UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas - Bocapán, Tumbes 2024

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola

Presentado por:

Bach. Jean Piere Herrera Rueda

Tumbes, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas - Bocapán, Tumbes 2024

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Francisco Albuquerque Viera (presidente) : _____

Dr. José Modesto Carrillo Sarango (secretario) : _____

Dr. Eber Gines Tafur (vocal) : _____

Tumbes, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas - Bocapán, Tumbes 2024

Los suscritos declaramos que la Tesis es original en su contenido y forma:

Br. Jean Piere Herrera Rueda (autor) : _____

Dr. Eber Gines Tafur (asesor) : _____

Tumbes, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA

"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

En Tumbes, a los TREINTA días del mes de JUNIO del dos mil veinticinco, siendo las TRECE horas, en el aula virtual 2, del **Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias,** se reunieron los Jurados Calificador designados por **RESOLUCIÓN N°0144-2024/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, Dr. Francisco Alburqueque Viera (Presidente) Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Secretario); Dr. Eber Tafur Ginés (Vocal y Asesor) Dr. Napoleón Puño Lecarnaque (Accesitario),** se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, titulada: **"Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas– Bocapan, Tumbes 2024",** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Agrícola,** presentado por el **Bach. Jean Piere Herrera Rueda**, Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo Nº 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al: **Bach. Jean Piere Herrera Rueda** APROBADO por UNANIMIDAD, con el calificativo SOBRESALIENTE se hace conocer al sustentante, que deberá levantar observaciones finales echas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda APTO para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de **Ingeniero Agrícola**, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria Nº 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las CATORCE horas y CINCUENTA minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 30 de JUNIO 2025

Dr. Francisco Alburqueque Viera DNI Nº: 03605124 CODIGO ORCID: 000-0002-7468-5386 Presidente	**Dr. José Modesto Carrillo Sarango** DNI Nº: 00223850 CODIGO ORCID: 0000-0003-0841-3064 Secretario
Dr. Eber Ginés Tafur DNI N° : 17542075 CODIGO ORCID: 000-0003-0366-443 Vocal y Asesor	**Dr. Napoleón Puño Lecarnaque** DNI N° : ..... CODIGO ORCID ..... Accesitario

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
JMI/JCO

Jean Piere Herrera Rueda

Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas - Bo...

Eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas - Bocapán, Tumbes 2...

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:475014367

Fecha de entrega
20 jul 2025, 14:50 GMT-5

Fecha de descarga
20 jul 2025, 14:57 GMT-5

Nombre de archivo
TESIS - JEAN PIERE HERRERA RUEDA.docx

Tamaño de archivo
12.4 MB

102 Páginas

14.715 Palabras

80.972 Caracteres

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

turnitin Página 1 of 108 - Portada Identificador de la entrega trn:oid:::3117:475014367

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

17% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
14% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

Fuentes principales

17% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
14% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
repositorio.untumbes.edu.pe		3%
2	Internet	
hdl.handle.net		3%
3	Internet	
repositorio.ucv.edu.pe		1%
4	Internet	
repositorio.ana.gob.pe		<1%
5	Internet	
www.scribd.com		<1%
6	Internet	
repositorio.unan.edu.ni		<1%
7	Trabajos del estudiante	
Universidad de Piura on 2023-11-23		<1%
8	Internet	
repositorioacademico.upc.edu.pe		<1%
9	Trabajos del estudiante	
Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2020-10-02		<1%
10	Internet	
www.pik-potsdam.de		<1%
11	Internet	
vsip.info		<1%

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

turnitin Página 3 of 108 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:475014367

12 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2023-02-15 <1%

13 Internet
repositorio.unsch.edu.pe <1%

14 Trabajos del estudiante
Webster University on 2022-11-14 <1%

15 Trabajos del estudiante
Universidad Tecnologica de los Andes on 2023-11-28 <1%

16 Trabajos del estudiante
Universidad de Guayaquil on 2022-11-02 <1%

17 Internet
repositorio.uniandes.edu.co <1%

18 Internet
laccei.org <1%

19 Trabajos del estudiante
Universidad Tecnologica de los Andes on 2020-01-23 <1%

20 Trabajos del estudiante
Universitat Politècnica de València on 2024-07-05 <1%

21 Trabajos del estudiante
Universidad Cesar Vallejo on 2024-11-19 <1%

22 Trabajos del estudiante
unasam on 2023-02-21 <1%

23 Trabajos del estudiante
Instituto Tecnologico de Costa Rica on 2023-05-30 <1%

24 Internet
repositorio.unap.edu.pe <1%

25 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2022-10-26 <1%

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

turnitin Página 4 of 108 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:475014367

26	Internet	
pirhua.udep.edu.pe		<1%
27	Trabajos del estudiante	
uncedu on 2024-08-06		<1%
28	Internet	
repositorio.utea.edu.pe		<1%
29	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional Agraria La Molina on 2024-12-18		<1%
30	Internet	
distancia.udh.edu.pe		<1%
31	Trabajos del estudiante	
Universidad Andina del Cusco on 2024-12-03		<1%
32	Trabajos del estudiante	
Universidad de Piura on 2023-11-24		<1%
33	Trabajos del estudiante	
Universidad Privada Boliviana on 2022-06-11		<1%
34	Internet	
acolita.com		<1%
35	Internet	
repositorio.udh.edu.pe		<1%
36	Internet	
www.slideshare.net		<1%
37	Internet	
tesis.usat.edu.pe		<1%
38	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2024-07-10		<1%
39	Internet	
dspace.ucuenca.edu.ec		<1%

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

turnitin Página 5 of 108 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:475014367

40 Internet

repositorio.unsaac.edu.pe <1%

41 Trabajos del estudiante

Atlantic International University on 2015-05-31 <1%

42 Internet

repositorio.ug.edu.ec <1%

ING. GINES TAFUR, EBER
ORCID: 0000-0003-0366-4438

turnitin Página 6 of 108 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:475014367

DEDICATORIA

A mi padre Jhony, cuya dedicación y esfuerzo no solo me han brindado el apoyo necesario para alcanzar esta meta, sino que también fueron mi inspiración para estudiar ingeniería. Su ejemplo ha sido clave en mi formación.

A mi madre Yojani, por su apoyo incondicional y sus consejos, que me han guiado en los momentos importantes.

A mi hermano Wilson, por su respaldo y apoyo a lo largo de este camino.

A mi hermana Alessandra, cuya compañía ha sido una gran motivación.

Agradecimientos

A mi asesor de tesis Dr. Eber Gines Tafur por su disposición y orientación en el desarrollo de esta tesis.

Especial agradecimiento a Ambar, por su compañía y apoyo constante, que me motivaron a seguir adelante en cada etapa de este proceso.

Y a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a mi desarrollo como persona y profesional.

Índice general

1. Introducción 14
2. Revisión de literatura 15
2.1. Antecedentes 15
2.2. Marco teórico 16
2.2.1. Características de una Cuenca 16
2.2.2. Ciclo hidrológico 17
2.2.3. Precipitación 18
2.2.4. Medida de la precipitación 19
2.2.5. Producto grillado de precipitación 19
2.2.6. Análisis de tormentas 21
2.2.7. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia 22
2.2.8. Tiempo de concentración 22
2.2.9. Modelos hidrológicos 24
2.2.10. Clasificación de modelos hidrológicos 24
3. Materiales y métodos 26
3.1. Materiales, equipos y software 26
3.1.1. Materiales 26
3.1.2. Equipos 26
3.1.3. Software 26
3.2. Ubicación 27
3.2.1. Ubicación Geográfica 27
3.2.2. Ubicación Geodésica 27
3.3. Metodología 28
3.3.1. Técnicas de recolección de datos 28
3.3.2. Procedimiento para el cálculo de parámetros morfológicos 29
3.3.3. Determinación de la eficacia 33
3.3.4. Distribución estadística 34
3.3.5. Curvas I-D-F y hietogramas de diseño 36
3.3.6. Caudales máximos con Modelación HEC-HMS 37
3.3.7. Caudales máximos con Método racional modificado 39
3.3.8. Caudales máximos con Método de Creager 39
4. Resultados y discusión 40
4.1. Resultados 40

4.1.1. Delimitación de la cuenca 40
4.1.2. Parámetros morfológicos de la cuenca 41
4.1.3. Datos de precipitación 44
4.1.4. Validación de datos 53
4.1.5. Distribución estadística de las precipitaciones 55
4.1.6. Curvas I-D-F y hietogramas de diseño 59
4.1.7. Caudales máximos con modelación HEC-HMS 67
4.1.8. Caudales máximos con el Método racional modificado 69
4.1.9. Caudales máximos con el Método de Creager 71
4.1.10. Análisis de tendencia 74
4.1. Discusión 76
5. Conclusiones 79
6. Recomendaciones 80
7. Referencias bibliográficas 81
8. Anexos 83

Índice de tablas

Tabla N° 01: Ubicación Geopolítica de la cuenca Bocapán 27

Tabla N° 02: Ubicación Geodésica de la cuenca Bocapán 27

Tabla N° 03: Métricas estadísticas de validación 33

Tabla N° 04: Parámetros morfológicos de la cuenca Bocapán 42

Tabla N° 05: Métricas estadísticas de validación – RAIN4PE 53

Tabla N° 06: Métricas estadísticas de validación – PISCO 55

Tabla N° 07: Precipitación máxima (mm/día) de la cuenca Bocapán – RAIN4PE 56

Tabla N° 08: Prueba de Smirnov de Log-Pearson tipo III 57

Tabla N° 09: Precipitaciones máximas para distintos periodos de retorno 59

Tabla N° 10: Precipitación máxima de diseño para duraciones menores a 24h (mm) 59

Tabla N° 11: Intensidades de diseño para duraciones menores a 24h (mm) ... 61

Tabla N° 12: Método del bloque alterno para un TR = 2 años 63

Tabla N° 13: Resultados del método del bloque alterno para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 1000 años 64

Tabla N° 14: Parámetros de entrada, modelo HEC-HMS 67

Tabla N° 15: Número de curva de la cuenca Bocapán 68

Tabla N° 16: Caudales máximos con HEC-HMS 68

Tabla N° 17: Intensidad de precipitación para distintos periodos de retorno 69

Tabla N° 18: Coeficientes – Método Racional Modificado 69

Tabla N° 19: Caudales máximos con el Método racional modificado 71

Tabla N° 20: Parámetros de ingreso – Método de Creager 72

Tabla N° 21: Caudales máximos con el Método de Creager 74

Índice de Figuras

Figura N° 01: Ciclo hidrológico, representación cualitativa 18

Figura N° 02: Clasificación de modelos hidrológicos según la naturaleza de los algoritmos esenciales. 24

Figura N° 03: Mapa de ubicación de la cuenca Bocapán 27

Figura N° 04: Flujograma de metodología para determinar la eficacia del cálculo de caudales máximos 28

Figura N° 05: Búsqueda de datos en Alaska.edu 29

Figura N° 06: Descarga de datos en Alaska.edu 29

Figura N° 07: Visualización de MED descargados en ArcMap 30

Figura N° 08: Resultado de la unión del mosaico 31

Figura N° 09: Resultado de la herramienta Flow Direction 31

Figura N° 10: Resultado de la herramienta Flow Accumulation 32

Figura N° 11: Ubicación del SNAP (desembocadura) 32

Figura N° 12: Ventana Model_1 de HidroCalc 32

Figura N° 13: Cuenca delimitada 40

Figura N° 14: Curvas de nivel – Cuenca Bocapán 40

Figura N° 15: Red de drenaje – Cuenca Bocapán 41

Figura N° 16: Estructura del Model_2 de HidroCalc 41

Figura N° 17: Ingreso de datos en HidroCalc 42

Figura N° 18: Curva Hipsométrica de la cuenca Bocapán 43

Figura N° 19: Frecuencia de altitudes de la cuenca Bocapán 44

Figura N° 20: Puntos de drenaje para subcuencas de orden 5 45

Figura N° 21: Subcuencas de orden 5 – cuenca Bocapán 45

Figura N° 22: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V1 47

Figura N° 23: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V2 47

Figura N° 24: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V3 48

Figura N° 25: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V4 48

Figura N° 26: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V5 49
Figura N° 27: datos de precipitación Estación Cañaveral 49
Figura N° 28: Datos de precipitación disponibles 50
Figura N° 29: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V1 51
Figura N° 30: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V2 51
Figura N° 31: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V3 52
Figura N° 32: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V4 52
Figura N° 33: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V5 53
Figura N° 34: Coeficiente de determinación R^2 54
Figura N° 35: Distribución estadística con HidroCalc 57
Figura N° 36: Ajuste de distribuciones teóricas 58
Figura N° 37: Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) 62
Figura N° 38: Hietograma de diseño para un TR = 2 años..... 63
Figura N° 39: Hietograma de diseño para un TR = 5 años..... 64
Figura N° 40: Hietograma de diseño para un TR = 10 años..... 65
Figura N° 41: Hietograma de diseño para un TR = 25 años..... 65
Figura N° 42: Hietograma de diseño para un TR = 50 años..... 65
Figura N° 43: Hietograma de diseño para un TR = 100 años..... 66
Figura N° 44: Hietograma de diseño para un TR = 200 años..... 66
Figura N° 45: Hietograma de diseño para un TR = 500 años..... 66
Figura N° 46: Hietograma de diseño para un TR = 1000 años..... 67
Figura N° 47: Creación de proyecto en HEC-HMS..... 67
Figura N° 48: Análisis de tendencia de caudales calculados 74

Índice de anexos

Anexo N° 01: Model_1 modelo en ArcMap para delimitación de cuenca 83

Anexo N° 02: Mapa de la Cuenca Bocapán 84

Anexo N° 03: Código en RStudio para extracción de datos 85

Anexo N° 04: Datos de precipitación mensual RAIN4PE de la Cuenca Bocapán periodo 01/1981 – 12/2015..... 85

Anexo N° 05: Análisis de correlación: Data RAIN4PE vs Est. Cañaveral..... 95

Anexo N° 06: Código en RStudio para validación de datos 96

Anexo N° 07: Número de curva – Cuenca Bocapán 97

Anexo N° 08: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 2 años..... 98

Anexo N° 09: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 5 años..... 98

Anexo N° 10: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 10 años..... 99

Anexo N° 11: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 25 años..... 99

Anexo N° 12: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 50 años..... 100

Anexo N° 13: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 100 años..... 100

Anexo N° 14: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 200 años..... 101

Anexo N° 15: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 500 años..... 101

Anexo N° 16: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 1000 años..... 102

RESUMEN

El estudio de eventos hidrológicos extremos, como las precipitaciones intensas, es clave para la gestión del agua y la prevención de desastres en zonas vulnerables. En la región Tumbes, la quebrada Casitas – Bocapán ha experimentado crecidas significativas debido a fenómenos como El Niño, provocando inundaciones y daños en infraestructura y áreas agrícolas. Sin embargo, la falta de registros confiables de precipitación y caudales en esta cuenca dificulta la estimación precisa de caudales máximos, lo que es fundamental para el diseño de defensas ribereñas y obras de mitigación.

Este estudio evalúa la eficacia del cálculo de caudales máximos con el producto grillado de precipitación RAIN4PE en la quebrada Casitas – Bocapán. Se analizaron datos de RAIN4PE desde 1981 hasta 2014 y se validaron con registros de la estación Cañaveral del SENAMHI utilizando métricas estadísticas como R^2, RMSE, MAE, PBIAS y NSE.

Los resultados mostraron que RAIN4PE ofrece estimaciones consistentes de precipitación, especialmente en la subcuenca V3, donde se obtuvieron las métricas de validación más óptimas ($R^2 = 0.9648$, NSE = 0.9549). Los caudales obtenidos con HEC-HMS y el Método racional modificado son comparables hasta un período de retorno de 100 años, confirmando la fiabilidad de RAIN4PE en ese rango.

En conclusión, RAIN4PE es una herramienta eficaz para la estimación de caudales máximos en la quebrada Casitas-Bocapán, especialmente para períodos de retorno entre 2 y 100 años, proporcionando información útil para el diseño de medidas de prevención y mitigación en la región.

Palabras clave: RAIN4PE, caudales máximos, HEC-HMS, precipitación grillada, quebrada Casitas-Bocapán.

ABSTRACT

The study of extreme hydrological events, such as intense rainfall, is key to water management and disaster prevention in vulnerable areas. In the Tumbes region, the Casitas – Bocapán stream has experienced significant flooding due to phenomena such as El Niño, causing flooding and damage to infrastructure and agricultural areas. However, the lack of reliable records of precipitation and flows in this basin makes it difficult to accurately estimate maximum flows, which is essential for the design of riverbank defenses and mitigation works.

This study evaluates the effectiveness of calculating maximum flows with the RAIN4PE gridded precipitation product in the Casitas – Bocapán stream. RAIN4PE data from 1981 to 2014 were analyzed and validated with records from the SENAMHI Cañaveral station using statistical metrics such as R^2, RMSE, MAE, PBIAS and NSE.

The results showed that RAIN4PE provides consistent precipitation estimates, especially in the V3 sub-basin, where the most optimal validation metrics were obtained (R^2 = 0.9648, NSE = 0.9549). The flows obtained with HEC-HMS and the Modified Rational Method are comparable up to a return period of 100 years, confirming the reliability of RAIN4PE in that range.

In conclusion, RAIN4PE is an effective tool for the estimation of maximum flows in the Casitas-Bocapán stream, especially for return periods between 2 and 100 years, providing useful information for the design of prevention and mitigation measures in the region.

Keywords: RAIN4PE, maximum flows, HEC-HMS, gridded precipitation, Casitas-Bocapán stream.

1. Introducción

ANA (2019), en su informe "*Consejos de Recursos Hídricos de Cuenca Tumbes",* menciona que: La Quebrada Bocapán (también llamada Casitas) es una de las más grandes del norte de Perú. Nace en Cañaveral, por la unión de las quebradas Cherrelique y Gramadal, y desemboca en el océano Pacífico, discurriendo en su totalidad por territorio peruano. El área total de su cuenca de drenaje es de 986 km^2.

Asimismo, ANA (2019) menciona que la quebrada Bocapán es bastante accidentada y solo produce un escurrimiento de agua en épocas de lluvia. Las pendientes son más pronunciadas en la parte alta de la cuenca y menos importantes en la parte baja, donde se forma un gran valle denominado Casitas que presenta características desérticas debido al carácter intermitente del curso de agua y la escasa vegetación existente.

En la región de Tumbes, la quebrada Casitas-Bocapán puede ser testigo de crecidas significativas debido a fenómenos climáticos como El Niño, lo que ha generaría inundaciones y daños en la infraestructura y áreas agrícolas.

La falta de datos históricos confiables de precipitación en esta cuenca dificulta la estimación precisa de los caudales máximos, lo que es esencial para el diseño de defensas ribereñas y estructuras de mitigación. Por ejemplo, en el estudio de Garabito (2021), se utilizó datos de precipitación de la estación Cañaveral para estimar caudales máximos con los métodos estadísticos de Gumbel, Creager, Izskowski y Log-Pearson III. Sin embargo, la dependencia de una sola estación hace que sea necesario buscar alternativas para mejorar la precisión de la estimación hidrológica.

Según Manchay y otros (2023), afirman que RAIN4PE es un nuevo conjunto de datos de precipitación cuadriculada diaria obtenido mediante la fusión de datos de precipitación de múltiples fuentes (Precipitación Infrarroja del Grupo de Riesgos Climáticos basados en satélites, CHIRP, reanálisis ERA5 y precipitación en el suelo con la elevación del terreno utilizando el método de regresión de bosque aleatorio.

En este contexto, el producto grillado de precipitación RAIN4PE surge como una herramienta innovadora para estimar valores de precipitación en áreas donde no hay estaciones meteorológicas.

Además, Fernandez-Palomino y otros (2022), en su informe “Generación del producto grillado de precipitación para Perú y Ecuador (RAIN4PE) y aplicación en el modelamiento hidrológico de las cuencas del Perú”, concluyen que: El producto de precipitación RAIN4PE resultó ser más confiable y preciso para el modelado hidrológico de las cuencas hidrográficas peruanas y ecuatorianas en comparación con otros productos de precipitación como ERA5, CHIRP, CHIRPS, MSWEP y PISCO. Asimismo, el enfoque utilizado para la generación de RAIN4PE se puede utilizar en otras regiones con escasez de datos.

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar la eficacia del cálculo de caudales máximos con el uso de RAIN4PE en la quebrada Casitas-Bocapán, lo que permitirá obtener una mayor comprensión de los riesgos asociados a las crecidas y contribuir a mejorar las medidas de prevención y planificación en esta cuenca vulnerable. Los resultados de esta investigación servirán como base para futuras investigaciones y proyectos que busquen mitigar los efectos de los eventos hidrológicos extremos en la región de Tumbes.

2. Revisión de literatura

2.1. Antecedentes

Según Garabito (2021), en su Tesis denominada “Estimación del caudal máximo en cuencas secas para diseño de defensa ribereña - caso quebrada Casitas-Bocapán Tumbes – 2020”, concluye que:

> El caudal máximo de diseño para un periodo de retorno de 50 años en la cuenca seca caso quebrada Casitas Bocapán es de: 635.84 m3/s. Con el método empírico de Izskowski a través de información de precipitación se logró elaborar una data histórica de 30 años, teniendo un caudal máximo de 661.08 m3/s en el año de 1998 y un caudal mínimo 29.10 m3/s en el año de 1996. Mediante el método de Manning se validó la información

obtenida por Gumbel y Log Pearson III obteniendo un caudal de 615.95m3/s y 635.84 m3/s respectivamente.

Por otro lado, Ortiz y Salinas (2022), en su Tesis denominada “Modelamiento hidráulico con el software Iber para el diseño de defensa ribereña de la Quebrada Bocapán - Tumbes – 2022” concluyen que:

> Se obtuvo información cartográfica de la página ALOS PALSAR para delimitar la cuenca Bocapán, como resultado dio un área de 893.074 km2, perímetro 206.236 km, longitud de 76.283 km, cota mínima 7 m.s.n.m., cota máxima 1539 m.s.n.m., pendiente promedio de la cuenca 21.17 % y con una curva numero de 62. Se calculó un caudal de diseño para un periodo de retorno de 140 años, utilizando los métodos estadísticos de Gumbel, del Método Racional Modificado y el Hec Hms, donde se eligió un Q. diseño: 800m3/s.

Asimismo, Cornejo (2023), en su Tesis denominada “Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango – Tumbes 2022”, concluye que:

> Con respecto a los resultados derivados del análisis hidrológico realizado en los tres sectores seleccionados para la calibración y validación, se determina que el producto final más óptimo es RAIN4PE, el cual según las métricas de desempeño evaluadas nos dice que este producto es capaz de representar correctamente las magnitudes y la estacionalidad de los caudales observados.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Características de una Cuenca

a) Delimitación de una cuenca

Es fundamental en la descripción de una cuenca hidrográfica. Esta delimitación se logra trazando una línea imaginaria sobre las divisiones de agua en las áreas llanas de un curso de agua, lo que facilita la identificación clara de los límites entre cuencas adyacentes. Esto permite

la adecuada distribución del escurrimiento generado por las precipitaciones en la parte superior de estas llanuras.

b) Perímetro de la Cuenca (P)

Es la medida total de los bordes de la cuenca; El perímetro (P) corresponde a la extensión del límite externo de la cuenca y varía en función del área y la configuración de la cuenca.

c) Pendiente media de una Cuenca (S)

Es el promedio ponderado de todas las pendientes asociadas a las áreas críticas donde la pendiente máxima se presume constante. Esta medida se calcula tradicionalmente dividiendo la diferencia de elevación entre dos puntos por la longitud del curso de agua.

d) Índice de Compacidad o Coeficiente de Gravelius (kc)

El índice de compacidad se define como la proporción entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que tiene la misma área que la cuenca.

Por otro lado, Villón (2002) manifiesta que:

> "Este índice de compacidad, trata de expresar la influencia del perímetro y el área de la cuenca en la escorrentía, particularmente las características del hidrograma".

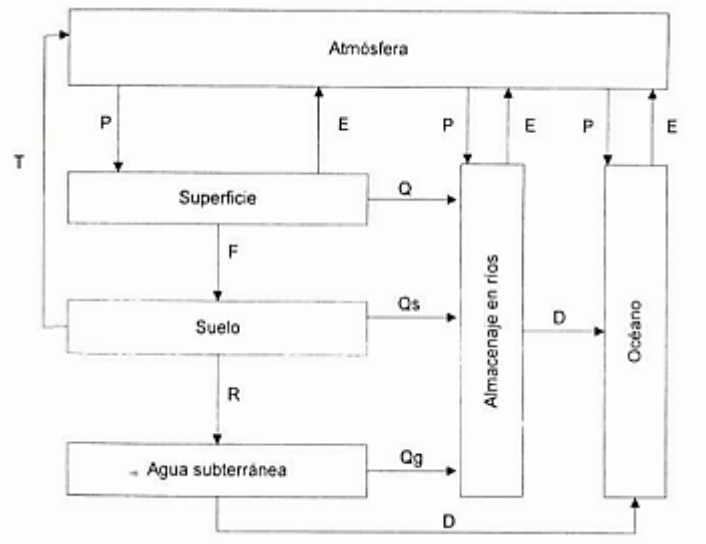
2.2.2. Ciclo hidrológico

Según Ordoñez (2011), afirma que:

> El ciclo hidrológico "se entiende como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (superficial, sub - superficial, subterránea, etc.). El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte circulatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el

agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento)". (p. 10)

Figura N° 01: Ciclo hidrológico, representación cualitativa



Fuente: Hidrología, Máximo Villón (2002)

E: evaporación	P: precipitación	T: transpiración
Q: escurrimiento superficial	Q_s: escurrimiento subsuperficial	Q_g: escurrimiento subterráneo
F: infiltración	D: descarga a los océanos	R: recarga

2.2.3. Precipitación

Según Campomanes (2015), afirma que:

La precipitación "Es toda forma de humedad, que originándose. En las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas las garúas, y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación".

Asimismo, manifiesta que: "También se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve y granizo)".

2.2.4. Medida de la precipitación

Según Campomanes (2015), afirma que:

> La cantidad de precipitación se expresa en unidades de lámina caída y acumulada sobre una superficie plana e impermeable. Para dichas mediciones se utilizan pluviómetros y pluviógrafos. Todas las formas de precipitación son medidas sobre la base de la altura vertical de agua que podría acumularse sobre un nivel superficial.

a) Pluviómetros registradores

Según Campomanes (2015), afirma que:

> Los pluviómetros registradores "Son aparatos que registran la precipitación automáticamente, en intervalos de tiempo pequeños. Estos medidores son más costosos y más propensos a error, pero pueden ser la única forma posible para ciertos sitios remotos y de difícil acceso. Estos medidores tienen la gran ventaja que indican la intensidad de la precipitación, la cual es un factor de importancia en muchos problemas."

b) Pluviógrafo

Según Villón (2022) precisa que:

> El Pluviógrafo "Es un instrumento, que registra la altura de lluvia en función del tiempo, lo cual permite determinar la intensidad de la precipitación, dato importante para el diseño de estructuras hidráulicas. Los pluviógrafos más comunes son de forma cilíndrica, y el embudo receptor está ligado a un sistema de flotadores, que originan el movimiento de una aguja sobre un papel registrador."

2.2.5. Producto grillado de precipitación

Un producto grillado de precipitación es una herramienta que utiliza datos de precipitación recolectados de diversas fuentes, como estaciones meteorológicas y satélites, para crear mapas o modelos que representan

la distribución espacial y temporal de la lluvia en una determinada área geográfica.

Entre los productos aplicables para el territorio del Perú se encuentran Rain4PE (lluvia para Perú y Ecuador), y el producto PISCO del SENAMHI

a) Rain4PE

RAIN4PE representa una innovadora recopilación de datos de precipitación diaria en forma de grilla, obtenidos al fusionar información de precipitación de diversas fuentes con la elevación del terreno utilizando el método de regresión forestal aleatoria. Además, RAIN4PE se ajusta hidrológicamente al utilizar información de caudales en cuencas donde se ha subestimado la precipitación, empleando la metodología de hidrología inversa.

Asimismo, según Manchay y otros (2023)

> RAIN4PE es el único producto de precipitación cuadriculado para Perú y Ecuador, que se beneficia del máximo de observaciones in situ disponibles, múltiples fuentes de precipitación, datos de elevación y se complementa con datos de caudal para corregir la subestimación de la precipitación en páramos y cuencas montañosas.

b) PISCO

Según Aybar Camacho et al. (2017), afirman que:

> El producto PISCO de precipitación (PISCO p) en su versión diaria y mensual es el resultado de la combinación y reanálisis de datos de estaciones terrenas con climatologías, y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (5 x 5 km); los datos grillados abarcan una serie temporal que inicia el 01 de enero del 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016.

2.2.6. Análisis de tormentas

Según Campomanes (2015), afirma que:

> El propósito de examinar la lluvia de una tormenta es adquirir información sobre las cualidades específicas de esa tormenta en particular. La altura se calcula considerando las diferentes combinaciones de superficie y duración, y comúnmente se presenta mediante tablas o gráficos. En conjunto, estos análisis proporcionan datos valiosos para diseñar vertedores y para estudiar pronósticos cuantitativos de precipitación.

Asimismo, manifiesta que durante el análisis de tormentas se tiene que considerar:

Intensidad: cantidad de precipitación (mm) por unidad de tiempo (h)

$$I_{máx} = P/t$$

Donde:

$I_{máx}$ = intensidad máxima en mm/hr

P = Precipitación en mm

t = tiempo en horas

Duración : tiempo de duración de la tormenta

Frecuencia : número de repeticiones de la tormenta.

Periodo de retorno: intervalo de tiempo promedio durante el cual se espera que un evento de determinada magnitud sea igualado o superado al menos una vez.

$$T = \frac{1}{f}$$

Donde:

T : periodo de retorno en años

$\boldsymbol{f}$: frecuencia

2.2.7. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia

Según Cadavid (2007), afirma que:

> Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) constituyen la base climatológica para la estimación de los caudales de diseño de diferentes obras hidráulicas. Estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos.

$$i = \frac{P}{T}$$

Donde:

i : intensidades de lluvia (mm)

P : precipitación (mm)

T : duración de lluvia (h)

2.2.8. Tiempo de concentración

Según Ibáñez et al. (2011), definen el Tiempo de Concentración como:

> "El tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida".

Asimismo, se describen las siguientes fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración (Tc):

- Fórmula de Témez:

$$Tc = 0.3\left(\frac{L}{S_0^{0.25}}\right)^{0.75}$$

Donde:

Tc : tiempo de concentración (h)

L : Longitud del cauce principal (km)

S_0 : pendiente media del cauce principal (%)

- Fórmula de Kirpich:

$$Tc = 0.95\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Donde:

Tc : tiempo de concentración (h)

L : longitud del cauce principal (km)

H : altura de inicio a fin (m)

- Fórmula de Bransby Williams:

$$Tc = \frac{L}{1.5D}\sqrt[5]{\frac{M^2}{F}}$$

Donde:

Tc : tiempo de concentración (h)

L : longitud del cauce principal (km)

D : diámetro del círculo equivalente (km^2)

M : área de la cuenca (km^2)

F : pendiente media del cauce principal (%)

2.2.9. Modelos hidrológicos

Según Búñuga (2019), afirma que:

> Los modelos hidrológicos tratan de representar el ciclo hidrológico con la finalidad de reproducir el fenómeno lluvia-escurrimiento que se produce en un espacio físico conocido como cuenca hidrográfica.

Por otro lado, Cabrera (2012) manifiesta que:

> Los modelos de cuenca son un reflejo de cómo entendemos el sistema cuenca y su respuesta. Su capacidad predictiva depende de cómo los construimos y cómo los aplicamos, y la calidad de las predicciones es generalmente consistente con la calidad de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa.

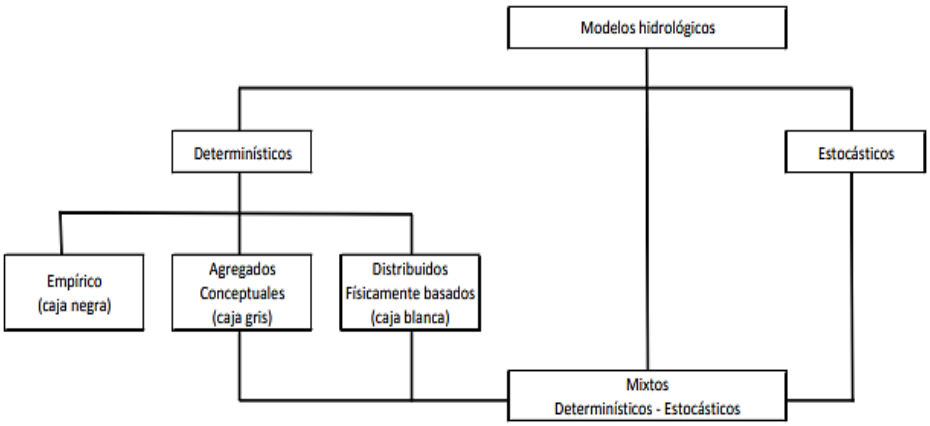
Esto implica que no hay un modelo único que pueda adaptarse a todas las cuencas del mundo: cada cuenca tiene características muy específicas en términos de clima, geografía, geología, etc., lo que resalta la importancia de algunos procesos sobre otros y determina la estructura del modelo.

