

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO
MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
GIORDAN JOSUÉ ALVARADO VILLANUEVA**

**ASESOR
MSc. JUAN WALTER CABRERA CABRERA**

Lima- Perú

2023

©2023, Universidad Nacional de Ingeniería.

Todos los derechos reservados.

Lima-Perú

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

giordan_josue@hotmail.com, Teléfono: 934148814

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	7
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	15
1.1 GENERALIDADES.....	15
1.2 PROBLEMÁTICA	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 HIPOTESIS.....	17
CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	18
2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO	18
2.2 SISTEMA HIDROLOGICO	19
2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	19
2.3.1 Clasificación de los Modelos Hidrológicos.....	20
2.4 PROCESOS HIDROLÓGICOS	22
2.4.1 Teorema de Transporte de Reynolds	22
2.4.2 Ecuación de Continuidad	23
2.4.3 Ecuación de Momentum	24
2.5 AGUA SUPERFICIAL.....	25
2.5.1 Hidrograma de Tormenta.....	26
2.5.2 Separación del Flujo Base	27
2.6 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	28
2.6.1 Fuentes de Incertidumbre	28
2.6.2 Calibración del modelo.....	29
2.6.3 Función Objetivo	29
2.6.4 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	29
2.7 MODELO CONCEPTUAL TANQUES DE ALMACENAMIENTO	30

2.8	ECUACIONES DE SAINT-VENANT	32
2.8.1	Ecuación de Continuidad	32
2.8.2	Ecuación de Momentum	33
CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDIO		37
3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	37
3.1.1	Subcuenca Barrios.....	37
3.1.2	Ubicación y Extensión.....	38
3.1.3	Acceso.....	38
3.1.4	Cobertura y usos de suelo	39
3.2	CLIMA.....	40
3.2.1	Precipitación.....	42
3.2.2	Temperatura.....	42
3.2.3	Evaporación	43
3.3	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS.....	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y APLICACIONES.....		45
4.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	45
4.1.1	Información Topográfica	45
4.1.2	Información Hidrometeorológica	45
4.1.3	Geología.....	48
4.1.4	Coberturas y Uso de suelos.....	50
4.2	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	54
4.2.1	Modelo Hidrograma Unitario SCS.....	54
4.2.1.1	Número de Curva	55
4.2.1.2	Hidrograma Adimensional SCS.....	57
4.2.1.3	Tiempo de Concentración.....	58
4.2.1.4	Tiempo de Retardo	59
4.2.1.5	Factor Tasa pico (PRF)	59
4.2.2	Modelo Conceptual TETIS.....	61
4.2.2.1	Tanque de Intercepción	62
4.2.2.2	Tanque de Almacenamiento Estático y Pérdidas por Evapotranspiración	63
4.2.2.3	Tanque de Almacenamiento Superficial y de Escorrentía Directa	64
4.2.2.4	Tanque de Almacenamiento Gravitacional y de Interflujo.....	66
4.2.2.5	Tanque de Almacenamiento Subterráneo y el Flujo Base	67
4.2.2.6	Tránsito de la Onda	69
4.2.3	Modelo de Discretización Hidrológica Desacoplada (DHD)	70
4.2.3.1	Introducción	70

4.2.3.2	Ecuaciones Hidrodinámicas	71
4.2.3.3	Fricción de Fondo	72
4.2.3.4	Esfuerzos Efectivos	73
4.2.3.5	Condiciones de Contorno Hidrodinámicas	74
4.2.3.5.1	Contornos Cerrados	74
4.2.3.5.2	Contornos Abiertos.....	74
4.2.3.6	Infiltración.....	75
4.2.3.7	Método de Green-Ampt	75
4.2.3.8	Abstracción Inicial.....	76
4.3	PARÁMETROS DE INGRESO A LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	76
4.3.1	Modelo Hidrograma Unitario SCS.....	76
4.3.1.1	Determinación del Número de Curva	77
4.3.2	Tiempo de Concentración	79
4.3.3	Modelo Conceptual TETIS.....	79
4.3.3.1	Modelo Digital de Elevaciones.....	79
4.3.3.2	Mapa de Pendientes.....	80
4.3.3.3	Mapa de Direcciones de Flujo	80
4.3.3.4	Mapa de Celdas Acumuladas.....	81
4.3.3.5	Almacenamiento Estático	81
4.3.3.6	Capacidad de Infiltración	84
4.3.3.7	Capacidad de Percolación.....	84
4.3.3.8	Conductividad Hidráulica de Interflujo	85
4.3.3.9	Conductividad Hidráulica del Acuífero.....	85
4.3.3.10	Capacidad de Pérdidas del Acuífero profundo.....	85
4.3.4	Modelo de discretización hidrológica desacoplada IBER	87
4.3.4.1	Coeficiente de rugosidad de Manning	87
4.3.4.2	Modelo de Pérdidas de Green-Ampt.....	88
4.4	TORMENTAS EN LOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	91
4.4.1	Modelo Agregado.....	91
4.4.2	Modelo Distribuido	92
4.5	ESCALA DE AREA Y TIEMPO	93
4.5.1	Escala de Área.....	93
4.5.2	Escala de Tiempo	95
4.6	CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	96
4.6.1	Algoritmo de gradiente invariable – Newton Raphson.....	96
4.6.2	Método de evolución y mezcla de complejos (SCE-UA)	97
4.6.3	Prueba y error	100

4.6.4	Proceso de Calibración	101
4.6.4.1	Modelo HMS	101
4.6.4.2	Modelo TETIS	102
4.6.4.3	Modelo IBER	103
4.6.5	Evaluación del rendimiento de los modelos hidrológicos	105
CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS		106
5.1	MODELO HIDROGRAMA UNITARIO HEC-HMS	106
5.1.1	Tiempo de Concentración	106
5.1.2	Tormentas	106
5.2	MODELO TANQUES DE ALMACENAMIENTO TETIS	111
5.2.1	Tormentas	111
5.3	MODELO DISCRETIZACIÓN HIDROLÓGICA DESACOPLADA IBER	115
5.3.1	Tormentas	115
5.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	119
5.4.1	Tormenta 1	119
5.4.2	Tormenta 2	120
5.4.3	Tormenta 3	121
5.4.4	Tormenta 4	123
5.4.5	Tormenta 5	124
5.4.6	Tormenta 6	125
5.4.7	Tormenta 7	127
5.5	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	130
5.5.1	Modelo HEC-HMS	130
5.5.2	Modelo TETIS	133
5.5.3	Modelo IBER	135
CONCLUSIONES		138
RECOMENDACIONES		143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		144
ANEXOS		147

RESUMEN

El estudio de tormentas en cuencas hidrográficas es un problema fundamental en el estudio de la hidrología superficial. La falta o insuficiencia de registros de lluvia y escorrentía impide evaluar los eventos de tormenta, caracterizados por su gran intensidad y corta duración, y que ocasionan la ocurrencia de caudales extremos y las consecuentes inundaciones. Para suplir esta deficiencia, se utilizan modelos hidrológicos de transformación lluvia-escorrentía para predecir la respuesta de una cuenca ante un determinado evento de tormenta. Por otro lado, es necesaria la disponibilidad de registros de alta resolución para determinar de manera adecuada los caudales máximos instantáneos.

El propósito de la presente tesis es realizar un análisis comparativo de tormentas, utilizando modelos hidrológicos de diversas naturalezas y de usos convencionales ampliamente aceptados y estudiados: el modelo agregado del Hidrograma Unitario SCS y el modelo distribuido de Tanques de Almacenamiento TETIS; a estos dos se ha agregado un modelo de discretización hidrológica desacoplada IBER2D, que considera las ecuaciones hidráulicas del movimiento del flujo para simular la escorrentía en las laderas, la formación de arroyos en la cuenca y determinar el hidrograma simulado. Este análisis ha sido desarrollado en la Subcuenca Barrios, ubicada en la parte alta de la cuenca del río Piura.

Los parámetros ingresados a los modelos hidrológicos han sido determinados a partir de la información bibliográfica existente y de los estudios desarrollados previamente en el área de estudio.

Los resultados indican que el modelo IBER2D presenta el mejor ajuste en todos los eventos simulados, y los resultados tienen menor variación en caudal pico y volumen de escorrentía respecto a los modelos hidrológicos de uso convencional HMS y TETIS.

ABSTRACT

The study of storms in hydrographic basins is a fundamental problem in the study of surface hydrology. The lack or insufficiency of high-resolution records makes it difficult to evaluate storm events, characterized by their great intensity and short duration, and which cause the occurrence of extreme flows and the consequent floods. To make up for this deficiency, hydrological models of rain-runoff transformation are used to predict the response of a basin to a specific storm event.

The purpose of this thesis is to carry out a comparative analysis of storms, using hydrological models of various natures and widely accepted and studied conventional uses: the SCS Unit Hydrogram aggregate model and the TETIS Storage Tank distributed model; To these two, a decoupled hydrological discretization model IBER2D has been added, which considers the hydraulic equations of flow movement to simulate runoff on the slopes and the formation of streams in the basin and determine the simulated hydrograph. This analysis has been developed in the Barrios Sub-basin, located in the upper part of the Piura river basin.

The parameters entered into the hydrological models have been determined from the existing bibliographic information and from the studies previously developed in the study area.

The results show that the IBER2D model presents the best fit in all simulated events, and the results have less variation in peak flow and runoff volume respect to the hydrological models conventionally used HMS and TETIS.

PRÓLOGO

El análisis de eventos extremos es una de las ramas de la Hidrología con especial importancia y aplicaciones en la ingeniería. Esta importancia va de la mano con la falta de información hidrológica existente, comprensible si se toma en cuenta el número de drenes (cursos de agua) y la longitud de estos a lo largo y ancho del territorio nacional. Esta deficiencia de información es cubierta utilizando modelos precipitación-escorrentía, los cuales permiten estimar descargas en base a registros de precipitaciones y otras características geomorfológicas y de cobertura de la cuenca.

Los modelos mencionados tienen buena performance a escala mensual y diaria; sin embargo, suelen perder confiabilidad a mayor resolución temporal, horaria o mayor, especialmente porque no existe suficientes registros de información para validarlos bajo las diferentes condiciones que pueden presentar las cuencas de nuestro país. Esta situación sugiere la necesidad de realizar un estudio a nivel de tormentas enfocado en evaluar la performance de diferentes modelos y poder concluir sobre la confiabilidad de éstos en la estimación de hidrogramas y caudales pico.

La presente investigación evalúa la performance de tres modelos precipitación – escorrentía con el objetivo de definir cuál de ellos representa mejor el comportamiento de una tormenta. Se evalúan el modelo HEC-HMS (modelo del número de curva); el modelo TETIS (modelo distribuido de base física, basado en el modelo de reservorios lineales); y, el modelo de discretización hidrológica desacoplada DHD (incluido en el modelo IBER2D, y basado en la discretización de las ecuaciones de Saint-Venant aplicadas a la escorrentía superficial).

Para el estudio se seleccionó la subcuenca Barrios, ubicada en la cuenca alta del río Piura, por la disponibilidad de información y por la relevancia que representa en la zona norte del país. La evaluación se realizó con registros correspondientes a un total de siete tormentas entre los años 1975 y 1979. Los resultados muestran una mejor performance en promedio del modelo DHD respecto a los modelos HEC-HMS y TETIS.

Los resultados presentados en el presente documento representan un valioso aporte para la selección de modelos y la estimación de caudales máximos, los

cuales redundarán en mejores diseños y en una mejor gestión de eventos extremos en diferentes regiones del país; sin embargo, el estudio deberá ser continuado y actualizado con información de otras regiones y con una mayor longitud de registros, para ampliar y/o confirmar las conclusiones obtenidas.

MSc. Juan Walter Cabrera Cabrera
Profesor Asociado
ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1:	Valores Referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe	30
Tabla 2.2:	Resumen de las Ecuaciones de Saint-Venant	36
Tabla 3.1:	Estaciones Meteorológicas en el Área de Estudio	41
Tabla 3.2:	Resumen de Precipitación Promedio Mensual	42
Tabla 3.3:	Resumen de Temperatura Promedio Mensual	43
Tabla 3.4:	Resumen de Evaporación Total Promedio Mensual	43
Tabla 3.5:	Parámetros Geomorfológicos de la Subcuenca Barrios	43
Tabla 4.1:	Resumen de Tormentas Observadas	46
Tabla 4.2:	Códigos de Zonificación Ecológica y Económica	51
Tabla 4.3:	Resumen de Parámetros de Suelo en las Calicatas	53
Tabla 4.4:	Condiciones de Humedad (AMC)	55
Tabla 4.5:	Valores de Número de Curva (Condición AMC tipo II)	56
Tabla 4.6:	Valores Sugeridos del PRF y "x"	60
Tabla 4.7:	Condiciones de Contorno en Contornos Abiertos	75
Tabla 4.8:	Asignación de Número de curva	77
Tabla 4.9:	Precipitaciones Antecedentes - Estación Barrios (mm)	78
Tabla 4.10:	Precipitaciones Antecedentes - Estación Canchaque (mm)	79
Tabla 4.11:	Tiempo de Concentración de Retardo (min)	79
Tabla 4.12:	Parámetros del Suelo (%)	83
Tabla 4.13:	Profundidad de Raíces (m)	83
Tabla 4.14:	Conductividad Hidráulica (mm/hr)	84
Tabla 4.15:	Capacidad de Percolación (mm/hr)	85
Tabla 4.16:	Valores para el Cálculo del Coeficiente de Rugosidad	87
Tabla 4.17:	Parámetros de Infiltraciones de Green-Ampt	88
Tabla 4.18:	Porcentaje de Áreas	91
Tabla 4.19:	Tormentas ponderadas (mm)	92
Tabla 5.1:	Tiempo de Concentración y Retardo (min)	106
Tabla 5.2:	Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento Hec-HMS	109
Tabla 5.3:	Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento Hec-HMS	110
Tabla 5.4:	Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento TETIS	114
Tabla 5.5:	Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento TETIS	114

Tabla 5.6:	Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento IBER	118
Tabla 5.7:	Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento IBER	118
Tabla 5.8:	Comparación de Resultados, Tormenta 1	119
Tabla 5.9:	Comparación de Resultados, Tormenta 2	120
Tabla 5.10:	Comparación de Resultados, Tormenta 3	121
Tabla 5.11:	Comparación de Resultados, Tormenta 4	123
Tabla 5.12:	Comparación de Resultados, Tormenta 5	124
Tabla 5.13:	Comparación de Resultados, Tormenta 6	126
Tabla 5.14:	Comparación de Resultados, Tormenta 7	127
Tabla 5.15:	Resumen de Eficiencias de Nash-Sutcliffe por Tormenta	128
Tabla 5.16:	Subdivisión de Tormentas para Validación de resultados	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	El Ciclo Hidrológico	18
Figura 2.2:	Diagrama del Sistema Hidrológico Global	19
Figura 2.3:	Clasificación de Modelos Hidrológicos de acuerdo con la Forma, la Aleatoriedad y la Variación Espacial y Temporal de los Fenómenos Hidrológicos.	21
Figura 2.4:	Fluido en las Regiones del Flujo	23
Figura 2.5:	Esquema de la Distribución de la Precipitación en una Cuenca durante la Tormenta.	25
Figura 2.6:	Componentes de un Hidrograma de Caudal durante una Tormenta	26
Figura 2.7:	Técnicas de Separación de Flujo Base	27
Figura 2.8:	Esquema de Concepto de Tanques de Almacenamiento	30
Figura 3.1:	Cuenca Hidrográfica del Río Piura	37
Figura 3.2:	Subcuenca Barrios	38
Figura 3.3:	Estaciones Meteorológicas en el Área de Estudio	41
Figura 3.4:	Variación de la Precipitación Total Promedio	42
Figura 3.5:	Curva Hipsométrica	44
Figura 4.1:	Topografía Descargada de la NASA	45
Figura 4.2:	Hidrogramas de Caudal Total y Escorrentía Directa Estimado por el Evento de Tormenta	47
Figura 4.3:	Geología de la Subcuenca Barrios	48
Figura 4.4:	Mapa de Zonificación Ecológica y Económica	50
Figura 4.5:	Imagen Satelital, Cobertura y Uso de Suelos	52
Figura 4.6:	Relación Precipitación-Escorrentía	54
Figura 4.7:	Hidrogramas Unitarios Sintéticos SCS	57
Figura 4.8:	Hidrograma Unitario Triangular	59
Figura 4.9:	Comparación Hidrogramas Unitarios, PRF	60
Figura 4.10:	Esquema Conceptual de Tanques de Almacenamiento TETIS	61
Figura 4.11:	Esquema del Tanque de Intercepción	62
Figura 4.12:	Esquema del Tanque de Almacenamiento Estático	63
Figura 4.13:	Esquema del Tanque de Almacenamiento Superficial	64
Figura 4.14:	Esquema del Tanque de Almacenamiento Gravitacional	66
Figura 4.15:	Esquema del Tanque de Almacenamiento Subterráneo	68
Figura 4.16:	Mapa de Número de Curva	78

Figura 4.17:	Modelo Digital de Elevaciones	80
Figura 4.18	Mapas de Ingreso a Modelo TETIS	86
Figura 4.19:	Modelo de Flujo de 8 Direcciones	81
Figura 4.20:	Software “Soil Water Characteristics”	82
Figura 4.21:	Mapas de Ingreso a Modelo IBER	90
Figura 4.22:	Polígonos de Thiessen	91
Figura 4.23:	Precipitación Distribuida (mm) – Método IDW- Tormenta 5	93
Figura 4.24:	Grilla de Cálculo Subcuenca Barrios – Modelo TETIS	94
Figura 4.25:	Grilla de Cálculo Subcuenca Barrios – Modelo IBER	95
Figura 4.26:	Convergencia del Método de Newton-Raphson	96
Figura 4.27:	Número de Iteraciones, Modelo HMS	97
Figura 4.28:	Ilustración del Método de Evolución y Barajado de Complejos, SCE-UA	99
Figura 4.29:	Ilustración de los Pasos Evolutivos por Cada Complejo, SCE-UA	100
Figura 5.1:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 1	106
Figura 5.2:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 2	107
Figura 5.3:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 3	107
Figura 5.4:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 4	107
Figura 5.5:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 5	108
Figura 5.6:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 6	108
Figura 5.7:	Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 7	108
Figura 5.8:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 1	111
Figura 5.9:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 2	111
Figura 5.10:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 3	112
Figura 5.11:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 4	112
Figura 5.12:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 5	112
Figura 5.13:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 6	113
Figura 5.14:	Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 7	113
Figura 5.15:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 1	115
Figura 5.16:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 2	116
Figura 5.17:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 3	116
Figura 5.18:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 4	116
Figura 5.19:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 5	117

Figura 5.20:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 6	117
Figura 5.21:	Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 7	117
Figura 5.22:	Comparación de Resultados, Tormenta 1	119
Figura 5.23:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 1	119
Figura 5.24:	Comparación de Resultados, Tormenta 2	120
Figura 5.25:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 2	121
Figura 5.26:	Comparación de Resultados, Tormenta 3	122
Figura 5.27:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 3	122
Figura 5.28:	Comparación de Resultados, Tormenta 4	123
Figura 5.29:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 4	123
Figura 5.30:	Comparación de Resultados, Tormenta 5	125
Figura 5.31:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 5	125
Figura 5.32:	Comparación de Resultados, Tormenta 6	126
Figura 5.33:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 6	126
Figura 5.34:	Comparación de Resultados, Tormenta 7	127
Figura 5.35:	Comparación de Hidrogramas, Tormenta 7	127
Figura 5.36:	Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 1	131
Figura 5.37:	Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 3	131
Figura 5.38:	Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 5	131
Figura 5.39:	Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 2	132
Figura 5.40:	Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 6	132
Figura 5.41:	Validación del modelo TETIS, Tormenta 1	133
Figura 5.42:	Validación del modelo TETIS, Tormenta 3	133
Figura 5.43:	Validación del modelo TETIS, Tormenta 5	134
Figura 5.44:	Validación del modelo TETIS, Tormenta 2	134
Figura 5.45:	Validación del modelo TETIS, Tormenta 6	135
Figura 5.46:	Validación del modelo IBER, Tormenta 1	135
Figura 5.47:	Validación del modelo IBER, Tormenta 3	136
Figura 5.48:	Validación del modelo IBER, Tormenta 5	136
Figura 5.49:	Validación del modelo IBER, Tormenta 2	137
Figura 5.50:	Validación del modelo IBER, Tormenta 6	137

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

AMC	Antecedent Moisture Condition
AWC_TOP	Contenido óptimo de agua disponible en el suelo
DHD	Discretización Hidrológica Desacoplada
CO	Estación Convencional
PG	Estación Pluviográfica
PLU	Estación Pluviométrica
PLU-H	Estación Pluviométrica Hidrométrica
HEC	Hydrologic Engineering Center
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
IDW	Inverse Distance Weighted
MINAM	Ministerio del Ambiente
IBER	Modelo de generación de escorrentía con base hidráulica
TETIS	Modelo de transformación lluvia-escorrentía tipo tanques de almacenamiento
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRCS	Natural Resources Conservation Service
CN	Número de Curva
ONG	Organización no Gubernamental
PRF	Peak Rate Factor
ROO	Profundidad superficial del suelo
PECHP	Proyecto Especial Chira Piura
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SWE	Shallow Water Equations
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SCS	Soil Conservation Service
TIFF	Tagged Image File Format
USDA	United States Department of Agriculture
ZEE	Zonificación Ecológica y Económica

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El estudio de tormentas en cuencas hidrográficas es un problema fundamental dentro de la hidrología superficial debido a la insuficiencia de registros de lluvia y caudales, lo que conduce al uso y aplicación de modelos de transformación lluvia-escorrentía para la estimación de caudales. Por otro lado, es necesaria la disponibilidad de registros de alta resolución para determinar verídicamente los caudales máximos instantáneos.

Por muchos años se ha estudiado dicha transformación utilizando modelos hidrológicos de parámetros concentrados (modelos agregados), que son alimentados por valores medios de la cuenca en estudio; sin embargo, estos no consideraban las variaciones espaciales al interior de la cuenca (terreno, tipo y uso de suelo, lluvia, etc.), ocasionando una pérdida de representatividad en el modelo y por ende, en los resultados. El actual impulso y desarrollo de las herramientas de cómputo y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido el desarrollo y difusión de modelos hidrológicos con parámetros distribuidos, los cuales dividen a la cuenca en celdas (grillas) que cuentan con sus propios parámetros, superando así la limitación de los modelos agregados.

El modelo agregado del Hidrograma Unitario SCS y el modelo distribuido de Tanques de Almacenamiento TETIS, son modelos de usos convencionales ampliamente aceptados y estudiados.

Dentro del grupo de los modelos distribuidos, en años recientes se ha empezado a desarrollar modelos de base hidráulica que simulan el flujo de la escorrentía generada por la lluvia sobre la cuenca en estudio a partir de formulaciones matemáticas utilizadas en la hidráulica, a las cuales se les adiciona los términos de la lluvia y las pérdidas; tal como considera el modelo de discretización hidrológica desacoplada IBER2D.

El desarrollo de este tipo de modelos hidráulicos representa una nueva alternativa para el estudio de los procesos de lluvia-escorrentía y a la vez abre un nuevo campo de investigación dentro del campo de la modelación hidrológica distribuida y del análisis de tormentas.

1.2 PROBLEMÁTICA

Los eventos máximos (tormentas) son considerados en el diseño de las infraestructuras hidráulicas, las cuales deberán ser capaces de resistir el evento de diseño y seguir funcionando adecuadamente; un error en este proceso puede llegar a causar pérdidas catastróficas; por tanto, será necesario estudiar a detalle los eventos de tormenta que los producen.

El estudio de las tormentas considera realizar simulaciones a través de modelos de transformación lluvia-escorrentía, que han presentado siempre un grado de error e incertidumbre en sus resultados, lo cual se redujo al implementar los modelos distribuidos; sin embargo, estas metodologías han sido propuestas de forma empírica, a partir de la observación de cuencas hidrográficas específicas y suposiciones en su planteamiento; los resultados tienen un cierto margen de variación respecto a los valores observados. Por lo anterior descrito, se considera importante estudiar nuevas metodologías que incluyan en mayor medida las características particulares de cada cuenca hidrográfica.

Para evaluar las nuevas metodologías de generación de caudales, son necesarios los registros de alta resolución; es decir, información medida en intervalos cortos de tiempo y que permitan representar la variación del caudal durante el desarrollo de la tormenta, lo cual permitirá determinar el caudal pico instantáneo que será utilizado en diseño de las infraestructuras hidráulicas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el rendimiento de diferentes modelos precipitación-escorrentía en la generación de hidrogramas de salida generados a partir de una tormenta sobre la sub cuenca del río Barrios, Región Piura.

1.3.2 Objetivos Específicos

Aplicar y calibrar el modelo IBER2D, basado en la discretización hidrológica desacoplada (DHD), para la transformación lluvia-escorrentía y determinar el hidrograma de caudales para una tormenta a escala horaria.

Aplicar y calibrar los modelos TETIS y HEC-HMS, para la transformación lluvia-escorrentía y determinar el hidrograma de caudales para una tormenta a escala horaria.

Evaluar la performance de los modelos de transformación lluvia-escorrentía aplicados, determinando cual genera los hidrogramas de mejor ajuste.

1.4 HIPOTESIS

“El modelo hidráulico IBER2D de transformación lluvia-escorrentía permite determinar hidrogramas de salida de una cuenca hidrográfica, con mejor representatividad que los modelos HEC-HMS y TETIS”.

CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO

El elemento principal sobre la Tierra es el agua, y está contenido en un espacio llamado hidrósfera, que se extiende desde un kilómetro por debajo de la corteza terrestre hasta quince kilómetros arriba en la atmósfera. El agua circula en la hidrósfera formando el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el concepto principal en el desarrollo de la hidrología, no tiene un inicio, ni tampoco un fin, pero posee diversos procesos que ocurren de forma continua.

La Figura 2.1 muestra cómo el agua se evapora desde los océanos y la superficie terrestre hacia la atmósfera, este vapor de agua es transportado por los vientos hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre u océanos; esta agua es interceptada por la vegetación, es transportada como un flujo superficial sobre el suelo, parte de esta agua infiltra en el suelo y ser conducida a través del suelo como flujo subsuperficial y descarga en los ríos como escorrentía superficial. El agua infiltrada puede percolar hasta grandes profundidades hasta recargar el agua subterránea, de donde emerge a manantiales, se descarga a los ríos o hacia el océano. Todos estos flujos finalmente fluyen al mar o se evaporan durante el proceso, generando una vez más este proceso continuo.

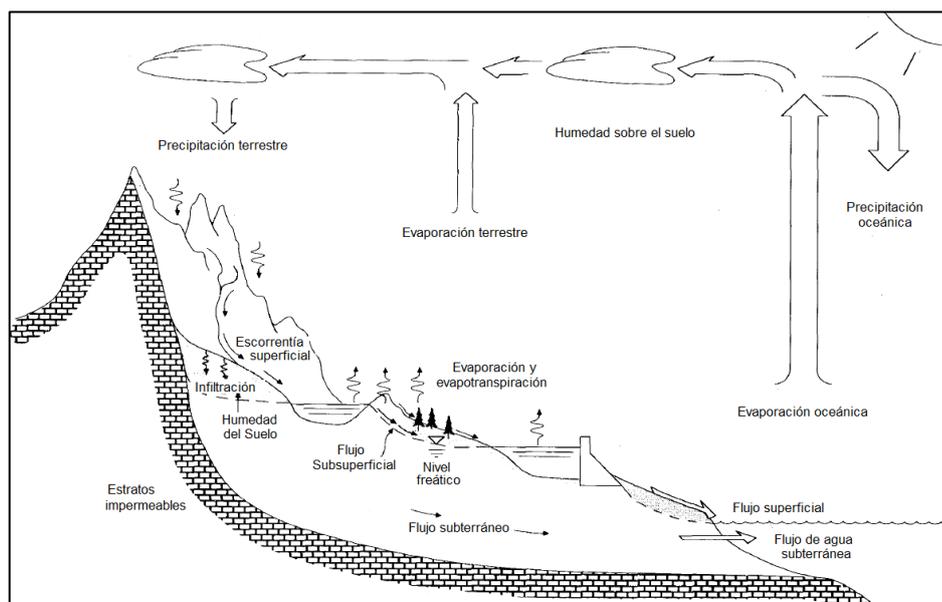


Figura N° 2.1: El Ciclo Hidrológico
Fuente: (Chow et al, 1988)

2.2 SISTEMA HIDROLOGICO

Se denomina “sistema” a un conjunto de procesos conectados entre sí, formando un todo. El ciclo hidrológico se puede representar como un sistema, cuyos componentes son la precipitación, evaporación, escorrentía, y otras fases del ciclo hidrológico, entras los cuales existe interacción.

La Figura 2.2 muestra el sistema hidrológico global, que a su vez está dividido en tres subsistemas: El sistema de agua atmosférica, que incluye todos los procesos que se presentan en la baja atmosfera, tales como la precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el sistema de agua superficial, que incluye el flujo superficial, la escorrentía en las laderas y hacia los ríos y océanos; y el sistema de agua subsuperficial, que incluye la infiltración, el flujo subsuperficial, la recarga de agua del acuífero y el flujo subterráneo.

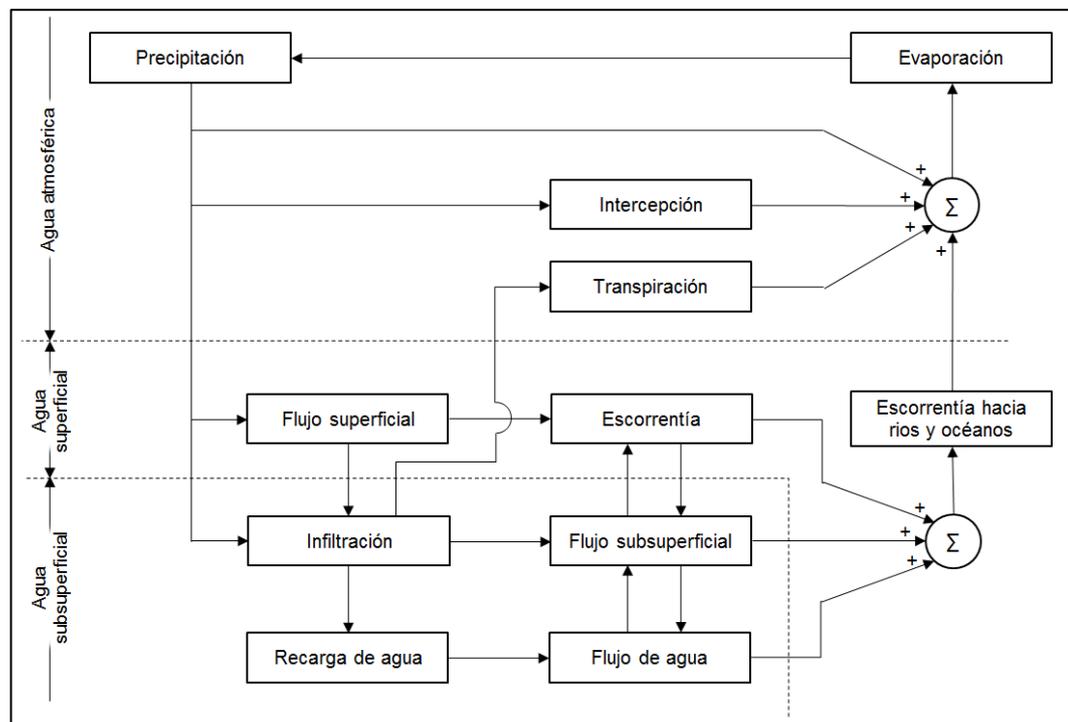


Figura N° 2.2: Diagrama del Sistema Hidrológico Global
 Fuente: (Chow et al, 1988)

2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Un modelo hidrológico tiene como objetivo representar los fenómenos que ocurren dentro de la cuenca, utilizando variables de ingreso para predecir una variable de salida. Los modelos hidrológicos realizan esta transformación mediante un conjunto de formulaciones matemáticas que relacionan las variables de entrada y

de salida, definiendo lo que usualmente se conoce como “función de transformación”.

2.3.1 Clasificación de los Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos se clasifican en función a las características de las variables de entrada al modelo y en función a la aleatoriedad, dependencia del espacio y del tiempo.

En función a la aleatoriedad, un modelo puede ser determinístico o estocástico. Un modelo determinístico no considera la aleatoriedad de las variables, es decir una entrada dada siempre producirá una misma salida, es utilizada para realizar pronósticos; mientras que un modelo estocástico tiene salidas parcialmente aleatorias y se utilizan para realizar predicciones.

En función a la dependencia espacial, un modelo determinístico puede ser agregado, en donde el sistema es promediado en el espacio y considerado como una única entidad; mientras que un modelo distribuido considera la variación espacial de los procesos hidrológicos. Por otro lado, los modelos estocásticos se clasifican en independientes en el espacio y correlacionados en él, de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio.

Finalmente, se considera la variación temporal, los modelos determinísticos se clasifican en modelos de flujo permanente, cuando la tasa de flujo no cambia en el tiempo, y modelo de flujo no permanente cuando no es así. Los modelos estocásticos siempre tienen salidas que son variables en el tiempo y pueden ser independientes del tiempo o correlacionados en él; un modelo independiente del tiempo representa una secuencia de los eventos hidrológicos no influyen entre sí, mientras que un modelo correlacionado en el tiempo representa una secuencia en la cual el evento siguiente se encuentra influido por uno o más eventos anteriores.

La Figura 2.3 muestra la clasificación de los modelos hidrológicos.

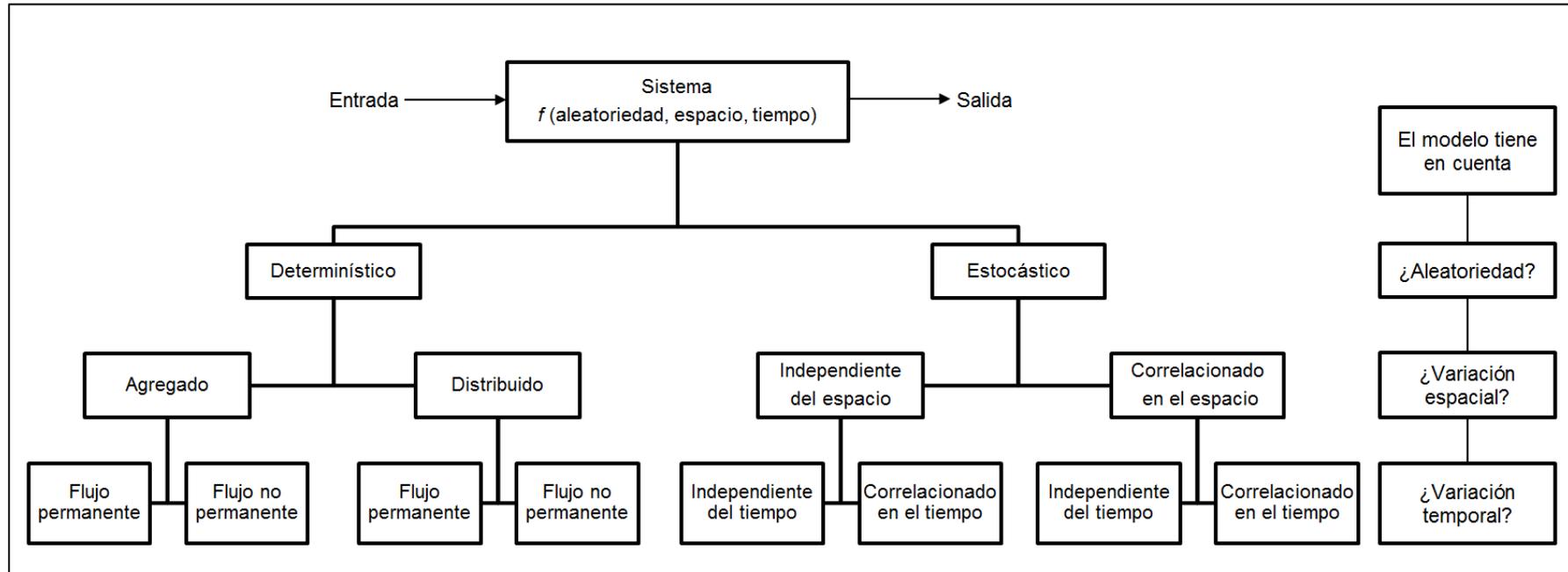


Figura 2.3 Clasificación de Modelos Hidrológicos de acuerdo con la Forma, la Aleatoriedad y la Variación Espacial y Temporal de los Fenómenos Hidrológicos.
 Fuente: (Chow et al, 1988)

2.4 PROCESOS HIDROLÓGICOS

Los procesos hidrológicos transforman la distribución espacial y temporal del agua; es decir, producen el movimiento del agua a través del ciclo hidrológico.

El movimiento del agua está influenciado por las propiedades físicas del sistema, estas son: el tamaño de la cuenca, la forma del cauce y la interacción del agua entre sus fases líquida, sólida y vapor. Estos procesos pueden ser representados mediante leyes físicas. Una herramienta necesaria para el desarrollo de los modelos hidrológicos es el teorema de transporte de Reynolds

2.4.1 Teorema de Transporte de Reynolds

El teorema de transporte de Reynolds utiliza las leyes físicas que son aplicables a masas discretas de una sustancia y las aplica a un fluido en circulación, esta similitud es posible si se considera un volumen de control en el fluido. El teorema de transporte de Reynolds es aplicado ampliamente en la mecánica de fluidos, su uso en la hidrología es aún escaso; sin embargo, proporciona una base para aplicar las leyes físicas a los sistemas hidrológicos.

En los fluidos se pueden encontrar dos tipos de propiedades; propiedades extensivas, si sus valores dependen de la masa del fluido; y las propiedades intensivas, si sus valores son independientes de la masa del fluido. Se puede considerar que para cualquier propiedad intensiva del fluido β , se podrá expresar como la propiedad extensiva B por la unidad de masa del fluido m . Lo cual se puede expresar como $\beta = dB/dm$. El teorema de Reynolds considera un volumen de control dV , una densidad de fluido ρ , la masa del elemento es $dm = \rho * dV$ (Chow Ven Te, 1988). La cantidad de la propiedad extensiva será:

$$B = \int \int \int \beta \rho dV \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En la Figura 2.4 se muestra el movimiento de la masa de fluido después de un pequeño intervalo de tiempo Δt , el flujo circula de izquierda a derecha a través del volumen de control, producto de esto se aprecian tres regiones de espacio. La región I, muestra la masa de fluido ocupada en el tiempo t , pero no en el tiempo $t + \Delta t$; la región II, muestra la masa de flujo que ocupa en ambos instantes; mientras que la región III, muestra la masa de fluido que ocupa en el tiempo $t + \Delta t$, pero no en el tiempo t . Para la masa de fluido sombreada, se puede definir para una propiedad extensiva del fluido respecto al tiempo:

$$\frac{dB}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [(B_{II} + B_{III})_{t+\Delta t} - (B_I + B_{II})_t] \quad (\text{Ec. 2.2})$$

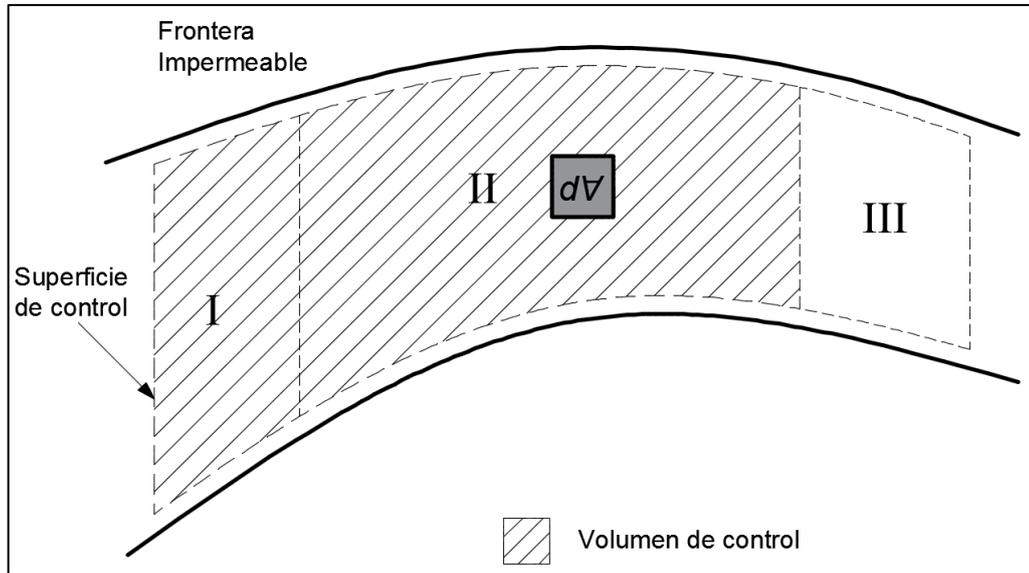


Figura 2.4 Fluido en las Regiones del Flujo.
Fuente: (Chow et al, 1988)

Cuando Δt tiene un valor muy bajo que tiende a ser cero, la ecuación 2.2 puede ser expresada de la forma:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \beta \rho dV + \iint_{s.c.} \beta \rho V dA \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde el volumen de control, dV , atraviesa a través del área, dA , en un tiempo, dt , a una velocidad de flujo, V ,

La teoría de transporte de Reynolds se basa en la ecuación 2.3. La cual establece que "la tasa total de cambio de una propiedad extensiva de un fluido es igual a la tasa de cambio de la propiedad extensiva almacenada en el volumen de control más el flujo neto de la propiedad extensiva a través de la superficie de control.

2.4.2 Ecuación de Continuidad

En los análisis hidrológicos, el principio físico más utilizado es la conservación de la masa. La ecuación de continuidad expresa este principio y es aplicado a un volumen de fluido. Del teorema de transporte de Reynolds se define la propiedad extensiva masa, $B = m$, por tanto $dB/dm = 1$. Además, se sabe que por la Ley de conservación de masa, $dB/dt = dm/dt = 0$. Reemplazando estos valores en el teorema de transporte de Reynolds se tiene:

$$0 = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV + \iint_{s.c.} \rho V dA \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Debido a que el flujo tiene densidad constante, la ecuación se simplifica a:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} dV + \iint_{s.c.} V dA = 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

La integral del primer término corresponde al fluido almacenado en el volumen de control denominado Q ; mientras que la integral del segundo término corresponde al flujo neto y se divide en flujo de entrada, I , y salida, Q .

$$\iint_{s.c.} V dA = \iint_{\text{salida}} V dA + \iint_{\text{entrada}} V dA = Q(t) - I(t) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La ecuación de continuidad se expresa finalmente como:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

La ecuación 2.7 es la ecuación de continuidad para un flujo no permanente y de densidad constante.

2.4.3 Ecuación de Momentum

El momentum está definido como el producto de la masa y la velocidad. Si se aplica el teorema de transporte de Reynolds al momentum de un fluido, la propiedad extensiva será $B = m * V$ y $\beta = dB/dm = V$. Según la Segunda Ley de Newton, la tasa de cambio de momentum respecto al tiempo es igual a la fuerza neta que se aplica. Entonces se tiene $dB/dt = d(mV)/dt = \Sigma F$. Al sustituir en la ecuación de transporte de Reynolds se tiene:

$$\sum F = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} V \rho dV + \iint_{s.c.} V \rho V dA \quad (\text{Ec. 2.8})$$

La ecuación de momento es aplicable para un flujo no permanente y no uniforme. Es decir, la velocidad varía en el espacio.

Si un flujo no uniforme es permanente en el tiempo, la derivada en función del tiempo en la ecuación se elimina, quedando:

$$\sum F = \iint_{s.c.} V \rho V dA \quad (\text{Ec. 2.9})$$

2.5 AGUA SUPERFICIAL

Se llama agua superficial al agua de la precipitación que se almacena o escurre sobre la superficie de la Tierra. Para determinar la cantidad de agua que finalmente va a escurrir producto de una precipitación, se deben conocer los diferentes procesos que suceden a través del tiempo en la superficie de la tierra.

Cuando ocurre la precipitación sobre una cuenca, una proporción grande contribuye al almacenamiento superficial; a medida que el agua se infiltra en el suelo, también hay un almacenamiento de la humedad del suelo producido por el agua retenida en las depresiones de la topografía; mientras ocurren estos procesos se producen las pérdidas por intercepción en la vegetación y la evaporación. Luego de estos procesos, parte del agua fluye a través del suelo hacia el agua subterránea para alimentar al acuífero, la otra parte de esta agua fluye a través del suelo no saturado cerca de la superficie terrestre y finalmente el excedente de todos estos procesos previos produce la escorrentía superficial.

En los modelos hidrológicos, estos procesos son ingresados como datos de entrada para el cálculo de la escorrentía. La Figura 2.5 muestra de forma esquemática los procesos para generar el flujo superficial en la tormenta.

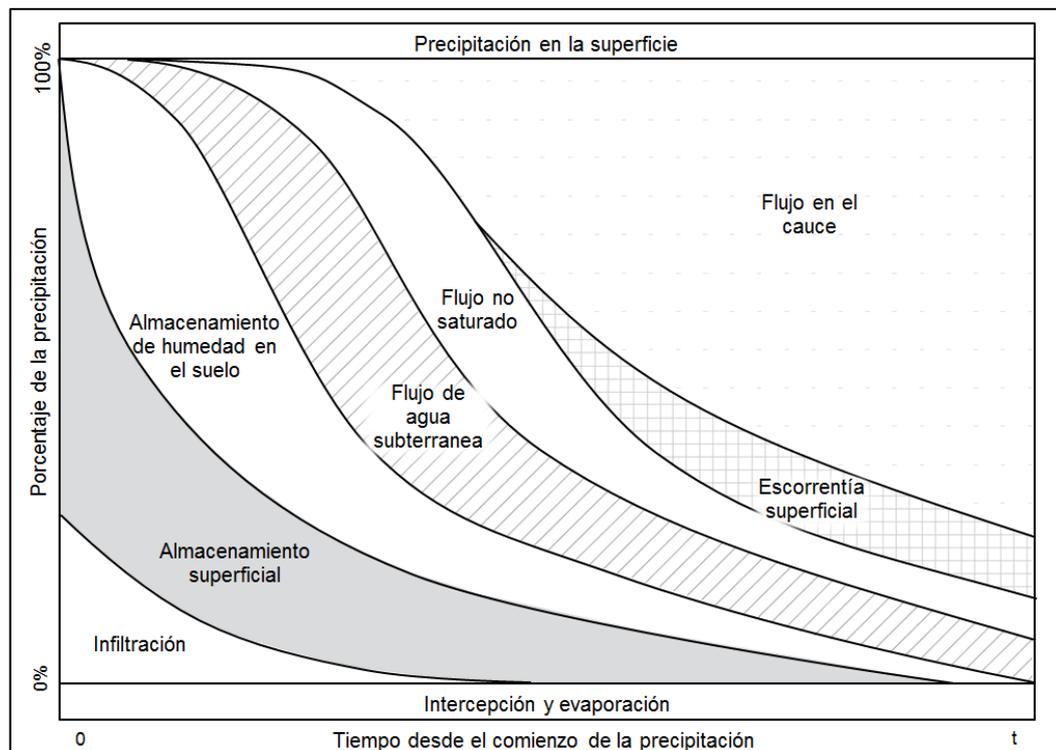


Figura 2.5 Esquema de la Distribución de la Precipitación en una Cuenca durante la Tormenta.

Fuente: (Chow et al, 1988)

2.5.1 Hidrograma de Tormenta

El hidrograma de tormenta se genera únicamente cuando existe excedente de agua, una vez que hayan sucedido todos los procesos previos a la escorrentía superficial. Es decir, la cantidad de agua que no se ha infiltrado, ni interceptado en la vegetación o en las depresiones de la topografía, y tampoco evaporado. Se puede decir, si la intensidad de la precipitación es, i , y las pérdidas, f , se tiene que la escorrentía que se generará será, $(i - f)$, llamado también exceso de precipitación. Si la capacidad de las pérdidas, f , es mayor a la intensidad de la precipitación, i , la precipitación es absorbida y no genera flujo de escorrentía. La escorrentía producto de la tormenta se representa a través de un hidrograma de caudal.

El hidrograma de caudal es una representación gráfica de la tasa de flujo en función al tiempo debido al paso de una corriente de agua. Además se define como “una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular” (Chow, 1959).

La Figura 2.6 muestra los componentes de un hidrograma de caudal durante una tormenta. El segmento AB corresponde al flujo base en el momento previo a iniciar la tormenta de forma intensa, el punto B es donde se genera la escorrentía directa, alcanza un pico C y termina en el punto D, luego continúa el segmento DE donde empieza nuevamente la recesión del flujo base.

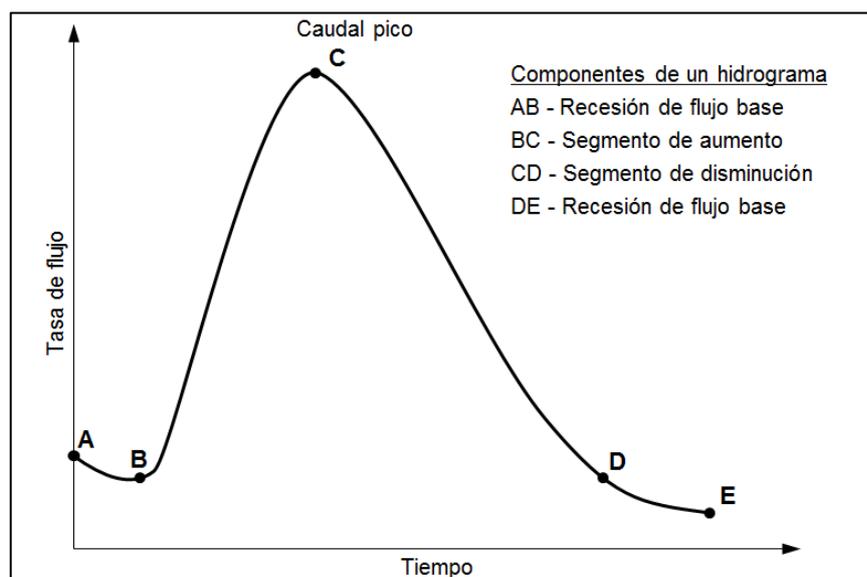


Figura 2.6 Componentes de un Hidrograma de Caudal durante una Tormenta.
Fuente: (Chow et al, 1988)

2.5.2 Separación del Flujo Base

La curva de abatimiento normal, o recesión del flujo base, presenta un comportamiento característico que se ha determinado superponiendo diversas curvas de recesión que se observan en una corriente dada, esta curva tiene la forma de un decaimiento exponencial (Horton, 1933)

$$Q(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/k} \quad (\text{Ec.2.10})$$

Donde, Q_0 es el flujo en el tiempo t_0 y k la constante de decaimiento exponencial.

En la Figura 2.6 se observa los periodos de tiempo en los cuales el hidrograma de caudal coincide con la curva de recesión de flujo base (B y D en la Figura 2.6). Entre estos puntos la escorrentía directa y el flujo base pueden separarse utilizando varios métodos, ver Figura 2.7.

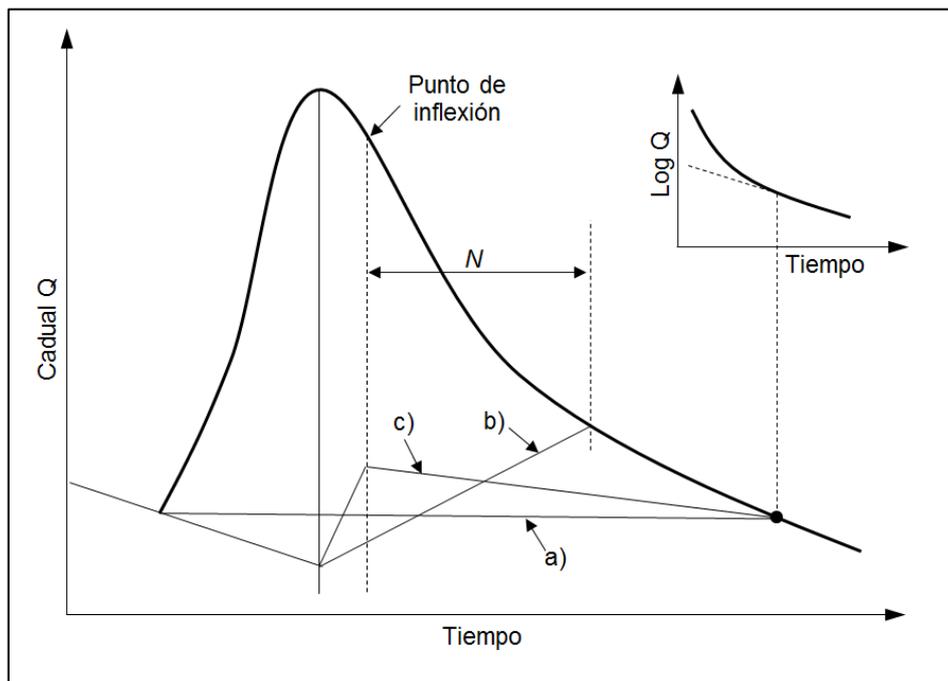


Figura 2.7 Técnicas de Separación de Flujo Base.
Fuente: (Chow et al, 1988)

Los métodos para la separación del flujo base son:

- a) El método de la línea recta; que consiste en dibujar una línea entre el punto inicial y final de la escorrentía directa superficial generada por la tormenta. Este método es aplicable en cuencas cubiertas por vegetación en regiones húmedas.
- b) El método de flujo base fijo; que supone que la escorrentía superficial termina a un tiempo, N , después del pico del hidrograma. El flujo base inicial se

proyecta hasta el pico del hidrograma y desde este punto se vuelve a proyectar al hidrograma, luego de ocurrido el tiempo, N.

- c) El método de la pendiente variable; consiste en proyectar el flujo base inicial hasta el pico del hidrograma, de manera similar se proyecta el flujo base final hacia el punto de inflexión del hidrograma. Luego se conectan estos puntos con líneas rectas.

2.6 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

El modelamiento hidrológico representa un fenómeno físico que ocurre en la realidad; sin embargo, esta simulación no es perfecta debido a la presencia de diversos errores, los fenómenos físicos son complejos e intentar incluir la totalidad de estos en un modelo generaría un análisis extremadamente complicado. Los errores y variaciones del modelo pueden ser reducidos a valores mínimos con un proceso de calibración adecuado.

Los modelos hidrológicos contienen:

- a) Variables de Ingreso: son los valores de ingreso al modelo, a partir de estas variables se intenta calcular otra variable en función a formulaciones matemáticas. Por ejemplo; la precipitación, a partir de la cual se calcula el caudal de escorrentía.
- b) Parámetros: son los valores constantes considerados como característicos del modelo. Por ejemplo; la rugosidad, la capacidad de infiltración de suelo, etc.
- c) Variables de estado: representan la condición del modelo; por ejemplo, la humedad inicial del suelo, etc.

2.6.1 Fuentes de Incertidumbre

Se considera que son cuatro las fuentes principales de incertidumbre en los modelos hidrológicos.

- a) Errores en los datos de Ingreso: corresponde a los errores en la forma de ingreso de los datos. Por ejemplo, la forma como se distribuye la precipitación en la cuenca en el método de las isoyetas.
- b) Errores en los datos observados: relacionado a los errores en las tomas de datos de campo. Por ejemplo, medición de la precipitación en el pluviómetro.
- c) Errores debido a valores no óptimos de parámetros: corresponde a la asunción de parámetros. Por ejemplo, el coeficiente de rugosidad de la cuenca.

d) Errores debido a la estructura del modelo: relacionado a las deficiencias del modelo hidrológico.

2.6.2 Calibración del modelo

Es el proceso por el cual se definen los valores de los parámetros del modelo, para los cuales, se tiene una aproximación óptima respecto a los datos observados. Este proceso puede realizarse de dos formas:

- a) Mediante prueba y error: es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de los parámetros en base al criterio del investigador; este proceso suele ser lento y subjetivo.
- b) Automática: este método optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas; suele ser un proceso rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores.

2.6.3 Función Objetivo

Para iniciar la calibración de un modelo hidrológico, se debe definir la “función objetivo”, la cual permite estimar el error entre los caudales simulados respecto a los observados, esta función se conoce como una medida de la bondad de ajuste (coeficiente de calibración, criterio de Schultz, eficiencia de Nash-Sutcliffe, error de balance de masas, raíz de error cuadrático medio, etc.)

2.6.4 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El criterio de Nash-Sutcliffe es usado para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_0)^2} \quad (\text{Ec.2.11})$$

Donde, $Q_{sim,i}$, representa el caudal simulado y Q_i , es caudal observado en el tiempo, i . Mientras que, Q_0 , es el promedio de los caudales observados.

Un valor de NSE igual a uno, representa una simulación perfecta (Molnar, 2011)

Tabla 2.1. Valores Referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011.

2.7 MODELO CONCEPTUAL TANQUES DE ALMACENAMIENTO

La producción de la escorrentía sobre una cuenca generada por una lluvia puede ser representada mediante un esquema conceptual con varios tanques de almacenamiento interconectados entre sí de forma vertical.

De forma abstracta se puede proponer que la escorrentía es calculada aproximadamente por un sistema de "n" tanques de almacenamiento, cada uno recibiendo entradas por la lluvia y/o el flujo de salida desde algún tanque superior; y de la misma manera este tanque permite un rebose de flujo hacia otro tanque inferior. La Figura 2.8a muestra el esquema el esquema del flujo entre tanques hasta determinar el flujo de escorrentía.

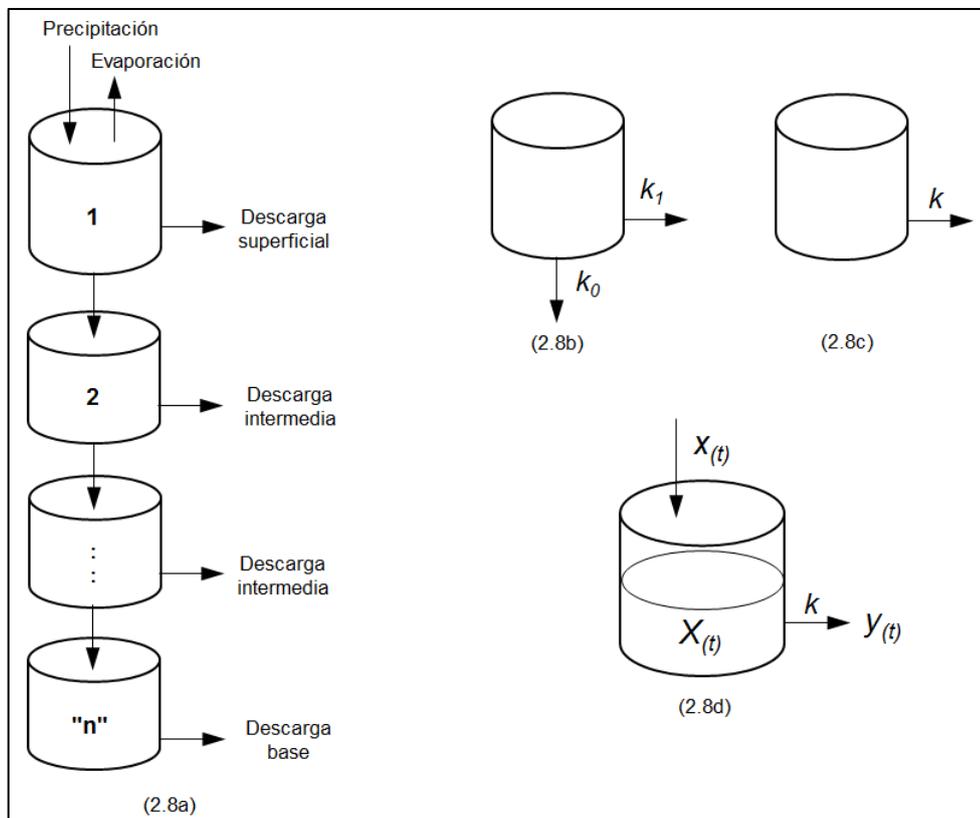


Figura 2.8 Esquema de Concepto de Tanques de Almacenamiento.

Fuente: (Sugawara, 1995)

El modelo considera el flujo de salida en cada tanque como una proporción k del flujo de ingreso. En la Figura 2.8b se muestra cada tanque de almacenamiento de forma independiente, existen salidas de flujo en forma de descargas y flujos hacia el tanque de almacenamiento inferior; si se consideran estos flujos como una sola salida, se tendrá un modelo de tanque lineal, Figura 2.8c. Finalmente, en la Figura 2.8d se muestra un modelo lineal de tanque de almacenamiento en forma más simplificada, que está en función del tiempo, donde se tiene un flujo de ingreso, $x_{(t)}$, y de salida, $y_{(t)}$. Si $X_{(t)}$ es el almacenamiento en el tanque, se tendrá:

$$\frac{d}{dt}X_{(t)} = x_{(t)} - y_{(t)}, \quad y_{(t)} = kX_{(t)} \quad (\text{Ec.2.12})$$

Combinando estas ecuaciones se tiene:

$$\left(\frac{d}{dt} + k\right)X_{(t)} = x_{(t)}, \quad \left(\frac{d}{dt} + k\right)y_{(t)} = kx_{(t)} \quad (\text{Ec.2.13})$$

Utilizando el operador diferencial tasa de cambio, $D = d/dt$, se obtiene finalmente:

$$X_{(t)} = \frac{1}{D + k}x_{(t)}, \quad y_{(t)} = \frac{k}{D + k}x_{(t)} \quad (\text{Ec.2.14})$$

La ecuación 2.14 muestra que el almacenamiento en el tanque, $X_{(t)}$, y su descarga, $y_{(t)}$, estarán en función lineal de los factores $1/(D + k)$ y $k/(D + k)$ del flujo de ingreso, $x_{(t)}$. El modelo funciona realizando el balance en cada tanque e interrelacionando los flujos de ingreso y salida entre tanques.

El modelo conceptual de tanques de almacenamiento considera cada tanque del sistema como cada uno de los principales procesos físicos que experimenta el agua dentro de una cuenca, y son determinantes en la producción y transferencia de escorrentía (intercepción, infiltración, evaporación, recarga del acuífero, escorrentía superficial y sub-superficial, flujo base, etc.). Estos tanques están conectados entre sí y dispuestos jerárquicamente de arriba hacia abajo, cada uno tiene un significado en la representación del proceso de la escorrentía. (Sugawara, 1995).

2.8 ECUACIONES DE SAINT-VENANT

La escorrentía generada por una lluvia sobre una cuenca se desplaza a través del suelo y los canales de la cuenca y se considera un proceso distribuido porque la velocidad y profundidad del flujo varía espacialmente dentro de la cuenca. Para determinar estos valores, se utilizan modelos basados en ecuaciones diferenciales parciales, llamada la ecuación de Saint-Venant.

Las ecuaciones de Saint-Venant describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto, esto es aplicable también en el flujo de escorrentía en una cuenca.

2.8.1 Ecuación de Continuidad

De la ecuación de continuidad para un flujo no permanente y de densidad variable a través de un volumen de control, se tiene que la tasa de entrada de masa es (Chow et al, 1988):

$$\iint_{\text{entrada}} \rho V dA = -\rho(Q + q dx) \quad (\text{Ec.2.15})$$

Donde, q es el caudal de entrada lateral a la dirección del flujo, dx es la longitud del volumen de control en la dirección de flujo y Q el caudal total de ingreso.

Se ha considerado negativo porque el flujo de ingreso es considerado como negativo en el teorema de transporte de Reynolds. El flujo de masa que sale del volumen de control es (Chow et al, 1988):

$$\iint_{\text{salida}} \rho V dA = \rho(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx) \quad (\text{Ec.2.16})$$

Donde dQ/dx es la tasa de cambio del flujo con respecto a la distancia.

Reemplazando los flujos de entrada y salida en la ecuación de continuidad (Ec. 2.4), y si se considera que la densidad del fluido es constante, se determina la forma conservativa de la ecuación de la continuidad (Chow et al, 1988)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (\text{Ec.2.17})$$

Otra forma de solucionar las ecuaciones de Saint-Venant, es utilizar la forma no conservativa de la ecuación de continuidad, en la cual no se considera como variable el caudal Q , sino la velocidad del flujo promedio V . Además, considerando una longitud de volumen de control dx y una profundidad de flujo dy . Se sustituyen

estos términos en la forma conservativa de la ecuación de la ecuación de la continuidad (Chow et al, 1988), Finalmente se deriva por partes el primer término de la ecuación y tendremos la ecuación de continuidad:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ec.2.18})$$

2.8.2 Ecuación de Momentum

Del teorema de transporte de Reynolds para el momentum y La Segunda ley de Newton, se tiene que la suma de las fuerzas que se aplican sobre un fluido es igual a la tasa de cambio del momentum almacenado dentro de un volumen de control (Ec. 2.8). Existen cinco fuerzas que actúan sobre el volumen de control.

$$\sum F = F_g + F_f + F_e + F_w + F_p \quad (\text{Ec.2.19})$$

Donde F_g es la fuerza gravitacional del volumen de control, F_f es la fuerza de fricción a lo largo del lecho y lados del volumen de control, F_e es la fuerza de contracción/expansión producida por los cambios abruptos de la sección transversal del volumen de control, F_w es la fuerza cortante del viento en la superficie del agua y F_p es la fuerza de desbalance de presiones. Estas fuerzas están definidas se la siguiente manera: (Chow et al, 1988)

La fuerza de gravedad del volumen de fluido dentro del volumen de control es:

$$F_g = \rho g A S_0 dx \quad (\text{Ec.2.20})$$

Donde la pendiente del fondo S_0 es igual a $-dy/dx$

La fuerza de fricción es producida por los esfuerzos cortantes a lo largo del lecho y lados del volumen de control y es igual a:

$$F_f = -\rho g A S_f dx \quad (\text{Ec.2.21})$$

Donde la pendiente de fricción S_f se deduce a partir de las ecuaciones de resistencia de Manning.

Las fuerzas por contracciones o expansiones bruscas en el volumen de control causan pérdidas de energía a través de corrientes de vórtices (flujo circulatorio).

$$F_e = -\rho g A S_e dx \quad (\text{Ec.2.22})$$

Donde la S_e es la pendiente de pérdidas de vórtices.

$$S_e = \frac{K_e}{2g} \frac{\partial(Q/A)^2}{\partial x} \quad (\text{Ec.2.23})$$

Donde K_e es el coeficiente de expansión o contracción adimensional.

La fuerza cortante por viento es causada por la resistencia de fricción entre el viento y la superficie libre del agua, está dada por:

$$F_w = -W_f B \rho dx \quad (\text{Ec.2.24})$$

Donde W_f es el factor de corte del viento.

La fuerza producida por el desbalance de presión es la resultante de las fuerzas hidrostáticas en los lados: izquierdo, F_{pl} , derecho, F_{pr} , y las fuerzas ejercidas en los taludes, F_{pb} , del volumen de control.

$$F_p = F_{pl} - F_{pr} + F_{pb} \quad (\text{Ec.2.25})$$

Si se considera un elemento de espesor, dw , ubicado a una elevación, w , del fondo del cauce, este elemento se encontrará a una profundidad, $y - w$; si se considera, b , el ancho del elemento en la sección transversal. Entonces, la presión hidrostática en el extremo izquierdo del volumen de control será:

$$F_{pl} = \int_0^y \rho g (y - w) b dw \quad (\text{Ec.2.26})$$

En el extremo derecho será:

$$F_{pr} = (F_{pl} + \frac{\partial F_{pl}}{\partial x} dx) \quad (\text{Ec.2.27})$$

Y las fuerzas ejercidas en los taludes será:

$$F_{pb} = \left[\int_0^y \rho g (y - w) \frac{\partial b}{\partial x} dw \right] dx \quad (\text{Ec.2.28})$$

Ahora sustituyendo las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 en 2.25 se tiene:

$$F_p = -\rho q A \frac{\partial y}{\partial x} dx \quad (\text{Ec.2.29})$$

Finalmente, la suma de las cinco fuerzas será:

$$\sum F = \rho g A S_o dx - \rho g A S_f dx - \rho g A S_e dx - W_f B \rho dx - \rho q A \frac{\partial y}{\partial x} dx \quad (\text{Ec.2.30})$$

Por otro lado, el flujo neto del momentum es la suma del momentum de entrada y salida al volumen de control. La ecuación 2.31 indica el flujo neto de salida del momentum a través de la superficie de control:

$$\iint_{c.s.} V\rho V dA = -\rho \left[\beta v_x q - \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} dx \right] \quad (\text{Ec.2.31})$$

Donde, β es llamado también coeficiente de Boussinesq.

La tasa de cambio del momentum almacenado en el volumen de control se calcula considerando un volumen $A * dx$.

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} V\rho dV = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} dx \quad (\text{Ec.2.32})$$

Luego de sustituir los términos de fuerza de la ecuación 2.30 y los términos de momentum 2.31 y 2.32 en la ecuación de momentum 2.8 se obtiene la forma conservativa de la ecuación de momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0 \quad (\text{Ec.2.33})$$

La forma no conservativa de la ecuación de momentum puede deducirse de forma similar a la forma no conservativa de la ecuación de continuidad. Despreciando las pérdidas de vórtices, los efectos de la fuerza cortante por el viento y el flujo lateral, se tiene para un ancho unitario:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f \right) = 0 \quad (\text{Ec.2.34})$$

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen diversas formas simplificadas. La ecuación de momentum considera términos correspondientes a los procesos físicos que gobiernan el flujo, estos son el término de aceleración local, que describe el cambio de la velocidad respecto al tiempo; el término de la aceleración convectiva, que describe el cambio de velocidad a lo largo de la dirección del flujo, el término de la fuerza de presión, que es proporcional al cambio de la profundidad del agua; el término de la fuerza gravitacional, proporcional a la pendiente del lecho S_o y el término de fuerza de fricción, proporcional a la pendiente de fricción S_f .

Tabla 2.2: Resumen de las Ecuaciones de Saint-Venant

<i>Ecuación de continuidad</i>				
Forma conservativa		$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$		
Forma no conservativa		$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$		
<i>Ecuación de momentum</i>				
Forma conservativa				
$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$				
Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción
Forma no conservativa (elemento de ancho unitario)				
$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$				
			Onda cinemática	
			Onda de difusión	
Onda dinámica				

Fuente: Chow et al, 1988.

En la presente investigación, el modelo agregado HEC-HMS realiza la transformación lluvia-escorrentía utilizando el método del número de curva, el cual está basado en la ecuación de continuidad para un flujo no permanente. Por otro lado, en los modelos distribuidos, el modelo TETIS realiza dicha transformación utilizando el método de los tanques de almacenamiento; mientras que el modelo IBER2D hace uso de las ecuaciones de Saint-Venant, a las cuales adiciona los términos de precipitación y pérdidas.

CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDIO

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

3.1.1 Subcuenca Barrios

La subcuenca Barrios se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Piura, que se localiza al norte del Perú y está comprendida entre la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico; tiene una área de aporte de 421 km² y está geográficamente comprendida entre los paralelos 4°42' y 5°45' de Latitud Sur y los meridianos 79°29' y 81°00' de Longitud Oeste. La cuenca del río Piura está situada en la región de Piura y abarca las provincias de Huancabamba, Morropón, Piura, Paíta y Sechura (ver Figura 3.1), la cual tiene una superficie aproximada de 12 216 km² y una longitud de cauce de 280 km.

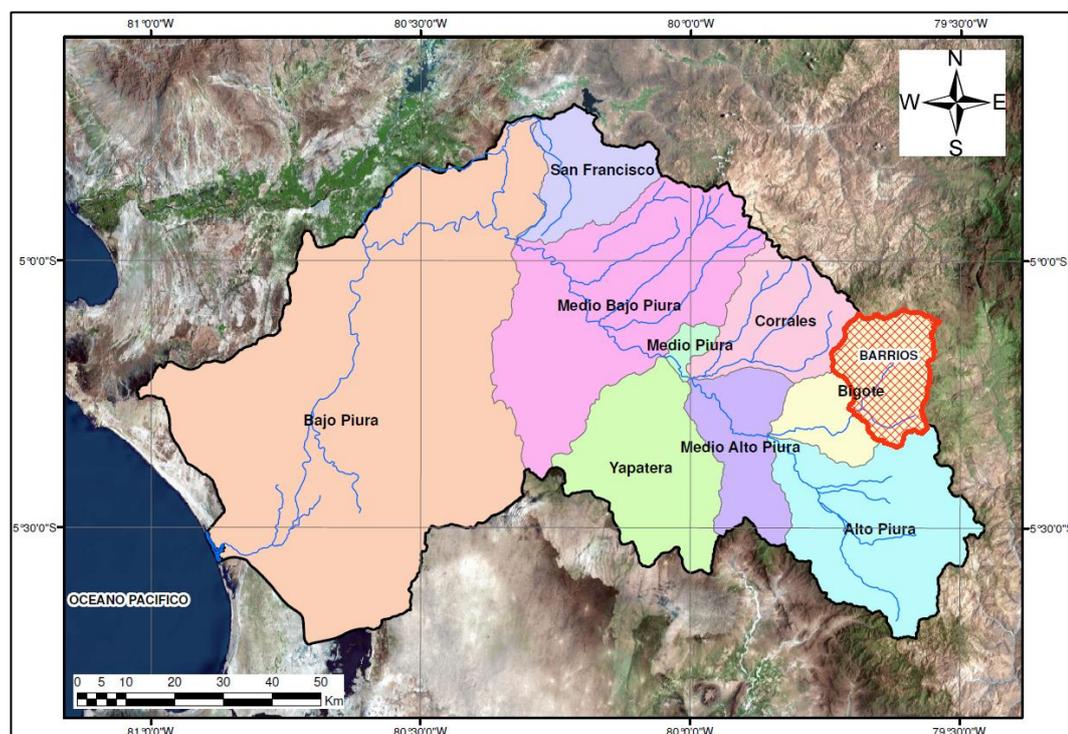


Figura 3.1 Cuenca Hidrográfica del Río Piura.

Fuente: Elaboración propia

En la parte alta de la cuenca del Río Piura se encuentra la estación limnigráfica Barrios, que es el punto de salida de la subcuenca Barrios, en esta subcuenca se realizará el análisis de tormentas de la presente investigación (ver Figura 3.2).

A continuación, se describen las características de esta subcuenca.

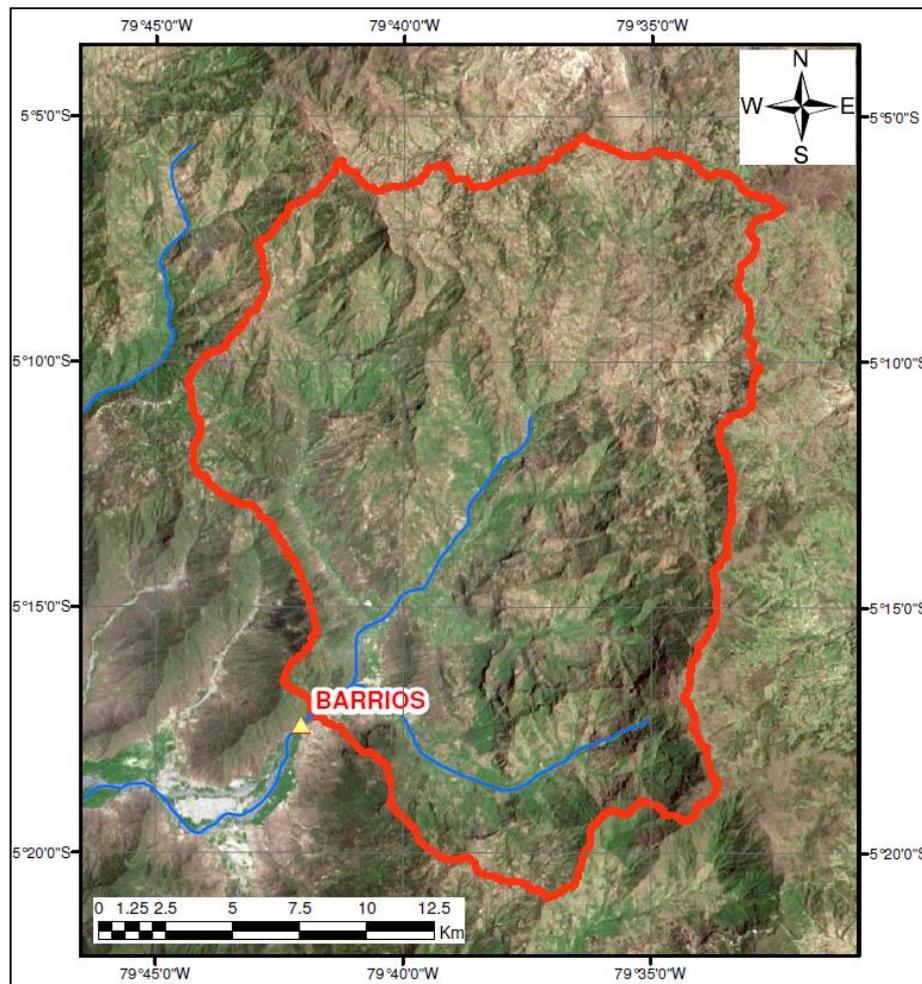


Figura 3.2 Subcuenca Barrios.
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Ubicación y Extensión

La subcuenca Barrios está ubicada en la Región Piura, entre los paralelos 05°05' y 05°21' de Latitud Sur y los meridianos 79°33' y 79°44' de Longitud Oeste. Su territorio pertenece, principalmente, a la provincia de Huancabamba.

