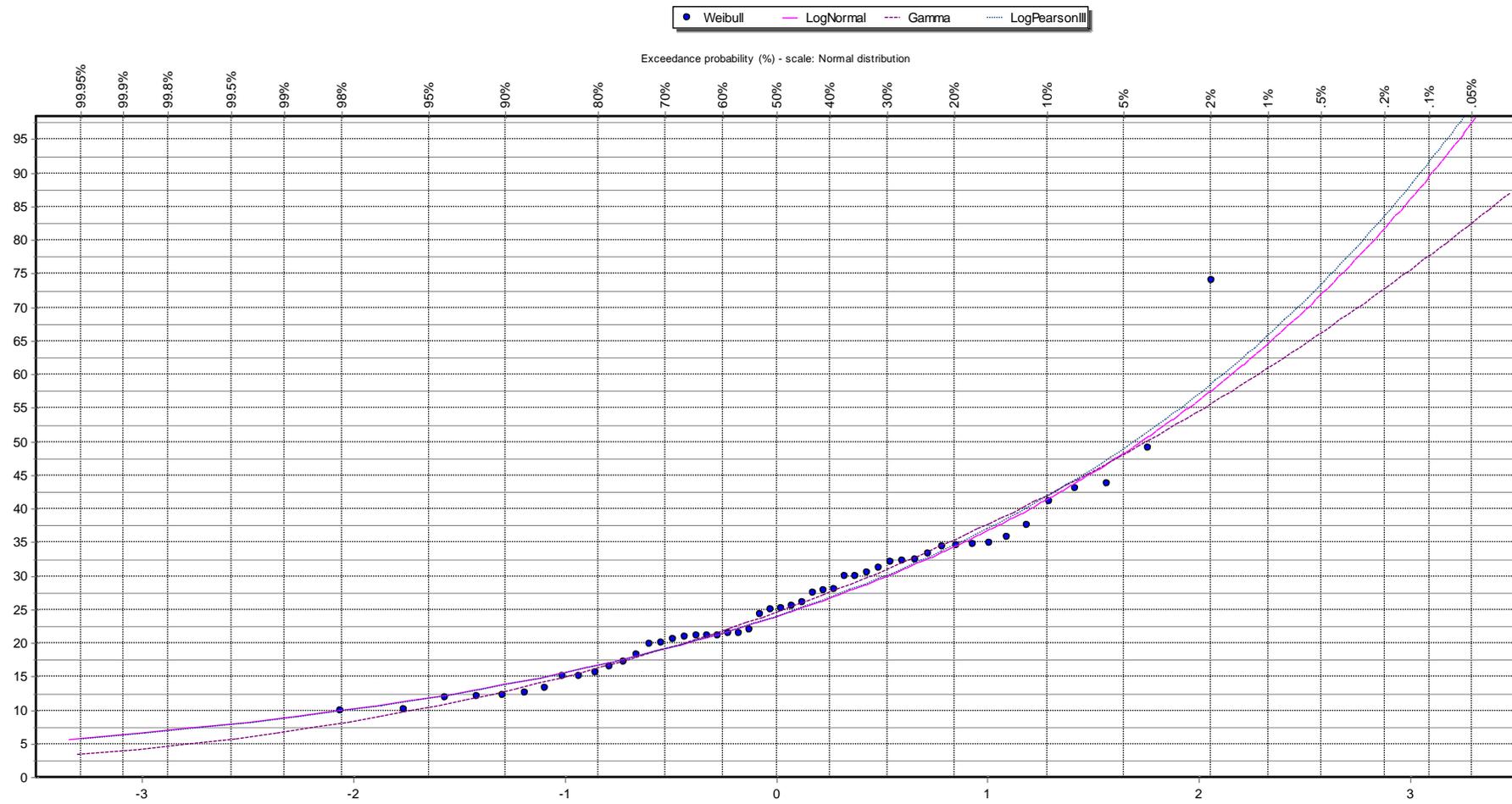


Figura 63: Curva de distribución - Estación San Lázaro de Escomarca