2.2.10. Clasificación de modelos hidrológicos

Cabrera (2012) en su artículo denominado “Modelos Hidrológicos” se centra en tres aspectos fundamentales que son de utilidad para la modelización hidrológica de cuencas:

- Según la definición de los fundamentos de los procesos esenciales; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos,
- De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos,
- Y de acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.

Figura N° 02: Clasificación de modelos hidrológicos según la naturaleza de los algoritmos esenciales.



Fuente: Refsgaard y Abbott, 1996.

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales, equipos y software

3.1.1. Materiales

- Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona en estudio

  Fuente: Búsqueda de datos ASF (alaska.edu)

- Shapefile de cuencas menores de la región Tumbes

  Fuente: Observatorio Nacional de Recursos Hídricos (ana.gob.pe)

- Shapefile de ríos y quebradas de la región Tumbes

  Fuente: Observatorio Nacional de Recursos Hídricos (ana.gob.pe)

- Data grillada de precipitación RAIN4PE

  Fuente: Rain for Perú and Ecuador (RAIN4PE) (gfz-potsdam.de)

- Data grillada de precipitación PISCO

  Fuente: SENAMHI - Perú

- Registro histórico de precipitaciones, estación Cañaveral

  Fuente: SENAMHI - Perú

- Útiles de escritorio

3.1.2. Equipos

- Laptop hp Core i3

3.1.3. Software

- ArcGIS 10.4
- HidroCALC v2.0
- RStudio (R 4.3.1)
- HEC HMS 4.11
- Microsoft Office 2016

3.2. Ubicación

3.2.1. Ubicación Geopolítica

Tabla N° 01: Ubicación Geopolítica de la cuenca Bocapán

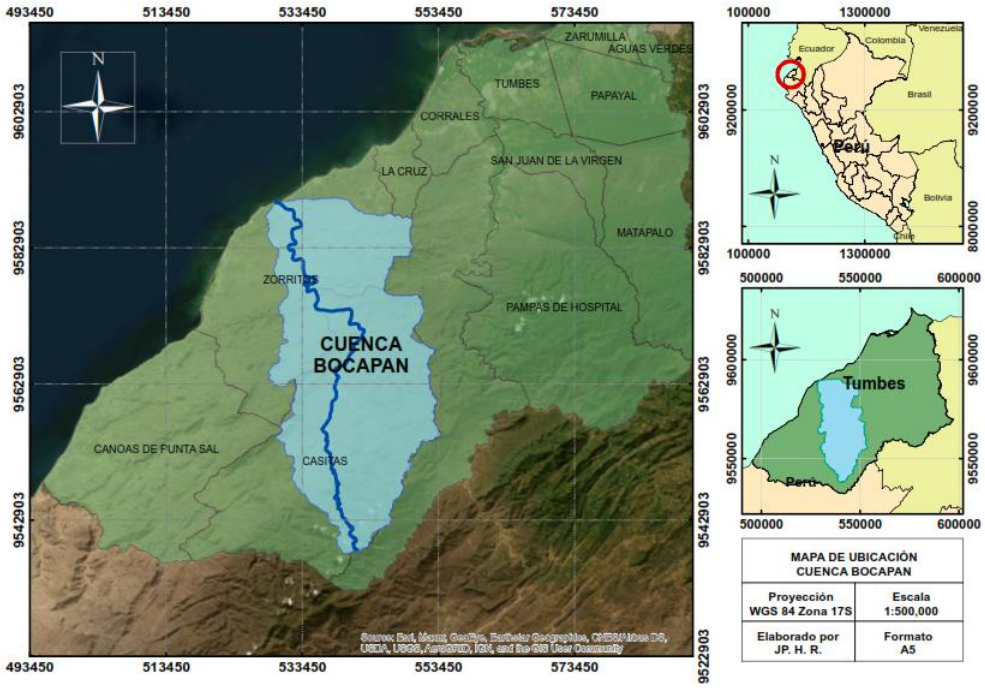
Región	Provincia	Distritos
Tumbes	Contralmirante Villar	Casitas, Zorritos

3.2.2. Ubicación Geodésica

Tabla N° 02: Ubicación Geodésica de la cuenca Bocapán

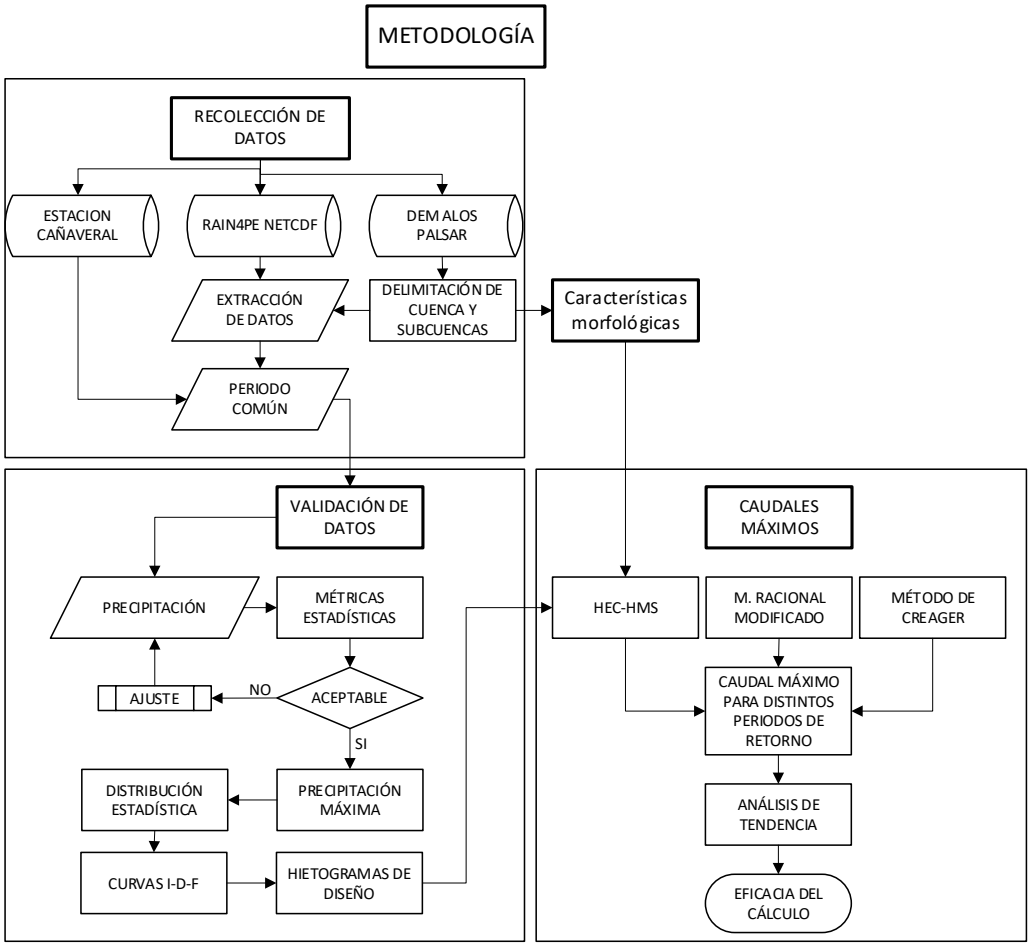
Coordenadas UTM(m)		Altitud media	DATUM Geodésico	Zona / Banda
Norte	Este			
9589698	529558	339.975 m.s.n.m.	WGS84	17 S
9587008	549483			
9555150	553389			
9537813	539865			
9563547	528959			

Figura N° 03: Mapa de ubicación de la cuenca Bocapán



3.3. Metodología

Figura N° 04: Flujograma de metodología para determinar la eficacia del cálculo de caudales máximos



3.3.1. Técnicas de recolección de datos

a) ArcGIS 10.5

Inicialmente, se empleó el software de información geográfica ArcGIS para delimitar la cuenca.

b) RStudio

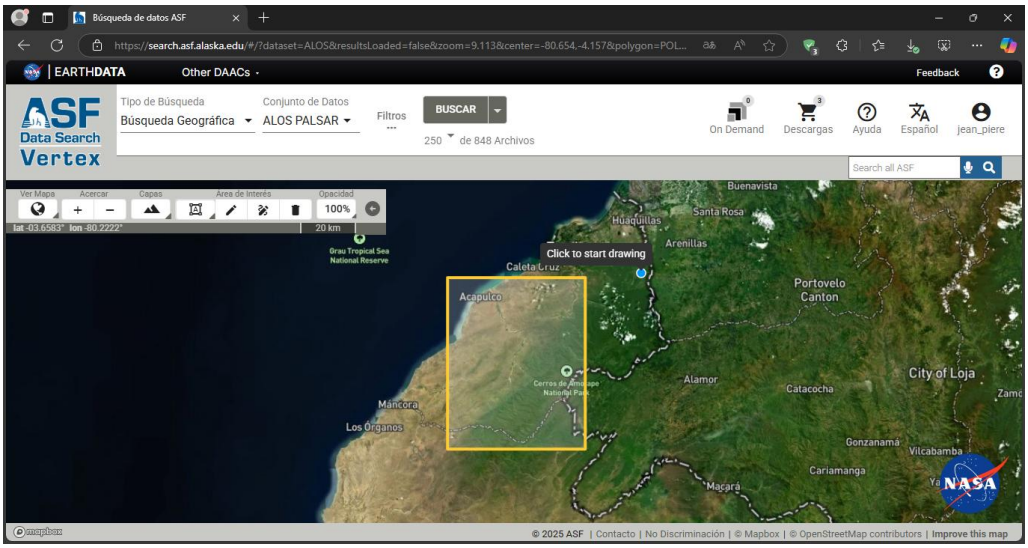
Se empleó el software libre RStudio con el motor R 4.4.2. para el recorte y extracción de la data de precipitaciones RAIN4PE en formato NetCDF, para su posterior procesamiento, análisis estadístico y elaboración de gráficos.

3.3.2. Procedimiento para el cálculo de parámetros morfológicos

Delimitación de la cuenca

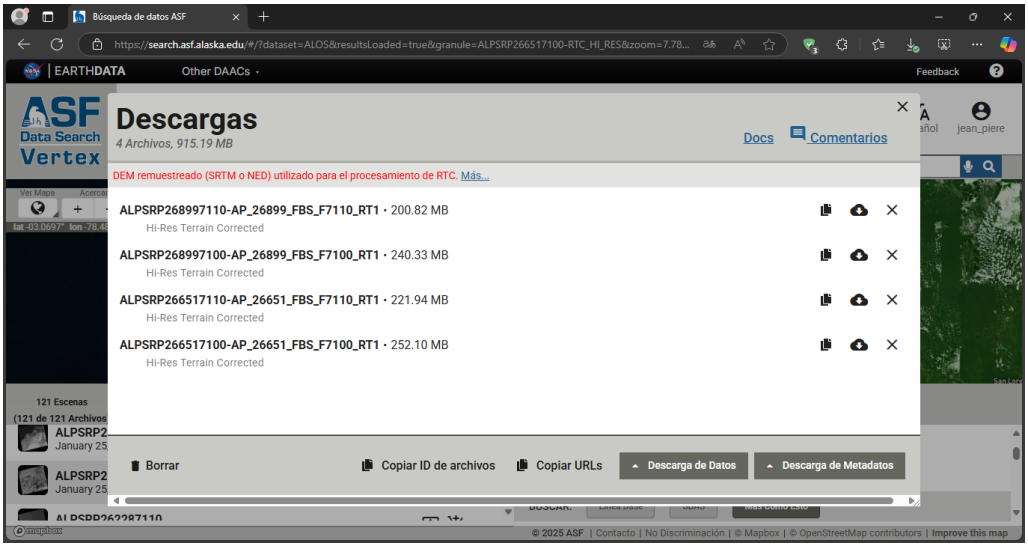
Para la delimitación de la cuenca Casitas – Bocapán se usó el Modelo Digital de Elevación (MDE) Alos Palsar de 12.5 m x 12.5 m de resolución, obtenido de: [Búsqueda de datos ASF (alaska.edu)](https://search.asf.alaska.edu/).

Figura N° 05: Búsqueda de datos en Alaska.edu



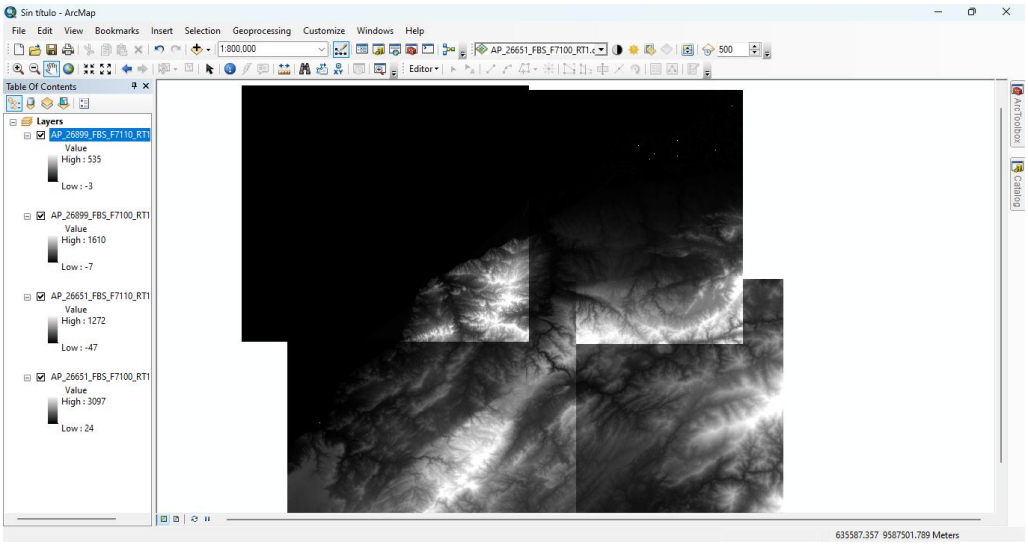
En la búsqueda de datos se dibujó un polígono aproximado en la zona de estudio y se aplicó el filtro “Hi-Res Terrain Corrected” para el conjunto de datos ALOS PALSAR

Figura N° 06: Descarga de datos en Alaska.edu



Se usó ArcMap para abrir los MED descargados

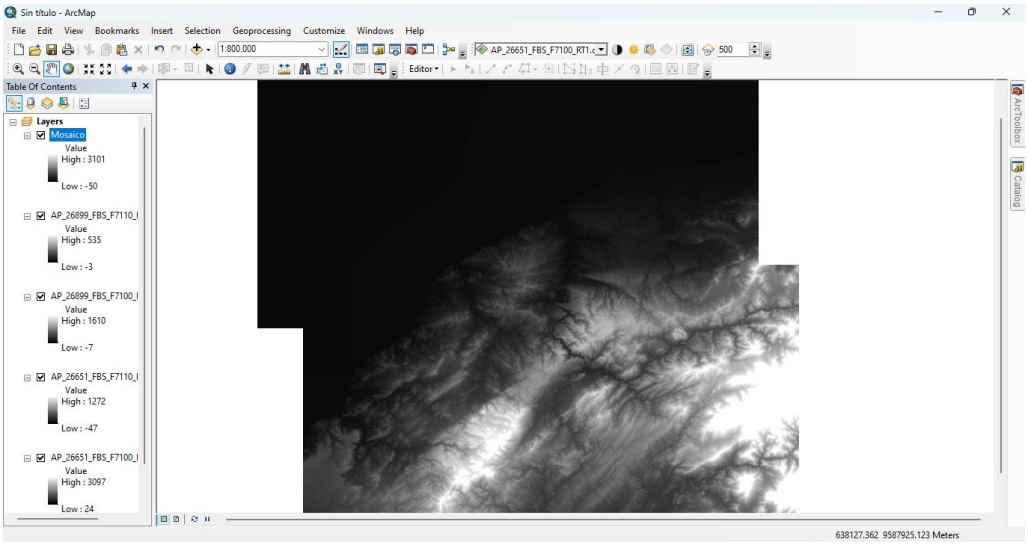
Figura N° 07: Visualización de MED descargados en ArcMap



Se aplicó la herramienta "*Mosaic To New Raster*" contenida en ArcToolbox:

ArcToolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic To New Raster

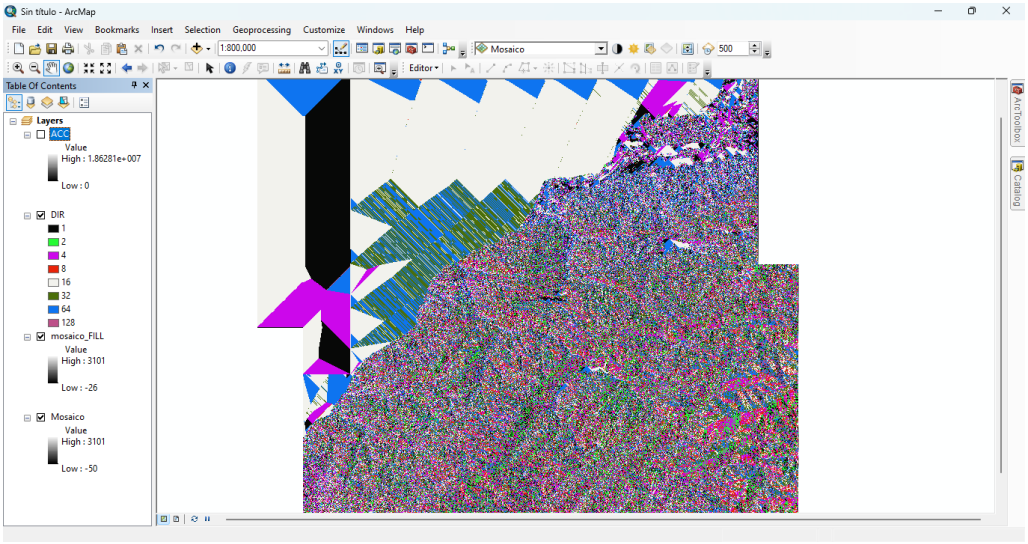
Figura N° 08: Resultado de la unión del mosaico



Una vez obtenido el MED para toda el área de estudio se procesó para obtener los ráster de dirección de flujo y acumulación de flujo, necesarios para la delimitación de la cuenca:

Flow Direction: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*

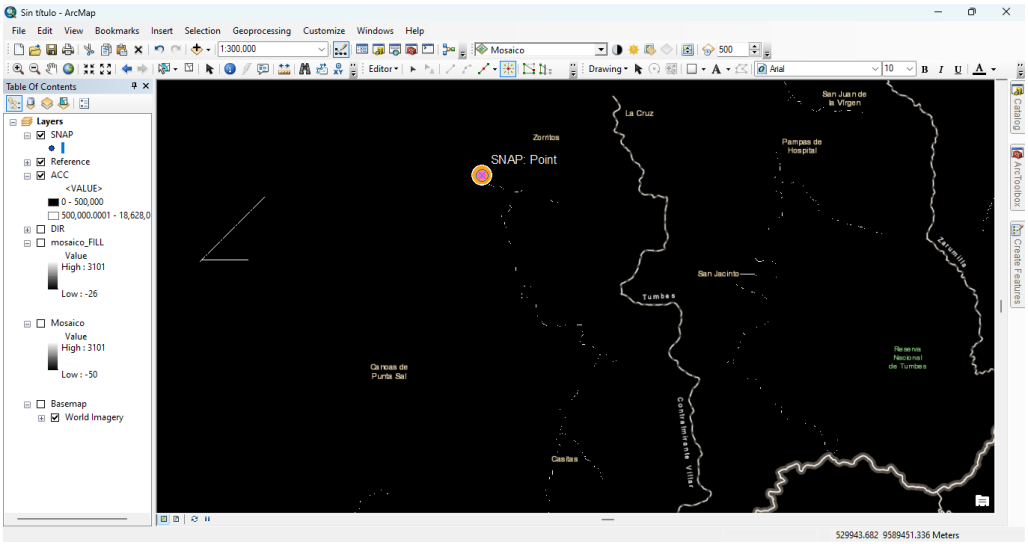
Figura N° 09: Resultado de la herramienta Flow Direction



Flow Accumulation: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation*

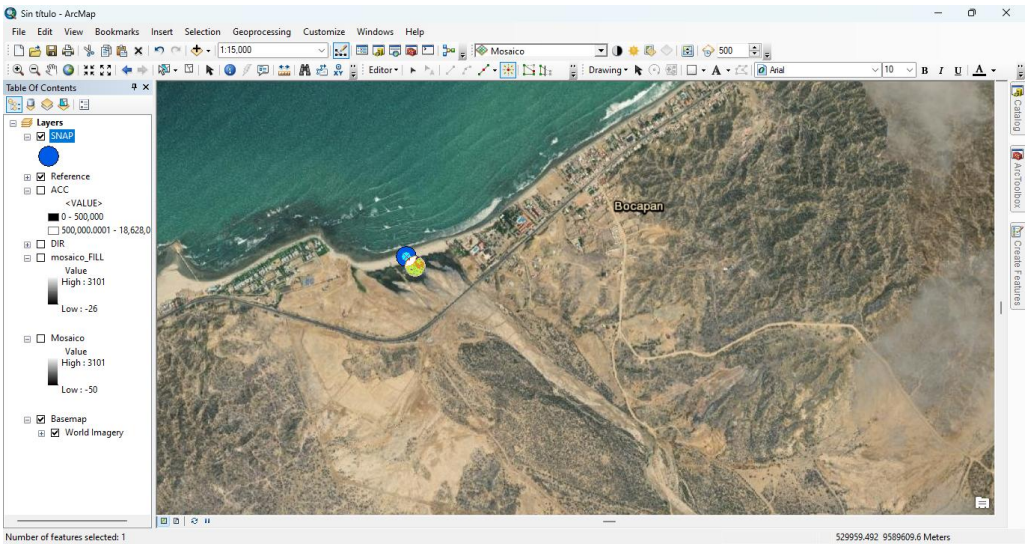
AL obtener la acumulación de flujo, se insertó un punto de referencia para definir el punto de salida

Figura N° 10: Resultado de la herramienta Flow Accumulation



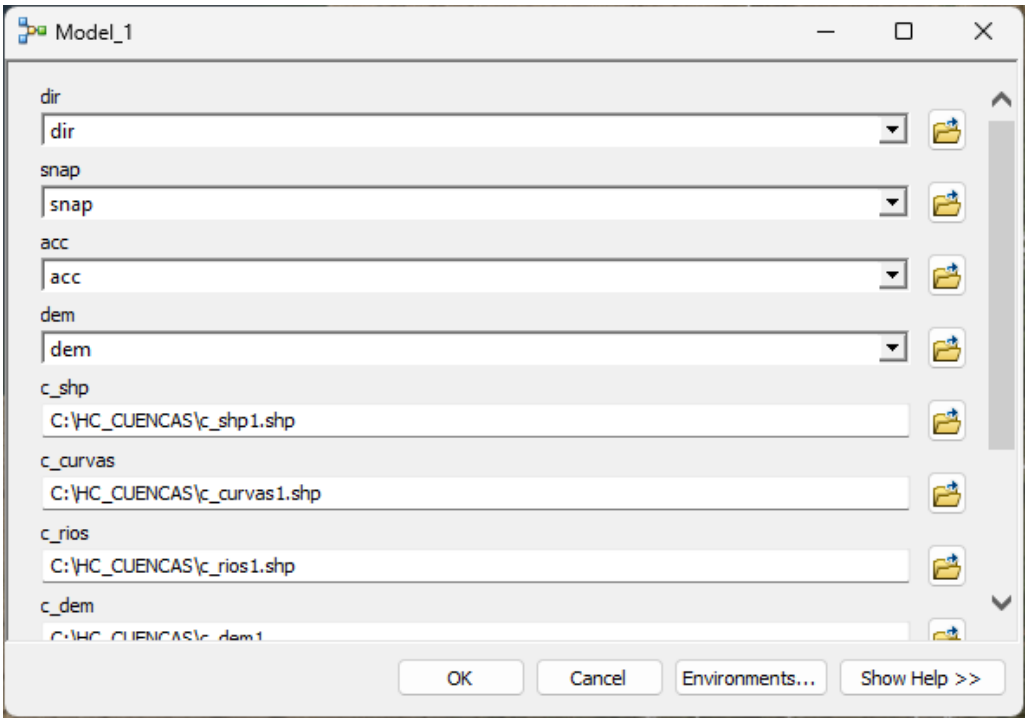
Verificamos la ubicación del SNAP (punto de salida o desembocadura) con el uso de un mapa base disponible en ArcMap

Figura N° 11: Ubicación del SNAP (desembocadura)



Aplicamos el Model_1 de HidroCalc_gisTool, el cual nos pidió ingresar la dirección de flujo, el punto snap, la acumulación de flujo y el MED para obtener la delimitación de la cuenca, curvas de nivel, cauce y ríos.

Figura N° 12: Ventana Model_1 de HidroCalc



Parámetros morfológicos de la cuenca

Para la obtención de los parámetros morfológicos de la cuenca se empleó el software HidroCalc V2.0 de UNU INGENIEROS, el cual emplea las fórmulas descritas en su artículo “Manual de referencias” obtenido de mReferenciasHC2.pdf

3.3.3. Determinación de la eficacia

Para determinar la eficacia del producto grillado de precipitación Rain4PE, se aplicaron métricas estadísticas para evaluar el desempeño meteorológico y validar la data, teniendo como datos observados la data de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Tabla N° 03: Métricas estadísticas de validación

Métrica	Descripción	Fórmula	Valor óptimo
R^2	Coeficiente de determinación	$1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\hat{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}$	1
RMSE	Raíz del error medio cuadrático	$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}$	0

MAE	Error absoluto medio	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert O_i - S_i\rvert$	0
PBIAS	Sesgo estadístico porcentual	$\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \times 100$	0
NSE	Índice de Nash – Sutcliffe	$1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$	1

Nota: n: número de datos, Q_i: valor observado, S_i: valor simulado.

Se comparará con los resultados obtenidos luego de realizar el mismo procedimiento con el producto grillado PISCO del SENAMHI.

3.3.4. Distribución estadística

Con el fin de evaluar el mejor ajuste que nos permitió obtener las precipitaciones de diseño para distintos periodos de retorno, se aplicó la fórmula de Kolmogorov–Smirnov para las siguientes distribuciones estadísticas:

- Normal
- Gamma
- Gamma 3P
- Log-Normal 2P
- Log-Pearson tipo III
- Gumbel

De la obtención de la distribución con el mejor ajuste se procedió a calcular los valores de precipitación correspondientes para distintos periodos de retorno según las siguientes fórmulas:

- Distribución Normal

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2}$$

Donde:

x: variable independiente

$\bar{X}$: media aritmética

S: desviación estándar

- Distribución Gamma

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1}e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta\gamma\Gamma(\gamma)}$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} x^{\gamma-1}e^{-x}dx$$

Donde:

γ: parámetro de forma

β: parámetro de escala

$\Gamma(\gamma)$: función Gamma

Distribución Gamma 3P

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^{\gamma-1}e^{-\frac{x-x_0}{\beta}}}{\beta\gamma\Gamma(\gamma)}$$

Donde:

x: variable aleatoria

x_0: parámetro de posición

β: parámetro de escala

γ: parámetro de forma

$\Gamma(\gamma)$: función Gamma

- Distribución Log-Normal 2P

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\Pi}\sigma_y}e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$$

Donde:

μ_y: parámetro de escala (media)

σ_y: desviación estándar de los logaritmos naturales de x

- Distribución Log-Pearson tipo III

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{\ln x - x_0}{\beta}}}{x\beta\gamma\Gamma(\gamma)}$$

Donde:

x_0: parámetro de posición

β: parámetro de escala

γ: parámetro de forma

- Distribución Gumbel

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-\mu}{\alpha} - e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

Donde:

α: parámetro de escala

μ: parámetro de posición

3.3.5. Curvas I-D-F y hietogramas de diseño

Se estimó la precipitación en intervalos menores a 24 horas, fórmula:

$$\boldsymbol{P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25}}$$

P_D = precipitación máxima de duración D, en mm

P_{24H} = precipitación máxima de 24 horas, en mm

D = duración de la precipitación

Intensidad de precipitación:

$$\boldsymbol{I = \frac{P_D}{D}}$$

PD = precipitación máxima de duración D, en mm

D = duración de la precipitación, en horas

Ecuación de intensidad, duración y frecuencia (curvas I-D-F):

$$\mathrm{I} = \frac{K \times T^{m}}{D^{n}}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de retorno (años)

D = Duración de la precipitación (min)

3.3.6. Caudales máximos con Modelación HEC-HMS

Según la US Army Corps of Engineers (2023), afirma que:

> HEC-HMS, un software especializado en modelación hidrológica, se ha diseñado específicamente para replicar los procesos completos que tienen lugar en sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas. Este programa incorpora una variedad de métodos convencionales para el análisis hidrológico, abarcando desde la infiltración de eventos hasta la generación de hidrogramas unitarios y el enrutamiento hidrológico. Asimismo, el software proporciona herramientas de análisis adicionales para optimizar modelos, predecir caudales, reducir el riesgo de inundaciones, evaluar la incertidumbre en los modelos, analizar la erosión y transporte de sedimentos, así como para evaluar la calidad del agua.

Para llevar a cabo la aplicación de este modelo, se aplicaron los métodos de Curva Número (CN) e Hidrograma unitario como métodos de pérdida y transformación, respectivamente.

a) Método de Número de curva

El número de curva (CN), representa el coeficiente de escorrentía de una cuenca en una serie de curvas, determinadas por la cobertura vegetal y el uso de suelo. Este coeficiente tiene un valor mínimo de 1 y un valor máximo de 100, que representa desde una baja a alta escorrentía, respectivamente.

Fórmula:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Donde:

P_e: exceso de precipitación (escorrentía directa) (mm)

P: precipitación total (mm)

I_a: abstracción inicial (mm)

$$I_a = 0.2 * S$$

S: retención máxima potencial del suelo (mm)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

b) Hidrograma unitario

Representa la precipitación excedente (lluvia efectiva) repartida sobre una cuenca de manera homogénea, que origina un volumen unitario de escorrentía.

Fórmula:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

Donde:

T_p: tiempo al pico del hidrograma (horas)

t_r: duración del exceso de precipitación (horas)

$t_p = 0.6 * t_c$, donde t_c: tiempo de concentración

Caudal pico del hidrograma:

$$Q_p = \frac{2.08 * A * Q}{T_p}$$

Donde:

Q_p: caudal pico (m^3/s)

A: área de la cuenca (km^2)

Q: escorrentía total (mm)

3.3.7. Caudales máximos con Método racional modificado

El Método Racional Modificado es una variante del Método Racional, que se utiliza para estimar caudales máximos en cuencas hidrográficas, a diferencia del método racional clásico, este considera la distribución espacial de la lluvia y la heterogeneidad de la cuenca.