La subcuenca Barrios presenta una orientación de Este hacia Suroeste, y tiene una elevación mínima de 305 m.s.n.m. en la parte baja, y una elevación máxima de 3,400 m.s.n.m. En esta subcuenca existe la estación limnigráfica Barrios, que toma mediciones del caudal del río Bigote, el área de aporte de la subcuenca hasta la estación Barrios es de 421 km². (Ver Figura 3.2)

3.1.3 Acceso

El acceso al área de estudio se realiza a través de una carretera asfaltada hasta el pueblo de Buenos Aires, que está ubicado a 94 km de la ciudad de Piura; luego se continúa el trayecto por una trocha carrozable hasta el pueblo de Salitral,

ubicado a 11 km del pueblo de Buenos Aires; a partir de este punto se ingresa a la subcuenca Barrios y el acceso a casi todos los pueblos es mediante trochas carrozables.

3.1.4 Cobertura y usos de suelo

A continuación se detalla cada tipo de cobertura según el Sistema de Gestión de la Cuenca del Río Piura, desarrollado por el Gobierno Regional de Piura y el Instituto Regional de Apoyo a la Gestión de los Recursos Hídricos en el año 2001. (Lopez, 2001)

Bosques y Praderas

La subcuenca Barrios, alberga una rica cobertura vegetal conformada por extensas áreas de bosques, también se puede incluir plantaciones de mango, maracuyá, praderas formadas por arbustos, pastos naturales, cultivos transitorios como el arroz, frijoles, soya, etc. La vegetación natural del bosque está conformada por Algarrobo, Sapote, Hualtaco, Pinán, Ceibo, Palo Santo, Guayaquil, Overall, Cedro, Caoba, palo de balsa y Faique. Se estiman áreas de más de 70 km² de bosque y 200 km² de praderas. Principalmente se encuentran en la zona de los valles, entre los 300 y 1,500 m.s.n.m.

Los bosques, con predominancia de árboles de porte alto, proporcionan sombra y protegen al suelo de la erosión; estas áreas están complementadas por praderas, conformada de arbustos y pastos naturales, los cuales prosperan vigorosamente en épocas lluviosas. Aprovechando las posibilidades de desarrollo que presenta el bosque, las familias han logrado promover la crianza de vacunos, ovinos, porcinos, aves y de ganado caprino.

Cauces

Los cauces y sus laderas presentan vegetación variada en función a la zona ecológica que atraviesa; el cauce está conformado de material de lecho de río, y las laderas de vegetación estacional, que varía entre los periodos de lluvia y de estiaje. En la subcuenca Barrios se estima un área de cauces de 20 km².

Sembríos

Este tipo de cobertura incluye principalmente zonas agrícolas, se encuentra entre los 2,000 y 3,600 m.s.n.m. que es una zona de laderas pronunciadas y se encuentra la meseta andina. Predomina la microparcelación, con asistencia técnica en algunos cultivos de café, cacao, caña y pasturas. Toda su producción

se caracteriza por el reducido y casi nulo uso de insumos químicos. En esta zona los agricultores realizan la asociación y rotación de cultivos, y promueven prácticas de conservación de suelos. Se estima que el área total de sembríos en la subcuenca Barrios es mayor a los 100 km².

Los cultivos en esta zona están destinados, principalmente, a la subsistencia de las familias, se cultiva maíz amarillo y amiláceo, tubérculos, frijoles, caña de azúcar, café, trigo, caña de Guayaquil, lúcuma, granadilla, naranja, chirimoya, guanábana, mamey y grandes extensiones de pastos de bajo riego y en seco.

Suelo desnudo y Montañoso

Este tipo de suelo se encuentra en las partes altas de la subcuenca Barrios, con elevaciones superiores a los 3,500 m.s.n.m. Generalmente son suelos arcillosos y limosos, cascajosos y pedregosos; de baja fertilidad debido a los procesos erosivos que se dan por estar ubicados en laderas con pendientes variables. Predominan los suelos pardos, pero es común encontrar suelos rojos, amarillos, tierras blancas, etc. La topografía y el relieve en esta parte de la subcuenca son accidentados, con pendientes que pueden variar entre 25 a 45%. Se estima que el área total de suelo desnudo y montañoso en la subcuenca Barrios es alrededor de 30 Km².

3.2 CLIMA

El clima de la subcuenca Barrios se puede caracterizar como ligeramente húmedo y templado frío en la parte baja; mientras que en la parte alta es húmedo y semifrío.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) viene operando una red de estaciones meteorológicas, con información desde el año 1963. Además, el Proyecto Especial Chira Piura (PECHP) tiene registros de estaciones meteorológicas con registro entre los años 1971 y 1992. En La Tabla 3.1 se enumeran las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio; además, en la Figura 3.3 se muestra la ubicación de éstas respecto a la subcuenca Barrios.

Tabla 3.1 Estaciones Meteorológicas en el Área de Estudio

Estación	Coordenadas		Altitud m.s.n.m.	Periodo Registro	Institución operante	Categoría
	Latitud S	Longitud W				
Altamiza	05°04'	79°44'	2600	1979 - 1987	PECHP	PLU
Bigote	05°20'	79°47'	200	1963 - 1998	SENAMHI	PLU
Barrios	05°17'	79°42'	310	1974 - 1993	PECHP	PLU - H
Canchaque	05°22'	79°36'	1200	1979 - 1987	SENAMHI	PLU - PG
Chignia	05°36'	79°38'	850	1979 - 1987	PECHP	PG
Morropón	05°11'	79°59'	140	1970 - 1998	SENAMHI	CO
Paltashaco	05°07'	79°52'	900	1971 - 1991	PECHP	PLU - H
Pasapampa	05°07'	79°36'	3410	1964 - 1993	PECHP	PLU
Pirga	05°40'	79°37'	1510	1979 - 1983	SENAMHI/ PECHP	PLU
Huarmaca	05°34'	79°31'	2180	1973 - 1998	SENAMHI	CO

Fuente: Inventario de Estaciones Meteorológicas de SENAMHI (1998)

PLU: Pluviométrica, H: Hidrológica, PG: Pluviográfica, CO: Climatológica Ordinaria.

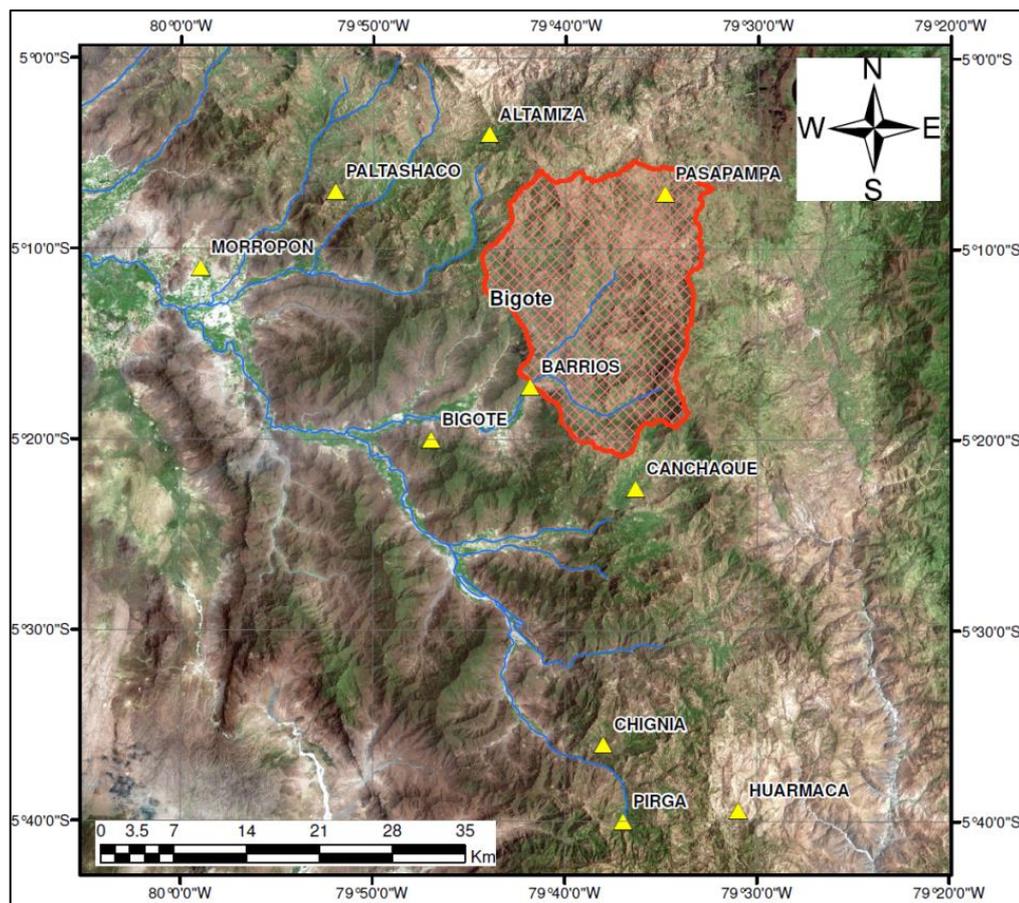


Figura 3.3 Estaciones Meteorológicas en el Área de Estudio.

Fuente: Elaboración propia

En la presente investigación, se utilizará para el modelamiento la información de tormentas y caudales registrados en las estaciones Barrios y Canchaque.

3.2.1 Precipitación

La precipitación en el área de estudio se presenta principalmente entre los meses de diciembre y mayo, siendo máximas en el mes de marzo. La Tabla 3.2 muestra el resumen del promedio de las precipitaciones en las estaciones Barrios, Canchaque, Pasapampa y Bigote. Además, en la Figura 3.4 se muestra su variación durante todo el año. En el Anexo I se detalla la información meteorológica utilizada en la presente investigación.

Tabla 3.2 Resumen de Precipitación Promedio Mensual

Estación	Barrios	Canchaque	Pasapampa	Bigote
Enero	41.0	116.6	112.2	54.6
Febrero	106.9	196.0	143.8	179.6
Marzo	177.3	248.5	180.5	202.5
Abril	80.5	119.5	110.2	81.2
Mayo	6.6	31.8	43.5	3.7
Junio	1.2	9.3	14.1	0.8
Julio	0.4	3.0	6.5	0.0
Agosto	1.8	3.0	11.0	0.1
Septiembre	1.9	3.5	12.6	2.1
Octubre	5.6	11.9	53.2	4.7
Noviembre	4.4	11.2	39.1	5.1
Diciembre	26.6	47.3	75.0	10.2

Fuente: Elaborado a partir de información histórica de Senamhi.

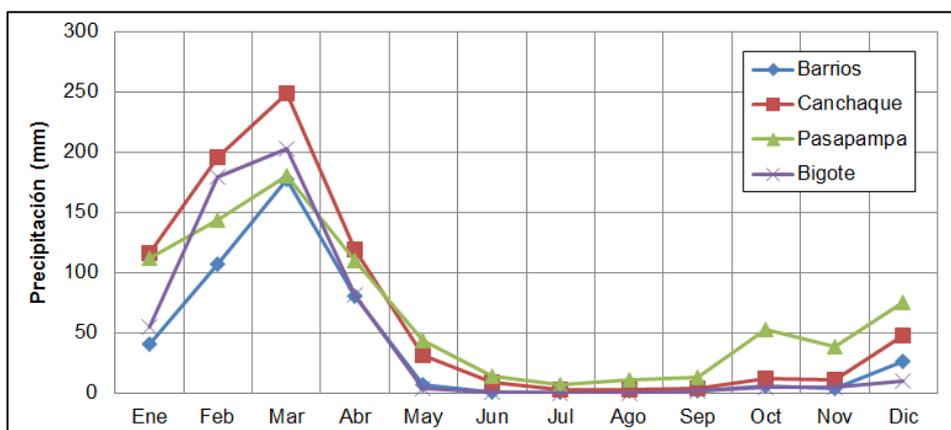


Figura 3.4 Variación de la Precipitación Total Promedio.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Temperatura

Respecto a la temperatura en la cuenca del río Piura, tiene un valor promedio de 20.4°C. La Tabla 3.3 muestra la temperatura promedio mensual en las estaciones Morropón y Huarmaca. En el Anexo I se detalla la información meteorológica utilizada en la presente investigación.

Tabla 3.3 Resumen de Temperatura Promedio Mensual

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Morropón	26.7	27.5	27.5	27.0	25.2	23.7	22.3	23.2	23.9	24.5	25.2	25.4
Huarmaca	14.6	14.8	15.3	15.5	15.9	16.5	16.7	16.5	16.0	15.2	14.6	14.7

Fuente: Elaborado a partir de información histórica de Senamhi.

3.2.3 Evaporación

Respecto a la evaporación en la cuenca del río Piura, tiene un valor promedio de 105.8 mm. La Tabla 3.4 muestra la evaporación total promedio mensual en las estaciones Morropón y Huarmaca. En el Anexo I se detalla la información meteorológica utilizada en la presente investigación.

Tabla 3.4 Resumen de Evaporación Total Promedio Mensual

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Morropón	147.3	116.9	104.9	108.2	106.0	94.2	96.8	112.8	128.4	141.0	145.0	155.1
Huarmaca	54.1	47.5	61.0	51.1	66.7	105.8	151.3	151.5	118.3	101.3	95.4	78.1

Fuente: Elaborado a partir de información histórica de Senamhi.

3.3 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

La subcuenca Barrios tiene una altitud media de 1 801 m.s.n.m., una pendiente media de 45%. El factor de forma calculado es de 0,50; que corresponde a una forma ligeramente ensanchada, este valor genera producción sostenida de caudales y potencial de crecientes. Asimismo, el coeficiente de compacidad calculado es de 1,34; lo cual indica que es una subcuenca que tiene una forma oval oblonga y se espera un tiempo de concentración relativamente menor. La Tabla 3.5 muestra los parámetros geomorfológicos de la subcuenca Barrios.

Tabla 3.5: Parámetros Geomorfológicos de la Subcuenca Barrios

Parámetros	Unidad	Valor
Área	Km ²	421
Perímetro	Km	98
Altura media	m.s.n.m.	1801
Pendiente media	%	45
Longitud del cauce principal	Km	30
Pendiente media del cauce principal	m/m	0,106
Factor de forma	-	0,50
Coeficiente de compacidad	-	1,34
Coeficiente de redondez	-	1,73
Densidad de drenaje		0,51

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de redondez 1,73; no es un valor tan alejado de la unidad e indica que la cuenca no es alargada. La densidad de drenaje 0,51; indica que la red de drenaje de la subcuenca Barrios es eficiente.

La Figura 3.5 muestra la curva hipsométrica de la subcuenca Barrios, de la cual se infiere que es una cuenca en equilibrio; es decir, se encuentra en su fase de madurez.

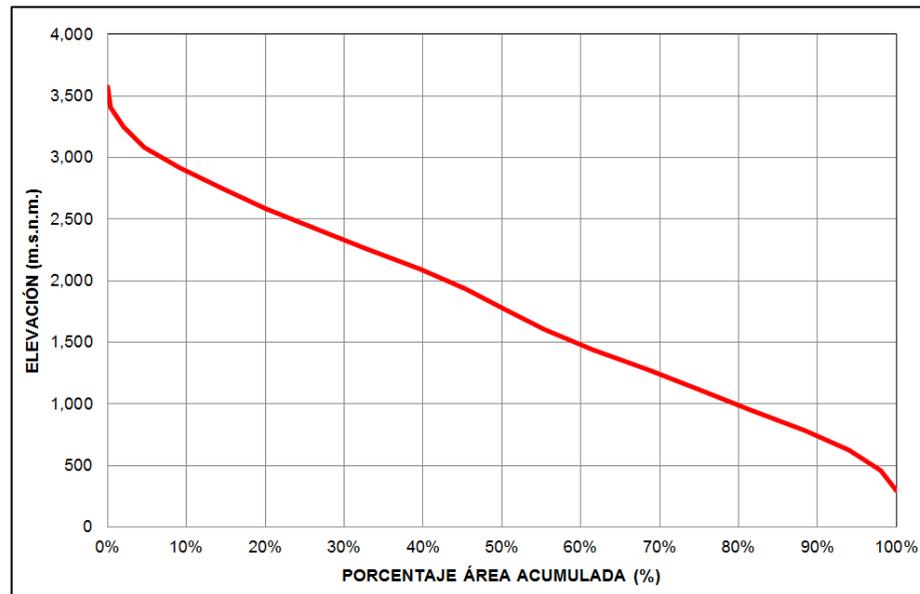


Figura 3.5 Curva Hipsométrica.
Fuente: Elaboración propia

De los parámetros geomorfológicos calculados, se puede inferir que la respuesta de la subcuenca Barrios será relativamente rápida. Debido a que presenta una red de drenaje eficiente, la forma de la cuenca permite que el tiempo de concentración sea relativamente corto; además presenta pendientes altas, tanto en las laderas, como en los cauces. Por otro lado, la respuesta de la subcuenca dependerá del contenido de humedad antecedente a la ocurrencia de la tormenta, la cual está determinada por las precipitaciones de los días previos en el área de estudio.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y APLICACIONES

4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

4.1.1 Información Topográfica

La información topográfica ha sido descargada del sitio web EARTHDATA desarrollado por la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?fst0=Land%20Surface&fsm0=Topography>). Esta información ha sido descargada en formato TIFF, que consiste de una red de grillas de 38.09 metros de ancho, en la cual cada grilla contiene un valor de elevación. Este tamaño de grilla tiene suficiente precisión para el desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos. La Figura 4.1 muestra la topografía descargada correspondiente al área de estudio.

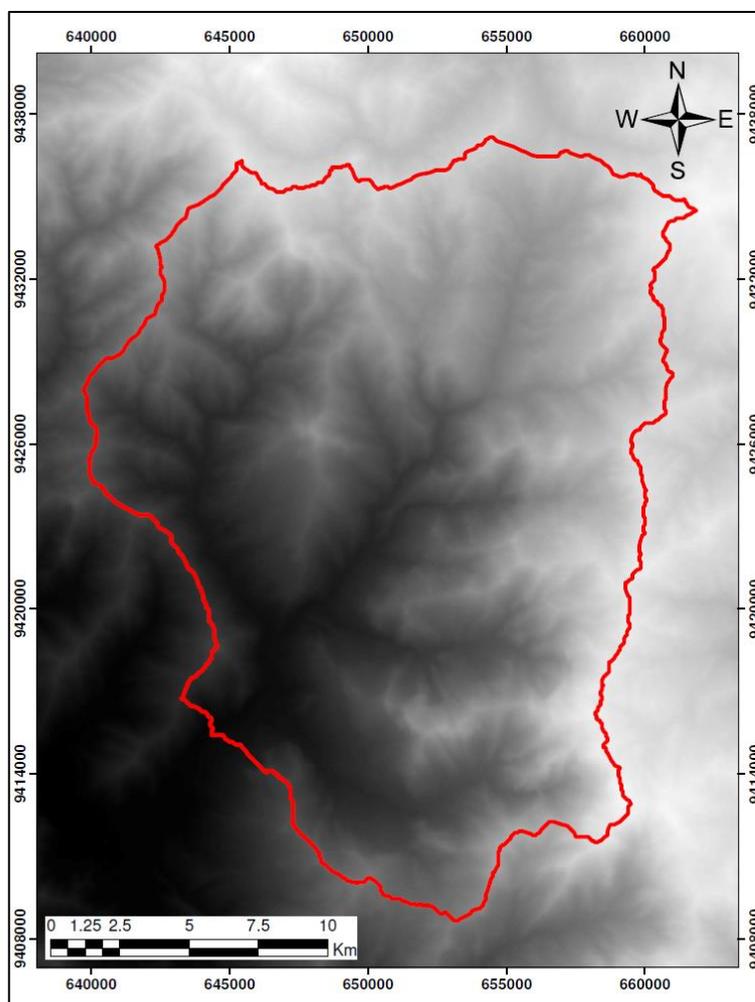


Figura 4.1 Topografía Descargada de la NASA.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Información Hidrometeorológica

Las tormentas a analizar en la presente investigación, corresponden a los datos observados de las precipitaciones a escala horaria en las estaciones Barrios,

Canchaque y Pasapampa; respecto a los caudales, se tiene la medición de las descargas a escala horaria en la estación Barrios. Esta información ha sido registrada entre los años 1975 a 1979 y comprende siete eventos de tormenta, los registros de precipitación serán utilizados como datos de ingreso al modelo hidrológico, mientras que los registros de caudales serán utilizados para la calibración de los mismos. Estas series horarias de medición de datos de precipitaciones y caudales horarios han sido recopiladas de la tesis desarrollada por Fernández (2010), las cuales pertenecen al Proyecto Especial Chira Piura (PECHP).

La Tabla 4.1 muestra el resumen de los registros de precipitaciones y caudales para cada una de las tormentas indicadas; la separación de flujo base se realizó mediante el método de la línea recta, mencionada en el Capítulo 2 de la presente investigación, este método es aplicable a las corrientes efímeras y cuencas pequeñas a medianas cubiertas con vegetación en regiones húmedas (Chow et al, 1988); como la subcuenca Barrios es relativamente mediana y se ubica en la parte alta de la cuenca de Río Piura, los caudales importantes solo se presentan de forma intermitente durante los eventos de tormenta; por otro lado, es una subcuenca con vegetación y presenta un clima húmedo. En el Anexo II se detallan los datos observados en campo.

Tabla 4.1: Resumen de Tormentas Observadas.

Tormenta	Fecha	Tormenta (mm)			Caudal Neto (m³/s)
		Canchaque	Barrios	Pasapampa	
Tormenta 1	13/02/1975	54.3	34	-	46.7
Tormenta 2	25/03/1976	58.7	65.1	-	263.5
Tormenta 3	18/02/1977	61.2	19.2	-	21.2
Tormenta 4	24/04/1977	63.8	53.6	-	253.2
Tormenta 5	01/03/1978	40.4	44.1	47	30.4
Tormenta 6	07/03/1979	61.8	38.5	-	43.3
Tormenta 7	23/04/1977	44.2	52.7	-	105.2

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.1 se observa que no siempre existe la misma proporcionalidad de los caudales netos generados en cada tormenta, esto sucede porque la humedad antecedente en la subcuenca es diferente en cada evento.

La Figura 4.2 muestra los hidrogramas observados de cada una de las tormentas a ser analizadas en la presente investigación.

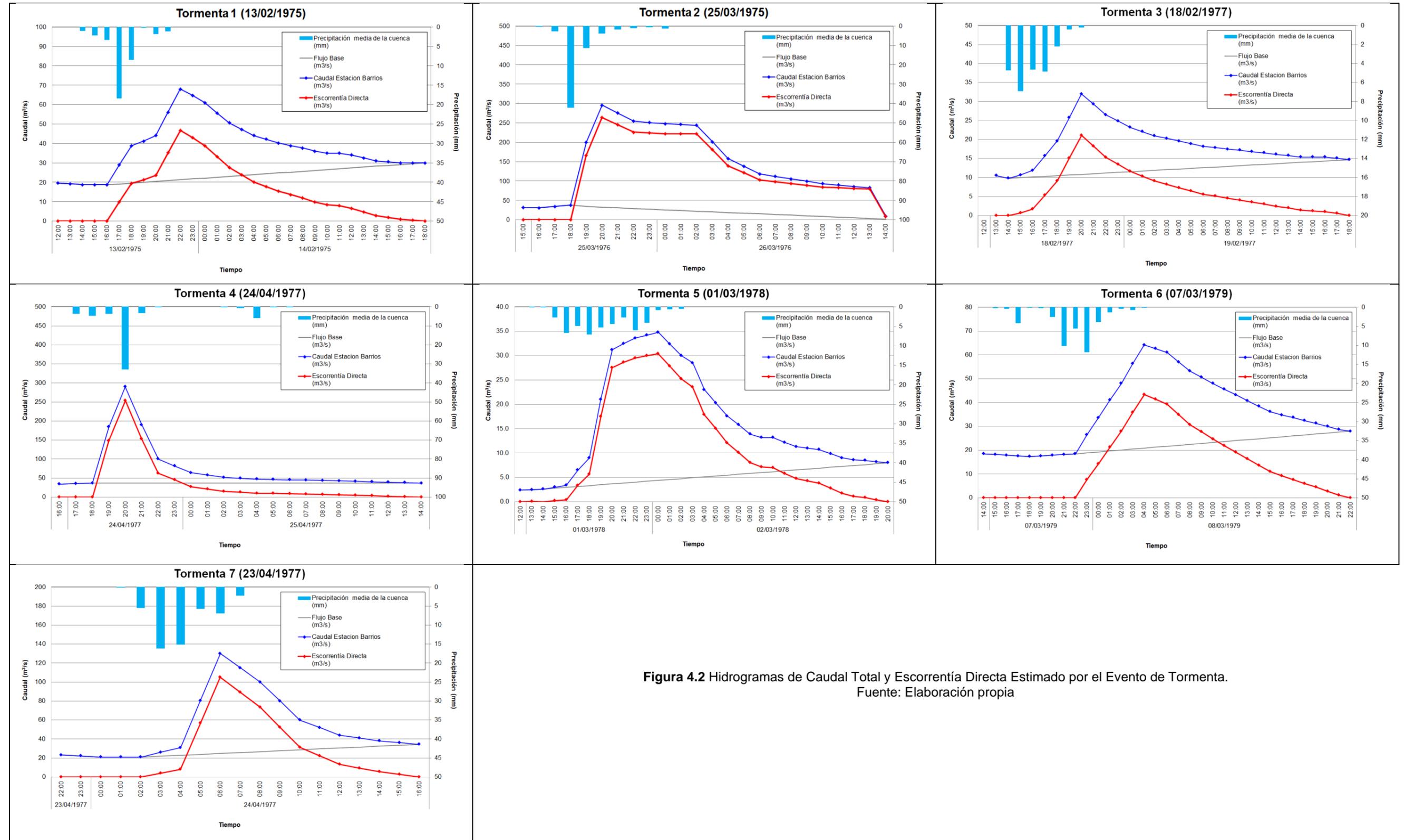


Figura 4.2 Hidrogramas de Caudal Total y Escorrentía Directa Estimado por el Evento de Tormenta.
Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Geología

La información geológica ha sido descargada del sitio web del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú, y corresponde al Mapa Geológico de la Región de Piura, versión digital emitida en abril de 2015 (https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1855/2/B056Mapa.1_Geologico_Piura.pdf). La Figura 4.3 muestra la geología en el área de la subcuenca Barrios, donde se reconocen las unidades litoestratigráficas.

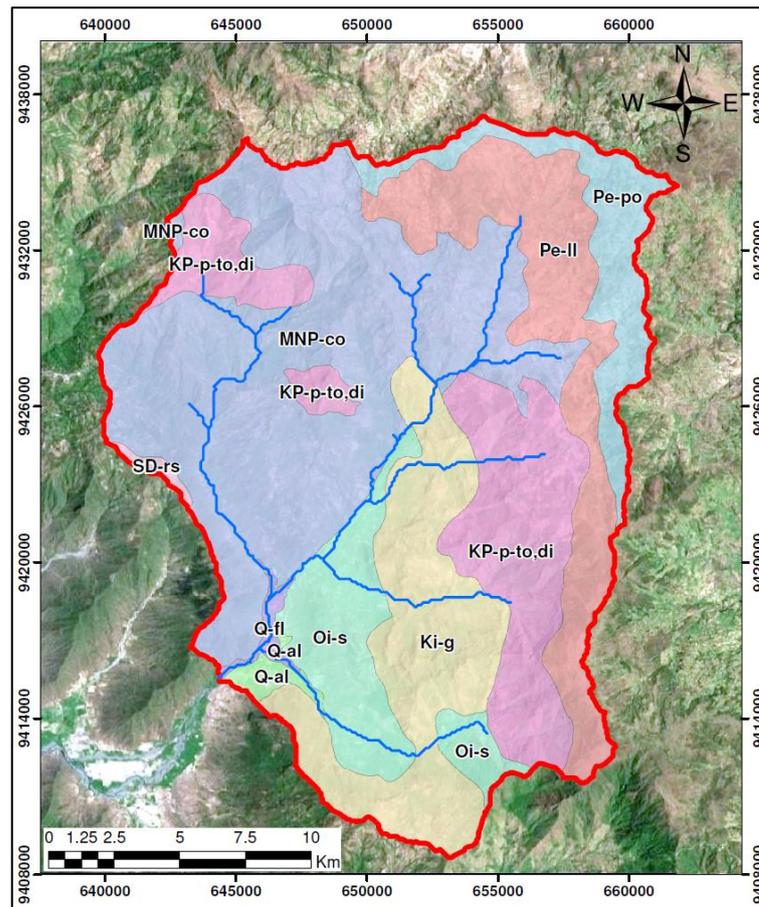


Figura 4.3 Geología de la Subcuenca Barrios.
Fuente: Ingemmet, 2015

KP-p-to,di (Tonalita, Diorita - Pamparume)

Esta unidad comprende rocas intrusivas y subvolcánicas del sistema Cretáceo superior del Mesozoico. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca Barrios.

MNP-co (Complejo Olmos)

Esta unidad comprende esquistos muy deformados con segregación de cuarzo, pertenecientes a la era Mesoproterozoico. Se encuentra en la margen derecha de la subcuenca Barrios.

Q-fl (Depósitos Fluviales)

Esta unidad comprende conglomerados no consolidados, arenas sueltas y material limo arcilloso, pertenecientes al sistema Cuaternario del Cenozoico.

Pe-II (Volcánico Llama)

Esta unidad comprende conglomerados diagenizados, lavas andesíticas, tobas con fragmentos líticos de composición andesítica y dacítica, pertenecientes al sistema Paleógeno del Cenozoico. Se encuentra en la parte alta de la subcuenca Barrios.

Oi-s (Formación Salas)

Esta unidad comprende esquistos y pizarras de color gris verdoso a gris oscuras, pertenecientes al sistema Ordoviciano del Paleozoico. Se encuentra en la margen izquierda de la subcuenca Barrios.

SD-rs (Formación Rio Seco)

Esta unidad comprende, principalmente, bancos de cuarcitas gris oscuras a negruzcas y bastante recristalizados, esporádicamente presentan filitas gris blanquecinas a blanco amarillentas y pizarras negras, pertenecientes al sistema Devoniano del Paleozoico.

Pe-po (Volcánico Porculla)

Esta unidad comprende lavas de composición andesítica, intercalado con tobas andesíticas y riolíticas con fragmentos de líticos, pertenecientes al sistema Paleógeno del Cenozoico. Se encuentra en la parte más alta de la subcuenca Barrios.

Ki-g (Grupo Goyllarisquizga)

Esta unidad comprende areniscas y cuarcitas blanquecinas, lutitas y algunos lentes de carbón, pertenecientes al sistema Cretáceo inferior del Mesozoico. Se encuentra en la margen izquierda de la subcuenca Barrios.

Q-al (Depósitos Aluviales)

Esta unidad comprende conglomerados y arenas no consolidadas, pertenecientes al sistema Cuaternario del Cenozoico. Se encuentra en la parte baja de la subcuenca Barrios.

En la presente investigación, se ha utilizado los mapas de las formaciones geológicas para asignar los parámetros del suelo, tales como: conductividad hidráulica, capacidad de infiltración, percolación, porosidad, etc. Adicionalmente, se ha complementado esta información con los mapas de coberturas y de uso de suelos.

4.1.4 Coberturas y Uso de suelos

La información de coberturas ha sido descargada a partir del sitio web del Ministerio de Ambiente (MINAM), que proporciona el mapa de Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) elaborado por el Gobierno Regional de Piura en el año 2012 y aprobado por el MINAM (<https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-zonificacion-ecologica-economica-departamento-piura>). La Figura 4.4 muestra este mapa en el área de la subcuenca Barrios, donde indica la cobertura y uso de suelo mediante códigos. Además, la Tabla 4.2 muestra los códigos para cada zona identificada.

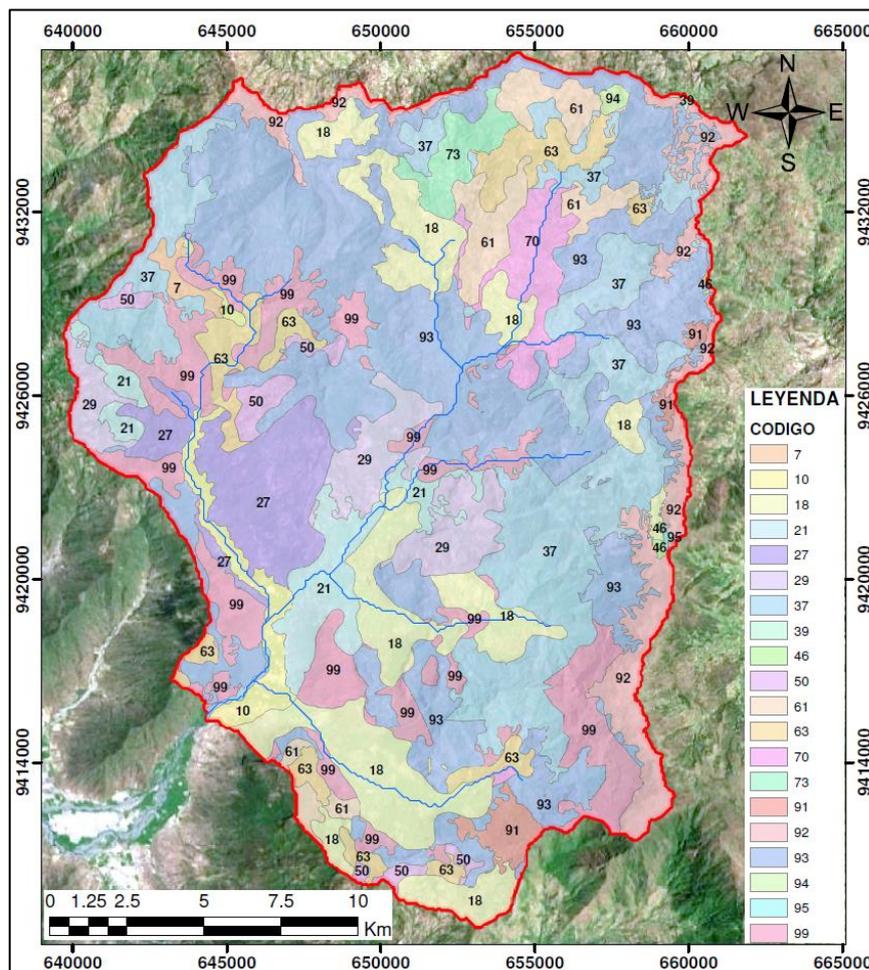


Figura 4.4 Mapa de Zonificación Ecológica y Económica.

Fuente: Gobierno Regional de Piura, 2012.

Tabla 4.2: Códigos de Zonificación Ecológica y Económica

Código ZEE	Nombre
7	Zonas aptas para cultivos en limpio con calidad Agrológica baja, asociadas a tierras de protección
10	Zonas aptas para cultivos en limpio con calidad Agrológica media
18	Zonas aptas para cultivos permanentes con calidad Agrológica baja
21	Zonas aptas para cultivos permanentes con calidad Agrológica baja, asociadas a potencial turístico
27	Zonas aptas para cultivos permanentes con calidad Agrológica baja, asociadas a zonas aptas para pastos
29	Zonas aptas para cultivos permanentes con calidad Agrológica baja, asociadas a zonas para producción forestal maderable
37	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica baja
39	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica baja, asociadas a potencial de energías renovables no convencionales en tierras de protección
46	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica baja, asociadas a potencial turístico
50	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica baja, asociadas a tierras de protección
61	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica baja, asociadas a zonas aptas para producción forestal maderable
63	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica media
70	Zonas aptas para pastos con calidad Agrológica media, asociadas a tierras de protección
73	Zonas aptas para producción forestal maderable
91	Zona de Bosque Húmedo
92	Zona de Paramos
93	Zonas para protección y conservación ecológico
94	Zonas para protección y conservación ecológica asociadas a potencial de energías renovables no convencionales
95	Zonas para protección y conservación ecológica asociadas a potencial de energías renovables no convencionales y potencial turístico
99	Zonas de Recuperación (Pecuario Extensivo en Tierras de protección)

Fuente: Gobierno Regional de Piura, 2012.

La información de uso de suelo y coberturas ha sido, además, determinada a partir de imágenes satelitales de la subcuenca Barrios; esta información ha sido descargada desde Bing Maps de Microsoft (<https://www.bing.com/maps>), aplicación lanzada en 2005. La resolución de estas imágenes es de 1.2 metros de tamaño por pixel. Esta imagen satelital, en conjunto con el mapa de zonificación ecológica, ha sido utilizada para determinar el tipo de coberturas y usos de suelo. La Figura 4.5 muestra el tipo de cobertura y uso de suelo.

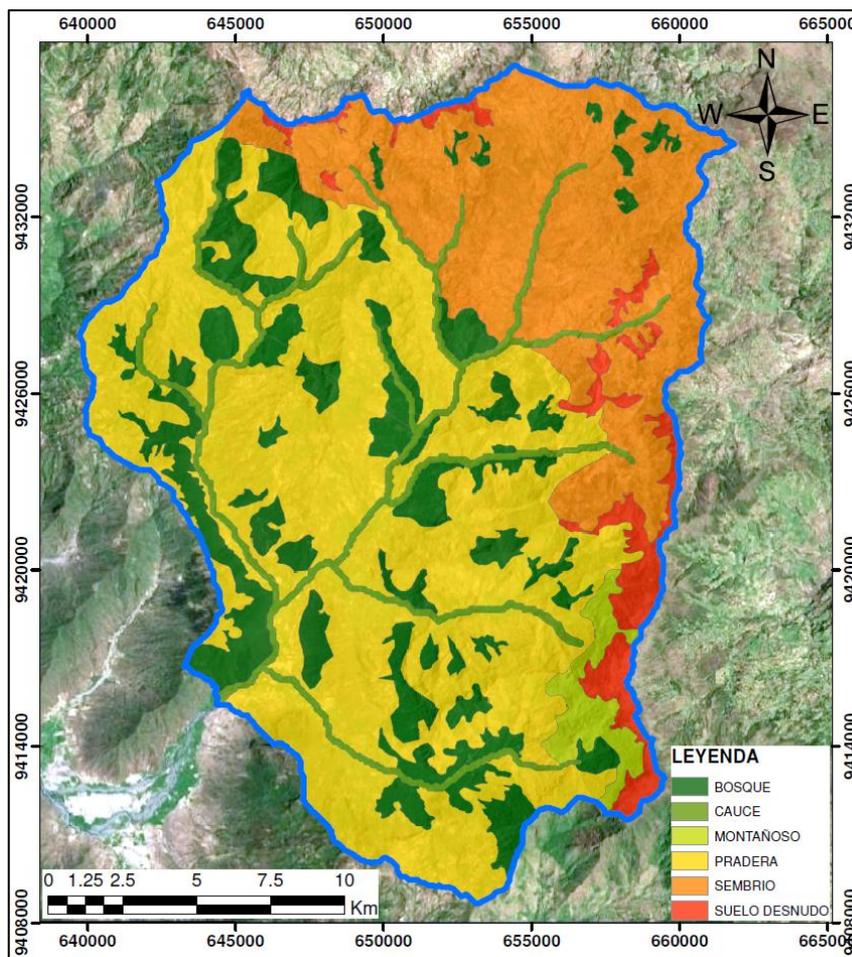


Figura 4.5 Imagen Satelital, Cobertura y Uso de Suelos.
Fuente: Elaboración propia.

Se han encontrado, principalmente, seis tipos de cobertura y uso de suelos, los cuales son: bosques, praderas, zona de los cauces, zonas de sembríos, suelo desnudo y terreno montañoso.

Asimismo, se obtuvieron los parámetros de suelo a partir de las calicatas en los estudios: “Tercer Informe (Final) del Servicio de Consultoría para ejecutar el Estudio de Capacidad de Uso Mayor de la Tierra en el Departamento de Piura”, desarrollado por el Gobierno Regional de Piura en el año 2010; y la tesis “Caracterización y Evaluación de los Niveles de Fertilidad en algunos Suelos del Distrito de Sapillica, Provincia de Ayabaca, Región Piura” desarrollado por Liliana Sernaqué Silupú de la Universidad Nacional de Piura en el año 2015.

La Tabla 4.3 muestra el resumen de la recopilación de las principales características del suelo y coberturas encontradas en la información de las calicatas.

Tabla 4.3: Resumen de Parámetros de Suelo en las Calicatas.

Calicata	Fisiografía	Vegetación	Textura	% Materia orgánica	Profundidad (m)
RCPH1	Vertiente montañosa	Pastos cultivados	Franco arcilloso	0.50%	1
RCPH2	Vertiente montañosa	Matorral, helechos	Franco arcilloso	0.50%	>1
RPA1	Altiplanicie Disectada	Césped de puna, pajonal.	Franco	0.50%	>1
RPA2	Altiplanicie ondulada	Pasto natural, bofedales	Arcillo Limoso	0.50%	<1
RPA3	Vertiente montañosa	Cultivos de caña, maíz.	Franco	0.50%	<1
HB1	Vertiente montañosa	Matorral y cultivos	Franco Arenoso	0.50%	1
HB2	Vertiente montañosa	Matorral y cultivos	Franco Arenoso	0.50%	1
HB3	Vertiente montañosa	Matorral y cultivos	Franco Arenoso	0.50%	>1
HB4	Vertiente montañosa	Cultivos de papa, trigo.	Franco Arenoso	0.50%	>1
HB5	Vertiente montañosa	Matorral de páramo	Franco Arenoso	0.50%	>1
RPTG1	Valle y llanura irrigada	Cultivos de mango y limón	Franco	0.50%	1
C1	Colinas	Cultivos de caña y papa	Franco Arcilloso	0.35%	<1
C2	Colinas	Cultivo de plátano, frejol.	Franco Arcilloso	0.55%	<1
C3	Colinas	Cultivo de plátano, frejol.	Arcillo Limoso	0.30%	<1
C4	Colinas	Cultivo de café y maíz	Franco Arcilloso	0.55%	<1

Fuente: Elaboración propia.

El Anexo III muestra el detalle de los resultados obtenidos en las calicatas cercanas al área de estudio.

La información recopilada en la presente investigación será utilizada como datos de ingreso a los modelos hidrológicos, estos serán ingresados como promedios ponderados para el caso del modelo hidrológico agregado HEC-HMS; mientras que en los modelos hidrológicos distribuidos TETIS e IBER2D, serán ingresados como mapas.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Como se mencionó en el capítulo anterior, para el presente estudio se ha considerado el uso de tres modelos hidrológicos a detallar: el “hidrograma unitario SCS”, de “tanques de almacenamiento TETIS” y de “Discretización Hidrológica Desacoplada (DHD)”.

4.2.1 Modelo Hidrograma Unitario SCS

El método del hidrograma unitario fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés) y está compuesto en dos partes: primero se realiza la estimación del volumen de escorrentía producido por una precipitación y en la segunda parte se determina el tiempo de distribución de escurrimiento, además del caudal pico. La Figura 4.6 muestra la relación entre la precipitación, P , y la escorrentía, Q .

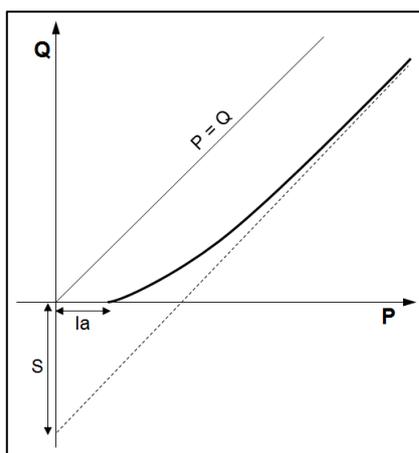


Figura 4.6 Relación Precipitación-Escorrentía.
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.6 se observa que para precipitaciones menores a “ I_a ”, no se genera escorrentía superficial. “ I_a ” está compuesto principalmente por las pérdidas de interceptación, almacenamiento en depresiones e infiltración, éstas ocurren antes que se produzca la escorrentía.

Se denomina “ S ” a la retención potencial máxima, que es la máxima cantidad de agua que puede ser contenido en la superficie de la cuenca antes de que se produzca la escorrentía.

Para determinar el volumen producido por la escorrentía, se establece una relación entre la retención real, “ $P - I_a - Q$ ”, y la retención potencial máxima, S ,

que es igual a la relación entre la escorrentía real, Q , y la escorrentía potencial máxima, " $P - I_a$ ".

$$\frac{P - I_a - Q}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (\text{Ec.4.1})$$

De la experiencia práctica, se ha demostrado que " I_a " es aproximadamente el 20% de la retención potencial máxima; por lo cual, la escorrentía se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S} \quad (\text{Ec.4.2})$$

4.2.1.1 Número de Curva

El valor de la retención potencial máxima, S , (en mm) está definido en función al tipo de suelo y cobertura de la cuenca. Numéricamente se tiene una convención para representar esta retención a través de un valor llamado "numero de curva", CN por sus siglas en inglés, que está definido como:

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (\text{Ec.4.3})$$

Se puede deducir que para zonas impermeables, la retención potencial máxima, S , será igual a 0 y el número de curva igual a 100; mientras que en zonas totalmente permeables donde no se produce escorrentía, la retención potencial máxima se vuelve un valor infinito y el número de curva igual a cero.

Para determinar el volumen de escorrentía, primero se realiza la estimación del valor del número de curva, CN , que dependerá de las características propias de la cuenca, tales como: el uso y condiciones del suelo, y del contenido de humedad en la cuenca al momento de la ocurrencia de la tormenta.

Según el SCS, se conocen y aceptan tres tipos de condiciones de humedad antecedente, AMC por sus siglas en inglés, para una cuenca. La Tabla 4.4 indica las condiciones de humedad y los criterios por los cuales están definidos.

Tabla 4.4: Condiciones de Humedad (AMC)

Condición de humedad antecedente	Precipitación total de los 5 días anteriores (mm)	
	Estación sin desarrollo vegetativo	Estación de crecimiento vegetativo
I	Menor de 12.7 mm	Menor de 35.6 mm
II	Entre 12.7 y 27.9 mm	Entre 35.6 y 53.3 mm
III	Mayor a 27.9 mm	Mayor a 53.3 mm

Fuente: Chow et al, 1988.

Para determinar el número de curva, CN , de una cuenca, se utiliza la Tabla 4.5 que muestra los valores de CN para cada tipo de cobertura, prácticas de cultivo y en función a cuatro grupos de suelos hidrológicos que están definidos según su capacidad de transmitir agua (infiltración); el grupo A tiene una intensidad alta de transmisión de agua, el grupo B moderada, el C lenta, y el D muy lenta.

Tabla 4.5: Valores de Número de Curva (Condición AMC tipo II)

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA	GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada:				
sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales:				
condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques:				
troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	39	61	74	80
cubierta buena	49	69	79	84
Área abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos Industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: Chow et al, 1988.

Los números de curva mostrados en la Tabla 4.5 aplican para la condición de humedad antecedente AMC II; para condiciones secas, AMC I, y condiciones húmedas, AMC III, los números de curva equivalentes son calculados como:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} \quad (\text{Ec.4.4})$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)} \quad (\text{Ec.4.5})$$

4.2.1.2 Hidrograma Adimensional SCS

El hidrograma adimensional SCS es un hidrograma unitario sintético, en el cual el caudal se expresa por la relación del caudal, q , con respecto al caudal pico, q_p , y el tiempo por la relación del tiempo, t , con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario, T_p . La Figura 4.13a muestra este hidrograma adimensional, los valores de q_p y T_p pueden ser calculados a partir de un modelo simplificado de un hidrograma unitario triangular, como se aprecia en la Figura 4.7b.

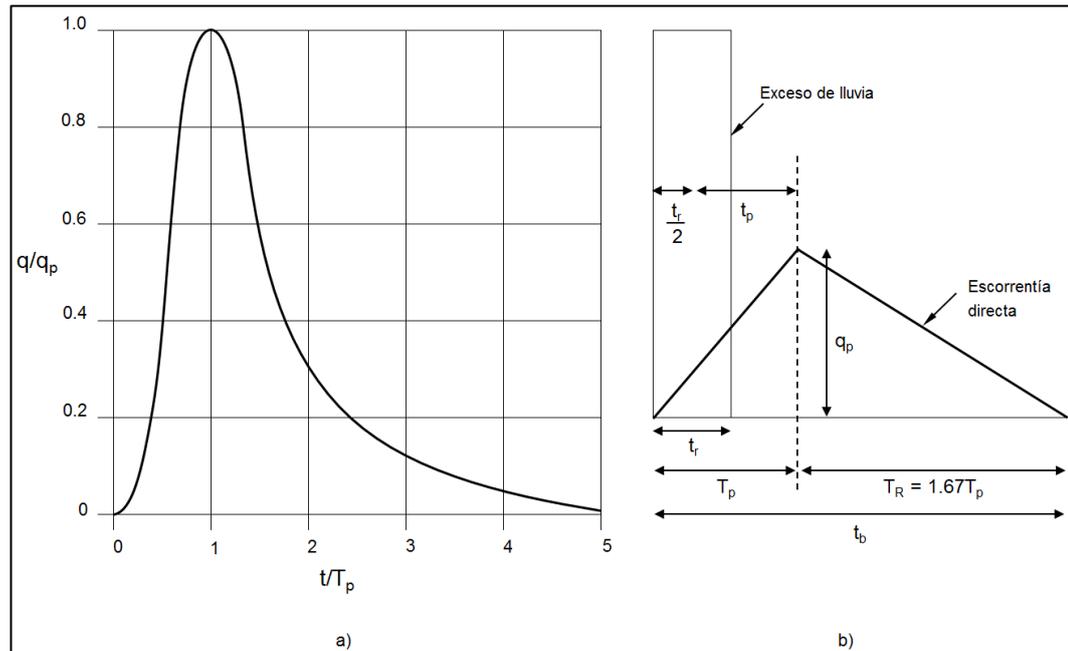


Figura 4.7 Hidrogramas Unitarios Sintéticos SCS.
Fuente: Chow et al, 1988

En base a la observación de una gran variedad de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere que el tiempo de recesión, T_R , puede aproximarse a $1.67T_p$.

Debido a que el área bajo el hidrograma unitario debe ser igual a la escorrentía directa de 1 cm, puede demostrarse que: (Chow et al, 1988)

$$q_p = \frac{C * A}{T_p} \quad (\text{Ec.4.6})$$

Donde C es igual a 2.08 y A es el área de la cuenca en Km^2 .

Además, el estudio de hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo, t_p , puede ser aproximadamente $0.6T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. Como se observa en la Figura 4.7b el tiempo de ocurrencia del pico, T_p , puede ser expresado en términos del tiempo de retardo, t_p , y la duración efectiva de la lluvia, t_r .

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (\text{Ec.4.7})$$

Cuando se dispone de un hidrograma unitario para un exceso de lluvia dado, pueden deducirse los hidrogramas unitarios para otras duraciones, esto puede ser calculado fácilmente aplicando los principios de superposición y proporcionalidad.

4.2.1.3 Tiempo de Concentración

Se define como el tiempo mínimo requerido para que todos los puntos de una cuenca estén aportando escorrentía de forma simultánea al punto de salida. Está determinado por el tiempo que demora en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado.

En la literatura existen diversas expresiones, propuestas por diversos autores, para el cálculo del tiempo de concentración, tales como: Kirpich, California Culverts Practice, Izzard, Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley, Ecuación de retardo SCS, etc. En la presente investigación se utilizará el método del SCS, que es aplicable a cuencas medianas.

Ecuación de retardo SCS, 1973

Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 8 km². Se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra pavimentada; en áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación, se pueden aplicar factores de ajuste (USACE, 2000).

$$t_c = \frac{0.0136 * L^{0.8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (\text{Ec.4.12})$$

Donde CN es el número de curva SCS.

4.2.1.4 Tiempo de Retardo

Se define como el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y el caudal pico (ver Figura 4.7). En el capítulo 4.2.1.2 se indica que puede ser expresado como el 60% del tiempo de concentración (Chow et al, 1988).

4.2.1.5 Factor Tasa pico (PRF)

El factor de tasa del pico (PRF, por sus siglas en inglés), es un factor incluido en el modelo hidrológico del hidrograma unitario SCS, que tiene como finalidad modificar la forma del hidrograma manteniendo el volumen total de escorrentía. Se utiliza para ajustar el hidrograma y tener una respuesta más lenta o rápida de la cuenca, lo cual dependerá de sus características, tales como: forma, rugosidad, estructuras internas de drenaje, etc.

El factor de tasa del pico es calculado de la siguiente manera: (USACE, 2000)

$$PRF = q_p * T_p \quad (\text{Ec.4.13})$$

La Figura 4.8 muestra el hidrograma unitario triangular.

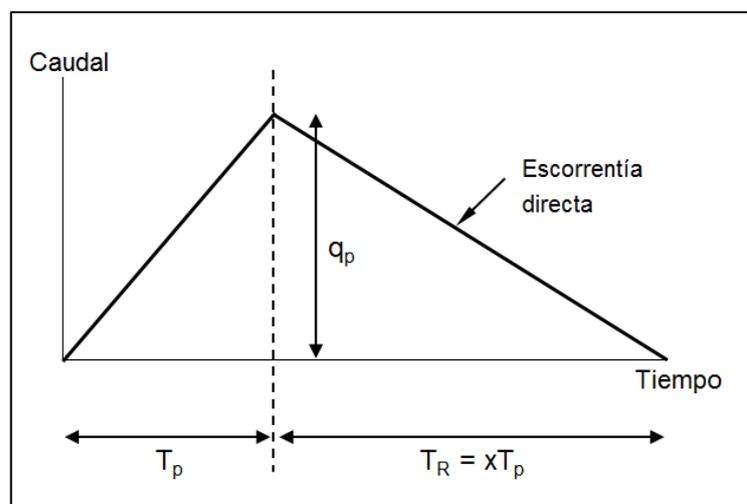


Figura 4.8 Hidrograma Unitario Triangular.
Fuente: Lopes, 2015.

Donde “x” es el factor que se aplica al tiempo de ocurrencia del caudal pico, para representar el tiempo de recesión.

La Tabla 4.6 muestra los valores sugeridos de PRF y “x” para diferentes tipos de cuencas.

Tabla 4.6: Valores Sugeridos del PRF y “x”

Cuenca	PRF (pies ³)	x
Urbana	575	1.25
SCS	484	1.67
Urbano/rural	400	2.25
Rural con alta pendiente	300	3.33
Rural con media pendiente	200	5.5
Rural con baja pendiente	100	12.0

Fuente: Lopes, 2015.

La aplicación de un PRF menor, extenderá el tiempo de retardo, produciendo que se reduzca el caudal pico. Por otro lado, un PRF mayor, genera un caudal pico mayor debido a que el tiempo de recesión se acorta (ver Figura 4.8). Se considera un rango de valores para el factor PRF, desde 100 hasta 600. Sin embargo, el modelo SCS utiliza por defecto el factor PRF de 484, que fue desarrollado en 4 pequeñas cuencas hidrográficas en la región de Delmarva, en Estados Unidos. (NRCS, 2007)

La Figura 4.9, muestra la variación del hidrograma según el PRF.

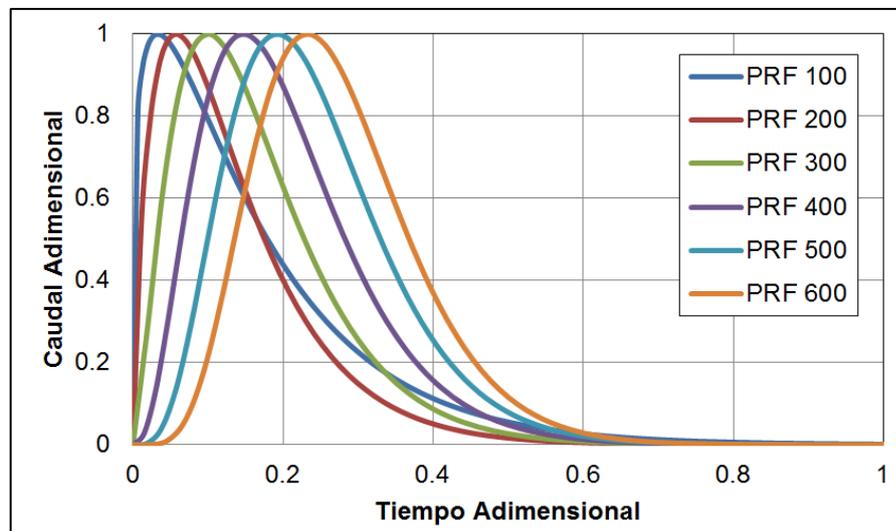


Figura 4.9 Comparación Hidrogramas Unitarios, PRF.
 Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 Modelo Conceptual TETIS

El modelo TETIS considera a la producción de la escorrentía como el resultado de un balance hídrico, en el cual el agua se distribuye entre seis tanques de almacenamiento conceptual y conectados entre sí (más un séptimo tanque de cauces). La Figura 4.10 muestra el diagrama de flujo del modelo considerado en estos tanques.

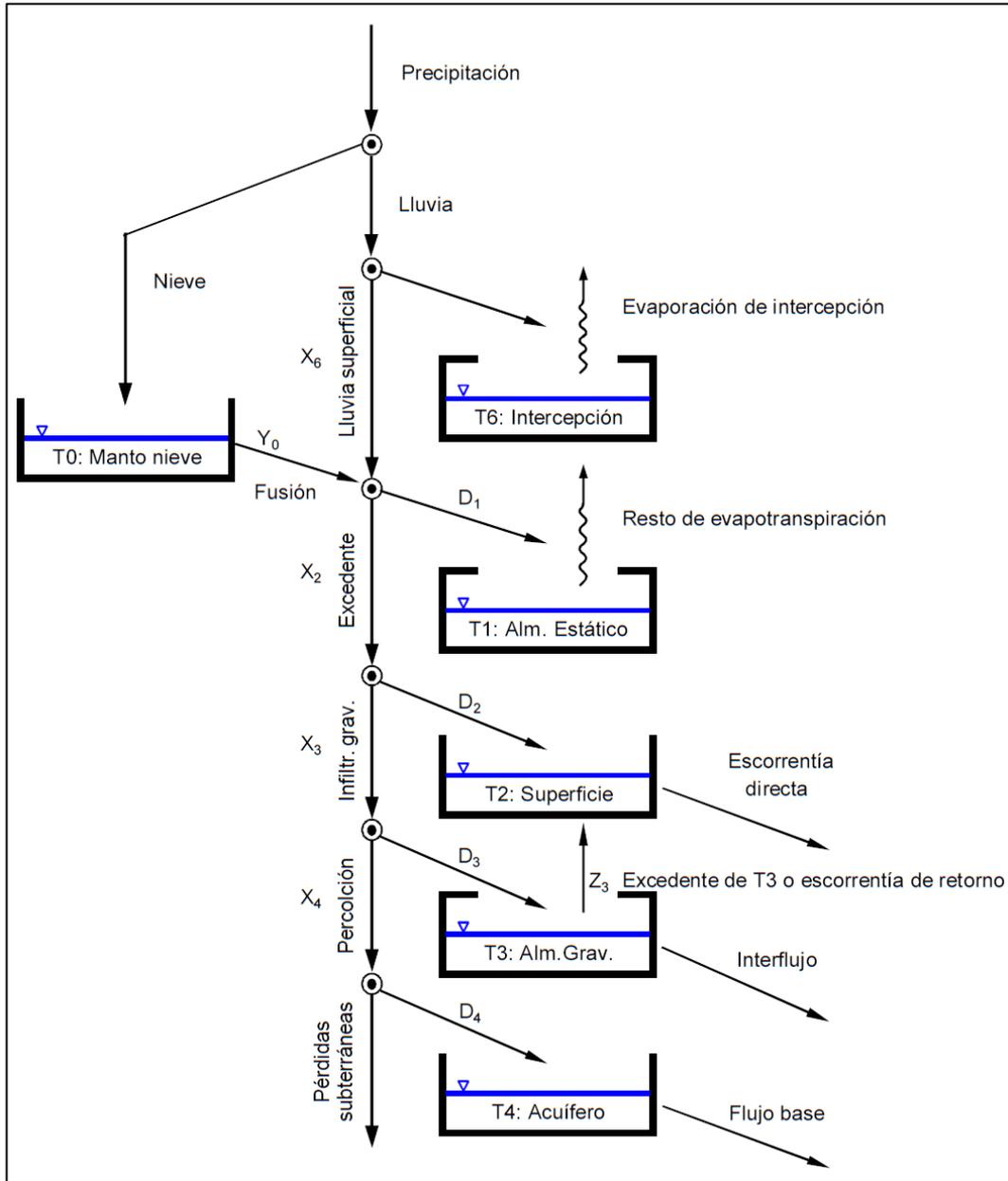


Figura 4.10 Esquema Conceptual de Tanques de Almacenamiento TETIS.
 Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

El flujo de agua que es transferido entre los tanques está en función al agua almacenada en ellos; por lo cual, se denominan variables de estado a los

volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado está relacionada al esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas e hidrológicas del suelo.

4.2.2.1 Tanque de Intercepción

El primer tanque de almacenamiento (T6 Intercepción), representa el agua interceptada por la cobertura vegetal durante una lluvia y que solo puede salir de ella por evaporación directa desde la vegetación; por lo tanto, no forma parte de la escorrentía. La Figura 4.11 muestra el detalle de este tanque.

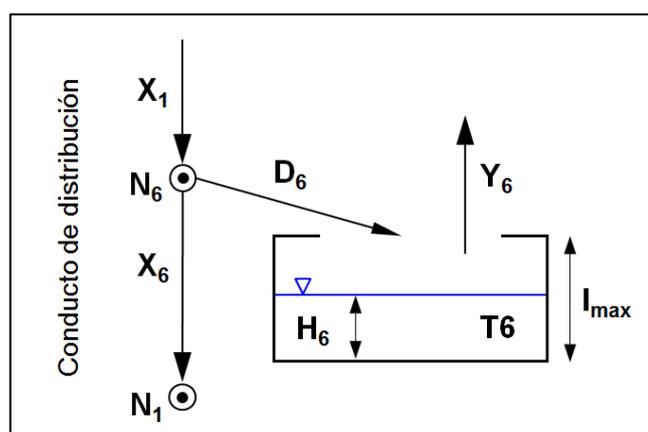


Figura 4.11 Esquema del Tanque de Intercepción.
Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

La precipitación, X_1 , entra al primer nodo del conducto distribuidor N_6 de donde se deriva una cantidad D_6 para el tanque de intercepción, T6, que tiene una capacidad máxima determinada de las características de la vegetación, I_{max} .

La cantidad de agua restante se denomina lluvia superficial, X_6 , y depende del contenido de humedad sobre la superficie de las hojas (cantidad de agua almacenada en el tanque, H_6), de las características de la cubierta vegetal (I_{max}) y de la cantidad de lluvia X_1 . El modelo TETIS emplea la siguiente relación:

$$X_6 = \text{Max}[0, X_1 - \lambda_v * I_{max} + H_6] \quad (\text{Ec.4.14})$$

Donde, λ_v es el factor de vegetación del suelo.

Otro factor que tiene influencia en este tanque es la evaporación directa, Y_6 , que se calcula mediante la formulación:

$$Y_6 = \text{Min}[ETP * \lambda_v(t) * FC_2, H_6] \quad (\text{Ec.4.15})$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial y FC_2 es un factor corrector cercano a uno. Luego, se debe actualizar la cantidad de agua H_6 dentro del tanque T6:

$$H_6 = H_6 - Y_6 \quad (\text{Ec.4.16})$$

Mientras no se llena el tanque de intercepción, no existirá flujo hacia los demás tanques, esto ocurre en la realidad con las lluvias menores.

4.2.2.2 Tanque de Almacenamiento Estático y Pérdidas por Evapotranspiración

El tanque de almacenamiento estático T1 representa el agua que transita por la cuenca, y que sólo sale de ella por evapotranspiración y por tanto no forma parte de la escorrentía. Esto incluye la detención del agua en charcos y la retención en el suelo. La Figura 4.12 muestra el detalle de este tanque.

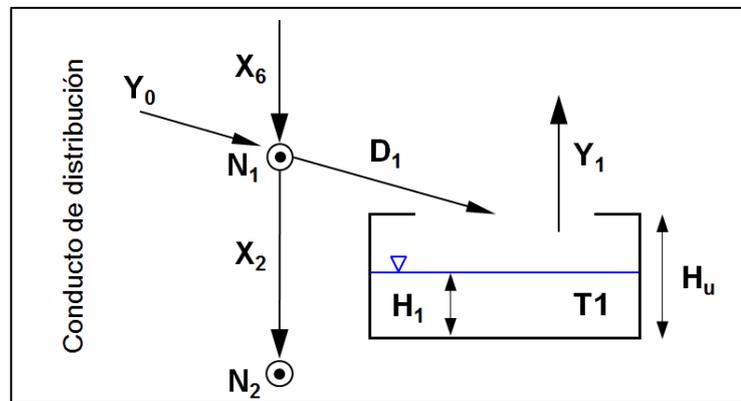


Figura 4.12 Esquema del Tanque de Almacenamiento Estático.
Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

La lluvia superficial X_6 entra al conducto distribuidor N_1 , a partir del cual se deriva una cantidad D_1 para el tanque de almacenamiento estático, T1, que tiene una capacidad máxima, H_u .

La cantidad de agua que ingresa a este tanque no puede ser superior al espacio disponible en el almacenamiento estático del suelo. El modelo TETIS emplea la siguiente relación:

$$D_1 = \min \left\{ (X_6 + Y_0) * \left(1 - \frac{H_1}{H_u * FC_1} \right)^{p_1} ; H_u * FC_1 - H_1 \right\} \quad (\text{Ec.4.17})$$

Donde Y_0 representa el agua que aporta la fusión de la nieve, H_1 es el contenido inicial de agua del tanque T1, H_u representa la capacidad máxima del tanque T1 y p_1 un exponente que indica cuándo se presenta un excedente X_2 .

El factor corrector FC_1 , que multiplica al tanque de almacenamiento estático, tiene una relación inversa con el volumen del hidrograma de salida.

La cantidad de agua que es derivada desde el conducto distribuidor N_1 y que no ha ingresado al almacenamiento estático, X_2 , es calculada en TETIS mediante la siguiente expresión:

$$X_2 = \text{Max}[0, X_6 + Y_0 - D_1] \quad (\text{Ec.4.18})$$

Durante la ocurrencia de una tormenta de corta duración, se puede despreciar el efecto de la evapotranspiración.

Según el planteamiento del modelo, solamente cuando se completa la capacidad del almacenamiento estático, el flujo restante generará escorrentía para que siga su recorrido por el conducto de distribución.

4.2.2.3 Tanque de Almacenamiento Superficial y de Escorrentía Directa

Este tanque representa la cantidad agua que se encuentra en la superficie y puede moverse por la superficie de las laderas de la cuenca (escorrentía directa) o infiltrarse en el suelo.

En la Figura 4.13 se muestra el tanque de almacenamiento del flujo superficial T2, donde existe una derivación D_2 desde el nodo N_2 hacia el tanque de almacenamiento del flujo superficial en la ladera T2, que ocurre cuando la intensidad de la tormenta ha excedido la capacidad de infiltración del suelo, (Horton, 1933). Por otro lado, se observa un flujo Z_3 que ingresa al tanque T2, proveniente del exceso de la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional T3, que ocurre producto del retorno del agua infiltrada en el subsuelo (Dunne et al., 1975).

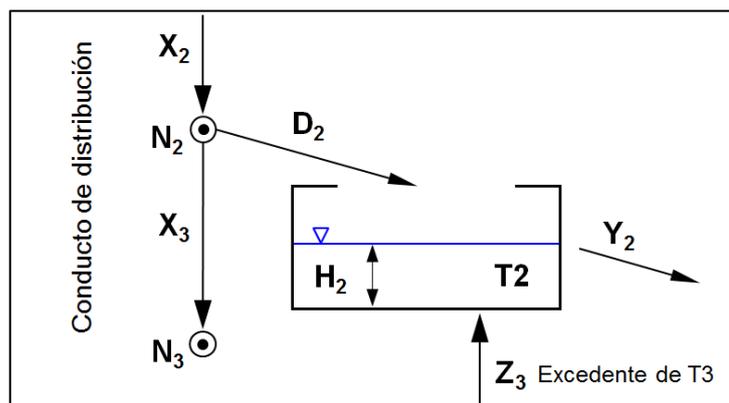


Figura 4.13 Esquema del Tanque de Almacenamiento Superficial.
 Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

La cantidad de agua que continúa por el conducto distribuidor X_3 , está determinado por el agua que puede pasar a través del suelo con una humedad

superior a la capacidad de campo K_s , en un intervalo de tiempo Δt y teniendo un flujo excedente del almacenamiento estático X_2 ; se calcula como:

$$X_3 = \text{Min}[X_2, \Delta t * k_s * FC_3] \quad (\text{Ec.4.19})$$

Donde FC_3 es un factor corrector que se aplica por el efecto de escala espacial y temporal, tiene valores alrededor de 0.2. Para un factor corrector mayor, genera una mayor infiltración de flujo hacia los estratos inferiores del suelo, en consecuencia, se reduce el volumen del hidrograma de caudal de salida.

En el nodo N_2 se tiene que la cantidad de agua que se deriva al tanque T2 es:

$$D_2 = X_2 - X_3 \quad (\text{Ec.4.20})$$

El flujo superficial es representado en un canal equivalente, donde toda la escorrentía fluye a través de él. Las características de este canal estarán en función de la morfología y cobertura de la ladera, se aplica la ecuación de la continuidad y se determina el coeficiente de descarga α (Francés, 2014):

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{v_t * FC_4 * \Delta t + \Delta x} \quad (\text{Ec.4.21})$$

El coeficiente de descarga puede adoptar valores entre 0 y 1, aumentando conforme aumenta la pendiente de la cuenca.

La velocidad del flujo está en función a la pendiente S_0 . Puede ser expresada como (Francés, 2014):

$$v_t = 1.4142 * S_0^{0.5} \quad (\text{Ec.4.22})$$

El valor de 1.4142 corresponde a una estimación previa realizada para que el rango de velocidades se encuentre entre 1 y 0.01 m/s para un amplio rango de pendientes.

Para la estimación del flujo que escurre por la ladera, el modelo TETIS emplea la siguiente expresión:

$$Y_2 = H_2 * \alpha \quad (\text{Ec.4.23})$$

El valor del factor corrector FC_4 es bastante variable, pero puede decirse que debe encontrarse entre 0.01 y 10.0. Un aumento en el factor corrector FC_4 implica un aumento del volumen del hidrograma.

4.2.2.4 Tanque de Almacenamiento Gravitacional y de Interflujo

Este tanque contiene el agua gravitacional almacenada en la capa superior del suelo. La Figura 4.14 muestra el flujo que ingresa al nodo N_3 donde parte de este volumen percola al nivel inferior, X_4 , mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior de suelo, T3, a partir del cual se produce el interflujo en la ladera, Y_3 , adicionalmente puede volver a la superficie como escorrentía de retorno, Z_3 , cuando la capacidad máxima H_{3_Max} del almacenamiento gravitacional ha sido superada.

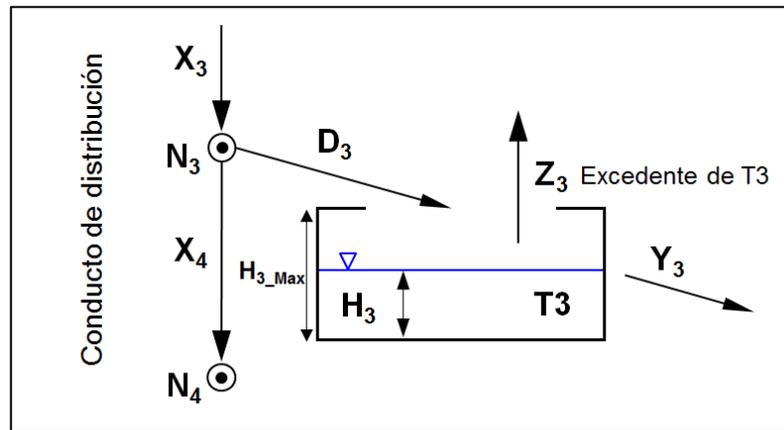


Figura 4.14 Esquema del Tanque de Almacenamiento Gravitacional.
Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

La cantidad de agua que percola hacia la zona inferior del suelo puede ser asociada al flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera X_3 y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo en condiciones de saturación, conocida como capacidad de percolación k_p .

$$X_4 = \text{Min}[X_3, \Delta t * k_p * FC_5] \quad (\text{Ec.4.24})$$

Siendo FC_5 un factor corrector debido a los efectos de escala espacial y temporal; el aumento de este valor implica una mayor percolación y por lo tanto, se tendrá una disminución del volumen del hidrograma de salida.

La cantidad de agua que se deriva al tanque gravitacional, D_3 , depende de la cantidad de agua que puede percolar hacia el nivel inferior X_4 , y de acuerdo con la ecuación de continuidad, puede ser expresada como:

$$D_3 = X_3 - X_4 \quad (\text{Ec.4.25})$$

Se procede a actualizar el estado del almacenamiento T3 mediante la expresión:

$$H_3 = \text{min}(H_3 + X_3 - X_4, H_{3_Max}) \quad (\text{Ec.4.26})$$

Cuando se supera la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional se produce un excedente Z_3 .

La escorrentía subsuperficial en la ladera se calcula mediante una formulación similar a lo presentado en el almacenamiento T_2 . El coeficiente de descarga α se calcula mediante la siguiente relación:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{FC_6 * k_{ss} * \Delta t + \Delta x} \quad (\text{Ec.4.27})$$

Donde FC_6 es un factor corrector de la conductividad horizontal saturada k_{ss} . Un factor corrector FC_6 muy alto, hace que el coeficiente α sea cercano a uno y por lo tanto la tasa de salida, Y_3 , sea muy alta; es decir, se genera un mayor hidrograma.

El modelo TETIS utiliza la siguiente expresión para estimar la cantidad del flujo que escurre sub-superficialmente:

$$Y_3 = H_3 * \alpha \quad (\text{Ec.4.28})$$

Se observa que este valor depende de la cantidad almacenada en el tanque, H_3 .

4.2.2.5 Tanque de Almacenamiento Subterráneo y el Flujo Base

Este tanque representa al acuífero. Las salidas corresponden a las pérdidas subterráneas y el flujo base de los cauces. Se ha considerado el tanque T_4 que representa el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior del suelo hacia la red de drenaje, que se podría considerar como el acuífero, y luego sale para formar el flujo base.

La Figura 4.15 muestra que el tanque T_4 recibe agua del conducto de distribución en el nodo N_4 . Donde tiene la posibilidad de que parte del agua siga hacia las pérdidas subterráneas X_5 y que el resto D_4 sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T_4 .

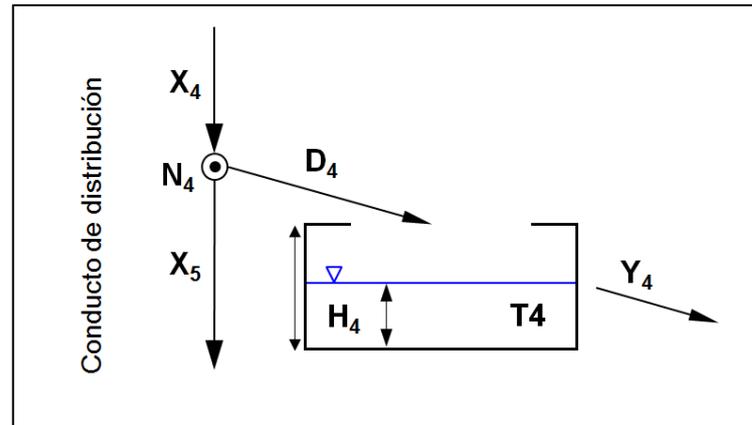


Figura 4.15 Esquema del Tanque de Almacenamiento Subterráneo.
Fuente: Manual Modelo Conceptual TETIS, 2014.