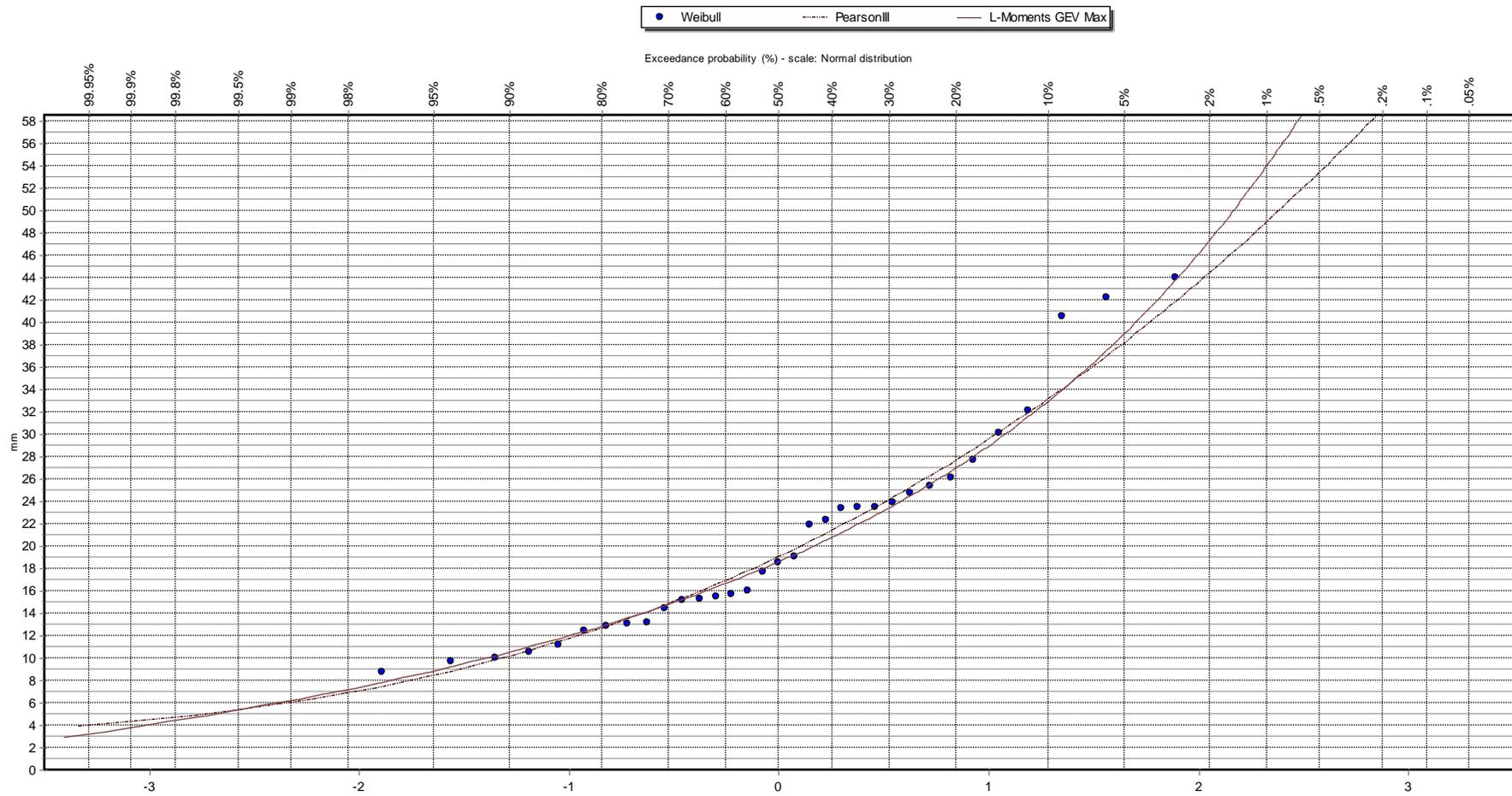


Figura 64: Curva de distribución – Estación San Pedro de Pilas