- Fórmula:

$$Q = 0.278 \times CIAK$$

Donde:

Q : caudal máximo (m^3/s)

C : coeficiente de escurrimiento

I : intensidad de precipitación (mm/h)

A : área de la cuenca (km^2)

K : coeficiente de uniformidad

3.3.8. Caudales máximos con Método de Creager

La fórmula para calcular el caudal máximo con el método de Creager es la siguiente:

$$Q = (C_1 + C_2) \times \log(T) \times A^{m \times A^{-n}}$$

Donde:

Q : caudal máximo (m^3/s)

C_1 y C_2: coeficientes definidos por regiones hidráulicas

T : periodo de retorno (años)

A : área de la cuenca (km^2)

m y n : exponentes definidos por regiones hidráulicas

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados

4.1.1. Delimitación de la cuenca

Resultados del Model_1:

Figura N° 13: Cuenca delimitada

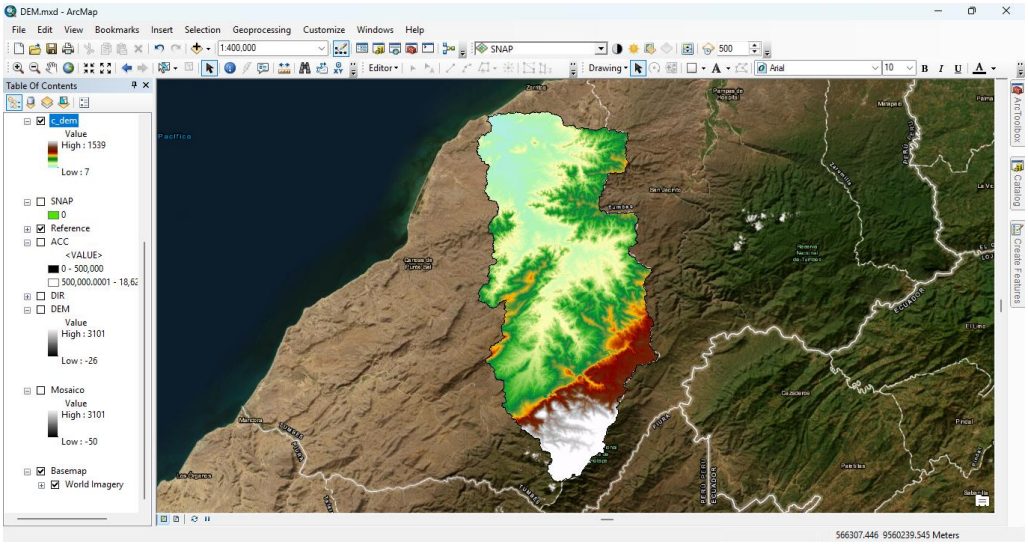


Figura N° 14: Curvas de nivel – Cuenca Bocapán

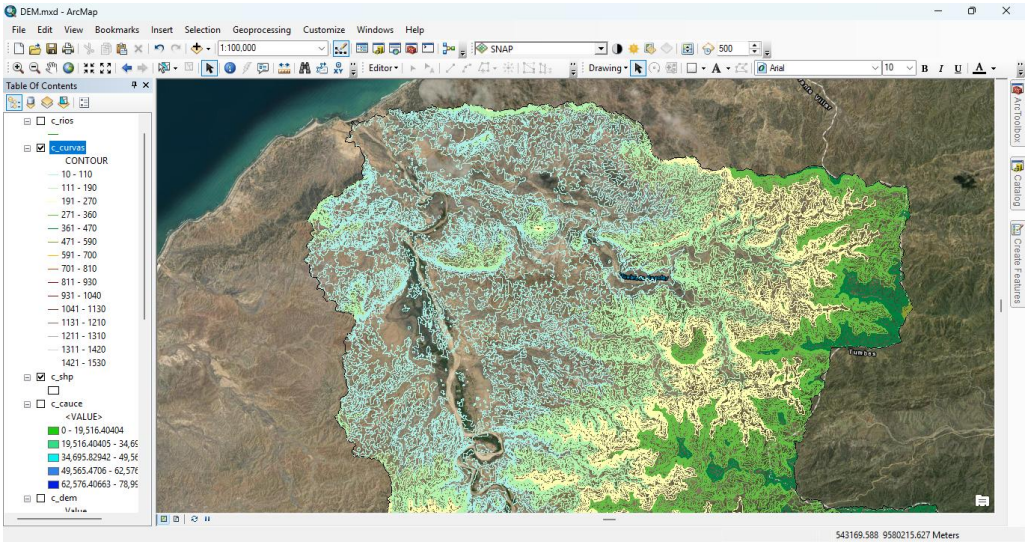
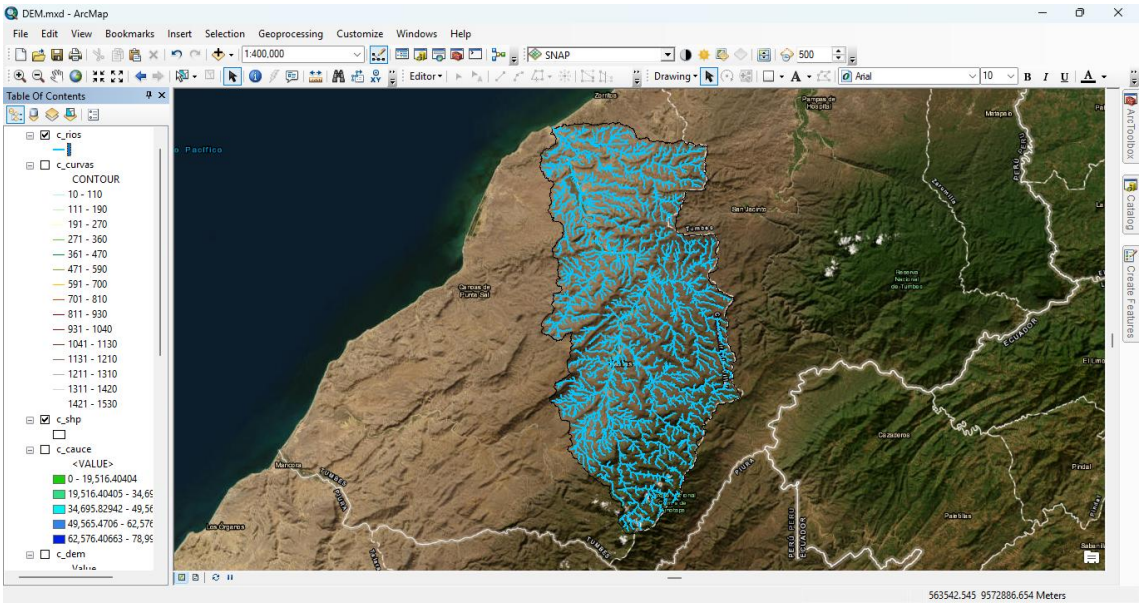
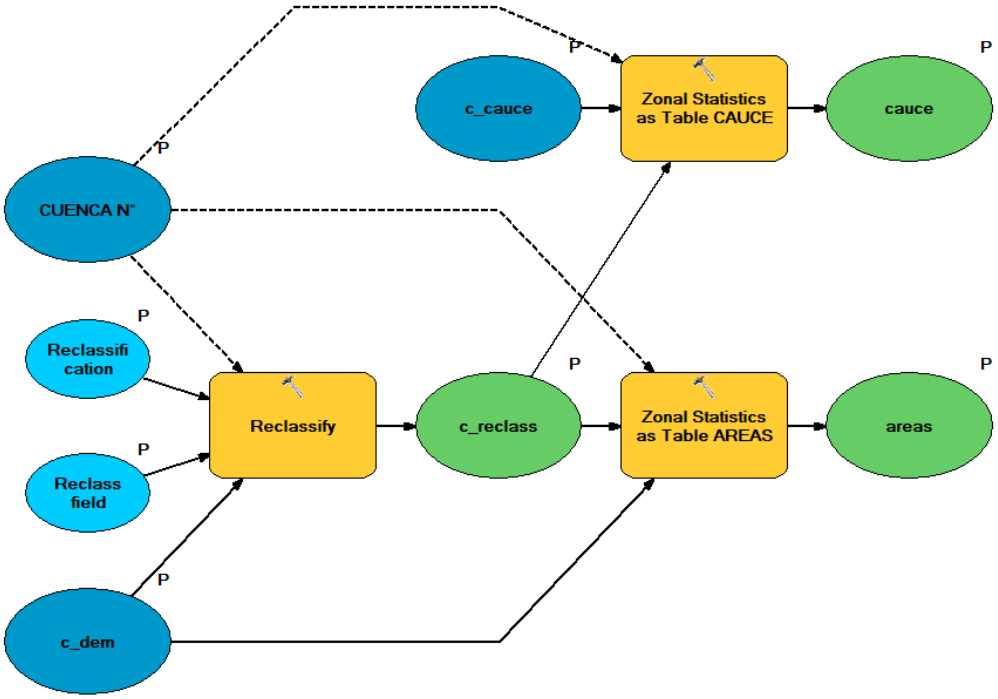


Figura N° 15: Red de drenaje – Cuenca Bocapán



4.1.2. Parámetros morfológicos de la cuenca

Figura N° 16: Estructura del Model_2 de HidroCalc



Se procesó la información obtenida de ArcMap en HidroCalc para obtener los parámetros morfológicos de la cuenca:

Figura N° 17: Ingreso de datos en HidroCalc

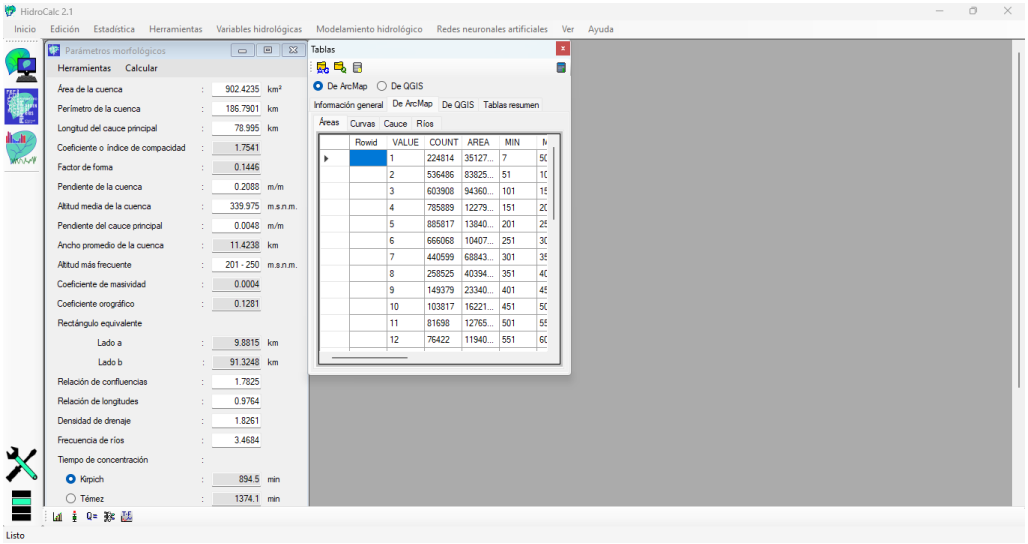


Tabla N° 04: Parámetros morfológicos de la cuenca Bocapán

Área de la cuenca:	902.4235	Km²
Perímetro de la cuenca:	186.7901	Km
Longitud del cauce principal:	78.995	Km
Coeficiente de compacidad:	1.7541	
Factor de forma:	0.1446	
Pendiente de la cuenca:	0.2088	m/m
Altitud media:	339.975	m.s.n.m.
Pendiente del cauce principal:	0.0048	m/m
Ancho promedio:	11.4238	Km
Altitud más frecuente:	201 - 250	m.s.n.m.
Coeficiente de masividad:	0.0004	
Coeficiente orográfico:	0.1281	
Lado a, Rect. Equiv.:	9.8815	Km
Lado b, Rect. Equiv.:	91.3248	Km
Relación de confluencias:	1.7825	
Relación de longitudes:	0.9764	
Densidad de drenaje:	1.8261	
Frecuencia de ríos:	3.4684	
Tc, Kirpich:	894.5	min.
Tc, Témez:	1374.1	min.
Tc, Giandotti:	970.7	min.
Tc, Izzard:	250.5	min.
Tc, SCS:	687.9	min.
Tc, Onda cinemática:	1989.1	min.

El Ancho promedio (11.4238 km), muestra que la cuenca es alargada, lo cual coincide con el factor de forma (0.1446 < 0.2) y el coeficiente de compacidad (1.7541 > 1), que también indican una forma alargada, lo que generalmente implica una respuesta hidrológica más lenta ante eventos de precipitación.

Del resultado de la relación de confluencias (1.7825), relación de longitudes (0.9764), densidad de drenaje (1.8261) y frecuencia de ríos (3.4684) se puede inferir que la cuenca tiene una red de drenaje moderadamente equilibrada con un drenaje eficiente, lo cual sugiere que la escorrentía se distribuye progresivamente y no se concentra de manera abrupta. Sin embargo, aunque los picos de caudal pueden demorar en formarse según el tiempo de concentración, se podrían producir inundaciones ante precipitaciones intensas y de larga duración.

Figura N° 18: Curva Hipsométrica de la cuenca Bocapán

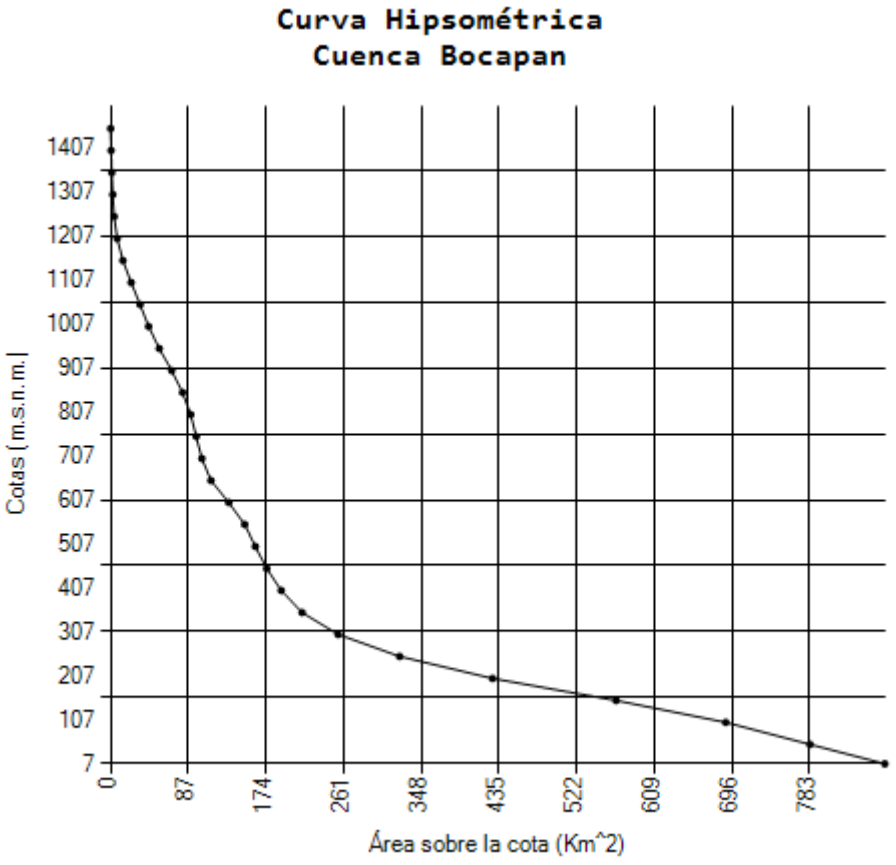
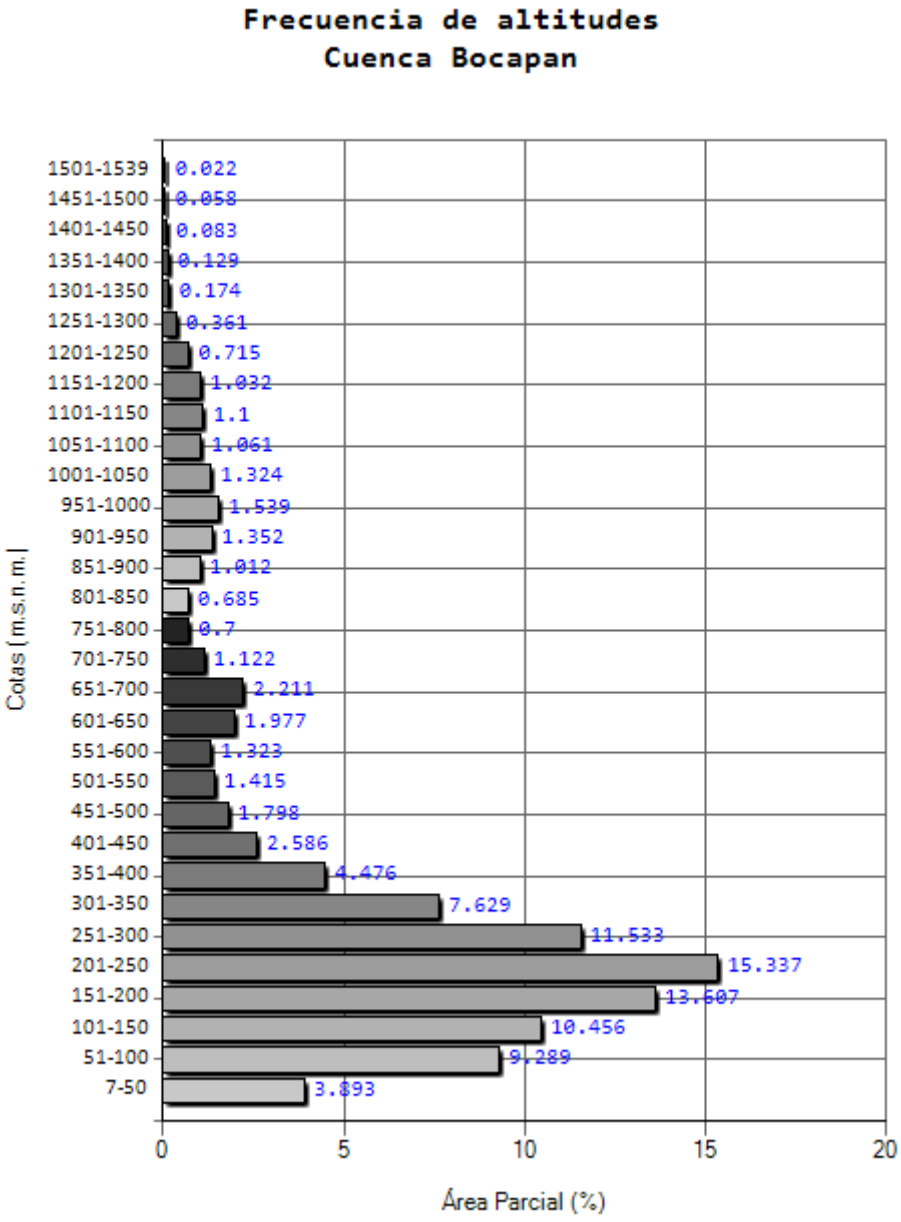


Figura N° 19: Frecuencia de altitudes de la cuenca Bocapán



4.1.3. Datos de precipitación

Para la extracción de datos de precipitación se obtuvo las subcuencas de orden 5 para obtener datos de precipitación media areal:

Se establecieron 5 puntos de drenaje en la desembocadura de los ríos de orden 5, obteniendo 5 subcuencas de orden 5:

Figura N° 20: Puntos de drenaje para subcuencas de orden 5

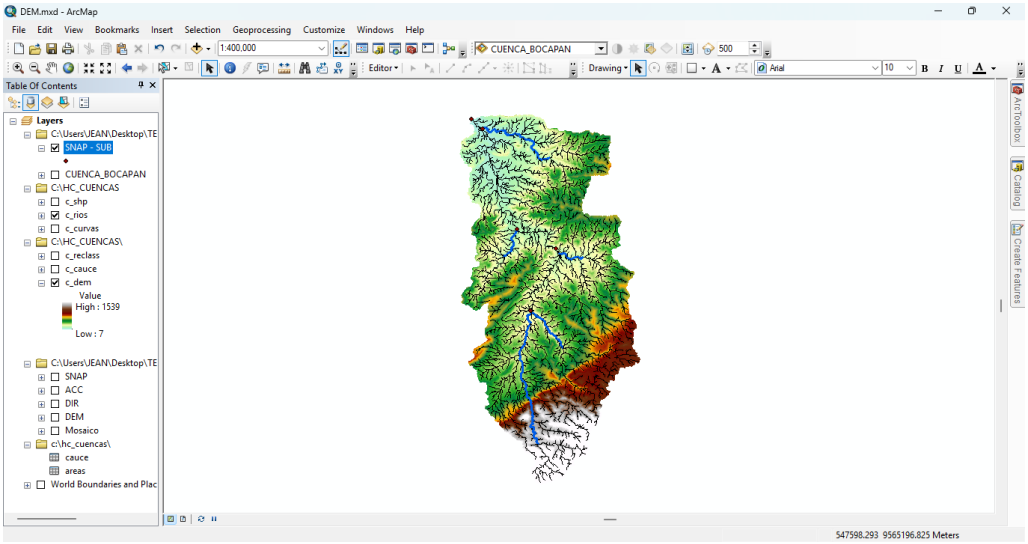
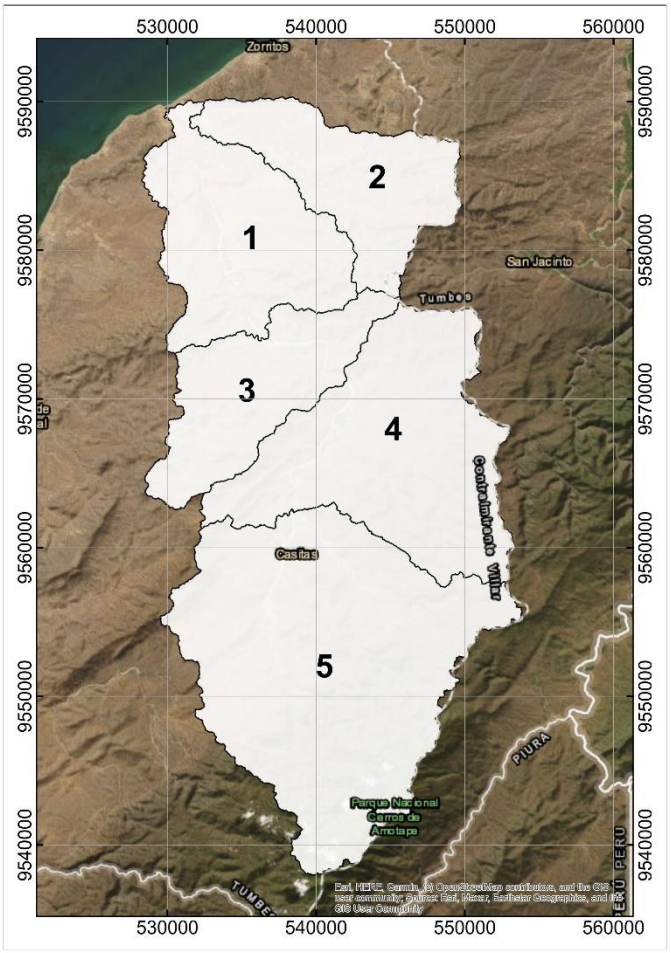


Figura N° 21: Subcuencas de orden 5 – cuenca Bocapán



Posteriormente, se descargó la data de precipitación RAIN4PE en formato NetCDF de https://doi.org/10.5880/pik.2020.010 y se extrajo con código en RStudio:

```
library(sp)
library(raster)
library(ncdf4)

location <- 'C:/Users/JEAN/Desktop/TESIS/CARPETA DE TRABAJO/R'
setwd(location)
UH <- shapefile('C:/Users/JEAN/Desktop/TESIS/CARPETA DE
TRABAJO/SHP/SUBCUENCAS_BOCAPAN.shp')
plot(UH)
pp <- brick("C:/Users/JEAN/Desktop/TESIS/CARPETA DE
TRABAJO/R/NetCDF/RAIN4PE.nc")

# Extraer valores medios de precipitación sobre la cuenca
pp_extracted <- raster::extract(pp, UH, method = 'simple', fun = mean,
na.rm = TRUE)

# Convertir y guardar en CSV
pp_extracted <- t(pp_extracted)
pp_extracted <- round(pp_extracted, 2)
write.csv(pp_extracted, 'RAIN4PE_CUENCA_BOCAPAN.CSV', quote =
FALSE)
```

Data extraída:

Figura N° 22: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V1

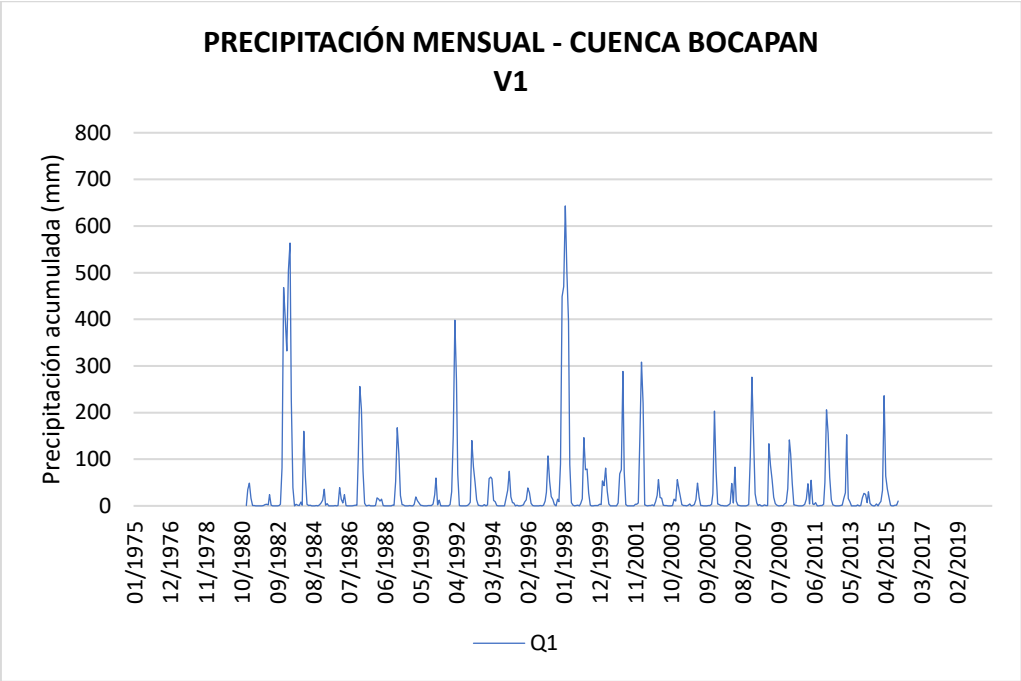


Figura N° 23: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V2

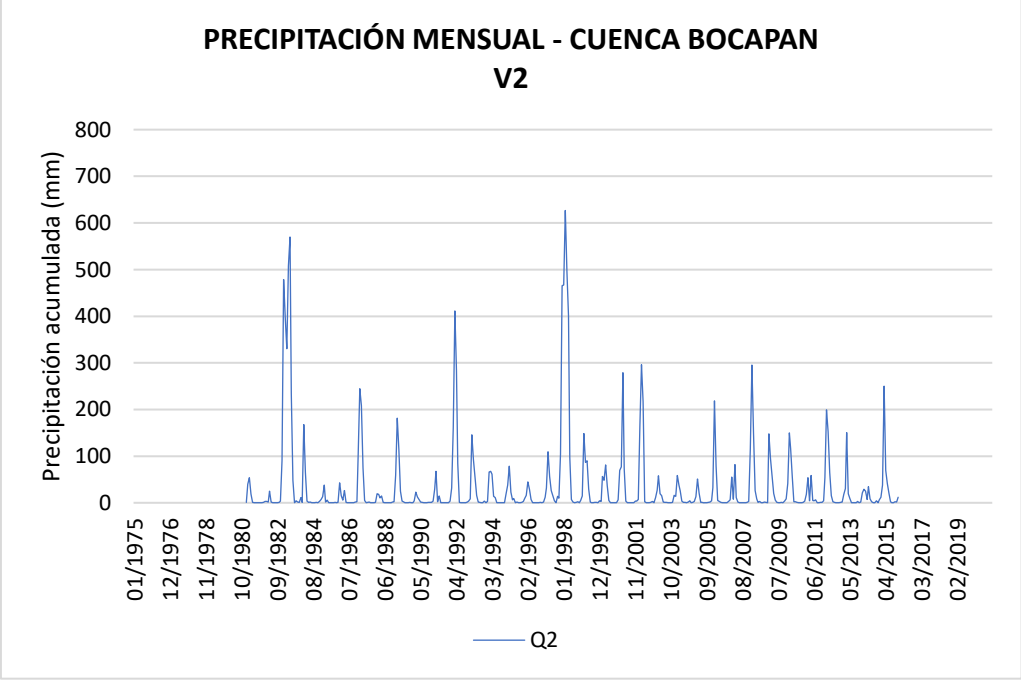


Figura N° 24: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V3

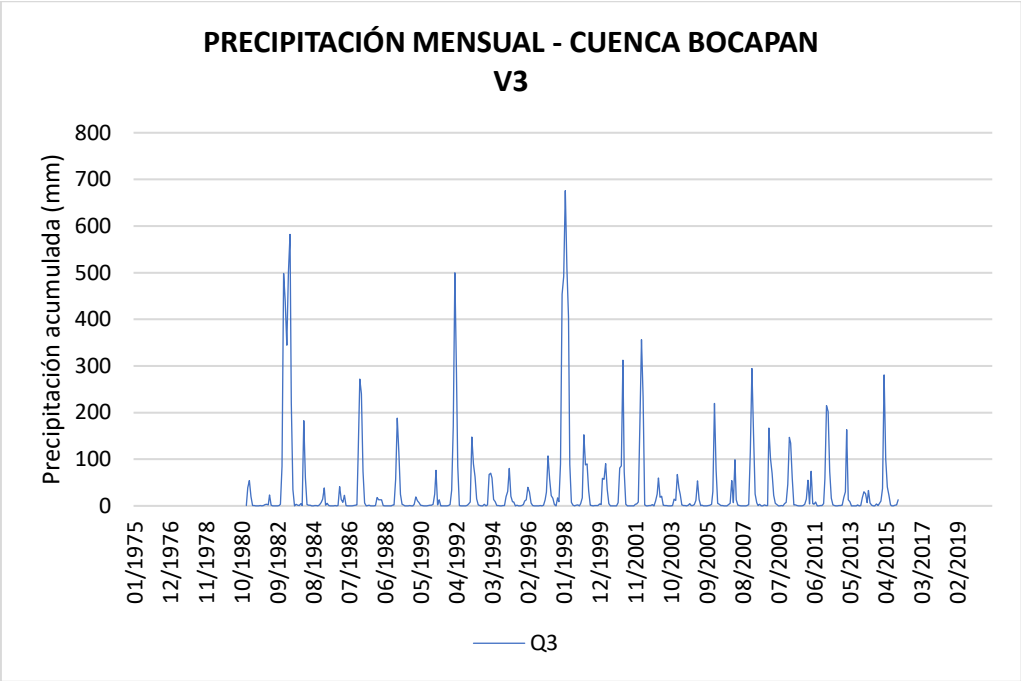


Figura N° 25: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V4

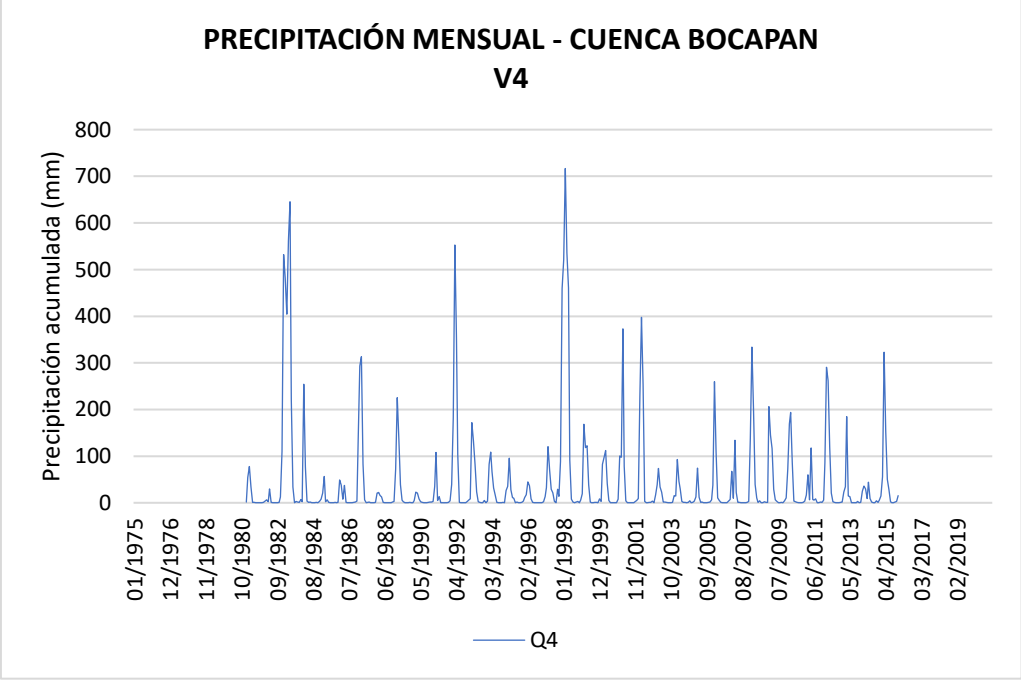
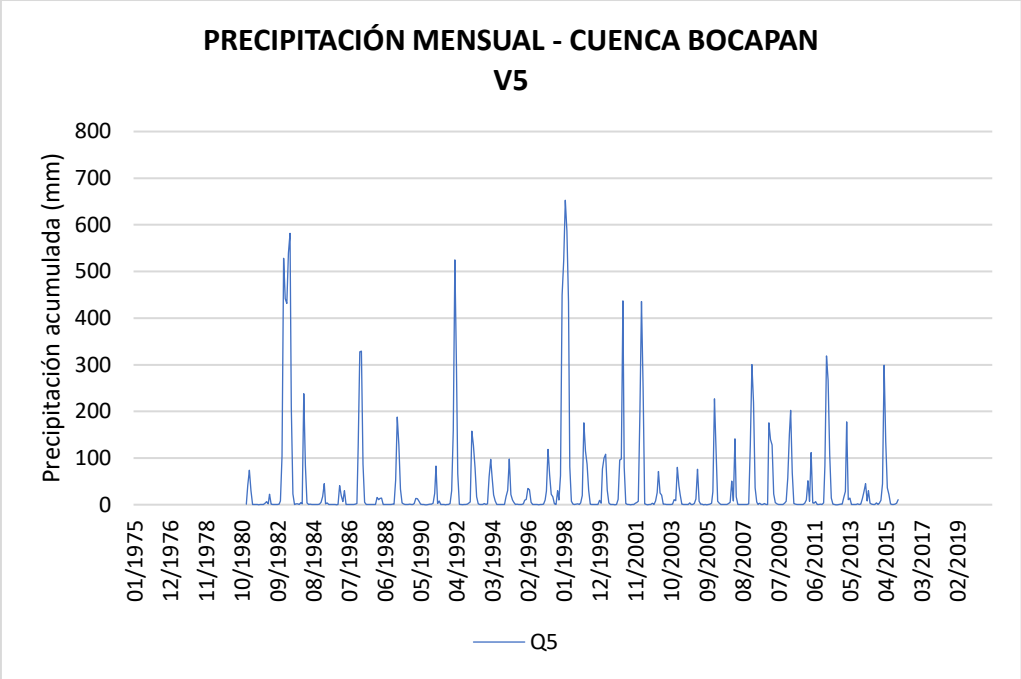