Para las pérdidas subterráneas el modelo TETIS emplea la siguiente expresión:

$$X_5 = \min(X_4, \Delta t * k_{ps} * FC_7) \quad (\text{Ec.4.29})$$

En donde k_{ps} es la velocidad de percolación en la zona profunda del suelo. En el análisis de tormentas, llega a tener valores muy pequeños, para lo cual se puede ajustar el factor corrector FC_7 a cero y así la totalidad del agua pasa al almacenamiento subterráneo.

De acuerdo con la ecuación de continuidad, se tiene:

$$D_4 = X_4 \quad (\text{Ec.4.30})$$

Del mismo modo que en los almacenamientos anteriores y siendo FC_8 un factor corrector, el modelo TETIS emplea la siguiente relación para estimar las salidas del almacenamiento subterráneo:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{FC_8 * k_{sa} * \Delta t + \Delta x} \quad (\text{Ec.4.31})$$

En donde k_{sa} corresponde a la conductividad hidráulica horizontal saturada del substrato.

Un valor del factor corrector FC_8 muy alto implica que el coeficiente α sea cercano a uno y por lo tanto la tasa de salida Y_4 sea muy alta; es decir, un hidrograma de mayor volumen.

La relación para el flujo de salida de este nivel es:

$$Y_4 = H_4 * \alpha \quad (\text{Ec.4.32})$$

Finalmente se realiza la sumatoria de todas las salidas de los tanques de almacenamiento hacia la escorrentía para calcular, posteriormente, la traslación del flujo.

4.2.2.6 Tránsito de la Onda

El tránsito de la onda se realiza a través de la red de drenaje natural de la cuenca. El modelo empleado en TETIS es la onda cinemática.

La forma de la sección del cauce puede obtenerse a partir de las relaciones de geometría hidráulica propuestas por Leopold y Madock (1953), quienes relacionan la profundidad, y , el ancho, w , y la velocidad, v , con el caudal en el cauce, Q :

$$y = b * Q^\beta, \quad w = c * Q^\varepsilon, \quad v = p * Q^\lambda \quad (\text{Ec.4.33})$$

Donde b , c , p , β , ε y λ son constantes regionales. De la ecuación de continuidad y la homogeneidad dimensional se tiene $b * c * p = 1$ y $\beta + \varepsilon + \lambda = 1$.

Según Leopold, Wilman y Miller (1964) para una determinada zona geográfica homogénea, existe una relación entre el caudal a sección llena, Q_b , y el área de una cuenca, A :

$$Q_b = \kappa * A^\varphi \quad (\text{Ec.4.34})$$

Donde κ y φ con constantes de validez regional.

Reemplazando las ecuaciones 4.33 y 4.34 se puede determinar la expresión general para la rugosidad, n , en el modelo TETIS (Francés, 2014).

$$n = C_n * C_d^\xi * y^{\xi\theta} * s^{\xi\theta} \quad (\text{Ec.4.35})$$

Donde C_n y C_d son coeficientes, ξ y θ exponentes, y profundidad y s pendiente.

Aplicando la ecuación de Manning se tiene la expresión (Francés, 2014)

$$v_t = K_a * A_t^{\varpi_1} * A^{\varpi_2} * s_0^{\varpi_3} \quad (\text{Ec.4.36})$$

Donde K_a es un coeficiente, ϖ_1 , ϖ_2 y ϖ_3 son exponentes, A_t el área de la sección del cauce, A área de cuenca de aporte y s_0 la pendiente del cauce.

La simplificación de la onda cinemática supone que la pendiente de la línea de energía es igual a la pendiente del terreno. Es decir, que la velocidad y la profundidad del flujo se relacionan mediante una expresión de flujo uniforme como la ecuación de Manning.

Reemplazando la expresión de velocidad indicada en la ecuación 4.36 y aplicándola en la Ecuación de continuidad, ecuación 2.7, se determina la velocidad, v_t , y el caudal, Q_t , mediante la expresión (Francés, 2014):

$$v_t = A_t^{eas} * B, \quad Q_t = A_t^{eas+1} * B, \quad (\text{Ec.4.37})$$

Donde eas es el exponente, y B es la expresión $K_a * \Lambda^{\omega 2} * s^{\omega 3}$ y dependen de las características geomorfológicas de la cuenca.

El factor corrector FC_g , empleado en TETIS multiplica directamente la velocidad de la onda. Este valor no afecta al volumen del hidrograma, pero si el caudal debido al cambio de la velocidad del flujo.

Los diferentes coeficientes y exponentes indicados en la metodología del modelo TETIS, incluidos de forma predeterminada en su modelamiento, han sido determinados en función a los estudios desarrollados por Leopold y Madock (1953) en cuencas de los Estados Unidos. En la presente investigación, se utilizan como parámetros de ingreso la capacidad de todos los tanques de almacenamiento. Por otro lado, para la calibración del modelo se hace uso de los factores de corrección FC, para cada uno de los tanques, los cuales ajustan la capacidad de almacenamiento y de movimiento del agua. Además, se reduce la incertidumbre de utilizar los coeficientes y exponentes presentados por Leopold y Madock (1953).

4.2.3 Modelo de Discretización Hidrológica Desacoplada (DHD)

4.2.3.1 Introducción

El modelo hidrodinámico DHD resuelve las ecuaciones de aguas someras, también conocidas como 2D Ecuaciones de Aguas Superficiales (2D-SWE, por sus siglas en inglés) o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. Estas condiciones se cumplen razonablemente en flujos en ríos y escorrentía de las laderas de las cuencas.

En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables, y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes.

4.2.3.2 Ecuaciones Hidrodinámicas

En el modelo hidrodinámico DHD se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y del momento en las dos direcciones horizontales, incluyendo los términos del componente hidrológico de precipitación y pérdidas (Manual de Referencia Hidráulico IBER, 2014):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial hU_x}{\partial t} + \frac{\partial hU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial hU_y}{\partial t} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial x} + \frac{\partial hU_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

(Ec. 4.38)

Donde h es la profundidad de agua, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_b es la elevación de la superficie de agua, τ_b es la fricción del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de la rotación de la tierra, λ es la latitud, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, M_s , M_x , M_y son los terminamos de entrada/salida de masa y de momento, esto permite ingresar al modelo IBER2D la precipitación, infiltración y sumideros.

Los términos de fuente que se incluye en las ecuaciones hidrodinámicas son: presión hidrostática, pendiente del fondo, tensiones tangenciales viscosas y turbulentas, rozamiento del fondo, rozamiento superficial por viento, precipitación e infiltración.

Los esquemas numéricos que generalmente son utilizados para resolver las ecuaciones de Saint Venant 2D son los elementos o diferencias finitas. Sin embargo, se ha observado que estas metodologías presentan inestabilidad numérica cuando se calcula un flujo en un régimen rápidamente variado (Bladé, 2015); motivo por el cual, se ha desarrollado un esquema de alta resolución basado en la técnica de volúmenes finitos, que es capaz de resolver las ecuaciones sin generar estos inconvenientes y en un menor tiempo.

En líneas generales, el método de volúmenes finitos consiste en dividir el dominio de cálculo en un número finito de volúmenes de control no solapados, de forma que cada nodo de la malla esté rodeado por uno de estos volúmenes de control. La ecuación diferencial se integra sobre cada volumen de control. Para expresar

la variación de la variable dependiente en las caras de los volúmenes de control y resolver las integrales, se elige una función local lineal. El resultado de la integración es la ecuación discretizada son los valores de la solución de las ecuaciones para los nodos de la malla. La principal ventaja de este método con respecto al de diferencias finitas se basa en que la solución obtenida asegura implícitamente que magnitudes como la masa, cantidad de movimiento y energía se conservan para cualquier grupo de volúmenes de control.

En el método de los elementos finitos la variación supuesta para la variable dependiente se toma como la solución aproximada, y es calculada por los valores en los nodos y las funciones de interpolación entre estos. El método de diferencias finitas considera como solución tan sólo los valores de la variable dependiente en los nodos de la malla, sin hacer referencia a los valores de esta variable entre los distintos nodos. El método de volúmenes finitos también adopta este enfoque pero utiliza las fórmulas de interpolación sólo como funciones auxiliares necesarias para evaluar las integrales aparecidas en su formulación.

En una discretización espacial con volúmenes finitos, el espacio se divide en polígonos, donde cada elemento tendrá contornos definidos por sus vértices, en los cuales se resuelven las ecuaciones, y a su vez se encuentran conectados por sus lados. Para resolver las ecuaciones hidrodinámicas por el método de volúmenes finitos, es necesario realizar una discretización espacial del dominio de estudio a elementos de menor tamaño, a este conjunto se conoce como malla. El modelo IBER2D trabaja con mallas no estructuradas formada por elementos de 3 y/o 4 lados, debido a que una malla de estas características se adapta a cualquier geometría sin necesidad de tener una organización o estructura interna.

4.2.3.3 Fricción de Fondo

La fricción del fondo tiene dos efectos en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Estos dos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de corte u_f , que implica expresar la tensión tangencial de fondo con las unidades de velocidad:

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (\text{Ec.4.39})$$

Donde τ_b es el módulo del esfuerzo de corte de fondo, y ρ la densidad del agua.

Debido a que la velocidad es promediada en profundidad; no se puede calcular la velocidad de corte por medio de funciones de tipo pared estándar, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical. Por lo tanto, es necesario relacionar la velocidad de corte u_f con la velocidad media promediada en profundidad a través de un coeficiente de fricción. La fricción del fondo se expresa como:

$$\tau_b = \rho u_f^2 = \rho C_f |U|^2 \quad (\text{Ec.4.40})$$

En donde C_f es el coeficiente de corte de fondo. Existen diversas expresiones que permiten aproximar el valor del coeficiente de corte C_f . En su mayoría se asume un flujo uniforme con un perfil logarítmico de velocidad en profundidad.

En los modelos bidimensionales, el radio hidráulico deja de definirse como el área de la sección mojada entre el perímetro mojado, ya que no tiene sentido definir una sección transversal debido a que el flujo se desplaza en ambas direcciones. Considerando una columna de fluido de ancho Δx y profundidad h , el radio hidráulico se calcularía como:

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h\Delta x}{\Delta x} = h \quad (\text{Ec.4.41})$$

Por tanto, en los modelos bidimensionales el radio hidráulico será igual a la profundidad de agua.

La fricción de fondo puede ser calculado mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de rugosidad de Manning n como parámetro. El coeficiente de fricción es calculado a partir de la rugosidad.

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (\text{Ec.4.42})$$

4.2.3.4 Esfuerzos Efectivos

Los esfuerzos efectivos horizontales que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas incluyen los efectos de los esfuerzos viscosos, turbulentos y los términos de dispersión debido a la no homogeneidad en profundidad del perfil de velocidad y está definido como: (Manual de referencia hidráulico Iber, 2014)

$$\tau_{ij}^e = \tau_{ij}^v - \overline{u_i' u_j'} + D_{ij} \quad (\text{Ec.4.43})$$

Donde τ_{ij}^v son los esfuerzos viscosos, $\overline{u_i' u_j'}$ son los esfuerzos turbulentos o de Reynolds, y D_{ij} la dispersión lateral, que se define:

$$D_{ij} = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_s} (U_i - \bar{u}_i) (U_j - \bar{u}_j) dZ \quad (\text{Ec.4.44})$$

Los esfuerzos viscosos se determinan a partir de la viscosidad cinemática del fluido, mediante la expresión:

$$\tau_{ij}^v = \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Ec.4.45})$$

Por lo general, estos esfuerzos viscosos suelen ser valores significativamente menores respecto a los demás términos de las ecuaciones hidrodinámicas.

Los esfuerzos turbulentos suelen ser mucho mayores a los viscosos, y se presentan generalmente en zonas de recirculación del flujo, que presenta una elevada turbulencia. La mayoría de modelos de turbulencia utilizan el término de difusión turbulenta, mediante la fórmula:

$$-\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{Ec.4.46})$$

Donde ν_t es la viscosidad turbulenta, que se calcula mediante el modelo de turbulencia, IBER2D utiliza el modelo de turbulencia de Boussinesq.

Los términos de dispersión se desprecian debido a la hipótesis del modelo que considera un perfil de velocidad uniforme en profundidad.

4.2.3.5 Condiciones de Contorno Hidrodinámicas

El modelo IBER2D considera dos tipos de contornos: abiertos y cerrados.

4.2.3.5.1 Contornos Cerrados

Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son de tipo impermeables, y no permiten el paso del fluido a través de ellos.

El flujo de escorrentía presenta una superficie de contacto con los contornos laterales mucho menor a la superficie de contacto con el fondo, por lo cual la fuerza de rozamiento en las paredes puede ser despreciada.

4.2.3.5.2 Contornos Abiertos

En los contornos abiertos se pueden colocar diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales se encuentren correctamente planteadas matemáticamente, la cantidad de condiciones a colocar en los contornos abiertos va a depender de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, además del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento).

La Tabla 4.7 muestra el conjunto de condiciones implementadas en IBER2D en los contornos abiertos.

Tabla 4.7: Condiciones de Contorno en Contornos Abiertos

CONTORNO	RÉGIMEN		CONDICIONES
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y profundidad b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico		a) Profundidad
			b) Cota de agua
			c) Vertedero (Cota y coeficiente de descarga)
			d) Curva de gasto
	Subcrítico / Crítico		Ninguna

Fuente: Manual de referencia hidráulico de IBER, 2014.

4.2.3.6 Infiltración

En el análisis de las tormentas es necesario considerar la infiltración de agua en el suelo no saturado, y de esta manera determinar la escorrentía superficial (transformación de lluvia en escorrentía).

La infiltración se ingresa el modelo IBER2D mediante un término fuente negativo en la ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = -i \quad (\text{Ec.4.47})$$

Donde i es la tasa de infiltración real, calculada como el valor mínimo entre la tasa de infiltración potencial f , y la cantidad de agua superficial disponible para infiltrarse.

$$i = \min\left(f, \frac{h}{\Delta t}\right) \quad (\text{Ec.4.48})$$

4.2.3.7 Método de Green-Ampt

El modelo de pérdidas de Green-Ampt, considera que existe un frente saturado que separa la región de suelo saturada, la capa superficial del suelo, y una región no saturada, en la cual existe una succión. Conforme la infiltración se profundiza

en el suelo, el frente saturado desciende y la altura de suelo saturado aumenta. La tasa de infiltración potencial se calcula mediante la expresión (Chow et al, 1988):

$$f = k_s \left(1 + \frac{(h + \Psi)\Delta\theta}{L_o\Delta\theta + F} \right) \quad F = \int_0^t f dt \quad L = L_0 + \frac{F}{\Delta\theta} \quad \Delta\theta = \phi - \theta_i \quad (\text{Ec.4.49})$$

Donde k_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo, h es la altura del agua, Ψ es la succión en la región de suelo no saturada, $\Delta\theta$ es el cambio de humedad del suelo a medida que el frente de saturación profundiza, θ_i es el contenido de humedad inicial del suelo, ϕ es la porosidad total del suelo, y L es la altura de la región de suelo saturada.

4.2.3.8 Abstracción Inicial

El modelo de pérdidas de Green-Ampt, además de calcular las pérdidas por infiltración, incluye la posibilidad de considerar una abstracción inicial.

La abstracción inicial representa los procesos de retención superficial de la vegetación, las depresiones del terreno o la capacidad de saturación de suelos altamente porosos. La abstracción inicial está definida como el volumen de agua que se pierde en una determinada área de subcuenca, es decir tiene unidad de longitud. Este valor se subtrae del agua que llega al terreno, ya sea en forma de precipitación o de escorrentía superficial.

En la presente investigación, se ha utilizado el modelo IBER para generar los hidrogramas de caudal generados en la subcuenca Barrios. El dominio del modelo está conformado por una malla no estructurada, la cual se acopla a la superficie topografía. En esta malla se ingresa los mapas de tormentas, parámetros de suelo, pérdidas, rugosidad, etc. En función a las abstracciones iniciales y al modelo de infiltración, se tendrá la precipitación efectiva que será representada como una lámina de agua, la cual fluye por gravedad a través de los cauces de la subcuenca, la metodología explicada en este capítulo muestra las ecuaciones que definirán el movimiento del flujo en el interior de la subcuenca.

4.3 PARÁMETROS DE INGRESO A LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

4.3.1 Modelo Hidrograma Unitario SCS

El modelo hidrológico del hidrograma unitario SCS es un modelo agregado; es decir, los parámetros de ingreso serán el promedio de toda la subcuenca Barrios. Se han determinado estos parámetros en función a la información recopilada de

área del proyecto. Se ha utilizado el software HEC-HMS versión 4.2.1 para calcular el modelo.

La presente investigación pretende comparar los resultados de este modelo hidrológico agregado, respecto a los modelos distribuidos. Por lo cual, se ha considerado evaluar toda el área como una sola cuenca para su modelamiento, y de esta manera obtener resultados del modelo en su forma más elemental, en parte apoyado por ser una cuenca mediana (420 km²). Por este motivo, no se ha subdividido la cuenca en áreas más pequeñas, esta subdivisión se realizará en los modelos hidrológicos distribuidos.

4.3.1.1 Determinación del Número de Curva

Para la determinación del número de curva, se ha utilizado la información geológica para clasificar el grupo hidrológico de suelo, además se ha asignado el número de curva en función al mapa de coberturas y uso de suelo. Se ha asignado los valores indicados en la Tabla 4.5. Según la geología, en la subcuenca Barrios se encuentra el suelo de grupo hidrológico C, estos son las tonalitas, dioritas, volcánico, esquistos, pizarras, cuarcitas, andesita y tobas; y además el grupo B, estos son depósitos aluviales, cuarcitas, lutitas, carbón, conglomerados y arena suelta. Según el mapa de coberturas y de uso de suelos, en el área de estudio se encuentran pastizales, bosques, cultivos, páramos, etc. La Figura 4.16 muestra el valor del número de curva según las áreas determinadas en función a los mapas geológico y de coberturas. La Tabla 4.8 muestra el número de curva asignado.

Tabla 4.8: Asignación de Número de curva

Cobertura y uso de Suelo	Grupo Hidrológico B	Grupo Hidrológico C
Zonas aptas para pastos con calidad agrícola baja	61	74
Zona de bosque húmedo	69	79
Zonas aptas para cultivos permanentes con calidad Agrológica baja	74	-
Zona para protección y conservación ecológica	-	78
Zona de páramos	-	86

Fuente: Elaboración propia.

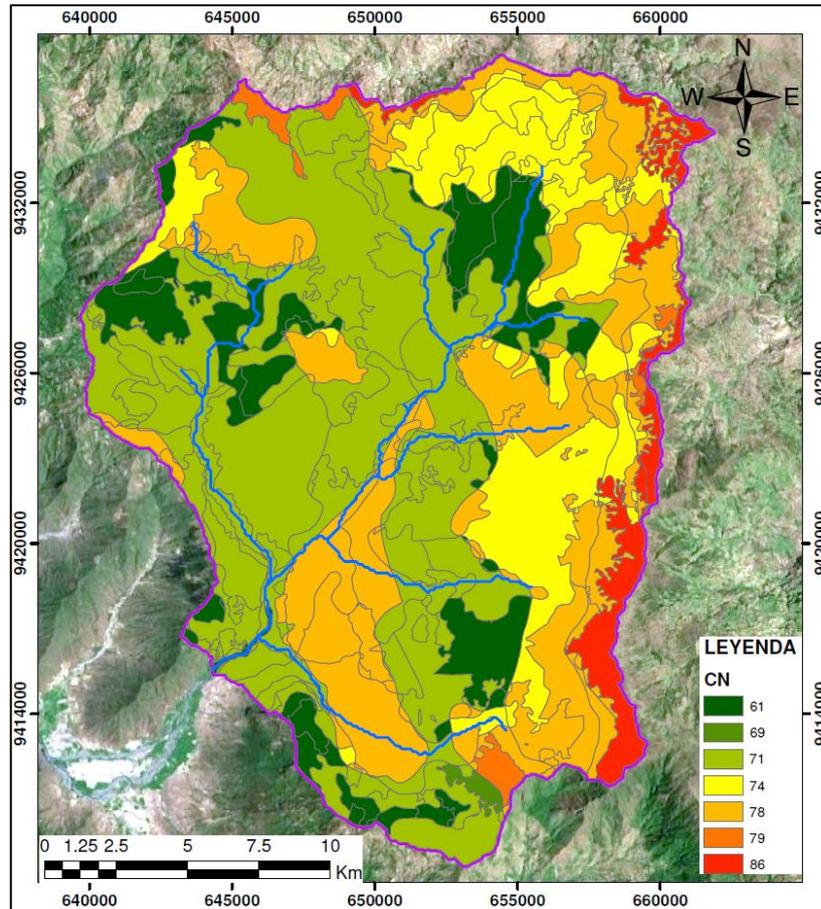


Figura 4.16 Mapa de Número de Curva.

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el modelo hidrológico HEC-HMS es agregado, se calcula el número de curva promedio de toda la subcuenca Barrios, el valor calculado es 72.8 y corresponde a la condición de humedad antecedente tipo II, Para determinar el número de curva para las condiciones de humedad I y III se ha utilizado las Tablas 4.9 y 4.10, y la precipitación acumulada de los 5 días anteriores a la tormenta.

Tabla 4.9: Precipitaciones Antecedentes - Estación Barrios (mm)

Tormenta "n"	n-5	n-4	n-3	n-2	n-1	Total	AMC
13/02/1975	1.7	0	0	0.1	0.1	1.9	I
25/03/1976	2.1	12.8	2.9	12	10.6	40.4	II
18/02/1977	16.2	12.3	5.5	0	19.2	53.2	II
24/04/1977	2.5	0.2	9.9	13	44.4	70	III
01/03/1978	2.4	0.5	0	2.5	0.7	6.1	I
07/03/1979	3.4	0	7.8	47.1	6.9	65.2	III
23/04/1977	0	2.5	0.2	9.9	13	25.6	I

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10: Precipitaciones Antecedentes - Estación Canchaque (mm)

Tormenta "n"	n-5	n-4	n-3	n-2	n-1	Total	AMC
13/02/1975	4.8	0	0.2	2.1	2.8	9.9	I
25/03/1976	10.8	16.7	7.8	17.3	16.3	68.9	III
18/02/1977	21.2	0	4.8	0	9.1	35.1	I
24/04/1977	7.1	2.9	19.5	19	54.3	102.8	III
01/03/1978	0.1	0	14.1	0	0	14.2	I
07/03/1979	6.9	1.3	9.9	28.1	13.4	59.6	III
23/04/1977	0	7.1	2.9	19.5	19	48.5	II

Fuente: Elaboración propia

El número de curva calculado para una condición de humedad antecedente I, es decir condiciones secas, es de 53; mientras que para una condición de humedad antecedente III, es decir condiciones húmedas, es 86.

4.3.2 Tiempo de Concentración

Se ha determinado el tiempo de concentración en función a las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 4.4.1.3. La Tabla 4.11 muestra los valores obtenidos para tiempo de concentración y de retardo.

Tabla 4.11: Tiempo de Concentración y Retardo (min)

Autor	Tiempo de Concentración	Tiempo de Retardo
Ecuación de retardo SCS (AMC I)	816	490
Ecuación de retardo SCS (AMC II)	487	292
Ecuación de retardo SCS (AMC III)	323	194

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Modelo Conceptual TETIS

El modelo hidrológico de Tanques de Almacenamiento TETIS, es un modelo distribuido, es decir los parámetros de ingreso serán ingresados en cada elemento de área de la subcuenca Barrios, el modelamiento considera una grilla de 50 m. Se han determinado estos parámetros en función a la información recopilada de área del proyecto.

4.3.3.1 Modelo Digital de Elevaciones

La información topográfica utilizada para determinar el modelo digital de elevaciones (MDE) está indicada en el Capítulo 4.3.1. Delimitada dentro de la

subcuenca Barrios, la elevación mínima es de 302 m.s.n.m. y máxima es 3 578 m.s.n.m. La Figura 4.17 muestra el MDE utilizado en el modelo hidrológico TETIS.

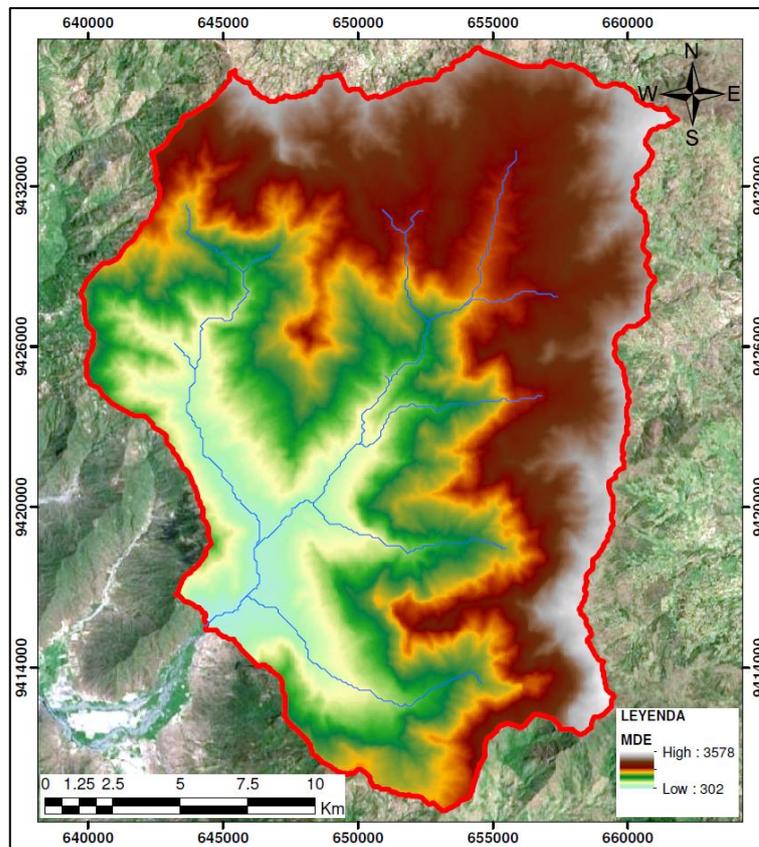


Figura 4.17 Modelo Digital de Elevaciones.
Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2 Mapa de Pendientes

El Mapa de Pendientes es determinado a partir del MDE, este mapa muestra la diferencia del gradiente entre dos formas de relieve; es decir, es una relación de la altitud entre dos puntos y su distancia horizontal. Presenta valores desde 0 hasta 2.59. La Figura 4.18a muestra el Mapa de Pendientes ingresado en el modelo hidrológico TETIS.

4.3.3.3 Mapa de Direcciones de Flujo

El Mapa de Direcciones de flujo es determinado a partir del MDE, la dirección del flujo está determinada por la dirección de descenso más empinada, o la caída máxima, desde cada celda. Cuando se encuentra la dirección se codifica con un valor que representa esa dirección. Existen 8 direcciones de salida válidas que se relacionan con las 8 celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. La Figura 4.19 muestra el modelo de flujo de ocho direcciones. (Jenson y Domingue, 1998)

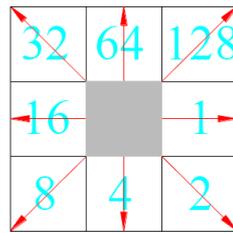


Figura 4.19 Modelo de Flujo de 8 Direcciones.
Fuente: Manual de Usuario, Programa TETIS, 2019.

La Figura 4.18b muestra el Mapa de Direcciones de flujo ingresado en el modelo hidrológico TETIS.

4.3.3.4 Mapa de Celdas Acumuladas

El Mapa de Celdas Acumuladas es determinado a partir del Mapa de Direcciones de Flujo y representa el flujo acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendiente. Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar los cauces de las subcuencas; mientras que las celdas con una acumulación de flujo igual a cero son alturas topográficas locales y se utilizan para determinar las crestas.

La Figura 4.18c muestra el Mapa de Celdas Acumuladas ingresado en el modelo hidrológico TETIS.

4.3.3.5 Almacenamiento Estático

El Mapa de Almacenamiento Estático del suelo, H_u , es el mapa más importante en el funcionamiento del modelo TETIS, en él se basa la articulación del primero de sus tanques, que representa el recorrido del agua dentro de la cuenca y que solo sale en forma de evaporación y se calcula en función a 4 variables previas:

$$H_u = Alm. Sup. + AWC_TOP * \min(Prof. Raíces; ROO) \quad (Ec.4.50)$$

Dónde:

Alm. Sup. es el almacenamiento en charcos (mm)

AWC_TOP es el contenido óptimo de agua disponible en el suelo (mm/m)

Prof. Raíces es la profundidad de raíces, dependiente del tipo de cobertura (m)

ROO es la profundidad del suelo antes de encontrarse con algún obstáculo (m)

El almacenamiento en charcos depende de la pendiente del terreno y puede calcularse mediante la expresión (GIMHA, 2014):

$$A_{charcos} = 10 - 130 * i \quad i < 0.075 \quad (Ec.4.51)$$

Donde i es la pendiente del terreno en m/m. Para pendientes mayores a 7%, se considera que toda el agua puede escurrir y por tanto no existiría almacenamiento.

El contenido óptimo de agua disponible en el suelo es el agua potencialmente aprovechable por las plantas y cultivos. El contenido de agua disponible en el suelo es la diferencia de capacidad de campo, CC, y punto de marchitez, PMP, (Petillo, Puppo, Hayashi, Et Morales, 2012), debido a que estas cantidades se encuentran en porcentaje de volumen, %, debe ser multiplicado por 10, para obtener la unidad de mm/m

$$AWT_{TOP} = (CC - PMP) * 10 \quad (\text{Ec.4.52})$$

Los valores de capacidad y punto de marchitez han sido determinados a partir de la textura del suelo, los porcentajes de arena y arcilla, y el contenido de materia orgánica, mostrados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5, y haciendo uso del software “Soil Water Characteristics” desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (USDA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos de la Universidad de Washington. La Figura 4.20 muestra la plataforma utilizada en este software para la determinación de los parámetros del suelo.

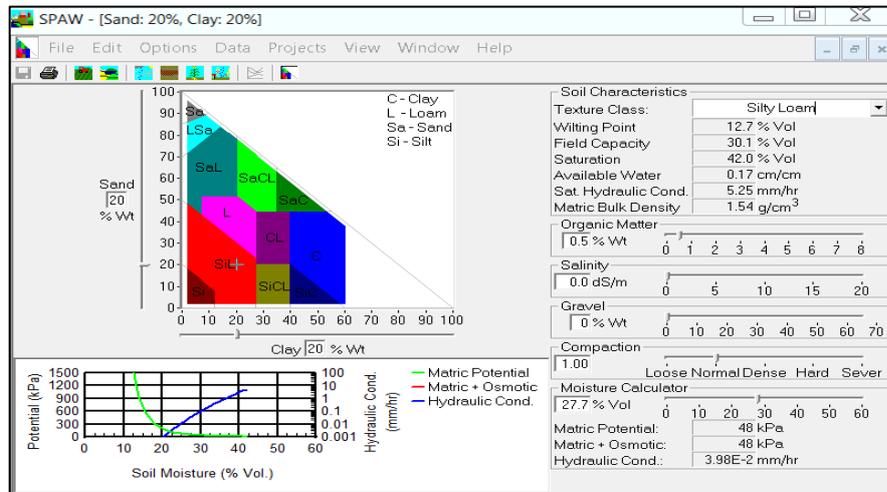


Figura 4.20 Software “Soil Water Characteristics”
Fuente: Washington State University

La Tabla 4.12 muestra los parámetros para diferentes texturas de suelo.

Tabla 4.12: Parámetros del Suelo (%)

Textura	PMP	CC
Arcilla	29.7	42.2

Textura	PMP	CC
Franco Arcilloso	20.6	33.9
Franco	11.3	24.4
Arena arcillosa	3.5	9.2
Arena	2.7	6.6
Arcilla arenosa	25.3	36.2
Franco arcilla arenosa	17	26.4
Franco arenoso	6.3	15.1
Limo	5	28.8
Arcilla limosa	27.7	42
Franco arcilla limosa	20.5	37.2
Franco Limoso	12.7	30.1

Fuente: Washington State University

La profundidad de las raíces depende del tipo de cobertura presente. La Tabla 4.13 muestra valores típicos de profundidad de raíces para diferentes tipos de coberturas.

Tabla 4.13: Profundidad de Raíces (m)

Categoría	Raíces
Tejido urbano continuo	0.06
Zonas industriales o comerciales	0.06
Instalaciones recreativas	0.1
Tubérculos	0.55
Cultivos confinados	0.7
Pastos limpios	0.6
Mosaicos de pastos y cultivos	0.6
Mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales	0.6
Mosaico de pastos con especies naturales	0.6
Bosque denso	1
Bosque abierto	1
Bosque Fragmentado	1
Bosque de galería y ripario	1
Plantación forestal	1.25
Herbazal	0.6
Arbustos	0.7
Tierras desnudas y degradadas	0
Lagunas, lagos y ciénagas naturales.	0
Zonas de extracción Minera	0

Fuente: GIMHA, 2014

La profundidad del suelo antes de encontrarse con un obstáculo, conocido también como suelo superficial se obtiene a partir de la información de calicatas

mencionado en el Capítulo 4.3.5. En estos registros se observa que la profundidad promedio del suelo es de 1 metro.

La Figura 4.18d muestra el Mapa de Almacenamiento Estático ingresado en el modelo hidrológico TETIS, el cual se elaboró utilizando sistemas de información geográfica.

4.3.3.6 Capacidad de Infiltración

El mapa de Capacidad de Infiltración (K_s), conocida también como conductividad hidráulica saturada del suelo y está definido como la capacidad que tienen los poros del suelo en conducir o transmitir agua desde un punto a otro, depende de las características del suelo, tales como su compactación, textura, materiales y su homogeneidad, mostrados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5. La Tabla 4.14 muestra los valores de conductividad hidráulica para diferentes tipos de suelos.

Tabla 4.14: Conductividad Hidráulica (mm/hr)

Textura	K_s
Arena	117.8
Arena margosa	29.9
Marga arenosa	10.9
Marga	3.4
Marga Limosa	6.5
Marga areno-arcillosa	1.5
Marga arcillosa	1
Marga limo-arcillosa	1
Arcilla arenosa	0.6
Arcilla limosa	0.5
Arcilla	0.3

Fuente: Chow et al, 1988

La Figura 4.18e muestra el Mapa de Capacidad de infiltración ingresado en el modelo hidrológico TETIS, el cual se elaboró utilizando sistemas de información geográfica.

4.3.3.7 Capacidad de Percolación

El mapa de Capacidad de Percolación, K_p , es la percolación que corresponde al sustrato rocoso de la parte inferior del suelo, y depende directamente de su geología, mostrada en el Capítulo 4.3.3. La Tabla 4.15 muestra los valores de capacidad de percolación para diferentes tipos de sustratos rocosos.

Tabla 4.15: Capacidad de Percolación (mm/hr)

Sustrato rocoso	K_p	
	Min	Max
Dolomita	0.0004	0.0042
Caliza	0.0042	0.4167
Arcilla	0.0042	0.4167
Marga	0.0417	4.1667
Limonita	0.0417	4.1667
Arenisca	0.4167	41.6667
Conglomerado	4.1667	416.6667
Grava	41.6667	416.6667

Fuente: Giabattista, 2014

La Figura 4.18f muestra el Mapa de Capacidad de percolación ingresado en el modelo hidrológico TETIS, el cual se elaboró utilizando sistemas de información geográfica.

4.3.3.8 Conductividad Hidráulica de Interflujo

La conductividad hidráulica de interflujo, K_{ss} , es la velocidad del interflujo, este parámetro se obtiene de información de campo, pero de forma práctica puede ser considerado igual a la capacidad de infiltración del suelo (ver Figura 4.18e). Esto es posible porque en el análisis de tormentas se considera un tiempo de simulación pequeño (1 día), mientras que el flujo subterráneo demora un tiempo mucho mayor en trasladarse. (Giabattista, 2014)

4.3.3.9 Conductividad Hidráulica del Acuífero

La conductividad hidráulica del acuífero, K_{sa} , es la velocidad del flujo en el acuífero, este parámetro se obtiene de información de campo, pero de forma práctica en el análisis de tormentas de tiempo menor a un día, puede ser considerado igual a la capacidad de percolación del sustrato rocoso (ver Figura 4.18f) (Giabattista, 2014).

4.3.3.10 Capacidad de Pérdidas del Acuífero profundo

La conductividad hidráulica del acuífero profundo, K_{ps} , es la velocidad del flujo en el acuífero profundo, pero de forma práctica en el análisis de tormentas y puede ser considerado como el 10% de la capacidad de percolación (ver Figura 4.18f) (Giabattista, 2014).

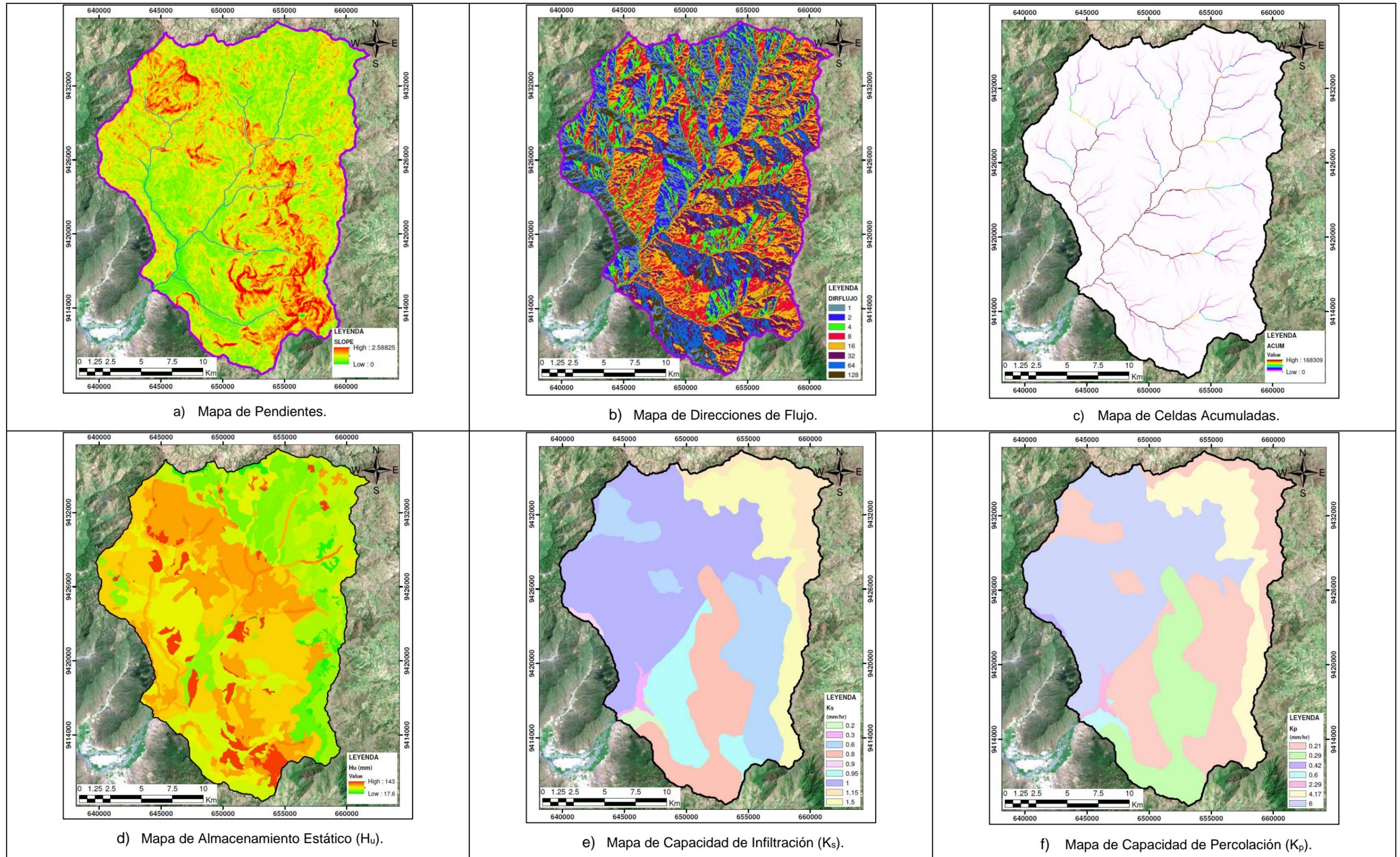


Figura 4.18 Mapas de Ingreso a Modelo TETIS.
Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Modelo de discretización hidrológica desacoplada IBER

El modelo hidrológico de discretización hidrológica desacoplada (DHD) IBER2D, es un modelo distribuido, es decir los parámetros de ingreso serán ingresados en cada elemento de área de la subcuenca Barrios, el modelamiento considera una malla no estructura de elementos triangulares de 70 m de longitud de lado (se debe tener densidad de puntos similar al modelo TETIS). Se han determinado estos parámetros en función a la información recopilada de área del proyecto.

4.3.4.1 Coeficiente de rugosidad de Manning

El mapa de coeficiente de rugosidad de Manning ha sido determinado en función a las condiciones del suelo y cobertura en las laderas y el cauce. Esta información está descrita en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5. El coeficiente de Manning será calculado mediante la expresión (Chow et al, 1988)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (\text{Ec.4.53})$$

Los valores de n_0 , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 y m_5 son determinados en función a la Tabla 4.16

Tabla 4.16: Valores para el Cálculo del Coeficiente de Rugosidad

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n ₀	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n ₁	0
	Menor		0.005
	Moderado		0.01
	Severo		0.02
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n ₂	0
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n ₃	0
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetación	Baja	n ₄	0.005 - 0.010
	Media		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 - 0.050
	Muy alta		0.050 - 0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m ₅	1.00
	Apreciable		1.15
	Severo		1.30

Fuente: Chow et al, 1988.

La Figura 4.21a muestra el mapa de Coeficientes de rugosidad ingresado al modelo IBER2D.

4.3.4.2 Modelo de Pérdidas de Green-Ampt

El modelo de Pérdidas de Green-Ampt considera los parámetros de succión, porosidad, saturación inicial, conductividad hidráulica saturada, y profundidad del suelo. Estos parámetros son determinados en función la humedad antecedente y el tipo de cobertura del suelo indicados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5. Adicionalmente se considera un valor para las pérdidas iniciales y la profundidad del suelo.

La Tabla 4.17 muestra los parámetros de suelo usados en la ecuación de Green-Ampt para diferentes clases de suelos.

Tabla 4.17: Parámetros de Infiltraciones de Green-Ampt

Clase de Suelo	Porosidad	Succión (mm)	Conductividad hidráulica (mm/h)
Arena	0.374 – 0.500 (0.437)	9.7 – 253.9 (49.5)	117.8
Arena margosa	0.363 – 0.506 (0.437)	13.5 – 279.4 (61.3)	29.9
Marga arenosa	0.351 – 0.555 (0.453)	26.7 – 454.7 (110.1)	10.9
Marga	0.375 – 0.551 (0.463)	13.3 – 593.8 (88.9)	3.4
Marga limosa	0.420 – 0.582 (0.501)	29.2 – 953.9 (166.8)	6.5
Marga limoarcillosa	0.332 – 0.464 (0.398)	44.2 – 1080 (218.5)	1.5
Marga arcillosa	0.409 – 0.519 (0.464)	47.9 – 911 (208.8)	1.0
Marga limo-arcillosa	0.418 – 0.524 (0.471)	56.7 – 1315 (273)	1.0
Arcilla arenosa	0.370 – 0.490 (0.430)	40.8 – 1402 (239)	0.6
Arcilla limosa	0.425 – 0.533 (0.479)	61.3 – 1394 (292.2)	0.5
Arcilla	0.427 – 0.523 (0.475)	63.9 – 1565 (316.3)	0.3

Fuente: Chow et al, 1988.

Carga de succión del suelo no saturado en el frente mojado

Este valor representa la succión en la región de suelo no saturada, y ha sido determinado en función a la Tabla 4.17 y la información de clase de suelos mencionados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5.

La Figura 4.21b muestra los valores de succión utilizados en el modelo IBER2D.

Porosidad total

El valor de la porosidad del suelo permite calcular la parte del agua que será retenida en el suelo, ha sido determinado en función a la Tabla 4.17 y la información de clase de suelos mencionados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5.

La Figura 4.21c muestra los valores de porosidad utilizados en el modelo IBER2D.

Conductividad hidráulica

El valor de conductividad hidráulica del suelo permite calcular la velocidad con que el agua fluye a través del suelo durante la infiltración, ha sido determinado en función a la Tabla 4.17 y la información de clase de suelos mencionados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5.

La Figura 4.21d muestra los valores de conductividad hidráulica utilizados en el modelo IBER2D.

Pérdidas Iniciales

Las pérdidas iniciales del suelo, están en función del tipo de cobertura de la subcuenca, las depresiones topográficas, etc. y ha sido determinado en función a la Tabla 4.17 y la información de tipos de cobertura mencionadas en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5. Se ha considerado como pérdidas iniciales, los valores obtenidos en el método de pérdidas del número de curva, que utiliza las ecuaciones 4.2 y 4.3.

La Figura 4.21e muestra los valores de las pérdidas iniciales consideradas en el modelo IBER2D.

Profundidad del suelo

El valor de la profundidad del suelo ha sido determinado en función a los hallazgos en las calicatas realizadas por los estudios en el área, mencionados en los Capítulos 4.3.3 al 4.3.5. Se ha considerado que la profundidad del suelo promedio es de 1 metro, según se indica en el Capítulo 4.5.2.5.

Saturación Inicial

El valor de la saturación inicial del suelo ha sido determinado en función al tipo de humedad antecedente (AMC) y para cada evento de tormenta analizado. En el Capítulo 4.5.1.1 muestra las Tablas 4.9 y 4.10 donde se indica el tipo de humedad antecedente de las estaciones Barrios y Canchaque.

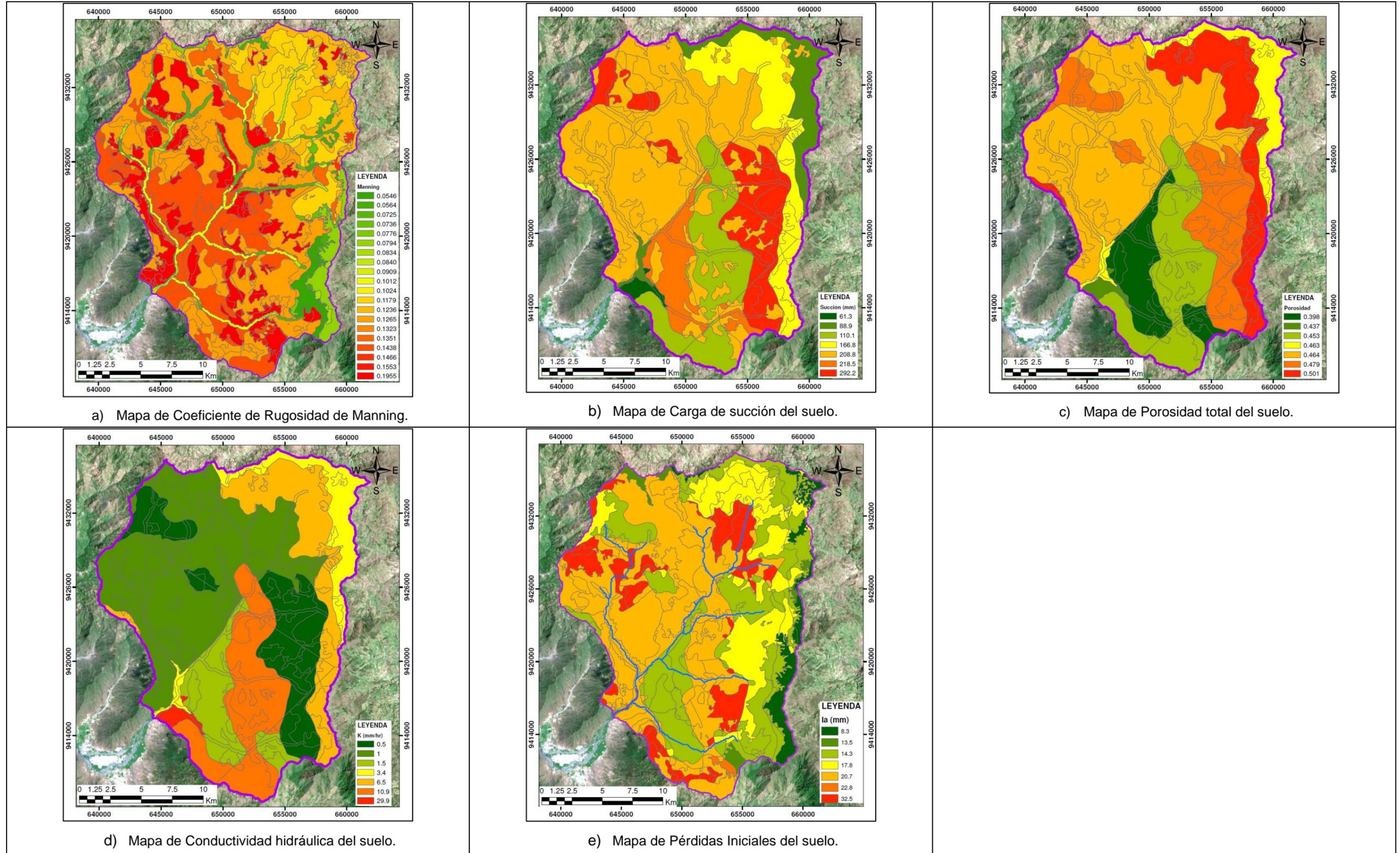


Figura 4.21 Mapas de Ingreso a Modelo IBER.
Fuente: Elaboración propia

4.4 TORMENTAS EN LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

4.4.1 Modelo Agregado

El modelo hidrológico del hidrograma unitario SCS es un modelo agregado; es decir, la precipitación será ingresada como un promedio de toda la cuenca. En el presente estudio se dispone principalmente de la información de dos estaciones meteorológicas: Barrios y Canchaque.

Para determinar el valor de la precipitación media sobre la cuenca se utilizó el método de los Polígonos de Thiessen, que consiste en realizar un promedio ponderado en función del área de influencia de cada estación.

La Figura 4.22 muestra los Polígonos de Thiessen.

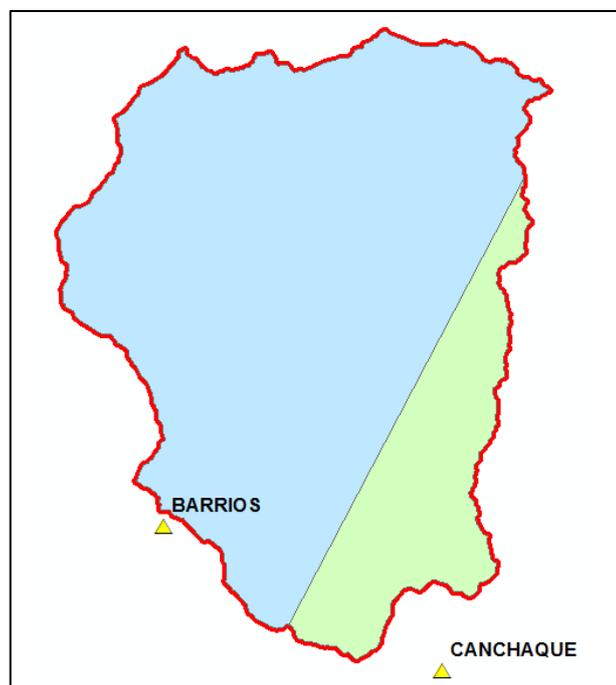


Figura 4.22 Polígonos de Thiessen.
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.18 muestra las ponderaciones para determinar la precipitación media en la subcuenca.

La Tabla 4.18: Porcentaje de Áreas

Estación	Área (km ²)	Porcentaje
Barrios	340.8	80.9%
Canchaque	80.2	19.1%
Total	421	100%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 4.19 muestra los valores de tormentas ponderados incluidos en el modelamiento hidrológico.

La Tabla 4.19: Tormentas ponderadas (mm)

Tormenta	Estación Barrios	Estación Canchaque	Tormenta ponderada
Tormenta 1	34	54.3	36.2
Tormenta 2	65.1	58.7	64.5
Tormenta 3	19.2	61.2	23.8
Tormenta 4	53.6	31.2	51.2
Tormenta 5	44.1	40.4	43.4
Tormenta 6	38.5	61.8	41.2
Tormenta 7	52.7	44.2	51.1

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2 Modelo Distribuido

Los modelos hidrológicos de Tanques de Almacenamiento TETIS y de Discretización Hidrológica Desacoplada IBER2D, son modelos distribuidos; es decir, la precipitación será ingresada en cada elemento de área de la subcuenca Barrios.

Inverso de la Distancia al cuadrado (IDW)

El modelo hidrológico de Tanques de Almacenamiento TETIS distribuye la precipitación a cada elemento de la subcuenca mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW, por sus siglas en inglés), que consiste en la obtención de factores de ponderación, w_{0j} , como una función entre la distancia desde el punto de la estación hacia el elemento donde se quiere estimar el valor de la precipitación mediante la siguiente expresión:

$$w_{0j} = \frac{\frac{1}{d_{0j}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{0i}^2}} \quad (\text{Ec.4.54})$$

Donde n es el número de estaciones de medición empleadas, siendo:

$$d_{0j} = \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Ec.4.55})$$

La precipitación, X_0 , sobre cada elemento de la subcuenca es estimado como la sumatoria del producto del respectivo factor de ponderación por el valor de precipitación en cada una de las estaciones.

$$X_0 = \sum_{j=1}^n w_{0j} X_j \quad (\text{Ec.4.56})$$

La Figura 4.23 muestra la distribución de precipitaciones a utilizar en los modelos hidrológicos distribuidos. La precipitación varía conforme a la duración de la tormenta, creándose un efecto de precipitación dinámica en el tiempo. En el Anexo II se muestran la distribución de las tormentas analizadas en la presente investigación.

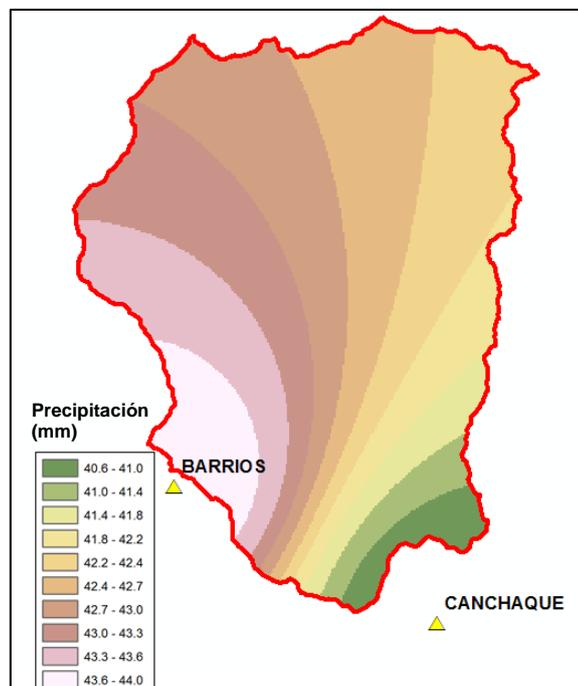


Figura 4.23 Precipitación Distribuida (mm) – Metodo IDW - Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

4.5 ESCALA DE AREA Y TIEMPO

4.5.1 Escala de Área

El modelo hidrológico del hidrograma unitario SCS es un modelo agregado, el área considerada, será el área total de la subcuenca Barrios 421 km². En el modelo HEC-HMS se ha considerado la sub cuenca Barrios como un solo elemento, en el cual se aplicaron los parámetros de ingreso promediados en el espacio. En la presente investigación se utilizará el modelo HEC-HMS como modelo agregado, por cual subdividir la subcuenca en áreas de menor tamaño disturbaría los resultados directos del modelo de transformación lluvia-escorrentía.

Con respecto a los modelos hidrológicos TETIS e IBER, que son distribuidos espacialmente, se debe definir un tamaño de elemento en el cual se subdividirá la subcuenca Barrios. Tomando como referencia la información topográfica descargada, la cual tiene un tamaño de grilla de 38.09 m, se ha definido, como efecto práctico y considerando tiempos de cálculo razonables en los modelos, un

tamaño de grilla de 50 m. El modelo TETIS usa directamente esta grilla como base topográfica sobre la cual realiza el cálculo hidrológico en cada elemento de grilla.

La densidad de grillas en el modelo es de 400 grillas por kilómetro cuadrado. La Figura 4.24 muestra la grilla utilizada por el modelo TETIS.

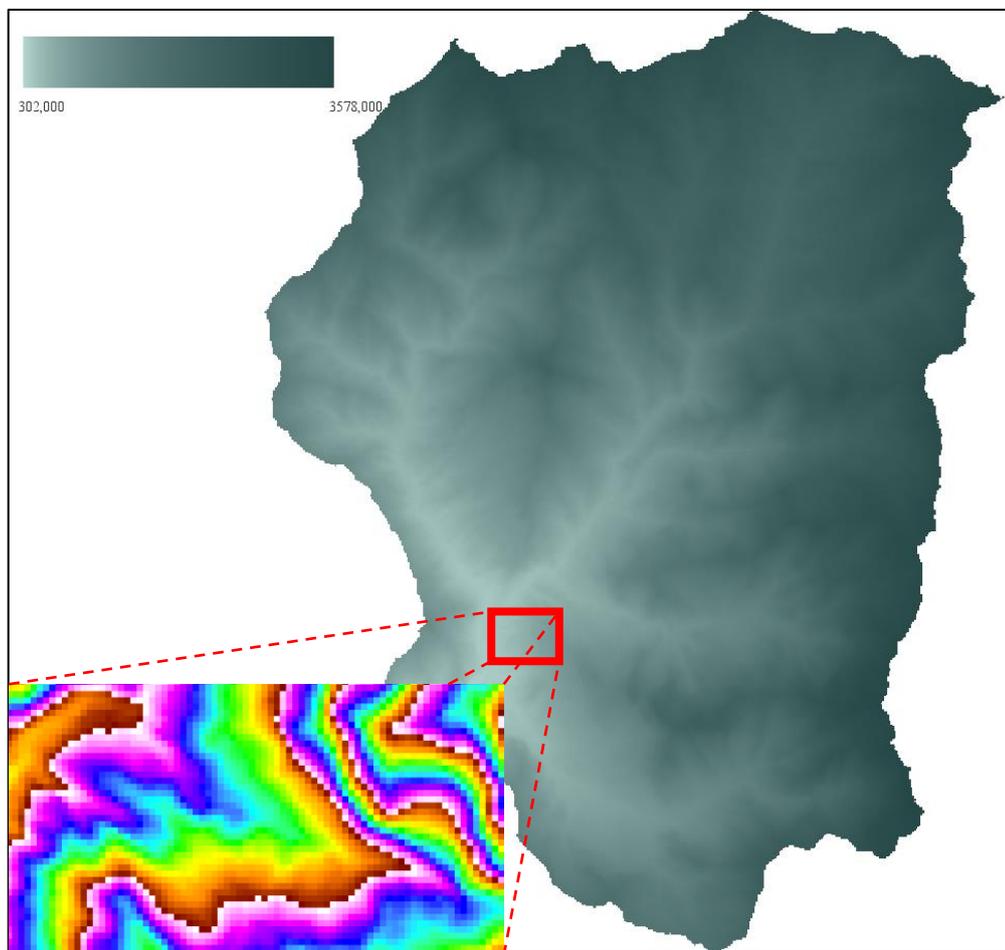


Figura 4.24 Grilla de Cálculo Subcuenca Barrios – Modelo TETIS.
Fuente: Modelo TETIS.

Respecto al modelo hidrológico distribuido IBER2D, considera en su cálculo una malla no estructurada, con elementos triangulares cuyos vértices son llamados nodos, en los cuales se realiza el cálculo hidrológico. Para tener una densidad de puntos de cálculo equivalente a los utilizados en el modelo TETIS, se debe considerar una malla de elementos triangulares de 70 metros de lado.

La Figura 4.25 muestra la malla no estructurada utilizada por el modelo IBER2D.

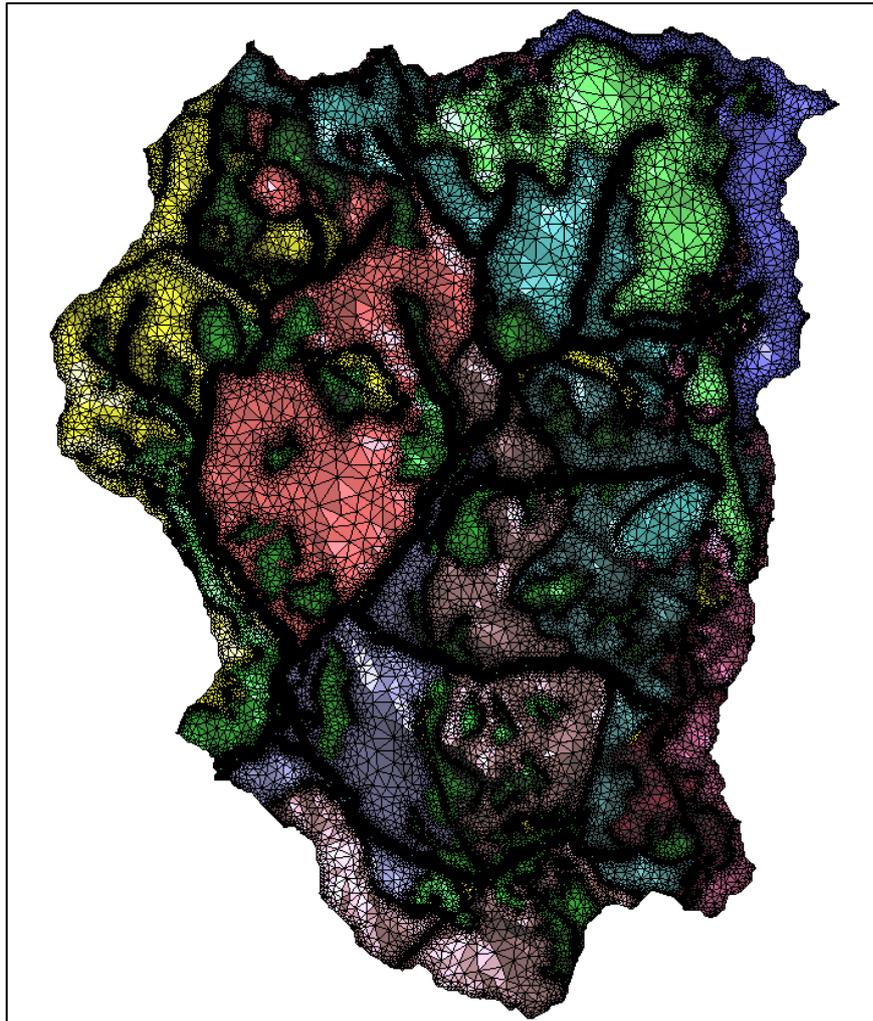


Figura 4.25 Malla de Cálculo Subcuenca Barrios – Modelo IBER.
Fuente: Modelo IBER.

4.5.2 Escala de Tiempo

Los registros de las tormentas y medición de caudales mencionados en el Capítulo 4.3.2, se encuentran a escala horaria. Esta información puede ser considerada como detallada, a pesar de que las simulaciones en los modelos hidrológicos permite el uso de una escala de tiempo menor. Se ha considerado utilizar la misma escala de tiempo de los datos observados, con el fin de realizar su ajuste y calibración. Se ha definido 1 hora como la escala del tiempo para la presente investigación.

4.6 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

El punto de partida en la calibración de los modelos hidrológicos será realizar la simulación con los parámetros recopilados en las referencias bibliográficas e información de los proyectos mencionados en el capítulo 4.3. El proceso de calibración consiste en acotar el dominio de posibles valores para cada parámetro, y mediante un proceso iterativo encontrar el valor de convergencia. Los dominios serán definidos en función a las condiciones iniciales de humedad y los resultados que se obtienen de las iteraciones previas.

En el caso de los modelos HEC-HMS 4.2.1 y TETIS 9.0.1b, se ha realizado la calibración con los métodos de optimización automática incluidos como herramientas dentro del software de aplicación; mientras que en el modelo IBER2D, se ha realizado la calibración de forma manual. A continuación, se describe cada uno de estos métodos:

4.6.1 Algoritmo de gradiente invariable – Newton Raphson

El modelo HMS utiliza para la calibración la herramienta Optimización Automática, basada en el algoritmo de gradiente invariante, que consiste en realizar correcciones sucesivas para estimar cada parámetro. Si x_i representa la estimación de un parámetro en la iteración i , la siguiente iteración x_{i+1} se define como:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i \quad (\text{Ec.4.57})$$

Donde Δx_i es la corrección del parámetro. La función objetivo será minimizar este factor hasta un valor menor a 0,01; el cálculo de aproximación utilizado corresponde al método de Newton-Raphson (US Army Corps of Engineers, 2000). La Figura 4.26a muestra el esquema de la convergencia de este método.

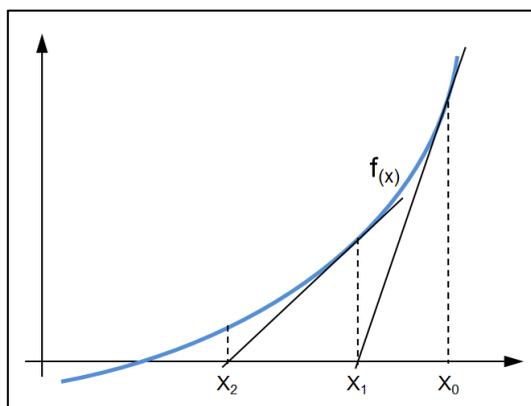


Figura 4.26 Convergencia del Método de Newton-Raphson
 Fuente: Elaboración propia.

Se ha considerado hasta un valor máximo de 100 iteraciones; sin embargo, se observa que la convergencia suele ocurrir en menos de 20 iteraciones. (Ver Figura 4.27)

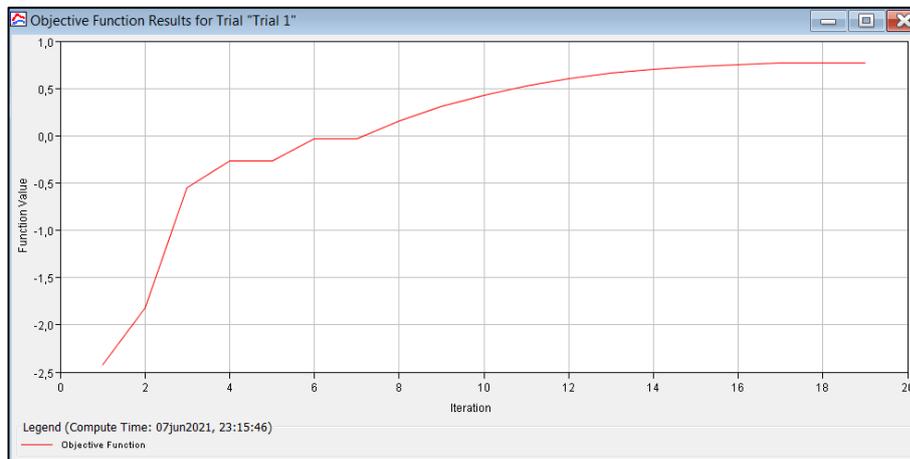


Figura 4.27 Número de Iteraciones, Modelo HMS.
Fuente: Modelo HEC HMS.

4.6.2 Método de evolución y mezcla de complejos (SCE-UA)

El modelo TETIS utiliza para la calibración la herramienta de Optimización Automática, basada en el algoritmo del método de evolución y mezcla de complejos (SCE-UA, por sus siglas en inglés), desarrollado en la Universidad de Arizona. Este modelo se considera robusto y eficiente para la calibración de modelos lluvia-escorrentía (Duan et al, 1994). A continuación, se destacan los pasos a seguir:

- 1) Generar una muestra de "s" puntos aleatorios en el espacio factible y calcular el valor de la función objetivo en cada punto. Si no hay información previa sobre el máximo, se puede considerar una distribución de probabilidad uniforme para generar la muestra.
- 2) Clasificar los puntos. Ordenar los "s" puntos en orden decreciente asumiendo que el propósito es minimizar la función objetivo.
- 3) Partición en complejos. Dividir los "s" puntos en "p" complejos, de modo que cada uno contenga "m" puntos. El primer complejo contiene los "p(k-1)+1" clasificados y el segundo complejo contiene los "p(k-1)+2" clasificados, y así sucesivamente para los valores de k=1, 2, ..., m.

- 4) Evolución de un complejo. Evolución de cada complejo de acuerdo a un algoritmo de evolución competitiva de complejos, "Complex Competitive Evolution, CCE". El algoritmo CCE está basado en el procedimiento propuesto por Nedel y Mead (Nedel et al, 1965) para generar descendencia. El CCE utiliza el método Simplex de búsqueda hacia abajo combinado con la búsqueda aleatoria propuesta por Preece (Preece, 1987) y la evolución competitiva sugerida por Holland (Holland, 1975). El método Simplex es resumido en los siguientes pasos: (Duan et al, 1994)

En la Figura 2.28 se puede observar de forma gráfica el proceso de evolución de complejos del SCE-UA. En la cual, los puntos rosados corresponden a los puntos aleatorios, el punto azul corresponde a punto generado con mejor convergencia, y la cruz (+) roja es el punto de la función objetivo.

Construir un subcomplejo de forma aleatoria, seleccionando "q" puntos de una distribución de probabilidad trapezoidal (Puntos rosados de la Figura 2.28). El mejor punto (con el mayor valor de la función) tiene la mayor oportunidad de ser elegido para formar un subcomplejo y el peor tiene una probabilidad menor.

- a. Identificar el peor punto del subcomplejo y calcular el centroide del subcomplejo sin incluir el punto más malo.
- b. Intentar reflejar el peor punto a través del centroide. Si el nuevo punto generado está dentro del espacio factible, ir al siguiente paso, de lo contrario, aleatoriamente generar un punto dentro del espacio factible e ir al siguiente paso.
- c. Si el nuevo punto generado es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto por el nuevo punto e ir al paso (g), de lo contrario ir al siguiente paso. (Punto azul de la Figura 2.28)
- d. Intentar un paso de contracción, calculando un punto a medio camino entre el centroide y el peor punto. Si el punto de contracción es mejor que el peor punto, reemplace el peor punto por el de contracción y vaya al paso (g), de lo contrario ir al siguiente paso.
- e. Aleatoriamente generar un punto dentro del espacio factible y reemplazar el peor punto por el punto generado aleatoriamente.

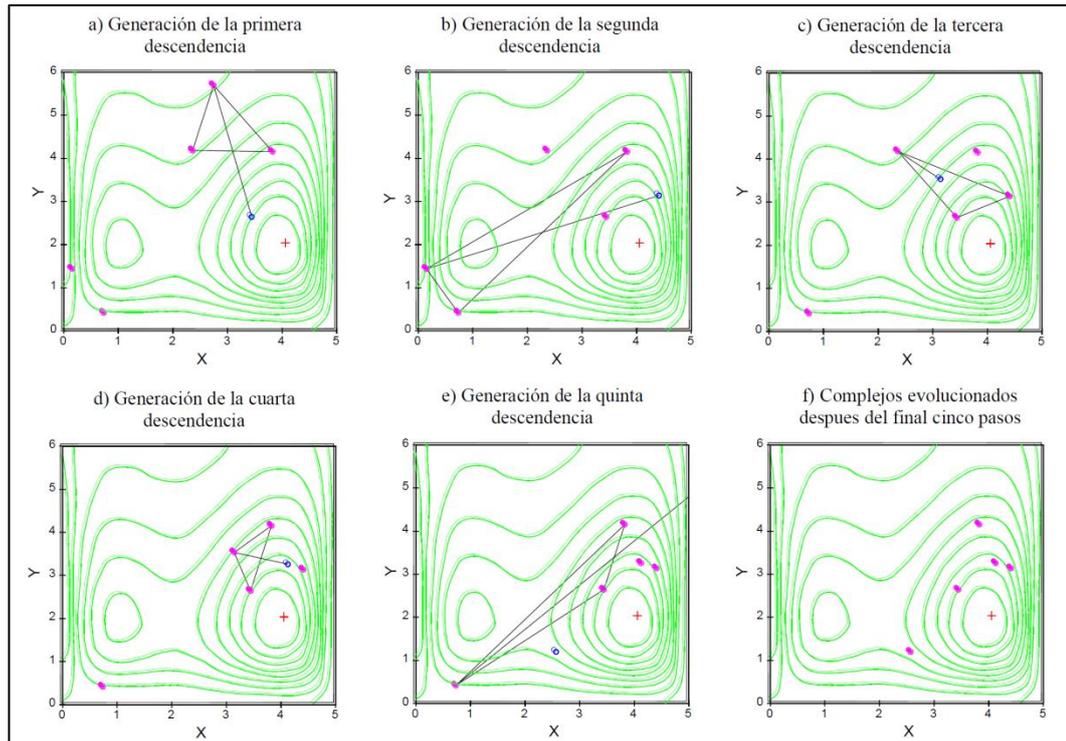


Figura 4.28 Ilustración del Método de Evolución y Barajado de Complejos, SCE-UA.
Fuente: Duan et al, 1992.

- f. Repita los pasos (b)-(f) α veces, donde $\alpha \geq 1$ es el número de descendientes consecutivos generados por el mismo subcomplejo.
 - g. Repita los pasos (a)-(g) β veces, donde $\beta \geq 1$ es el número de pasos de evolución tomado por cada complejo a antes de que los complejos sean barajados.
- 5) Barajar los complejos. Combinar los puntos en los complejos evolucionados en una sola muestra, ordenar en orden creciente según la función objetivo y volver a hacer la repartición de la población en “p” complejos según el paso 3. La Figura 2.29 se muestra los pasos evolutivos por cada complejo.
 - 6) Revisar la convergencia. Si se satisfacen los criterios previamente establecidos de convergencia, se puede parar, de lo contrario seguir.
 - 7) Revisar la reducción en el número de complejos. Si el mínimo número de complejos requerido en la población “ p_{\min} ” es menor que “p”, eliminar el

complejo con el rango mas bajo en sus puntos. Hacer “ $p=p-1$ ” y “ $s=pm$ ”. Regresar al paso 4. Si $p_{\min}=p$ regresar al paso 4.

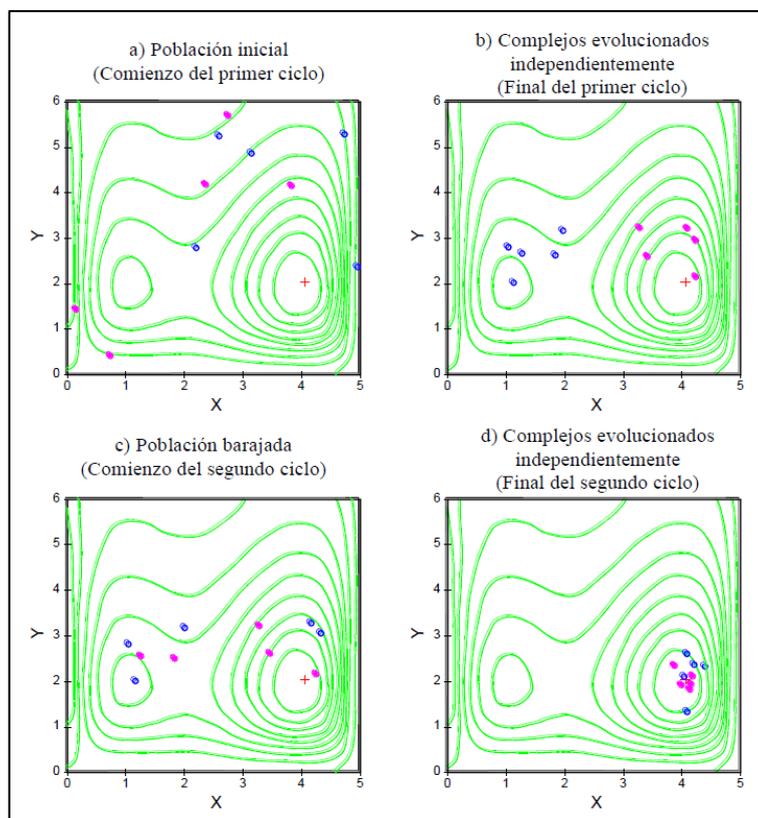


Figura 4.29 Ilustración de los Pasos Evolutivos por cada Complejo, SCE-UA.
Fuente: Duan et al, 1992.