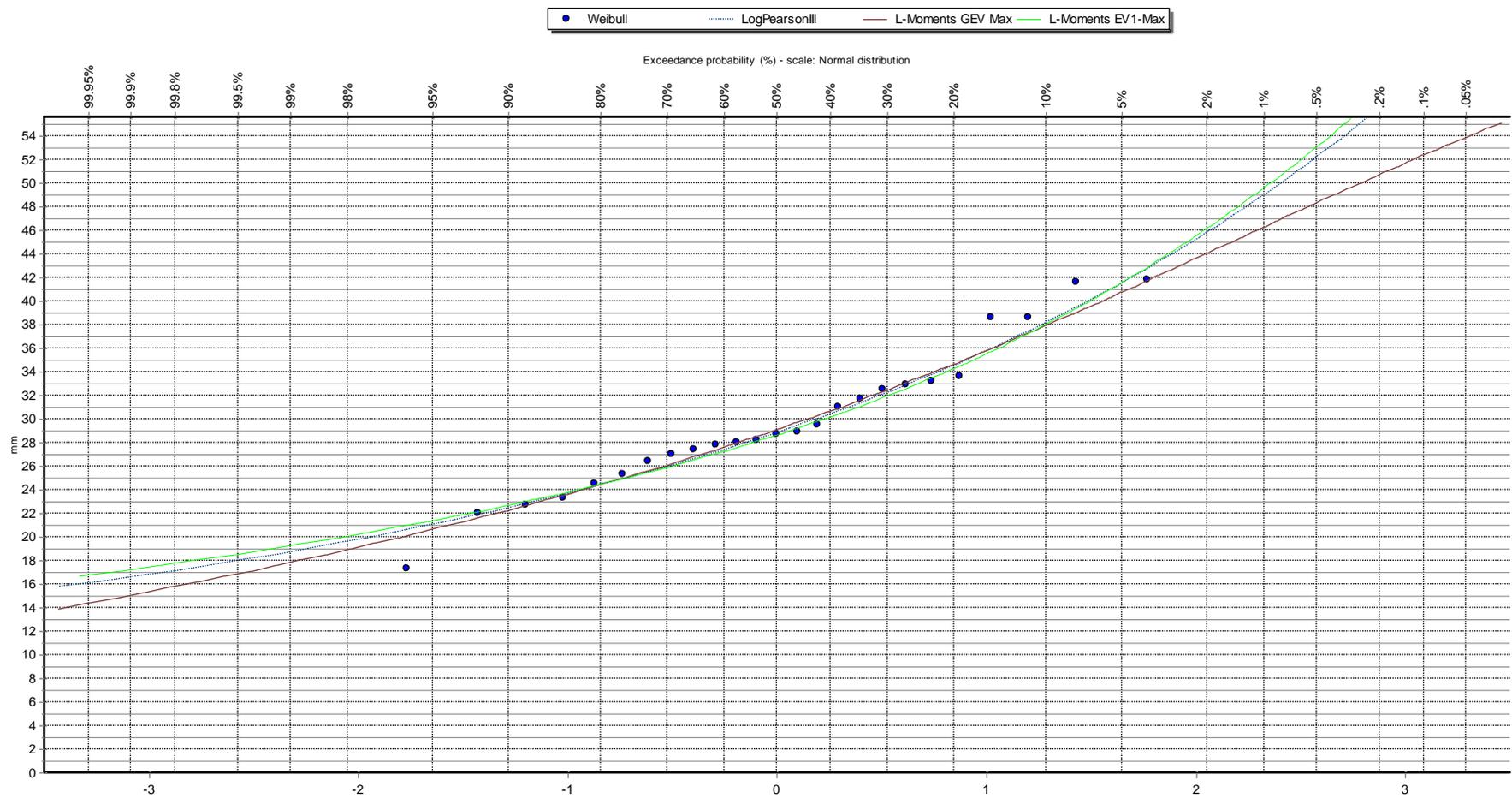


Figura 65: Curva de distribución - Estación Tanta