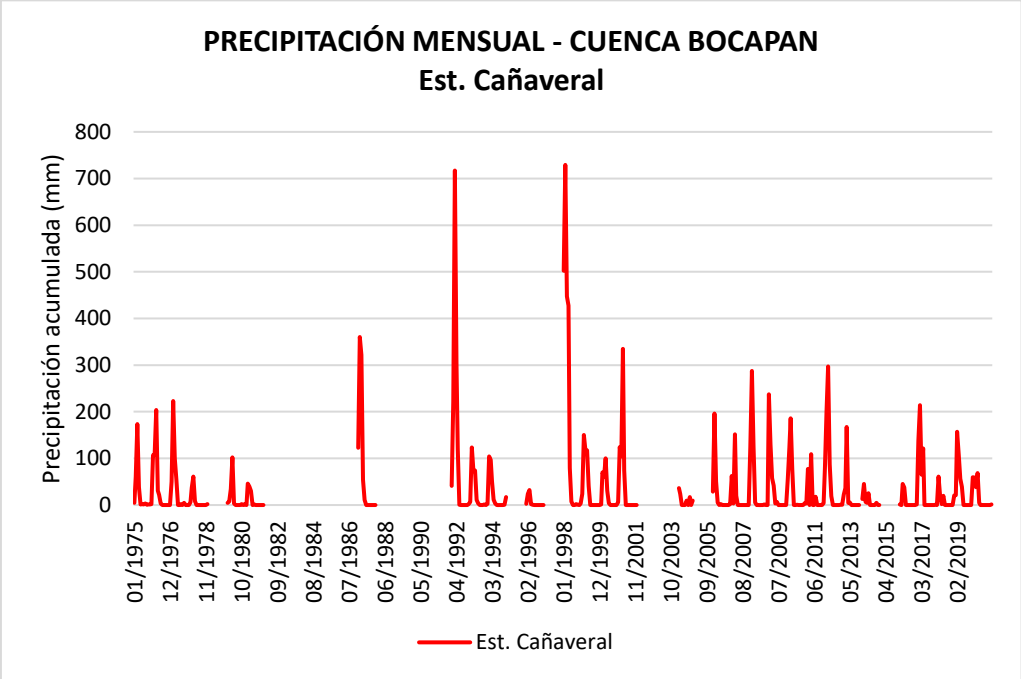
Figura N° 26: datos de precipitación RAIN4PE – Subcuenca V5



Datos Observados:

Se obtuvo datos de precipitación de la estación Cañaveral del SENAMHI:

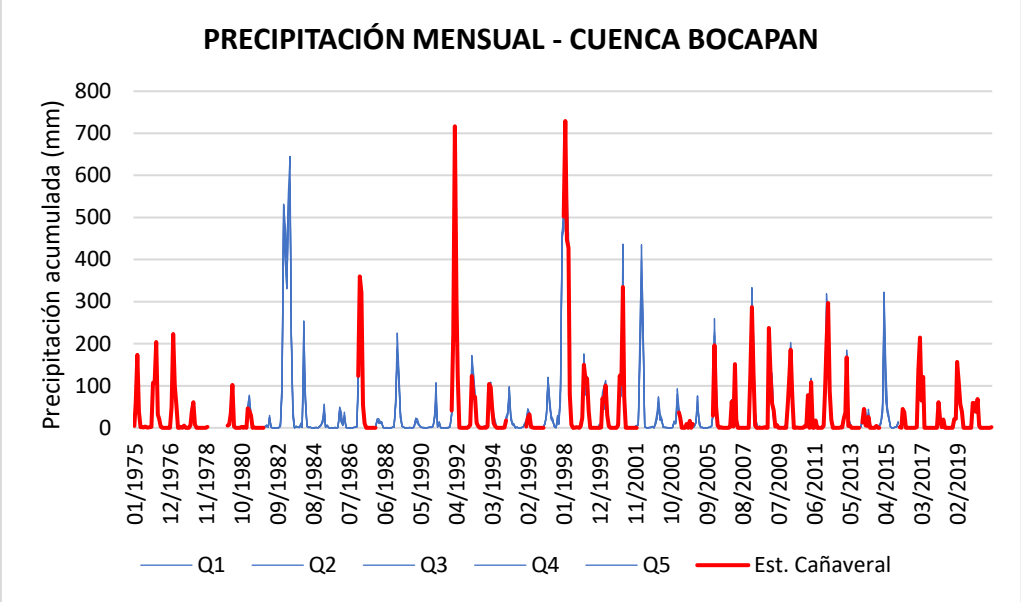
Figura N° 27: datos de precipitación Estación Cañaveral



De los datos disponibles de la estación Cañaveral se observan periodos con datos faltantes: ene/1981 – dic/1986, ene/1988 – dic/1991, ene/1995 – dic/1995, ene/1997 – dic/1997, ene/2002 – dic/2003, ene/2005 – dic/2005, dic/2013 y ene/2015 – dic/2015.

Para el presente estudio se considerará el periodo común de datos de precipitación disponibles:

Figura N° 28: Datos de precipitación disponibles



Del gráfico se observa que el periodo en común es de ene/1981 a dic/2014

Completación de datos:

Los datos faltantes en la estación Cañaveral representan alrededor del 40% del total, esto sugiere una necesidad de completar los datos faltantes haciendo uso de diferentes métodos. Sin embargo, ante un porcentaje alto de faltantes (40%) se podría incurrir en subestimaciones o sobreestimaciones que no representarían o no se asemejarían a los datos reales en caso se hayan dado precipitaciones intensas. Por ello, se optó por usar los datos observados disponibles para la validación de otros modelos.

Para un análisis comparativo también se extrajo la data de precipitación del producto PISCO del SENAMHI:

Figura N° 29: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V1

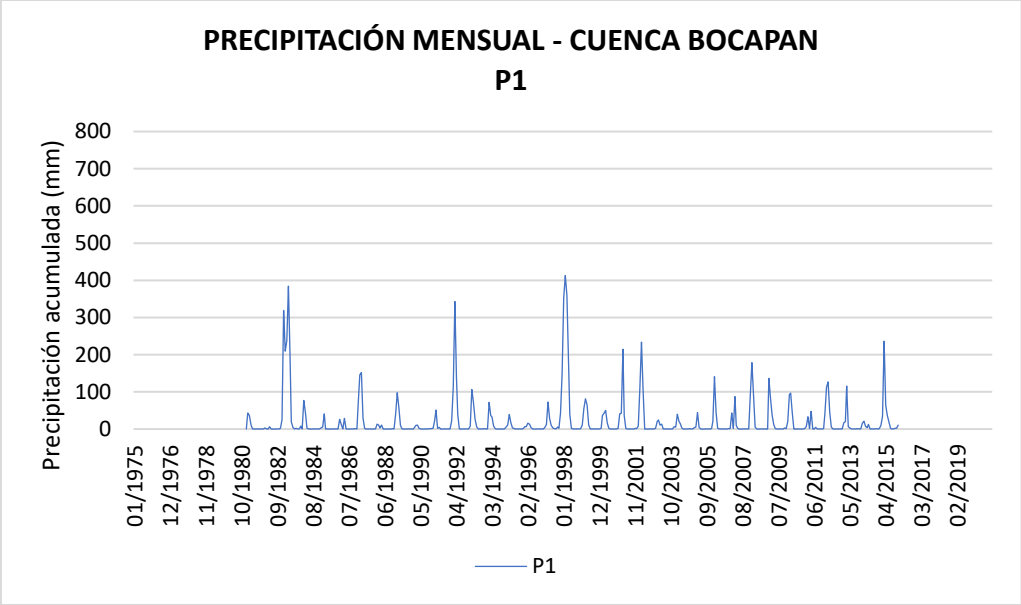


Figura N° 30: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V2

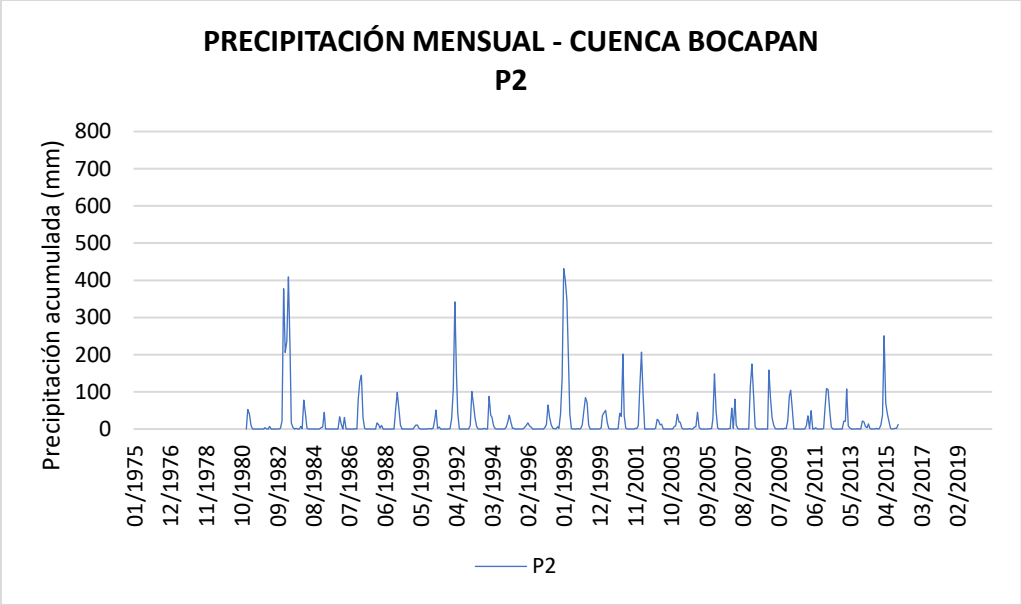


Figura N° 31: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V3

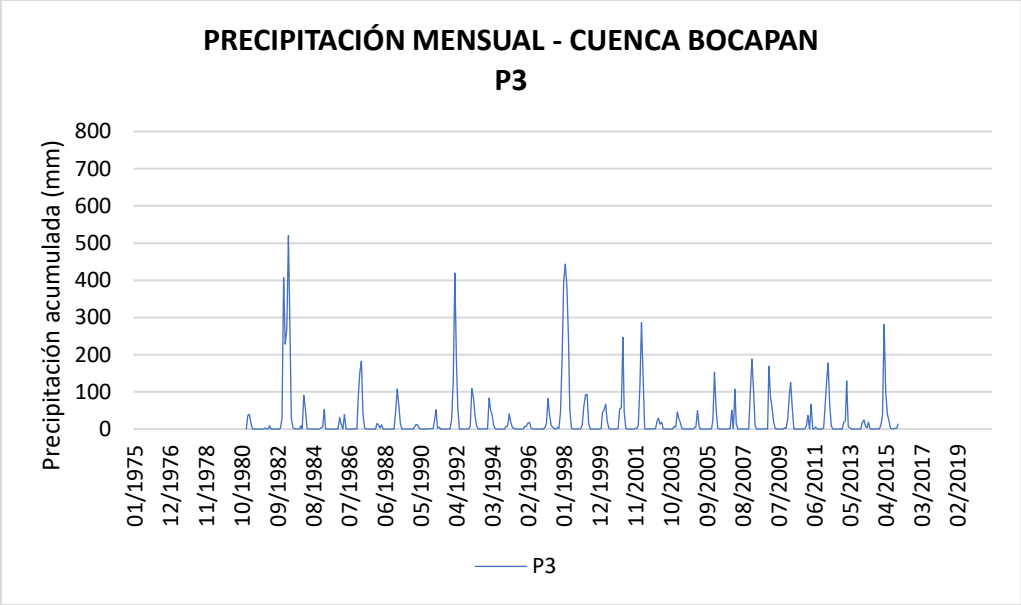


Figura N° 32: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V4

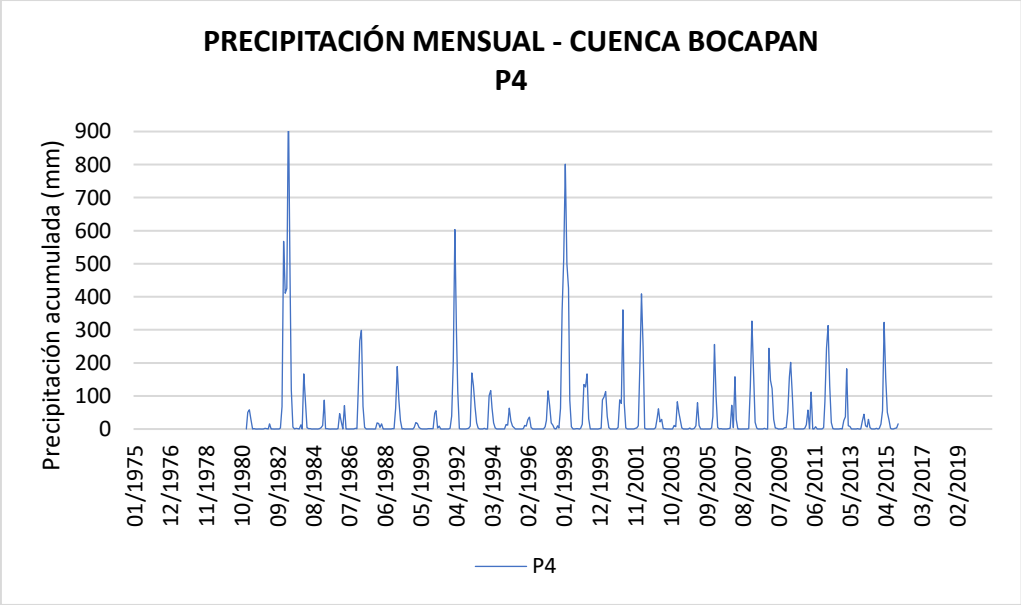
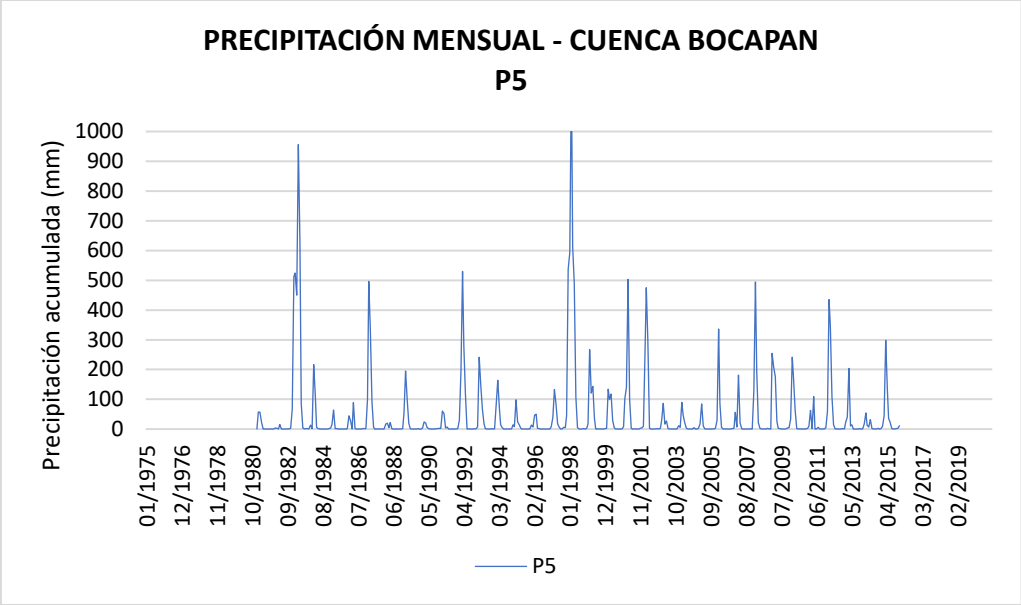


Figura N° 33: datos de precipitación PISCO – Subcuenca V5



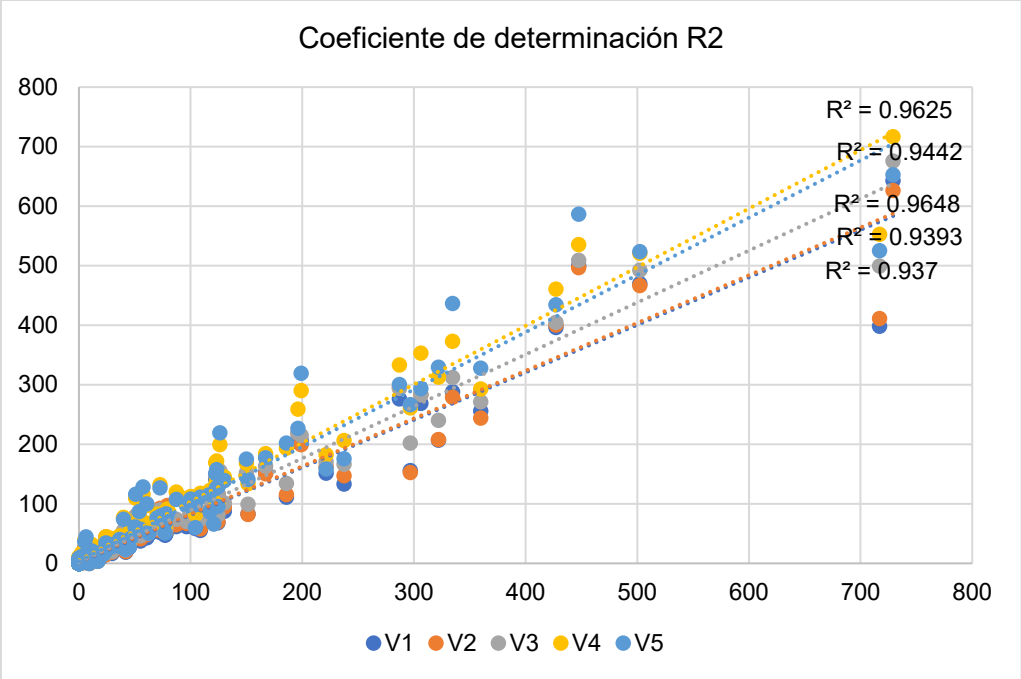
4.1.4. Validación de datos

Para la validación de datos se usó un código (Anexo N° 06) en RStudio para evaluar las métricas de R^2, RMSE, MAE, PBIAS y NSE. Se insertaron los datos disponibles de la estación Cañaveral (PP) y los datos extraídos de RAIN4PE (V1, V2, V3, V4 y V5) en un mismo archivo csv para su procesamiento.

Tabla N° 05: Métricas estadísticas de validación – RAIN4PE

	R2	RMSE	MAE	PBIAS	NSE
V1	0.93703	30.26504	10.80494	16.66854	0.91181
V2	0.93932	29.48339	10.66042	13.38359	0.91631
V3	0.96485	21.64793	8.44942	8.26559	0.95488
V4	0.96254	20.37059	9.12787	-10.9169	0.96005
V5	0.94419	24.22812	9.09235	-4.72999	0.94348

Figura N° 34: Coeficiente de determinación R^2



De los resultados anteriores, las subcuencas V3 y V4 tienen un r^2 de 0.96485 y 0.96254 respectivamente, lo que indica que la data extraída de RAIN4PE representa más del 96% de los datos observados en esta área

En los resultados del RMSE, V3 y V4 tienen los valores más bajos, esto indica que presentan menos desviación respecto a los valores reales.

Los valores de MAE oscilan entre 8.4 a 10.8, siendo el más bajo el de V3, y el NSE se aproxima al valor óptimo en V3, V4 y V5.

Con respecto al PBIAS, V3 presenta el valor más cercano al valor óptimo (8.265), V4 y V5 subestiman los valores observados (PBIAS negativo) y, por otro lado, V1 y V2 muestran las métricas más lejanas a los valores óptimos incluyendo una sobreestimación de los valores observados.

Métricas de validación con el producto PISCO del SENAMHI:

Para la validación de datos se usó un código (Anexo) en RStudio para evaluar las métricas de R^2, RMSE, MAE, PBIAS y NSE. Se insertaron los datos disponibles de la estación Cañaveral (PP) y los datos extraídos de PISCO (V1, V2, V3, V4 y V5) en un mismo archivo csv para su procesamiento.

Resultados de la evaluación del producto PISCO:

Tabla N° 06: Métricas estadísticas de validación – PISCO

	R2	RMSE	MAE	PBIAS	NSE
V1	0.94699	50.53307	18.57575	43.63442	0.75414
V2	0.92168	50.77815	18.19809	42.20471	0.75175
V3	0.96443	41.03174	14.55229	33.73211	0.83790
V4	0.97420	16.94239	7.08723	-6.94111	0.97236
V5	0.90756	48.51795	15.59952	-26.58195	0.77336

De las tablas 3 y 4 se tiene que ambos productos presentan valores altos de R^2, pero los errores RMSE y MAE son significativamente menores en RAIN4PE, lo que indica mayor precisión.

En particular, V3 tiene mejores métricas en ambos productos, aunque el R^2 es prácticamente igual (0.9648 en RAIN4PE y 0.9644 en PISCO), el RMSE en PISCO (41.03) es casi el doble que en RAIN4PE (21.65), y el MAE también es mayor en PISCO (14.55 frente a 8.45).

Además, el PBIAS en PISCO (33.73) muestra una sobrestimación de la precipitación, mientras que en RAIN4PE (8.27) el sesgo es mucho menor. El NSE refuerza esta diferencia, con un valor más alto en RAIN4PE (0.95488) que en PISCO (0.83790), lo que confirma mejor ajuste de RAIN4PE a los datos observados.

La diferencia se repite en V1, V2, V4 y V5, PISCO presenta errores más elevados y una tendencia a la sobrestimación en la mayoría de los casos.

En conclusión, RAIN4PE, en especial con los datos de la subcuenca V3, ofrece la estimación más precisa y confiable de la precipitación, mientras que PISCO tiende a sobrestimar los valores.

4.1.5. Distribución estadística de las precipitaciones

Para el cálculo de los caudales máximos se usaron las precipitaciones máximas mensuales por cada año del producto RAIN4PE:

Tabla N° 07: Precipitación máxima (mm/día) de la cuenca Bocapán – RAIN4PE

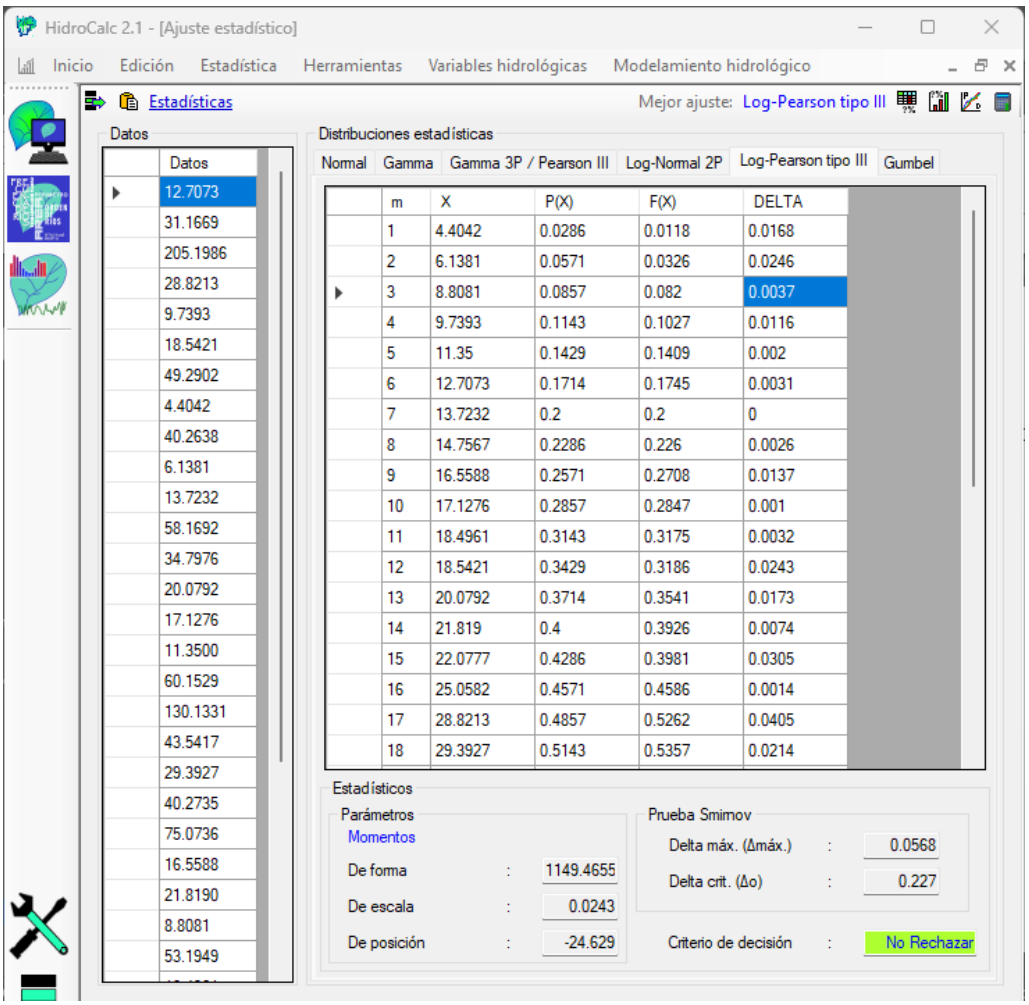
Precipitación máxima (mm/d)					
Año	V1	V2	V3	V4	V5
1981	8.3618	8.3990	12.7073	14.9610	12.9299
1982	28.9071	34.0177	31.1669	41.1322	37.6313
1983	145.6615	107.9486	205.1986	200.3412	159.9957
1984	26.5762	24.0843	28.8213	30.9014	36.8621
1985	8.7793	11.9124	9.7393	13.1782	8.9301
1986	14.2865	12.1769	18.5421	18.2001	16.2885
1987	41.2928	43.8382	49.2902	48.9876	43.5651
1988	4.5625	6.1062	4.4042	5.9119	3.5065
1989	35.5275	42.7342	40.2638	50.5559	38.6455
1990	6.9506	8.7058	6.1381	6.0634	5.0262
1991	11.5610	12.8565	13.7232	19.3578	15.8724
1992	57.1345	65.0614	58.1692	79.8290	58.9262
1993	32.8137	34.2342	34.7976	40.1571	36.2027
1994	18.4457	18.6248	20.0792	21.6889	20.0000
1995	18.2221	19.6499	17.1276	18.0520	16.2074
1996	9.1303	9.2731	11.3500	13.8583	11.9887
1997	70.4094	69.8634	60.1529	73.4951	62.6952
1998	116.7557	116.5744	130.1331	123.8548	101.7959
1999	33.7337	39.2004	43.5417	52.4781	46.3438
2000	26.9827	26.4856	29.3927	34.7972	28.7540
2001	34.6812	38.2382	40.2735	44.8271	55.5777
2002	67.0605	70.7627	75.0736	71.2773	65.2158
2003	13.0463	11.9134	16.5588	18.4780	21.2578
2004	16.6740	18.5272	21.8190	29.8989	24.3305
2005	10.2540	11.6865	8.8081	10.5820	12.0120
2006	52.0873	56.5335	53.1949	52.8440	39.2138
2007	16.8015	20.9424	18.4961	23.9449	26.3972
2008	53.6197	55.0643	55.6392	61.4884	58.9188
2009	33.3175	34.2627	39.1816	48.2663	47.6040
2010	30.5956	35.9821	37.3299	40.6951	41.1860
2011	18.5443	20.6496	22.0777	28.7178	25.1023
2012	44.9913	46.9260	54.8265	64.9082	62.5975
2013	22.3854	22.5822	25.0582	27.7163	27.1069
2014	12.4491	12.7465	14.7567	15.3216	15.8793

En la validación de datos se evidenció que la subcuenca V3 tiene los valores más óptimos de las métricas de validación. Por ello, se utilizarán estos valores en representación del conjunto de datos de precipitación de toda la cuenca.

Distribución estadística

Se realizó la prueba de Smirnov empleando HidroCalc para obtener el mejor ajuste de las distribuciones estadísticas:

Figura N° 35: Distribución estadística con HidroCalc



Datos
12.7073
31.1669
205.1986
28.8213
9.7393
18.5421
49.2902
4.4042
40.2638
6.1381
13.7232
58.1692
34.7976
20.0792
17.1276
11.3500
60.1529
130.1331
43.5417
29.3927
40.2735
75.0736
16.5588
21.8190
8.8081
53.1949

m	X	P(X)	F(X)	DELTA
1	4.4042	0.0286	0.0118	0.0168
2	6.1381	0.0571	0.0326	0.0246
3	8.8081	0.0857	0.082	0.0037
4	9.7393	0.1143	0.1027	0.0116
5	11.35	0.1429	0.1409	0.002
6	12.7073	0.1714	0.1745	0.0031
7	13.7232	0.2	0.2	0
8	14.7567	0.2286	0.226	0.0026
9	16.5588	0.2571	0.2708	0.0137
10	17.1276	0.2857	0.2847	0.001
11	18.4961	0.3143	0.3175	0.0032
12	18.5421	0.3429	0.3186	0.0243
13	20.0792	0.3714	0.3541	0.0173
14	21.819	0.4	0.3926	0.0074
15	22.0777	0.4286	0.3981	0.0305
16	25.0582	0.4571	0.4586	0.0014
17	28.8213	0.4857	0.5262	0.0405
18	29.3927	0.5143	0.5357	0.0214

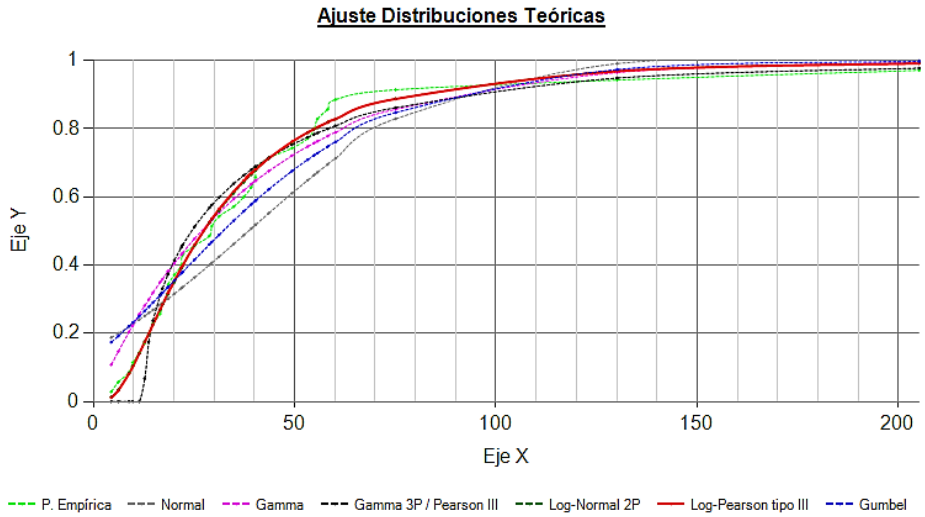
Los resultados muestran que la distribución estadística Log-Pearson tipo III tiene el mejor ajuste con un delta máximo de 0.0568 según la prueba Smirnov.