En el algoritmo CCE cada punto de un complejo es un “padre” potencial con la capacidad de participar en el proceso de reproducción de descendencia. Se recomienda “ $m \geq 2$, $m=2n+1$ ”, donde “ n ” es el número de parámetros, también se sugiere “ $\alpha=1$ ” y “ $\beta=m$ ”. Además, se destaca que “ q ” varía entre 2 y “ m ”, en donde “ $q=n+1$ ” y “ p_{\min} ” debe encontrarse entre 1 y “ p ” recomendado “ $p_{\min}=p/2$ ”

Durante la optimización automática de las simulaciones, desarrollado en el modelo TETIS, se realizaron entre 5 a 10 ciclos de calibración, de los cuales tenían entre 200 a 500 generaciones de descendencias, en cada caso.

4.6.3 Prueba y error

El modelo IBER2D no incorpora la herramienta de optimización automática. La naturaleza del modelamiento conlleva a un tiempo de cálculo aproximado de una hora por cada simulación. En consecuencia, un proceso iterativo demandaría una

gran cantidad de tiempo de cálculo que haría inviable la investigación. Por tal motivo, se procedió a realizar una calibración manual.

El ajuste manual de los parámetros estará basado en el criterio del investigador. El algoritmo a usar utiliza la técnica de optimización de búsqueda local, pues primero se usa con la finalidad de identificar la región comprometida con la solución óptima, después se utiliza la solución previa como punto de partida para llevar a cabo la búsqueda subsiguiente. En cada iteración, se calcula la bondad del ajuste hasta encontrar niveles aceptables.

En el desarrollo de las calibraciones manuales de las simulaciones, se realizaron entre 10 a 50 iteraciones para determinar los parámetros con buen ajuste, lo cual considera una variación menor al 10% en volumen y caudal pico.

4.6.4 Proceso de Calibración

4.6.4.1 Modelo HMS

La calibración de los parámetros en el modelo HMS, ha sido realizada mediante el algoritmo de gradiente invariable – Newton Raphson, para lo cual, utiliza la herramienta de Optimización que se encuentra incorporado en el software HEC-HMS 4.2.1.

El proceso de calibración del modelo HMS, se realiza de la siguiente manera:

- a) La simulación inicial se realiza con los parámetros de número de curva (CN), tiempo de retardo (Tlag) y Abstracciones iniciales (Ia), calculados a partir de la información recopilada y referencias bibliográficas, mostrados en el capítulo 4.3.1.
- b) La primera calibración se realiza mediante un proceso iterativo; para lo cual, se acota el dominio de los parámetros “CN” y “Tlag” en función al tipo de humedad antecedente (AMC). El proceso de iteración se realiza con la herramienta Optimización, incorporado en el software HEC-HMS 4.2.1.
- c) La segunda calibración consiste en aumentar o reducir, según se requiera, el dominio de las abstracciones iniciales en un +/- 50% del valor inicial. Igual que en paso anterior, se realiza un proceso iterativo.
- d) En función al hidrograma resultante, se procede a ajustar el dominio de cada parámetro, basado en el criterio del investigador, con la finalidad de

determinar los parámetros que presenten mejor ajuste. Se debe mantener la significancia física de cada uno de estos en la subcuenca.

- e) Las abstracciones iniciales y el número de curva determinan el tiempo de inicio y volumen del hidrograma de caudal, mientras que el tiempo de retardo permite que el caudal pico del hidrograma se ajuste en el tiempo.
- f) La última calibración consiste en modificar el valor del factor de tasa del pico (PRF) utilizado en el modelo HMS, que por defecto utiliza el valor de 484 que aplica a las cuencas de estudio de los Estados Unidos. Este valor está influenciado por la rugosidad y vegetación de la cuenca, en la presente investigación se ha considerado valores entre 300 y 400 debido a que la subcuenca Barrios presenta abundante vegetación.

4.6.4.2 Modelo TETIS

La calibración de los parámetros en el modelo TETIS, ha sido realizada mediante el método de evolución y mezcla de complejos (SCE-UA), para lo cual se utiliza la herramienta de Optimización Automática que se encuentra incorporado en el software Tetis 9.0.1b.

Los parámetros utilizados en el modelo de tanque de almacenamiento TETIS son: el almacenamiento estático (H_u), capacidad de infiltración (K_s), capacidad de percolación (K_p), conductividad hidráulica de interflujo (K_{ss}), conductividad hidráulica del acuífero (K_{sa}) y capacidad de pérdidas del acuífero profundo (K_{ps}); de los cuales, solamente los dos primeros tanques de almacenamiento: estático y capacidad de infiltración, tienen influencia para eventos de tormenta de 24 horas. Los demás parámetros son utilizados, y tienen sensibilidad, en modelos hidrológicos continuos; es decir, periodos de meses o años. Además, se considera como parámetro de ajuste a la velocidad de drenaje en la ladera de la subcuenca.

Para efectos de calibración automática, el modelo TETIS considera factores correctores (FC_i) para cada parámetro. Estos factores son aplicados a los mapas de parámetros para aumentar o disminuir sus valores. Previamente se define el dominio para cada parámetro, que consiste en asignar el valor mínimo y máximo dentro del cual se realizará la calibración del parámetro.

Para calibrar los modelos se aplican los factores correctores: FC_1 , correspondiente al almacenamiento estático; FC_3 , correspondiente a la infiltración; y FC_9 ,

correspondiente a la velocidad de drenaje. Además, el modelo incluye asignar el estado inicial para cada tanque de almacenamiento. En la presente investigación se han incluido las pérdidas iniciales en el tanque de almacenamiento estático, H_1 , donde está incluida la interceptación por la vegetación. Se asigna un porcentaje del valor máximo en este tanque, %Inic. El Anexo IV muestra los mapas de parámetros calibrados en las tormentas analizadas.

El proceso de calibración del modelo TETIS, se realiza de la siguiente manera:

- a) La simulación inicial se realiza con los parámetros calculados a partir de la información recopilada y referencias bibliográficas, mostrados en el capítulo 4.3.2.
- b) La primera calibración consiste en acotar el dominio del porcentaje de humedad inicial, en función al tipo de humedad antecedente (AMC).
- c) Posteriormente, la calibración consiste en el acotar el dominio de los factores correctores FC_i , a un valor cercano a 1. El proceso de iteración se realiza con la herramienta Optimización Automática, incorporado en el software Tetis 9.0.1b.
- d) El porcentaje de humedad inicial, el almacenamiento estático y la infiltración determinan el tiempo de inicio y volumen del hidrograma de caudal, mientras que la velocidad de drenaje permite que el caudal pico del hidrograma se ajuste en el tiempo.
- e) Debido a la naturaleza del algoritmo de calibración, este es capaz de encontrar su propio valor de convergencia en el dominio definido; el investigador puede ajustar el dominio de los factores hasta encontrar mejores ajustes.

4.6.4.3 Modelo IBER

La calibración de los parámetros en el modelo IBER ha sido realizada de forma manual.

Los parámetros utilizados en el modelo de discretización hidrológica desacoplada (DHD) IBER2D son: el coeficiente de rugosidad de Manning (n) en las superficies de ladera de la cuenca (n_t) y del cauce (n_c), y los parámetros relacionados a las pérdidas hidrológicas: Saturación inicial (Sat), Capacidad de infiltración (K), Succión de frente del suelo (Su), la porosidad (η) y la profundidad del suelo (Prof).

El proceso de calibración consiste en asignar los parámetros calculados de la información bibliográfica, descrita en el Capítulo 4.3.3, y en función a los resultados que se obtienen, se procede a ajustar cada parámetro en función a la implicancia de cada uno de estos en el hidrograma calculado.

En la calibración del modelo IBER se considera el ajuste espacial de los parámetros. Debido a la base hidráulica matemática del modelo, se puede observar el comportamiento del flujo de agua (alturas y velocidades) en toda el área de la cuenca mientras se realiza la simulación. Por lo tanto, es posible observar la respuesta de la cuenca en cada área específica y en cada momento de la simulación; esto permite ajustar los parámetros en función a la observación de la respuesta de la cuenca.

Los parámetros de porosidad y profundidad del suelo se encuentran claramente definidos en la información bibliográfica, además no presentan una sensibilidad considerable en el modelamiento. Por tanto, no se ha considerado como parámetros a ser calibrados.

El proceso de calibración del modelo IBER, se realiza de la siguiente manera:

- a) La simulación inicial se realiza con los valores promedio de los parámetros calculados a partir de la información recopilada y referencias bibliográficas, mostrados en el capítulo 4.3.3.
- b) La primera calibración consiste en acotar el dominio del porcentaje de humedad inicial, en función al tipo de humedad antecedente (AMC).
- c) Posteriormente, la calibración consiste en acotar el dominio de los parámetros del modelo de infiltración de Green-Ampt y la rugosidad de Manning. Este dominio ha sido determinado en función de los máximos y mínimos indicados en la información recopilada e indicada en el capítulo 4.3.3.
- d) Se observa el resultado de la simulación inicial y se procede a evaluar la sensibilidad de cada parámetro; el porcentaje de humedad inicial y la capacidad de infiltración determinan predominantemente el volumen del hidrograma de caudal; mientras que el valor de succión y el coeficiente de Manning determinan la ubicación del caudal pico del hidrograma.
- e) Usando el método de prueba y error, se ajustan los parámetros dentro del dominio acotado y guardando correlación con su implicancia física.

- f) El coeficiente de Manning tiene implicancia directa en la forma del hidrograma, se consideran dos casos: el cauce, que tiene las características de un canal definido; y por otro lado, las laderas, donde el agua fluye superficialmente y donde predomina el efecto de la fricción del suelo.
- g) La interfaz del software IBER2D, permite visualizar la formación de la escorrentía distribuida en toda el área de la subcuenca; a partir de estos resultados previos se realizan ajustes espaciales hasta determinar un ajuste correcto.

4.6.5 Evaluación del rendimiento de los modelos hidrológicos

La calibración de los modelos hidrológicos se realizará con el criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), descrito en el capítulo 2.8.3, donde el modelo calibrado con mayor valor de NSE, será el que mejor se ajuste a los datos medidos en campo. Los ajustes aceptables serán catalogados “Bueno” a “Excelente”. Finalmente, el modelo hidrológico que acumule la mayor cantidad de ajustes “Excelente” en las tormentas analizadas, será el que presente el mejor desempeño.

Además, se debe procurar que el volumen y caudal pico del hidrograma, no presenten una variación mayor al 10% respecto a los datos medidos en campo.

CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1 MODELO HIDROGRAMA UNITARIO HEC-HMS

5.1.1 Tiempo de Concentración

Se ha determinado el tiempo de concentración en función a las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 4.4.1.3. La Tabla 5.1 muestra los valores obtenidos para tiempo de concentración y de retardo.

Tabla 5.1: Tiempo de Concentración y Retardo (min)

Autor	Tiempo de Concentración	Tiempo de Retardo
Ecuación de retardo SCS (AMC I)	816	490
Ecuación de retardo SCS (AMC II)	487	292
Ecuación de retardo SCS (AMC III)	323	194

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Tormentas

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.1 para la condición de humedad antecedente (AMC). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados, siguiendo la metodología explicada en el capítulo 4.6.4.1 de la presente investigación.

En las Figuras 5.1 a 5.7 se muestran los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación de cada tormenta, y además está comparado con los datos observados en campo.

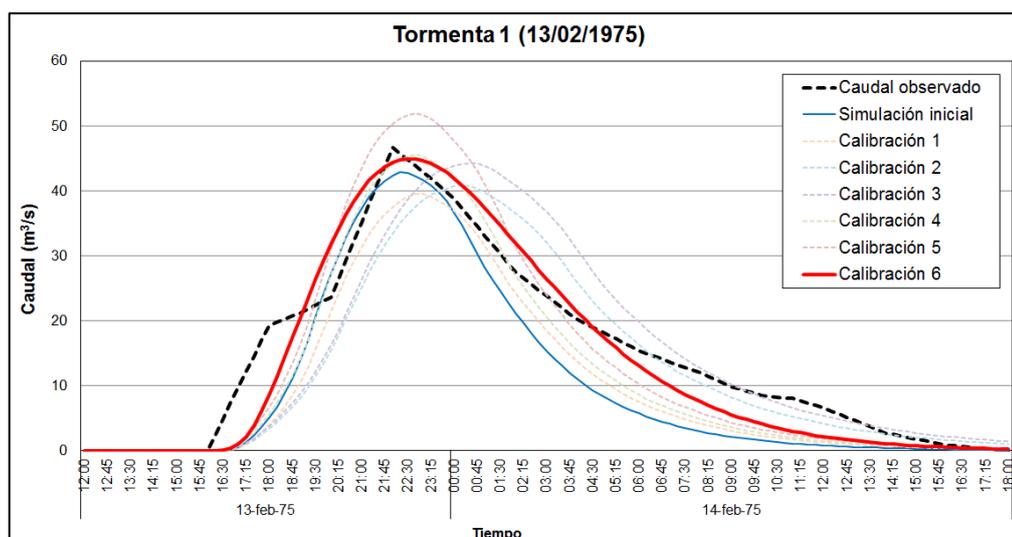


Figura 5.1 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 1.

Fuente: Elaboración propia

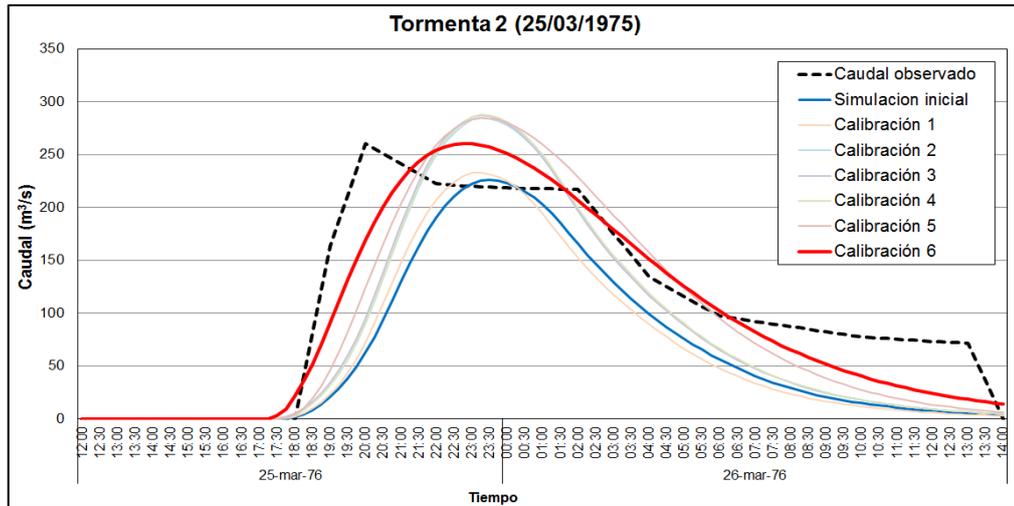


Figura 5.2 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 2.

Fuente: Elaboración propia

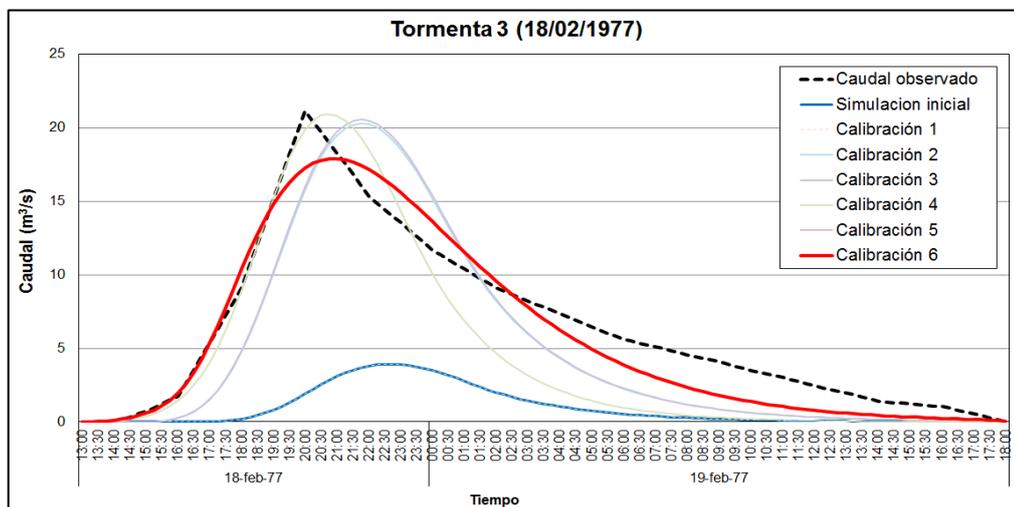


Figura 5.3 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 3.

Fuente: Elaboración propia

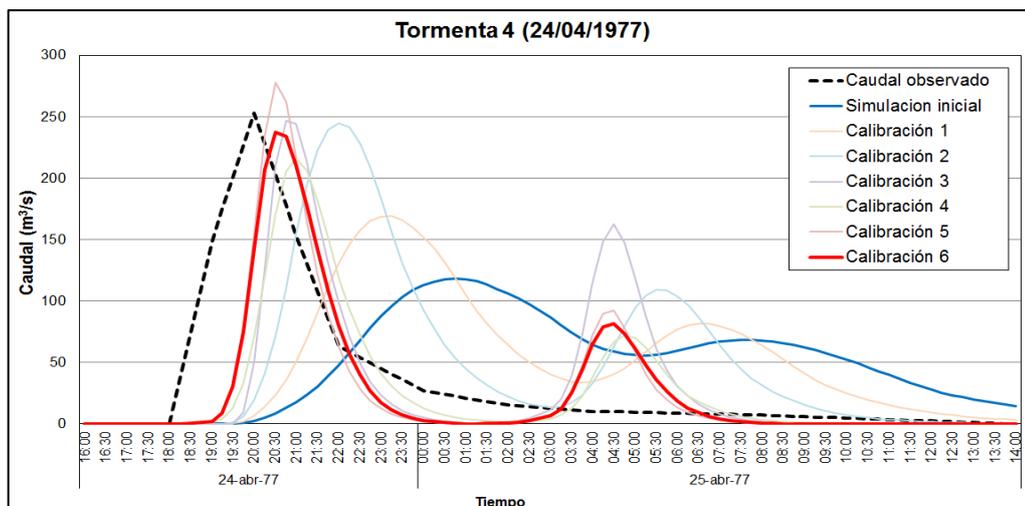


Figura 5.4 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 4.

Fuente: Elaboración propia

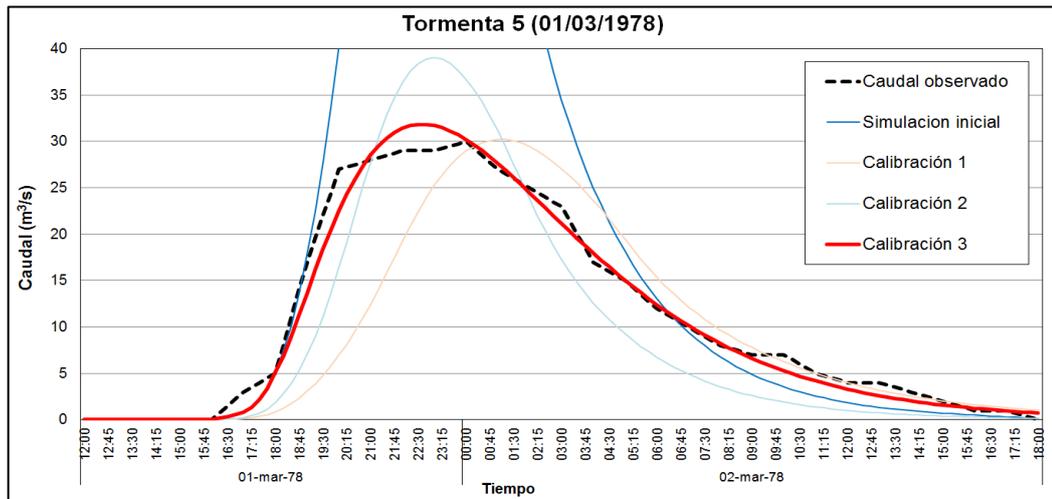


Figura 5.5 Resultados Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

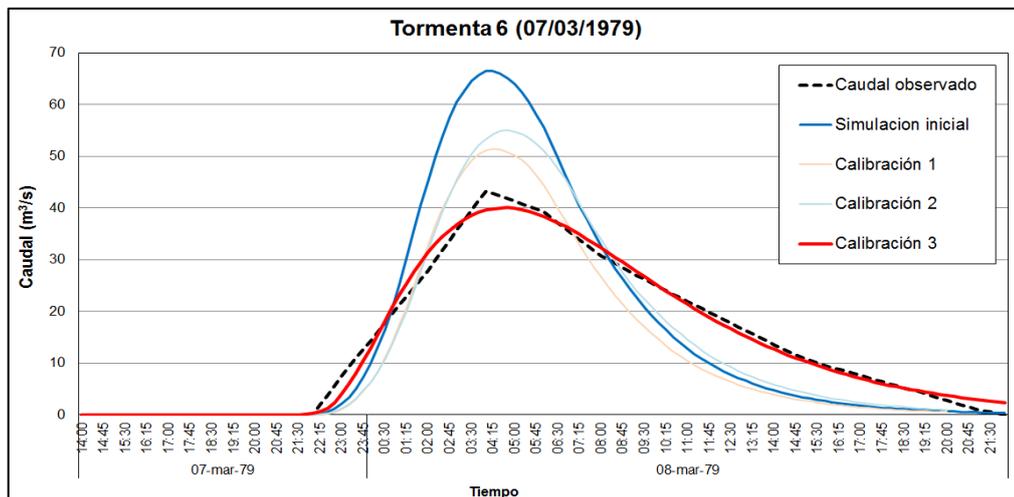


Figura 5.6 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 6.
 Fuente: Elaboración propia

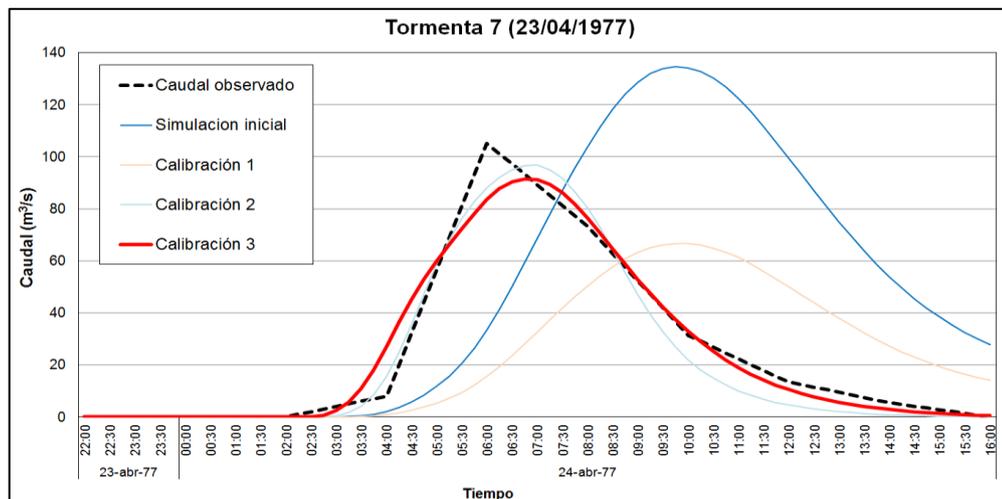


Figura 5.7 Resultados de Modelamiento HEC-HMS, Tormenta 7.
 Fuente: Elaboración propia

Los parámetros iniciales utilizados en el modelamiento, considera un valor de 72.8 para el número de curva, 292 minutos de tiempo de retardo y 19.0 mm de abstracción inicial.

Las Tablas 5.2 y 5.3 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación. En el Anexo V se detallan los resultados obtenidos en el modelamiento en HMS.

Tabla 5.2: Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento HEC-HMS

Tormenta	CN	Tlag	la
Tormenta 1	53.19	324.4	6.1
Tormenta 2	74.83	249.9	7.9
Tormenta 3	63.05	243.9	9.6
Tormenta 4	40.32	50.5	7.6
Tormenta 5	56.62	273.1	19.2
Tormenta 6	70.7	303.5	18.5
Tormenta 7	41.45	100.4	11.6

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC) a excepción de la Tormenta 4, la cual es la única que ocurre a finales del mes abril; en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una reducción de la vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el tiempo de retardo es menor que en las demás tormentas.

Los Tablas 5.2 y 5.3 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación. En el Anexo V se detallan los resultados obtenidos en el modelamiento en HMS.

Tabla 5.3: Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento HEC-HMS

Tormenta (mm)	Caudal pico			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1 (36.2 mm)	46.7	45	-3.6%	1.601	1.502	-6.2%	0.95
Tormenta 2 (64.5 mm)	260.8	260.6	-0.1%	10.249	9.335	-8.9%	0.87
Tormenta 3 (23.8 mm)	21.2	17.9	-15.6%	0.677	0.615	-9.2%	0.94
Tormenta 4 (51.2 mm)	253.2	237.6	-6.2%	2.885	2.214	-23.3%	0.45
Tormenta 5 (43.4 mm)	30	31.9	6.3%	1.22	1.189	-2.5%	0.99
Tormenta 6 (41.2 mm)	43.3	40.1	-7.4%	1.664	1.656	-0.5%	0.99
Tormenta 7 (51.5 mm)	105.2	91.5	-13.0%	1.705	1.678	-1.6%	0.97
	Promedio		-5.6%	Promedio		-7.4%	0.88

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que 6 de las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, mientras que la tormenta 4 tiene un ajuste bueno.

5.2 MODELO TANQUES DE ALMACENAMIENTO TETIS

5.2.1 Tormentas

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente (AMC). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados, siguiendo la metodología explicada en el capítulo 4.6.4.2 de la presente investigación.

En las Figuras 5.8 a 5.14 se muestran los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación de cada tormenta, y además está comparado con los datos observados en campo.

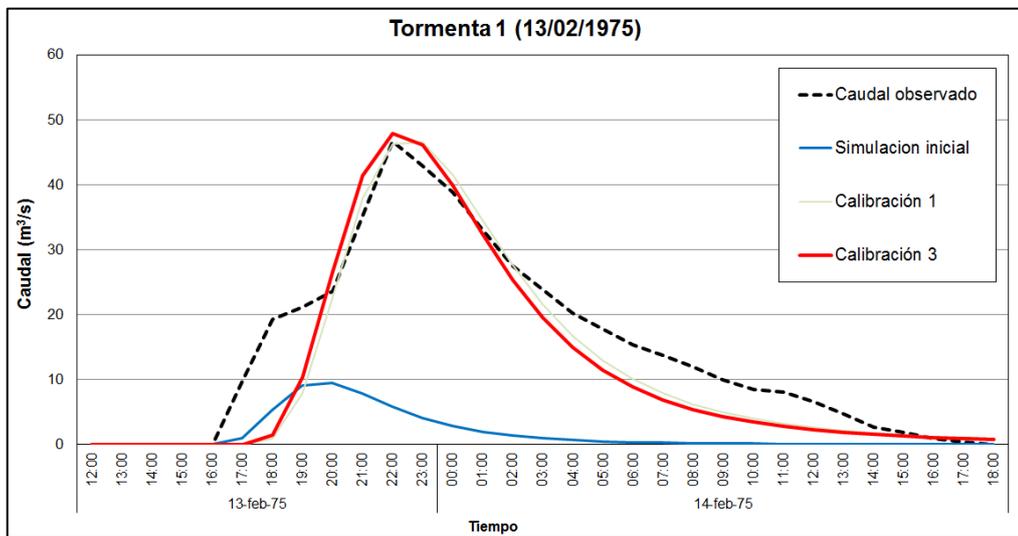


Figura 5.8 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 1.
 Fuente: Elaboración propia

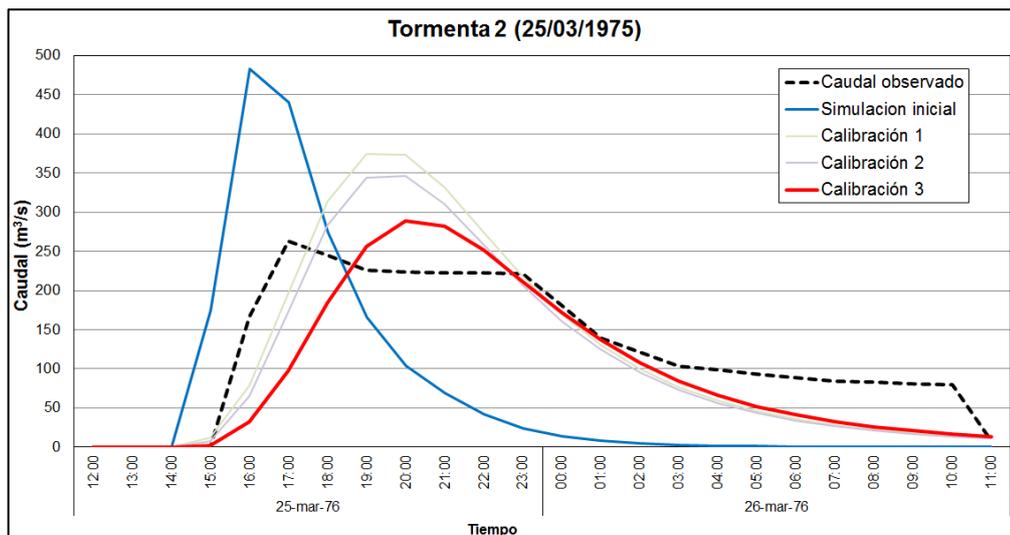


Figura 5.9 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 2.
 Fuente: Elaboración propia

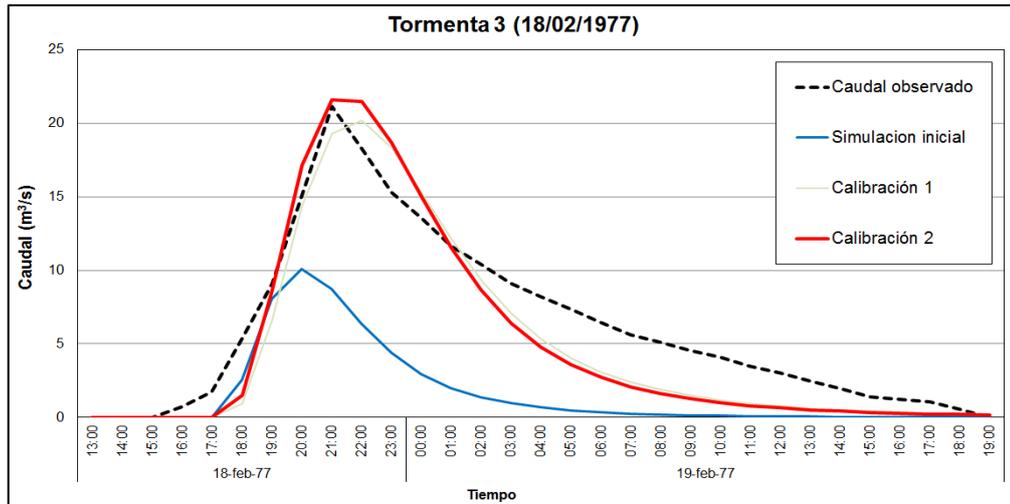


Figura 5.10 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 3.
 Fuente: Elaboración propia

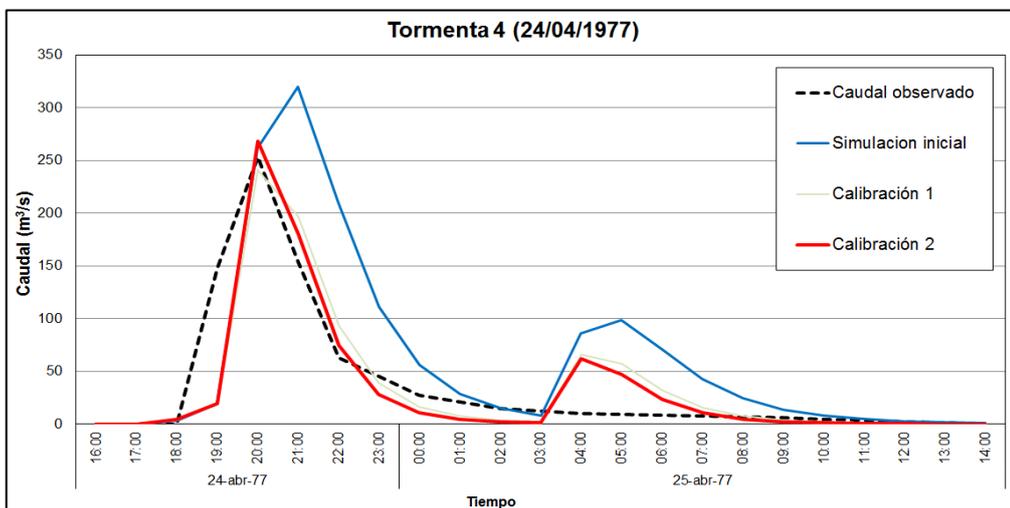


Figura 5.11 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 4.
 Fuente: Elaboración propia

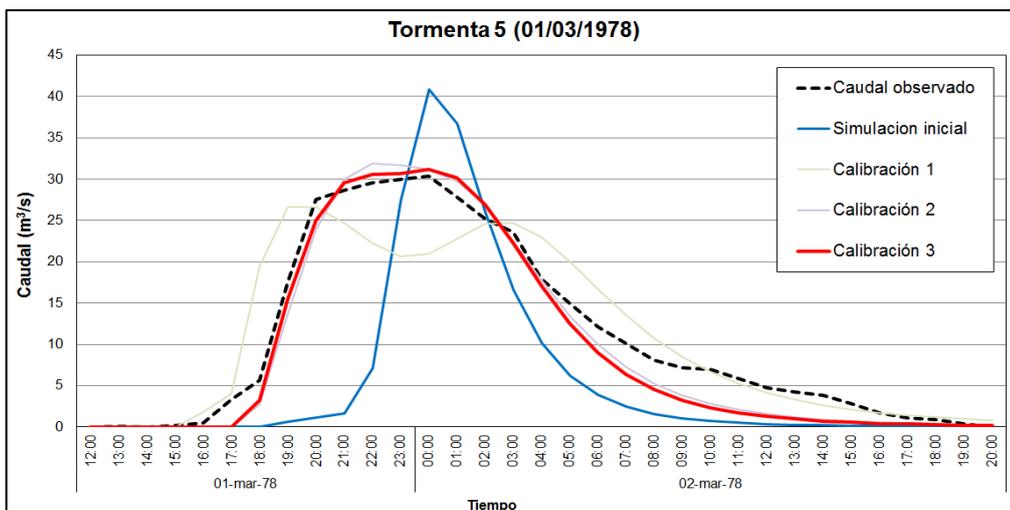


Figura 5.12 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

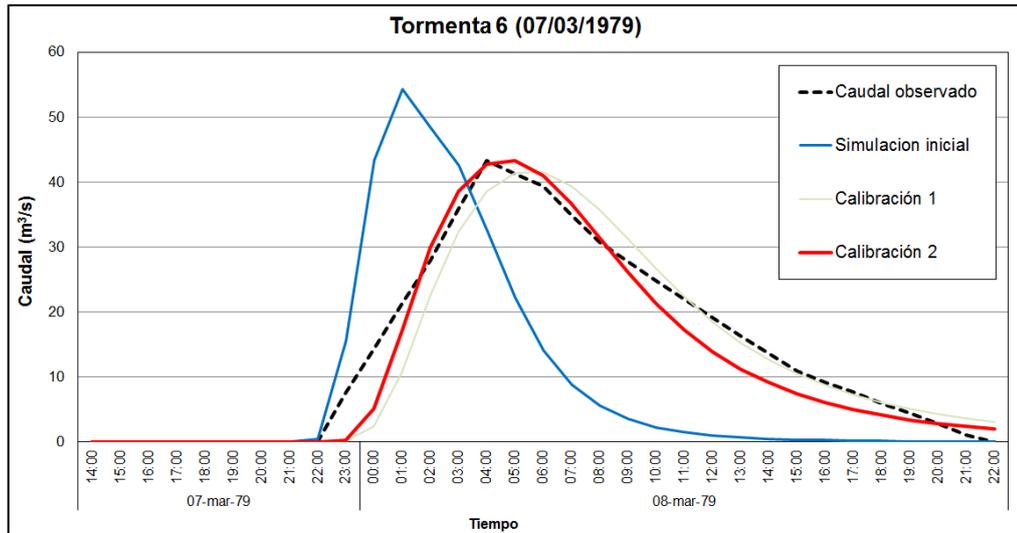


Figura 5.13 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 6.
 Fuente: Elaboración propia

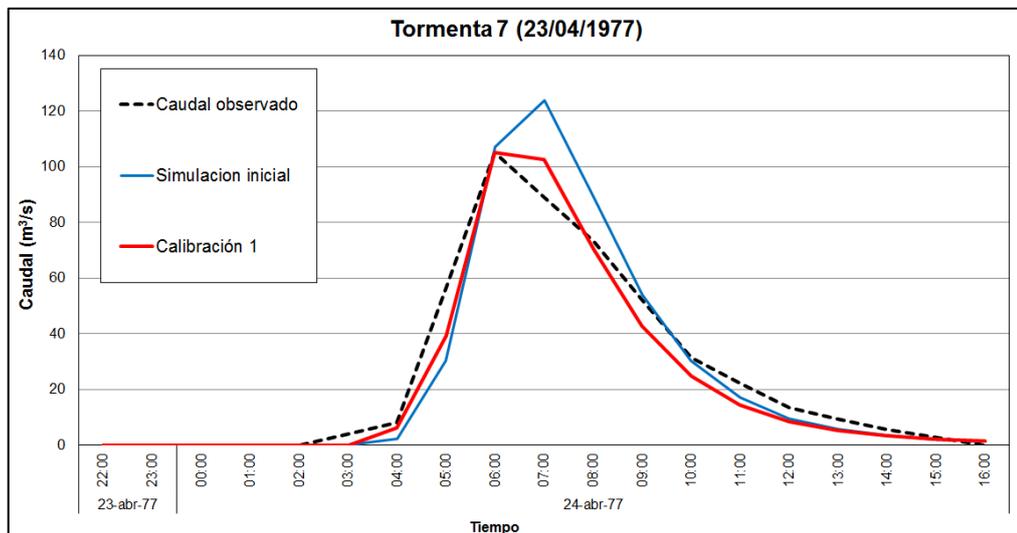


Figura 5.14 Resultados de Modelamiento TETIS, Tormenta 7.
 Fuente: Elaboración propia

Los factores de corrección iniciales utilizados en el modelamiento consideran un valor de 1; mientras que el porcentaje de humedad inicial varía entre 30 a 50% en función a su condición de humedad antecedente (AMC)

Los Tablas 5.4 y 5.5 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación.

Tabla 5.4: Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento TETIS

Tormenta	FC1	FC3	FC9	% Inic
Tormenta 1	0.71	0.80	0.30	28.6%
Tormenta 2	1.13	0.96	0.14	62.0%
Tormenta 3	0.89	0.99	0.42	39.3%
Tormenta 4	1.41	2	2.5	59.0%
Tormenta 5	0.81	0.98	0.58	41.0%
Tormenta 6	0.99	4.7	0.21	59.5%
Tormenta 7	0.93	4.04	0.87	48.7%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC), además los factores correctores relacionado a las pérdidas son cercanos a 1; a excepción de la Tormenta 4, la cual es la única que ocurre a finales del mes abril, en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una mejor concentración de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el factor corrector que aplica a las velocidades es mayor que en las demás tormentas. Por otro lado, la tormenta 4 presenta un pico predominante y posteriormente otro pico menor de precipitación, por ese motivo en el modelamiento se observan 2 picos de caudal en la simulación.

El Anexo IV muestra los mapas de parámetros de ingreso al modelo hidrológico TETIS para las siete tormentas analizadas.

Tabla 5.5: Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento TETIS

Tormenta	Caudal pico			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1 (36.2 mm)	46.7	47.9	2.6%	1.601	1.293	-19.2%	0.84
Tormenta 2 (64.5 mm)	260.8	288.4	10%	10.249	8.563	-19.4%	0.55
Tormenta 3 (23.8 mm)	21.2	21.6	1.9%	0.677	0.545	-19.5%	0.84
Tormenta 4 (51.2 mm)	253.2	268.5	6.0%	2.885	2.697	-6.5%	0.74
Tormenta 5 (43.4 mm)	30	31.1	3.7%	1.22	1.103	-9.6%	0.95
Tormenta 6 (41.2 mm)	43.3	43.3	0.0%	1.664	1.664	0.0%	0.95
Tormenta 7 (51.5 mm)	105.2	105.3	0.1%	1.705	1.535	-10.0%	0.96
	Promedio		3.5%	Promedio		-12.0%	0.83

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que 5 de las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, mientras que las tormentas 2 y 4 tienen un ajuste bueno y muy bueno. Se observa que generalmente tienen una menor eficiencia de ajuste que el modelo HMS.

En el Anexo V se detallan los resultados obtenidos en el modelamiento en TETIS.

5.3 MODELO DISCRETIZACIÓN HIDROLÓGICA DESACOPLADA IBER

5.3.1 Tormentas

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente (AMC). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados, siguiendo la metodología explicada en el capítulo 4.6.4.3 de la presente investigación.

En las Figuras 5.15 a 5.21 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación de cada tormenta, y además está comparado con los datos observados en campo.

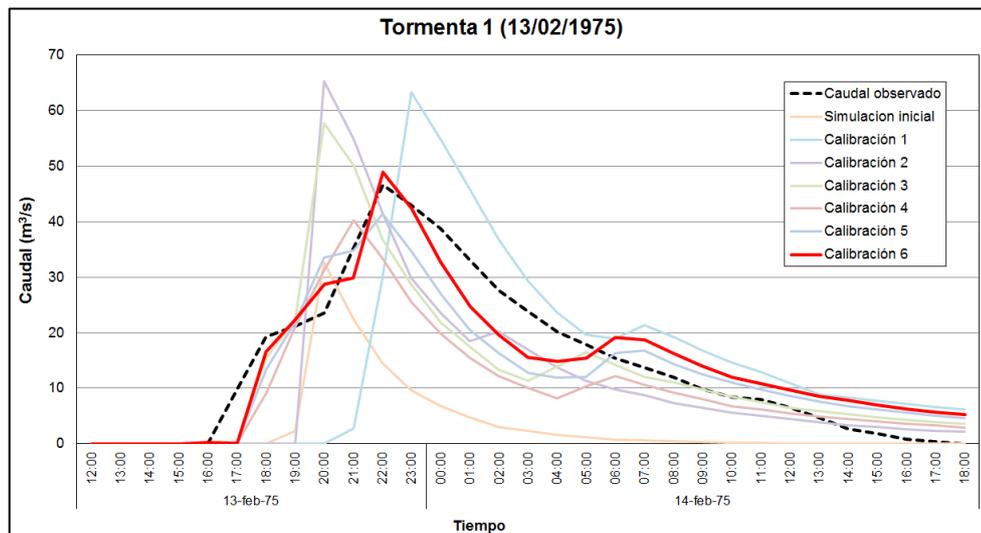


Figura 5.15 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 1.
Fuente: Elaboración propia

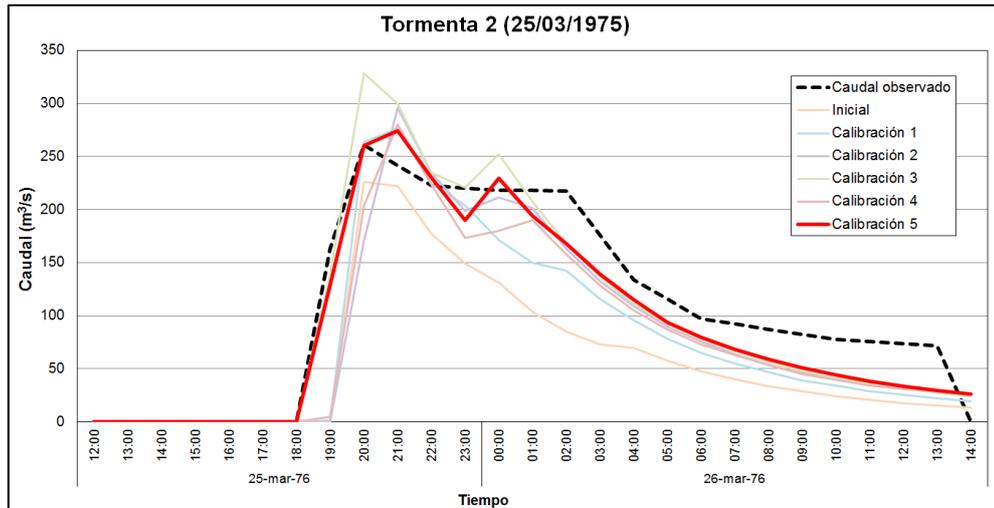


Figura 5.16 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 2.
 Fuente: Elaboración propia

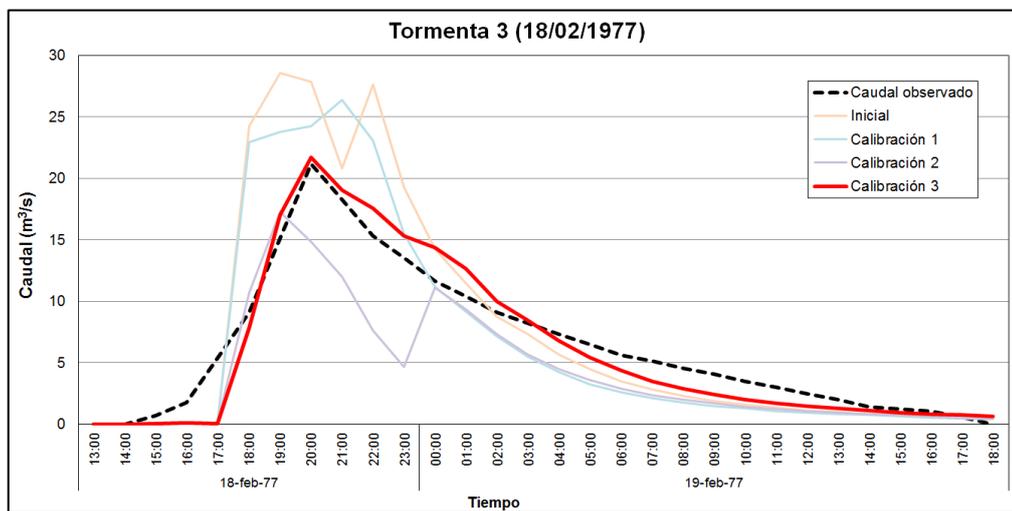


Figura 5.17 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 3.
 Fuente: Elaboración propia

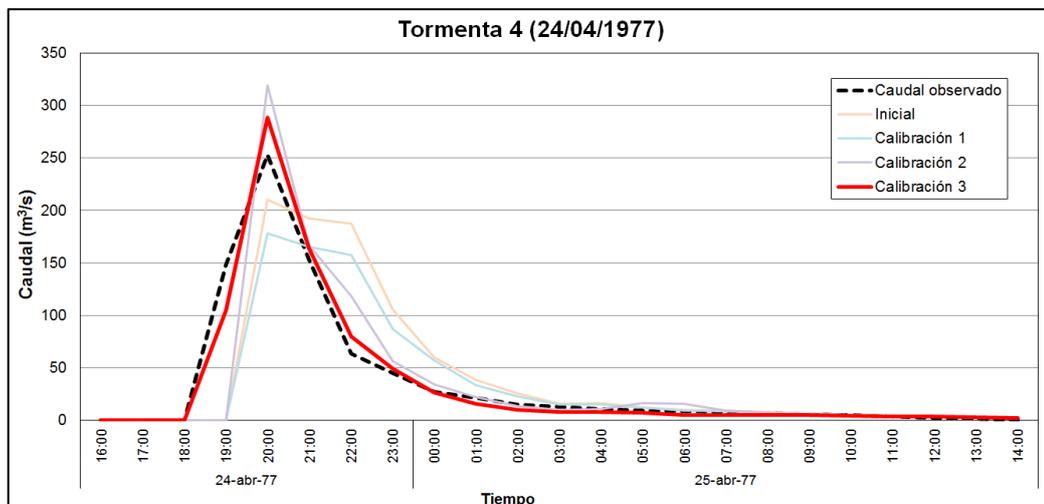


Figura 5.18 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 4.
 Fuente: Elaboración propia

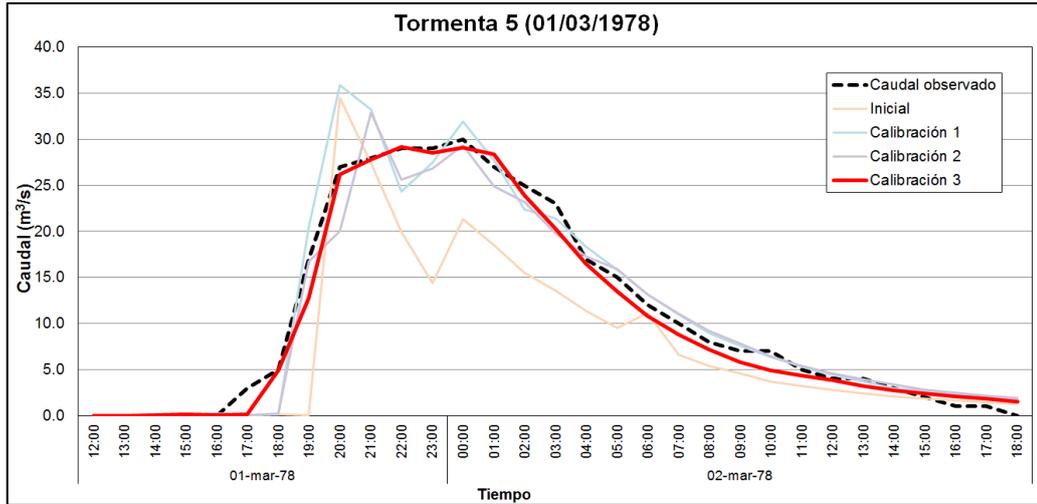


Figura 5.19 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

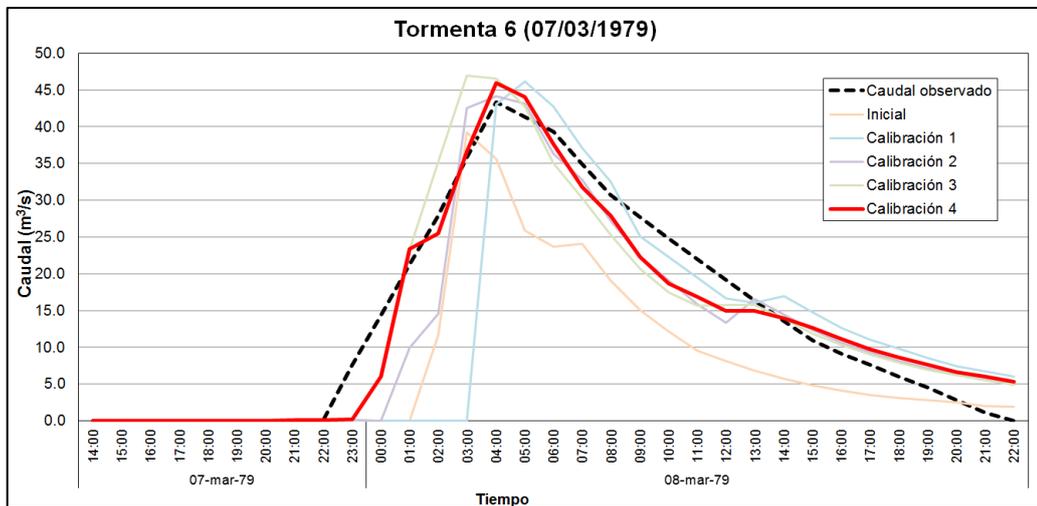


Figura 5.20 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 6.
 Fuente: Elaboración propia

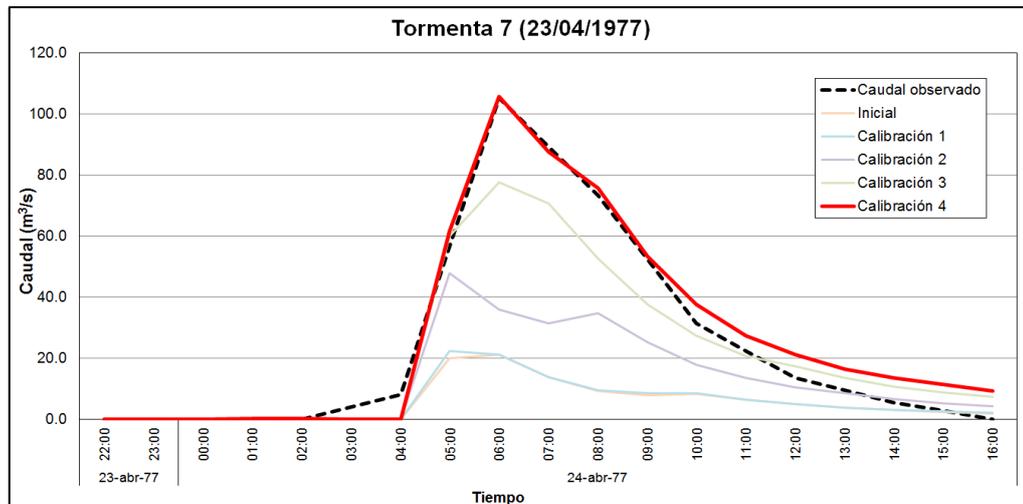


Figura 5.21 Resultados de Modelamiento IBER, Tormenta 7.
 Fuente: Elaboración propia

Los Tablas 5.6 y 5.7 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación. El Anexo IV muestra los mapas de parámetros calibrados de ingreso al modelo hidrológico IBER2D para las siete tormentas analizadas.

Tabla 5.6: Resumen de Parámetros Calibrados, Modelamiento IBER

Tormenta	Su	Sat	K	nt	nc
Tormenta 1	1000	0.40	0.97	0.35	0.140
Tormenta 2	1100	0.75	0.41	0.60	0.400
Tormenta 3	1100	0.40	0.80	0.38	0.100
Tormenta 4	550	0.80	7.67	0.15	0.025
Tormenta 5	900	0.35	0.25	0.38	0.040
Tormenta 6	1200	0.80	0.75	0.60	0.050
Tormenta 7	900	0.40	0.97	0.38	0.040

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC); a excepción de la Tormenta 4, la cual es la única que ocurre a finales del mes abril, en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una mejor concentración de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el coeficiente de Manning es menor que en las demás tormentas.

Tabla 5.7: Resumen de Resultados Calibrados, Modelamiento IBER

Tormenta	Caudal pico			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1 (36.2 mm)	46.7	48.9	4.7%	1.601	1.620	1.2%	0.87
Tormenta 2 (64.5 mm)	260.8	274.2	5.1%	10.249	8.837	-13.8%	0.93
Tormenta 3 (23.8 mm)	21.2	21.7	2.4%	0.677	0.649	-4.1%	0.92
Tormenta 4 (51.2 mm)	253.2	288.8	14.1%	2.885	2.870	-0.5%	0.96
Tormenta 5 (43.4 mm)	30	29.2	-2.7%	1.22	1.156	-5.2%	0.98
Tormenta 6 (41.2 mm)	43.3	46.0	6.2%	1.664	1.616	-2.9%	0.94
Tormenta 7 (51.5 mm)	105.2	105.7	0.5%	1.705	1.875	10.0%	0.98
	Promedio		4.3%	Promedio		-2.2%	0.94

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que todas las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, y presentan una bondad de ajuste ligeramente mejor que el modelo HMS.

5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.4.1 Tormenta 1

La Tabla 5.8 y la Figura 5.22 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.8: Comparación de Resultados, Tormenta 1

Tormenta 1	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	46.7	45	47.9	48.9
Volumen	1.601	1.502	1.293	1.620
NSE	1	0.92	0.84	0.87

Fuente: Elaboración Propia

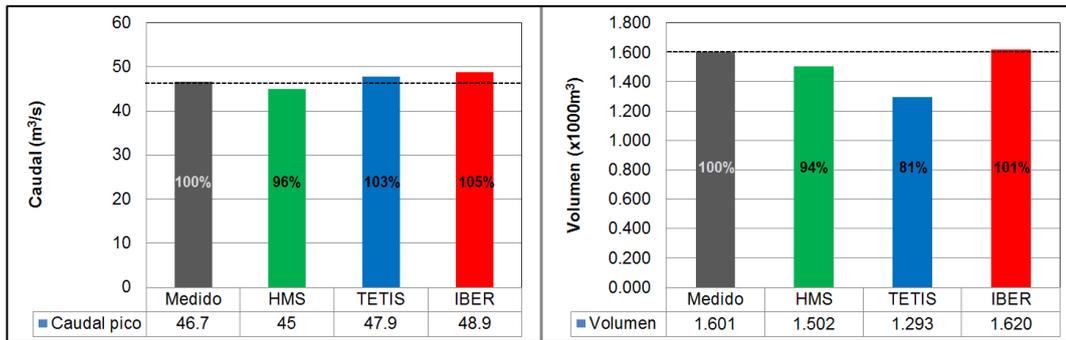


Figura 5.22 Comparación de Resultados, Tormenta 1.
 Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.23 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

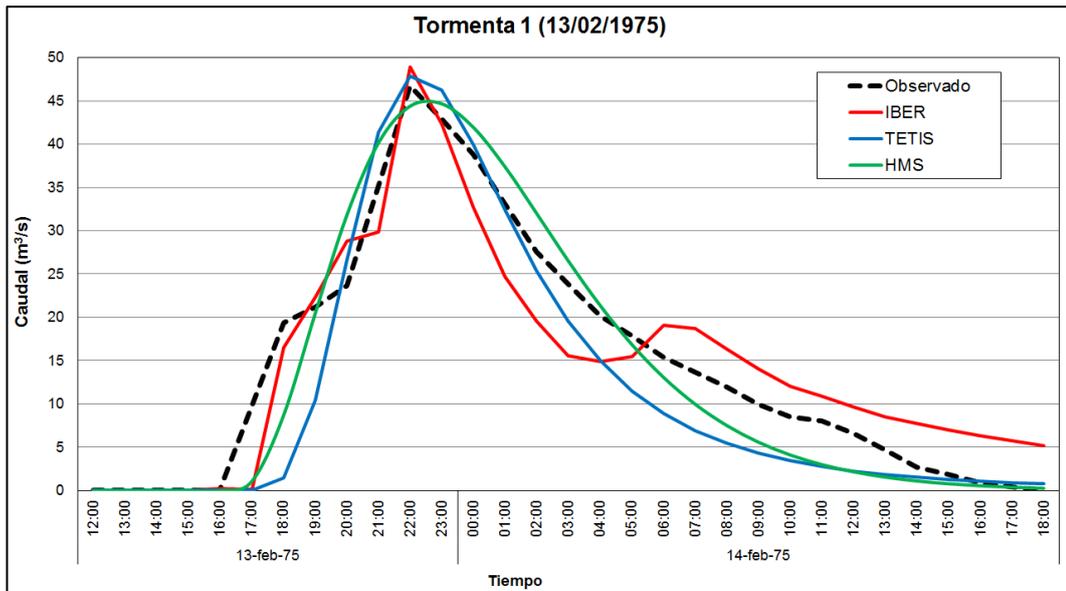


Figura 5.23 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 1.
 Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tres modelos tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe calificadas como “excelente”. Los valores de caudal pico simulados se encuentran en el rango $\pm 5\%$ del valor observado en campo, mientras que el volumen de escorrentía simulado es hasta un 19% menor en el modelo TETIS. Gráficamente los hidrogramas simulados en modelos HMS y TETIS son más parecidos al hidrograma observado; sin embargo, el volumen de escorrentía el modelo IBER es más aproximado.

5.4.2 Tormenta 2

La Tabla 5.9 y la Figura 5.24 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.9: Comparación de Resultados, Tormenta 2

Tormenta 2	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	260.8	260.6	288.4	274.2
Volumen	10.249	9.335	8.553	8.837
NSE	1	0.87	0.55	0.93

Fuente: Elaboración Propia

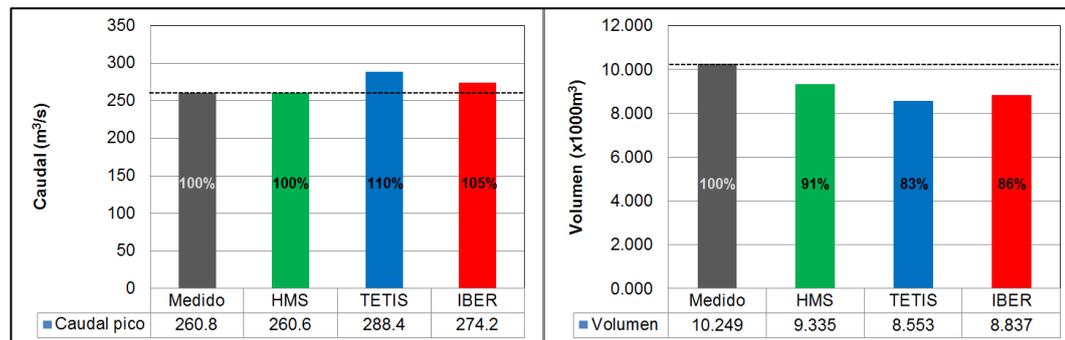


Figura 5.24 Comparación de Resultados, Tormenta 2.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.25 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

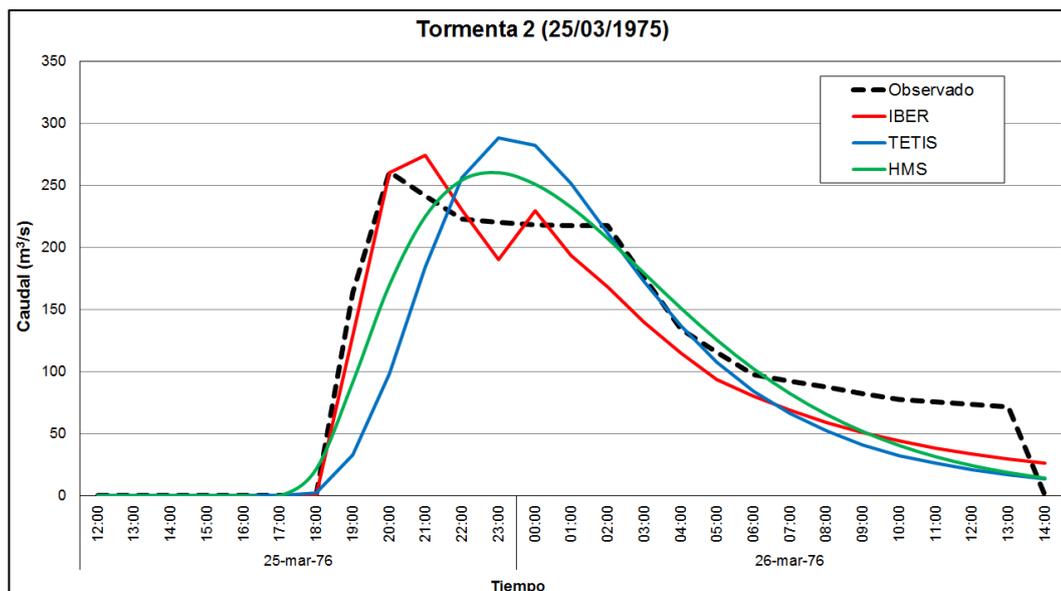


Figura 5.25 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 2.
 Fuente: Elaboración propia

Se observa que en los modelos HMS e IBER tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”, mientras que en el caso del modelo TETIS tiene una eficiencia “Buena”. Los valores de caudal pico simulados en los modelos HMS e IBER se encuentran en el rango +5% del valor observado, mientras que en el caso del modelo TETIS, es un 24% mayor. Por otro lado, el volumen de escorrentía simulado es hasta un 14% menor al volumen observado en todos los modelos. Gráficamente el hidrograma simulado que más se asemeja al hidrograma observado corresponde a la simulación en el modelo IBER.

5.4.3 Tormenta 3

La Tabla 5.10 y la Figura 5.26 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.10: Comparación de Resultados, Tormenta 3

Tormenta 3	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	21.2	17.9	21.6	21.7
Volumen	0.677	0.615	0.545	0.649
NSE	1	0.94	0.84	0.92

Fuente: Elaboración Propia

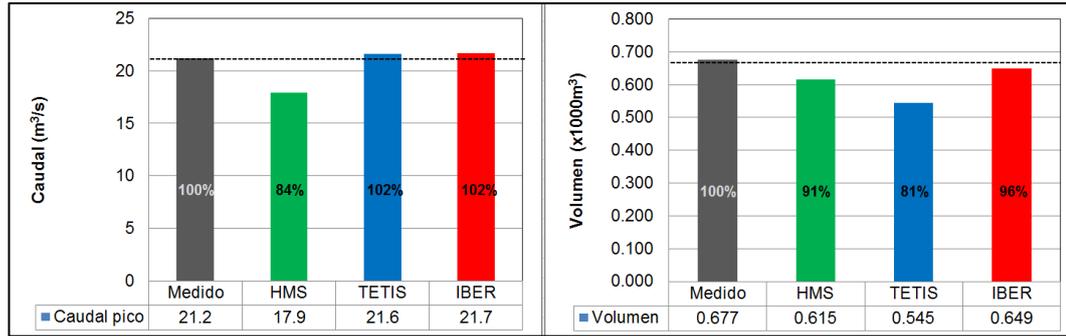


Figura 5.26 Comparación de Resultados, Tormenta 3.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.27 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

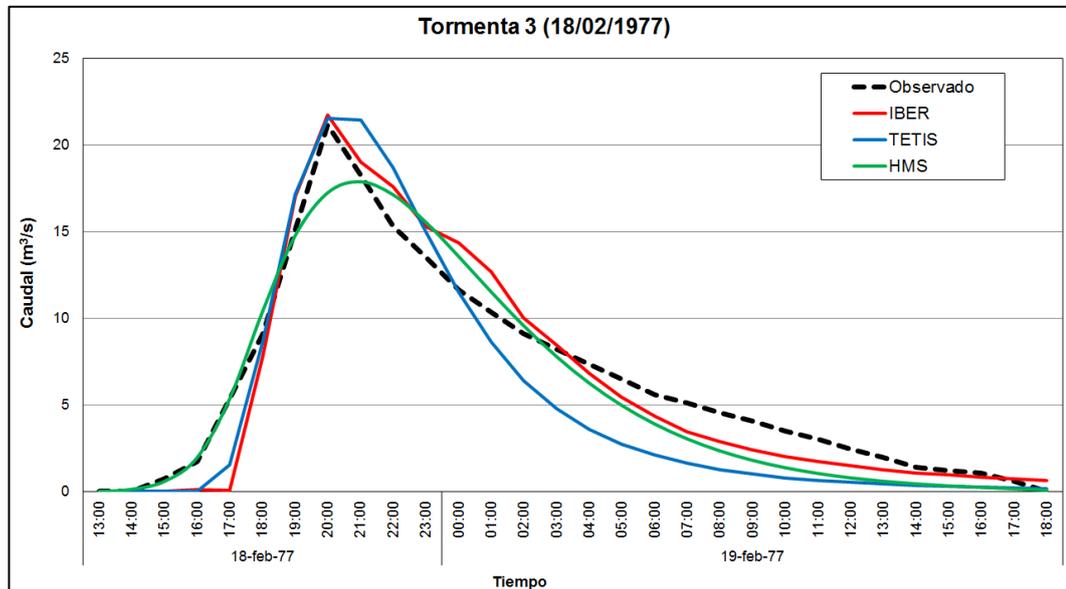


Figura 5.27 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 3.
Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tres modelos tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”. Los valores de caudal pico simulados se encuentran en el rango +2% del valor observado en campo en los modelos TETIS e IBER, mientras que en caso del modelo HMS es -16% a lo observado. Por otro lado, el volumen de escorrentía simulado es hasta un 19% menor en el modelo TETIS. Gráficamente los hidrogramas simulados en modelos TETIS e IBER son más parecidos al hidrograma observado.

5.4.4 Tormenta 4

La Tabla 5.11 y la Figura 5.28 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.11: Comparación de Resultados, Tormenta 4

Tormenta 4	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	253.2	237.6	268.5	288.8
Volumen	2.885	2.214	2.697	2.870
NSE	1	0.45	0.74	0.96

Fuente: Elaboración Propia

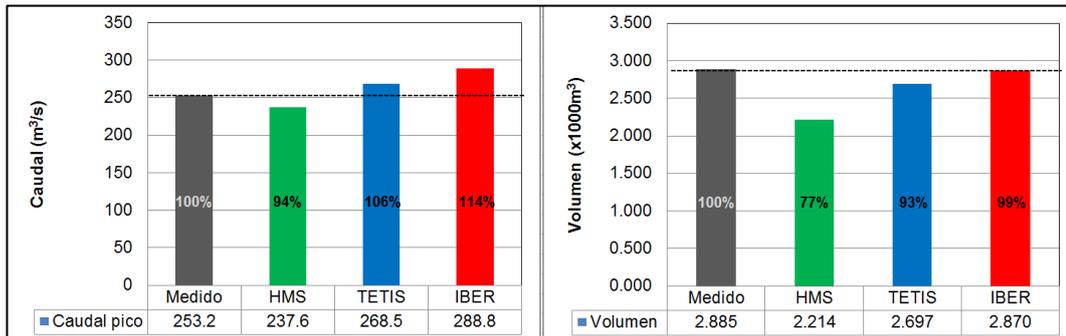


Figura 5.28 Comparación de Resultados, Tormenta 4.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.29 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

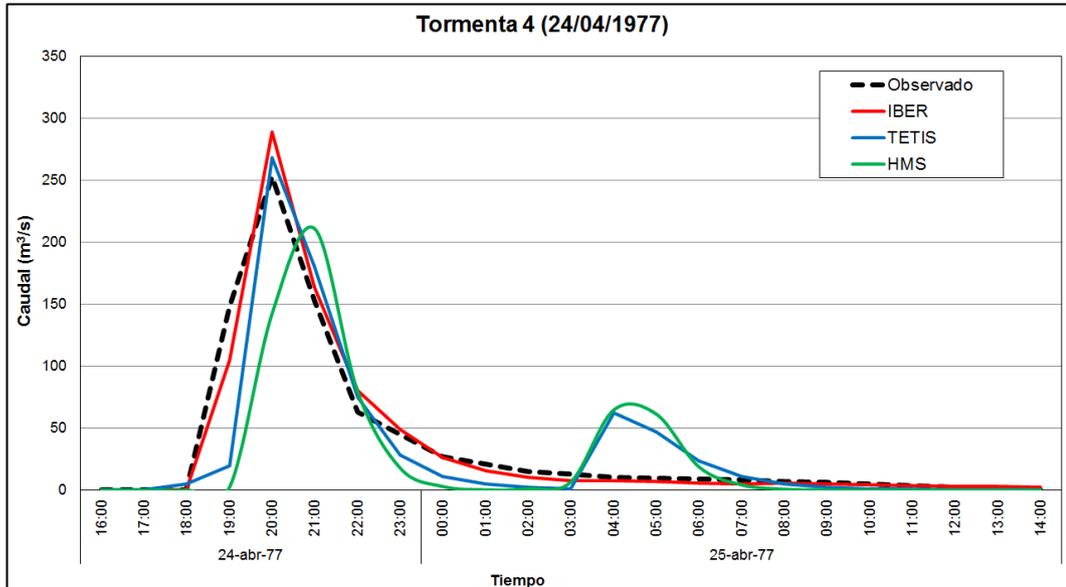


Figura 5.29 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 4.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el IBER tiene una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”, mientras que en el caso del modelo TETIS tiene una eficiencia “Muy Buena”, y en modelo HMS es “Buena”. Los valores de caudal pico simulados se encuentran en el rango $\pm 14\%$ del valor observado, siendo el valor mayor en el modelo IBER. Por otro lado, el volumen de escorrentía simulado es hasta un 23% menor al volumen observado, en caso del modelo HMS. Gráficamente el hidrograma simulado que más se asemeja al hidrograma observado corresponde a la simulación en el modelo IBER.

En la tormenta 4 se observa la ocurrencia de 2 picos, un primer pico predominante y posteriormente un segundo pico menor; por este motivo en los modelos HMS y TETIS, el hidrograma obtenido en el modelamiento presenta de igual manera 2 picos de caudal. Sin embargo, el hidrograma medido de la subcuenca solo muestra un pico y no el segundo, lo cual es debido a las características propias de la subcuenca que amortigua el segundo pico; de modo tal, que no se observa una respuesta en el hidrograma de respuesta. Esta característica no puede ser percibida ni ajustada en los modelos HMS y TETIS, puesto que son modelos que parten del principio de que un impulso de precipitación, generará una respuesta de caudal en ese mismo orden. Por otro lado, el modelo IBER2D si permite asignar parámetros de pérdidas y rugosidad en el cauce localizadas en cada parte de la subcuenca, lo cual permite amortiguar este segundo pico; de mal manera que el hidrograma simulado tenga un mejor ajuste al hidrograma observado.

5.4.5 Tormenta 5

La Tabla 5.12 y la Figura 5.30 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.12: Comparación de Resultados, Tormenta 5

Tormenta 5	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	30	31.9	31.1	29.2
Volumen	1.22	1.189	1.103	1.156
NSE	1	0.99	0.95	0.98

Fuente: Elaboración Propia

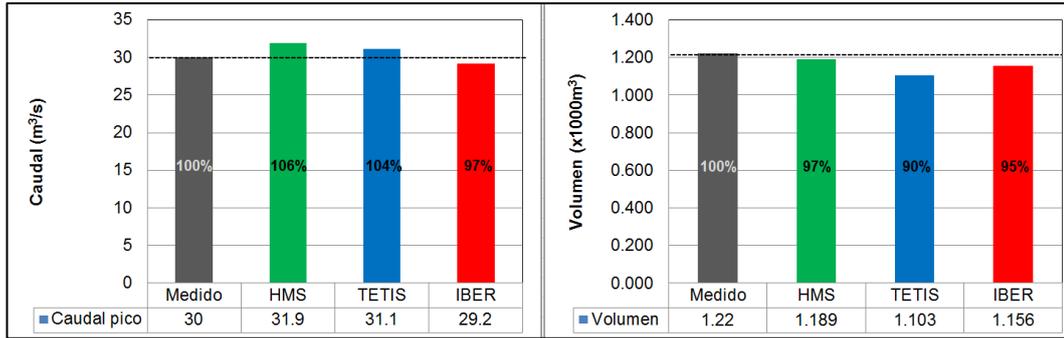


Figura 5.30 Comparación de Resultados, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.31 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

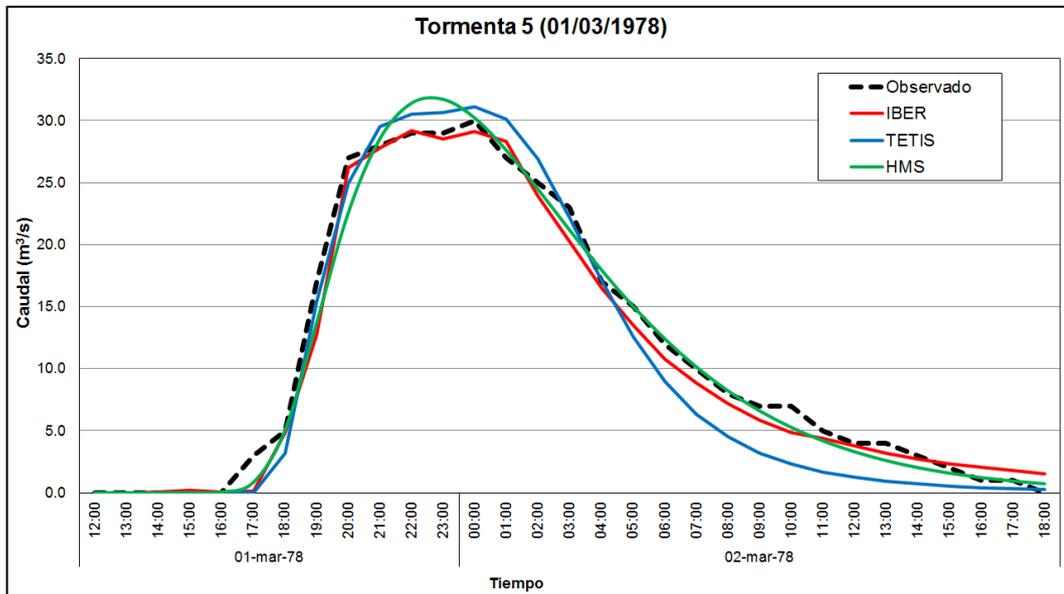


Figura 5.31 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tres modelos tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”. Los valores de caudal pico simulados se encuentran en el rango $\pm 6\%$ del valor observado en campo, mientras que el volumen de escorrentía simulado es hasta un 10% menor. Gráficamente los hidrogramas simulados en modelos HMS, TETIS e IBER son bien parecidos al hidrograma observado; siendo el modelo IBER el que tiene un ajuste aún mayor.

5.4.6 Tormenta 6

La Tabla 5.13 y la Figura 5.32 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.13: Comparación de Resultados, Tormenta 6

Tormenta 6	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	43.3	40.1	43.3	46
Volumen	1.664	1.656	1.664	1.616
NSE	1	0.99	0.95	0.94

Fuente: Elaboración Propia

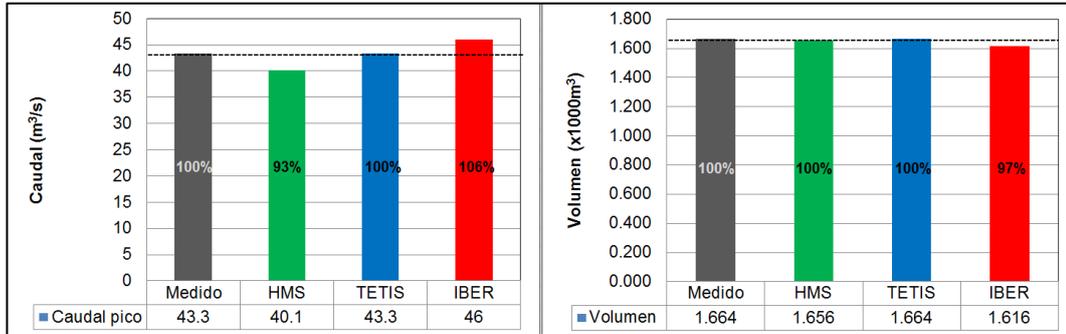


Figura 5.32 Comparación de Resultados, Tormenta 6.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.33 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

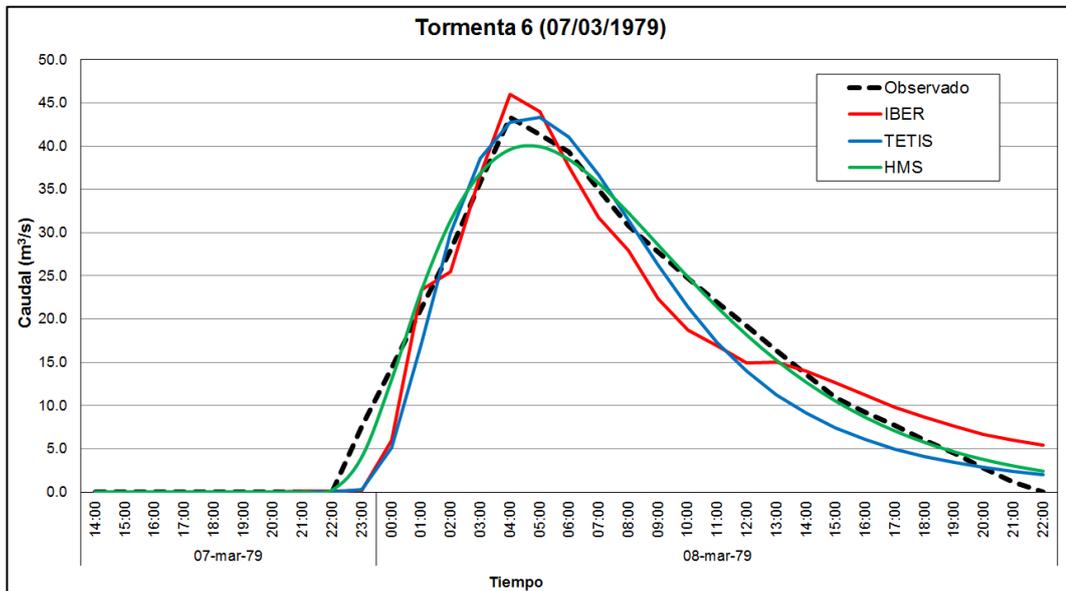


Figura 5.33 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 6.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los tres modelos tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”. Los valores de caudal pico simulados se encuentran en el rango $\pm 7\%$ del valor observado en campo, mientras que el volumen de escorrentía simulado es hasta un 3% menor. Gráficamente los hidrogramas simulados en modelos HMS, TETIS e IBER son bien parecidos al hidrograma observado.

5.4.7 Tormenta 7

La Tabla 5.14 y la Figura 5.34 muestran el resumen de resultados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

Tabla 5.14: Comparación de Resultados, Tormenta 7

Tormenta 7	Observado	HMS	TETIS	IBER
Caudal pico	105.2	91.5	105.3	105.7
Volumen	1.705	1.678	1.535	1.875
NSE	1	0.97	0.96	0.98

Fuente: Elaboración Propia

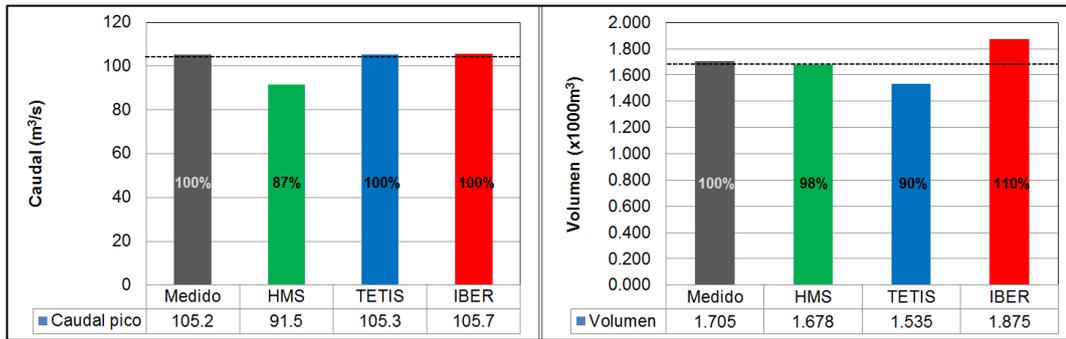


Figura 5.34 Comparación de Resultados, Tormenta 7.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.35 muestra los hidrogramas calibrados obtenidos con los 3 modelos hidrológicos.

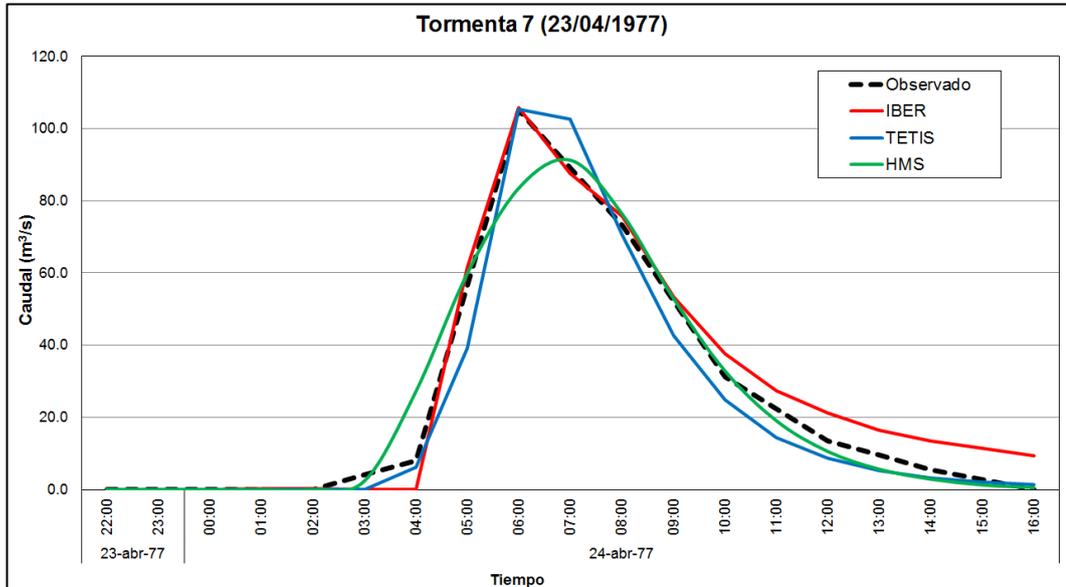


Figura 5.35 Comparación de Hidrogramas, Tormenta 7.

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo V se muestran los resultados de alturas de agua y velocidades máximas en toda el área la subcuenca Barrios, para cada una de las simulaciones calibradas de cada tormenta.

Se observa que los tres modelos tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe del tipo “excelente”. Los valores de caudal pico simulados son similares al observado en los modelos TETIS e IBER, mientras que en el modelo HMS es un 13% menor al valor observado en campo, Por otro lado, el volumen de escorrentía simulado se encuentra en el rango $\pm 10\%$ del valor observado en campo. Gráficamente los hidrogramas simulados en modelos HMS, TETIS e IBER se ajustan bien al hidrograma observado; siendo el modelo IBER que tiene un ajuste aún mayor.

La Tabla 5.15 muestra el resumen del tipo de eficiencia de Nash-Sutcliffe, en función de cada tormenta analizada y modelo utilizado.

Tabla 5.15: Resumen de Eficiencias de Nash-Sutcliffe por Tormenta

Tormenta	HMS	TETIS	IBER
Tormenta 1	Excelente	Excelente	Excelente
Tormenta 2	Excelente	Buena	Excelente
Tormenta 3	Excelente	Excelente	Excelente
Tormenta 4	Buena	Muy Buena	Excelente
Tormenta 5	Excelente	Excelente	Excelente
Tormenta 6	Excelente	Excelente	Excelente
Tormenta 7	Excelente	Excelente	Excelente

Fuente: Elaboración Propia

El modelo hidrológico agregado HMS, presenta un menor grado de complejidad para ser calibrado; el algoritmo de gradiente invariable – Newton Raphson, incluido en el módulo de calibración automática, suele llegar a su convergencia en un lapso de tiempo de 3 segundos. Mientras que en los modelos distribuidos el tiempo puede llegar a ser mucho mayor. En el caso del modelo TETIS, el algoritmo de evolución competitiva de complejos (SCE-UA), incluido en el módulo de calibración automática, suele llegar a su convergencia en un lapso de tiempo de 30 minutos. Finalmente, en el caso del modelo IBER, debido a la naturaleza de la simulación, no realiza calibraciones automáticas. El proceso de calibración se realiza con el método de prueba y error, que consiste en observar la respuesta de la cuenca en cada subcuenca interna, esto gracias a la visualización de resultados mientras se realiza la simulación. Cada simulación demora en realizarse aproximadamente 1 hora.

El modelo hidrológico HMS al ser un modelo agregado, presenta la forma del hidrograma definida que puede ser ajustada, en cierta forma, por los parámetros calibrados; sin embargo, no es capaz de representar las respuestas específicas definidas por la topografía de las laderas y los cauces de la subcuenca.

El modelo TETIS al ser distribuido puede representar en mejor manera el hidrograma de respuesta de la subcuenca puesto que se está representando las características topográficas y de parámetros en cada parte de la subcuenca. Sin embargo, no realiza la traslación sobre los cauces y se apoya de la ecuación de la onda cinemática para definir el movimiento del flujo, además el modelo aplica el concepto de tanques de almacenamiento en cada parte de la subcuenca que produce una respuesta a cada impulso de precipitación, lo cual no necesariamente ocurre tal como se ha observado en la tormenta 4 de la presente investigación.

Finalmente el modelo IBER2D resuelve las ecuaciones de aguas superficiales en toda la malla no estructurada que se acopla a la superficie topográfica; por lo cual, los valores obtenidos guardan relación con los resultados aledaños. Se puede calcular la escorrentía en cada parte de la subcuenca y además se tienen definidas las laderas y cauces en toda la subcuenca, con lo cual se realiza el cálculo hidráulico de traslación del flujo. El modelo IBER2D permite ajustar localmente los valores de rugosidad de las laderas y cauces, lo cual tiene influencia directa en la forma del hidrograma de respuesta.

En base a la eficiencia de Nash-Sutcliffe, el modelo IBER presentó un ajuste “Excelente” en todas las calibraciones de las tormentas analizadas”; es decir una eficiencia mayor a 0.8, siendo el modelo con mayor representatividad en los valores de caudal pico y volumen del hidrograma; Por otro lado, el modelo HMS presenta una calibración con una eficiencia “Buena”; es decir una eficiencia entre 0.4 y 0.6.; correspondiente a la Tormenta 4. Finalmente, el modelo TETIS presenta una calibración con una eficiencia “Muy Buena”; es decir una eficiencia entre 0.6 y 0.8; correspondiente a la Tormenta 4, y la Tormenta 2 que presenta una eficiencia “Buena”.

5.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la validación de los modelos hidrológicos estudiados; se ha subdividido las tormentas analizadas en dos grupos, en función de: el tamaño de la tormenta analizada, la magnitud del caudal pico observado y las características de humedad antecedente. A continuación se muestra la distribución de las tormentas consideradas en el proceso de validación.

Tabla 5.16: Subdivisión de Tormentas para Validación de resultados.

Subdivisión	Tormenta	Precipitación	Caudal pico	AMC
		mm	m ³ /s	-
Grupo I	Tormenta 1	36.2	46.7	I
	Tormenta 3	23.8	21.2	I - II
	Tormenta 5	43.4	30.4	I
Grupo II	Tormenta 2	64.5	263.5	II - III
	Tormenta 6	41.2	43.3	III

Fuente: Elaboración Propia

La Tormenta 4, como se explicó anteriormente, presenta un comportamiento atípico respecto a las demás tormentas; por lo cual, no es considerada en el proceso de validación; mientras que la Tormenta 7, presenta un tamaño de tormenta, caudal pico y condición de humedad antecedente que no corresponde a la subdivisión propuesta.

5.5.1 Modelo HEC-HMS

A continuación, se muestra los grupos de Tormentas I (1, 3 y 5) y II (2 y 6), en las cuales se han simulado cada tormenta con los parámetros calibrados de las demás tormentas del grupo.

Las Figuras 5.36 al 5.38 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo HEC-HMS, en el Grupo I.

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 1, 3 y 5; presentan un nivel de ajuste Excelente; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

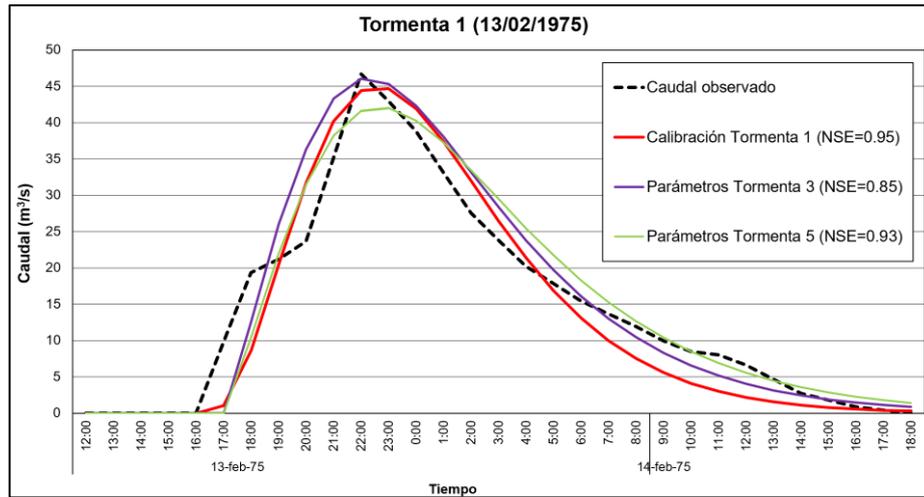


Figura 5.36 Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 1.
Fuente: Elaboración propia

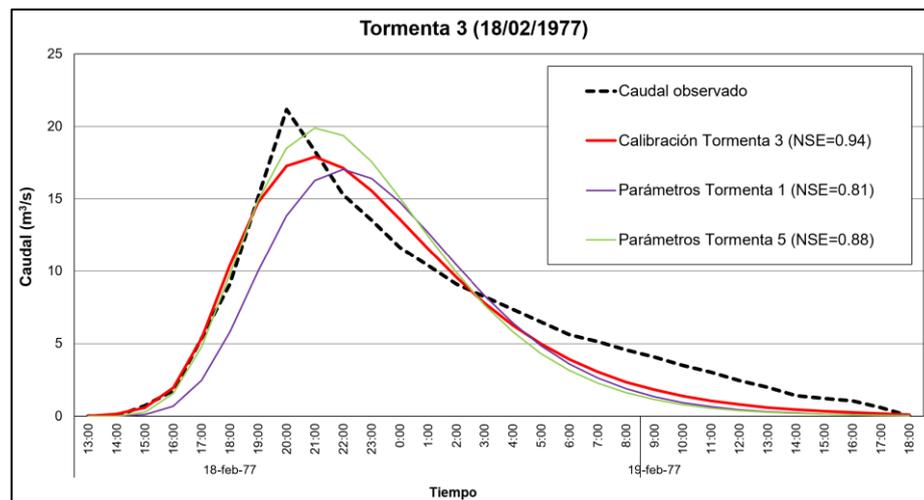


Figura 5.37 Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 3.
Fuente: Elaboración propia

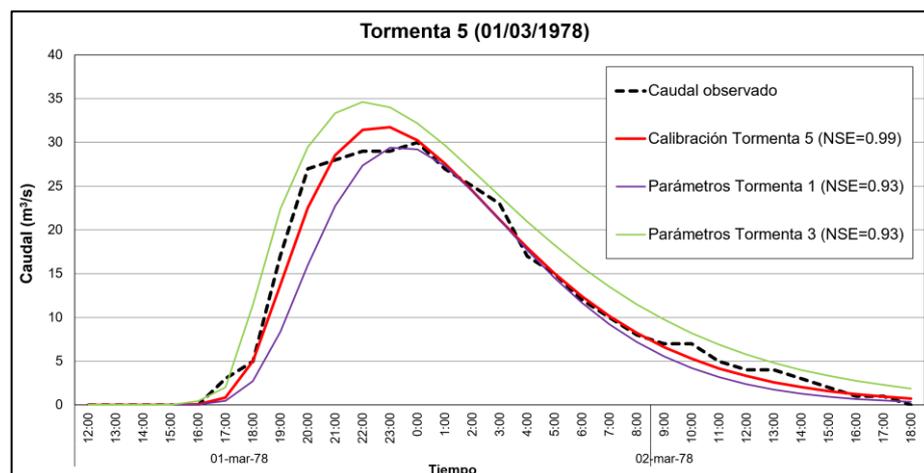


Figura 5.38 Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 5.
Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 5.39 y 5.40 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo HEC-HMS, en el Grupo II.

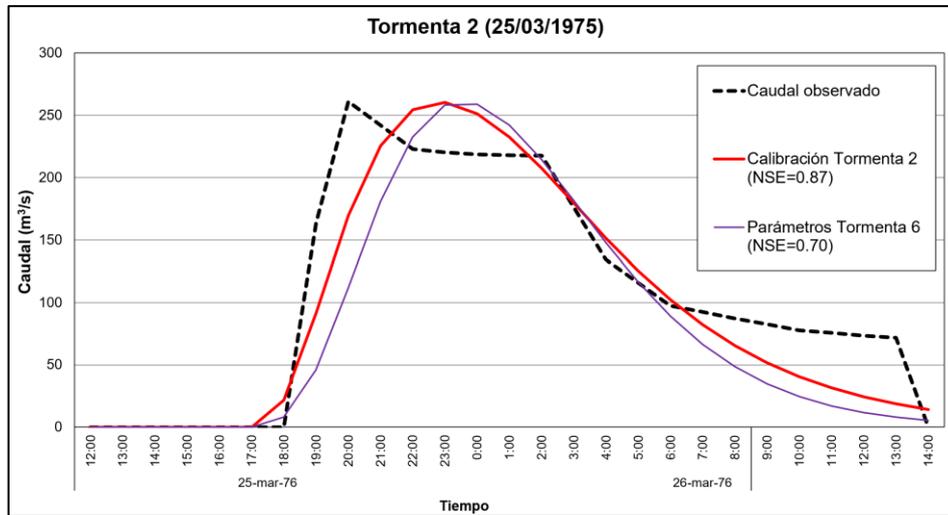


Figura 5.39 Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 2.
Fuente: Elaboración propia

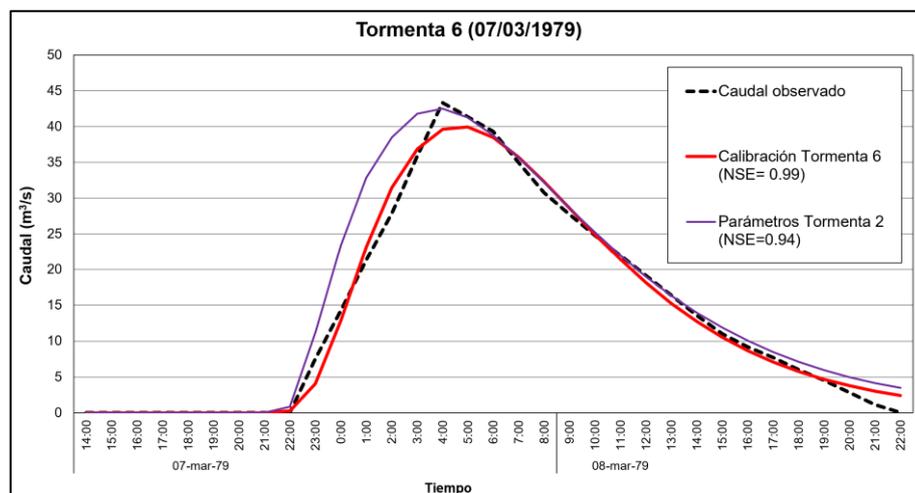


Figura 5.40 Validación del modelo HEC-HMS, Tormenta 5.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 2 y 6; presentan un nivel de ajuste Bueno; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

5.5.2 Modelo TETIS

A continuación, se muestra los grupos de Tormentas I (1, 3 y 5) y II (2 y 6), en las cuales se han simulado cada tormenta con los parámetros calibrados de las demás tormentas del grupo.

Las Figuras 5.41 al 5.43 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo TETIS, en el Grupo I.

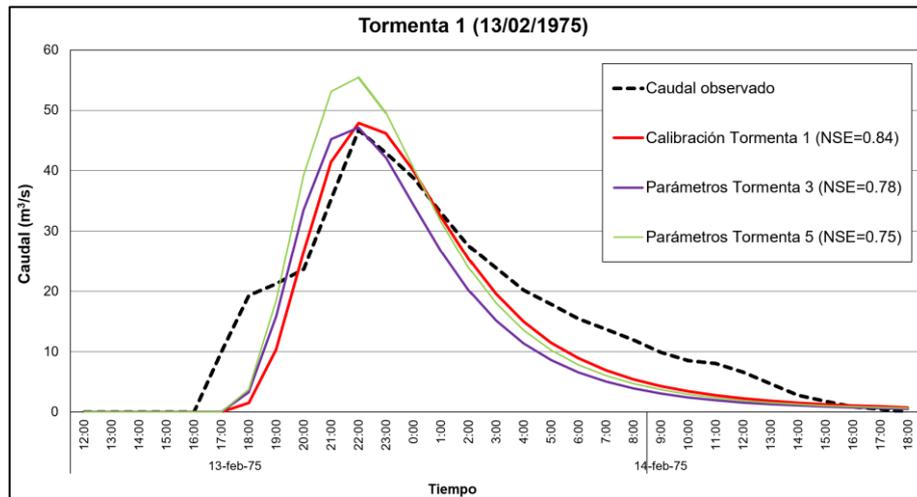


Figura 5.41 Validación del modelo TETIS, Tormenta 1.
 Fuente: Elaboración propia

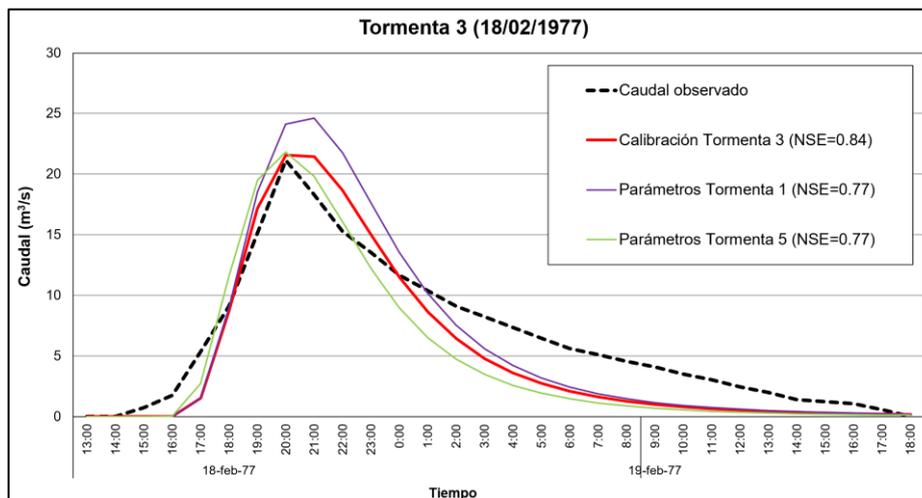


Figura 5.42 Validación del modelo TETIS, Tormenta 3.
 Fuente: Elaboración propia

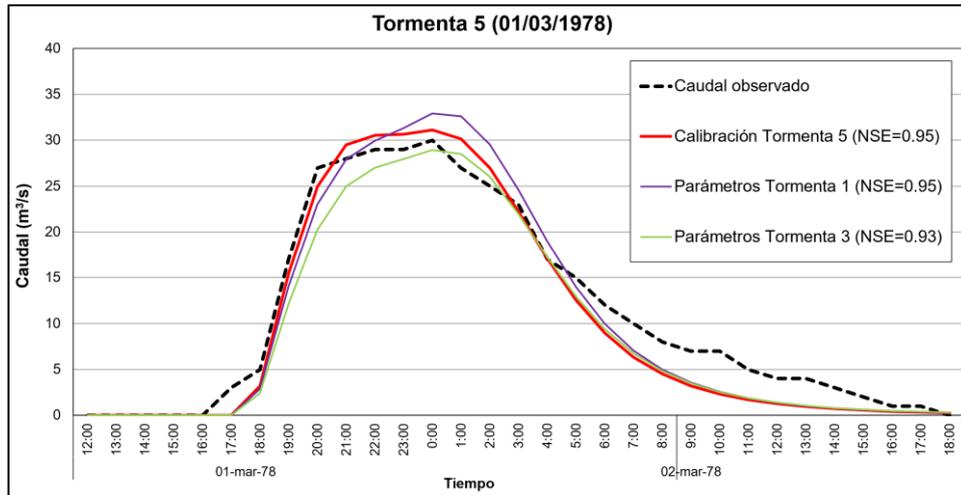


Figura 5.43 Validación del modelo TETIS, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 1, 3 y 5; presentan un nivel de ajuste Bueno; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

Las Figuras 5.44 y 5.45 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo TETIS, en el Grupo II.

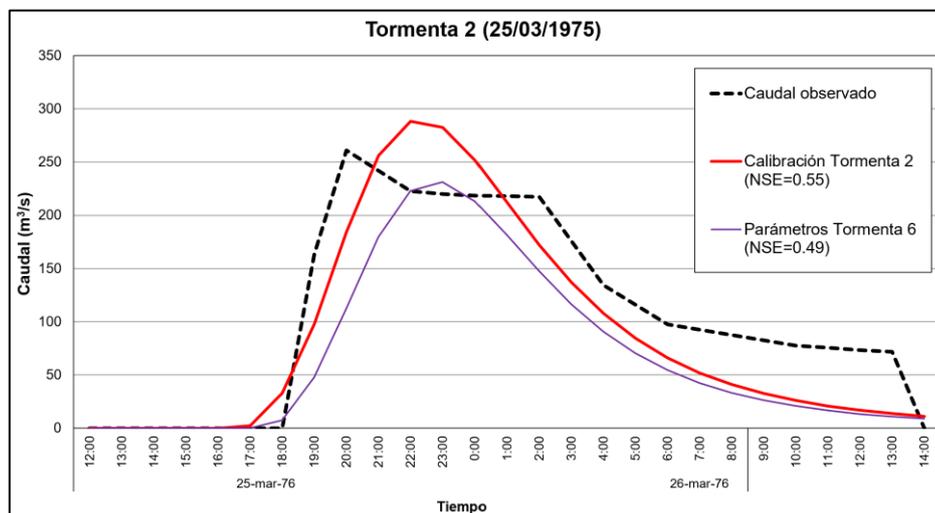


Figura 5.44 Validación del modelo TETIS, Tormenta 2.
 Fuente: Elaboración propia

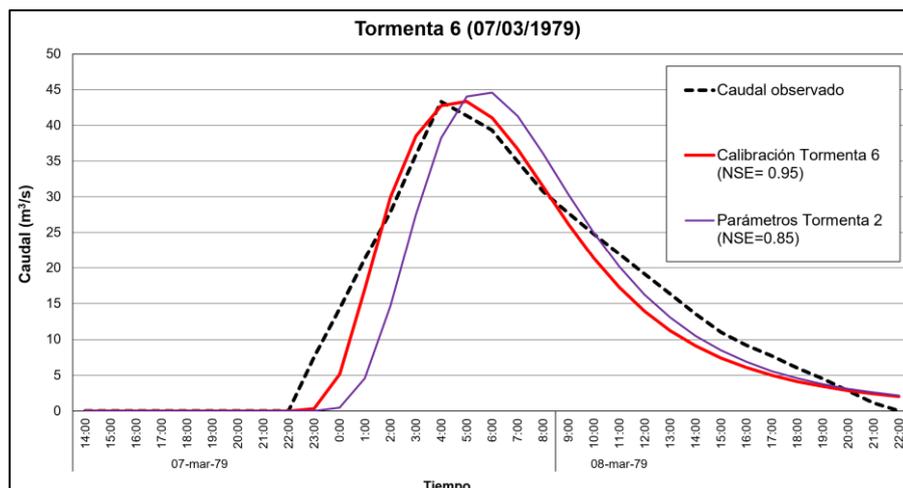


Figura 5.45 Validación del modelo TETIS, Tormenta 6.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 2 y 6; presentan un nivel de ajuste Bueno; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

5.5.3 Modelo IBER

A continuación, se muestra los grupos de Tormentas I (1, 3 y 5) y II (2 y 6), en las cuales se han simulado cada tormenta con los parámetros calibrados de las demás tormentas del grupo.

Las Figuras 5.46 al 5.48 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo IBER, en el Grupo I.

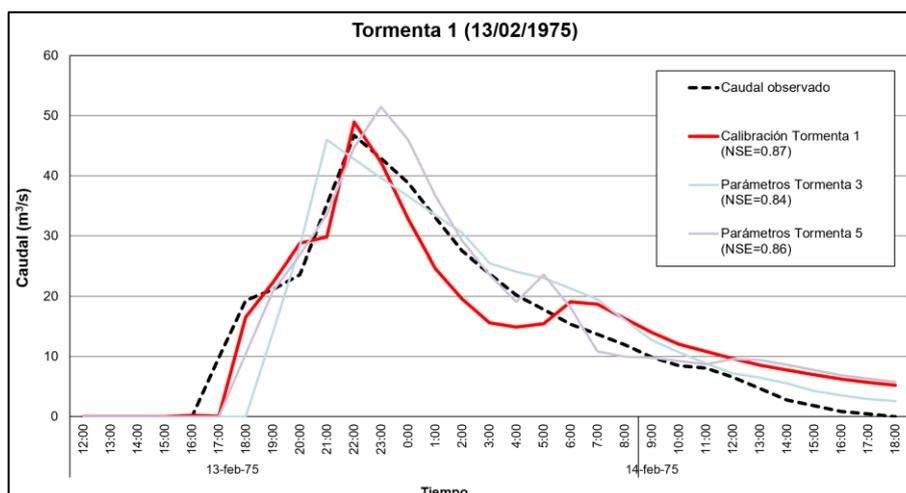


Figura 5.46 Validación del modelo IBER, Tormenta 1.
Fuente: Elaboración propia

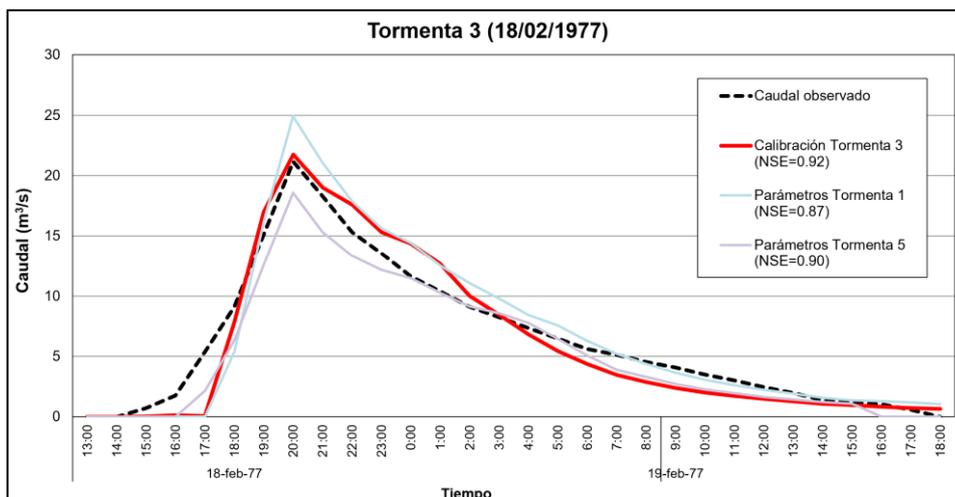


Figura 5.47 Validación del modelo IBER, Tormenta 3.
 Fuente: Elaboración propia

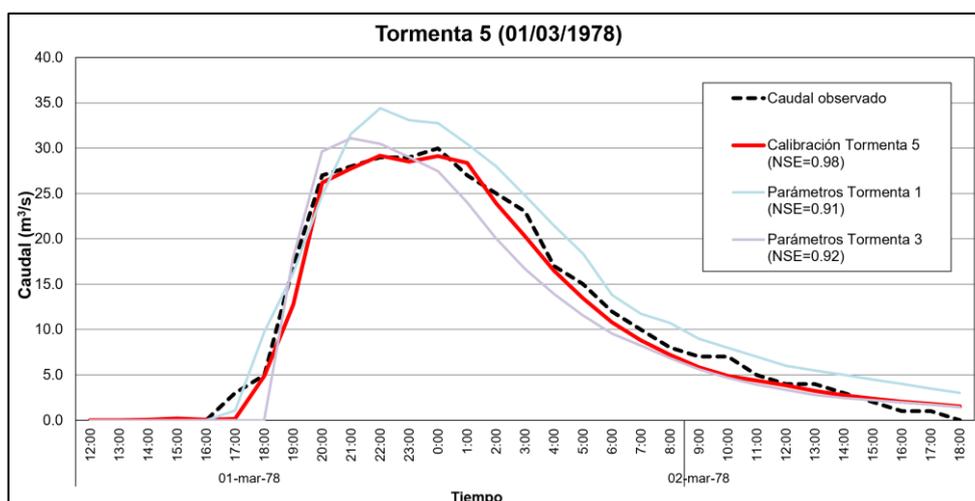


Figura 5.48 Validación del modelo IBER, Tormenta 5.
 Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 1, 3 y 5; presentan un nivel de ajuste Excelente; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

Las Figuras 5.49 y 5.50 muestra los hidrogramas obtenidos en la validación de los resultados de los parámetros calibrados del modelo IBER, en el Grupo II.

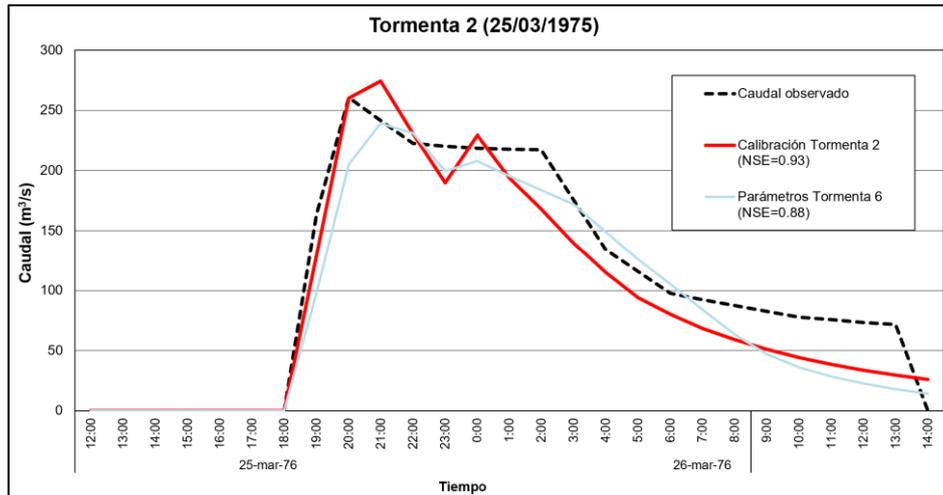


Figura 5.49 Validación del modelo IBER, Tormenta 2.
Fuente: Elaboración propia

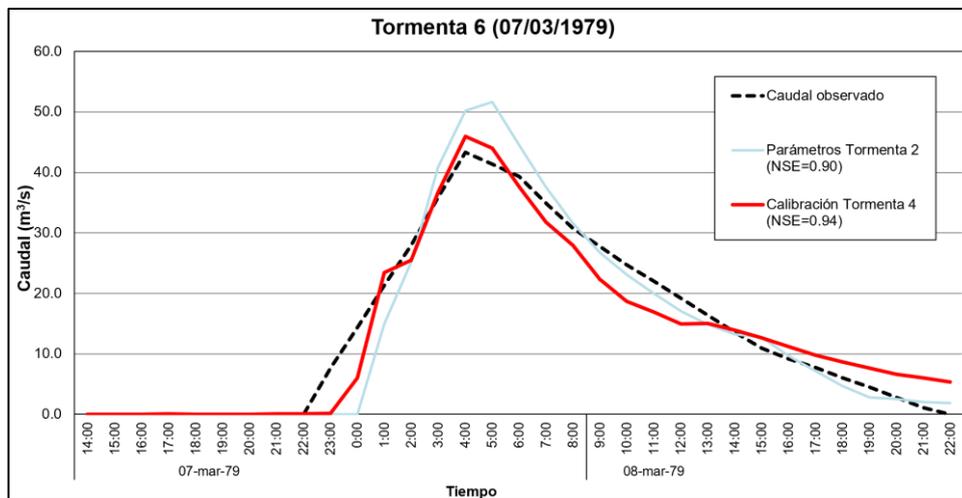


Figura 5.50 Validación del modelo IBER, Tormenta 6.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la validación de los parámetros utilizados en las Tormentas 2 y 6; presentan un nivel de ajuste Excelente; por lo tanto, se demuestra que los parámetros calibrados son capaces de predecir la respuesta de la cuenca de estudio, en otros eventos de tormenta similares.

CONCLUSIONES

Conclusiones relacionadas a los Objetivos y la Hipótesis de la presente investigación:

- a) El modelo IBER2D presentó la mejor eficacia de representatividad respecto a los modelos HMS y TETIS. La eficiencia de Nash-Sutcliffe promedio en el modelo IBER2D es de 0.94, mientras que en los modelos HMS y TETIS es 0.88 y 0.83, respectivamente. Por lo tanto, es factible el uso de este modelo para fines de diseño de la infraestructura hidráulica; adicionalmente, es posible incluir en el modelamiento las diferentes estructuras hidráulicas, tales como: defensas ribereñas, diques, pilares de puentes, disipadores de energía, bocatomas, etc. El modelo IBER2D genera el hidrograma de caudal producto de la escorrentía superficial en la cuenca y desarrolla un modelamiento hidráulico bidimensional, con el cual se determinan las características hidráulicas del flujo (alturas de agua, velocidades, número de Froude, etc.), que nos permiten desarrollar los diseños de ingeniería y predecir fenómenos de erosión y socavación.
- b) La performance de los modelos de transformación lluvia-escorrentía aplicado en la presente investigación, presentan resultados que se ajustan satisfactoriamente a los valores observados en campo. La eficiencia de Nash-Sutcliffe indica una eficiencia de “Buena” a “Excelente” en todas las simulaciones realizadas.
- c) Respecto a los valores de caudal pico en los hidrogramas calculados, el modelo IBER2D presentó una variación promedio de 4.3% respecto al caudal observado, mientras que en los modelos HMS y TETIS es de 5.6 y 5.4%, respectivamente.
- d) Respecto a los valores de volumen de los hidrogramas calculados, el modelo IBER2D presentó una variación promedio de 2.2% respecto al volumen observado, mientras que en los modelos HMS y TETIS es de 7.4 y 11%, respectivamente.
- e) El proceso de Validación verifica que los parámetros calibrados, en cada uno de los modelos hidrológicos evaluados, son capaces de predecir el

comportamiento de la cuenca en eventos de tormenta similares, con un ajuste de eficiencia “Buena” y “Excelente”.

- f) Los tres modelos hidrológicos evaluados son capaces de representar la respuesta hidrológica de la cuenca durante un evento de tormenta, presentándose un nivel de aproximación aceptable. Sin embargo, la base de cálculo hidráulica del modelo IBER2D, permite modelar el comportamiento del flujo en el cauce, determinándose las profundidades y velocidades del flujo en forma bidimensional, con lo cual es posible realizar el diseño de la infraestructura hidráulica.

Conclusiones relacionadas al modelo del Hidrograma Unitario SCS, simulado en HMS.

- a) Se verifican en seis de las tormentas evaluadas el criterio de humedad antecedente (AMC), que afecta a los parámetros de número de curva y tiempo de retardo, lo cual tiene una implicancia directa en los resultados. Para una humedad antecedente AMC I considera un número de curva mínimo de 41.5, mientras que en una AMC III es como máximo 74.8. Sin embargo, en la Tormenta 4 no se cumple este criterio.
- b) Los resultados indican que el criterio de considerar las abstracciones iniciales (I_a) como el 20% de la retención potencial máxima (S) no es correcta en la mayoría de las tormentas evaluadas en esta subcuenca. Solamente en las Tormentas 5 y 6 se verificó una “ I_a ” igual al 20% de “ S ”, en las demás tormentas fue aproximadamente el 9%.
- c) Los resultados de las simulaciones en el modelo HMS, indican que el caudal pico simulado se encuentra en promedio un 5.6% menor al caudal observado en campo; siendo como máxima variación -15.6% en la Tormenta 3, y mínima variación -0.1% en la Tormenta 2, teniendo una eficiencia de Nash-Sutcliffe “excelente” en casi todas las tormentas, a excepción de la Tormenta 4, que tiene una eficiencia “Buena”.
- d) Los resultados de las simulaciones en el modelo HMS, indican que el volumen total de escorrentía simulado se encuentra en promedio un 7.4%

menor al volumen observado en campo; teniendo como máxima variación -23.3% en la Tormenta 4, y mínima variación -0.5% en la Tormenta 6.

Conclusiones relacionadas al modelo de Tanques de Almacenamiento Tetis, simulado en TETIS.

- a) Se verifican en las siete tormentas evaluadas el criterio de humedad antecedente (AMC), que afecta a los parámetros de porcentaje de humedad inicial, que para una humedad antecedente AMC I considera un porcentaje de humedad inicial como mínimo de 28.6%, mientras que en una AMC III es como máximo 62%. Es decir, tiene una implicancia directa en los resultados. Se ha verificado en cada tormenta, que el valor asignado de humedad inicial, guarda relación con el criterio de humedad antecedente (AMC) en cada tormenta.
- b) El factor de corrección que aplica al almacenamiento estático (FC1), que incluye las pérdidas en el primer tanque; que consiste en evaporación, retención, etc. en el suelo y cobertura superficial, no presenta una significativa variación respecto a los parámetros obtenidos bibliográficamente, siendo en promedio 0.97, con un factor mínimo es 0.71 en la Tormenta 1, y el máximo 1.41 en la Tormenta 4.
- c) El factor de corrección que aplica a la infiltración (FC3) en la mayor parte de las tormentas (Tormentas: 1, 2, 3 y 5); no presenta una significativa variación respecto a los parámetros obtenidos bibliográficamente, siendo en promedio 0.93, con un factor mínimo de 0.80 en la Tormenta 1, y el máximo 0.99 en la Tormenta 3. Sin embargo, en las Tormentas 4, 6 y 7, si presentan una variación significativa, siendo en promedio 3.58, con un factor mínimo de 2 en la Tormenta 4, y el máximo 4.7 en la Tormenta 6. Esto puede estar ocurriendo porque en estas tormentas, la condiciones de humedad antecedente es AMC III.
- d) El factor de corrección que aplica a las velocidades de ladera (FC9), es en promedio 0.42, con un factor mínimo de 0.15 en la tormenta 2, y el máximo 0.87 en la Tormenta 7. Esto puede generarse debido a que en los meses de verano, los sembríos se encuentran en su fase de maduración y por tanto existe abundante vegetación; sin embargo, a finales de abril, que es

donde ocurre la Tormenta 4, los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una menor cantidad de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el factor correcto de velocidad es 2.5.

- e) Los resultados de las simulaciones en el modelo TETIS, indican que el caudal pico simulado se encuentra en promedio un 5.4% mayor al caudal observado en campo; siendo como máxima variación 23.7% en la Tormenta 2, y mínima variación 0% en la Tormenta 6. Teniendo una eficiencia de Nash-Sutcliffe “excelente” en varias las tormentas, a excepción de la Tormentas 2 y 4, que tienen una eficiencia “Buena” y “muy Buena”, respectivamente.
- f) Los resultados de las simulaciones en el modelo TETIS, indican que el volumen total de escorrentía simulado se encuentra en promedio un 11% menor al volumen observado en campo; teniendo como máxima variación -19.2% en la Tormenta 1, y mínima variación 0% en la Tormenta 6.

Conclusiones relacionadas al modelo de Discretización Hidrológica Desacoplada (DHD), simulado en IBER.

- a) Se verifican en las siete tormentas evaluadas el criterio de humedad antecedente (AMC), que afecta a los parámetros de saturación inicial, que para una humedad antecedente AMC I considera una saturación inicial como mínimo de 0.35 mientras que en una AMC III es como máximo 0.80. Es decir, tiene una implicancia directa en los resultados.
- b) La carga de succión del suelo en el frente mojado promedio de las simulaciones calibradas es 1 033 mm, que es un valor que se encuentra dentro del rango de parámetros de los suelos finos, tales como arcillas y limos; con un valor de succión promedio mínimo de 900 en las Tormentas 5 y 7, y el máximo de 1 200 mm en la Tormenta 7. Sin embargo, en la calibración de la tormenta 4, tiene un valor de succión de 550 mm, que considera un suelo limo arenoso.
- c) El parámetro de capacidad de infiltración promedio de las simulaciones calibradas es 0.69 mm/hr, que es un valor que se encuentra dentro del

rango de parámetros de los suelos finos, tales como arcillas y limos; con un valor de capacidad de infiltración mínimo de 0.25 mm/hr en la Tormenta 5, y el máximo de 0.97 mm/hr en las Tormentas 1 y 7. Sin embargo, en la calibración de la tormenta 4, tiene un valor de capacidad de infiltración de 7.67 mm/hr, que considera un suelo limo arenoso.

- d) El parámetro del coeficiente de Manning promedio, en las laderas de la subcuenca Barrios, de las simulaciones calibradas es 0.45; que corresponde a cauces con vegetación muy alta. Además, es un valor alto debido a que las alturas de agua en las corrientes de escorrentía en las laderas de la cuenca, son de poca profundidad y el efecto de la fricción del fondo tiene una influencia mucho mayor en el movimiento del flujo, que en caso de canales, con alturas de agua mayores. En el caso de los cauces, se tiene un coeficiente de Manning promedio de 0.066, que corresponde a un cauce con vegetación media a alta.
- e) Los resultados de las simulaciones en el modelo IBER, indican que el caudal pico simulado se encuentra en promedio un 4.3% mayor al caudal observado en campo; siendo como máxima variación +14.1% en la Tormenta 4, y mínima variación -2.7% en la Tormenta 5. Teniendo una eficiencia de Nash-Sutcliffe “excelente” en todas las tormentas.
- f) Los resultados de las simulaciones en el modelo IBER, indican que el volumen total de escorrentía simulado se encuentra en promedio un 2.2% menor al volumen observado en campo; teniendo como máxima variación -13.8% en la Tormenta 2, y mínima variación -0.5% en la Tormenta 4.

RECOMENDACIONES

- a) Evaluar el proceso de erosión, sedimentación y transporte de sedimentos; que pueden ser simulados y calibrados en el modelo IBER2D, siguiendo la metodología de discretización hidrológica desacoplada, mediante ecuaciones numéricas aplicadas en una malla de cálculo representada en la topografía de la cuenca, además permite generar los mapas de erosión y deposición de materiales.
- b) Evaluar la performance del modelo IBER2D en cuencas costeras y amazónicas; y evaluar si es representativa en este tipo de cuencas que tienen una cobertura con diferentes características a las evaluadas en la presente investigación.
- c) Evaluar el performance del modelo IBER2D y TETIS en modelos hidrológicos continuos, donde la escala de tiempo ya no será horario, sino diaria y mensual. Esto permite hacer evaluación de la proyección disponibilidad hídrica y/o cambio climático.
- d) Implementar algoritmos de calibración automática en el modelo IBER2D, el cual permita ajustar por parámetros espacialmente; esto permitirá tener mejores calibraciones con menor dificultad y tiempo de simulación. Se pueden desarrollar metodologías de calibración, las cuales permitan la variabilidad de los parámetros y ser aplicados en el esquema numérico de volúmenes finitos utilizado por el modelo IBER2D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bladé, E; Caro, C (2015). “Modelación Hidrológica Distribuida basada en Esquemas de Volúmenes finitos”, Tesis para optar el título de doctorado Facultad de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Cea, L; Bladé, E (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51, 5464-5486, AGU Publications.

Chow, V. (1959). *Open Channel Hydraulics*, New York, USA, McGraw-Hill.

Chow, V. Maidment D. R. y Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*, New York, USA, McGraw-Hill.

Dávila, M. y Francés, F. (2011). Trabajo Fin de Maester “Modelación Distribuida con TETIS dentro del marco del proyecto Comparación de modelos distribuidos del NWS de EEUU Aplicado en la Región de Oklahoma”, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.

Duan, Q. W. Sorooshian, S. y Gupta V. K. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol. 24, N° 7, p. 1163-1173.

Duan, Q. W. Sorooshian, S. y Gupta V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, Vol. 158, p. 265-284.

Dunne, T. W. Zhang y B. Aubry (1975). Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff, *Water Resources Research*, 27(9), 2271-2285.

Estrela, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos, Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid, España.

Fernández, P. (2010). “Aplicación del Modelo de Almacenamiento para la Obtención de Hidrogramas de Avenidas en cuencas de los ríos Piura y Torata”. Tesis para optar el título profesional Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Francés, F. (2014a). Descripción del Modelo conceptual distribuido de Simulación hidrológica TETIS v.8, Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental - GIMHA, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.

Francés, F. (2014b). Manual del Usuario. Programa TETIS v.8, Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental - GIMHA, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.

Giabattista, B. (2014). Implementation of a disturbed sediment model in different data availability scenarios, Universidad Politècnica de Valencia, España.

GIMHA, Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental. (2014). Modelando Agua, crecidas y sedimentos con TETIS 8.2: estimación de parámetros. Valencia, España.

Gobierno Regional de Piura. (2010). Estudio Tercer Informe (Final) del “Servicio de Consultoría para ejecutar el Estudio de Capacidad de Uso Mayor de la Tierra en el Departamento de Piura”.

Gobierno Regional de Piura. (2012). Mapa de Zonificación Ecológica y Económica (ZEE). Aprobado por el MINAM.

Holland, J.H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. First edition. University of Michigan Press. Reprint MIT Press, 1992.

Horton, R. (1933). The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. Transactions of the American Geophysical Union, 14, 446-460.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2015). Mapa Geológico, Región Piura, Piura, Perú.

Jenson, S. y Domingue, J. (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593–1600.

Leopold, L. Maddock, T. (1964). Fluvial Process in Geomorphology. Freeman, San Francisco.

Leopold, L. Wolman, M. y Miller, J. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S. Geology Survey. Prof. Paper no. 252.

Lopes, A. (2015). Factor de Pico para Hidrogramas Unitarios Sintéticos Triangulares, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, porte Alegre, RS, Brasil.

Lopez, N. (2001). “Diagnóstico de la Cuenca del río Piura con enfoque de Gestión de Riesgos y énfasis en los recursos agua, suelo y cobertura vegetal”, Autoridad Autónoma de la Cuenca Hidrográfica Chira-Piura, Piura, Perú.

Manual de Referencia Hidráulico IBER. (2014). “Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas”, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Instituto Flumen, España.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2011). Manual de Carreteras Hidrología, Hidráulica y Drenaje, Lima, Perú.

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Nelder, J. A., and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. Journal of Computing, 7, 308-313.

NRSC, Natural Resources Conservation Service. (2007). Chapter 16 Hydrographs, Part 630 hydrologic, National Engineering Handbook, Department of Agriculture, USA.

Petillo, G., Puppo, Hayashi, & Morales. (2012). Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. Departamento de Suelos y Agua, Facultad de Ingeniería Agrónoma. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

Price, W. (1987). Global optimization algorithms for a cad workstation. Journal of Optimization Theory and Applications, 55(1):133–146

Sernaqué, L. (2015). “Caracterización y Evaluación de los Niveles de Fertilidad en algunos Suelos del Distrito de Sapillica, Provincia de Ayabaca, Región Piura”. Tesis para optar el título profesional Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú.

Sugawara, M. (1995). Chapter 6: Tank Model. In Singh, V.P. (ed) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publication, Colorado, USA, 165-214.

US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources. (2013). Hydrologic Engineering Center. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual version 4.0, Washington, DC 20314-1000.

US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources. (2000). Hydrologic Engineering Center. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, California, USA.

ANEXOS

Anexo I: Información meteorológica mensual

Anexo II: Tormentas observadas

Anexo III: Resumen de Información de calicatas

Anexo IV: Parámetros calibrados

Anexo V: Resultados de las simulaciones

Anexo I: Información Meteorológica Mensual

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.1
Precipitación Total Mensual (mm) - Estación Barrios
 Latitud: 05°17' Longitud: 79°42' Elevación: 310 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1973	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	1.8	1	8	7.4	S/D
1974	14.9	63.0	30.2	6.6	1.3	1.8	0.2	2.2	1.5	4.4	5.2	1.6	132.9
1975	40.6	103.4	221.7	146.7	11.1	2.6	0.2	12.6	0.1	17.3	0.5	0.8	557.6
1976	88.0	193.9	279.6	130.2	19.3	2.6	0.3	1.0	2.1	2.2	0.1	11.0	730.3
1977	56.9	206.9	247.8	144.1	4.1	1.2	1.5	1.2	10.7	0.0	4.6	10.4	689.4
1978	3.4	39.4	149.4	44.1	11.5	0.1	0.1	0.6	0.6	0.3	0.0	1.5	251.0
1979	55.6	48.5	217.0	24.3	1.2	0.0	0.0	4.9	4.8	0.0	0.0	0.0	356.3
1980	1.3	24.9	101.8	95.0	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	5.7	12.0	9.0	250.8
1981	12.7	52.8	318.8	82.1	0.7	0.9	0.0	3.1	0.0	11.3	0.0	3.5	485.9
1982	14.1	56.2	0.1	44.2	9.1	0.0	1.8	0.0	4.2	5.9	21.7	342.0	499.3
1983	306.1	425.9	711.1	502.5	286.5	147.6	4.0	0.3	0.4	13.3	0.9	21.0	2419.6
1984	65.0	373.2	287.2	23.6	8.0	3.8	2.0	0.0	1.8	7.1	3.5	3.6	778.8
1985	39.4	54.5	107.3	3.6	10.6	0.0	0.0	3.8	0.0	1.5	0.1	23.6	244.4
1986	55.1	2.6	12.0	116.7	1.3	0.2	0.0	0.7	1.8	0.2	11.0	19.9	221.5
1987	64.2	67.3	547.7	134.2	0.6	0.1	0.2	0.3	0.6	5.6	0.2	0.0	821.0
1988	73.3	94.2	4.1	34.4	19.5	0.0	0.3	0.0	3.6	5.8	9.8	4.9	249.9
1989	106.8	341.0	230.2	99.1	1.7	3.3	0.0	0.0	0.2	14.3	1.5	1.0	799.1
1990	3.8	29.1	54.6	39.8	2.4	0.0	0.0	0.0	0.6	10.8	4.4	2.3	147.8
1991	1.6	65.9	203.8	199.8	9.0	3.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	16.4	502.4
1992	59.7	184.4	508.0	25.3	99.6	2.4	0.0	1.2	2.2	S/D	S/D	S/D	S/D
Prom.	55.9	127.7	222.8	99.8	26.2	8.9	0.6	1.7	1.9	5.8	4.4	25.3	563.2
Max.	306.1	425.9	711.1	502.5	286.5	147.6	4.0	12.6	10.7	17.3	21.7	342.0	2419.6
Min.	1.3	2.6	0.1	3.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	132.9
S.D.	67.6	126.4	196.1	111.8	65.3	32.8	1.0	2.9	2.5	5.3	5.8	75.2	520.9

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.1A
Variación de la Precipitación

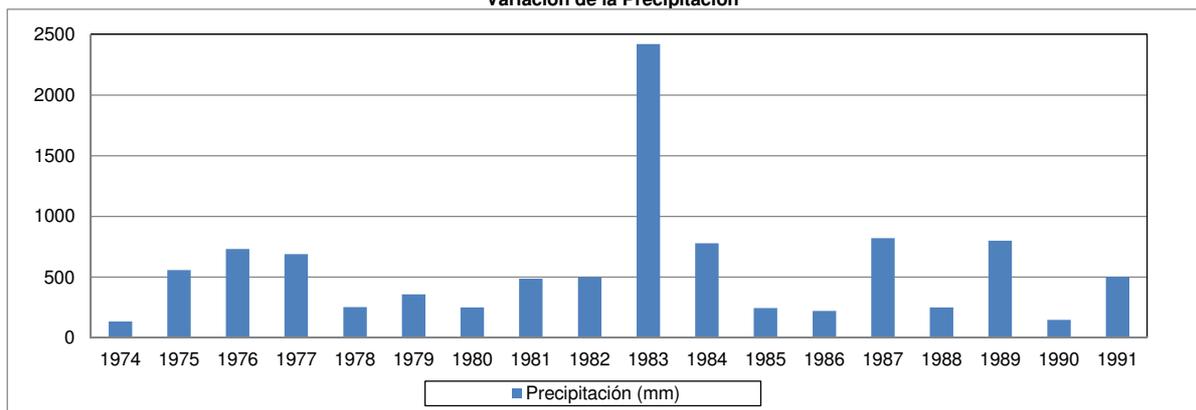
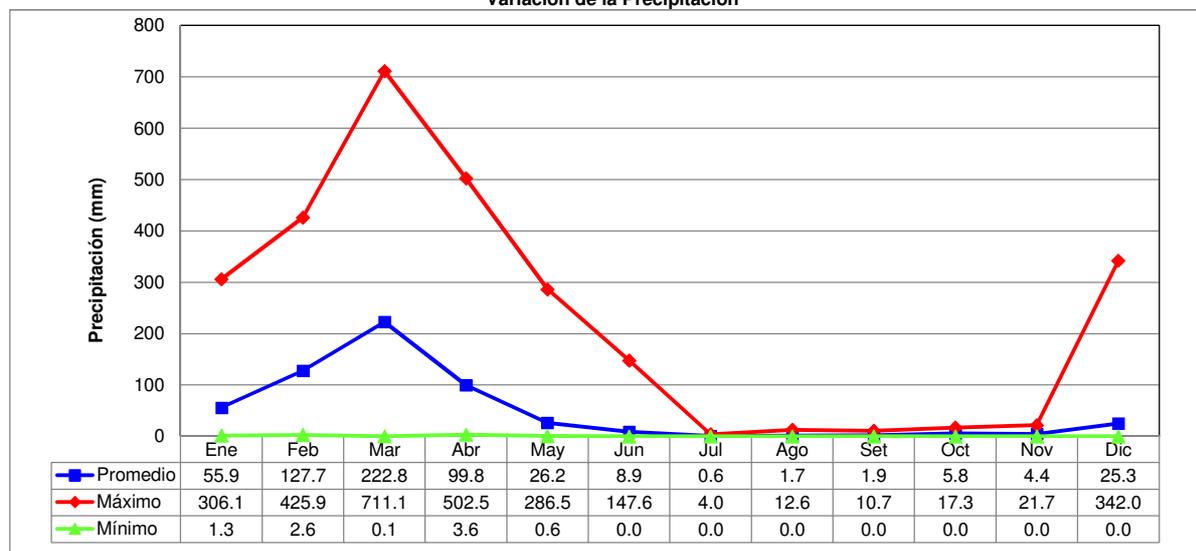


GRAFICO 1.1B
Variación de la Precipitación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.2
Precipitación Total Mensual (mm) - Estación Canchaque
Latitud: 05°22' Longitud: 79°36' Elevación: 1200 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1963	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0	11.6	24	64	S/D
1964	98.0	122.0	59.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	20.0	0.0	0.0	300.0
1965	153.0	105.0	424.0	397.6	144.0	19.0	10.0	0.0	7.0	25.0	34.0	36.0	1354.6
1966	97.0	59.0	200.0	20.6	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	10.8	11.5	0.0	409.7
1967	99.3	334.7	88.9	20.3	13.8	0.0	9.6	0.0	3.0	11.6	3.7	2.1	587.0
1968	31.9	111.1	35.7	20.9	0.0	0.0	0.0	10.2	1.2	17.3	11.1	7.5	246.9
1969	158.5	91.2	203.0	165.0	7.2	0.0	0.0	0.0	8.2	21.8	23.8	24.7	703.4
1970	116.7	80.7	82.7	31.9	33.0	12.1	0.0	0.0	5.2	13.3	9.5	27.6	412.7
1971	69.4	118.4	401.8	59.3	40.6	41.1	0.5	0.5	2.1	1.4	7.6	69.0	811.7
1972	68.1	94.6	603.7	287.5	47.1	49.9	9.8	4.1	3.4	13.0	20.7	90.7	1292.6
1973	155.0	475.6	246.6	265.3	26.0	7.6	3.1	11.2	4.5	1.7	25.2	48.8	1270.6
1974	33.0	95.2	80.9	37.3	5.5	6.0	0.9	8.7	4.9	12.5	26.1	30.8	341.8
1975	90.0	157.0	221.2	149.9	40.5	15.5	3.6	26.0	0.3	39.3	12.4	4.1	759.8
1976	200.3	323.4	288.4	99.7	61.7	14.1	4.7	7.8	6.3	2.4	2.8	82.0	1093.6
1977	147.5	259.2	214.1	273.6	15.0	9.5	16.8	0.0	17.9	0.1	12.7	16.5	982.9
1978	18.1	66.4	208.6	107.9	33.9	2.7	0.4	0.0	0.9	1.0	1.1	14.4	455.4
1979	109.5	87.5	274.4	35.2	2.3	0.0	0.0	1.0	3.4	0.7	0.0	1.5	515.5
1980	17.9	65.9	130.6	136.3	10.5	31.4	0.0	0.0	0.0	20.3	12.4	31.2	456.5
1981	44.7	194.4	398.1	83.3	1.2	0.0	0.0	4.0	0.0	19.8	1.8	31.9	779.2
1982	63.5	86.2	11.1	94.7	13.1	0.0	5.4	0.0	3.2	15.2	44.9	496.0	833.3
1983	412.1	381.1	751.0	293.9	195.3	42.7	13.2	1.9	8.8	30.6	12.4	45.1	2188.1
1984	97.3	435.8	313.2	109.3	11.1	11.2	0.0	0.0	0.0	21.9	5.9	30.1	1035.8
1985	88.5	107.6	166.5	28.6	4.7	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	9.5	60.8	466.8
1986	99.8	98.8	70.1	151.8	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	54.0	480.0
1987	170.7	169.0	644.5	110.8	57.3	0.0	0.0	0.0	4.8	3.1	2.8	7.1	1170.1
1988	189.2	244.0	6.4	54.2	42.1	0.0	1.8	0.3	2.1	0.0	9.8	61.6	611.5
1989	381.1	452.1	530.9	110.7	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	23.4	1.8	12.6	1522.3
1990	37.9	106.8	106.2	85.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7	4.4	19.2	391.5
1991	42.9	154.0	235.9	122.9	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	11.8	605.6
1992	137.1	214.0	17.1	14.8	13.5	11.3	9.9	8.1	6.1	4.5	2.7	1.0	440.2
1993	20.7	448.5	446.3	165.5	65.2	3.7	0.0	0.0	15.2	0.0	4.4	84.3	1253.8
1994	165.4	337.0	243.1	170.2	43.1	S/D	S/D						
Prom.	116.6	196.0	248.5	119.5	31.8	9.3	3.0	3.0	3.5	11.9	11.2	47.3	792.4
Max.	412.1	475.6	751.0	397.6	195.3	49.9	16.8	26.0	17.9	39.3	44.9	496.0	2188.1
Min.	17.9	59.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	246.9
S.D.	92.3	136.3	197.5	98.4	41.8	13.9	4.6	5.5	4.4	10.9	10.9	86.6	473.2

Fuente: Senamhi

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.3
Precipitación Total Mensual (mm) - Estación Pasapampa
Latitud: 05°07' Longitud: 79°36' Elevación: 3410 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1963	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	14.7	44.7	100.8	S/D
1964	52.5	61.7	71.9	134.9	18.5	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	349.3
1965	31.5	45.6	10.9	96.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6	56.2	254.8
1966	95.7	70.8	163.1	90.2	83.2	16.7	0.0	0.0	0.0	35.3	38.1	10.6	603.7
1967	157.2	115.9	134.0	90.8	35.7	36.9	24.4	0.0	0.0	68.8	14.2	27.3	705.2
1968	24.6	10.5	100.3	56.2	27.2	0.0	4.9	0.0	5.2	73.0	15.0	26.6	343.5
1969	108.6	87.3	100.8	243.9	0.0	9.6	0.0	20.4	13.8	61.9	67.6	122.8	836.7
1970	91.9	128.4	121.0	45.8	112.5	16.7	0.0	4.3	27.1	83.4	94.5	89.9	815.5
1971	110.1	157.8	445.8	76.6	78.5	63.3	8.3	0.0	16.7	95.8	27.5	125.5	1205.9
1972	133.6	135.1	291.0	83.8	24.4	10.3	0.0	0.0	13.4	18.8	96.8	89.1	896.3
1973	74.9	179.4	146.2	187.7	36.1	26.9	9.7	12.2	18.2	354.0	84.6	111.5	1241.4
1974	56.8	175.7	113.5	35.0	4.9	14.4	14.8	7.4	10.5	32.6	85.7	70.2	621.5
1975	61.6	277.9	217.7	145.4	78.2	20.3	7.6	63.1	8.4	71.4	0.0	35.8	987.4
1976	204.6	216.6	264.1	57.3	52.7	8.7	12.9	18.4	11.7	5.8	14.9	63.7	931.4
1977	103.1	122.2	170.0	81.7	15.0	31.9	0.0	19.5	18.9	34.8	19.3	49.8	666.2
1978	52.4	71.5	170.7	67.5	70.7	11.0	2.1	3.7	10.5	10.9	16.3	40.8	528.1
1979	94.9	75.3	255.7	62.9	16.9	0.8	0.0	36.5	31.4	1.4	7.8	15.4	599.0
1980	63.7	0.0	114.2	188.4	57.2	0.9	2.6	4.9	8.4	74.1	61.5	98.7	674.6
1981	110.4	215.6	265.2	152.1	6.6	0.0	3.7	33.0	0.4	53.2	17.4	106.8	964.4
1982	38.8	101.3	149.1	168.5	104.9	8.0	1.9	0.2	24.2	89.7	95.8	317.2	1099.5
1983	266.9	118.7	359.1	138.9	120.1	15.3	6.0	0.0	24.9	73.4	21.5	113.3	1258.1
1984	91.1	379.4	211.4	100.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	782.3
1985	144.6	95.1	160.2	61.5	42.0	0.0	0.0	18.0	6.5	29.5	20.0	129.3	706.7
1986	170.0	218.5	108.0	106.2	34.1	0.0	0.0	16.8	31.5	37.5	85.7	113.0	921.3
1987	178.2	57.4	127.6	64.1	26.8	0.0	25.7	3.3	2.9	13.8	19.7	40.8	560.3
1988	152.5	214.5	42.7	68.2	65.2	0.0	0.0	0.0	29.9	25.8	103.3	90.9	793.0
1989	230.9	299.9	257.8	184.7	9.3	20.4	0.3	0.0	8.4	135.0	19.6	46.7	1213.0
1990	77.4	108.7	109.6	94.9	86.7	72.7	63.8	52.1	39.3	29.1	17.1	6.2	757.6
1991	77.3	193.5	232.2	92.8	32.0	13.3	0.0	5.6	0.0	18.9	30.4	77.2	773.2
1994	198.6	235.9	322.0	219.5	22.6	0.0	0.0	0.0	4.6	S/D	S/D	S/D	S/D
Prom.	112.2	143.8	180.5	110.2	43.5	14.1	6.5	11.0	12.6	53.2	39.1	75.0	788.9
Max.	266.9	379.4	445.8	243.9	120.1	72.7	63.8	63.1	39.3	354.0	103.3	317.2	1258.1
Min.	24.6	0.0	10.9	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	254.8
S.D.	64.1	91.1	101.7	57.9	35.8	18.0	12.9	16.4	11.6	66.9	34.5	62.5	326.9

Fuente: Senamhi

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.4
Precipitación Total Mensual (mm) - Estación Bigote
 Latitud: 05°20' Longitud: 79°47' Elevación: 200 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
2000	42.1	331.2	260.5	88.6	11.6	6.1	0	0.5	14	0	0	50.8	805.4
2001	128.5	109.0	374.0	152.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.8	13.0	6.7	2.5	788.7
2002	0.0	103.6	281.5	231.9	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	3.8	6.7	636.8
2003	25.8	152.9	12.8	0.5	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	7.4	207.1
2004	48.8	28.3	2.2	88.2	5.9	0.0	0.0	0.0	0.5	18.5	0.6	11.5	204.5
2005	0.4	47.0	187.9	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	0.2	1.0	4.3	248.3
2006	11.6	363.5	226.9	50.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	7.1	667.0
2007	36.3	0.9	125.0	3.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	9.4	0.0	180.9
2008	88.4	472.6	488.4	181.9	6.5	1.0	0.0	0.0	0.0	2.6	10.1	0.0	1251.5
2009	175.4	127.9	243.7	27.9	11.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	5.1	11.9	603.1
2010	43.1	238.3	24.7	65.7	0.6	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Prom.	54.6	179.6	202.5	81.2	3.7	0.8	0.0	0.1	2.1	4.7	5.1	10.2	559.3
Max.	175.4	472.6	488.4	231.9	11.6	6.1	0.2	0.5	14.0	18.5	10.1	50.8	1251.5
Min.	0.0	0.9	2.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	180.9
S.D.	55.2	152.5	153.9	78.1	4.4	1.8	0.1	0.2	4.3	6.3	3.8	14.4	372.3

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.4A
 Variación de la Precipitación

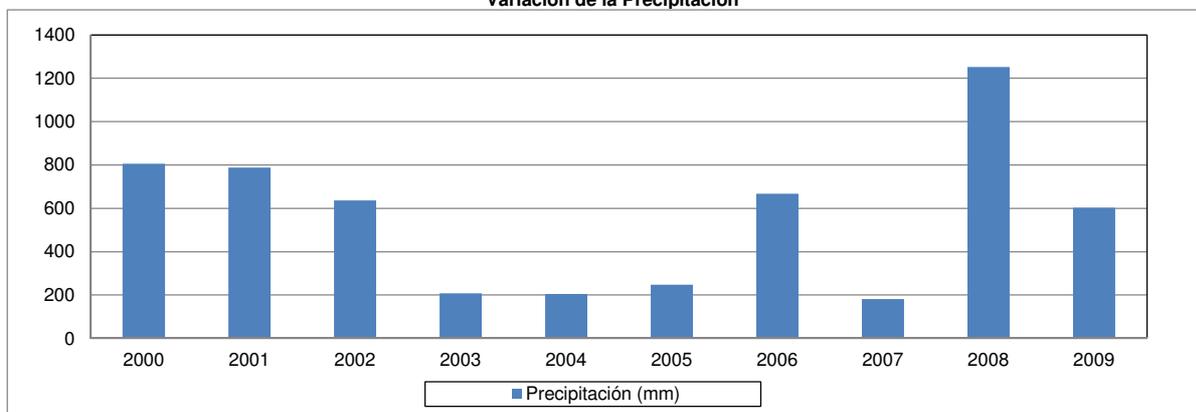
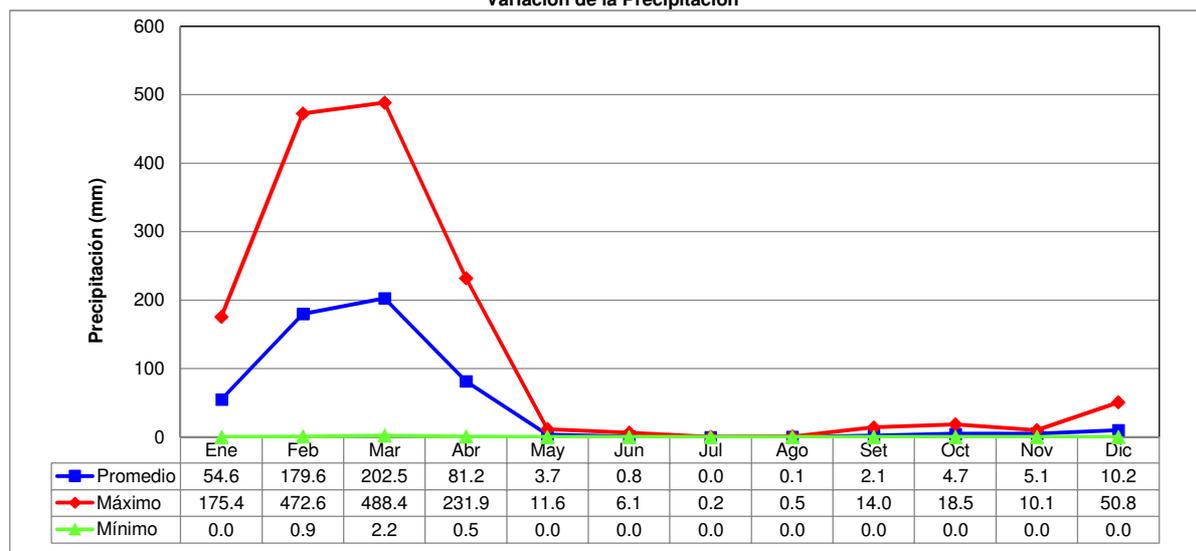


GRAFICO 1.4B
 Variación de la Precipitación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.5
Temperatura Promedio, Máximo y Mínimo Mensual (°C) - Estación Morropón
 Latitud: 05°11' Longitud: 79°59' Elevación: 140 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Prom.	26.7	27.5	27.5	27.0	25.2	23.7	22.3	23.2	23.9	24.5	25.2	25.4	25.1
Max.	32.7	32.5	32.8	32.1	30.9	29.8	29.4	30.2	31.4	31.9	32.3	32.1	32.8
Min.	20.7	22.4	22.2	21.8	19.4	17.6	15.2	16.1	16.3	17.0	18.0	18.6	15.2

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.5A
Variación de la Temperatura