Tabla N° 08: Prueba de Smirnov de Log-Pearson tipo III

Distribución estadística Log-Pearson tipo III				
m	**X**	**P(X)**	**F(X)**	**DELTA**
1	4.4042	0.0286	0.0118	0.0168
2	6.1381	0.0571	0.0326	0.0246
3	8.8081	0.0857	0.0820	0.0037
4	9.7393	0.1143	0.1027	0.0116
5	11.3500	0.1429	0.1409	0.0020
6	12.7073	0.1714	0.1745	0.0031

7	13.7232	0.2000	0.2000	0.0000
8	14.7567	0.2286	0.2260	0.0026
9	16.5588	0.2571	0.2708	0.0137
10	17.1276	0.2857	0.2847	0.0010
11	18.4961	0.3143	0.3175	0.0032
12	18.5421	0.3429	0.3186	0.0243
13	20.0792	0.3714	0.3541	0.0173
14	21.8190	0.4000	0.3926	0.0074
15	22.0777	0.4286	0.3981	0.0305
16	25.0582	0.4571	0.4586	0.0014
17	28.8213	0.4857	0.5262	0.0405
18	29.3927	0.5143	0.5357	0.0214
19	31.1669	0.5429	0.5638	0.0209
20	34.7976	0.5714	0.6155	0.0441
21	37.3299	0.6000	0.6474	0.0474
22	39.1816	0.6286	0.6688	0.0402
23	40.2638	0.6571	0.6806	0.0235
24	40.2735	0.6857	0.6807	0.0050
25	43.5417	0.7143	0.7134	0.0008
26	49.2902	0.7429	0.7618	0.0189
27	53.1949	0.7714	0.7891	0.0177
28	54.8265	0.8000	0.7994	0.0006
29	55.6392	0.8286	0.8043	0.0243
30	58.1692	0.8571	0.8186	0.0386
31	60.1529	0.8857	0.8289	0.0568
32	75.0736	0.9143	0.8875	0.0268
33	130.1331	0.9429	0.9687	0.0258
34	205.1986	0.9714	0.9917	0.0202

Figura N° 36: Ajuste de distribuciones teóricas



Con la herramienta “simular varios valores” de HidroCalc se pudo obtener las precipitaciones máximas usando distintas distribuciones estadísticas.

Tabla N° 09: Precipitaciones máximas para distintos periodos de retorno

TR	Normal	Gamma	Gamma 3P	Log-Normal 2P	Log-Pearson tipo III	Gumbel
2	38.4657	26.645	23.4456	27.4866	26.9747	32.1448
5	70.8621	61.857	54.9316	55.0189	54.2607	66.1467
10	87.7913	88.459	83.7906	79.0693	78.5472	88.6589
25	105.8363	123.511	124.7896	116.3816	116.8978	117.1032
50	117.4944	149.842	156.4836	149.3969	151.381	138.2047
100	127.9597	175.84	187.5216	186.9403	191.1388	159.1505
200	137.5786	201.198	216.4656	229.715	236.6542	180.0198
500	149.1982	232.762	248.5586	294.638	306.0046	207.5529
1000	157.355	253.969	266.3426	350.8918	365.1105	228.3618

4.1.6. Curvas I-D-F y hietogramas de diseño

Debido a los resultados mostrados en la figura 32, se emplearán las precipitaciones máximas obtenidas con Log-Pearson tipo III (Tabla N° 07) para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Estimación de la precipitación en intervalos menores de 24 horas, fórmula:

$$\boldsymbol{P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25}}$$

P_D = precipitación máxima de duración D, en mm

P_{24H} = precipitación máxima de 24 horas, en mm

D = duración de la precipitación

Tabla N° 10: Precipitación máxima de diseño para duraciones menores a 24h (mm)

Duración (Minutos)	Precipitación en 24 horas (mm)								
	26.97	**54.26**	**78.55**	**116.90**	**151.38**	**191.14**	**236.65**	**306.00**	**365.11**
	Periodo de Retorno (Años)								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	Precipitación (mm)								
5	6.55	13.17	19.07	28.38	36.75	46.40	57.45	74.28	88.63
10	7.79	15.66	22.67	33.75	43.70	55.18	68.32	88.34	105.40

15	8.62	17.33	25.09	37.35	48.36	61.06	75.60	97.76	116.64
20	9.26	18.63	26.96	40.13	51.97	65.62	81.24	105.05	125.34
25	9.79	19.70	28.51	42.43	54.95	69.38	85.90	111.08	132.53
30	10.25	20.61	29.84	44.41	57.51	72.62	89.91	116.26	138.71
35	10.65	21.42	31.01	46.16	59.77	75.47	93.44	120.82	144.16
40	11.01	22.15	32.07	47.72	61.80	78.03	96.61	124.93	149.06
45	11.34	22.81	33.03	49.15	63.65	80.36	99.50	128.66	153.51
50	11.64	23.42	33.91	50.46	65.35	82.51	102.16	132.09	157.61
55	11.92	23.99	34.72	51.68	66.92	84.50	104.62	135.28	161.41
60	12.19	24.52	35.49	52.81	68.39	86.36	106.92	138.25	164.96
120	14.49	29.15	42.20	62.81	81.33	102.70	127.15	164.41	196.17
180	16.04	32.26	46.70	69.51	90.01	113.65	140.72	181.95	217.10
240	17.24	34.67	50.19	74.69	96.72	122.13	151.21	195.52	233.28
300	18.22	36.66	53.07	78.98	102.27	129.13	159.88	206.74	246.67
360	19.07	38.37	55.54	82.66	107.04	135.16	167.34	216.38	258.17
420	19.82	39.88	57.72	85.91	111.25	140.47	173.91	224.88	268.32
480	20.50	41.23	59.68	88.82	115.02	145.23	179.82	232.51	277.42
540	21.11	42.46	61.47	91.48	118.46	149.57	185.19	239.46	285.71
600	21.67	43.59	63.11	93.92	121.62	153.57	190.13	245.85	293.34
660	22.19	44.65	64.63	96.18	124.56	157.27	194.72	251.78	300.41
720	22.68	45.63	66.05	98.30	127.30	160.73	199.00	257.32	307.02
780	23.14	46.55	67.39	100.29	129.87	163.98	203.02	262.52	313.23
840	23.57	47.42	68.65	102.16	132.30	167.04	206.82	267.43	319.08
900	23.98	48.25	69.84	103.94	134.60	169.95	210.42	272.08	324.63
960	24.37	49.03	70.98	105.63	136.79	172.71	213.84	276.51	329.91
1020	24.75	49.78	72.06	107.24	138.88	175.35	217.11	280.73	334.95
1080	25.10	50.50	73.10	108.79	140.88	177.87	220.23	284.77	339.77
1140	25.44	51.18	74.09	110.27	142.79	180.30	223.23	288.64	344.40
1200	25.77	51.84	75.05	111.69	144.64	182.62	226.11	292.37	348.84
1260	26.09	52.48	75.97	113.06	146.41	184.86	228.88	295.96	353.12
1320	26.39	53.09	76.86	114.38	148.12	187.03	231.56	299.42	357.25
1380	26.69	53.69	77.72	115.66	149.78	189.12	234.15	302.77	361.25
1440	**26.97**	**54.26**	**78.55**	**116.90**	**151.38**	**191.14**	**236.65**	**306.00**	**365.11**

Intensidad de precipitación

$$\boldsymbol{I = \frac{P_D}{D}}$$

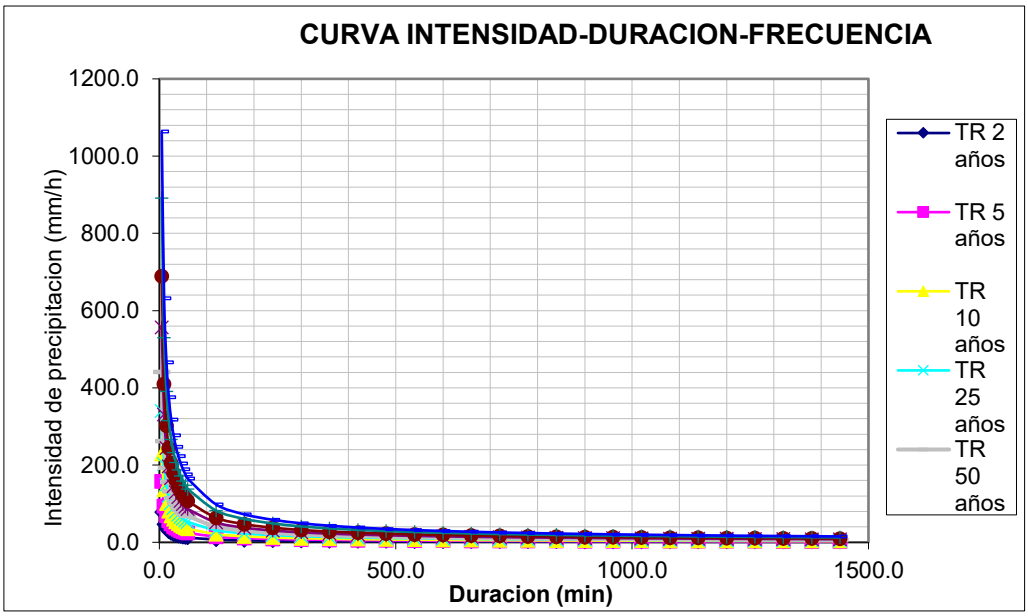
PD = precipitación máxima de duración D, en mm

D = duración de la precipitación, en horas

Tabla N° 11: Intensidades de diseño para duraciones menores a 24h (mm)

Duración (Horas)	Duración (min)	Periodo de Retorno (Años)								
		2	5	10	25	50	100	200	500	1000
		Intensidad (mm/hr)								
0.08	5	78.6	158.1	228.8	340.5	441.0	556.8	689.4	891.4	1063.5
0.17	10	46.7	94.0	136.0	202.5	262.2	331.1	409.9	530.0	632.4
0.25	15	34.5	69.3	100.4	149.4	193.4	244.3	302.4	391.0	466.6
0.33	20	27.8	55.9	80.9	120.4	155.9	196.9	243.7	315.1	376.0
0.42	25	23.5	47.3	68.4	101.8	131.9	166.5	206.2	266.6	318.1
0.50	30	20.5	41.2	59.7	88.8	115.0	145.2	179.8	232.5	277.4
0.58	35	18.3	36.7	53.2	79.1	102.5	129.4	160.2	207.1	247.1
0.67	40	16.5	33.2	48.1	71.6	92.7	117.0	144.9	187.4	223.6
0.75	45	15.1	30.4	44.0	65.5	84.9	107.2	132.7	171.5	204.7
0.83	50	14.0	28.1	40.7	60.6	78.4	99.0	122.6	158.5	189.1
0.92	55	13.0	26.2	37.9	56.4	73.0	92.2	114.1	147.6	176.1
1.00	60	12.2	24.5	35.5	52.8	68.4	86.4	106.9	138.3	165.0
2.00	120	7.2	14.6	21.1	31.4	40.7	51.3	63.6	82.2	98.1
3.00	180	5.3	10.8	15.6	23.2	30.0	37.9	46.9	60.7	72.4
4.00	240	4.3	8.7	12.5	18.7	24.2	30.5	37.8	48.9	58.3
5.00	300	3.6	7.3	10.6	15.8	20.5	25.8	32.0	41.3	49.3
6.00	360	3.2	6.4	9.3	13.8	17.8	22.5	27.9	36.1	43.0
7.00	420	2.8	5.7	8.2	12.3	15.9	20.1	24.8	32.1	38.3
8.00	480	2.6	5.2	7.5	11.1	14.4	18.2	22.5	29.1	34.7
9.00	540	2.3	4.7	6.8	10.2	13.2	16.6	20.6	26.6	31.7
10.00	600	2.2	4.4	6.3	9.4	12.2	15.4	19.0	24.6	29.3
11.00	660	2.0	4.1	5.9	8.7	11.3	14.3	17.7	22.9	27.3
12.00	720	1.9	3.8	5.5	8.2	10.6	13.4	16.6	21.4	25.6
13.00	780	1.8	3.6	5.2	7.7	10.0	12.6	15.6	20.2	24.1
14.00	840	1.7	3.4	4.9	7.3	9.4	11.9	14.8	19.1	22.8
15.00	900	1.6	3.2	4.7	6.9	9.0	11.3	14.0	18.1	21.6
16.00	960	1.5	3.1	4.4	6.6	8.5	10.8	13.4	17.3	20.6
17.00	1020	1.5	2.9	4.2	6.3	8.2	10.3	12.8	16.5	19.7
18.00	1080	1.4	2.8	4.1	6.0	7.8	9.9	12.2	15.8	18.9
19.00	1140	1.3	2.7	3.9	5.8	7.5	9.5	11.7	15.2	18.1
20.00	1200	1.3	2.6	3.8	5.6	7.2	9.1	11.3	14.6	17.4
21.00	1260	1.2	2.5	3.6	5.4	7.0	8.8	10.9	14.1	16.8
22.00	1320	1.2	2.4	3.5	5.2	6.7	8.5	10.5	13.6	16.2
23.00	1380	1.2	2.3	3.4	5.0	6.5	8.2	10.2	13.2	15.7
24.00	1440	1.1	2.3	3.3	4.9	6.3	8.0	9.9	12.8	15.2

Figura N° 37: Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)



Hietogramas de diseño

A partir de las curvas IDF se obtuvo la ecuación de intensidad, duración y frecuencia:

$$\mathrm{I} = \frac{270.258 \times T^{0.399}}{D^{0.750}}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de retorno (años)

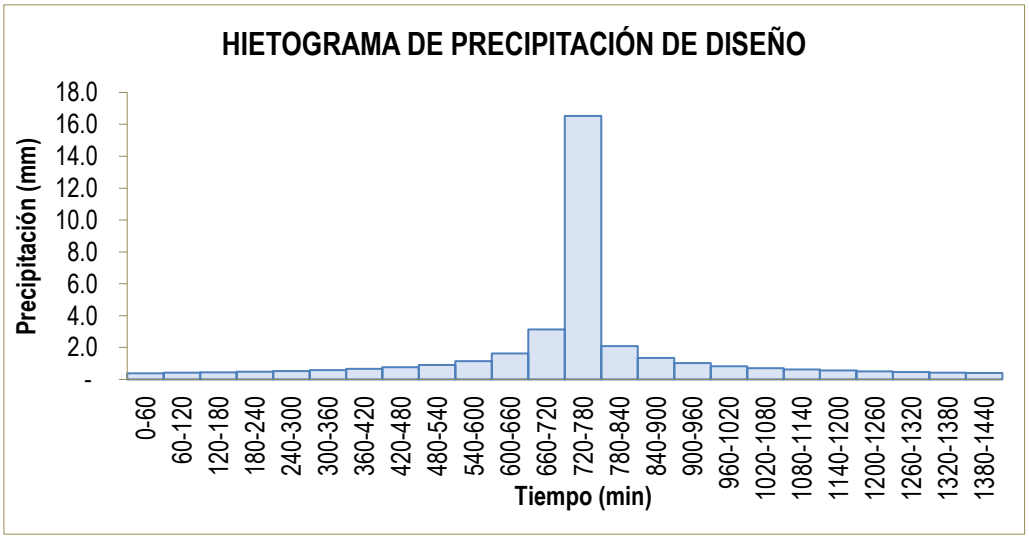
D = Duración de la precipitación (min)

Con esta ecuación se desarrolló el método del bloque alterno para obtener los hietogramas de diseño:

Tabla N° 12: Método del bloque alterno para un TR = 2 años

MÉTODO DEL BLOQUE ALTERNO					
Duración	Intensidad	Profundidad acumulada	Profundidad incremental	Tiempo	Precipitación
min	mm/hr	mm	mm	min	mm
60	16.530	16.530	16.530	0-60	0.387
120	9.829	19.657	3.128	60-120	0.414
180	7.251	21.754	2.097	120-180	0.445
240	5.844	23.377	1.622	180-240	0.483
300	4.944	24.718	1.341	240-300	0.529
360	4.312	25.870	1.153	300-360	0.587
420	3.841	26.887	1.016	360-420	0.662
480	3.475	27.800	0.913	420-480	0.764
540	3.181	28.630	0.831	480-540	0.913
600	2.939	29.394	0.764	540-600	1.153
660	2.737	30.103	0.709	600-660	1.622
720	2.564	30.765	0.662	660-720	3.128
780	2.414	31.387	0.622	720-780	16.530
840	2.284	31.974	0.587	780-840	2.097
900	2.169	32.530	0.556	840-900	1.341
960	2.066	33.059	0.529	900-960	1.016
1020	1.974	33.564	0.505	960-1020	0.831
1080	1.892	34.047	0.483	1020-1080	0.709
1140	1.816	34.511	0.463	1080-1140	0.622
1200	1.748	34.956	0.445	1140-1200	0.556
1260	1.685	35.385	0.429	1200-1260	0.505
1320	1.627	35.799	0.414	1260-1320	0.463
1380	1.574	36.199	0.400	1320-1380	0.429
1440	1.524	36.586	0.387	1380-1440	0.400

Figura N° 38: Hietograma de diseño para un TR = 2 años



De la misma forma, se obtuvo los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 1000 años:

Tabla N° 13: Resultados del método del bloque alterno para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 1000 años

RESULTADOS MÉTODO DEL BLOQUE ALTERNO - HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN (mm)									
Duración	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)								
	2	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**	**200**	**500**	**1000**
60	0.39	0.56	0.74	1.06	1.40	1.84	2.43	3.50	4.62
120	0.41	0.60	0.79	1.13	1.50	1.97	2.60	3.75	4.94
180	0.45	0.64	0.85	1.22	1.61	2.12	2.80	4.03	5.32
240	0.48	0.70	0.92	1.32	1.74	2.30	3.03	4.37	5.76
300	0.53	0.76	1.01	1.45	1.91	2.52	3.32	4.79	6.31
360	0.59	0.85	1.12	1.61	2.12	2.80	3.69	5.31	7.00
420	0.66	0.95	1.26	1.81	2.39	3.15	4.16	5.99	7.90
480	0.76	1.10	1.45	2.09	2.76	3.64	4.80	6.92	9.12
540	0.91	1.32	1.73	2.50	3.30	4.35	5.73	8.26	10.89
600	1.15	1.66	2.19	3.16	4.16	5.49	7.24	10.43	13.76
660	1.62	2.34	3.08	4.44	5.86	7.73	10.19	14.68	19.36
720	3.13	4.51	5.94	8.57	11.30	14.89	19.64	28.31	37.32
780	16.53	23.82	31.41	45.28	59.70	78.72	103.80	149.61	197.27
840	2.10	3.02	3.99	5.74	7.57	9.99	13.17	18.98	25.03
900	1.34	1.93	2.55	3.67	4.84	6.39	8.42	12.14	16.01
960	1.02	1.47	1.93	2.78	3.67	4.84	6.38	9.20	12.13
1020	0.83	1.20	1.58	2.28	3.00	3.96	5.22	7.52	9.91
1080	0.71	1.02	1.35	1.94	2.56	3.38	4.45	6.42	8.46
1140	0.62	0.90	1.18	1.70	2.25	2.96	3.90	5.63	7.42
1200	0.56	0.80	1.06	1.52	2.01	2.65	3.49	5.03	6.64
1260	0.50	0.73	0.96	1.38	1.82	2.40	3.17	4.57	6.03
1320	0.46	0.67	0.88	1.27	1.67	2.21	2.91	4.19	5.53
1380	0.43	0.62	0.82	1.18	1.55	2.04	2.69	3.88	5.12
1440	0.40	0.58	0.76	1.10	1.44	1.91	2.51	3.62	4.77

Figura N° 39: Hietograma de diseño para un TR = 5 años

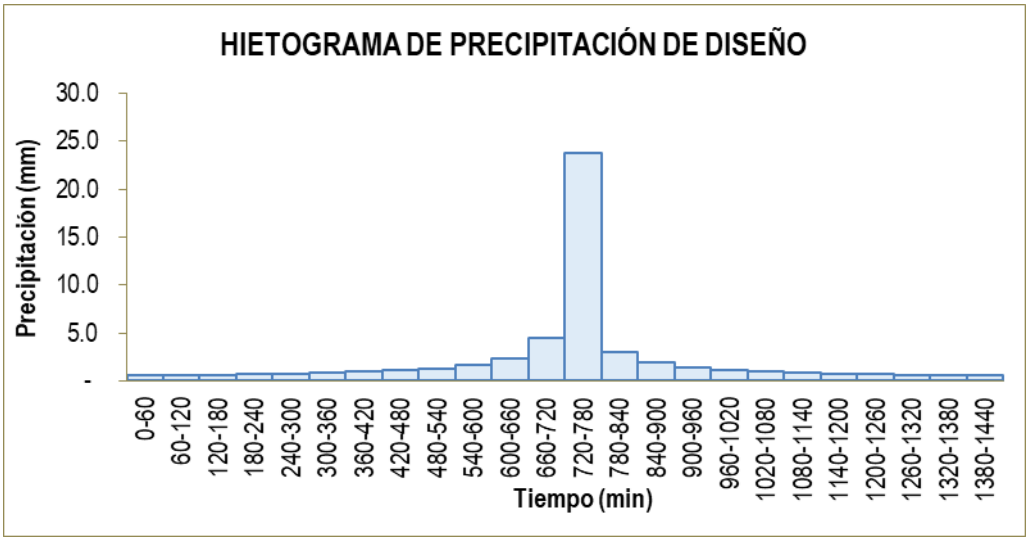


Figura N° 40: Hietograma de diseño para un TR = 10 años

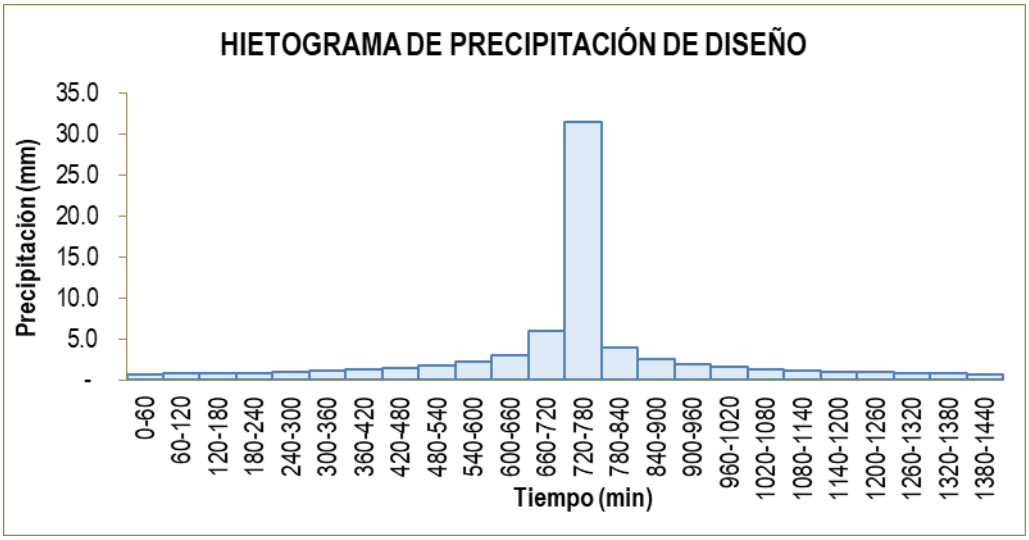


Figura N° 41: Hietograma de diseño para un TR = 25 años

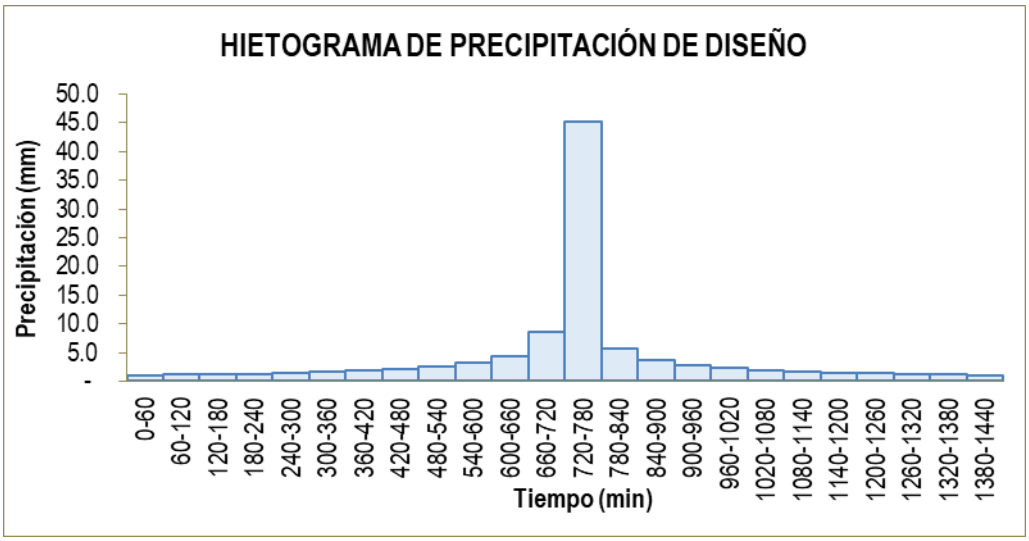


Figura N° 42: Hietograma de diseño para un TR = 50 años

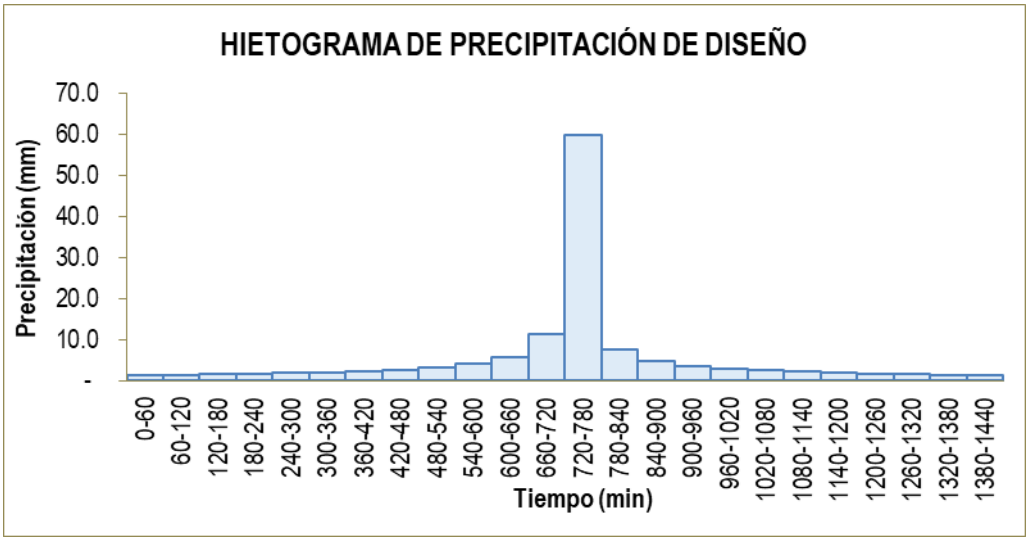


Figura N° 43: Hietograma de diseño para un TR = 100 años

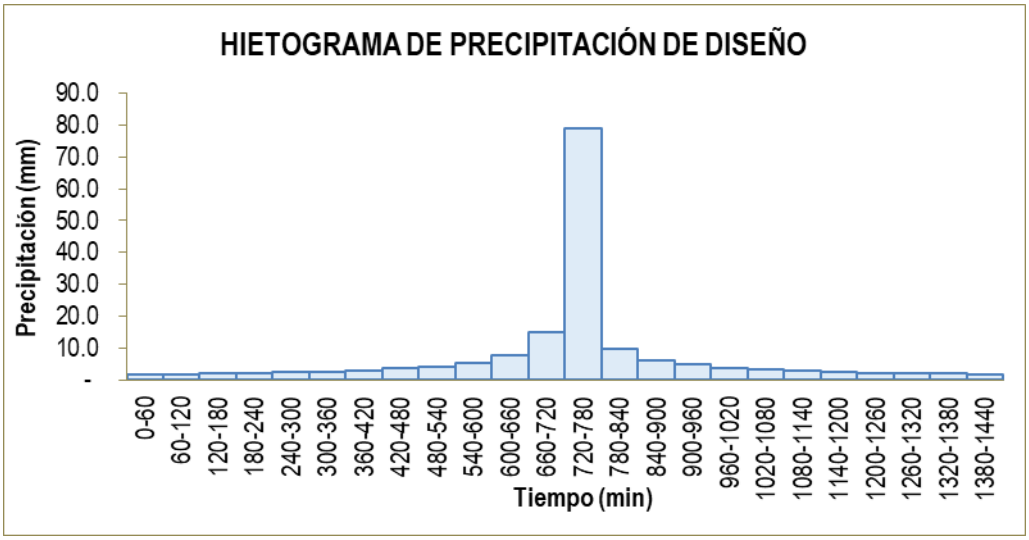


Figura N° 44: Hietograma de diseño para un TR = 200 años

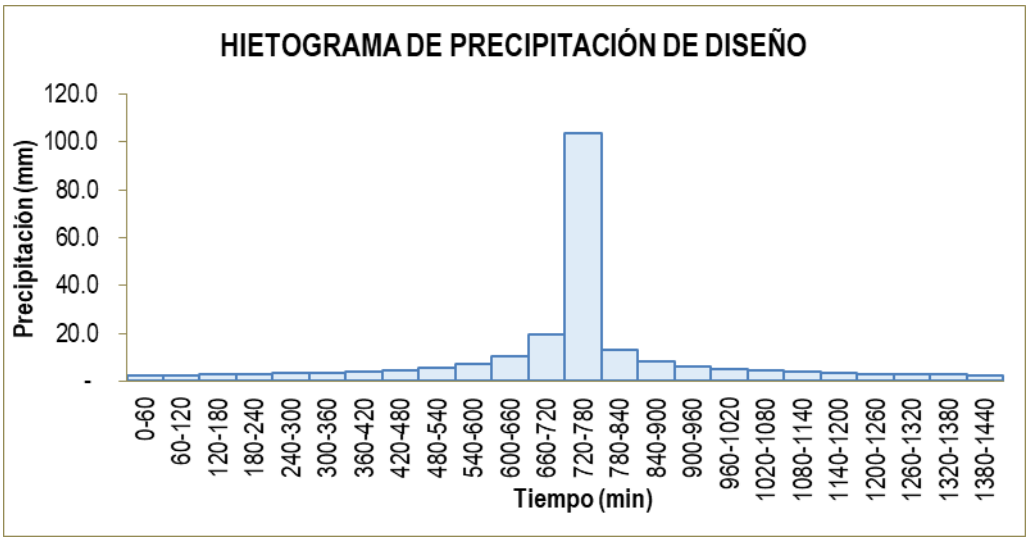


Figura N° 45: Hietograma de diseño para un TR = 500 años

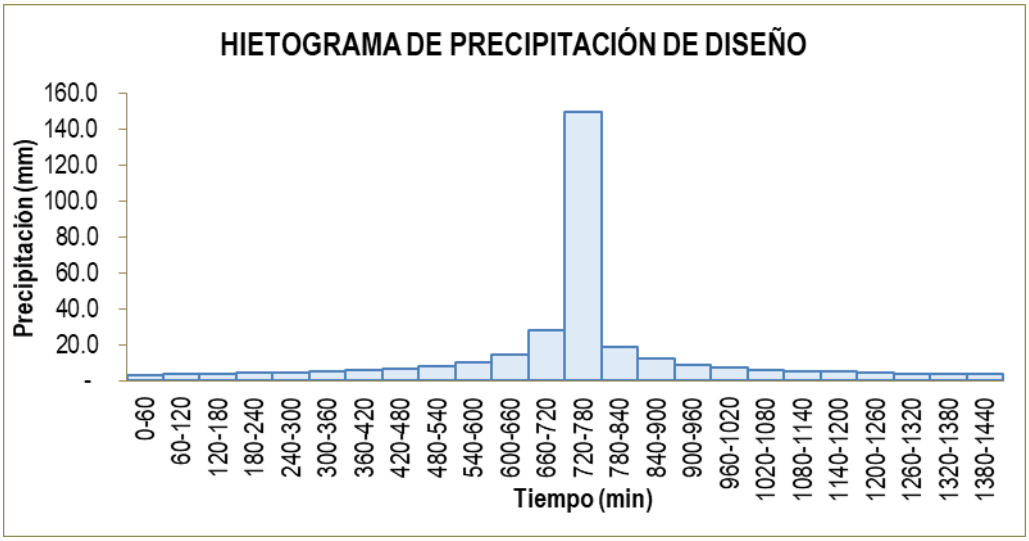
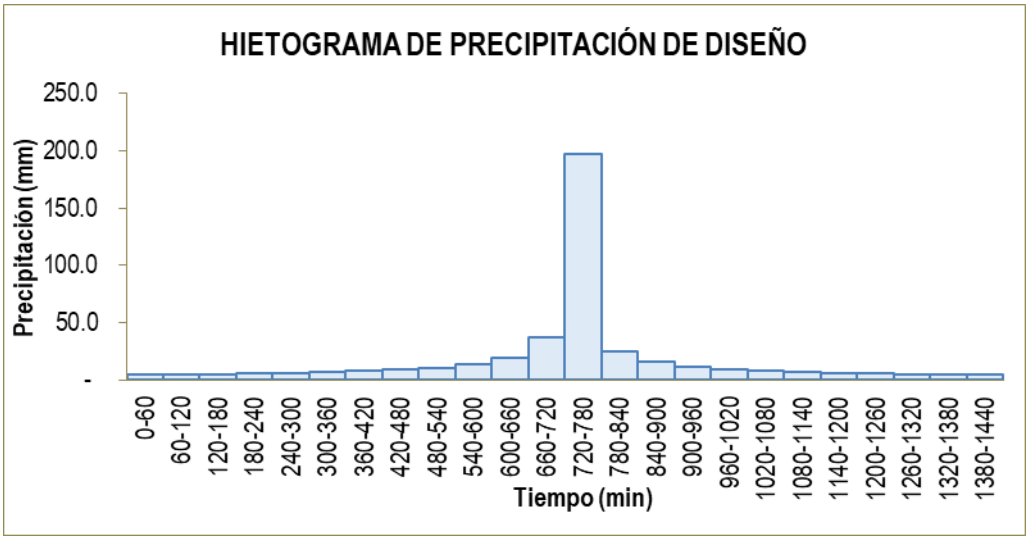
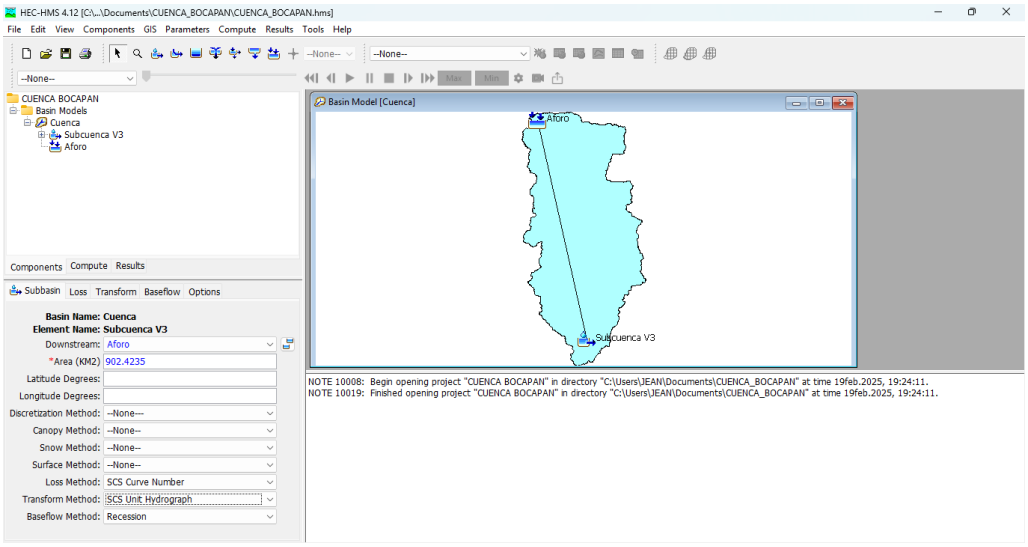


Figura N° 46: Hietograma de diseño para un TR = 1000 años



4.1.7. Caudales máximos con modelación HEC-HMS

Figura N° 47: Creación de proyecto en HEC-HMS



Parámetros de entrada

Tabla N° 14: Parámetros de entrada, modelo HEC-HMS

Área de la cuenca	902.4235
Método de pérdida	Número de curva
Método de transformación	Hidrograma unitario
Tiempo de retraso	606.54

Número de curva

Tabla N° 15: Número de curva de la cuenca Bocapán

Número de curva en condiciones secas	CN =	39.9
Número de curva en condiciones normales	CN =	60.8
Número de curva en condiciones húmedas	CN =	73.9

Para la obtención del número de curva mostrado en la tabla n° 13, se usó el shapefile de numero de curva (Anexo N° 07) disponible en https://www.geogpsperu.com.