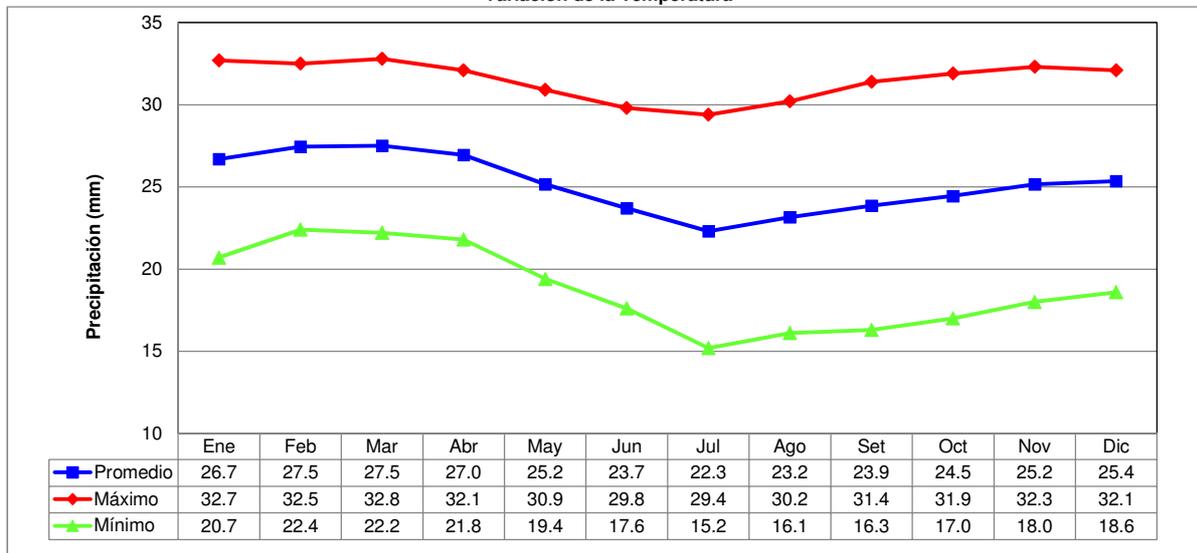
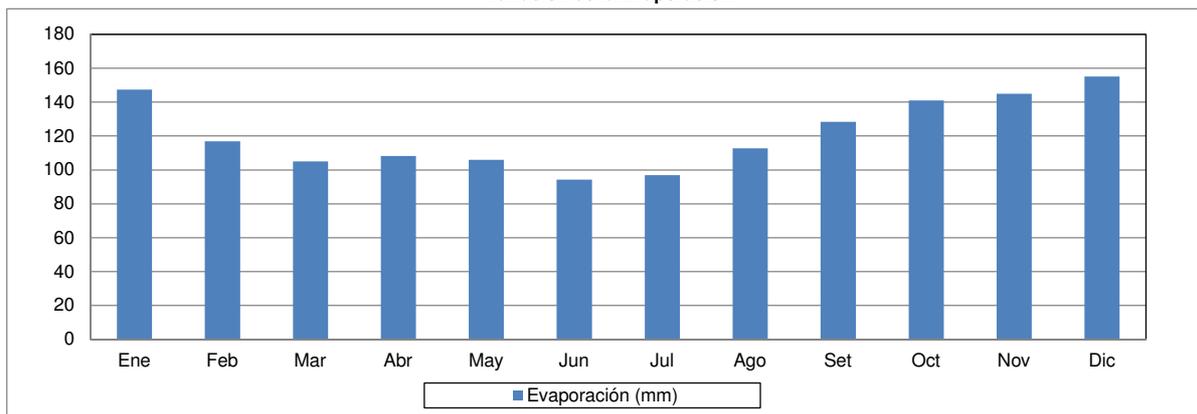


TABLA 1.6
Evaporación Total Mensual (mm) - Estación Morropón
 Latitud: 05°11' Longitud: 79°59' Elevación: 140 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Prom.	147.3	116.9	104.9	108.2	106.0	94.2	96.8	112.8	128.4	141.0	145.0	155.1	121.4

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.6A
Variación de la Evaporación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 1.7
Temperatura Promedio, Máximo y Mínimo Mensual (°C) - Estación Huarmaca
 Latitud: 05°34' Longitud: 79°31' Elevación: 2180 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Prom.	14.6	14.8	15.3	15.5	15.9	16.5	16.7	16.5	16.0	15.2	14.6	14.7	15.5
Max.	17.5	17.7	18.7	18.5	19.5	20.8	21.0	20.9	20.3	19.0	18.1	18.1	21.0
Min.	11.7	11.9	11.9	12.4	12.2	12.2	12.3	12.1	11.7	11.4	11.1	11.2	11.1

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.7A
Variación de la Temperatura

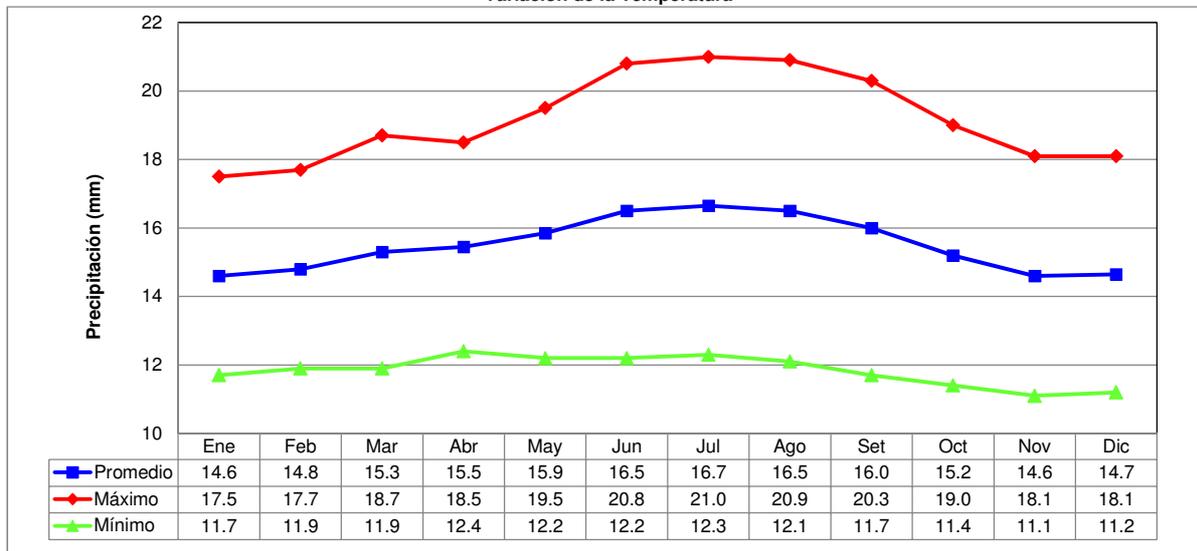
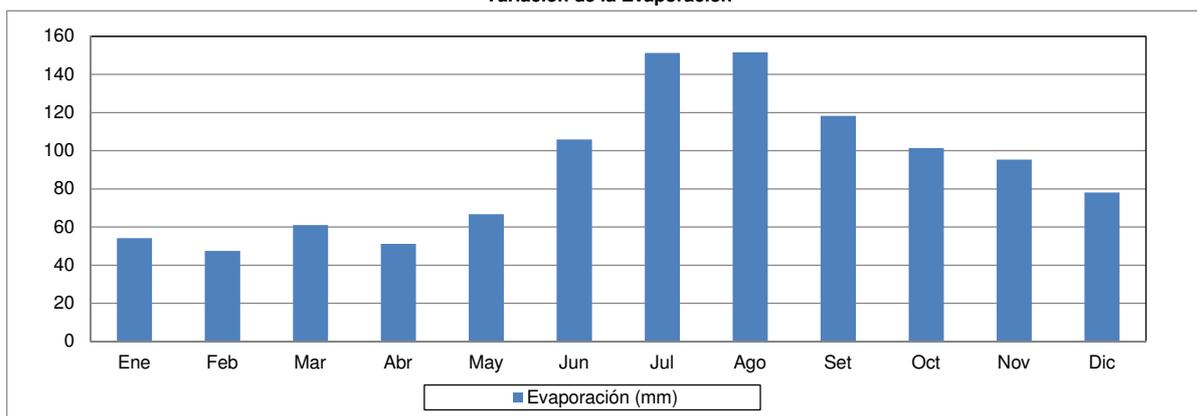


TABLA 1.8
Evaporación Total Mensual (mm) - Estación Huarmaca
 Latitud: 05°34' Longitud: 79°31' Elevación: 2180 m.sn.m. 17S

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Prom.	54.1	47.5	61.0	51.1	66.7	105.8	151.3	151.5	118.3	101.3	95.4	78.1	90.2

Fuente: Senamhi

GRAFICO 1.8A
Variación de la Evaporación



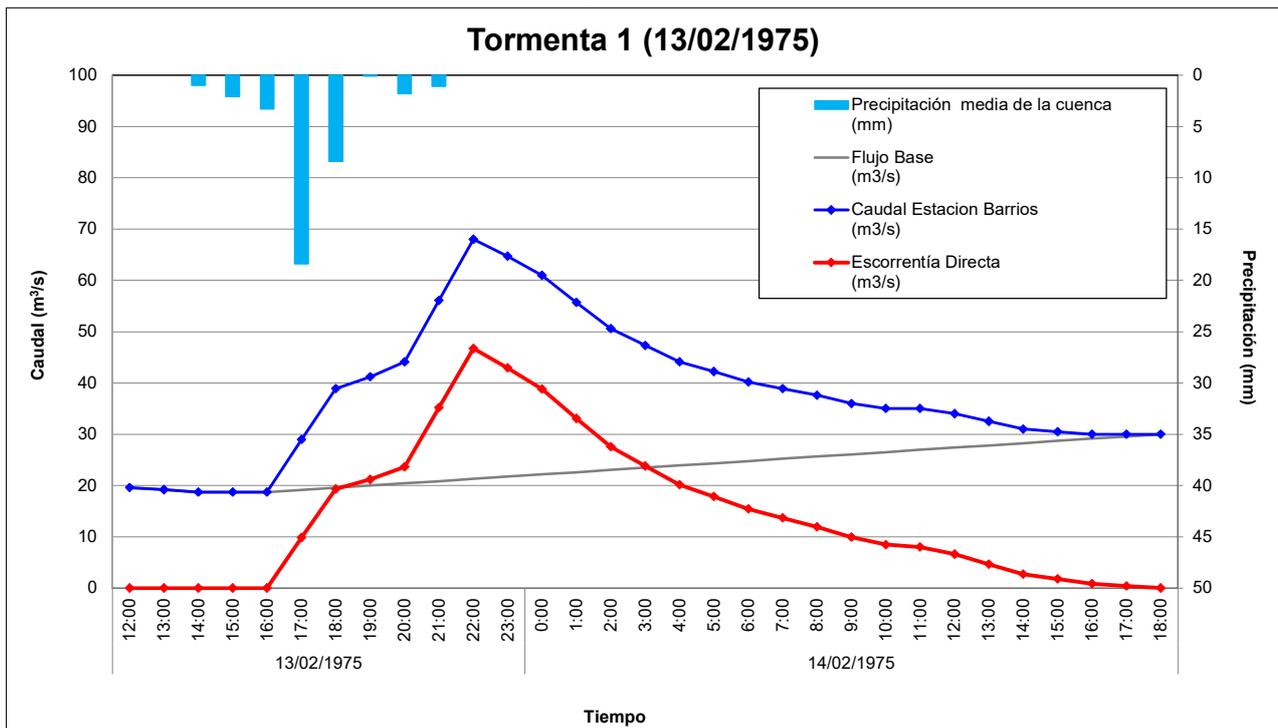
Anexo II: Tormentas Observadas

TABLA 2.1

TORMENTA 1 (13/02/1975)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
13/02/1975	12:00	0	0	0	19.6	19.6	0
	13:00	0	0	0	19.2	19.2	0
	14:00	9.2	0	1	18.7	18.7	0
	15:00	19.4	0	2.1	18.7	18.7	0
	16:00	13.5	2	3.3	18.7	18.7	0
	17:00	10.7	19.4	18.4	29	19.1	9.9
	18:00	0.2	9.4	8.4	38.9	19.6	19.3
	19:00	1.3	0	0.1	41.2	20.0	21.2
	20:00	0	2	1.8	44.1	20.4	23.7
	21:00	0	1.2	1.1	56.1	20.9	35.2
	22:00	0	0	0	68	21.3	46.7
	23:00				64.7	21.7	43.0
14/02/1975	0:00				61	22.2	38.8
	1:00				55.7	22.6	33.1
	2:00				50.6	23.0	27.6
	3:00				47.3	23.5	23.8
	4:00				44.1	23.9	20.2
	5:00				42.2	24.3	17.9
	6:00				40.2	24.8	15.4
	7:00				38.9	25.2	13.7
	8:00				37.6	25.7	11.9
	9:00				36	26.1	9.9
	10:00				35	26.5	8.5
	11:00				35	27.0	8.0
	12:00				34	27.4	6.6
	13:00				32.5	27.8	4.7
	14:00				31	28.3	2.7
	15:00				30.5	28.7	1.8
	16:00				30	29.1	0.9
	17:00				30	29.6	0.4
	18:00				30	30.0	0.0
Total (mm)		54.3	34	36.2			

GRAFICO 2.1
Hidrograma de la Tormenta



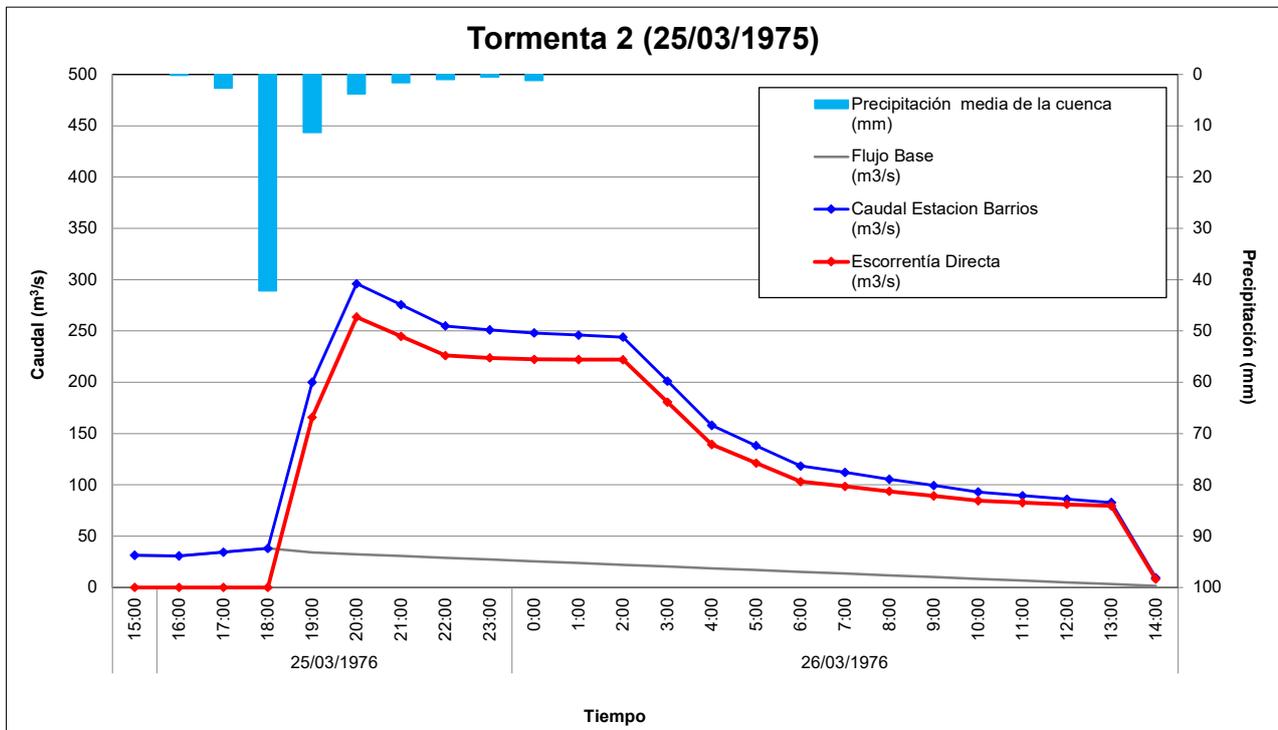
NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto.

TABLA 2.2

TORMENTA 2 (25/03/1976)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
	15:00				31.4	31.4	0
25/03/1976	16:00	1.8	0	0.2	30.8	30.8	0
	17:00	24.1	0	2.7	34.4	34.4	0
	18:00	20.8	44.9	42.2	38	38.0	0
	19:00	1.2	12.6	11.35	200	34.2	165.8
	20:00	1.1	4.1	3.8	296	32.5	263.5
	21:00	1.4	1.6	1.6	275.5	30.7	244.8
	22:00	4.1	0.6	1	255	29.0	226.0
	23:00	3.5	0.1	0.5	251	27.3	223.7
26/03/1976	0:00	0.7	1.2	1.15	248	25.6	222.4
	1:00	0	0	0	246	23.9	222.1
	2:00				244	22.1	221.9
	3:00				201	20.4	180.6
	4:00				158	18.7	139.3
	5:00				138.2	17.0	121.2
	6:00				118.4	15.3	103.1
	7:00				112	13.5	98.5
	8:00				105.5	11.8	93.7
	9:00				99.3	10.1	89.2
	10:00				93	8.4	84.6
	11:00				89.5	6.7	82.8
	12:00				85.9	4.9	81.0
	13:00				82.8	3.2	79.6
	14:00				9.6	1.5	8.1
Total (mm)		58.7	65.1	64.5			

GRAFICO 2.2
Hidrograma de la Tormenta



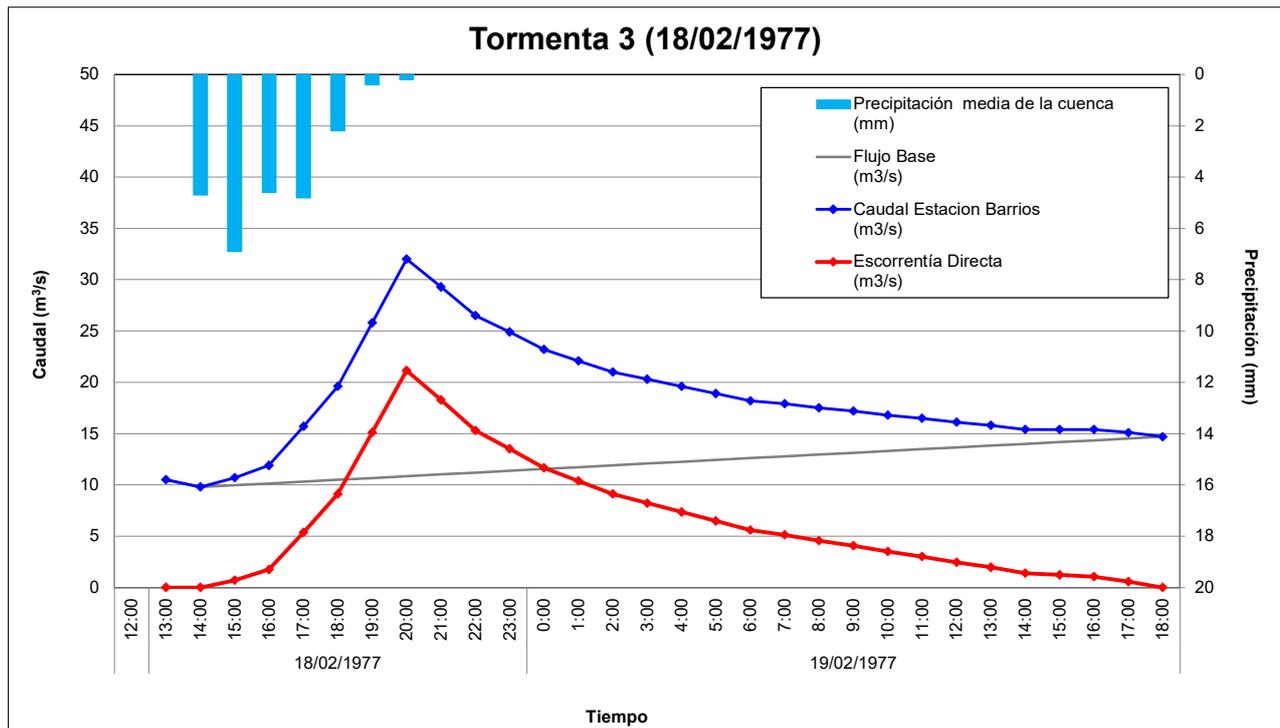
NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

TABLA 2.3

TORMENTA 3 (18/02/1977)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
	12:00						
18/02/1977	13:00	0.4	0	0	10.5	10.5	0
	14:00	11.8	3.8	4.7	9.8	9.8	0
	15:00	15	5.9	6.9	10.7	10.0	0.7
	16:00	16.7	3.1	4.6	11.9	10.2	1.8
	17:00	13.5	3.7	4.8	15.7	10.3	5.4
	18:00	3	2.1	2.2	19.6	10.5	9.1
	19:00	0.5	0.4	0.4	25.8	10.7	15.1
	20:00	0.2	0.2	0.2	32	10.9	21.2
	21:00	0.1	0	0	29.3	11.0	18.3
	22:00	0	0	0	26.5	11.2	15.3
	23:00				24.9	11.4	13.5
19/02/1977	0:00				23.2	11.6	11.7
	1:00				22.1	11.7	10.4
	2:00				21	11.9	9.1
	3:00				20.3	12.1	8.2
	4:00				19.6	12.3	7.4
	5:00				18.9	12.4	6.5
	6:00				18.2	12.6	5.6
	7:00				17.9	12.8	5.1
	8:00				17.5	13.0	4.6
	9:00				17.2	13.1	4.1
	10:00				16.8	13.3	3.5
	11:00				16.5	13.5	3.0
	12:00				16.1	13.7	2.5
	13:00				15.8	13.8	2.0
	14:00				15.4	14.0	1.4
	15:00				15.4	14.2	1.2
	16:00				15.4	14.4	1.1
	17:00				15.1	14.5	0.6
	18:00				14.7	14.7	0.0
Total (mm)		61.2	19.2	23.8			

GRAFICO 2.3
Hidrograma de la Tormenta



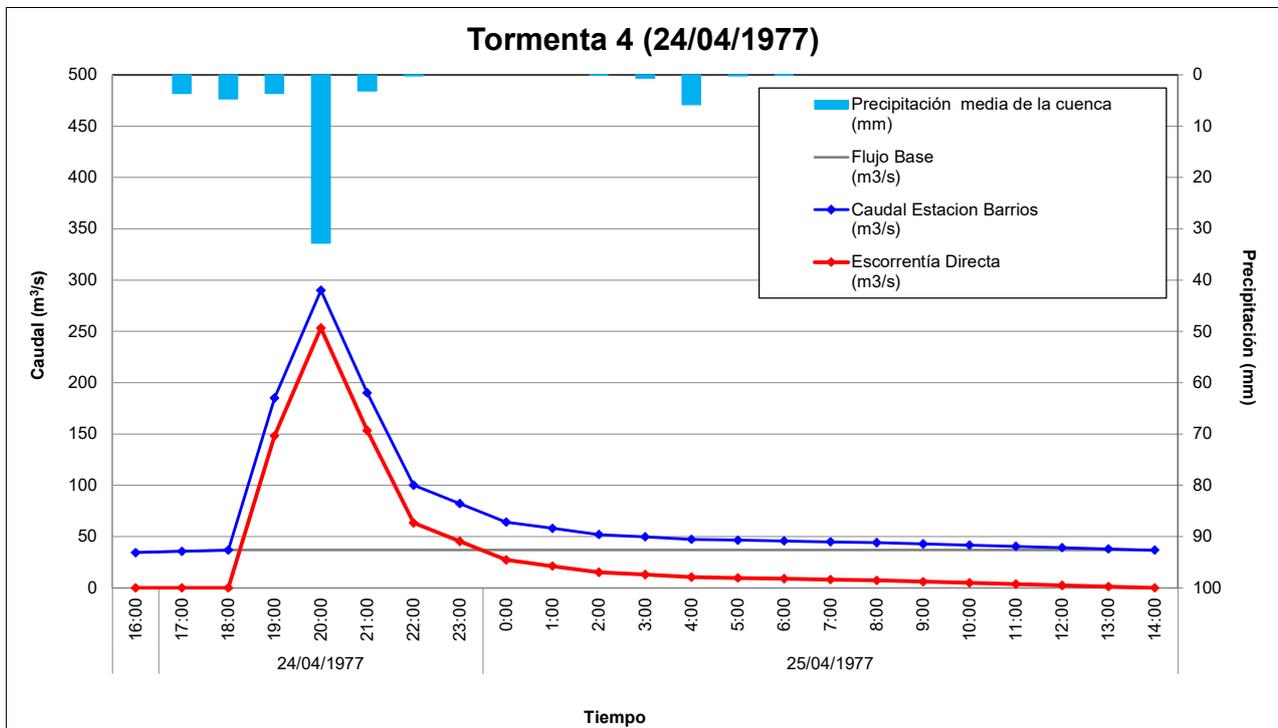
NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

TABLA 2.4

TORMENTA 4 (24/04/1977)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
	16:00				34.4	34.4	0
24/04/1977	17:00	32.6	0	3.6	35.6	35.6	0
	18:00	17	3.1	4.7	36.8	36.8	0
	19:00	11.3	2.7	3.6	185	36.8	148.2
	20:00	0.5	36.8	32.8	290	36.8	253.2
	21:00	0.1	3.5	3.1	190	36.8	153.2
	22:00	0	0.2	0.2	100	36.8	63.2
	23:00	0	0	0	82	36.8	45.2
25/04/1977	0:00	0	0	0	64	36.8	27.2
	1:00	0.1	0	0	58	36.8	21.2
	2:00	0.7	0	0.1	52	36.8	15.2
	3:00	0.1	0.7	0.6	49.6	36.8	12.8
	4:00	0.5	6.4	5.8	47.2	36.8	10.4
	5:00	0.6	0.1	0.2	46.4	36.8	9.6
	6:00	0.3	0.1	0.1	45.6	36.8	8.8
	7:00				44.8	36.8	8.0
	8:00				44	36.8	7.2
	9:00				42.8	36.8	6.0
	10:00				41.6	36.8	4.8
	11:00				40.4	36.8	3.6
	12:00				39.2	36.8	2.4
	13:00				38	36.8	1.2
	14:00				36.8	36.8	0.0
Total (mm)		31.2	53.6	51.2			

GRAFICO 2.4
Hidrograma de la Tormenta



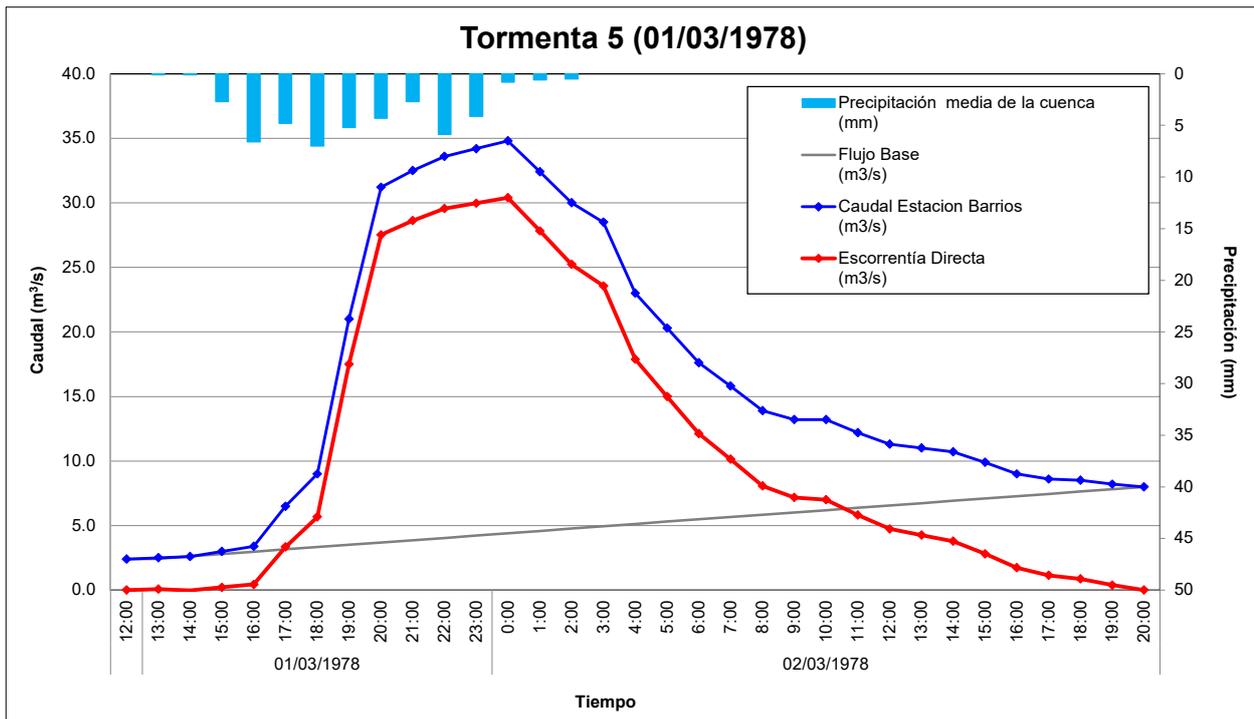
NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

TABLA 2.5

TORMENTA 5 (01/03/1978)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)			Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS	PASAPAMPA				
	12:00	0	0	0	0	2.4	2.4	0
01/03/1978	13:00	0.5	0	0	0.1	2.5	2.4	0.1
	14:00	0.7	0	0	0.1	2.6	2.6	0.0
	15:00	1.3	6.6	0.3	2.7	3	2.8	0.2
	16:00	2	16.5	0.5	6.6	3.4	3.0	0.4
	17:00	4.1	3.9	5.5	4.8	6.5	3.2	3.3
	18:00	1.1	11.7	4.9	7	9	3.3	5.7
	19:00	5	4.5	5.7	5.2	21	3.5	17.5
	20:00	2.1	0.4	7.5	4.3	31.2	3.7	27.5
	21:00	4.7	0.4	3.9	2.7	32.5	3.9	28.6
	22:00	4.7	0.1	10.2	5.9	33.6	4.0	29.6
	23:00	5.3	0	6.8	4.1	34.2	4.2	30.0
02/03/1978	0:00	4.3	0	0.6	0.8	34.8	4.4	30.4
	1:00	1.9	0	0.7	0.6	32.4	4.6	27.8
	2:00	2.7	0	0.4	0.5	30	4.8	25.2
	3:00	0	0	0	0	28.5	4.9	23.6
	4:00					23	5.1	17.9
	5:00					20.3	5.3	15.0
	6:00					17.6	5.5	12.1
	7:00					15.8	5.7	10.1
	8:00					13.9	5.8	8.1
	9:00					13.2	6.0	7.2
	10:00					13.2	6.2	7.0
	11:00					12.2	6.4	5.8
	12:00					11.3	6.6	4.7
	13:00					11	6.7	4.3
	14:00					10.7	6.9	3.8
	15:00					9.9	7.1	2.8
	16:00					9	7.3	1.7
	17:00					8.6	7.5	1.1
	18:00					8.5	7.6	0.9
	19:00					8.2	7.8	0.4
	20:00					8	8.0	0.0
Total (mm)		40.4	44.1	47	45.4			

GRAFICO 2.5
Hidrograma de la Tormenta

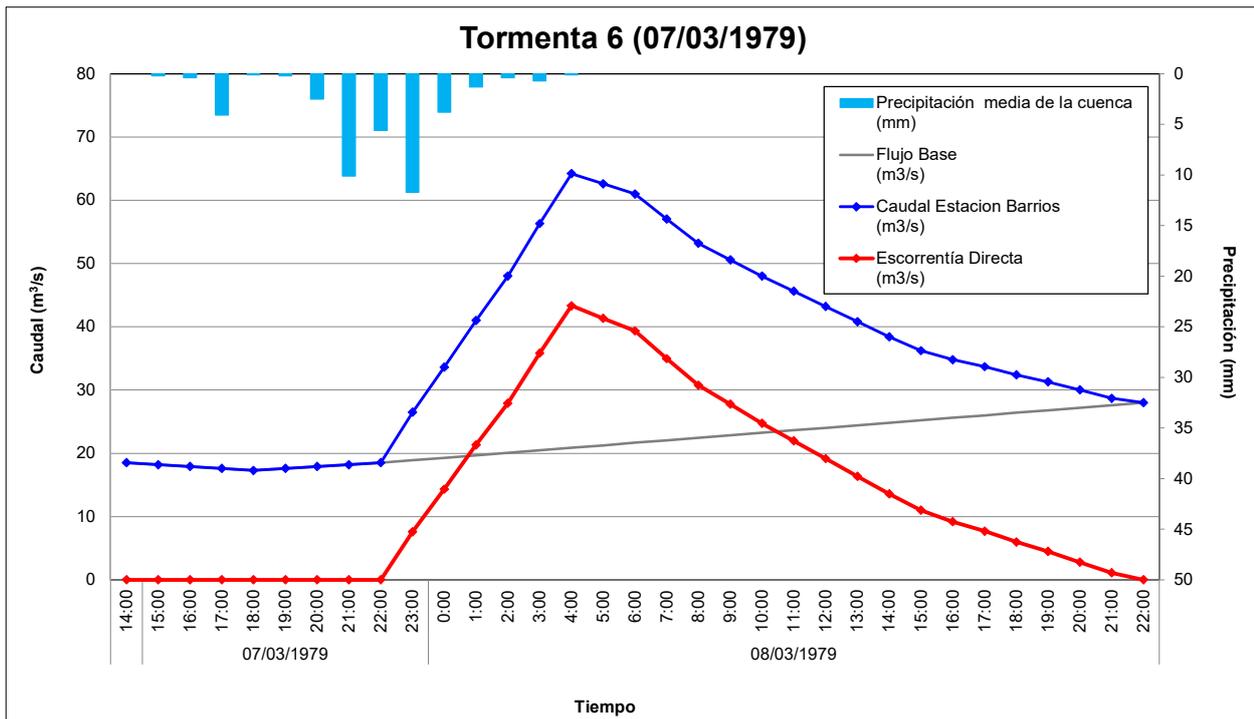


NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

TABLA 2.6
TORMENTA 6 (07/03/1979)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escoorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
	14:00				18.5	18.5	0
07/03/1979	15:00	1.5	0	0.2	18.2	18.2	0.0
	16:00	3.6	0	0.4	17.9	17.9	0.0
	17:00	1.2	4.5	4.1	17.6	17.6	0.0
	18:00	0.2	0.1	0.1	17.3	17.3	0.0
	19:00	1.4	0	0.2	17.6	17.6	0.0
	20:00	6.9	1.9	2.5	17.9	17.9	0.0
	21:00	14.3	9.6	10.1	18.2	18.2	0.0
	22:00	6.1	5.5	5.6	18.5	18.5	0.0
	23:00	9	12	11.7	26.5	18.896	7.6
08/03/1979	0:00	6	3.5	3.8	33.6	19.2918	14.3
	1:00	3.3	1	1.3	41	19.6876	21.3
	2:00	3	0.1	0.4	48	20.0834	27.9
	3:00	4.9	0.2	0.7	56.3	20.4792	35.8
	4:00	0.2	0.1	0.1	64.2	20.875	43.3
	5:00	0.2	0	0	62.6	21.2708	41.3
	6:00	0	0	0	61	21.6666	39.3
	7:00				57	22.0624	34.9
	8:00				53.2	22.4582	30.7
	9:00				50.6	22.854	27.7
	10:00				48	23.2498	24.8
	11:00				45.6	23.6456	22.0
	12:00				43.2	24.0414	19.2
	13:00				40.8	24.4372	16.4
	14:00				38.4	24.833	13.6
	15:00				36.2	25.2288	11.0
	16:00				34.8	25.6246	9.2
	17:00				33.7	26.0204	7.7
	18:00				32.4	26.4162	6.0
	19:00				31.3	26.812	4.5
	20:00				30	27.2078	2.8
	21:00				28.7	27.6036	1.1
	22:00				28	27.9994	0.0
Total (mm)		61.8	38.5	41.2			

GRAFICO 2.6
Hidrograma de la Tormenta



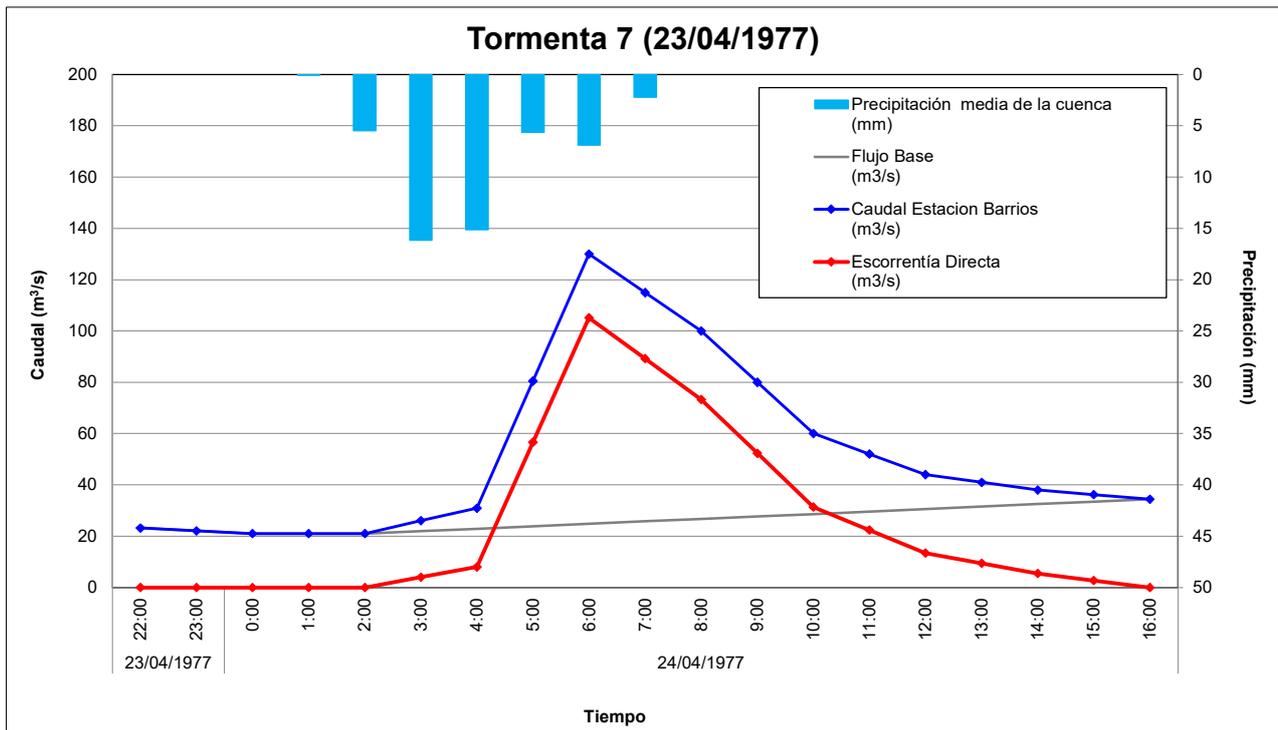
NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

TABLA 2.7

TORMENTA 7 (23/04/1977)

DIA	HORA	Precipitación por Estación (mm)		Precipitación media de la cuenca (mm)	Caudal Estacion Barrios (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)	Escorrentía Directa (m ³ /s)
		CANCHAQUE	BARRIOS				
23/04/1977	22:00	0	0	0	23.2	23.2	0
	23:00	0	0	0	22.1	22.1	0
24/04/1977	0:00	0	0	0	21	21	0
	1:00	0.4	0	0.1	21	21	0
	2:00	4.1	5.7	5.5	21	21	0
	3:00	4.7	18	16.1	26	21.9566	4.0
	4:00	4.8	16.8	15.1	30.9	22.9137	8.0
	5:00	23.1	2.8	5.6	80.5	23.8708	56.6
	6:00	6.1	7	6.9	130	24.8279	105.2
	7:00	1	2.4	2.2	115	25.785	89.2
	8:00	0	0	0	100	26.7421	73.3
	9:00				80	27.6992	52.3
	10:00				60	28.6563	31.3
	11:00				52	29.6134	22.4
	12:00				44	30.5705	13.4
	13:00				41	31.5276	9.5
	14:00				38	32.4847	5.5
	15:00				36.2	33.4418	2.8
16:00				34.4	34.3989	0.0	
Total (mm)		44.2	52.7	51.51			

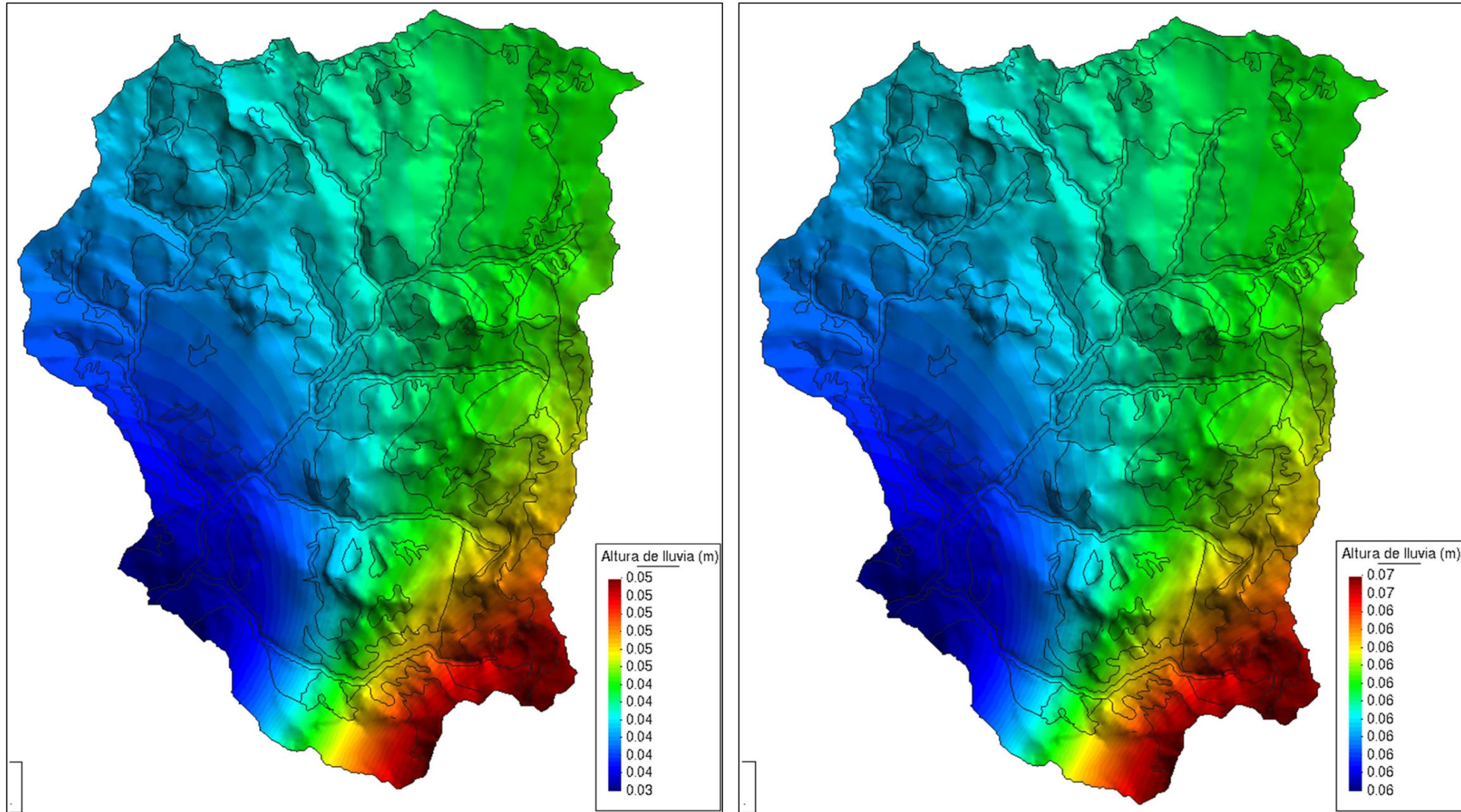
GRAFICO 2.7
Hidrograma de la Tormenta



NOTA: Las simulaciones se realizarán con el caudal neto

GRAFICO 2.8A

DISTRIBUCIÓN IDW DE PRECIPITACIONES OBSERVADAS

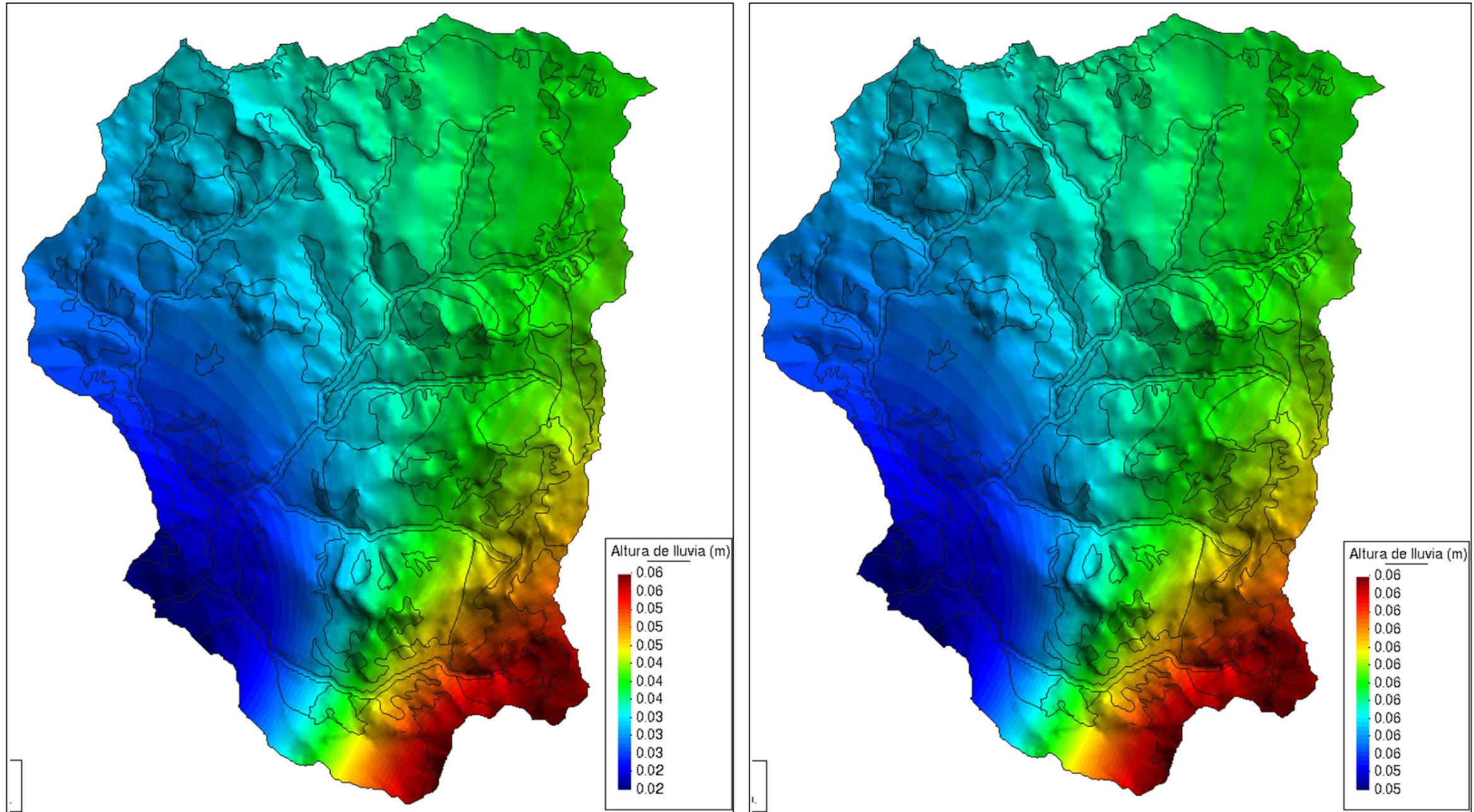


TORMENTA 1
Canchaque: 54.3 mm
Barrios: 34 mm

TORMENTA 2
Canchaque: 58.7 mm
Barrios: 65.1 mm

GRAFICO 2.8B

DISTRIBUCIÓN IDW DE PRECIPITACIONES OBSERVADAS

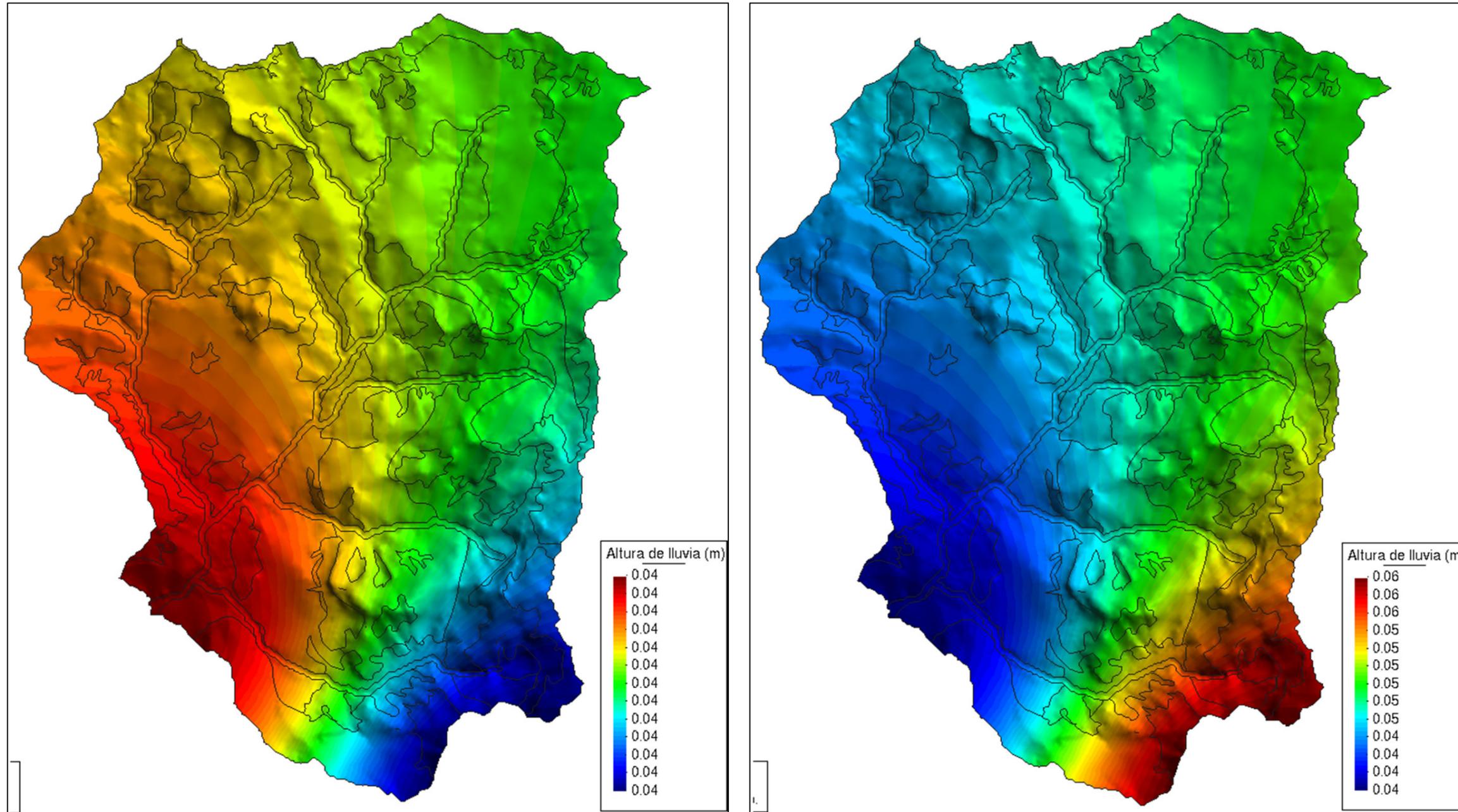


TORMENTA 3
Canchaque: 61.2 mm
Barrios: 19.2 mm

TORMENTA 4
Canchaque: 63.8 mm
Barrios: 53.6 mm

GRAFICO 2.8C

DISTRIBUCIÓN IDW DE PRECIPITACIONES OBSERVADAS



TORMENTA 5
Canchaque: 40.4 mm
Barrios: 44.1 mm

TORMENTA 6
Canchaque: 61.8 mm
Barrios: 38.5 mm

Anexo III: Resumen de Calicatas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS**

**TABLA 3.1
RESUMEN DE CALICATAS**

Nombre	RCPH1*	RCPH2*	RPA1*	RPA2*	RPA3*
Ubicación	9443126N 633048E Provincia de Morropón, Distrito de Chalaco, 2233 m.s.n.m.	9445730N 633566E Provincia de Morropón, Distrito de Chalaco, Sector Cerro Las Pircas. 3038 m.s.n.m.	9451056N 628170E Provincia de Ayabaca, Distrito de Frías, Sector Las Pircas (Meseta Andina). 3092 m.s.n.m.	9454120N 626382E Provincia de Ayabaca, Distrito de Frías, Sector Arenales (Meseta Andina). 3073 m.s.n.m.	9447764N 646637E Provincia de Ayabaca, Distrito de Frías, Sector Pur Pur. 1932 m.s.n.m.
Fisiografía	Vertiente montañosa moderadamente Disectada	Vertiente montañosa fuertemente Disectada	Altiplanicie Disectada	Altiplanicie ondulada	Vertiente montañosa fuertemente Disectada
Pendiente	8 - 15 %	15 - 25 %	8 - 15 %	0 - 4 %	8 - 15 %
Erosión	Ligera	Moderada	Moderada	Moderada en cárcavas	Ligera
Zona de Vida	Bosque húmedo - Montano Bajo Tropical	Bosque húmedo - Montano Tropical	Bosque húmedo - Montano Tropical	Bosque húmedo - Montano Tropical	Bosque seco - Premontano Tropical
Material Parental	Tonalita-diorita-Pamparumbe (KT-t,d-p). Constituido por gravas arenosas y limo arenoso con bolones y algo de bloques de hasta 1m, sub-redondeados y sub-angulosos, mayormente de naturaleza volcánica, medianamente densa a densa	Grupo San Pedro (Kim-sp). Consiste en una gruesa secuencia clástica volcánica, cubierta mayormente por una gruesa cobertura de suelo, favorecido por el clima húmedo de la región; los afloramientos son poco observables, haciendo difícil establecer su verdadera secuencia y su rango cronológico.	Tonalita-diorita-Pamparumbe (KT-t,d-p). Tonalita gris clara de textura granular que macroscópicamente se caracteriza por sus moteados oscuros debido a la concentración de cristales de biotita.	Tonalita-diorita-Pamparumbe (KT-t,d-p). Tonalita gris clara de textura granular que macroscópicamente se caracteriza por sus moteados oscuros debido a la concentración de cristales de biotita.	Grupo salas (Pi-s). Constituida por filitas argiláceas gris marrones a gris-violáceas, intercaladas con cimeritas verde pálidas o gris brunáceas y con capas delgadas de cuarcitas de grano fino. Afloran mayormente al sureste de Piura.
Vegetación	Pastos cultivados	Matorral, helechos	Césped de puna, pajonal bajo y ralo	Pasto natural, Césped de puna, bofedales	Cultivos de caña, maíz, café
Pedregosidad superficial	-	-	-	-	-
Descripción del perfil del suelo	Clase textural Franco Arcilloso; color pardo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad de 1m.	Clase textural Franco Arcilloso; color pardo grisáceo muy oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad mayor a 1m.	Clase textural Franco; color pardo grisáceo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad mayor a 1m.	Clase textural Arcillo Limoso; color marrón muy pálido, amarillento claro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Franco; color pardo amarillento oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad menor a 1m.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 3.1 (Cont.)
RESUMEN DE CALICATAS

Nombre	HB1*	HB2*	HB3*	HB4*	HB5*
Ubicación	9417398N 673010E Provincia de Huancabamba, Distrito de Huancabamba, Sector Aeropuerto 1890 m.s.n.m.	9421594N 674351E Provincia de Huancabamba, Distrito de Huancabamba, Sector Tierra Negra 2209 m.s.n.m.	9420720N 672830E Provincia de Huancabamba, Distrito de Huancabamba, Sector Cerro Colorado 2001 m.s.n.m.	9412612N 667773E Provincia de Huancabamba, Distrito de Huancabamba, Sector Nueva Esperanza 2829 m.s.n.m.	9407076N 660238E Provincia de Huancabamba, Distrito de Canchaque, Sector El Tambo 2938 m.s.n.m.
Fisiografía	Vertiente montañosa moderadamente Disectada	Vertiente montañosa moderadamente Disectada	Vertiente montañosa moderadamente Disectada	Vertiente montañosa fuertemente Disectada	Vertiente montañosa fuertemente Disectada
Pendiente	15 - 25 %	8 - 15 %	8 - 15 %	15 - 25 %	15 - 25 %
Erosión	Moderada a severa, remoción en masa	Moderada, de tipo laminar	Moderada	Moderada, de tipo laminar	Moderada a severa, remoción en masa y laminar
Zona de Vida	Monte espinoso - Pre-montano tropical	Bosque húmedo - Montano Bajo tropical	Bosque seco - Montano Bajo tropical	Bosque húmedo - Montano Bajo tropical	Bosque muy húmedo - Montano tropical
Material Parental	Volcánico llama (Tim- vii), está conformada por bancos gruesos de brechas piroclásticas andesíticas, gris violáceas a moradas, intercalados con niveles de tobas ácidas, blanco verdosas; ocasionalmente se observan conglomerados volcánicos.	Formación Rio Seco (Pi-rs) secuencia epimetamórfica, predominantemente cuarcítica. Al sureste de Chulucanas en la carretera hacia Huancabamba	Volcánico llama (Tim- vii), está conformada por bancos gruesos de brechas piroclásticas andesíticas, gris violáceas a moradas, intercalados con niveles de tobas ácidas, blanco verdosas; ocasionalmente se observan conglomerados volcánicos.	Volcánico porculla (Tim-vp) constituida, tobas andesíticas y riolíticas, gris blanquecinas, en bancos masivos, que conforman farallones a lo largo de los flancos de los cursos fluviales, al sur de Piura	Volcánico llama (Tim- vii), está conformada por bancos gruesos de brechas piroclásticas andesíticas, gris violáceas a moradas, intercalados con niveles de tobas ácidas, blanco verdosas; ocasionalmente se observan conglomerados volcánicos.
Vegetación	Matorral y cultivos (maíz, papa, caña), maguey, cactus, eucalipto	Matorral y cultivos (maíz, papa, caña), eucalipto	Matorral y cultivos de secano (maíz, trigo, arveja)	Cultivos de secano (papa, trigo, cebada)	Matorral de páramo
Pedregosidad superficial	20%	-	20%	-	-
Descripción del perfil del suelo	Clase textural Franco Arenoso; color pardo grisáceo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad de 1m.	Clase textural Franco Arenoso; color pardo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad de 1m.	Clase textural Franco Arenoso; color pardo rojizo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad mayor a 1m.	Clase textural Franco Arenoso; color pardo rojizo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad mayor a 1m.	Clase textural Franco Arenoso; color pardo gris oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad mayor a 1m.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 3.1 (Cont.)
RESUMEN DE CALICATAS

Nombre	RPTG1*	C1**	C2**	C3**	C4**
Ubicación	9459094N 571883E Provincia de Piura, Distrito de Tambogrande, Sector Pedregal 83 m.s.n.m.	9463638N 610706E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapollica, Sector Coletas 1746 m.s.n.m.	9465596N 612946E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapollica, Sector Masías 1597 m.s.n.m.	9467066N 613745E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapollica, Sector Naranjo 1617 m.s.n.m.	9467970N 614447E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapollica, Sector Pampa Larga 1748 m.s.n.m.
Fisiografía	Valle y llanura irrigada	Colinas	Colinas	Colinas	Colinas
Pendiente	0 - 4 %	8 - 15 %	15 - 25 %	15 - 25 %	15 - 25 %
Erosión	Nula	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Zona de Vida	Bosque seco - Premontano tropical	Bosque húmedo - Montano tropical	Bosque húmedo - Montano bajo tropical	Bosque húmedo - Montano bajo tropical	Bosque húmedo - Montano tropical
Material Parental	Depósitos aluviales (Qr-fl) depósitos acumulados en el fondo de los grandes cursos fluviales; están constituidos por conglomerados inconsolidados, arenas sueltas y materiales limo arcillosos; estos depósitos tienen mayor amplitud en los tramos de valle y llanura.	Coluvio aluvial	Aluvial	Aluvial	Aluvial
Vegetación	Cultivo de mango y limón	Cultivo de caña y papa	Cultivo de plátano, frejol, pastos	Cultivo de plátano, frejol, pastos, caña, maíz	Cultivo de café y maíz
Pedregosidad superficial	-	-	-	-	-
Descripción del perfil del suelo	Clase textural Franco; color pardo grisáceo muy oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.5%), profundidad de 1m.	Clase textural Franco Arcilloso; color pardo amarillento oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.35%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Franco Arcilloso Limoso; color gris muy oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.55%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Arcilloso Limoso; color pardo rojo, contenido bajo en materia orgánica (0.30%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Franco Arcilloso Limoso; color pardo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.55%), profundidad menor a 1m.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS**

**TABLA 3.1 (Cont.)
RESUMEN DE CALICATAS**

Nombre	C5**	C6**	C7**	C8**
Ubicación	9463638N 610706E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapillica, Sector Sauce Repela 1644 m.s.n.m.	9468979N 613027E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapillica, Sector Huacan 1542 m.s.n.m.	9472056N 612658E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapillica, Sector Sapillica 1443 m.s.n.m.	9470226N 612965E Provincia de Ayabaca, Distrito de Sapillica, Sector Palto 1586 m.s.n.m.
Fisiografía	Colinas	Colinas - montañas	Colinas	Colinas
Pendiente	15 - 25 %	8 - 15 %	8 - 15 %	15 - 25 %
Erosión	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Zona de Vida	Bosque húmedo - Montano bajo tropical	Bosque húmedo - Montano bajo tropical	Bosque húmedo - Montano bajo tropical	Bosque húmedo - Montano bajo tropical
Material Parental	Aluvial	Aluvial	Aluvial	Aluvial
Vegetación	Cultivo de maíz	Cultivo de maíz	-	Malezas
Pedregosidad superficial	-	-	-	-
Descripción del perfil del suelo	Clase textural Franco Arcilloso; color pardo amarillento, contenido bajo en materia orgánica (0.45%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Franco Arcilloso limoso; color pardo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.65%), profundidad menor a 1m.	Clase textural Franco Arenoso; color pardo oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.75%), profundidad mayor a 1m.	Clase textural Franco Arcilloso; color pardo amarillento oscuro, contenido bajo en materia orgánica (0.75%), profundidad de 1m.

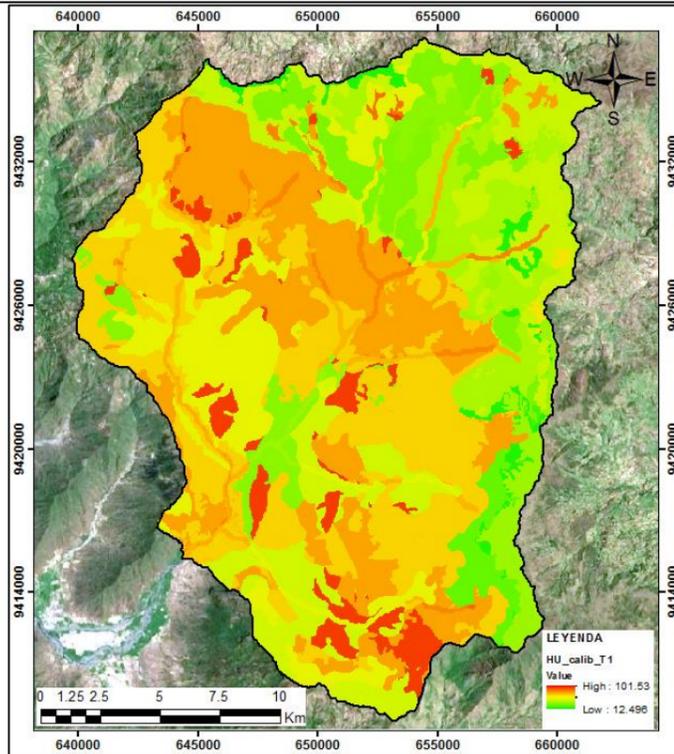
Fuente:

*Servicio de Consultoría para ejecutar el Estudio de Capacidad de Uso Mayor de la Tierra en el Departamento de Piura, 2010.

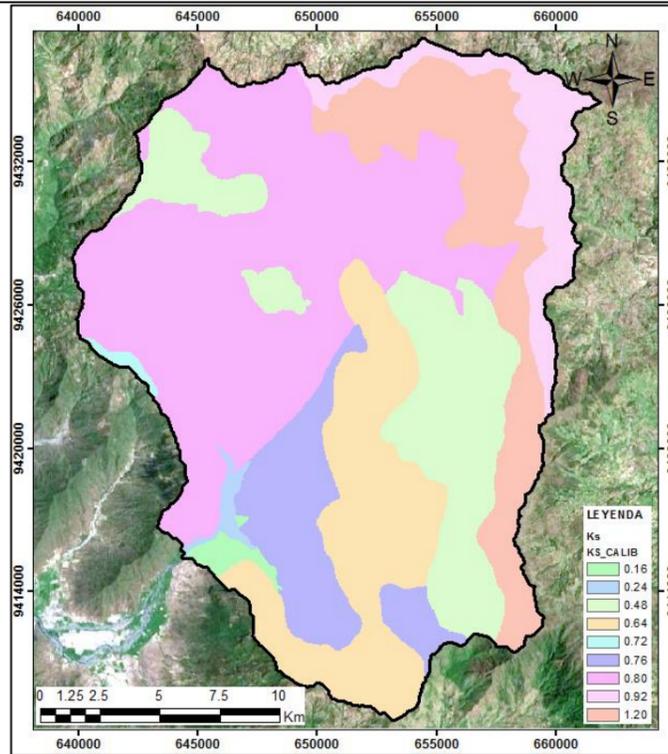
**Caracterización y Evaluación de los Niveles de Fertilidad en algunos Suelos del Distrito de Sapillica, Provincia de Ayabaca, Región Piura, 2015.

Anexo IV: Parámetros Calibrados

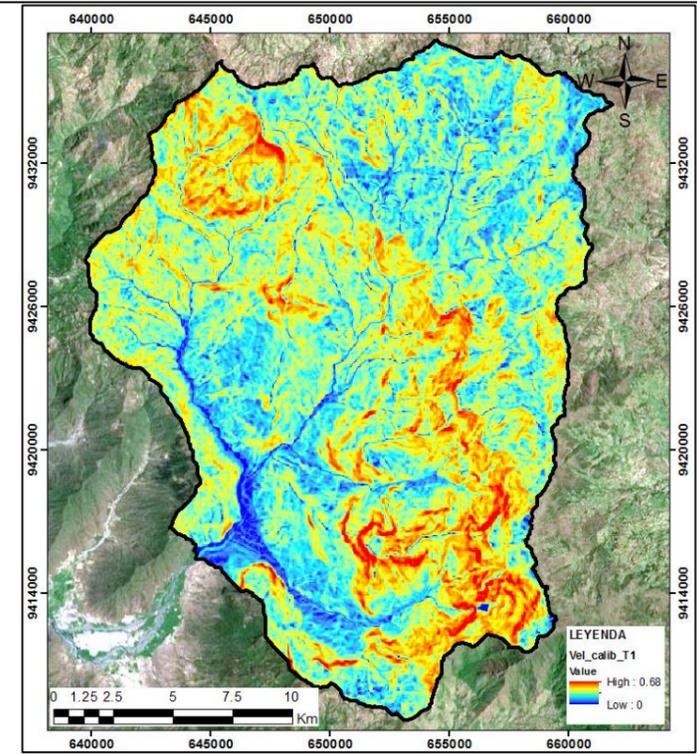
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 1



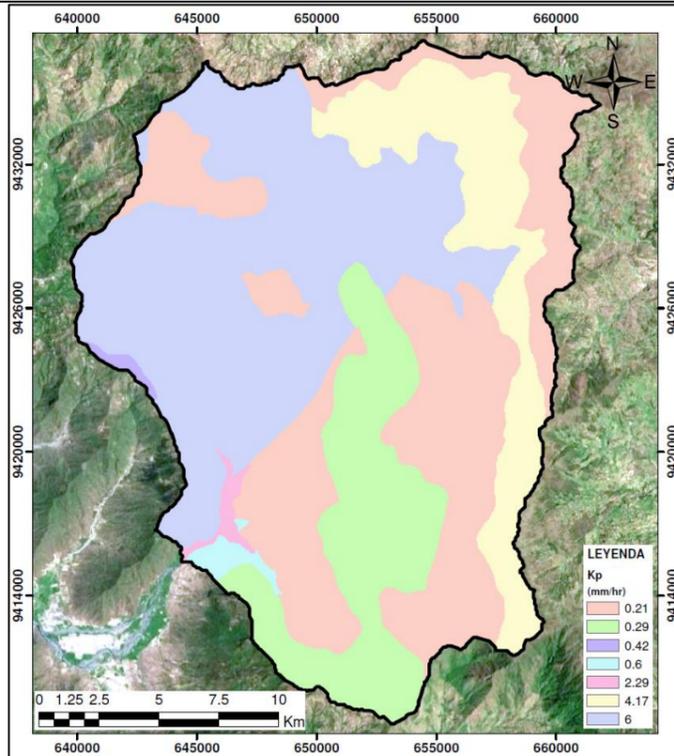
a) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



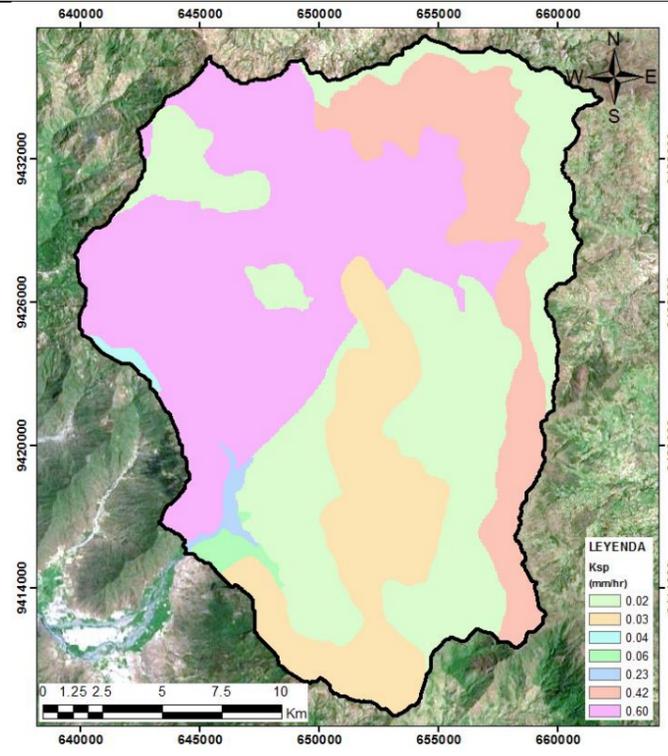
b) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



c) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



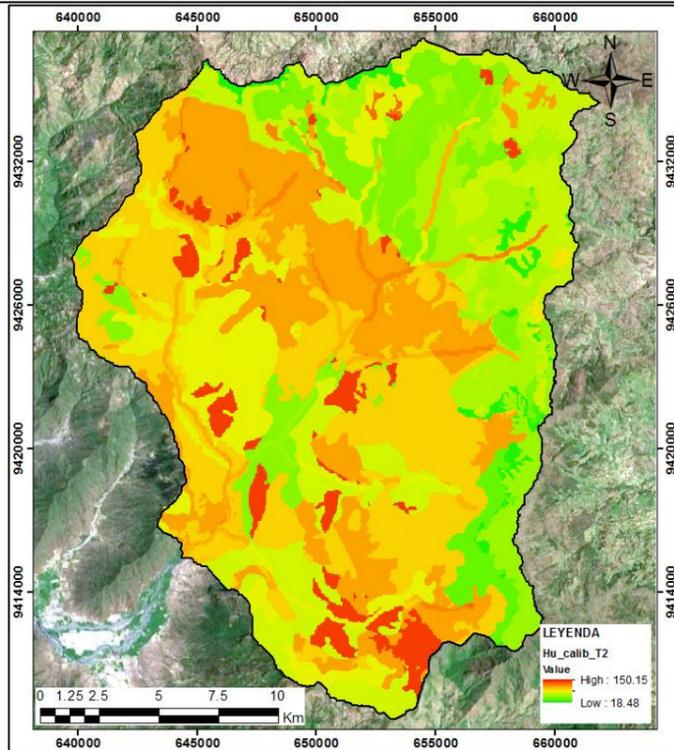
d) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



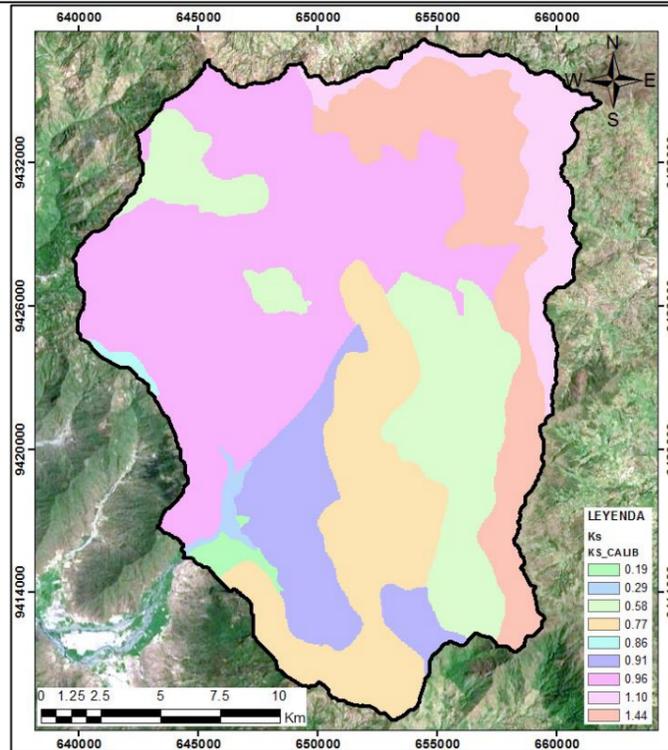
e) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

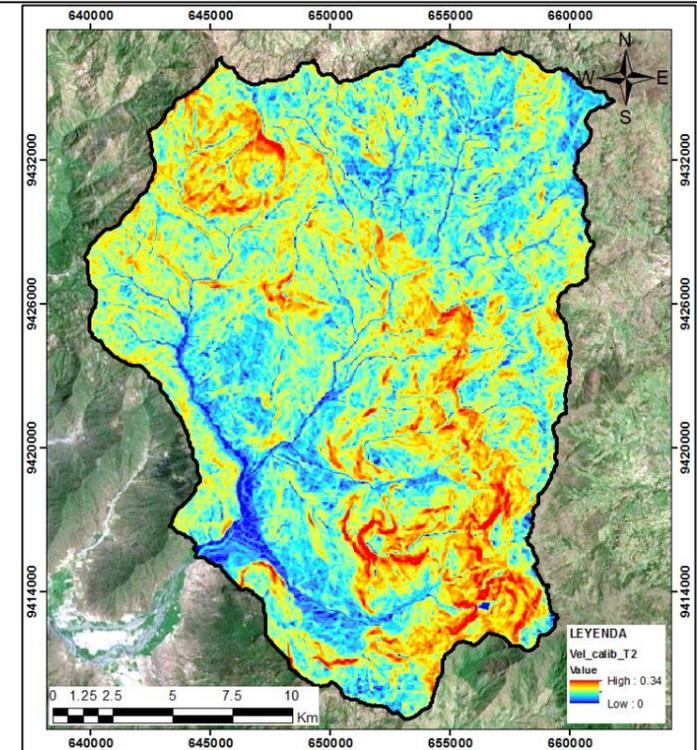
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 2



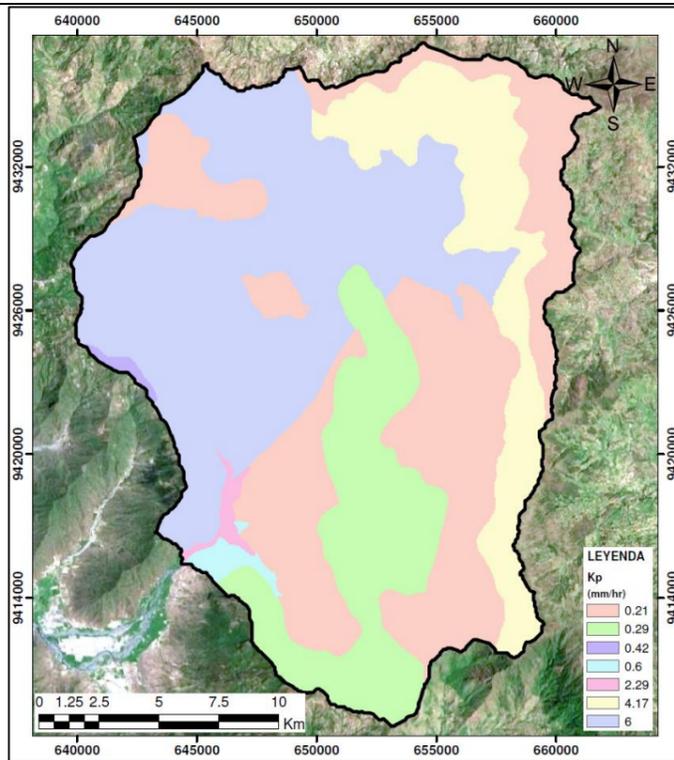
a) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