Para la obtención de caudales máximos se usó el número de curva en condiciones húmedas (mayor escorrentía)

Hidrograma unitario

Se emplearon los hietogramas obtenidos con el método del bloque alterno (Tabla N° 11).

El tiempo de retraso se calculó en base al tiempo de concentración:

Debido a que la cuenca Bocapán tiene un área de 902.4235 Km^2, el Tc se calculó promediando el Tc de Témez, Tc de Giandotti y Tc de SCS.

Tiempo de retraso = Tc promedio (1010.9) * 0.6

Resultados de modelación HEC-HMS:

Tabla N° 16: Caudales máximos con HEC-HMS

HEC-HMS	
TR	Q (m3/s)
2	46.3
5	143.3
10	282.4
25	602.1
50	986.7
100	1538.5
200	2307.2
500	3769.6
1000	5333.2

4.1.8. Caudales máximos con el Método racional modificado

- Fórmula:

$$Q = 0.278 \times CIAK$$

Donde:

Q : caudal máximo (m^3/s)

C : coeficiente de escurrimiento

I : intensidad de precipitación (mm/h)

A : área de la cuenca (km^2)

K : coeficiente de uniformidad

Datos de ingreso:

Tabla N° 17: Intensidad de precipitación para distintos periodos de retorno

TR	I
2	1.987685337
5	2.864908316
10	3.777551314
25	5.444693873
50	7.179151382
100	9.466136345
200	12.48166149
500	17.9901794
1000	23.72111716

Tabla N° 18: Coeficientes – Método Racional Modificado

Coeficiente de escorrentía (C)	0.3 (adim)
Coeficiente de uniformidad (K) (en base al Tc)	1.7091

Resultados:

- Para un **TR = 2 años**:

$\mathrm{C} = 0.3, \mathrm{I} = 1.987685\ \mathrm{mm/h}, \mathrm{A} = 902.4235\ \mathrm{km^2}, \mathrm{K} = 1.7091$

Entonces:

$$\mathrm{Q} = 0.278 \times 0.3 \times 1.987685 \times 902.4235 \times 1.7091$$

$$= \mathbf{255.6769\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 5 años**:

$C = 0.3$, $I = 2.864908$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$Q = 0.278 \times 0.3 \times 2.864908 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{368.5146\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 10 años**:

$C = 0.3$, $I = 3.777551$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$Q = 0.278 \times 0.3 \times 3.777551 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{485.9283\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 25 años**:

$C = 0.3$, $I = 5.444693$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$Q = 0.278 \times 0.3 \times 5.444693 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{700.3536\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 50 años**:

$C = 0.3$, $I = 7.179151$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$Q = 0.278 \times 0.3 \times 7.179151 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{923.4578\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 100 años**:

$C = 0.3$, $I = 9.466136$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$Q = 0.278 \times 0.3 \times 9.466136 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{1217.6337\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 200 años**:

$C = 0.3$, $I = 12.481661$ mm/h, $A = 902.4235$ km^2, $K = 1.7091$

Entonces:

$$\mathrm{Q} = 0.278 \times 0.3 \times 12.481661 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{1605.5222\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 500 años**:

$\mathrm{C} = 0.3, \mathrm{I} = 17.990179\ \mathrm{mm/h}, \mathrm{A} = 902.4235\ \mathrm{km^2}, \mathrm{K} = 1.7091$

Entonces:

$$\mathrm{Q} = 0.278 \times 0.3 \times 17.990179 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{2314.0856\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 1000 años**:

$\mathrm{C} = 0.3, \mathrm{I} = 23.721117\ \mathrm{mm/h}, \mathrm{A} = 902.4235\ \mathrm{km^2}, \mathrm{K} = 1.7091$

Entonces:

$$\mathrm{Q} = 0.278 \times 0.3 \times 23.721117 \times 902.4235 \times 1.7091$$
$$= \mathbf{3051.2589\ m^3/s}$$

Tabla N° 19: Caudales máximos con el Método racional modificado

TR	Q (m3/s)
2	255.6769
5	368.5146
10	485.9083
25	700.3536
50	923.4578
100	1217.6337
200	1605.5222
500	2314.0856
1000	3051.2589

4.1.9. Caudales máximos con el Método de Creager

Fórmula:

$$Q = (C_1 + C_2) \times \log(T) \times A^{m \times A^{-n}}$$

Donde:

Q : caudal máximo (m^3/s)

C_1 y C_2: coeficientes definidos por regiones hidráulicas

T : periodo de retorno (años)

A : área de la cuenca (km^2)

m y n : exponentes definidos por regiones hidráulicas

Datos de ingreso:

Tabla N° 20: Parámetros de ingreso – Método de Creager

Coeficiente C1, definido por región hidráulica	1.01
Coeficiente C2, definido por región hidráulica	4.37
Exponente m, definido por región hidráulica	1.02
Exponente n, definido por región hidráulica	0.04

Resultados:

- Para un **TR = 2 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 2$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(2) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{320.2941\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 5 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 5$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(5) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{743.6998\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 10 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 10$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(10) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{1063.9939\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 25 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 25$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(25) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{1487.3996\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 50 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 50$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(50) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{1807.6937\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 100 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 100$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(100) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{2127.9878\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 200 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 200$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(200) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{2448.2818\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 500 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 500$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(500) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$
$$= \mathbf{2871.6876\ m^3/s}$$

- Para un **TR = 1000 años**:

  $C_1 = 1.01, C_2 = 4.37, m = 1.02, n = 0.04, A = 902.4235, T = 1000$

  Entonces:

$$Q = (1.01 + 4.37) \times log(1000) \times 902.4235^{1.02 \times 902.4235^{-0.04}}$$

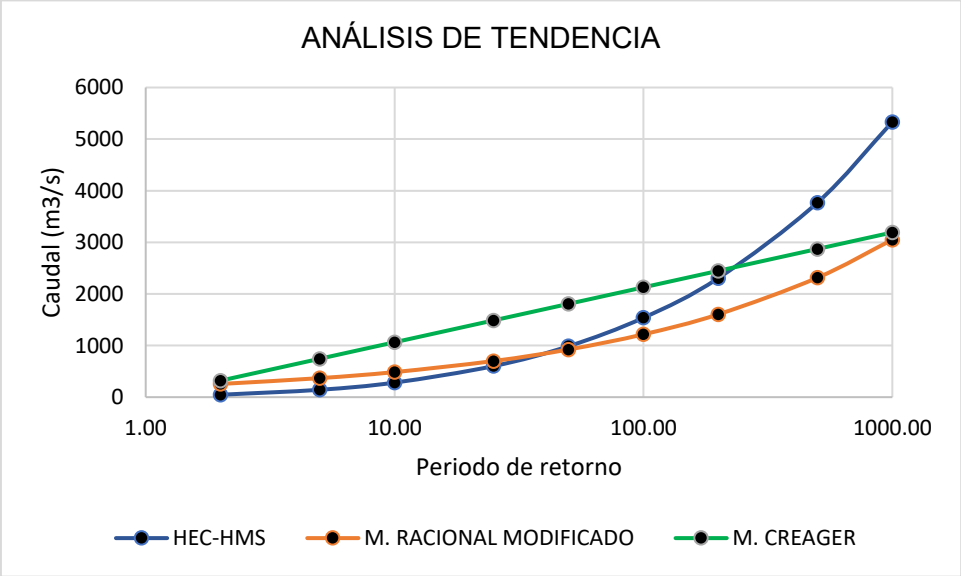
$$= \mathbf{3191.9817\ m^3/s}$$

Tabla N° 21: Caudales máximos con el Método de Creager

TR	Q (m3/s)
2	320.2941
5	743.6998
10	1063.9939
25	1487.3996
50	1807.6937
100	2127.9878
200	2448.2818
500	2871.6876
1000	3191.9817

4.1.10. Análisis de tendencia

Figura N° 48: Análisis de tendencia de caudales calculados



El gráfico muestra que los caudales máximos obtenidos con el modelo HEC-HMS son crecientes y se aproximan a los calculados con el Método Racional Modificado con periodos de retorno bajos. Sin embargo, en periodos de retorno mayores a 100 años la diferencia entre los resultados de ambos métodos aumenta.

También se puede visualizar que el método de Creager sobreestima los caudales en periodos de retorno de 5 a 100 años y tiene una tendencia lineal, por lo cual podemos decir que es un método conservador.

Debido a que en los métodos HEC-HMS y Método racional modificado se utilizó la data de precipitación de RAIN4PE, se puede deducir que el cálculo de caudales máximos con el uso de la data grillada de precipitación RAIN4PE es altamente eficaz para periodos de retorno de 2 a 100 años.

4.1. Discusión

Las características geomorfológicas muestran que la cuenca Bocapán tiene un ancho promedio de 11.42 km, factor de forma = 0.1446 y un coeficiente de compacidad = 1.7541, lo cual indica que es de forma alargada. Además, del resultado de la relación de confluencias (1.7825), relación de longitudes (0.9764), densidad de drenaje (1.8261) y frecuencia de ríos (3.4684) se puede inferir que la cuenca tiene una red de drenaje moderadamente equilibrada con un drenaje eficiente, lo cual sugiere que la escorrentía se distribuye progresivamente y no se concentra de manera abrupta. Sin embargo, aunque los picos de caudal pueden demorar en formarse según el tiempo de concentración (promedio = 1010.9 min), se podrían producir inundaciones ante precipitaciones intensas y de larga duración.

El producto grillado RAIN4PE proporcionó datos estimados de precipitación para el periodo comprendido entre el 01/01/1981 al 31/12/2015. Sin embargo, se optó por considerar el periodo 01/01/1981 – 31/12/2014 debido a la disponibilidad de datos observados de la estación Cañaveral del SENAMHI.

De los resultados de la validación de datos se obtuvo que la precipitación areal de la subcuenca V3 con RAIN4PE presenta los valores más óptimos correspondientes a las métricas de validación con un R^2=0.9648, RMSE=21.6479, MAE=8.449, PBIAS=8.2656 y NSE=0.9549. En cambio, con el uso de otro producto (PISCO) las métricas dieron resultados más alejados a los valores óptimos: R^2=0.9644, RMSE=41.031, MAE=14.552, PBIAS=33.732 y NSE=0.8379

La distribución estadística con el mejor ajuste para nuestros datos fue Log-Pearson tipo III con un delta máximo (diferencia máxima) de 0.0568 según la prueba de Smirnov.

Las intensidades de precipitación son 1.987 mm/hr, 2.864 mm/hr, 3.777 mm/hr, 5.444 mm/hr, 7.179 mm/hr, 9.466 mm/hr, 12.482 mm/hr, 17.99

mm/hr y 23.721 mm/hr para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente.

Los caudales máximos obtenidos con el modelo HEC-HMS son 46.3 m^3/s, 143.3 m^3/s, 282.4 m^3/s, 602.1 m^3/s, 986.7 m^3/s, 1538.5 m^3/s, 2307.2 m^3/s, 3769.6 m^3/s y 5333.2 m^3/s para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente.

Los caudales máximos obtenidos con el Método racional modificado son 255.7 m^3/s, 368.5 m^3/s, 485.9 m^3/s, 700.3 m^3/s, 923.4 m^3/s, 1217.6 m^3/s, 1605.5 m^3/s, 2314.1 m^3/s y 3051.2 m^3/s para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente.

Según el análisis de tendencia, el método de Creager sobreestima los caudales máximos para periodos de retorno de 5 a 100 años.

Los caudales máximos calculados con el modelo HEC-HMS se aproximan a los calculados con el Método racional modificado en periodos de retorno menores a 100 años, y con periodos de retorno mayores a 100 años el modelo HEC-HMS sobreestima los calculados por el método racional modificado.

Según Garabito (2021), se concluyó que: "*El caudal máximo de diseño para un periodo de retorno de 50 años en la cuenca seca caso quebrada Casitas Bocapán es de: 635.84 m3/s*". Sin embargo, en el presente estudio, los resultados muestran que, para un periodo de retorno de 50 años, el caudal máximo es de 986.7 m^3/s. Esta diferencia puede atribuirse, en primer lugar, a que Garabito (2021) empleó el método empírico de Izskowski y una data de precipitación observada con muchos datos faltantes. En contraste, en el presente estudio se utilizó el software HEC-HMS con métodos de pérdida y transformación, y la data de precipitación RAIN4PE previamente validada.

Por otro lado, Ortiz y Salinas (2022), concluyeron que: "*…la cuenca Bocapán, como resultado dio un área de 893.074 km2, perímetro 206.236 km, longitud de 76.283 km, pendiente promedio de la cuenca 21.17 % y con una curva numero de 62."* En contraste, en el presente estudio, los

resultados muestran que, la cuenca Bocapán tiene un área de 902.4235 km^2, perímetro 186.7901 km, longitud de cauce principal de 78.995 km, pendiente media de 20.88 % y una curva número de 73.9. Los resultados de las características geomorfológicas son muy aproximados, las diferencias mínimas se pueden atribuir a la diferencia entre las metodologías empleadas en el entorno SIG. Sin embargo, la diferencia entre los valores de la curva número, puede atribuirse a que, la curva número utilizada por Ortiz y Salinas (2022) es representativa de las condiciones normales de la cuenca, mientras que en el presente estudio se empleó la curva número correspondiente a condiciones húmedas, con el fin de calcular los caudales máximos.

Los resultados de la validación coinciden con los hallazgos de Cornejo (2023), quien identificó al producto RAIN4PE como el producto más adecuado para representar la respuesta hidrológica en la cuenca Puyango – Tumbes. De manera similar, en la cuenca Casitas – Bocapán se comprobó que RAIN4PE presenta un mejor ajuste a la precipitación observada, lo que confirma su confiabilidad para estudios hidrológicos en la región.

5. Conclusiones

La cuenca Bocapán tiene forma alargada y una red de drenaje moderadamente equilibrada, sus características geomorfológicas tales como el factor de forma, coeficiente de compacidad, densidad de drenaje y tiempo de concentración obtenidas con SIG permitieron mejorar la precisión en la estimación de caudales máximos.

La validación de datos demostró que el producto RAIN4PE proporciona estimaciones consistentes de precipitación, con métricas favorables de R^2, RMSE, MAE, PBIAS y NSE, en especial con los datos de la subcuenca V3, que ofrece la estimación más precisa y confiable de la precipitación.

Los caudales obtenidos con el modelo HEC-HMS y el Método racional modificado presentan coherencia hasta un periodo de retorno de 100 años, lo que respalda la fiabilidad de RAIN4PE en este rango.

Debido a que en los métodos HEC-HMS y Método racional modificado se utilizó la data de precipitación de RAIN4PE, se puede concluir que el cálculo de caudales máximos con el uso de la data grillada de precipitación RAIN4PE es altamente eficaz para periodos de retorno de 2 a 100 años.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios de topografía, infiltración, uso de suelo, cobertura vegetal para estudiar la evolución geomorfológica de la cuenca y analizar posibles cambios y/o alteraciones en el cauce y la red de drenaje.

La disponibilidad de datos de precipitación en la cuenca Bocapán es muy limitada debido a la falta de estaciones meteorológicas, se recomienda la instalación de más estaciones para poder validar datos grillados de precipitación en diferentes áreas de la cuenca.

Los caudales máximos obtenidos en la presente investigación se pueden utilizar como valores de referencia para futuras obras de defensas ribereñas con caudales máximos de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años.

Para la validación de los caudales obtenidos con periodos de retorno de 100 a 1000 años se hace necesario contar con datos observados, por ello, se recomienda la instalación de estaciones hidrométricas.

Se recomienda utilizar los datos obtenidos para futuras investigaciones orientadas al cálculo de caudales máximos con diferentes modelos.

7. Referencias bibliográficas

ANA. (2019). *Consejos de Recursos Hídricos de Cuenca Tumbes*. Obtenido de Hidrografía | Drupal: http://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/tumbes/Hidrograf%C3%ADa

Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., Huerta Julca, A., Fern, C., Vega Jácome, F., Sabino Rojas, E., & Felipe Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. *Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017*. Lima, Perú.

Búñuga Hernández, N. (2019). *APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MENSUALES EN LA SUB CUENCA DEL RÍO BIGOTE.* Piura, Perú. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/7d21c185-5187-4a42-b5a6-ada2021cc303/content

Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos.* Lima. Obtenido de https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf

Cadavid Cartagena, E. A. (2007). *Curvas IDF, Hietogramas de diseño de obras de infraestructura e impacto económico del periodo de retorno.* Bogotá. Obtenido de https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/e50eb32e-091f-4ee7-8144-f5eb0d388b45/content

Campomanes, G. P. (2015). *Manual de Hidrología Aplicada.* Lima. Obtenido de https://es.slideshare.net/dxfran/manual-de-hidrologia-giovene-perez-campomanes-civilgeeks

Cornejo Ruiz, C. E. (2023). *Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango – Tumbes 2022.* Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes.

Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., . . . Bronstert, A. (2021). *Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE). V. 1.0.* Obtenido de GFZ Data Services.: https://doi.org/10.5880/pik.2020.010

Garabito Infante, A. (2021). *Estimación del caudal máximo en cuencas secas para diseño de defensa ribereña - caso quebrada Casitas-Bocapán Tumbes - 2020.* Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica.* Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo%20de%20concentraci%c3%b3n.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2017). COMPENDIO ESTADÍSTICO DEL INDECI 2017 – GESTIÓN REACTIVA. Lima: INDECI. Dirección de Políticas, Planes y Evaluación.

Manchay Tocto, H. J., Aponte Olivera, A. G., & Carmona, A. A. (2023). Generación de precipitación para diferentes tiempos de retorno usando los productos grillados Rain4pe y PISCOp V2.1 en la cuenca del río Zaña. *3rd LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2023).* Obtenido de https://laccei.org/LEIRD2023-VirtualEdition/papers/Contribution_195_final_a.pdf

Montesinos, C. (2019). *Modelamiento hidrológico mensual distribuido para el monitoreo de sequías hidrológicas en la vertiente hidrográfica del Atlántico.* Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi. Dirección de Hidrología - DHI.

Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). Ciclo Hidrológico. *Foro Peruano para el Agua - GWP Perú.* Lima. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf

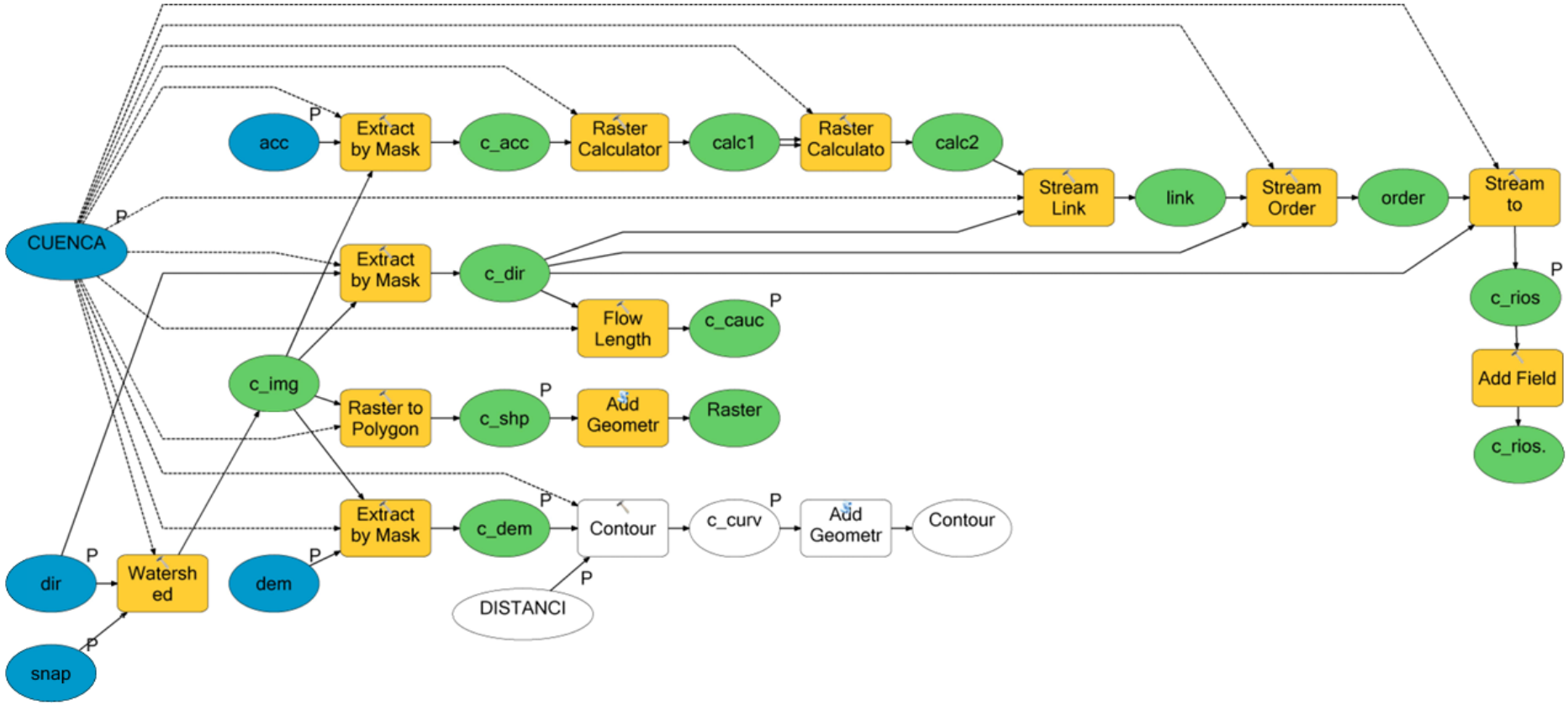
Ortiz Peña, G. J., & Salinas Oyola, B. (2022). *Modelamiento hidráulico con el software iber para el diseño de defensa ribereña de la Quebrada Bocapan - Tumbes – 2022* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes.

US Army Corps of Engineers. (2023). *Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

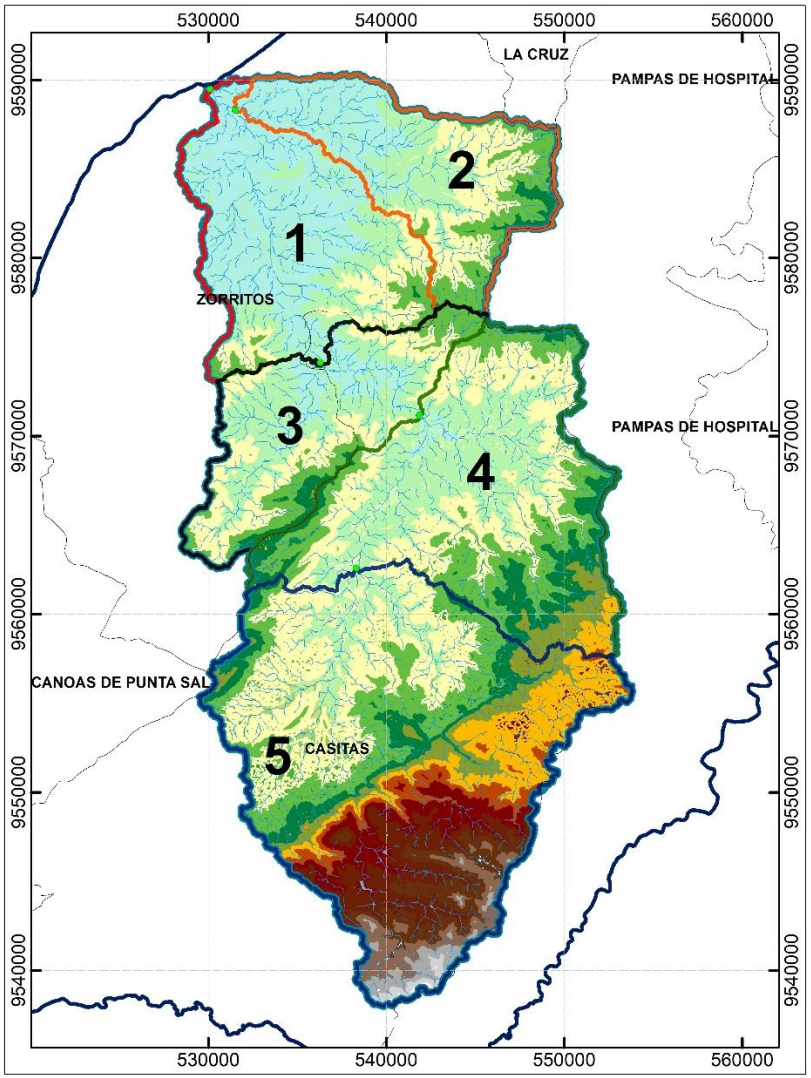
Villón, M. (2002). *Hidrología.* Lima: Editorial Villón.