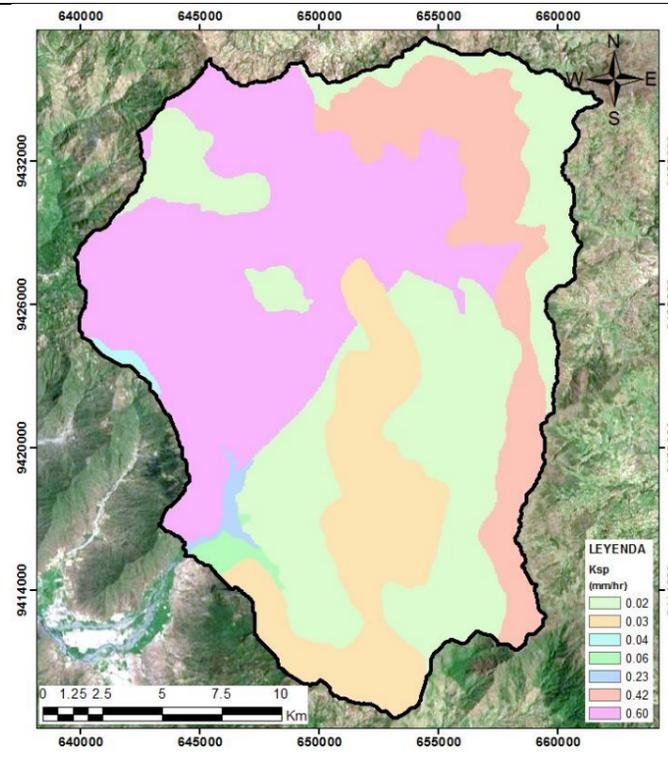
b) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



c) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



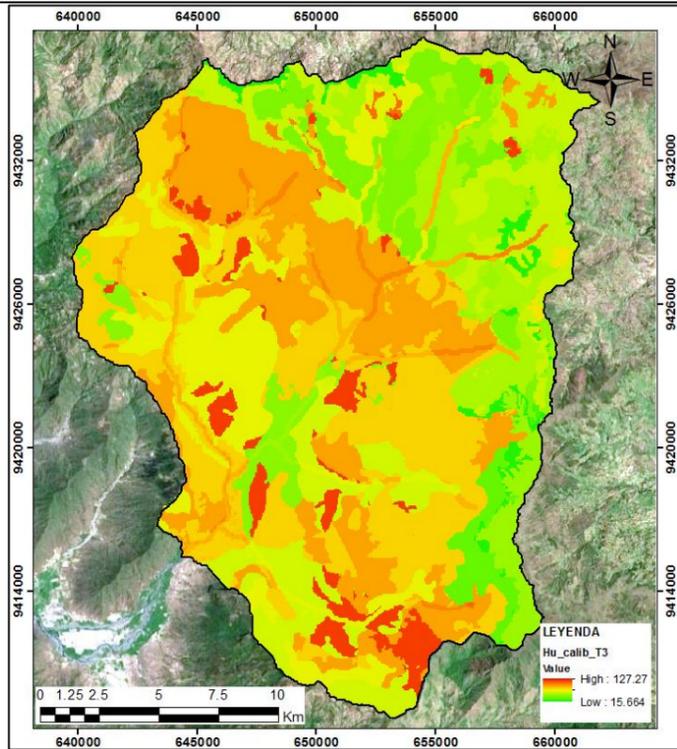
d) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



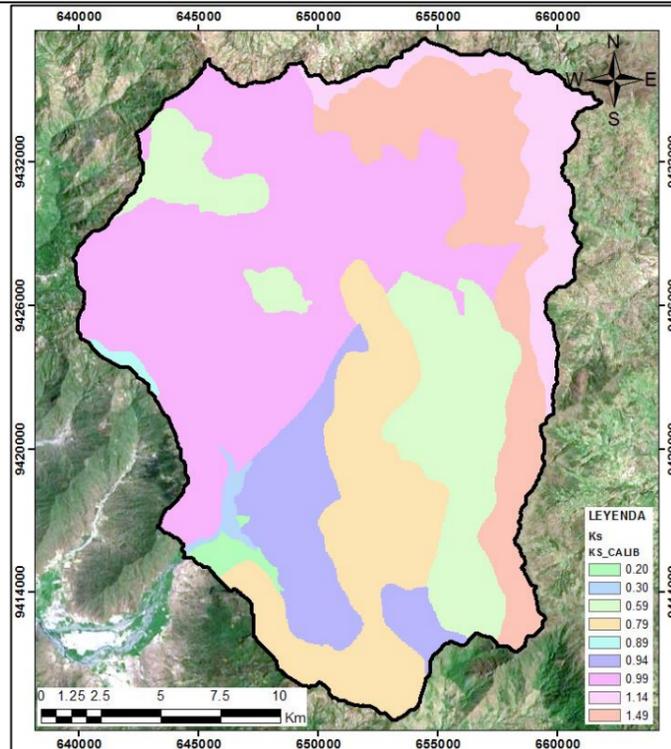
e) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

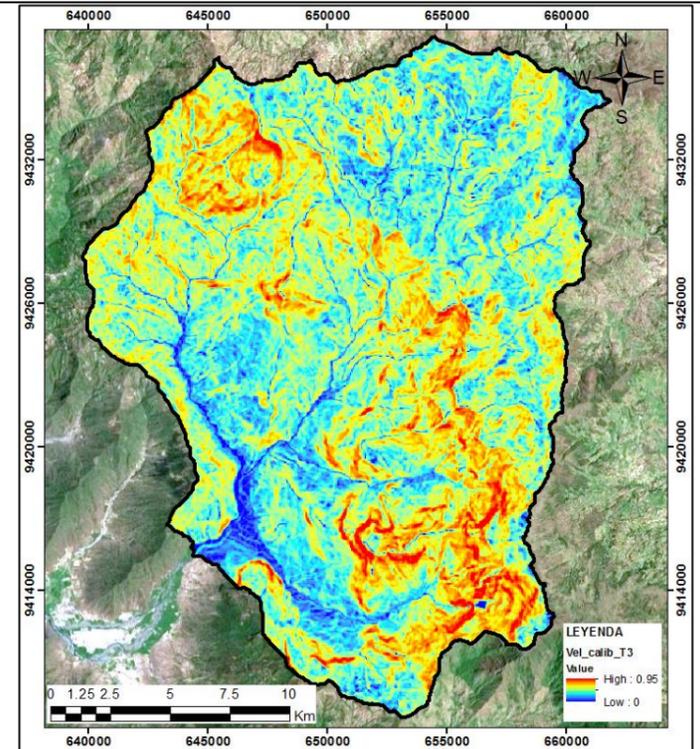
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 3



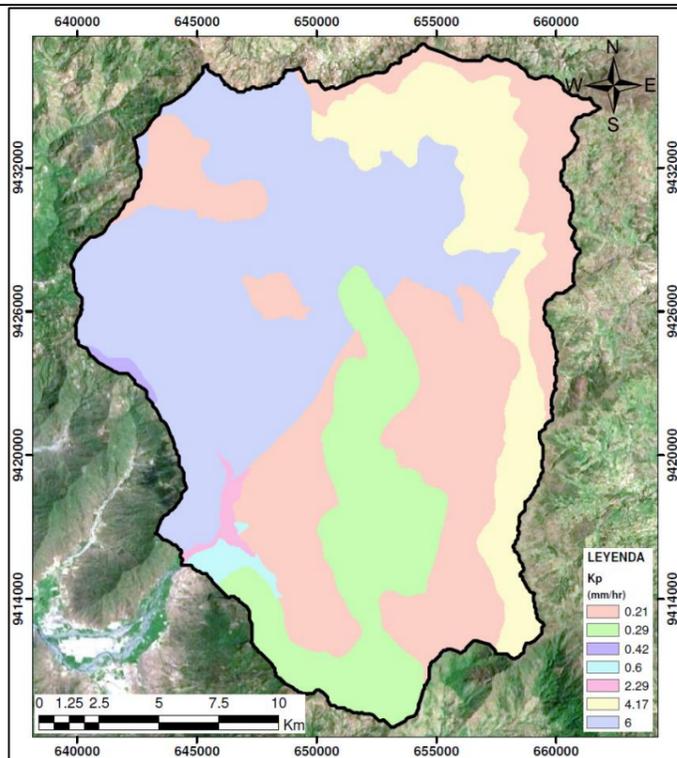
f) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



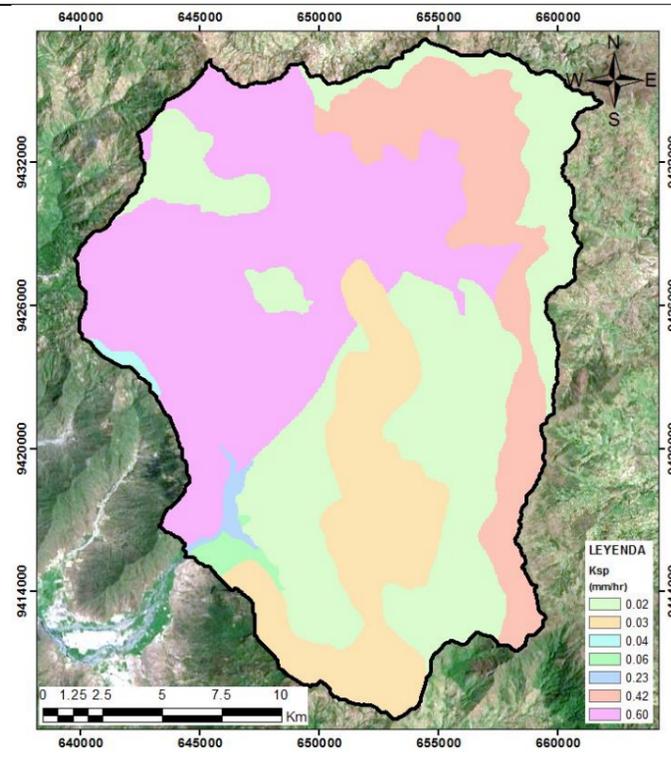
g) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



h) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



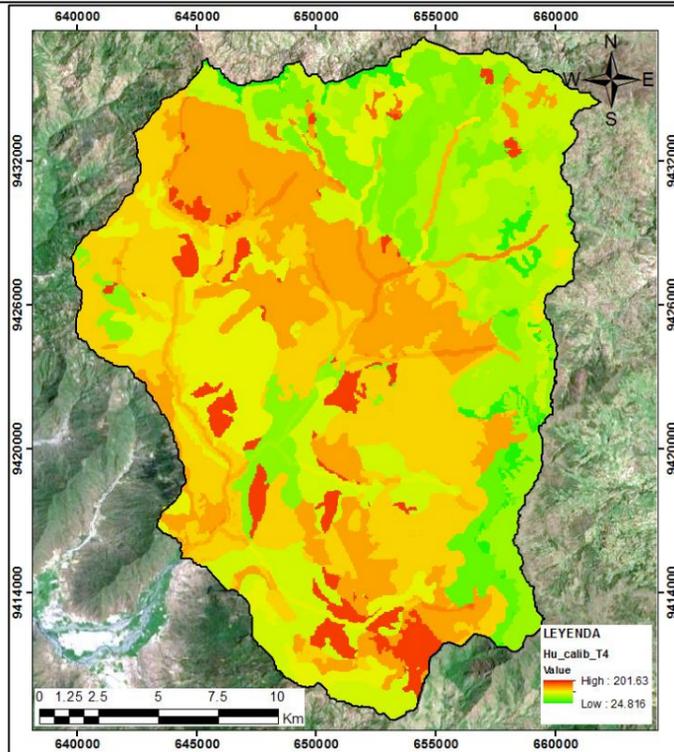
i) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



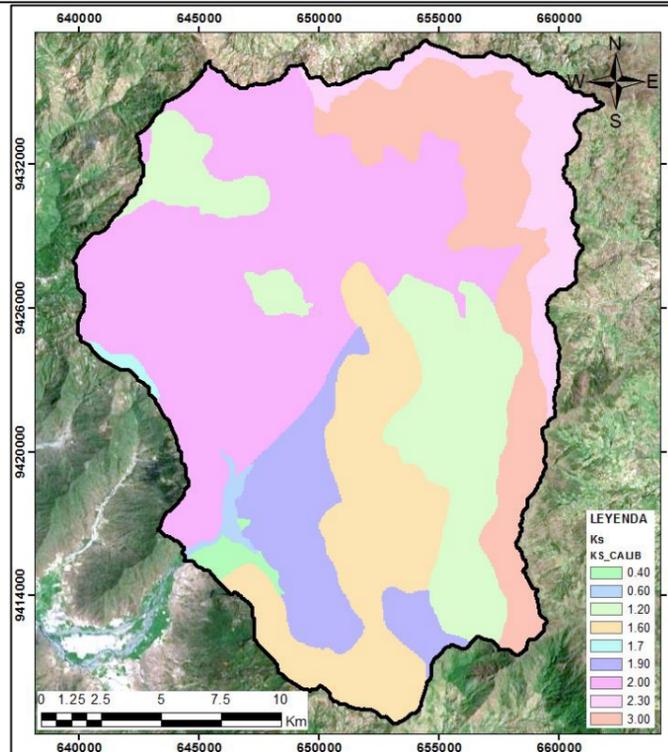
j) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

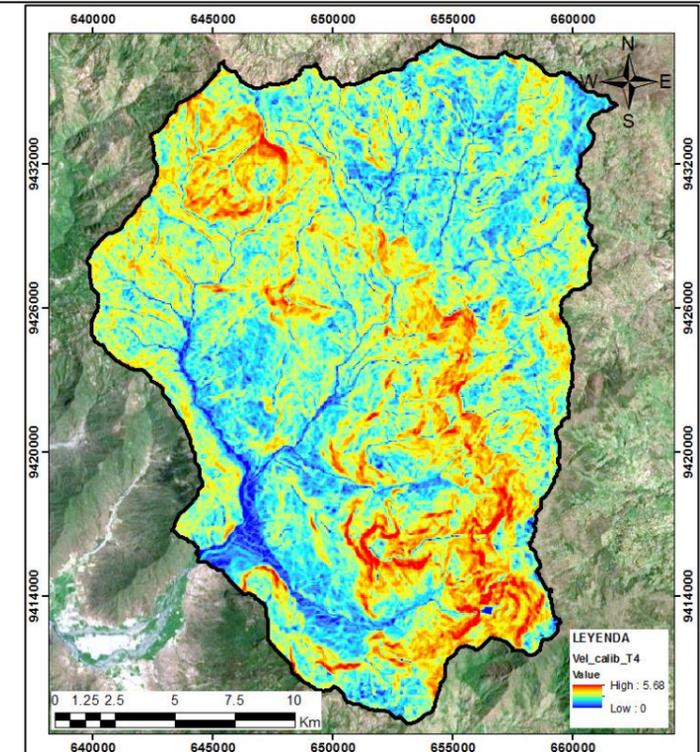
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 4



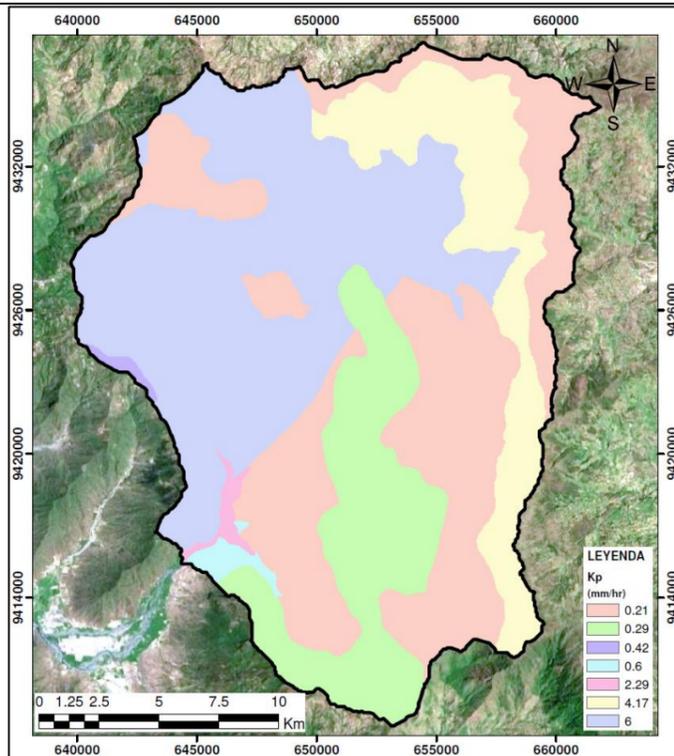
f) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



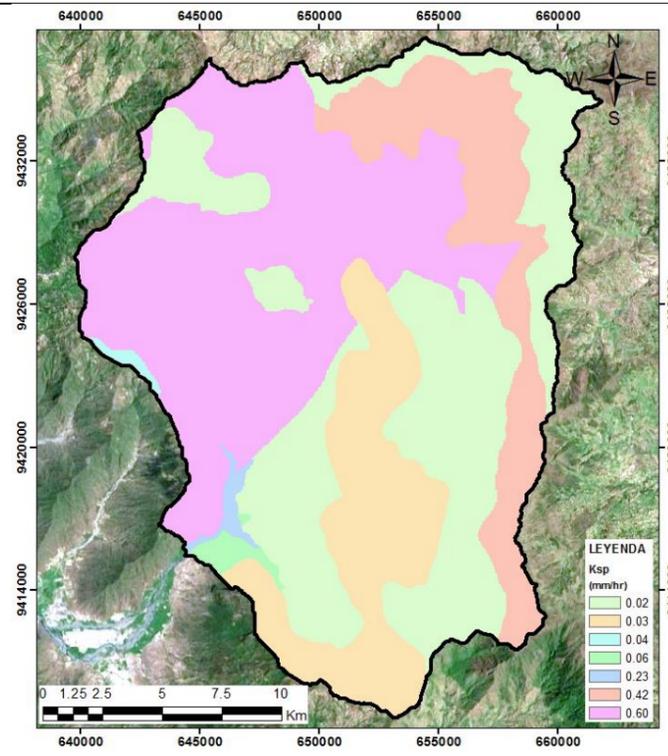
g) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



h) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



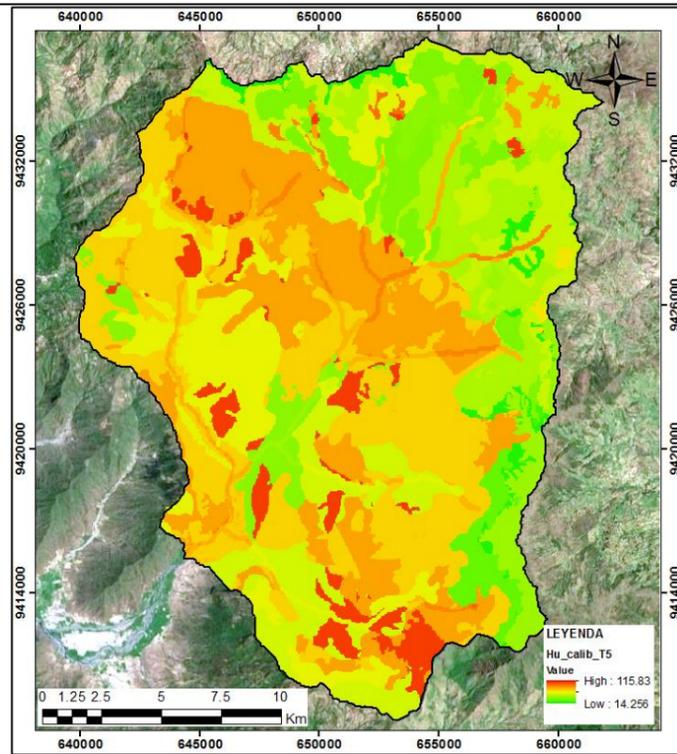
i) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



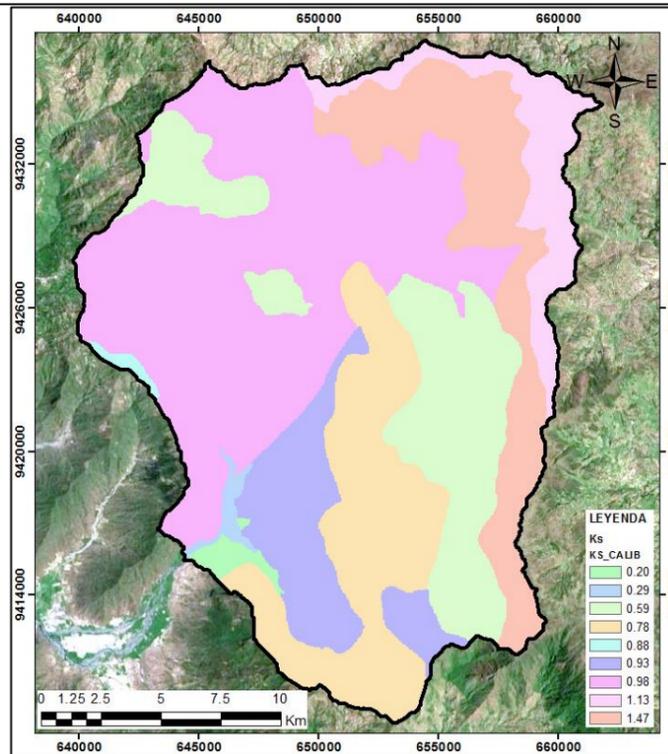
j) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

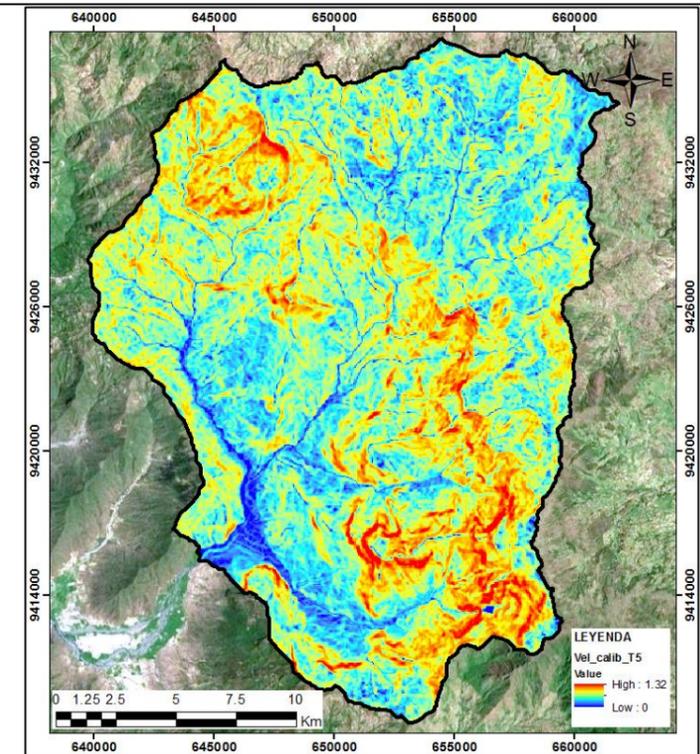
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 5



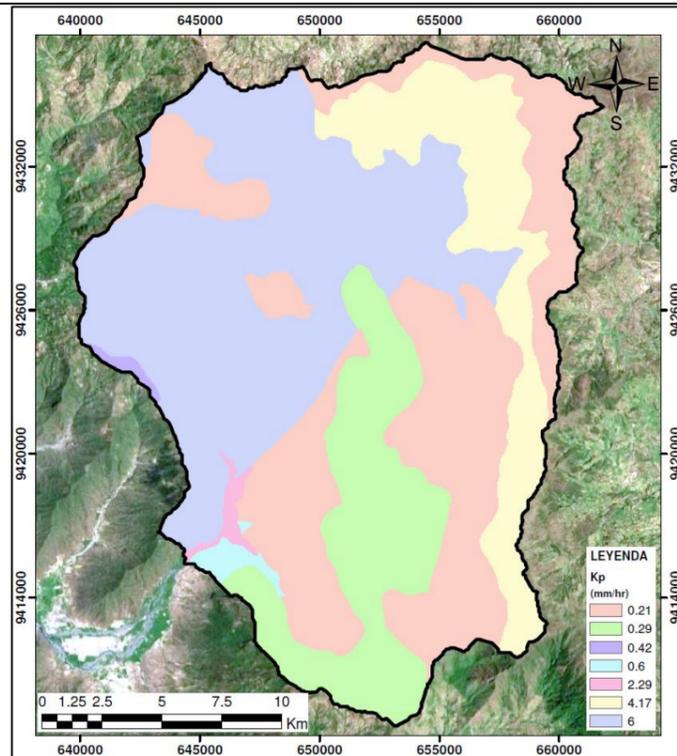
k) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



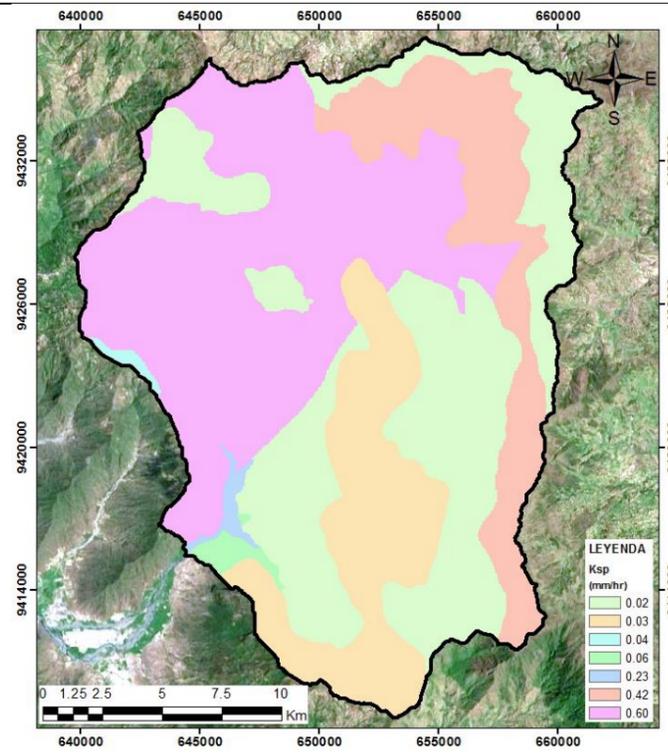
l) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



m) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



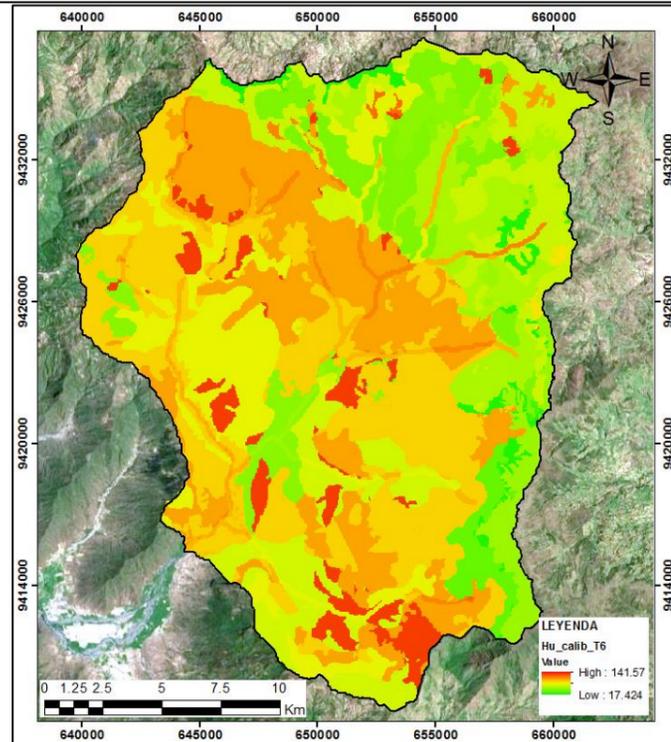
n) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



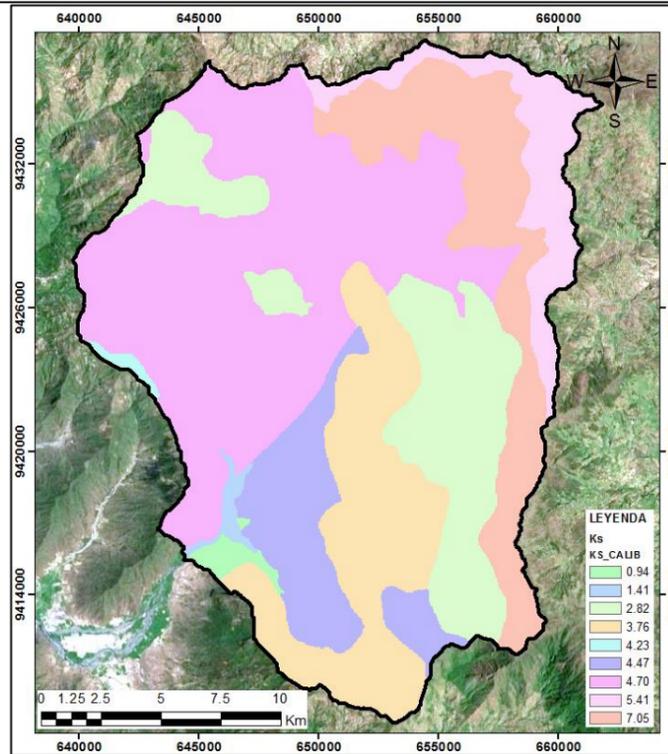
o) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

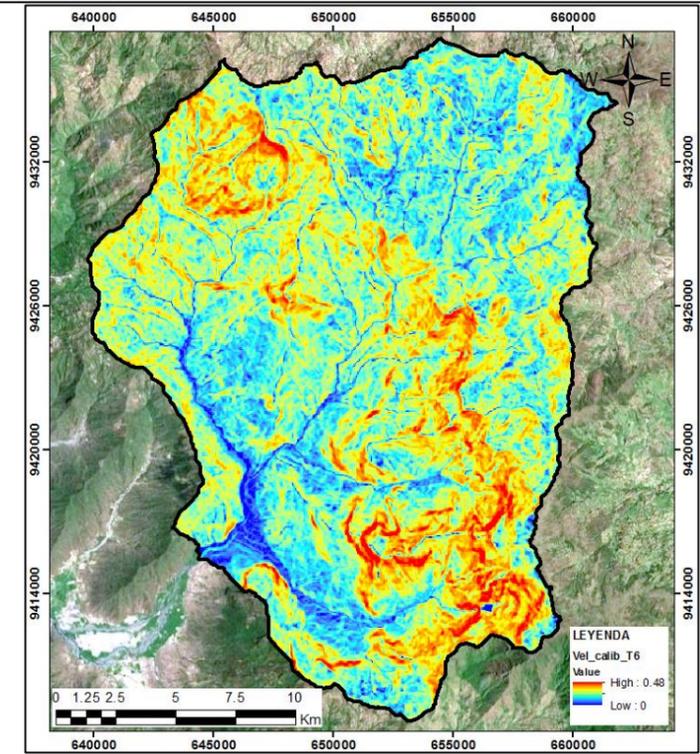
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 6



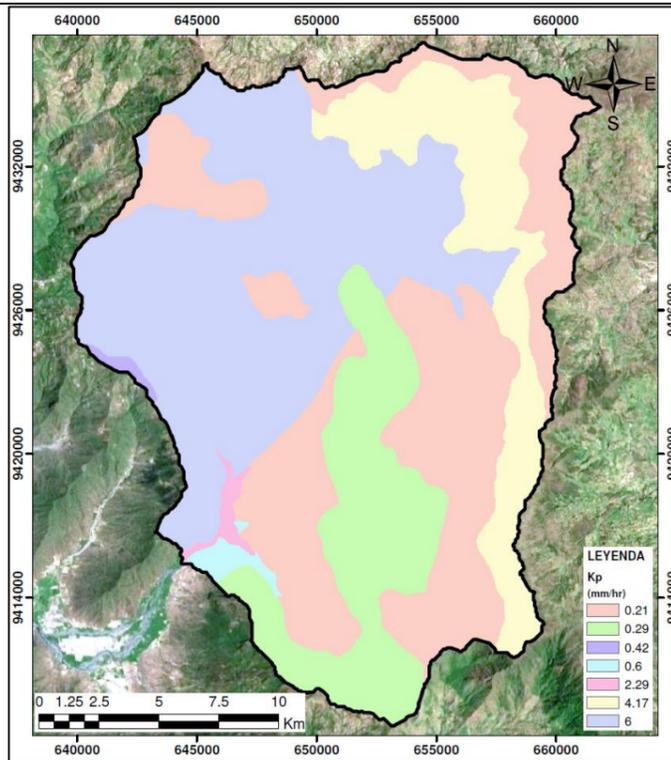
k) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



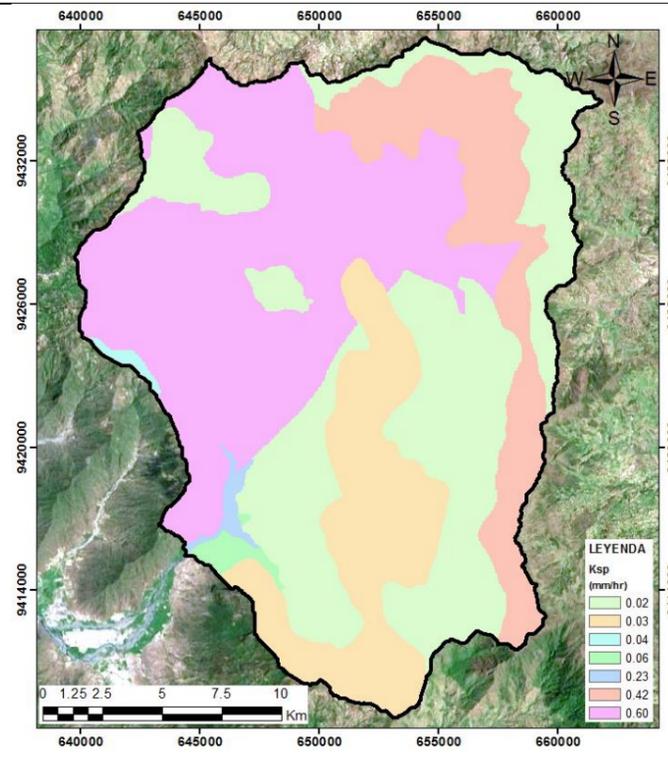
l) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



m) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



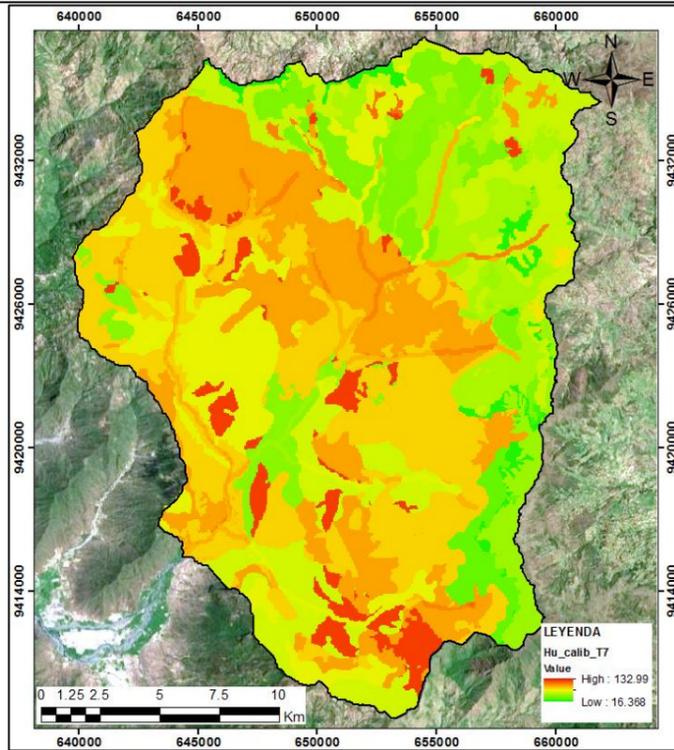
n) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



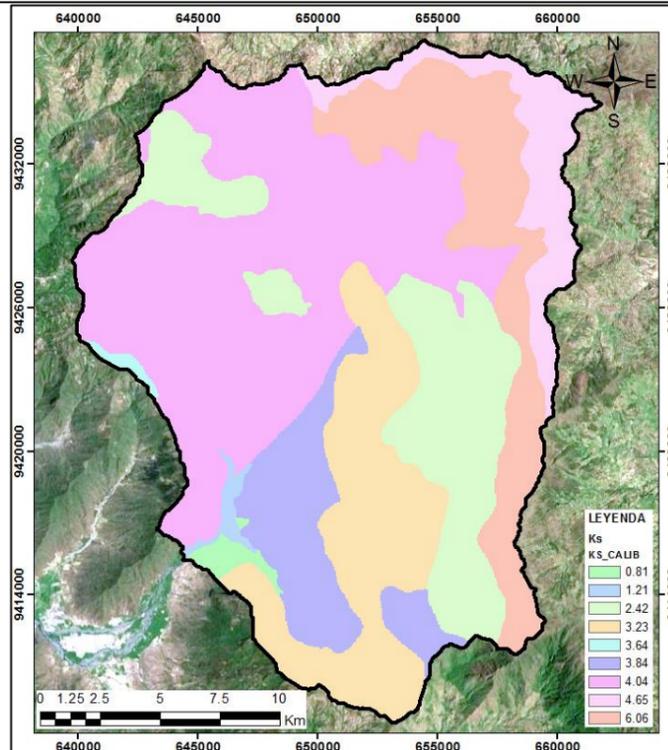
o) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

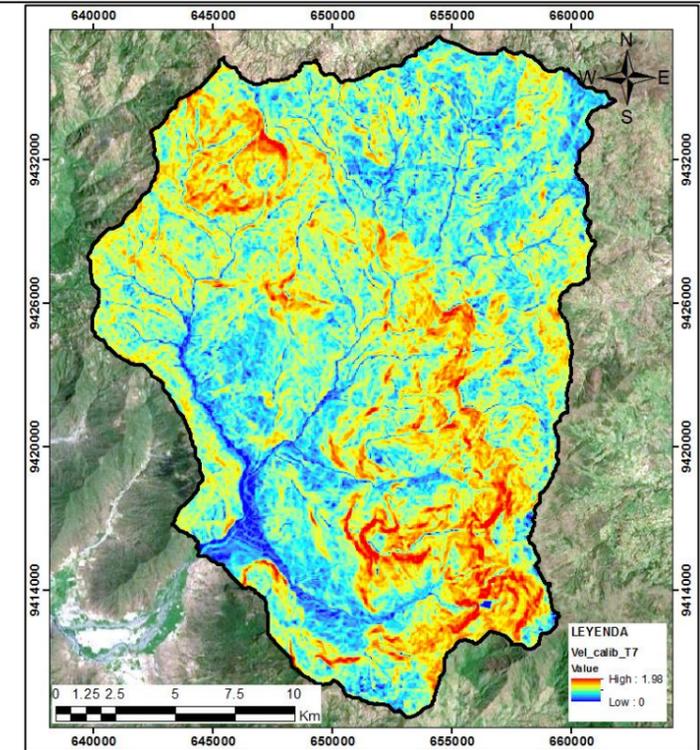
MAPAS DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO TETIS – TORMENTA 7



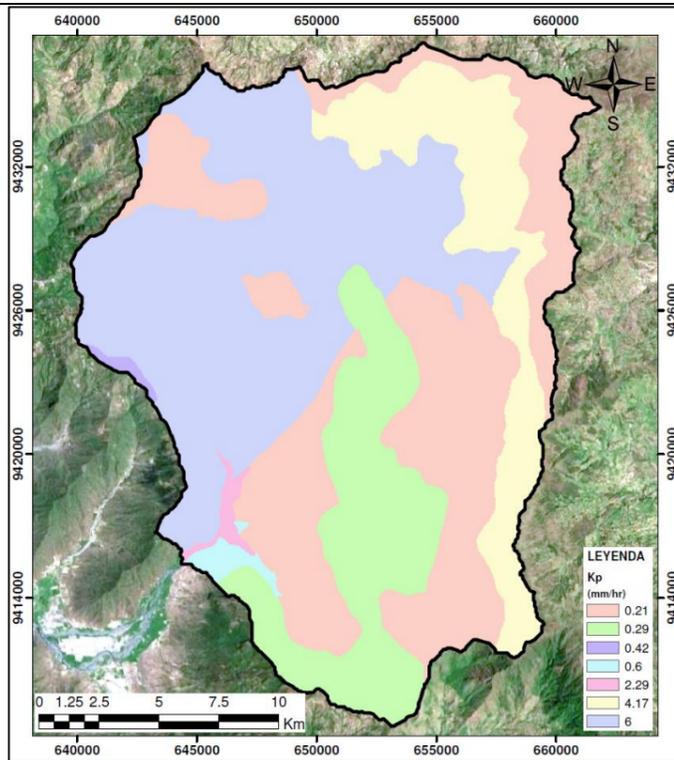
p) Mapa de Almacenamiento Estático (Hu)



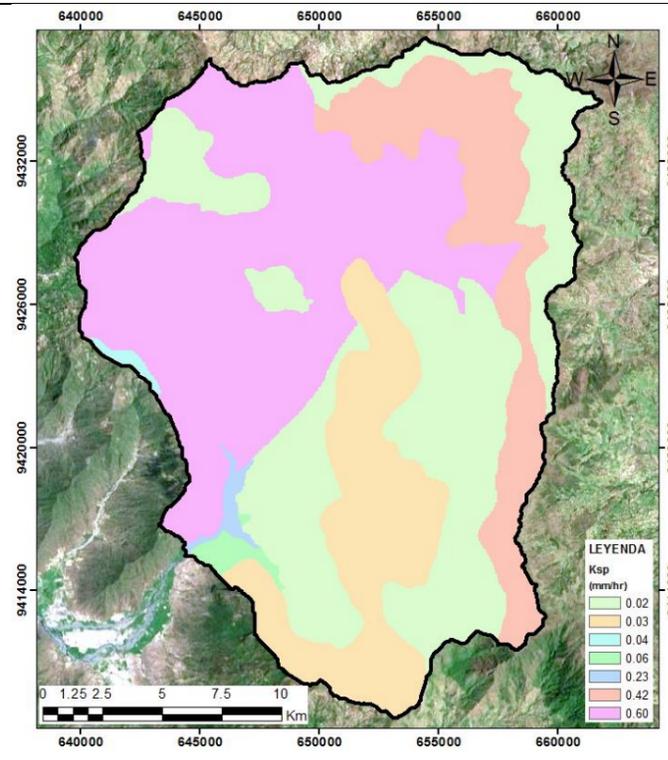
q) Mapa de Capacidad de Infiltración (Ks – mm/hr).



r) Mapa Velocidad de Ladera (m/s).



s) Mapa de Capacidad de percolación (mm/hr).*



t) Mapa de Capacidad de pérdidas del Acuífero profundo (mm/hr)

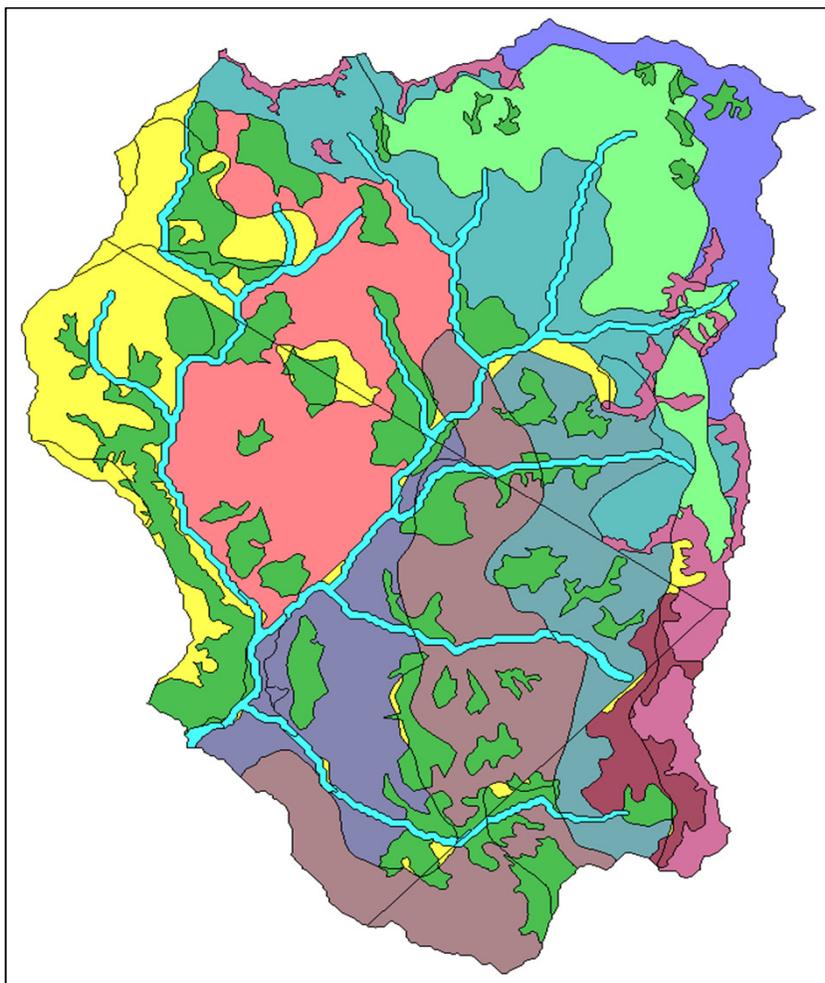
* El Mapa de Capacidad de percolación, es similar para los mapas de conductividad hidráulica de interflujo (Kss) y conductividad hidráulica del acuífero (Ksa).

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 1

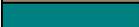
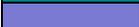
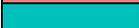
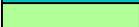
	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	400	0.464	0.4	1.5	10	0.6
	Cauces	400	0.479	1	0.1	1	0.05 - 0.14 - 0.26
	Montañoso	300	0.501	0.4	0.3	3	0.24
	Pradera 1	1200	0.464	0.4	1.25	6	0.4
	Pradera 2	1200	0.464	0.4	2.05	6	0.4
	Pradera 3	1200	0.464	0.4	1.25	6	0.4
	Pradera 4	1200	0.464	0.4	1.25	6	0.1
	Pradera 5	1200	0.464	0.4	1.25	6	0.1
	Sembríos 1	800	0.501	0.4	0.35	6	0.3
	Sembríos 2	800	0.501	0.4	0.55	6	0.3
	Sembríos 3	800	0.501	0.4	0.35	6	0.3
	Suelo desnudo	300	0.463	0.4	0.5	5	0.24

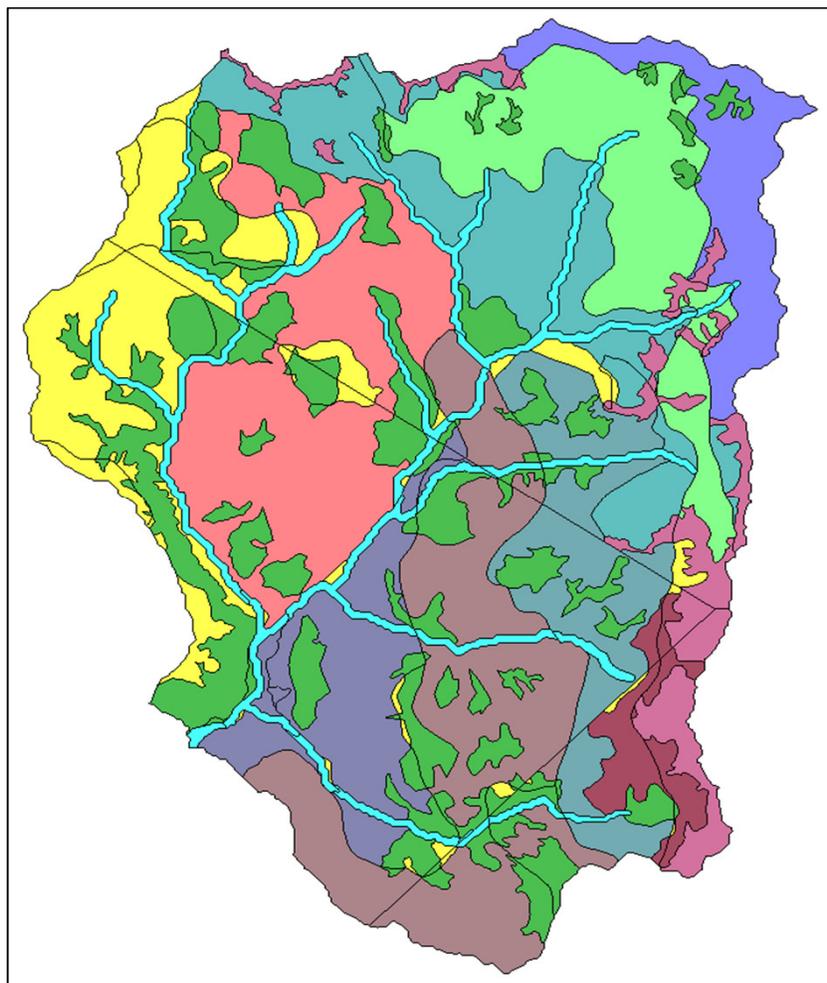


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 2

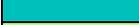
	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	400	0.464	0.75	1.5	10	0.6
	Cauces	400	0.479	1	0.1	1	0.30 - 0.50
	Montañoso	300	0.501	0.75	0.3	3	0.24
	Pradera 1	1200	0.464	0.75	0.33	6	0.55
	Pradera 2	1200	0.464	0.75	0.5	6	0.55
	Pradera 3	1200	0.464	0.75	0.33	6	0.55
	Pradera 4	1200	0.464	0.75	0.33	6	0.55
	Pradera 5	1200	0.464	0.75	0.33	6	0.55
	Sembríos 1	1000	0.501	0.75	0.35	6	0.65
	Sembríos 2	1000	0.501	0.75	0.55	6	0.65
	Sembríos 3	1000	0.501	0.75	0.35	6	0.65
	Suelo desnudo	300	0.463	0.75	0.5	5	0.24

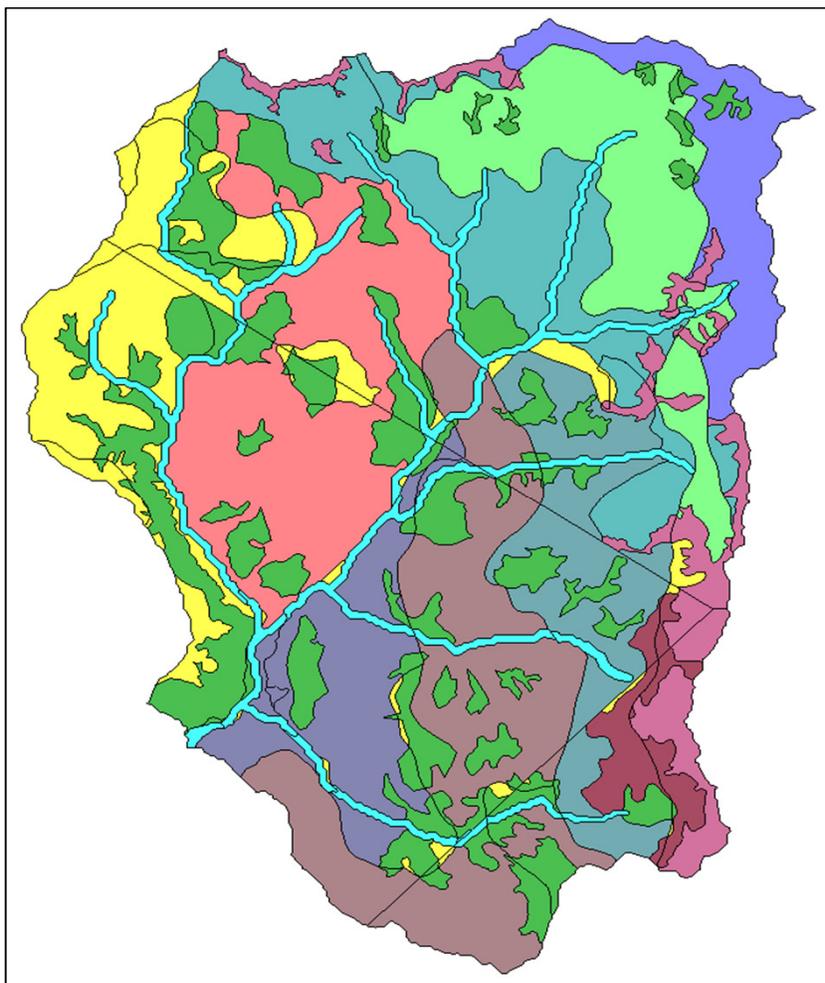


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 3

	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	600	0.464	0.4	1.1	12	0.6
	Cauces	600	0.479	1	0.1	1	0.05 - 0.1
	Montañoso	400	0.501	0.4	1.3	4	0.24
	Pradera 1	1200	0.464	0.4	0.9	10	0.4
	Pradera 2	1200	0.464	0.4	1	10	0.4
	Pradera 3	1200	0.464	0.4	0.9	10	0.4
	Pradera 4	1200	0.464	0.4	0.45	10	0.4
	Pradera 5	1200	0.464	0.4	0.45	10	0.4
	Sembríos 1	1000	0.501	0.4	0.85	10	0.36
	Sembríos 2	1000	0.501	0.4	0.85	10	0.36
	Sembríos 3	1000	0.501	0.4	0.85	10	0.36
	Suelo desnudo	400	0.463	0.4	3	6	0.24

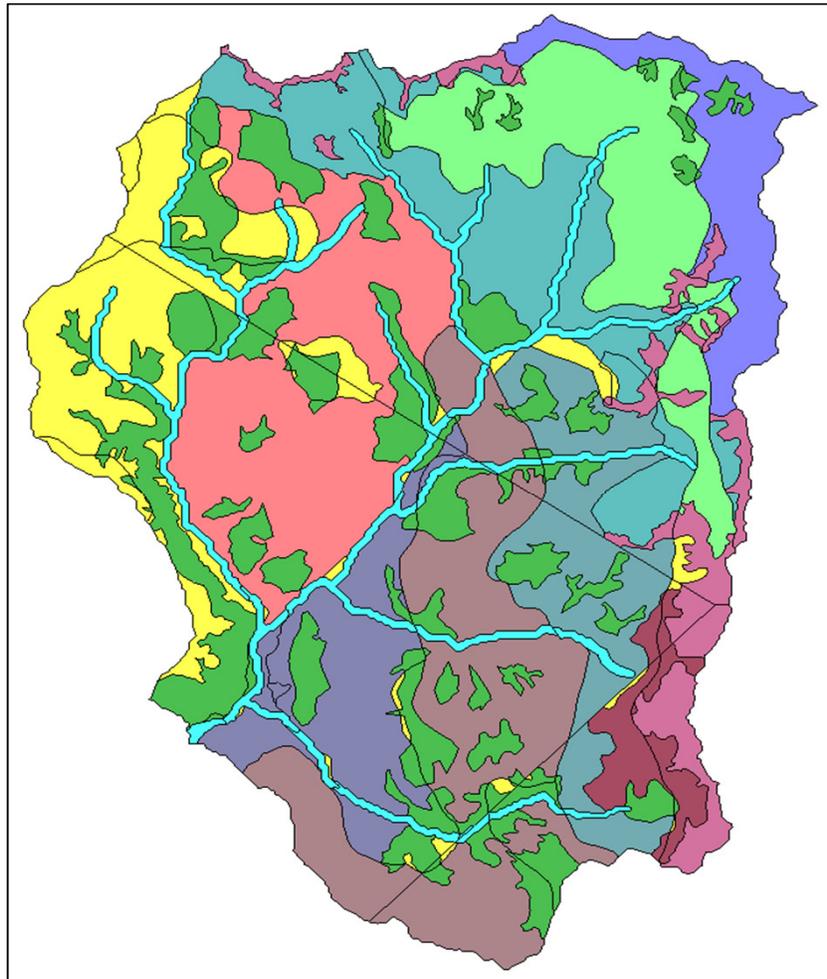


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 4

	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	200	0.464	0.8	8	10	0.6
	Cauces	200	0.479	1	0.1	1	0.025
	Montañoso	300	0.501	0.8	6	4	0.24
	Pradera 1	600	0.464	0.8	8	8	0.2
	Pradera 2	600	0.464	0.8	4	8	0.2
	Pradera 3	600	0.464	0.8	4	8	0.2
	Pradera 4	600	0.464	0.8	4	8	0.2
	Pradera 5	600	0.464	0.8	8	8	0.2
	Sembríos 1	500	0.501	0.8	11	8	0.18
	Sembríos 2	500	0.501	0.8	11	8	0.18
	Sembríos 3	500	0.501	0.8	11	8	0.18
	Suelo desnudo	300	0.463	0.8	6	5	0.15

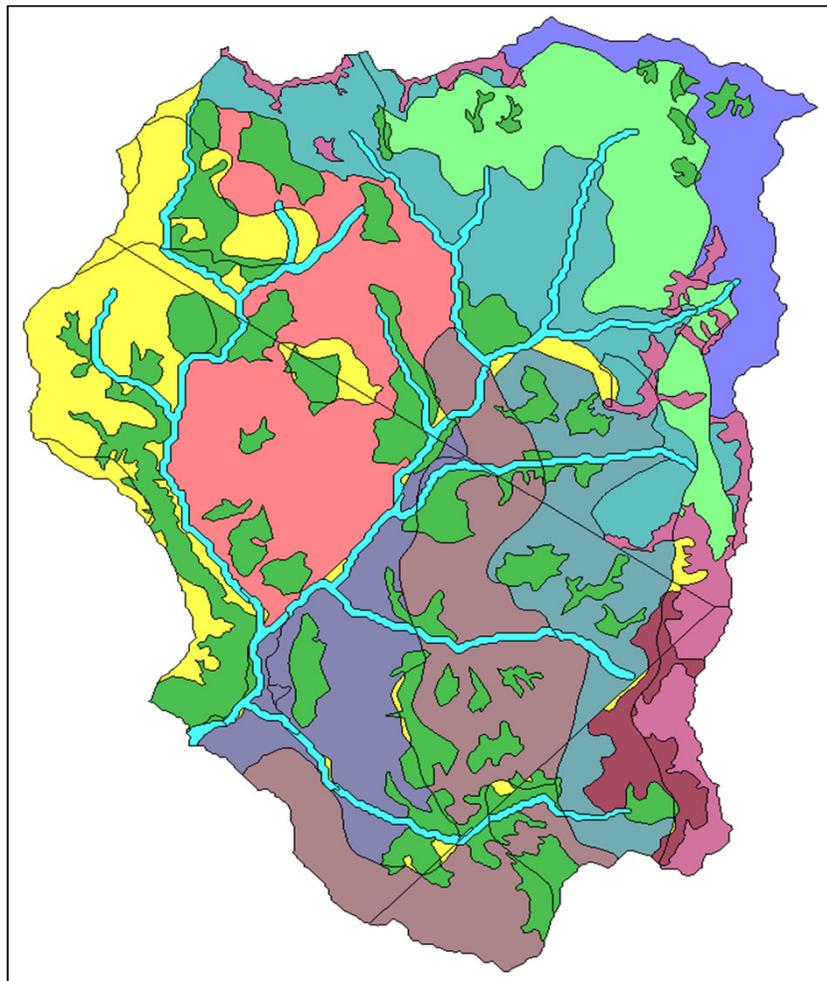


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 5

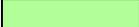
	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	200	0.464	0.3	0.5	25	0.6
	Cauces	200	0.479	1	0.1	1	0.04 - 0.08
	Montañoso	300	0.501	0.3	0.3	10	0.24
	Pradera 1	1200	0.464	0.3	0.2	15	0.4
	Pradera 2	1200	0.464	0.3	0.2	15	0.4
	Pradera 3	1200	0.464	0.3	0.2	15	0.4
	Pradera 4	1200	0.464	0.3	0.2	15	0.55
	Pradera 5	1200	0.464	0.3	0.2	15	0.55
	Sembríos 1	600	0.501	0.4	0.3	15	0.6
	Sembríos 2	600	0.501	0.4	0.3	15	0.6
	Sembríos 3	600	0.501	0.4	0.3	15	0.6
	Suelo desnudo	300	0.463	0.3	0.3	10	0.15

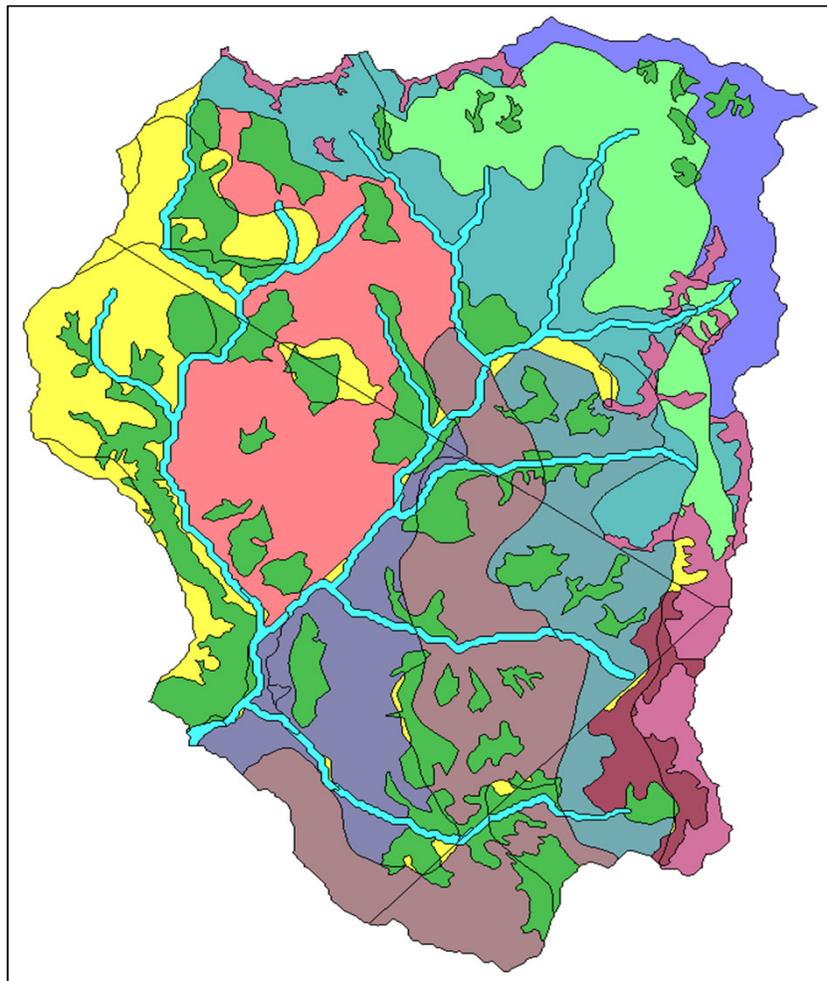


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 6

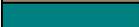
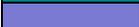
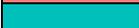
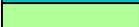
	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	600	0.464	0.75	1.25	25	0.9
	Cauces	600	0.479	1	0.1	1	0.04 - 0.2
	Montañoso	600	0.501	0.75	1.25	10	0.5
	Pradera 1	1200	0.464	0.75	1	15	0.6
	Pradera 2	1200	0.464	0.75	0.75	15	0.6
	Pradera 3	1200	0.464	0.75	1	15	0.6
	Pradera 4	1200	0.464	0.75	0.5	15	0.6
	Pradera 5	1200	0.464	0.75	0.5	15	0.6
	Sembríos 1	1200	0.501	0.75	1	15	0.8
	Sembríos 2	1200	0.501	0.75	0.75	15	0.8
	Sembríos 3	1200	0.501	0.75	0.5	15	0.8
	Suelo desnudo	600	0.463	0.75	1.25	10	0.5

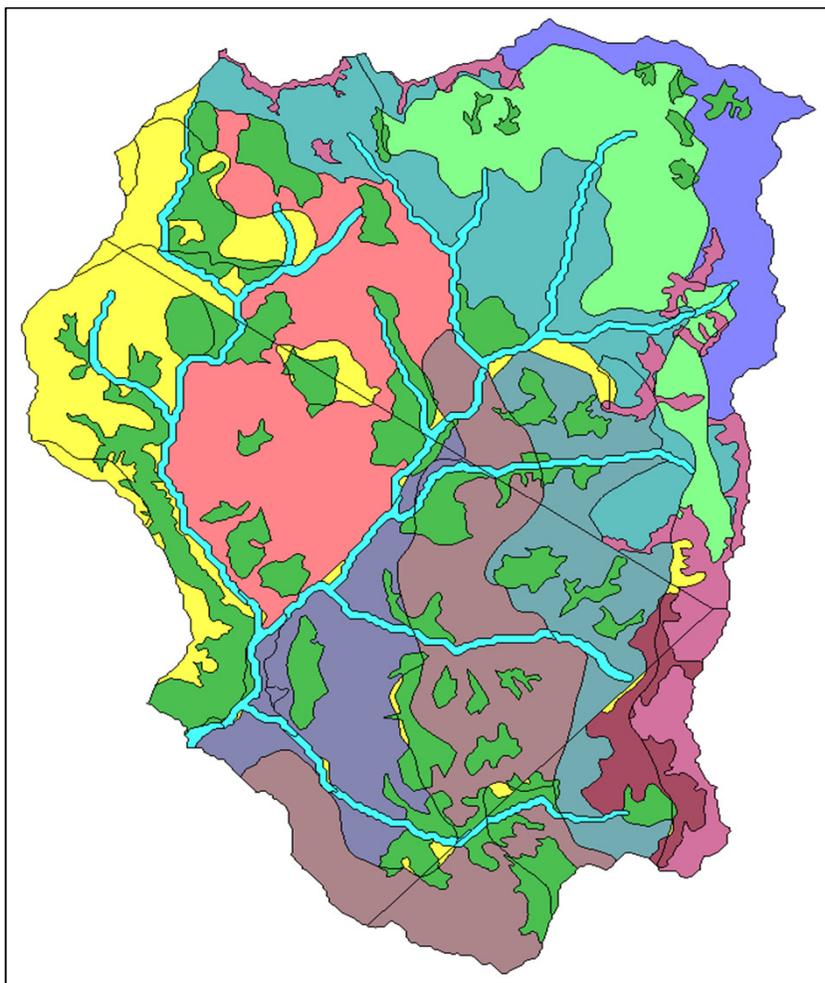


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

MAPA DE PARÁMETROS CALIBRADOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO IBER – TORMENTA 6

	Cobertura	Succión (mm)	Porosidad	Saturación Inicial	Ks (mm/hr)	Perdidas iniciales (mm)	Coficiente de Manning
	Bosques	300	0.464	0.4	1.25	25	0.9
	Cauces	300	0.479	1	0.1	1	0.04 - 0.2
	Montañoso	300	0.501	0.4	1.25	10	0.5
	Pradera 1	1200	0.464	0.4	1	15	0.6
	Pradera 2	1200	0.464	0.4	0.75	15	0.6
	Pradera 3	1200	0.464	0.4	1	15	0.6
	Pradera 4	1200	0.464	0.4	0.5	15	0.6
	Pradera 5	1200	0.464	0.4	0.5	15	0.6
	Sembríos 1	600	0.501	0.4	1	15	0.8
	Sembríos 2	600	0.501	0.4	0.75	15	0.8
	Sembríos 3	600	0.501	0.4	0.5	15	0.8
	Suelo desnudo	300	0.463	0.4	1.25	10	0.5



Anexo V: Resultados de Simulaciones

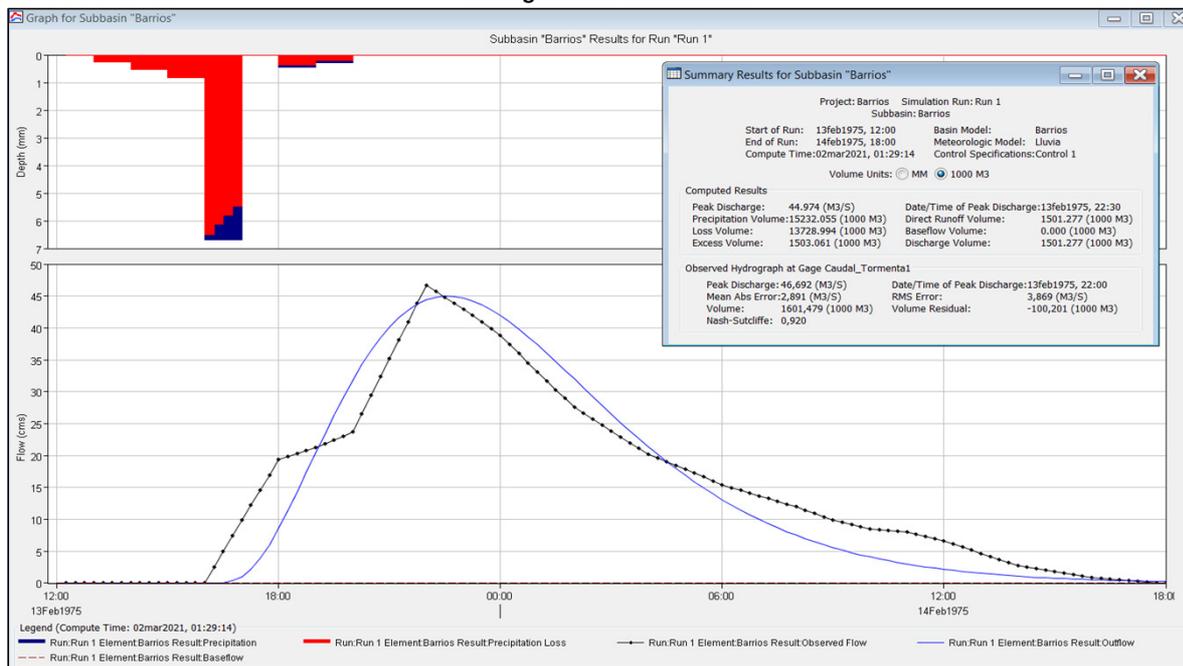
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

TABLA 5.1.1
RESULTADOS HMS - TORMENTA 1 (13/02/1975)

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
13-feb-75	12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
13-feb-75	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
13-feb-75	14:00	0.25	0.25	0.00	0.00	0.0
13-feb-75	15:00	0.53	0.53	0.00	0.00	0.0
13-feb-75	16:00	0.83	0.83	0.00	0.00	0.0
13-feb-75	17:00	6.70	5.48	1.22	1.05	9.9
13-feb-75	18:00	0.03	0.02	0.01	8.62	19.3
13-feb-75	19:00	0.45	0.35	0.10	20.40	21.2
13-feb-75	20:00	0.28	0.21	0.06	31.76	23.7
13-feb-75	21:00	0.00	0.00	0.00	40.15	35.2
13-feb-75	22:00	0.00	0.00	0.00	44.40	46.7
13-feb-75	23:00	0.00	0.00	0.00	44.66	43.0
14-feb-75	00:00	0.00	0.00	0.00	41.93	38.8
14-feb-75	01:00	0.00	0.00	0.00	37.37	33.1
14-feb-75	02:00	0.00	0.00	0.00	31.98	27.6
14-feb-75	03:00	0.00	0.00	0.00	26.49	23.8
14-feb-75	04:00	0.00	0.00	0.00	21.38	20.2
14-feb-75	05:00	0.00	0.00	0.00	16.87	17.9
14-feb-75	06:00	0.00	0.00	0.00	13.08	15.4
14-feb-75	07:00	0.00	0.00	0.00	9.97	13.7
14-feb-75	08:00	0.00	0.00	0.00	7.51	11.9
14-feb-75	09:00	0.00	0.00	0.00	5.59	9.9
14-feb-75	10:00	0.00	0.00	0.00	4.11	8.5
14-feb-75	11:00	0.00	0.00	0.00	3.00	8.0
14-feb-75	12:00	0.00	0.00	0.00	2.17	6.6
14-feb-75	13:00	0.00	0.00	0.00	1.56	4.7
14-feb-75	14:00	0.00	0.00	0.00	1.11	2.7
14-feb-75	15:00	0.00	0.00	0.00	0.79	1.8
14-feb-75	16:00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.9
14-feb-75	17:00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.4
14-feb-75	18:00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.0

GRAFICO 5.1.1
Hidrograma de la Tormenta



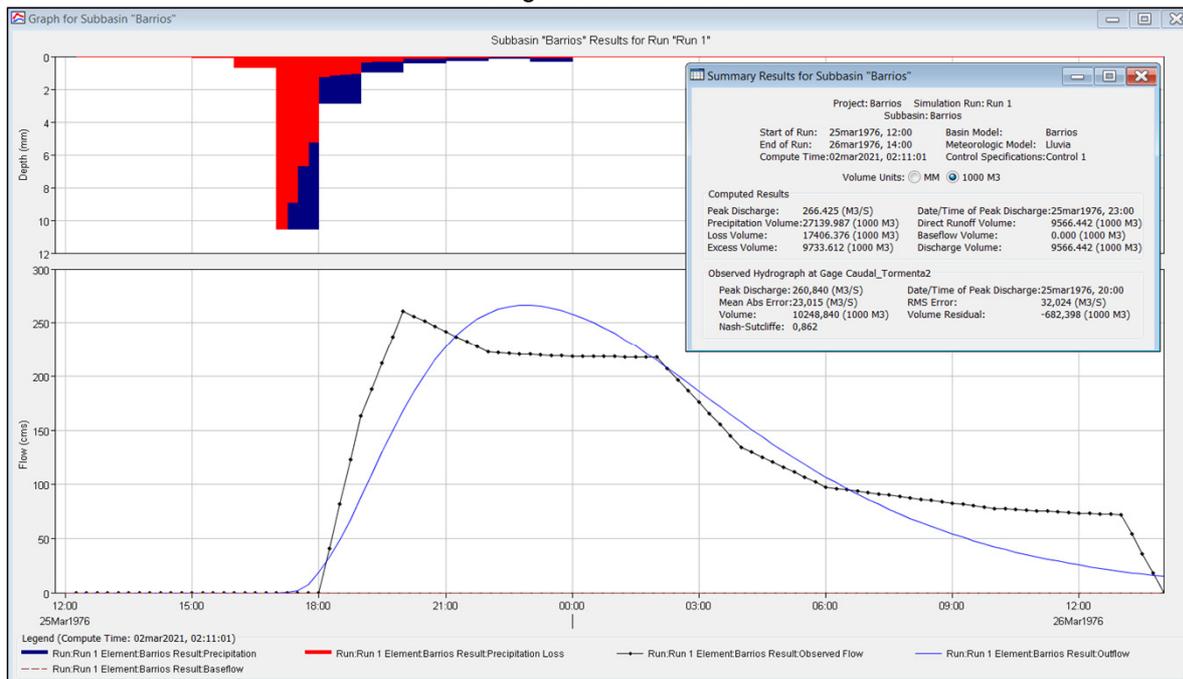
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.2
RESULTADOS HMS - TORMENTA 2 (25/03/1976)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
25-mar-76	12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	15:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	16:00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	17:00	0.68	0.68	0.00	0.00	0.0
25-mar-76	18:00	10.55	7.11	3.44	21.76	0.0
25-mar-76	19:00	2.84	1.49	1.35	91.54	163.4
25-mar-76	20:00	0.95	0.47	0.49	169.51	260.8
25-mar-76	21:00	0.40	0.19	0.21	225.49	241.8
25-mar-76	22:00	0.25	0.12	0.13	254.41	222.7
25-mar-76	23:00	0.13	0.06	0.07	260.33	220.1
26-mar-76	00:00	0.29	0.13	0.16	251.14	218.5
26-mar-76	01:00	0.00	0.00	0.00	232.36	217.9
26-mar-76	02:00	0.00	0.00	0.00	207.17	217.4
26-mar-76	03:00	0.00	0.00	0.00	179.22	175.8
26-mar-76	04:00	0.00	0.00	0.00	151.40	134.2
26-mar-76	05:00	0.00	0.00	0.00	125.46	115.8
26-mar-76	06:00	0.00	0.00	0.00	102.35	97.4
26-mar-76	07:00	0.00	0.00	0.00	82.41	92.5
26-mar-76	08:00	0.00	0.00	0.00	65.64	87.4
26-mar-76	09:00	0.00	0.00	0.00	51.80	82.6
26-mar-76	10:00	0.00	0.00	0.00	40.54	77.7
26-mar-76	11:00	0.00	0.00	0.00	31.51	75.6
26-mar-76	12:00	0.00	0.00	0.00	24.34	73.5
26-mar-76	13:00	0.00	0.00	0.00	18.71	71.8
26-mar-76	14:00	0.00	0.00	0.00	14.30	0.0