8. Anexos

Anexo N° 01: Model_1 modelo en ArcMap para delimitación de cuenca



Anexo N° 02: Mapa de la Cuenca Bocapán



Leyenda

Cuenca Bocapán

Subcuencas Bocapán

1
2
3
4
5

Ríos

Límite Tumbes

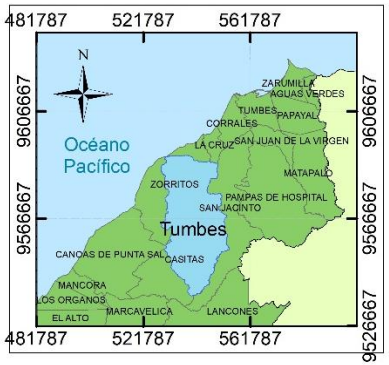
Elevación

Altura máx : 1539 m

Altura min : 7 m

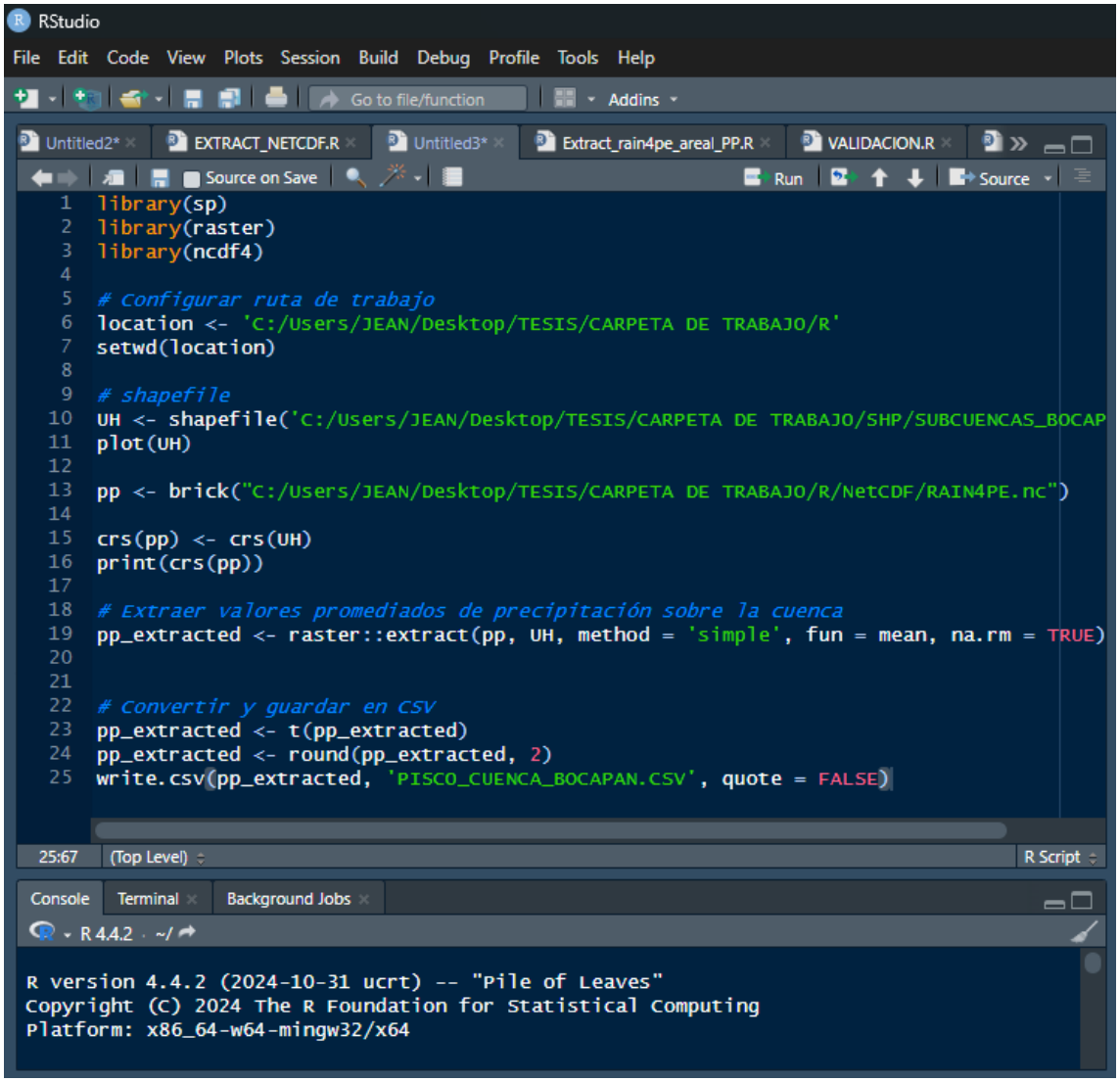
Curvas de nivel

10 - 110
111 - 190
191 - 270
271 - 360
361 - 470
471 - 590
591 - 700
701 - 810
811 - 930
931 - 1040
1041 - 1130
1131 - 1210
1211 - 1310
1311 - 1420
1421 - 1530



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES	
CUENCA BOCAPÁN	
DATUM WGS84	ZONA 17S
ESCALA 1:300,000	FORMATO A4
ELABORADO POR: BR. JEAN PIERE HERRERA RUEDA	

Anexo N° 03: Código en RStudio para extracción de datos



Anexo N° 04: Datos de precipitación mensual RAIN4PE de la Cuenca Bocapán periodo 01/1981 – 12/2015

	V1	V2	V3	V4	V5
01/1981	1.0032	1.1834	1.0563	1.678	0.9253
02/1981	35.2607	39.7228	38.8598	54.6822	41.8739
03/1981	49.0379	53.9037	54.5904	77.5129	74.1187
04/1981	16.4076	19.0377	19.8299	33.7858	30.2623
05/1981	0.6615	0.7548	0.8003	1.0583	0.6967
06/1981	0.519	0.4924	0.7158	0.7218	0.4058
07/1981	0.2055	0.2814	0.2844	0.28	0.1055
08/1981	0.156	0.1279	0.2524	0.2083	0.171
09/1981	0.1838	0.2426	0.2583	0.227	0.0671
10/1981	0.2367	0.2143	0.433	0.3911	0.2495
11/1981	0.1807	0.1213	0.2709	0.3572	0.3009
12/1981	0.6544	0.7537	0.7625	0.8177	0.4227
01/1982	2.6578	3.052	3.1104	3.6225	3.0764

02/1982	3.1857	3.1747	3.7416	6.1888	6.5477
03/1982	1.8726	1.9382	2.0199	2.328	1.6795
04/1982	23.832	25.2179	23.352	30.0096	22.5644
05/1982	1.55	1.6553	1.4518	0.9783	0.8071
06/1982	0.0929	0.0772	0.2036	0.2046	0.1538
07/1982	0.218	0.2071	0.352	0.3053	0.1214
08/1982	0.1371	0.1274	0.1773	0.1668	0.1212
09/1982	0.231	0.2155	0.3013	0.3005	0.2128
10/1982	0.5333	0.5955	0.6674	0.8221	0.7921
11/1982	3.6751	3.6795	3.3415	12.3051	7.8067
12/1982	81.6919	90.211	85.0751	110.0144	103.8261
01/1983	468.474	478.4128	498.6294	531.9002	528.4772
02/1983	402.256	398.5589	438.6816	481.0793	441.6597
03/1983	332.492	330.3927	344.6027	404.5775	431.3755
04/1983	504.979	507.8027	501.2488	561.4389	539.0767
05/1983	563.263	569.8666	581.9738	645.3417	581.559
06/1983	227.155	233.2837	220.4401	220.7279	208.1897
07/1983	39.1124	48.5735	35.3353	34.0532	22.9436
08/1983	0.2226	0.2315	0.2598	0.2659	0.1992
09/1983	3.172	4.3712	3.2657	3.2384	1.878
10/1983	1.3177	1.4669	1.3973	1.7331	1.6146
11/1983	0.6142	0.7264	0.6525	0.7157	0.5455
12/1983	8.0987	11.1889	5.1655	6.8045	4.6004
01/1984	1.1812	1.0753	1.1055	1.9929	1.8236
02/1984	160.039	167.5712	182.5648	253.8603	238.008
03/1984	62.4276	65.1647	60.3523	77.0965	84.2299
04/1984	3.1945	3.7419	3.0738	3.5676	3.8724
05/1984	0.862	1.0062	1.1251	1.233	0.7173
06/1984	1.1817	1.5383	1.4071	1.4566	0.8904
07/1984	0.2592	0.2735	0.339	0.3151	0.3186
08/1984	0.1417	0.1356	0.2287	0.209	0.1037
09/1984	0.3896	0.3855	0.4366	0.3939	0.2749
10/1984	0.6452	0.7265	0.7064	0.6864	0.4788
11/1984	0.2301	0.2346	0.3018	0.2732	0.2
12/1984	2.3995	3.0731	2.3921	3.0308	1.3083
01/1985	6.521	7.0154	7.0291	7.5099	5.532
02/1985	12.3766	13.4093	14.3443	20.5361	17.5209
03/1985	35.778	37.8276	38.7721	56.6013	45.3432
04/1985	1.4172	1.6284	1.6412	2.1438	1.9888
05/1985	4.9958	5.8874	5.3608	6.6573	4.0945
06/1985	0.3847	0.4796	0.6141	0.6592	0.3244
07/1985	0.2395	0.2679	0.3101	0.3643	0.2268
08/1985	0.2085	0.2171	0.2961	0.2908	0.1454
09/1985	0.1802	0.1839	0.2923	0.2357	0.1025
10/1985	0.5976	0.706	0.795	0.9642	0.5691

11/1985	0.0975	0.0656	0.2187	0.2714	0.0793
12/1985	1.0044	1.0484	0.8996	0.8643	0.6153
01/1986	39.1358	42.9208	41.4064	49.171	41.0476
02/1986	14.5336	15.4714	13.7905	38.068	19.3219
03/1986	5.9944	5.6542	7.4423	7.9534	6.682
04/1986	24.0292	26.5446	22.7048	37.4949	29.8556
05/1986	0.6561	0.7429	0.7789	1.1156	0.7582
06/1986	0.0807	0.0685	0.1498	0.1438	0.1272
07/1986	0.2093	0.2221	0.2724	0.2946	0.2035
08/1986	0.1324	0.1265	0.2396	0.2743	0.0947
09/1986	0.1109	0.0588	0.2399	0.2342	0.1265
10/1986	0.6884	0.5505	0.9351	0.9838	0.5925
11/1986	1.4732	1.5417	1.7676	1.9425	1.2617
12/1986	1.7569	2.1439	1.931	3.7184	2.6812
01/1987	100.216	105.2196	114.7657	136.882	126.4478
02/1987	255.839	244.3392	271.5828	293.1761	327.8266
03/1987	207.232	207.8568	240.2281	313.1422	329.4344
04/1987	74.8789	75.1177	74.106	83.4975	87.0427
05/1987	5.2743	5.3291	6.4993	6.6116	4.959
06/1987	0.2163	0.209	0.2703	0.293	0.2502
07/1987	0.5758	0.711	0.606	0.9	0.4321
08/1987	1.1163	1.4636	1.1869	1.4176	0.6632
09/1987	0.2455	0.2642	0.3477	0.3749	0.1552
10/1987	0.3093	0.2906	0.3891	0.3642	0.2729
11/1987	0.1676	0.086	0.3509	0.3813	0.1307
12/1987	0.4953	0.5772	0.6082	0.8697	0.5035
01/1988	17.4821	19.1695	17.9753	21.0234	15.5469
02/1988	14.4748	17.8106	13.1899	22.0829	10.9744
03/1988	10.3286	10.2131	13.1917	15.6917	13.6238
04/1988	14.595	14.3551	13.0866	12.6136	13.8507
05/1988	0.6851	0.7778	0.6358	0.6188	0.3371
06/1988	0.1845	0.1837	0.2578	0.2603	0.1339
07/1988	0.2976	0.3362	0.3449	0.3949	0.1893
08/1988	0.1385	0.1255	0.1721	0.214	0.1974
09/1988	0.2524	0.2084	0.3458	0.3165	0.2226
10/1988	0.2325	0.1941	0.3436	0.3688	0.1534
11/1988	1.4158	1.6612	1.4851	1.7012	1.079
12/1988	1.5494	2.0042	1.8212	2.8143	1.4255
01/1989	52.0007	59.2394	57.078	72.5523	52.8879
02/1989	167.752	181.2943	188.2122	225.4101	187.8231
03/1989	111.321	114.511	114.7014	136.802	127.8834
04/1989	21.8572	24.7035	24.9693	38.5241	33.2857
05/1989	3.1552	3.813	3.7779	5.7486	3.6737
06/1989	1.9085	2.1251	1.9368	2.4929	1.7427
07/1989	0.1844	0.1778	0.2688	0.2643	0.1801

08/1989	0.1882	0.1776	0.2448	0.2646	0.1479
09/1989	0.2203	0.2279	0.2781	0.2702	0.1587
10/1989	0.8327	0.9355	0.8489	0.8054	0.9272
11/1989	0.108	0.0828	0.2255	0.2587	0.1502
12/1989	0.1561	0.128	0.2146	0.2173	0.1459
01/1990	3.1673	4.2705	3.6624	5.1031	2.6293
02/1990	19.2509	22.98	18.9858	23.1065	13.4693
03/1990	10.7815	12.8101	11.093	21.0959	12.6383
04/1990	6.3163	6.9466	7.1257	8.4309	6.986
05/1990	1.3172	1.7278	1.6216	2.0332	1.2727
06/1990	0.5299	0.6559	0.7106	0.9526	0.5794
07/1990	0.4049	0.4534	0.363	0.3155	0.1305
08/1990	0.231	0.1731	0.3877	0.3522	0.0753
09/1990	0.2067	0.1844	0.2818	0.2453	0.0569
10/1990	0.8023	0.7895	0.8844	0.8679	0.6972
11/1990	1.0627	1.1605	1.3282	1.5589	1.4553
12/1990	1.0563	1.0749	1.207	1.2805	1.3021
01/1991	4.0086	3.8833	3.3642	3.1326	3.0501
02/1991	24.0831	29.7447	25.1921	35.1902	24.2418
03/1991	59.5917	67.3939	75.9996	107.6565	82.4716
04/1991	2.1824	2.532	2.4441	4.92	2.6204
05/1991	12.2088	14.4196	13.3959	13.0384	7.6565
06/1991	0.2235	0.2351	0.2917	0.3099	0.1762
07/1991	0.1418	0.1056	0.2166	0.2273	0.1366
08/1991	0.0771	0.0497	0.1507	0.1256	0.0894
09/1991	0.1042	0.0827	0.1547	0.1395	0.0717
10/1991	0.2554	0.284	0.3895	0.4593	0.1885
11/1991	0.3689	0.3076	0.5768	0.7405	0.3412
12/1991	2.6033	3.7545	3.0045	4.524	2.2997
01/1992	30.1063	32.0424	33.395	39.4745	30.0931
02/1992	151.659	162.2984	170.825	182.6534	158.7139
03/1992	398.364	411.369	499.6734	552.6309	525.0793
04/1992	268.736	283.2951	283.3038	353.2934	293.3779
05/1992	68.2298	84.3484	85.3788	104.0795	66.0601
06/1992	0.6487	0.6077	0.9413	1.2036	0.73
07/1992	0.2807	0.3295	0.3677	0.4124	0.1909
08/1992	0.1178	0.1011	0.2175	0.207	0.0434
09/1992	0.2189	0.222	0.3282	0.3579	0.2023
10/1992	0.2512	0.2682	0.315	0.4036	0.2121
11/1992	1.0861	1.3724	1.4889	2.7977	1.1407
12/1992	3.0444	3.8606	4.0076	5.501	2.9125
01/1993	7.4362	8.582	7.9774	8.1962	6.1248
02/1993	139.935	145.9993	147.8045	171.9221	157.4492
03/1993	83.8315	92.2191	89.878	132.4409	126.9403
04/1993	51.0758	54.1642	62.419	82.298	79.0561

05/1993	13.2838	15.7928	15.2117	23.4593	16.8328
06/1993	1.4627	1.5739	1.9435	2.1324	1.4825
07/1993	0.6918	0.911	0.795	1.0419	0.658
08/1993	0.3131	0.3668	0.3516	0.4647	0.212
09/1993	0.2585	0.2853	0.3614	0.3787	0.234
10/1993	2.9539	3.6661	3.4918	4.6953	2.7111
11/1993	0.2381	0.2253	0.2973	0.279	0.1902
12/1993	1.8776	2.8269	2.0875	3.497	1.5684
01/1994	58.3658	66.2932	67.2906	82.4816	60.1292
02/1994	61.6747	67.2623	70.3733	108.9316	96.89
03/1994	57.4655	61.1067	59.8444	66.6378	61.4054
04/1994	11.9138	13.6742	13.502	31.6731	21.1884
05/1994	8.7634	11.433	9.3156	16.9979	8.2227
06/1994	0.427	0.5451	0.526	0.6361	0.3265
07/1994	0.3562	0.4363	0.4528	0.4916	0.3005
08/1994	0.2423	0.2399	0.2903	0.2569	0.1918
09/1994	0.2969	0.3061	0.3165	0.3151	0.2855
10/1994	0.3559	0.3795	0.4321	0.6695	0.381
11/1994	0.3397	0.3156	0.4622	0.4778	0.3359
12/1994	16.5913	19.5733	20.2938	26.3789	17.3
01/1995	33.7622	38.2234	30.8875	34.9072	30.7044
02/1995	74.4936	78.766	80.1412	95.75	98.0696
03/1995	19.2123	23.0321	20.7559	27.8906	21.557
04/1995	6.9045	6.5748	8.937	11.0438	10.2568
05/1995	6.5324	8.8472	8.0306	10.1674	5.1618
06/1995	0.1175	0.1022	0.1994	0.1764	0.0899
07/1995	1.2707	1.5905	1.5038	1.8024	1.1123
08/1995	0.2048	0.24	0.285	0.2675	0.1472
09/1995	0.129	0.1296	0.2175	0.2291	0.125
10/1995	0.518	0.6095	0.5733	0.67	0.4153
11/1995	2.3318	3.3015	2.5452	3.3432	1.5957
12/1995	8.1598	9.3085	10.0894	11.3443	9.4608
01/1996	12.7879	16.1016	13.0176	17.5264	11.5445
02/1996	38.3202	44.7555	39.9458	44.6662	34.4864
03/1996	28.4084	29.2667	29.4731	36.375	31.8564
04/1996	5.6775	7.2019	6.4468	8.3939	5.2534
05/1996	0.5335	0.506	0.6731	0.6859	0.4852
06/1996	0.2493	0.268	0.2861	0.3049	0.2256
07/1996	0.4183	0.5212	0.3944	0.3115	0.1296
08/1996	0.1521	0.2113	0.2314	0.1979	0.1102
09/1996	0.1621	0.1829	0.2228	0.203	0.0626
10/1996	0.5214	0.726	0.5912	0.5623	0.335
11/1996	0.3369	0.4006	0.4159	0.3914	0.2329
12/1996	1.3592	1.7526	1.3941	2.1954	0.8013
01/1997	10.6169	11.6542	12.7992	13.4545	10.0207

02/1997	29.2988	31.5104	29.8976	32.258	29.2832
03/1997	107.36	109.6707	106.8593	120.1176	118.3875
04/1997	53.2016	56.6152	57.4093	70.4475	64.3316
05/1997	20.0035	26.1516	21.7622	28.8471	22.464
06/1997	14.0563	15.0297	16.8573	21.3153	16.9448
07/1997	3.1611	4.2696	2.948	2.8161	1.5761
08/1997	0.3709	0.422	0.4156	0.5097	0.3343
09/1997	14.2442	14.2698	16.9736	28.8166	29.7781
10/1997	8.6844	9.8297	9.2587	13.7933	9.9566
11/1997	89.9074	104.6327	90.1164	88.4945	62.3041
12/1997	448.715	465.5576	453.775	459.185	448.9564
01/1998	470.081	466.7821	492.3584	521.1776	523.5809
02/1998	643.078	626.6974	675.8118	716.6817	652.6599
03/1998	499.915	497.0379	509.0025	535.4484	586.8258
04/1998	396.228	400.3197	404.7589	460.6656	434.6695
05/1998	88.3143	97.3835	89.3187	91.5754	81.1116
06/1998	7.1412	6.909	7.3433	7.5793	7.5262
07/1998	1.364	1.8341	1.4113	1.4369	0.9466
08/1998	0.2098	0.2555	0.2403	0.3944	0.2026
09/1998	0.993	1.1602	1.3904	1.576	1.1801
10/1998	1.7903	2.2194	2.0719	3.22	1.9301
11/1998	0.2885	0.2985	0.3426	0.3266	0.2094
12/1998	4.7302	5.3416	4.9511	5.7149	3.8859
01/1999	15.003	14.6699	16.9922	19.5592	19.7824
02/1999	146.312	148.4923	152.1083	168.496	175.3968
03/1999	77.4267	87.0332	87.6385	118.367	115.0751
04/1999	78.6792	90.3495	90.1248	122.5917	86.6425
05/1999	27.2739	29.4266	32.2272	38.4416	30.7295
06/1999	1.467	1.7296	1.3528	1.285	0.9418
07/1999	0.379	0.5001	0.4321	0.428	0.2746
08/1999	0.244	0.2621	0.26	0.2596	0.1303
09/1999	0.7143	0.984	0.7826	0.9525	0.5939
10/1999	0.6747	0.8861	0.6262	0.6009	0.4722
11/1999	0.453	0.4791	0.4777	0.5277	0.3956
12/1999	3.624	4.0464	4.009	8.1726	9.1931
01/2000	2.4871	2.8101	2.5573	3.245	3.2671
02/2000	53.7731	56.4761	59.1529	82.7209	76.5001
03/2000	43.1134	48.1843	56.7267	97.0291	99.723
04/2000	81.3789	81.5324	90.6346	112.4087	108.077
05/2000	31.6669	36.721	35.2651	41.2351	31.4499
06/2000	4.5222	4.7741	4.6478	4.6891	4.1731
07/2000	0.1686	0.2001	0.2526	0.2623	0.1248
08/2000	0.2098	0.2646	0.2883	0.2999	0.1421
09/2000	0.195	0.202	0.239	0.2174	0.1322
10/2000	0.0994	0.0816	0.198	0.2133	0.0803

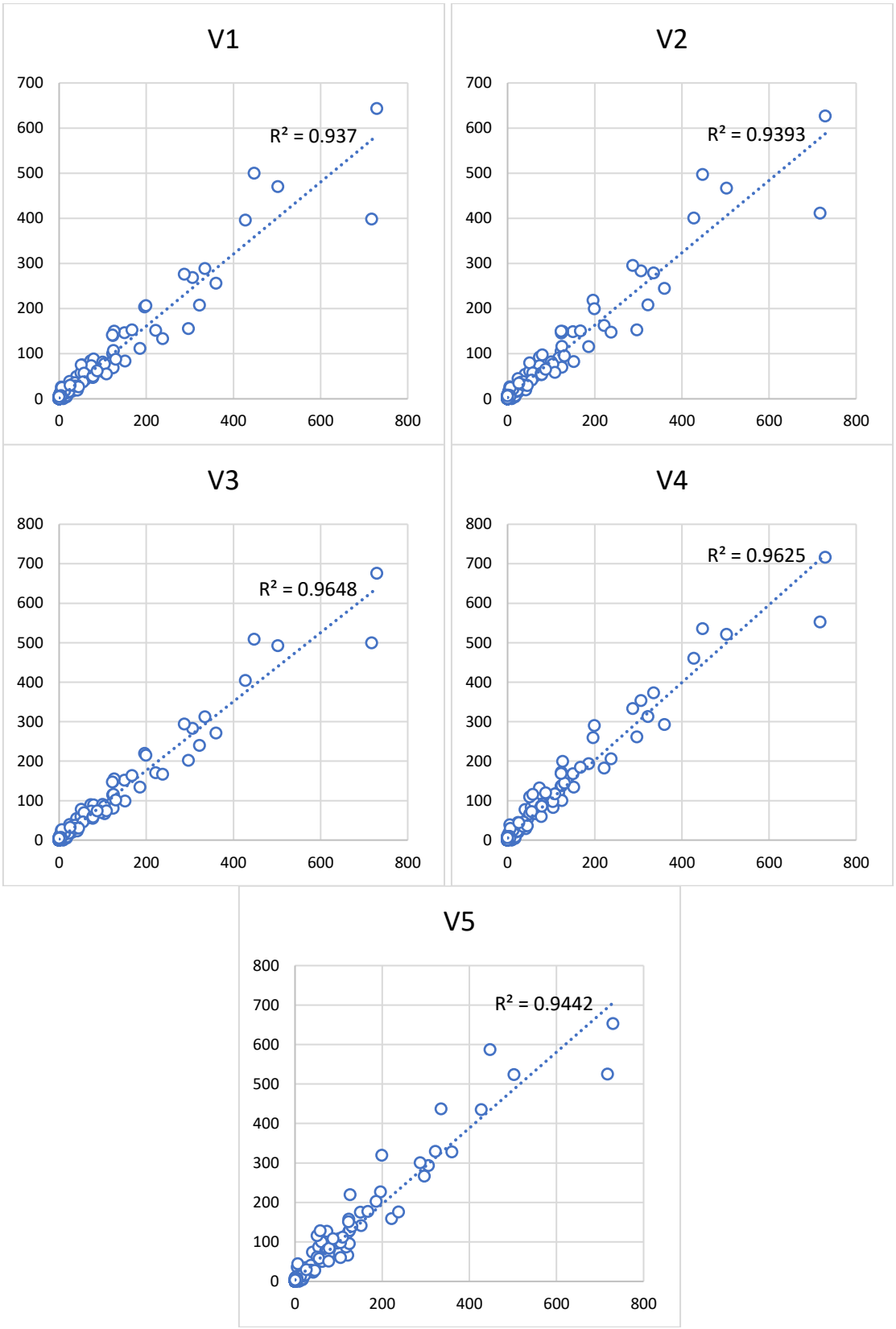
11/2000	0.2087	0.2169	0.2998	0.3352	0.1669
12/2000	6.3896	6.2036	6.8929	7.8537	11.3428
01/2001	68.3921	69.8621	81.029	100.5014	95.7703
02/2001	77.3481	76.9035	85.7864	97.7968	98.2077
03/2001	288.41	278.8205	312.2017	373.173	436.8541
04/2001	73.2367	73.2044	73.7703	78.5651	79.9639
05/2001	2.6454	3.5721	3.3823	4.6656	2.3168
06/2001	0.2802	0.3624	0.3102	0.3382	0.1606
07/2001	0.2301	0.3426	0.2634	0.277	0.1327
08/2001	0.1509	0.1583	0.207	0.1898	0.0825
09/2001	0.1525	0.2305	0.2071	0.2345	0.1688
10/2001	0.1929	0.1756	0.2699	0.2539	0.249
11/2001	3.7012	3.8503	3.4687	3.26	3.372
12/2001	3.6644	3.9067	3.9632	5.254	4.4295
01/2002	6.5679	7.0035	8.3325	9.3132	6.9891
02/2002	147.738	164.9558	175.5326	229.7453	194.5497
03/2002	307.98	296.0617	356.5791	397.8445	435.2308
04/2002	219.378	216.9001	234.274	252.8521	251.7148
05/2002	1.9137	2.1857	2.4112	2.7301	2.1448
06/2002	0.4568	0.5361	0.3865	0.3803	0.197
07/2002	0.1663	0.0988	0.2097	0.1962	0.0679
08/2002	0.6091	0.5025	0.9605	1.0204	0.596
09/2002	0.5448	0.571	0.7634	0.8333	0.5313
10/2002	2.3948	2.7131	2.7715	3.9199	2.8421
11/2002	0.3244	0.311	0.386	0.4468	0.3668
12/2002	8.9803	11.445	10.1781	16.4543	8.0644
01/2003	22.521	26.8053	25.3713	38.7938	26.0659
02/2003	56.2418	58.0055	59.7686	73.7147	70.85
03/2003	17.8932	19.7623	18.6157	33.5161	25.2909
04/2003	16.6154	15.2814	20.711	22.8442	20.5512
05/2003	1.3372	1.6787	1.5864	1.8287	1.0631
06/2003	0.9125	1.1842	1.0016	1.4888	0.9015
07/2003	0.6063	0.8291	0.64	0.6246	0.3008
08/2003	0.258	0.3028	0.3284	0.3709	0.1631
09/2003	0.1867	0.2169	0.2585	0.2567	0.1896
10/2003	0.2943	0.2881	0.3275	0.2484	0.1037
11/2003	0.6172	0.6595	0.7261	1.0006	1.12
12/2003	14.4099	16.3278	14.7264	15.1406	10.5196
01/2004	10.4813	13.9575	11.4556	14.6839	8.7682
02/2004	56.2567	58.3901	67.6214	92.5445	79.86
03/2004	35.4317	37.8257	37.7195	46.1978	40.467
04/2004	21.503	25.6887	24.802	29.8836	21.0794
05/2004	2.6817	3.4252	2.4738	2.9414	1.2397
06/2004	0.6273	0.7215	0.761	0.9616	0.6126
07/2004	0.7168	0.7568	0.7778	0.8307	0.5702

08/2004	0.1891	0.1553	0.2544	0.2285	0.1018
09/2004	1.3891	1.6944	1.1936	0.749	0.3684
10/2004	3.8644	4.1532	4.7221	4.5466	3.7889
11/2004	0.3704	0.3471	0.4415	0.4598	0.4083
12/2004	0.7607	0.861	0.7704	0.7032	0.6886
01/2005	2.7227	3.0622	3.0065	3.5228	2.7693
02/2005	13.2798	13.1021	11.9027	12.5332	12.2365
03/2005	48.5617	50.8471	53.5873	74.3609	75.8876
04/2005	18.2823	20.8074	13.647	11.8096	7.4914
05/2005	0.6138	0.6225	0.6185	0.7764	1.0251
06/2005	0.9571	1.174	1.1089	1.6341	1.0636
07/2005	0.0836	0.0461	0.1805	0.206	0.0824
08/2005	0.1926	0.2087	0.2822	0.3167	0.1642
09/2005	0.1537	0.1236	0.1977	0.1956	0.0719
10/2005	0.5255	0.6409	0.6868	0.7332	0.3935
11/2005	0.974	1.2673	1.1638	1.7907	0.8863
12/2005	3.523	4.4802	3.794	6.1266	2.9359
01/2006	26.4071	32.7039	30.8061	37.7722	27.5983
02/2006	203.495	218.3774	219.5711	259.3631	226.6339
03/2006	74.8333	79.428	78.3121	109.3978	115.9384
04/2006	4.5032	5.2222	5.3628	10.7281	7.3266
05/2006	2.8333	3.3007	3.3667	4.8113	3.1389
06/2006	0.835	0.8514	1.0511	0.9664	0.6515
07/2006	0.447	0.5574	0.5042	0.5338	0.3209
08/2006	0.3568	0.4793	0.378	0.333	0.1622
09/2006	0.2925	0.3745	0.3609	0.3879	0.2417
10/2006	0.2833	0.2809	0.3793	0.3743	0.265
11/2006	2.402	3.0313	2.6368	3.6586	2.4501
12/2006	5.0207	6.161	5.7689	7.4296	5.4838
01/2007	48.3009	55.1966	54.609	67.1997	50.5537
02/2007	6.3605	7.4783	6.6097	9.8011	8.092
03/2007	83.3666	82.2215	99.2429	134.0406	140.8605
04/2007	10.2904	11.0655	12.7816	22.1475	16.8433
05/2007	1.3155	1.7092	1.1674	0.9032	0.4935
06/2007	0.4971	0.4404	0.5946	0.6664	0.5025
07/2007	0.2318	0.2476	0.3611	0.364	0.1455
08/2007	0.3838	0.5552	0.3965	0.3859	0.2322
09/2007	0.2055	0.2335	0.3191	0.3097	0.1549
10/2007	0.3181	0.412	0.408	0.3904	0.2337
11/2007	0.6439	0.8468	0.7335	0.8079	0.4705
12/2007	2.5281	3.25	2.9296	3.2124	1.8498
01/2008	107.189	116.2587	116.3178	137.9875	128.8013
02/2008	276.205	295.4198	294.2906	333.4575	300.3526
03/2008	150.048	149.0687	155.341	199.3477	219.2186
04/2008	25.85	26.6449	25.1937	39.2734	36.2506

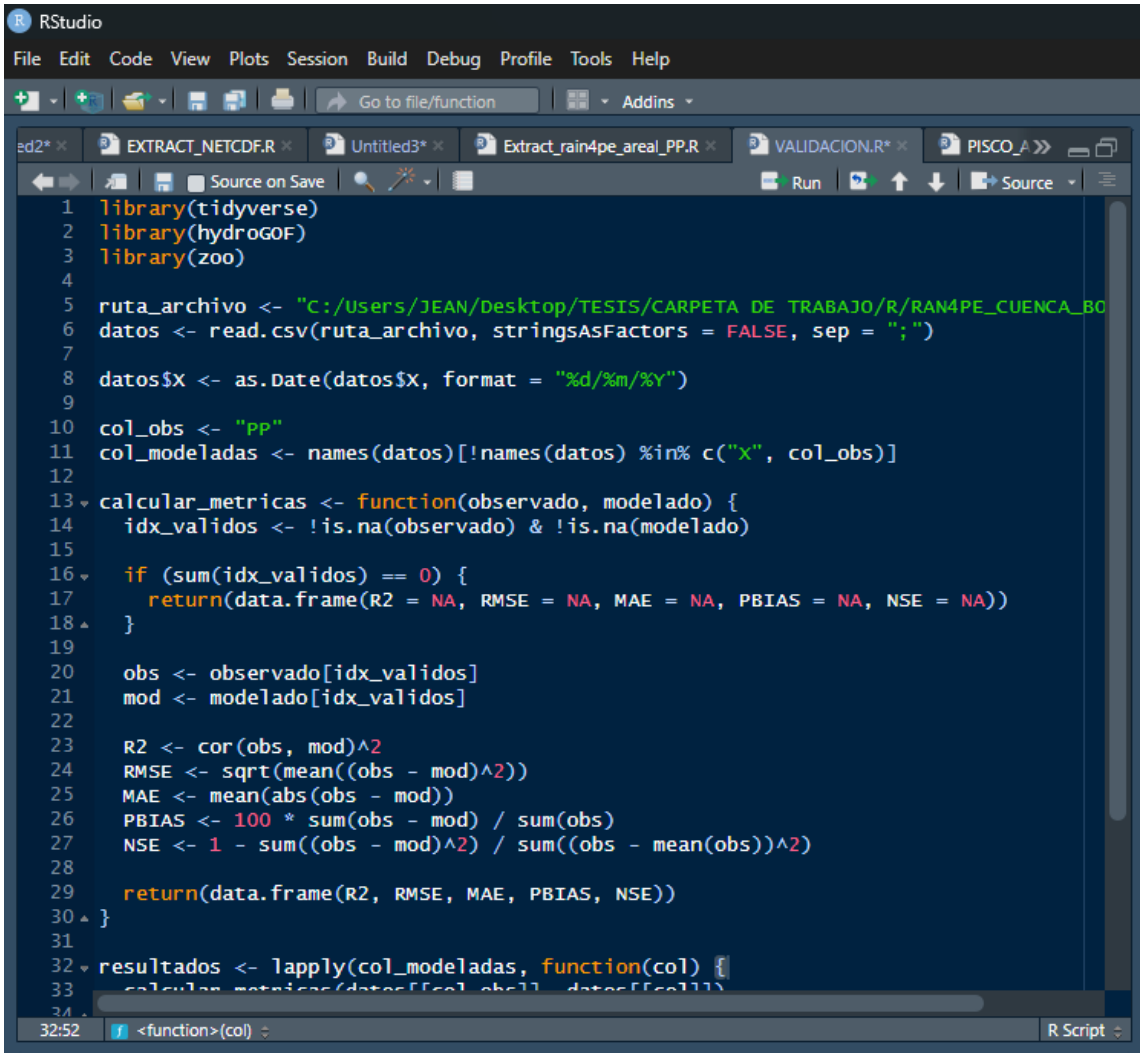
05/2008	6.2961	8.4093	7.0069	10.482	6.0763
06/2008	0.7915	0.9906	0.924	1.122	0.6915
07/2008	2.8384	3.2207	3.3358	4.5691	3.034
08/2008	0.3422	0.3424	0.3533	0.3125	0.224
09/2008	0.2519	0.276	0.3397	0.3032	0.1497
10/2008	1.8232	1.894	2.245	2.6015	2.2007
11/2008	0.8102	1.0694	1.0306	1.1597	0.7169
12/2008	0.4586	0.4526	0.5927	0.7524	0.4166
01/2009	133.125	147.5002	166.7661	206.2481	175.7245
02/2009	87.3743	94.6666	101.5523	144.9833	139.489
03/2009	56.692	57.1804	69.7705	115.9549	128.3988
04/2009	18.7707	19.8219	23.0172	29.1432	22.8137
05/2009	4.9072	6.0566	5.356	6.4261	4.2923
06/2009	1.6192	1.1092	2.5789	2.8796	1.874
07/2009	0.195	0.129	0.3162	0.3595	0.2256
08/2009	0.3019	0.3843	0.3921	0.4028	0.2208
09/2009	0.4612	0.6054	0.5574	0.5901	0.3362
10/2009	0.2556	0.2801	0.3041	0.2916	0.1982
11/2009	3.8867	3.733	4.8639	4.4613	3.3754
12/2009	6.8683	8.2282	7.9222	10.521	7.4645
01/2010	37.444	41.4053	46.2119	72.4659	57.3081
02/2010	141.332	149.7606	147.2517	169.1074	150.9046
03/2010	111.49	115.3061	134.5057	193.5736	202.2599
04/2010	48.3567	56.6681	59.1233	86.458	68.1602
05/2010	2.0897	2.3769	2.2814	3.3931	2.8085
06/2010	1.4921	2.0836	1.9007	2.4307	1.2395
07/2010	0.7933	0.9127	0.9693	0.97	0.671
08/2010	0.2465	0.2711	0.2894	0.2384	0.1147
09/2010	0.249	0.3002	0.2355	0.2122	0.1049
10/2010	0.3232	0.3924	0.3506	0.4017	0.3249
11/2010	0.6557	0.7513	0.7261	0.942	0.5733
12/2010	3.5579	3.8607	3.7592	3.8244	2.9619
01/2011	14.2408	18.3243	14.3364	16.7835	10.0503
02/2011	47.1608	53.4243	55.0239	60.0171	51.1009
03/2011	3.9053	4.3136	4.0896	6.1504	7.0727
04/2011	55.1319	58.2963	74.0871	117.6162	111.5007
05/2011	4.192	5.268	4.9696	6.8876	3.8987
06/2011	3.1537	4.2597	3.6629	5.7114	2.9826
07/2011	6.8042	6.3482	8.3102	8.2984	6.661
08/2011	0.1893	0.234	0.2497	0.2375	0.0974
09/2011	0.2009	0.202	0.3004	0.308	0.1569
10/2011	0.7823	0.9453	0.9288	1.3284	0.83
11/2011	0.5835	0.7192	0.7897	1.1089	0.7065
12/2011	3.7559	4.4332	4.6041	5.5019	3.7503
01/2012	49.9033	53.8664	58.3978	85.967	83.3944

02/2012	206.288	199.3685	215.0951	290.3297	319.1223
03/2012	155.649	152.4249	202.3019	261.4738	266.7495
04/2012	61.8107	65.2282	74.0396	119.6816	107.7303
05/2012	13.0639	15.5889	16.5567	20.4918	14.0932
06/2012	1.8229	2.2641	1.9678	2.3536	1.3856
07/2012	0.7486	0.9162	0.9444	1.23	0.7671
08/2012	0.168	0.1828	0.1904	0.1699	0.0823
09/2012	0.1247	0.1142	0.2152	0.223	0.0485
10/2012	0.3447	0.4059	0.4355	0.4798	0.3328
11/2012	0.7562	0.791	0.9599	1.2393	1.0367
12/2012	1.1969	1.4563	1.3463	1.71	1.0421
01/2013	15.6755	18.1098	17.7019	22.7719	15.2971
02/2013	28.0073	30.6343	29.9902	34.44	28.4323
03/2013	152.469	150.2777	163.6023	184.6114	177.1807
04/2013	15.7697	19.6811	12.9594	14.373	10.5439
05/2013	8.8946	9.2952	9.3326	13.5041	14.1461
06/2013	0.2196	0.2613	0.3524	0.3673	0.2247
07/2013	0.3197	0.3898	0.3952	0.3586	0.1403
08/2013	0.2359	0.2776	0.344	0.3195	0.1531
09/2013	0.1815	0.1654	0.3123	0.2605	0.2516
10/2013	2.2513	2.7123	2.2573	2.7619	1.6835
11/2013	0.3968	0.4093	0.3728	0.32	0.2558
12/2013	0.9455	1.2922	1.0089	1.2182	1.0931
01/2014	17.4302	21.7827	18.1199	25.0536	13.0854
02/2014	26.6052	29.3014	30.5736	36.1491	27.6317
03/2014	24.59	24.7623	26.4981	29.6203	44.7384
04/2014	6.8765	7.3436	7.1045	9.4418	7.9667
05/2014	30.0431	34.3176	32.7271	44.0185	29.7695
06/2014	5.3544	8.2729	6.3078	9.4288	3.4186
07/2014	1.5296	2.2083	1.5802	1.9076	1.057
08/2014	0.2191	0.2645	0.3289	0.2882	0.218
09/2014	0.2465	0.2257	0.3329	0.3526	0.2566
10/2014	3.9065	4.1608	4.2446	4.149	3.5961
11/2014	0.3818	0.4448	0.5117	0.736	0.5406
12/2014	4.7819	6.2619	4.8123	6.0234	3.2855

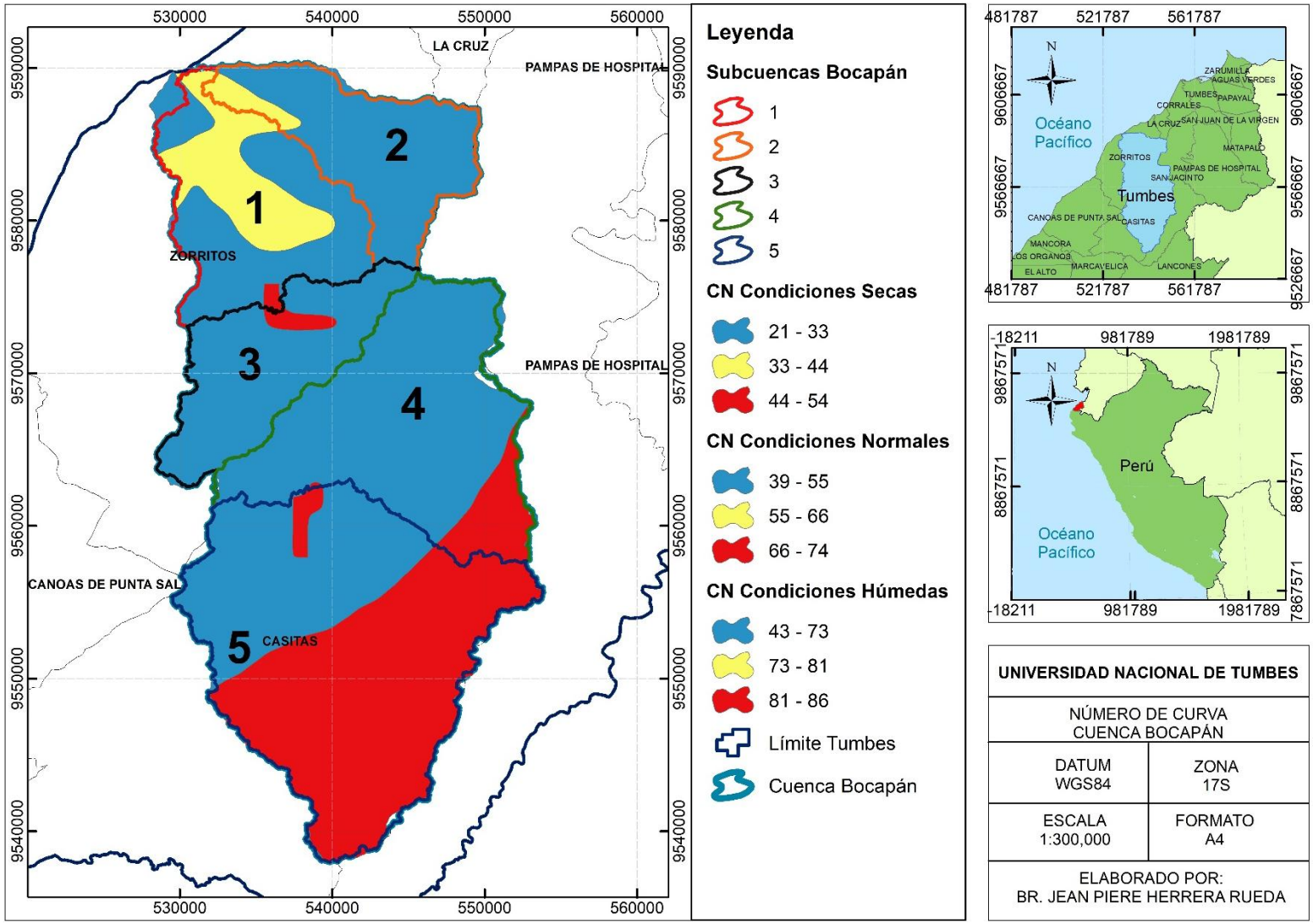
Anexo N° 05: Análisis de correlación: Data RAIN4PE vs Est. Cañaveral



Anexo N° 06: Código en RStudio para validación de datos

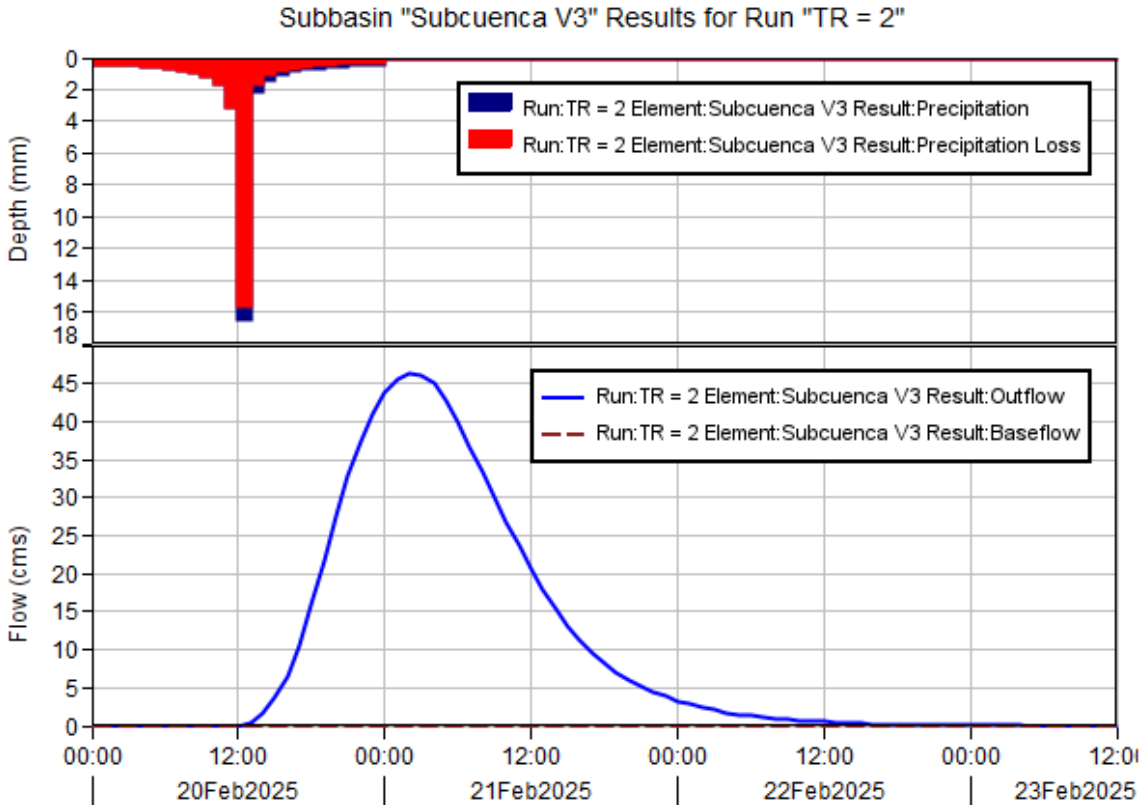


Anexo N° 07: Número de curva – Cuenca Bocapán

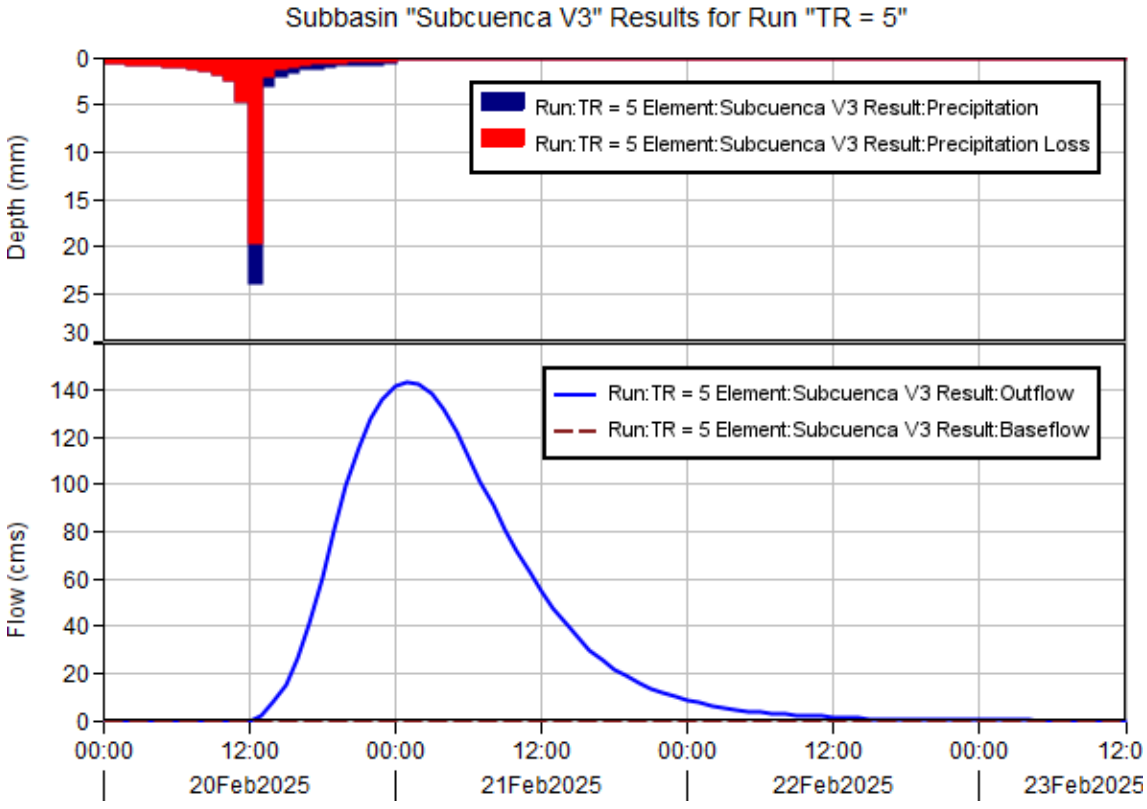


UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES	
NÚMERO DE CURVA CUENCA BOCAPÁN	
DATUM WGS84	ZONA 17S
ESCALA 1:300,000	FORMATO A4
ELABORADO POR: BR. JEAN PIERE HERRERA RUEDA	

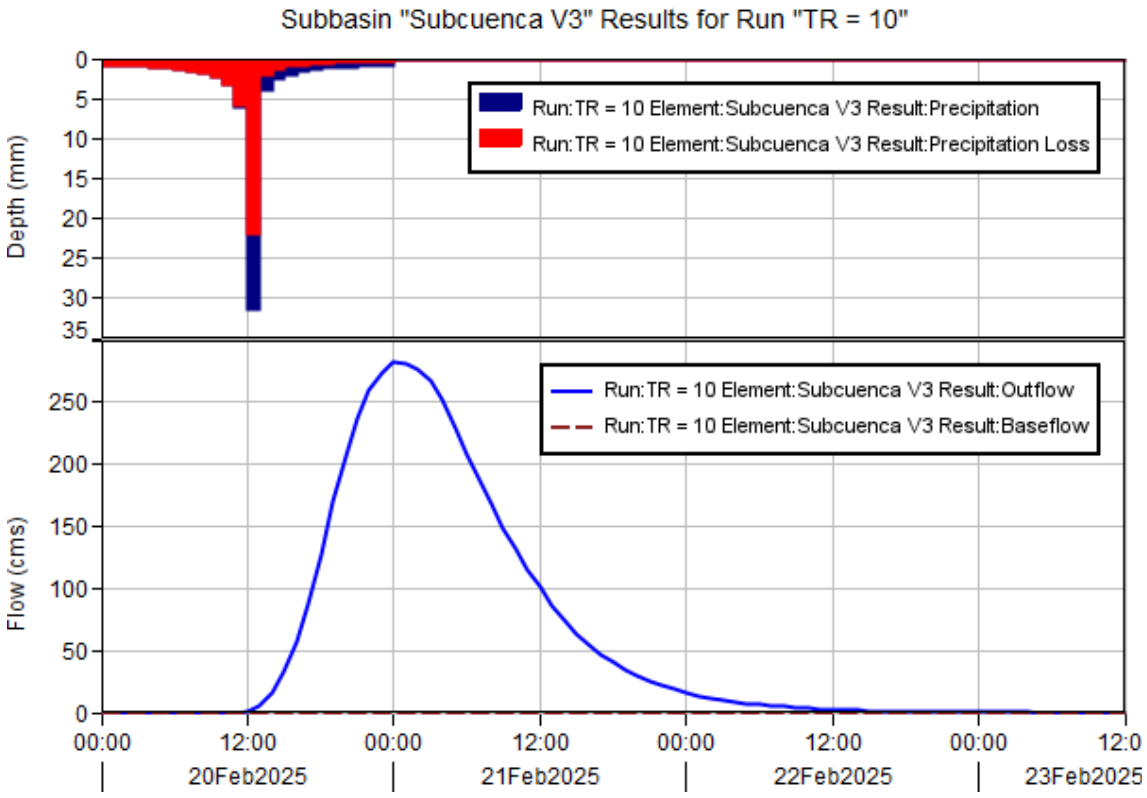
Anexo N° 08: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 2 años



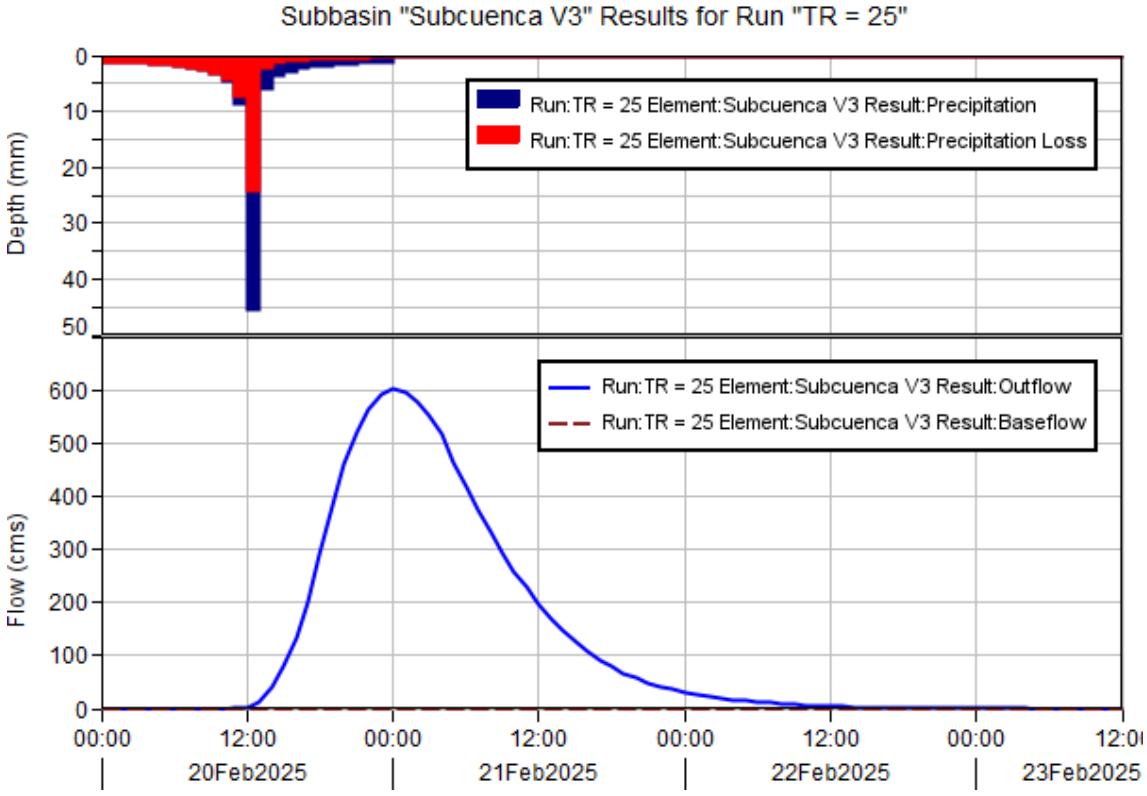
Anexo N° 09: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 5 años



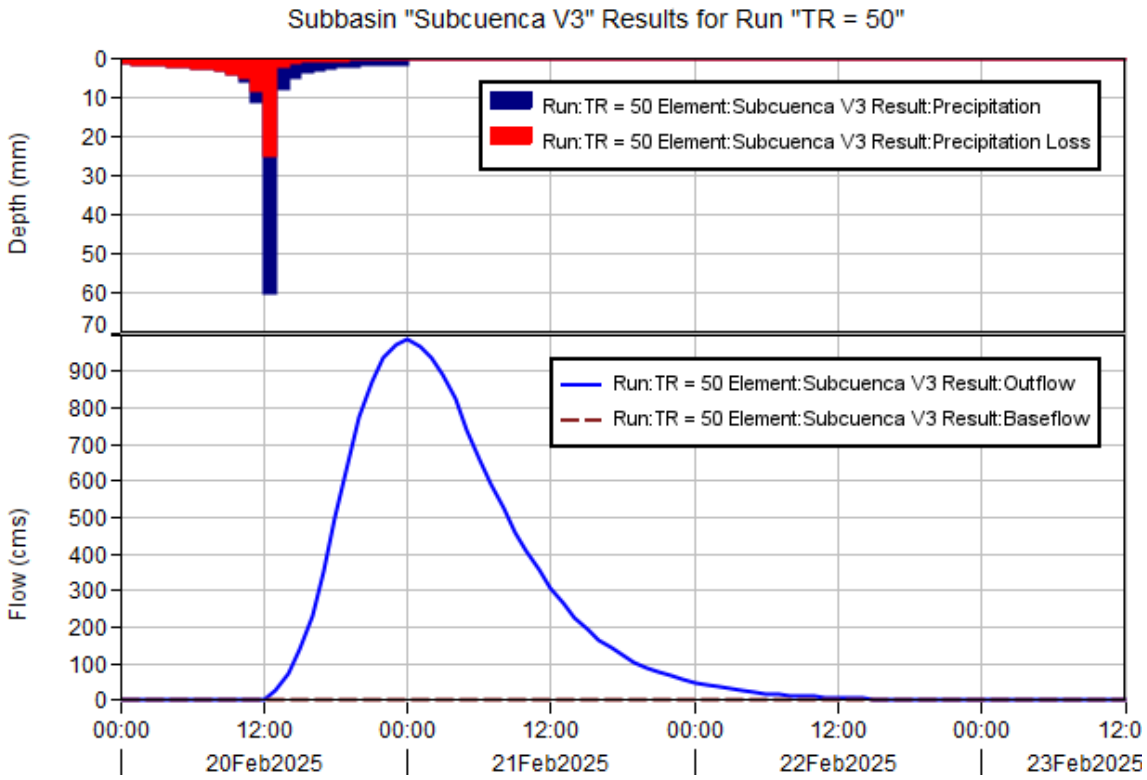
Anexo N° 10: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 10 años



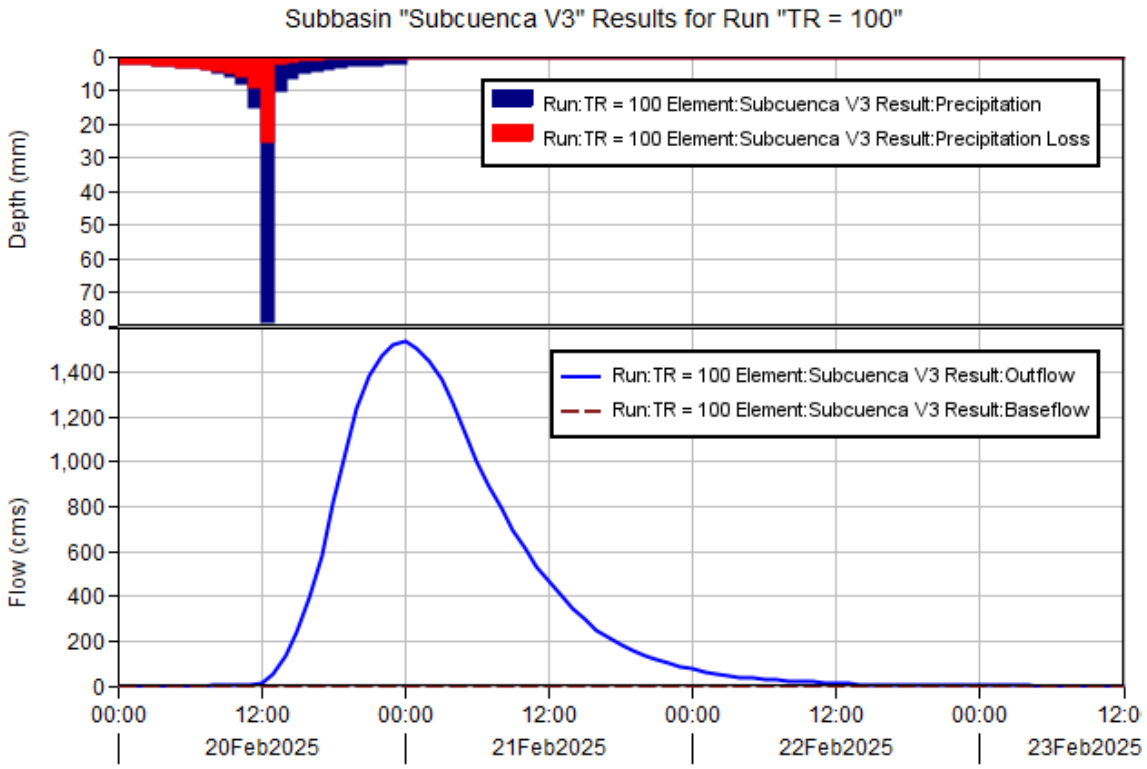
Anexo N° 11: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 25 años



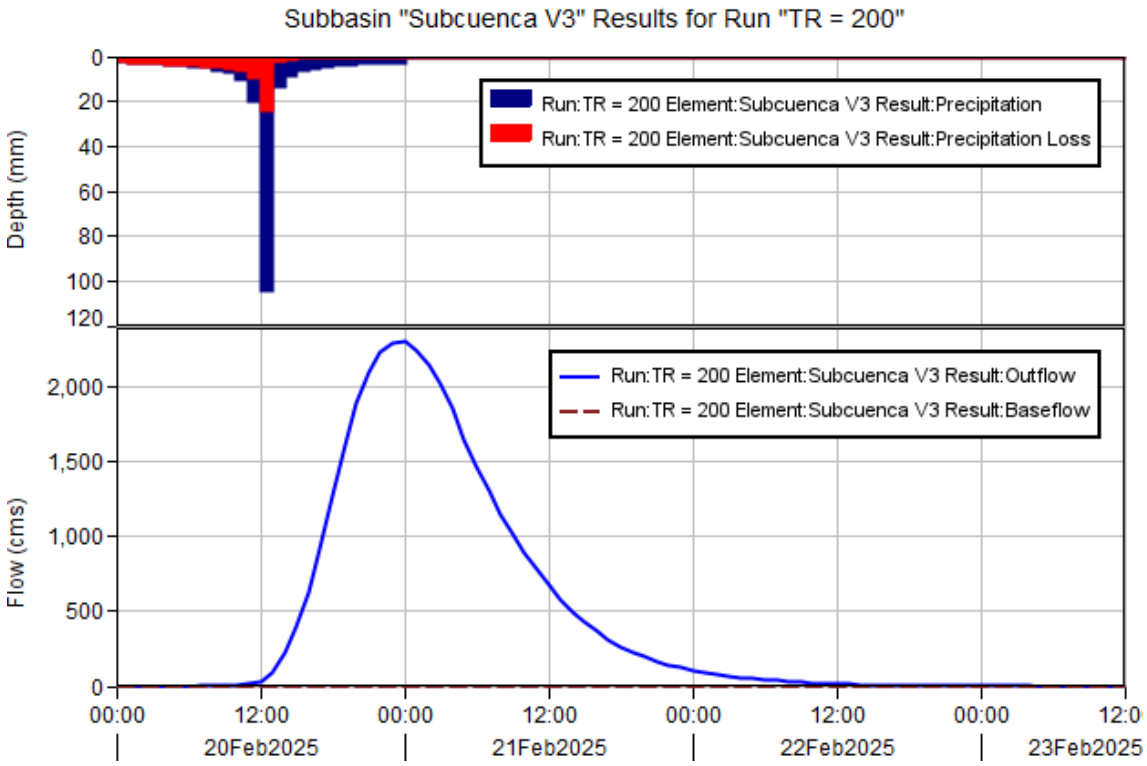
Anexo N° 12: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 50 años



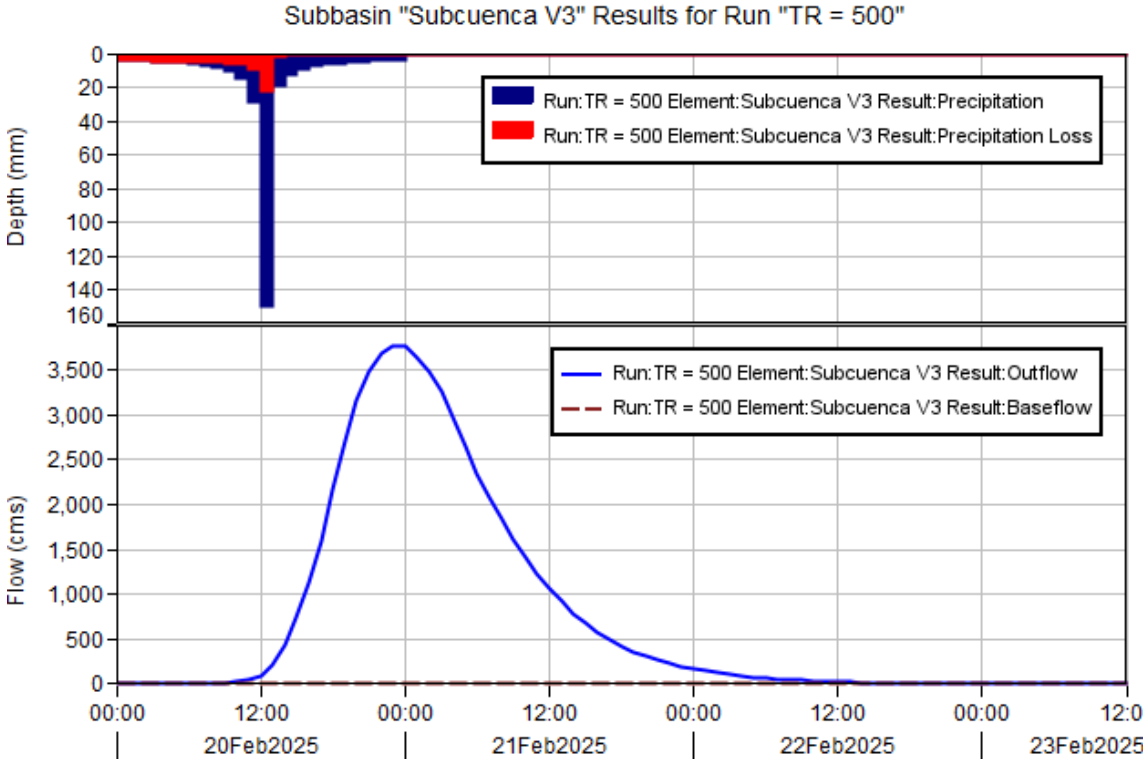
Anexo N° 13: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 100 años



Anexo N° 14: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 200 años



Anexo N° 15: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 500 años



Anexo N° 16: Hidrograma de caudal máximo para un TR = 1000 años