**GRAFICO 5.1.2
Hidrograma de la Tormenta**



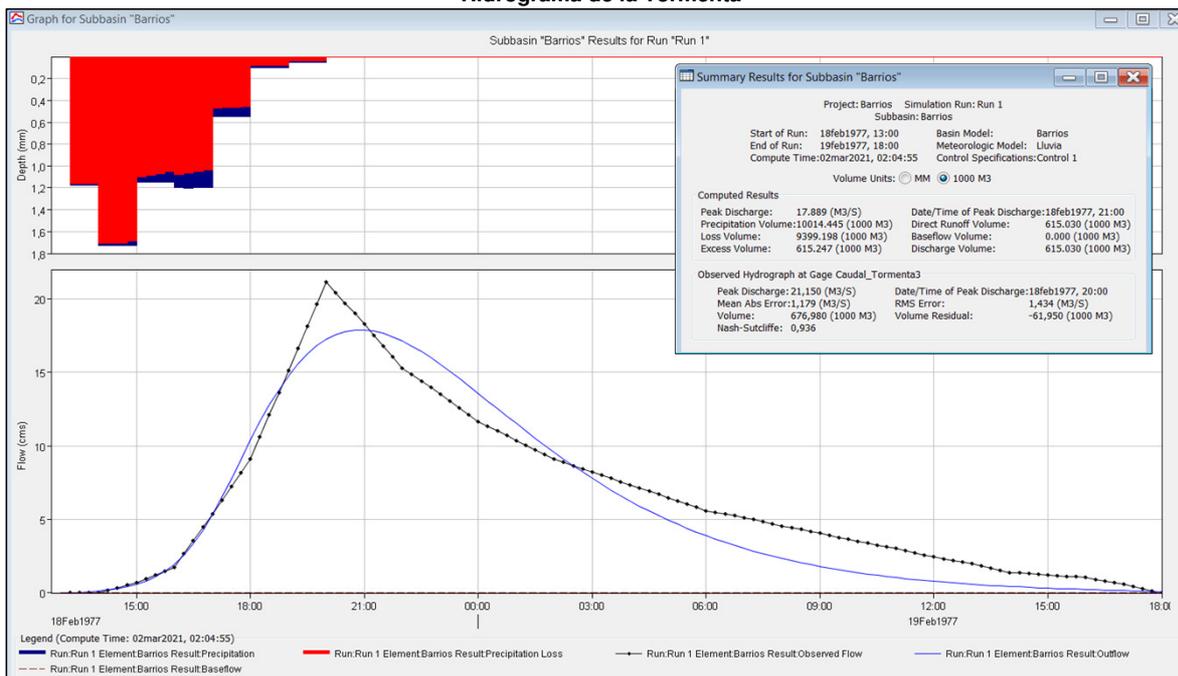
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.3
RESULTADOS HMS - Tormenta 3 (18/02/1977)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
18-feb-77	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
18-feb-77	14:00	1.18	1.16	0.01	0.13	0.0
18-feb-77	15:00	1.73	1.68	0.04	0.59	0.7
18-feb-77	16:00	1.15	1.05	0.10	1.96	1.8
18-feb-77	17:00	1.20	1.03	0.17	5.37	5.4
18-feb-77	18:00	0.55	0.46	0.09	10.38	9.1
18-feb-77	19:00	0.10	0.08	0.02	14.78	15.1
18-feb-77	20:00	0.05	0.04	0.01	17.26	21.2
18-feb-77	21:00	0.00	0.00	0.00	17.89	18.3
18-feb-77	22:00	0.00	0.00	0.00	17.14	15.3
18-feb-77	23:00	0.00	0.00	0.00	15.55	13.5
18-feb-77	00:00	0.00	0.00	0.00	13.58	11.7
19-feb-77	01:00	0.00	0.00	0.00	11.52	10.4
19-feb-77	02:00	0.00	0.00	0.00	9.56	9.1
19-feb-77	03:00	0.00	0.00	0.00	7.79	8.2
19-feb-77	04:00	0.00	0.00	0.00	6.26	7.4
19-feb-77	05:00	0.00	0.00	0.00	4.97	6.5
19-feb-77	06:00	0.00	0.00	0.00	3.90	5.6
19-feb-77	07:00	0.00	0.00	0.00	3.04	5.1
19-feb-77	08:00	0.00	0.00	0.00	2.35	4.6
19-feb-77	09:00	0.00	0.00	0.00	1.80	4.1
19-feb-77	10:00	0.00	0.00	0.00	1.38	3.5
19-feb-77	11:00	0.00	0.00	0.00	1.05	3.0
19-feb-77	12:00	0.00	0.00	0.00	0.79	2.5
19-feb-77	13:00	0.00	0.00	0.00	0.60	2.0
19-feb-77	14:00	0.00	0.00	0.00	0.45	1.4
19-feb-77	15:00	0.00	0.00	0.00	0.33	1.2
19-feb-77	16:00	0.00	0.00	0.00	0.24	1.1
19-feb-77	17:00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.6
19-feb-77	18:00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.0

**GRAFICO 5.1.3
Hidrograma de la Tormenta**



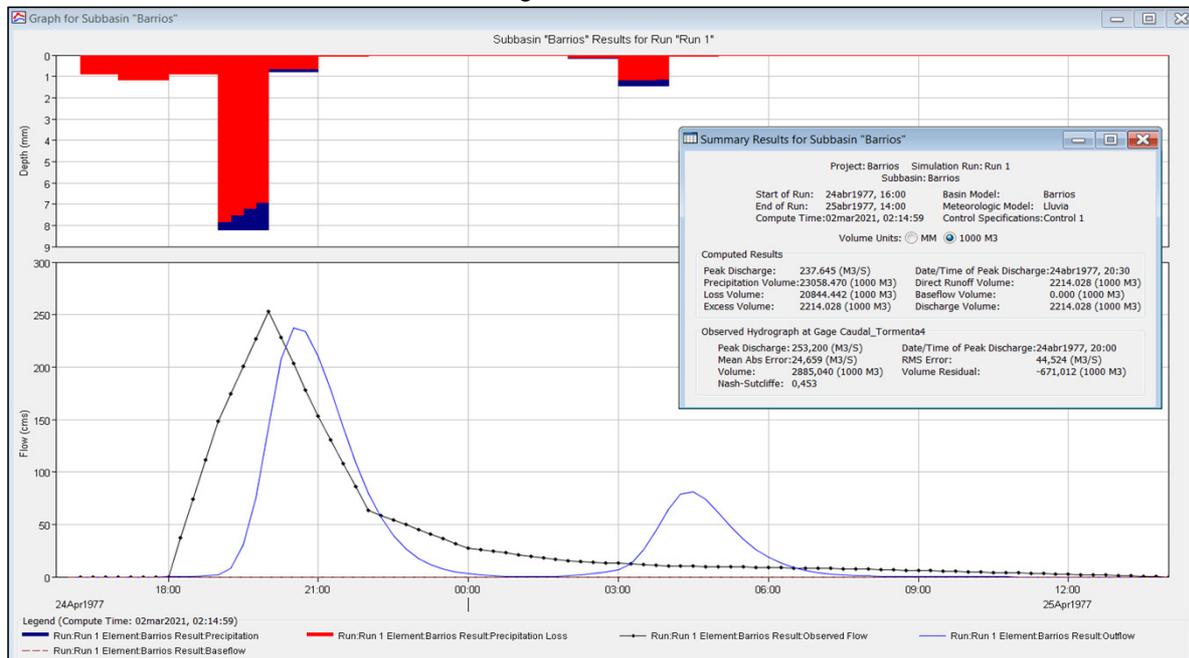
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.4
RESULTADOS HMS - Tormenta 4 (24/04/1977)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
24-abr-77	16:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
24-abr-77	17:00	0.90	0.90	0.00	0.00	0.0
24-abr-77	18:00	1.18	1.17	0.00	0.02	0.0
24-abr-77	19:00	0.90	0.88	0.02	2.11	148.2
24-abr-77	20:00	8.20	6.93	1.27	142.50	253.2
24-abr-77	21:00	0.78	0.63	0.14	210.82	153.2
24-abr-77	22:00	0.05	0.04	0.01	79.91	63.2
24-abr-77	23:00	0.00	0.00	0.00	17.68	45.2
24-abr-77	00:00	0.00	0.00	0.00	2.88	27.2
24-abr-77	01:00	0.00	0.00	0.00	0.25	21.2
24-abr-77	02:00	0.03	0.02	0.01	0.97	15.2
24-abr-77	03:00	0.15	0.12	0.03	6.70	12.8
25-abr-77	04:00	1.45	1.15	0.30	64.65	10.4
25-abr-77	05:00	0.05	0.04	0.01	61.25	9.6
25-abr-77	06:00	0.03	0.02	0.01	18.57	8.8
25-abr-77	07:00	0.00	0.00	0.00	4.16	8.0
25-abr-77	08:00	0.00	0.00	0.00	0.72	7.2
25-abr-77	09:00	0.00	0.00	0.00	0.06	6.0
25-abr-77	10:00	0.00	0.00	0.00	0.01	4.8
25-abr-77	11:00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.6
25-abr-77	12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.4
25-abr-77	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.2
25-abr-77	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0

**GRAFICO 5.1.4
Hidrograma de la Tormenta**



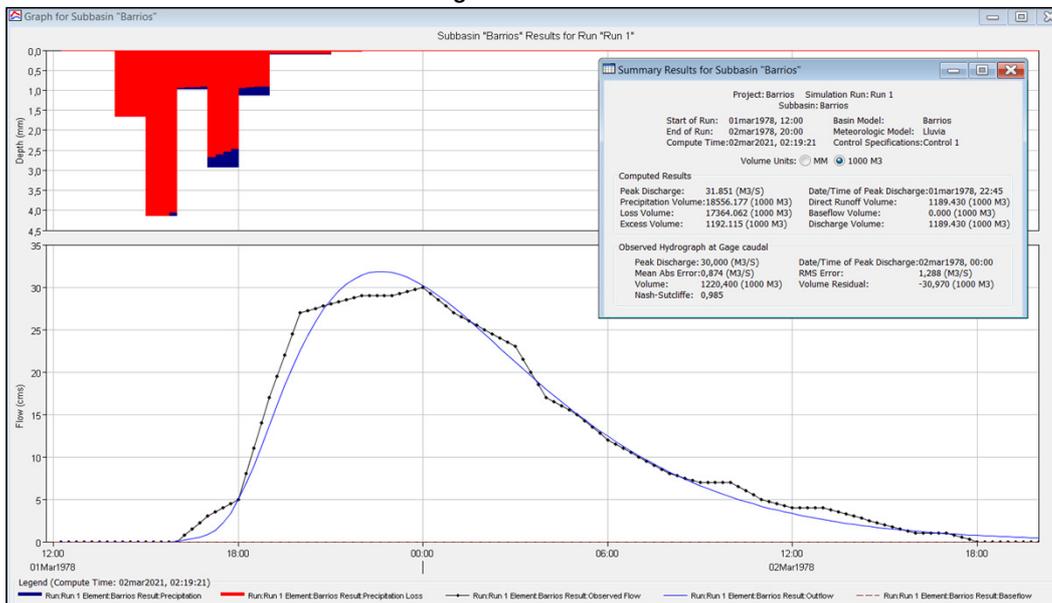
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.5
RESULTADOS HMS - Tormenta 5 (01/03/1978)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
01-mar-78	12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
01-mar-78	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
01-mar-78	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
01-mar-78	15:00	1.65	1.65	0.00	0.00	0.0
01-mar-78	16:00	4.13	4.05	0.08	0.07	0.0
01-mar-78	17:00	0.98	0.91	0.07	0.84	3.0
01-mar-78	18:00	2.93	2.45	0.48	5.02	5.0
01-mar-78	19:00	1.13	0.90	0.23	13.68	17.0
01-mar-78	20:00	0.10	0.08	0.02	22.55	27.0
01-mar-78	21:00	0.10	0.08	0.02	28.54	28.0
01-mar-78	22:00	0.03	0.02	0.01	31.42	29.0
01-mar-78	23:00	0.00	0.00	0.00	31.73	29.0
02-mar-78	00:00	0.00	0.00	0.00	30.22	30.0
02-mar-78	01:00	0.00	0.00	0.00	27.61	27.0
02-mar-78	02:00	0.00	0.00	0.00	24.47	25.0
02-mar-78	03:00	0.00	0.00	0.00	21.17	23.0
02-mar-78	04:00	0.00	0.00	0.00	17.98	17.0
02-mar-78	05:00	0.00	0.00	0.00	15.04	15.0
02-mar-78	06:00	0.00	0.00	0.00	12.42	12.0
02-mar-78	07:00	0.00	0.00	0.00	10.15	10.0
02-mar-78	08:00	0.00	0.00	0.00	8.23	8.0
02-mar-78	09:00	0.00	0.00	0.00	6.61	7.0
02-mar-78	10:00	0.00	0.00	0.00	5.28	7.0
02-mar-78	11:00	0.00	0.00	0.00	4.19	5.0
02-mar-78	12:00	0.00	0.00	0.00	3.31	4.0
02-mar-78	13:00	0.00	0.00	0.00	2.60	4.0
02-mar-78	14:00	0.00	0.00	0.00	2.03	3.0
02-mar-78	15:00	0.00	0.00	0.00	1.59	2.0
02-mar-78	16:00	0.00	0.00	0.00	1.23	1.0
02-mar-78	17:00	0.00	0.00	0.00	0.95	1.0
02-mar-78	18:00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.0
02-mar-78	19:00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.0
02-mar-78	20:00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.0

**GRAFICO 5.1.5
Hidrograma de la Tormenta**



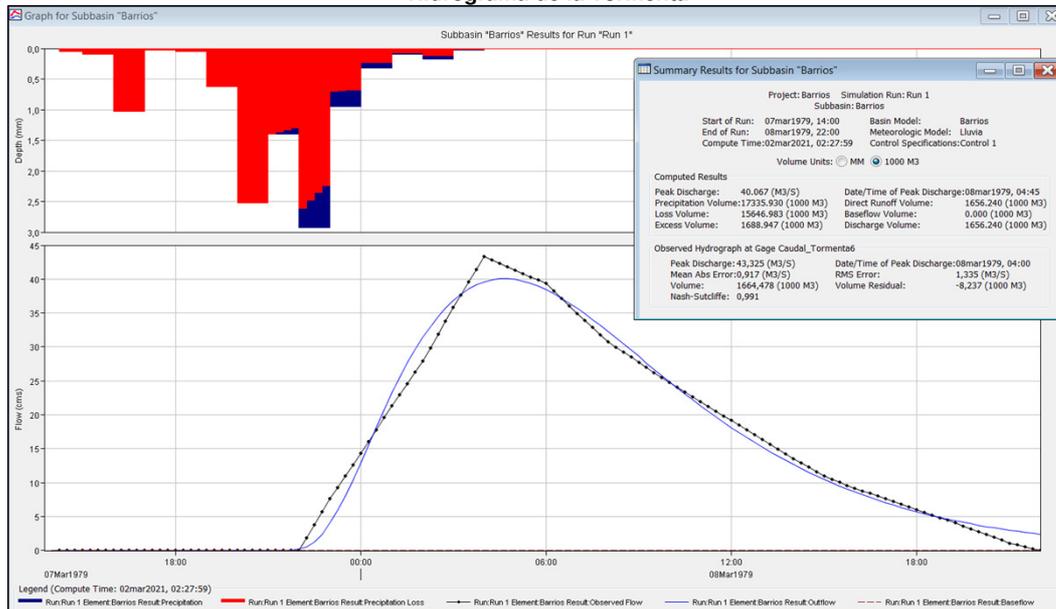
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.6
RESULTADOS HMS - Tormenta 6 (07/03/1979)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
07-mar-79	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	15:00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	16:00	0.10	0.10	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	17:00	1.03	1.03	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	18:00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	19:00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	20:00	0.63	0.63	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	21:00	2.53	2.53	0.00	0.00	0.0
07-mar-79	22:00	1.40	1.30	0.10	0.24	0.0
07-mar-79	23:00	2.93	2.25	0.68	4.06	7.6
07-mar-79	00:00	0.95	0.67	0.28	12.94	14.3
07-mar-79	01:00	0.33	0.23	0.10	23.21	21.3
08-mar-79	02:00	0.10	0.07	0.03	31.42	27.9
08-mar-79	03:00	0.18	0.12	0.06	36.86	35.8
08-mar-79	04:00	0.03	0.02	0.01	39.61	43.3
08-mar-79	05:00	0.00	0.00	0.00	39.95	41.3
08-mar-79	06:00	0.00	0.00	0.00	38.44	39.3
08-mar-79	07:00	0.00	0.00	0.00	35.70	34.9
08-mar-79	08:00	0.00	0.00	0.00	32.28	30.7
08-mar-79	09:00	0.00	0.00	0.00	28.58	27.8
08-mar-79	10:00	0.00	0.00	0.00	24.88	24.8
08-mar-79	11:00	0.00	0.00	0.00	21.36	22.0
08-mar-79	12:00	0.00	0.00	0.00	18.13	19.2
08-mar-79	13:00	0.00	0.00	0.00	15.23	16.4
08-mar-79	14:00	0.00	0.00	0.00	12.69	13.6
08-mar-79	15:00	0.00	0.00	0.00	10.50	11.0
08-mar-79	16:00	0.00	0.00	0.00	8.63	9.2
08-mar-79	17:00	0.00	0.00	0.00	7.05	7.7
08-mar-79	18:00	0.00	0.00	0.00	5.74	6.0
08-mar-79	19:00	0.00	0.00	0.00	4.64	4.5
08-mar-79	20:00	0.00	0.00	0.00	3.75	2.8
08-mar-79	21:00	0.00	0.00	0.00	3.01	1.1
08-mar-79	22:00	0.00	0.00	0.00	2.41	0.0

**GRAFICO 5.1.6
Hidrograma de la Tormenta**



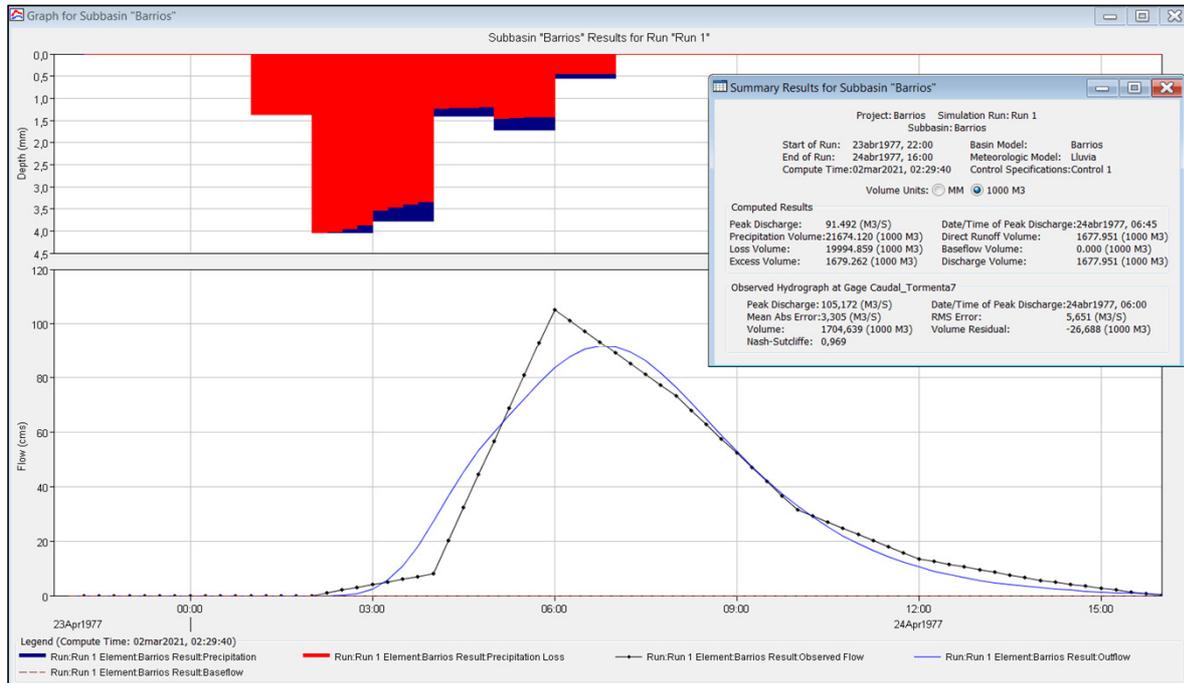
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.1.7
RESULTADOS HMS - Tormenta 7 (23/04/1977)**

Fecha	Hora	Precipitación (mm)	Perdidas (mm)	Exceso (mm)	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
23-abr-77	22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
23-abr-77	23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
23-abr-77	00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
23-abr-77	01:00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.0
23-abr-77	02:00	1.37	1.37	0.00	0.00	0.0
23-abr-77	03:00	4.04	3.86	0.18	2.40	4.0
23-abr-77	04:00	3.78	3.33	0.45	27.22	8.0
23-abr-77	05:00	1.41	1.20	0.21	59.99	56.6
23-abr-77	06:00	1.72	1.41	0.31	83.58	105.2
23-abr-77	07:00	0.55	0.45	0.10	91.25	89.2
23-abr-77	08:00	0.00	0.00	0.00	76.42	73.3
23-abr-77	09:00	0.00	0.00	0.00	52.96	52.3
24-abr-77	10:00	0.00	0.00	0.00	32.89	31.3
24-abr-77	11:00	0.00	0.00	0.00	19.05	22.4
24-abr-77	12:00	0.00	0.00	0.00	10.53	13.4
24-abr-77	13:00	0.00	0.00	0.00	5.62	9.5
24-abr-77	14:00	0.00	0.00	0.00	2.89	5.5
24-abr-77	15:00	0.00	0.00	0.00	1.28	2.8
24-abr-77	16:00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.0

**GRAFICO 5.1.7
Hidrograma de la Tormenta**



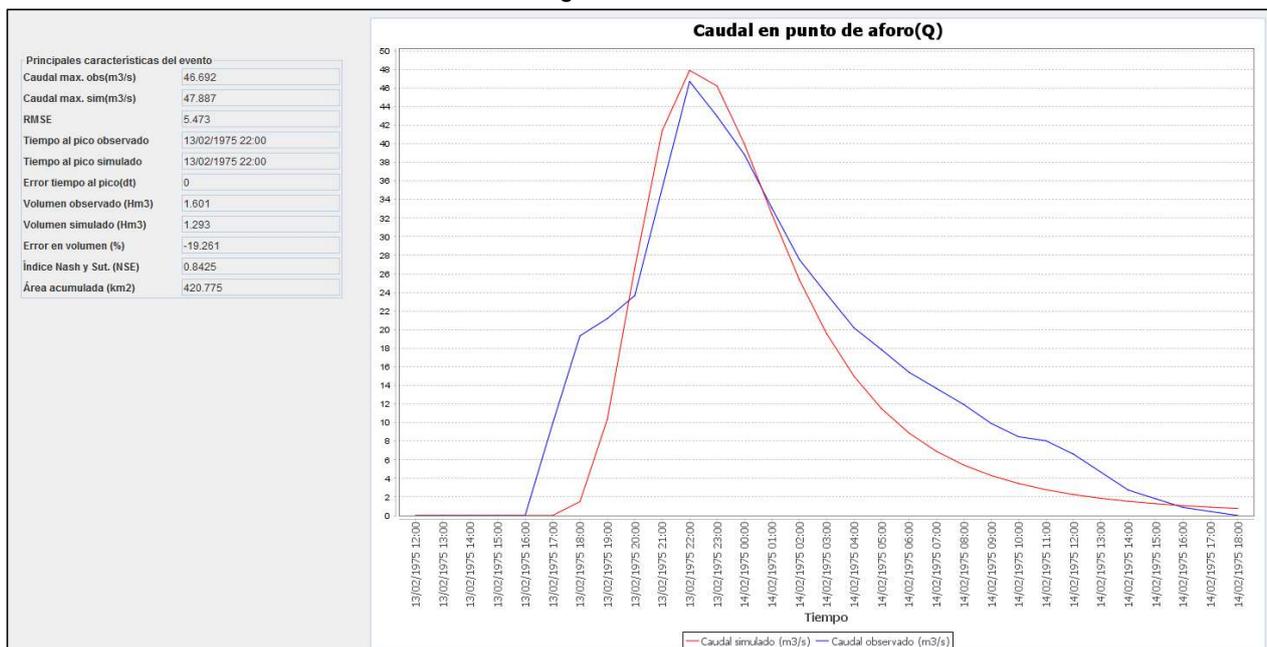
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.1
RESULTADOS TETIS - TORMENTA 1 (13/02/1975)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
13-feb-75	12:00	0.00	0.0
13-feb-75	13:00	0.00	0.0
13-feb-75	14:00	0.00	0.0
13-feb-75	15:00	0.00	0.0
13-feb-75	16:00	0.00	0.0
13-feb-75	17:00	0.01	9.9
13-feb-75	18:00	1.49	19.3
13-feb-75	19:00	10.38	21.2
13-feb-75	20:00	26.63	23.7
13-feb-75	21:00	41.41	35.2
13-feb-75	22:00	47.89	46.7
13-feb-75	23:00	46.21	43.0
14-feb-75	0:00	39.96	38.8
14-feb-75	1:00	32.41	33.1
14-feb-75	2:00	25.38	27.6
14-feb-75	3:00	19.55	23.8
14-feb-75	4:00	14.98	20.2
14-feb-75	5:00	11.50	17.9
14-feb-75	6:00	8.88	15.4
14-feb-75	7:00	6.91	13.7
14-feb-75	8:00	5.43	11.9
14-feb-75	9:00	4.31	9.9
14-feb-75	10:00	3.45	8.5
14-feb-75	11:00	2.78	8.0
14-feb-75	12:00	2.26	6.6
14-feb-75	13:00	1.85	4.7
14-feb-75	14:00	1.53	2.7
14-feb-75	15:00	1.27	1.8
14-feb-75	16:00	1.06	0.9
14-feb-75	17:00	0.90	0.4
14-feb-75	18:00	0.76	0.0

**GRAFICO 5.2.1
Hidrograma de la Tormenta**



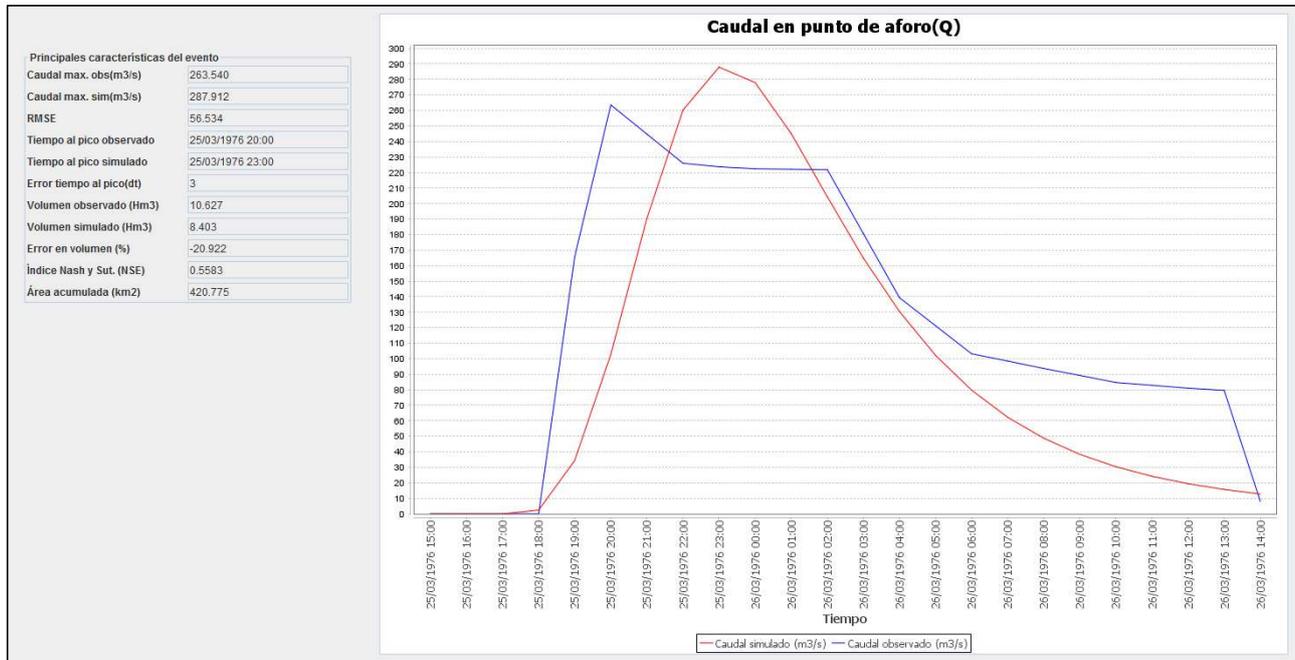
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.2
RESULTADOS TETIS - TORMENTA 2 (25/03/1976)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
25-mar-76	12:00	0.00	0.0
25-mar-76	13:00	0.00	0.0
25-mar-76	14:00	0.00	0.0
25-mar-76	15:00	2.45	0.0
25-mar-76	16:00	32.95	163.4
25-mar-76	17:00	98.10	260.8
25-mar-76	18:00	184.15	241.8
25-mar-76	19:00	256.20	222.7
25-mar-76	20:00	288.38	220.1
25-mar-76	21:00	282.39	218.5
25-mar-76	22:00	251.80	217.9
25-mar-76	23:00	211.85	217.4
26-mar-76	0:00	172.05	175.8
26-mar-76	1:00	136.90	134.2
26-mar-76	2:00	107.78	115.8
26-mar-76	3:00	84.46	97.4
26-mar-76	4:00	66.16	92.5
26-mar-76	5:00	51.97	87.4
26-mar-76	6:00	41.00	82.6
26-mar-76	7:00	32.53	77.7
26-mar-76	8:00	25.99	75.6
26-mar-76	9:00	20.90	73.5
26-mar-76	10:00	16.93	71.8
26-mar-76	11:00	13.81	0.0

**GRAFICO 5.2.2
Hidrograma de la Tormenta**



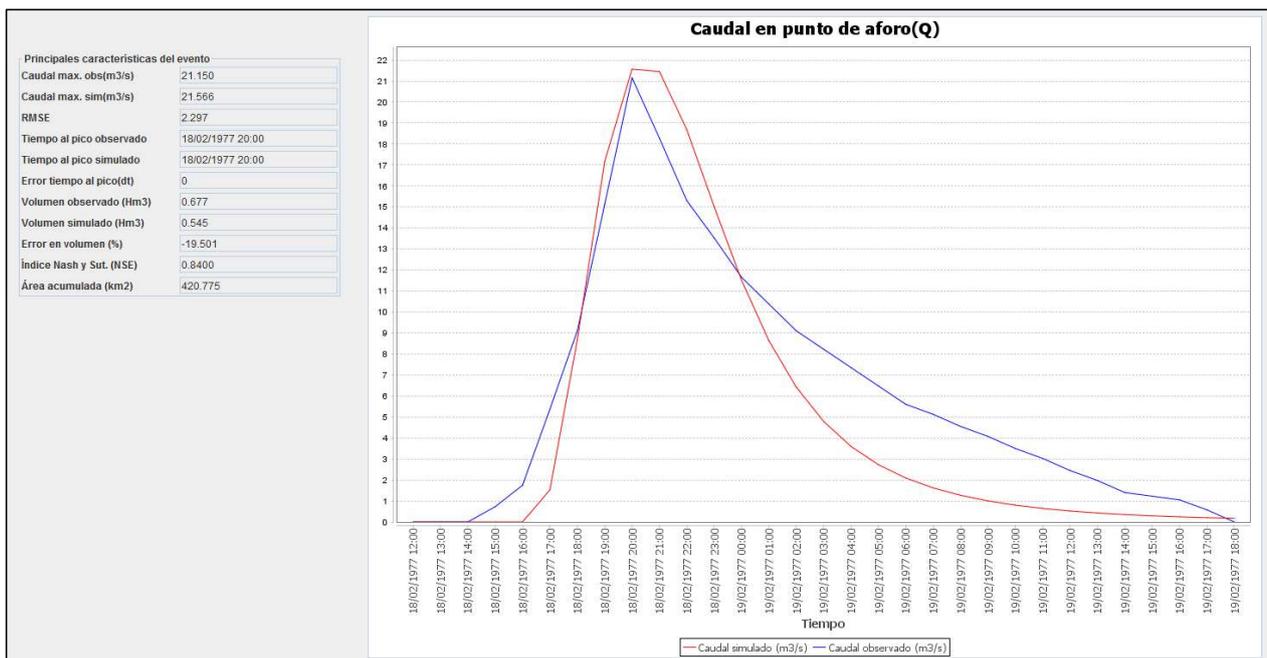
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.3
RESULTADOS TETIS- Tormenta 3 (18/02/1977)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
18-feb-77	13:00	0.00	0.0
18-feb-77	14:00	0.00	0.0
18-feb-77	15:00	0.00	0.7
18-feb-77	16:00	0.00	1.8
18-feb-77	17:00	0.00	5.4
18-feb-77	18:00	1.53	9.1
18-feb-77	19:00	8.68	15.1
18-feb-77	20:00	17.17	21.2
18-feb-77	21:00	21.57	18.3
18-feb-77	22:00	21.45	15.3
18-feb-77	23:00	18.68	13.5
18-feb-77	0:00	15.01	11.7
19-feb-77	1:00	11.51	10.4
19-feb-77	2:00	8.63	9.1
19-feb-77	3:00	6.42	8.2
19-feb-77	4:00	4.78	7.4
19-feb-77	5:00	3.59	6.5
19-feb-77	6:00	2.73	5.6
19-feb-77	7:00	2.09	5.1
19-feb-77	8:00	1.62	4.6
19-feb-77	9:00	1.27	4.1
19-feb-77	10:00	1.00	3.5
19-feb-77	11:00	0.80	3.0
19-feb-77	12:00	0.64	2.5
19-feb-77	13:00	0.52	2.0
19-feb-77	14:00	0.43	1.4
19-feb-77	15:00	0.35	1.2
19-feb-77	16:00	0.29	1.1
19-feb-77	17:00	0.24	0.6
19-feb-77	18:00	0.20	0.0

**GRAFICO 5.2.3
Hidrograma de la Tormenta**



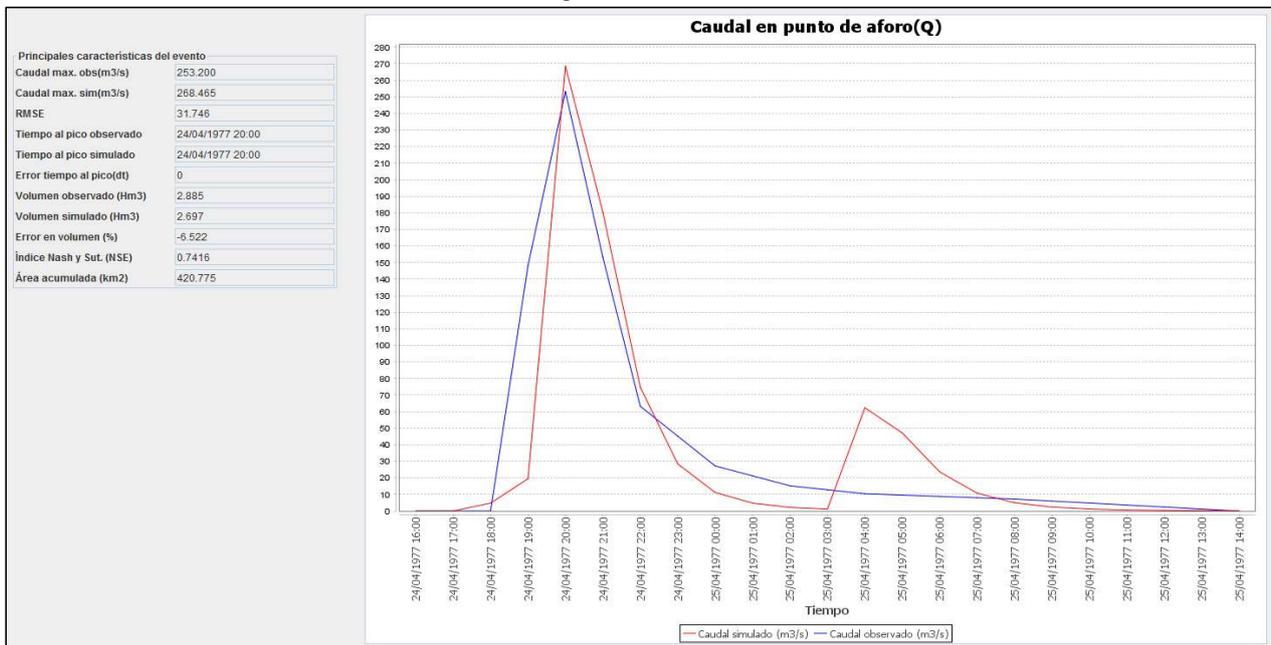
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.4
RESULTADOS TETIS - Tormenta 4 (24/04/1977)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
24-abr-77	16:00	0.00	0.0
24-abr-77	17:00	0.00	0.0
24-abr-77	18:00	4.73	0.0
24-abr-77	19:00	19.49	148.2
24-abr-77	20:00	268.46	253.2
24-abr-77	21:00	180.33	153.2
24-abr-77	22:00	74.70	63.2
24-abr-77	23:00	28.43	45.2
24-abr-77	0:00	11.20	27.2
24-abr-77	1:00	4.74	21.2
24-abr-77	2:00	2.18	15.2
24-abr-77	3:00	1.15	12.8
25-abr-77	4:00	62.32	10.4
25-abr-77	5:00	47.13	9.6
25-abr-77	6:00	23.58	8.8
25-abr-77	7:00	10.76	8.0
25-abr-77	8:00	4.95	7.2
25-abr-77	9:00	2.38	6.0
25-abr-77	10:00	1.21	4.8
25-abr-77	11:00	0.65	3.6
25-abr-77	12:00	0.37	2.4
25-abr-77	13:00	0.22	1.2
25-abr-77	14:00	0.14	0.0

**GRAFICO 5.2.4
Hidrograma de la Tormenta**



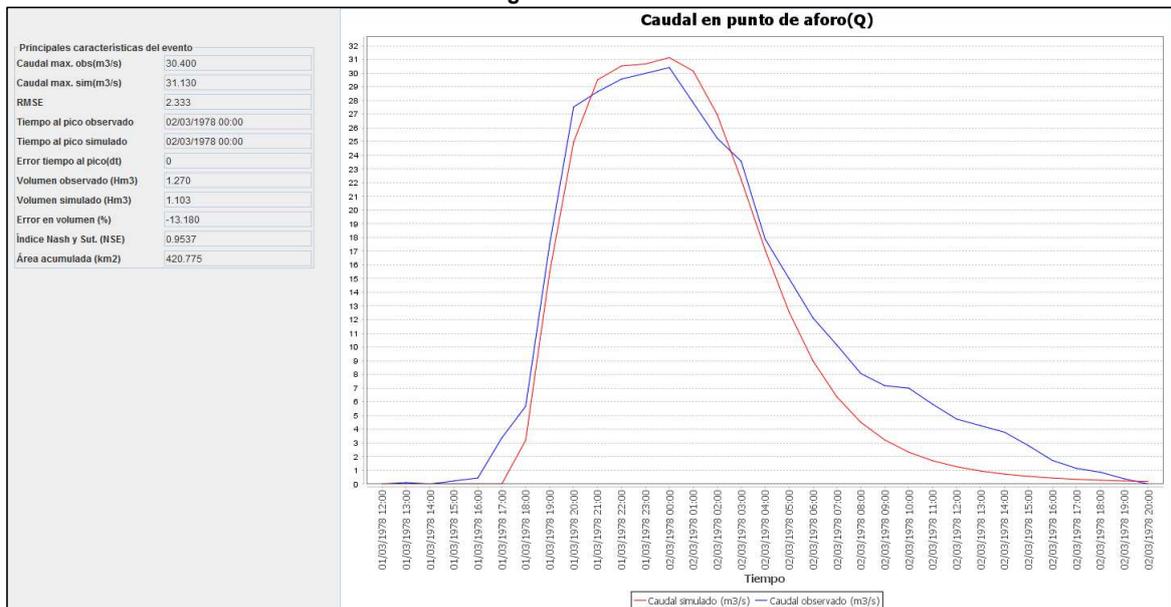
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.5
RESULTADOS TETIS - Tormenta 5 (01/03/1978)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
01-mar-78	12:00	0.00	0.0
01-mar-78	13:00	0.00	0.0
01-mar-78	14:00	0.00	0.0
01-mar-78	15:00	0.00	0.0
01-mar-78	16:00	0.00	0.0
01-mar-78	17:00	0.00	3.0
01-mar-78	18:00	3.20	5.0
01-mar-78	19:00	15.45	17.0
01-mar-78	20:00	24.96	27.0
01-mar-78	21:00	29.51	28.0
01-mar-78	22:00	30.52	29.0
01-mar-78	23:00	30.66	29.0
02-mar-78	0:00	31.13	30.0
02-mar-78	1:00	30.14	27.0
02-mar-78	2:00	26.97	25.0
02-mar-78	3:00	22.22	23.0
02-mar-78	4:00	17.10	17.0
02-mar-78	5:00	12.55	15.0
02-mar-78	6:00	8.98	12.0
02-mar-78	7:00	6.35	10.0
02-mar-78	8:00	4.50	8.0
02-mar-78	9:00	3.21	7.0
02-mar-78	10:00	2.32	7.0
02-mar-78	11:00	1.70	5.0
02-mar-78	12:00	1.26	4.0
02-mar-78	13:00	0.95	4.0
02-mar-78	14:00	0.72	3.0
02-mar-78	15:00	0.56	2.0
02-mar-78	16:00	0.43	1.0
02-mar-78	17:00	0.34	1.0
02-mar-78	18:00	0.27	0.0
02-mar-78	19:00	0.22	0.0
02-mar-78	20:00	0.18	0.0

**GRAFICO 5.2.5
Hidrograma de la Tormenta**



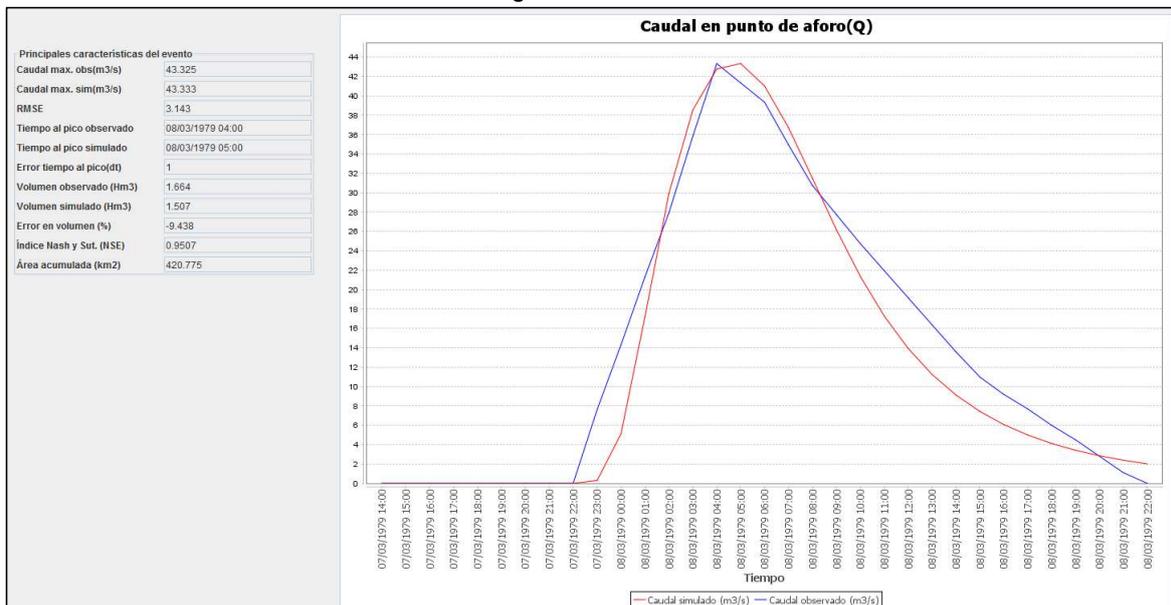
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.6
RESULTADOS TETIS - Tormenta 6 (07/03/1979)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
07-mar-79	14:00	0.00	0.0
07-mar-79	15:00	0.00	0.0
07-mar-79	16:00	0.00	0.0
07-mar-79	17:00	0.00	0.0
07-mar-79	18:00	0.00	0.0
07-mar-79	19:00	0.00	0.0
07-mar-79	20:00	0.00	0.0
07-mar-79	21:00	0.00	0.0
07-mar-79	22:00	0.00	0.0
07-mar-79	23:00	0.30	7.6
07-mar-79	0:00	5.12	14.3
07-mar-79	1:00	17.19	21.3
08-mar-79	2:00	29.91	27.9
08-mar-79	3:00	38.54	35.8
08-mar-79	4:00	42.75	43.3
08-mar-79	5:00	43.33	41.3
08-mar-79	6:00	41.01	39.3
08-mar-79	7:00	36.71	34.9
08-mar-79	8:00	31.49	30.7
08-mar-79	9:00	26.19	27.8
08-mar-79	10:00	21.37	24.8
08-mar-79	11:00	17.27	22.0
08-mar-79	12:00	13.93	19.2
08-mar-79	13:00	11.25	16.4
08-mar-79	14:00	9.11	13.6
08-mar-79	15:00	7.42	11.0
08-mar-79	16:00	6.07	9.2
08-mar-79	17:00	4.99	7.7
08-mar-79	18:00	4.12	6.0
08-mar-79	19:00	3.42	4.5
08-mar-79	20:00	2.85	2.8
08-mar-79	21:00	2.39	1.1
08-mar-79	22:00	2.01	0.0

**GRAFICO 5.2.6
Hidrograma de la Tormenta**



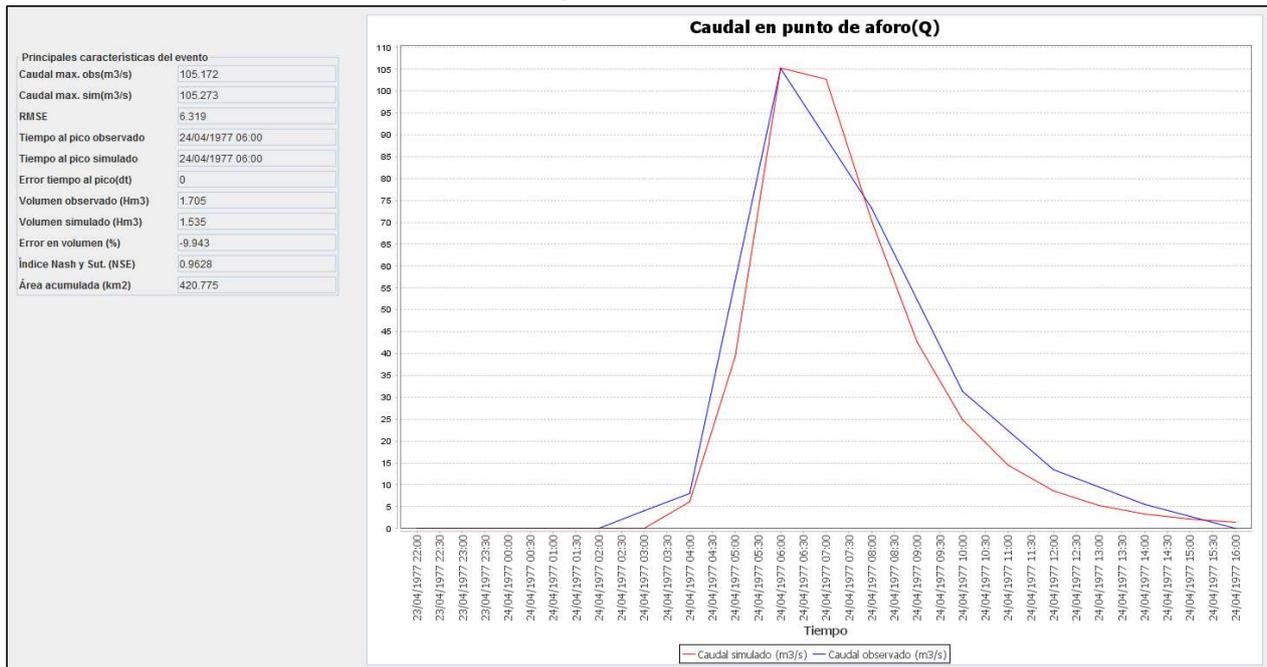
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.2.7
RESULTADOS TETIS - Tormenta 7 (23/04/1977)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
23-abr-77	22:00	0.00	0.0
23-abr-77	23:00	0.00	0.0
23-abr-77	0:00	0.00	0.0
23-abr-77	1:00	0.00	0.0
23-abr-77	2:00	0.00	0.0
23-abr-77	3:00	0.00	4.0
23-abr-77	4:00	6.10	8.0
23-abr-77	5:00	39.25	56.6
23-abr-77	6:00	105.27	105.2
23-abr-77	7:00	102.72	89.2
23-abr-77	8:00	70.41	73.3
23-abr-77	9:00	42.66	52.3
24-abr-77	10:00	24.85	31.3
24-abr-77	11:00	14.48	22.4
24-abr-77	12:00	8.59	13.4
24-abr-77	13:00	5.24	9.5
24-abr-77	14:00	3.29	5.5
24-abr-77	15:00	2.13	2.8
24-abr-77	16:00	1.42	0.0

**GRAFICO 5.2.7
Hidrograma de la Tormenta**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.3.1
RESULTADOS IBER - TORMENTA 1 (13/02/1975)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
13-feb-75	12:00	0.00	0.0
13-feb-75	13:00	0.00	0.0
13-feb-75	14:00	0.00	0.0
13-feb-75	15:00	0.02	0.0
13-feb-75	16:00	0.19	0.0
13-feb-75	17:00	0.09	9.9
13-feb-75	18:00	16.56	19.3
13-feb-75	19:00	22.35	21.2
13-feb-75	20:00	28.81	23.7
13-feb-75	21:00	29.85	35.2
13-feb-75	22:00	48.93	46.7
13-feb-75	23:00	42.31	43.0
14-feb-75	0:00	32.74	38.8
14-feb-75	1:00	24.70	33.1
14-feb-75	2:00	19.58	27.6
14-feb-75	3:00	15.60	23.8
14-feb-75	4:00	14.92	20.2
14-feb-75	5:00	15.48	17.9
14-feb-75	6:00	19.14	15.4
14-feb-75	7:00	18.70	13.7
14-feb-75	8:00	16.35	11.9
14-feb-75	9:00	14.01	9.9
14-feb-75	10:00	12.03	8.5
14-feb-75	11:00	10.87	8.0
14-feb-75	12:00	9.64	6.6
14-feb-75	13:00	8.53	4.7
14-feb-75	14:00	7.78	2.7
14-feb-75	15:00	6.95	1.8
14-feb-75	16:00	6.29	0.9
14-feb-75	17:00	5.73	0.4
14-feb-75	18:00	5.22	0.0

**GRAFICO 5.3.1A
Hidrograma de la Tormenta**

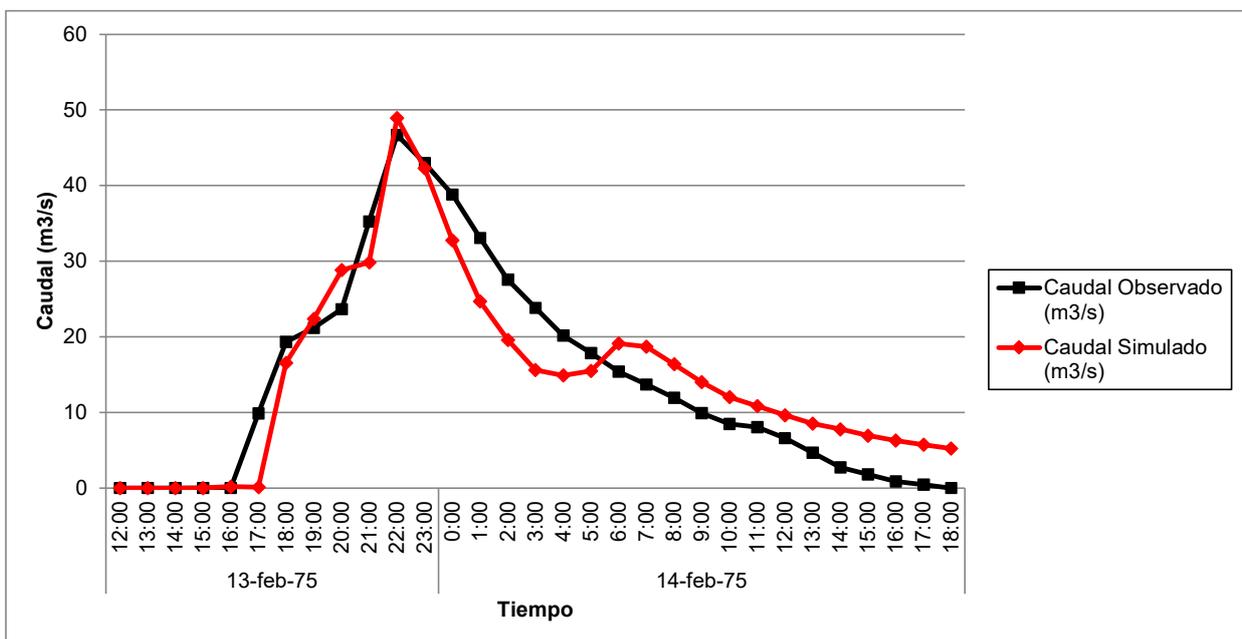
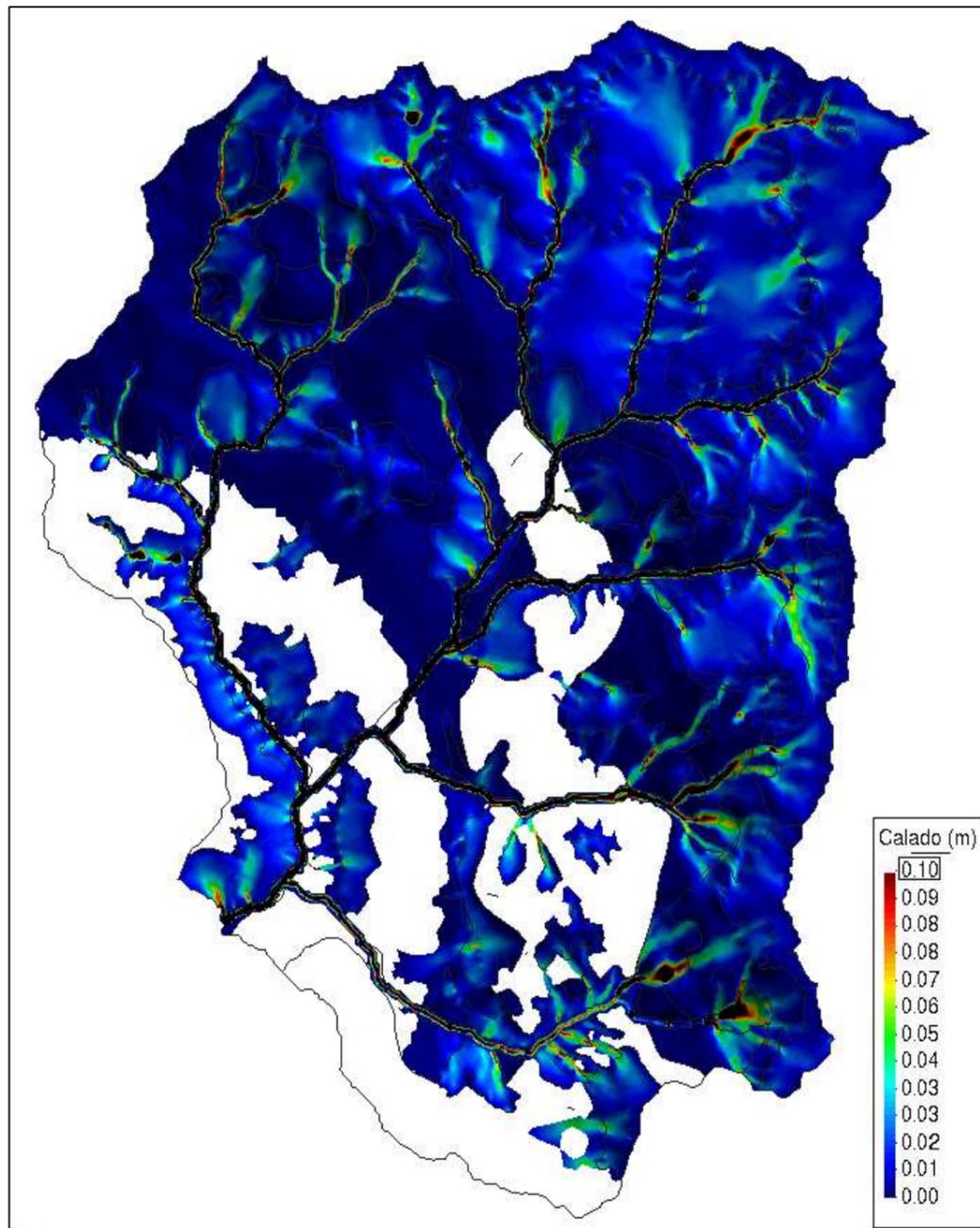


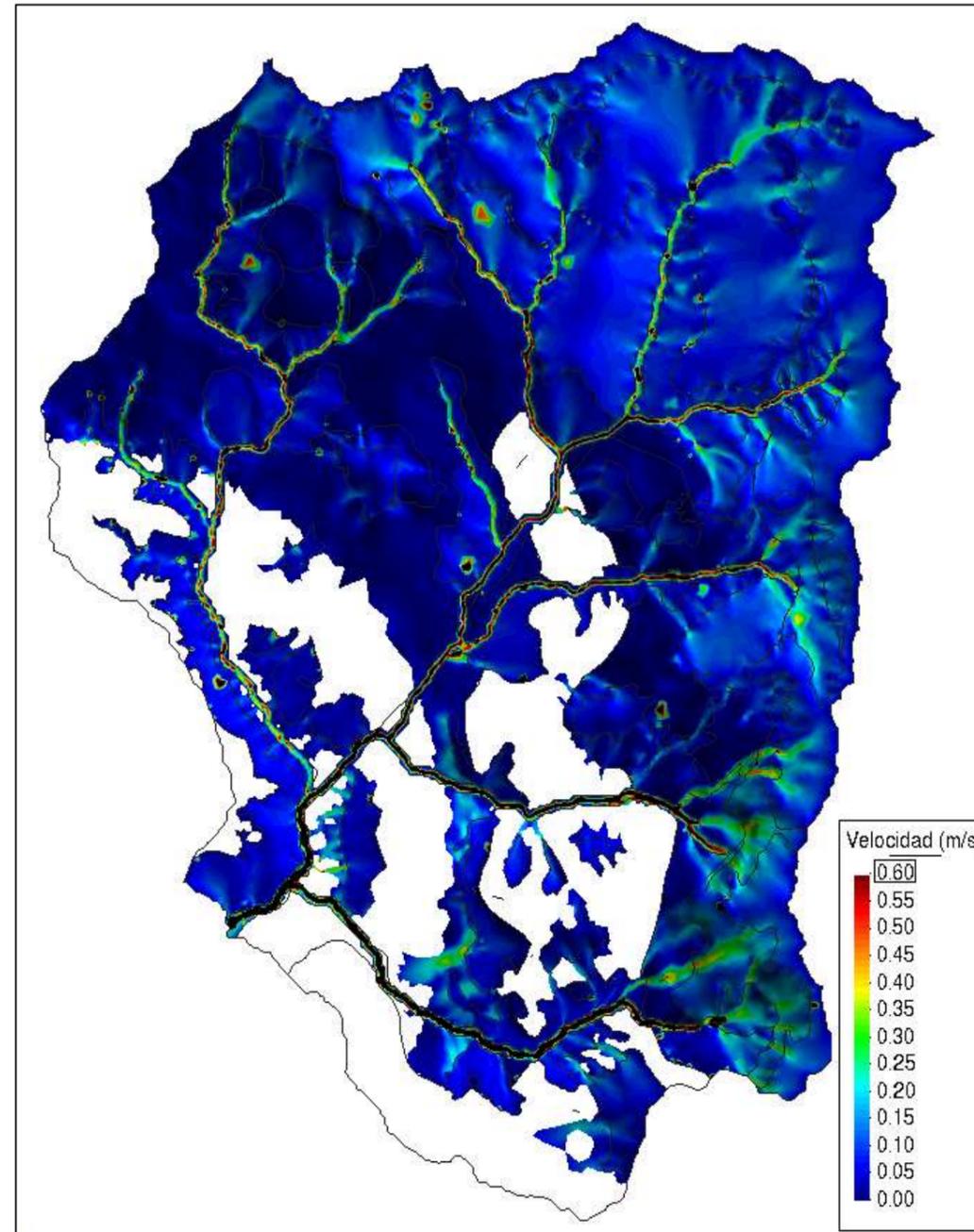
GRAFICO 5.3.1B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 1 (13/02/1975)



ALTURAS DE AGUA

Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

■ Calado > 0.1 m



VELOCIDADES DE AGUA

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 0.6 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

■ Velocidad > 0.6 m/s.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.3.2
RESULTADOS IBER - TORMENTA 2 (25/03/1976)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
25-mar-76	12:00	0.20	0.0
25-mar-76	13:00	0.04	0.0
25-mar-76	14:00	0.02	0.0
25-mar-76	15:00	0.02	0.0
25-mar-76	16:00	129.12	163.4
25-mar-76	17:00	260.43	260.8
25-mar-76	18:00	274.23	241.8
25-mar-76	19:00	230.53	222.7
25-mar-76	20:00	190.03	220.1
25-mar-76	21:00	229.52	218.5
25-mar-76	22:00	193.84	217.9
25-mar-76	23:00	168.02	217.4
26-mar-76	0:00	139.48	175.8
26-mar-76	1:00	115.06	134.2
26-mar-76	2:00	93.92	115.8
26-mar-76	3:00	80.04	97.4
26-mar-76	4:00	68.62	92.5
26-mar-76	5:00	58.95	87.4
26-mar-76	6:00	50.97	82.6
26-mar-76	7:00	44.02	77.7
26-mar-76	8:00	38.36	75.6
26-mar-76	9:00	33.65	73.5
26-mar-76	10:00	29.48	71.8
26-mar-76	11:00	26.10	0.0

**GRAFICO 5.3.2A
Hidrograma de la Tormenta**

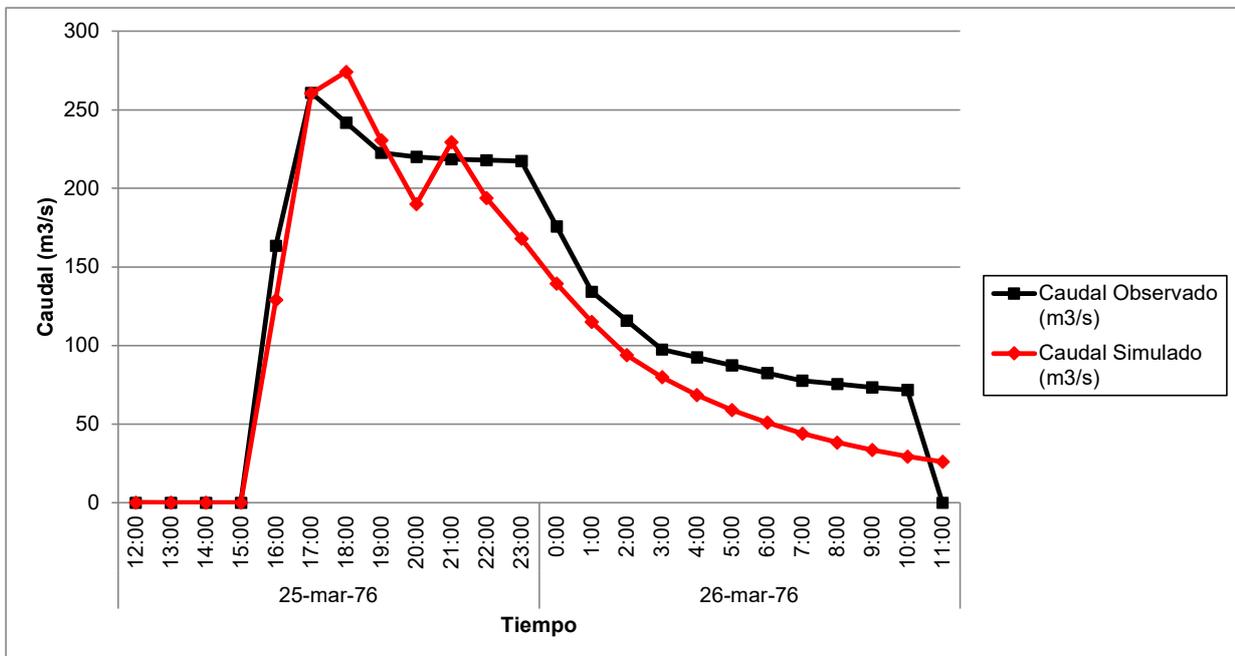
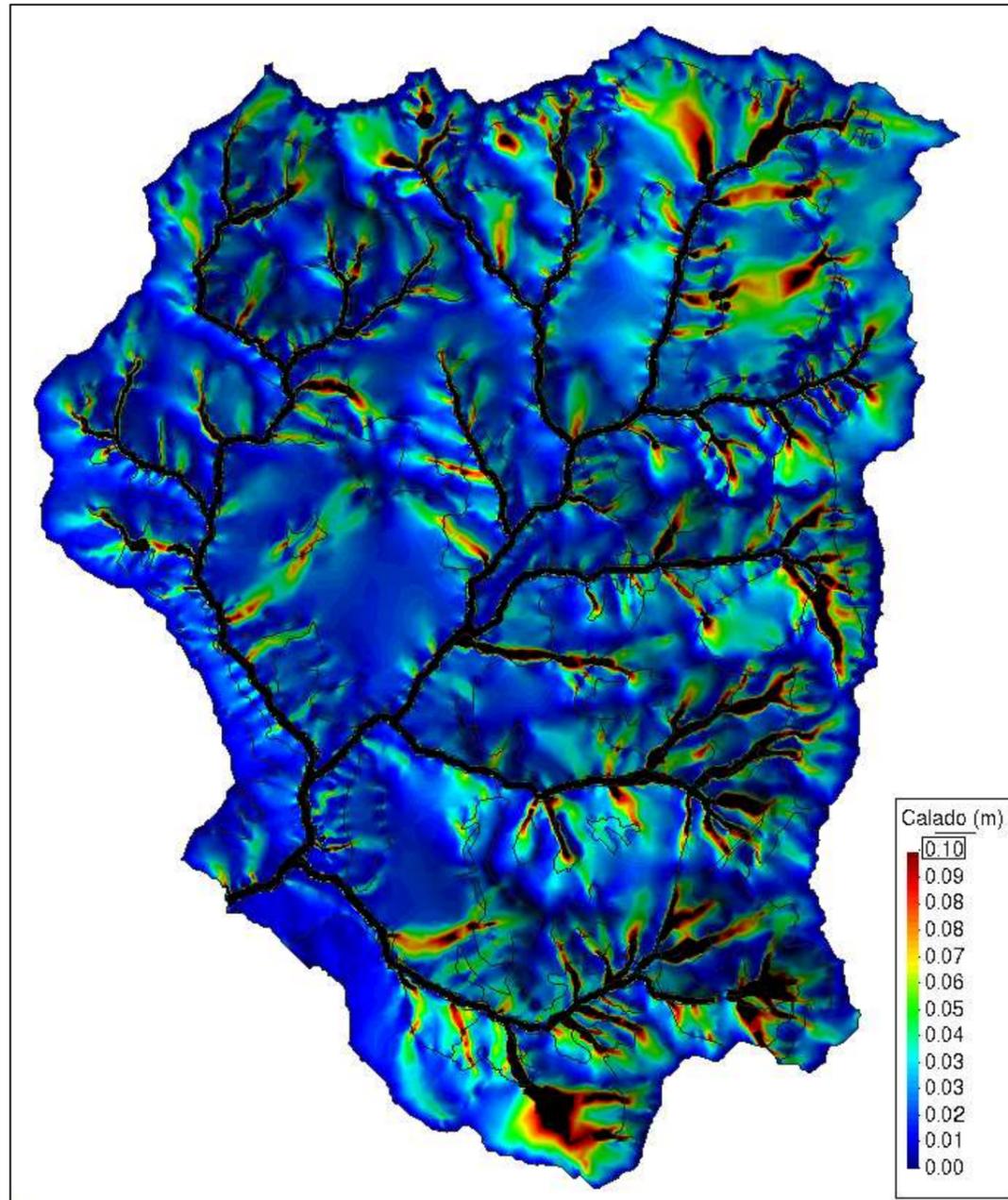


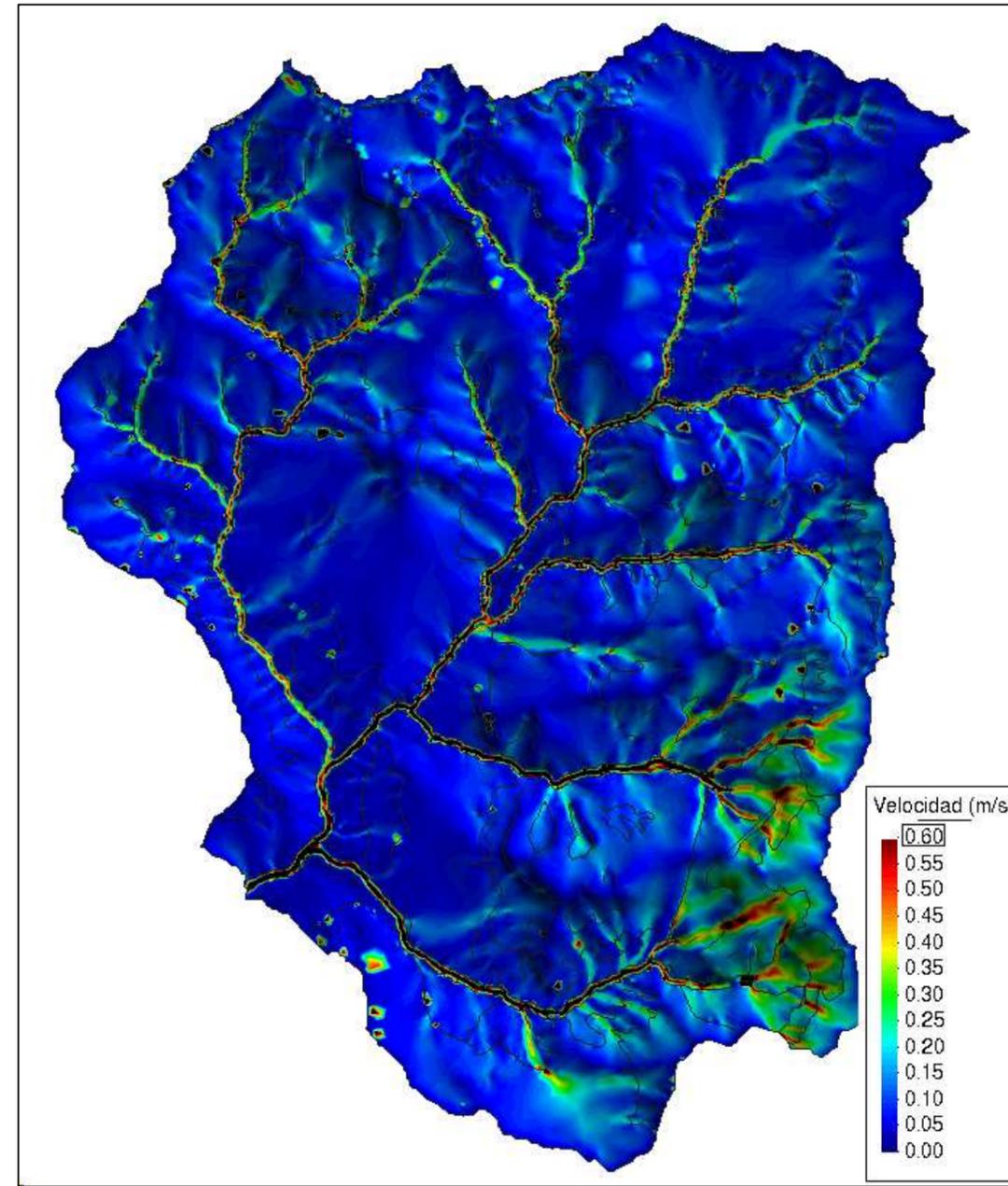
GRAFICO 5.3.2B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 2 (25/03/1976)



ALTURAS DE AGUA

Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

■ Calado > 0.1 m



VELOCIDADES DE AGUA

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 0.6 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

■ Velocidad > 0.6 m/s.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.3.3
RESULTADOS IBER - Tormenta 3 (18/02/1977)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
18-feb-77	13:00	0.00	0.0
18-feb-77	14:00	0.00	0.0
18-feb-77	15:00	0.04	0.7
18-feb-77	16:00	0.13	1.8
18-feb-77	17:00	0.07	5.4
18-feb-77	18:00	7.83	9.1
18-feb-77	19:00	17.01	15.1
18-feb-77	20:00	21.73	21.2
18-feb-77	21:00	19.03	18.3
18-feb-77	22:00	17.59	15.3
18-feb-77	23:00	15.32	13.5
18-feb-77	0:00	14.37	11.7
19-feb-77	1:00	12.67	10.4
19-feb-77	2:00	10.01	9.1
19-feb-77	3:00	8.44	8.2
19-feb-77	4:00	6.82	7.4
19-feb-77	5:00	5.44	6.5
19-feb-77	6:00	4.38	5.6
19-feb-77	7:00	3.45	5.1
19-feb-77	8:00	2.87	4.6
19-feb-77	9:00	2.40	4.1
19-feb-77	10:00	2.01	3.5
19-feb-77	11:00	1.73	3.0
19-feb-77	12:00	1.48	2.5
19-feb-77	13:00	1.27	2.0
19-feb-77	14:00	1.09	1.4
19-feb-77	15:00	0.95	1.2
19-feb-77	16:00	0.84	1.1
19-feb-77	17:00	0.74	0.6
19-feb-77	18:00	0.65	0.0

**GRAFICO 5.3.3A
Hidrograma de la Tormenta**

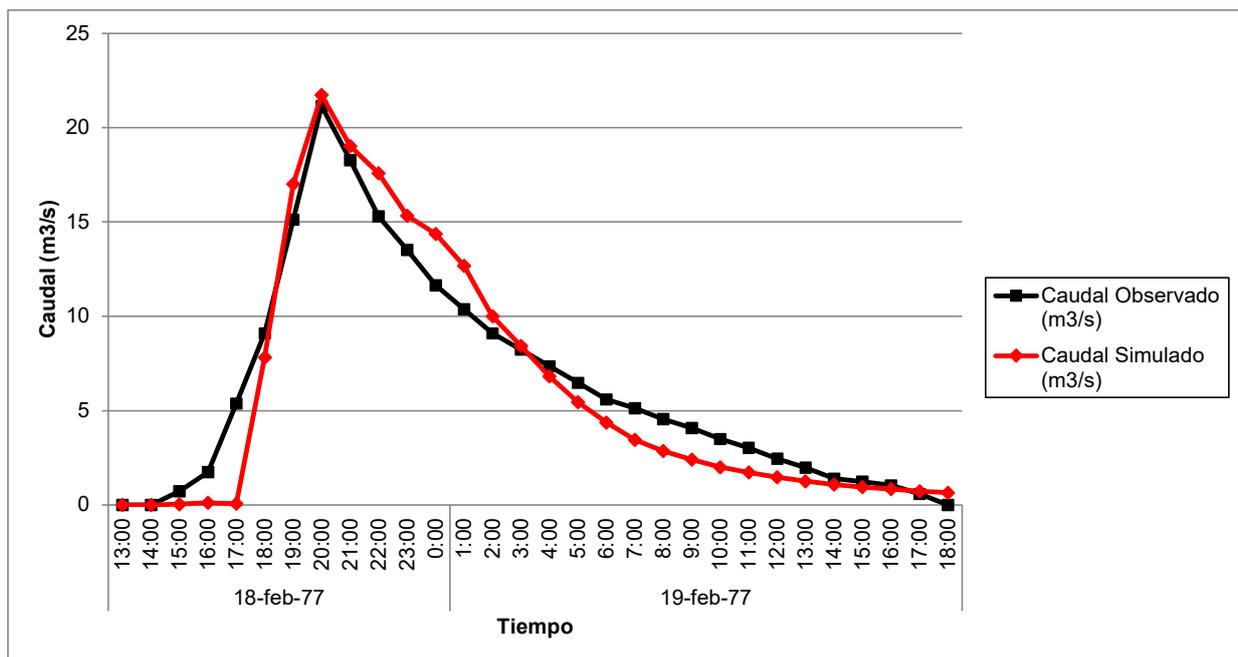
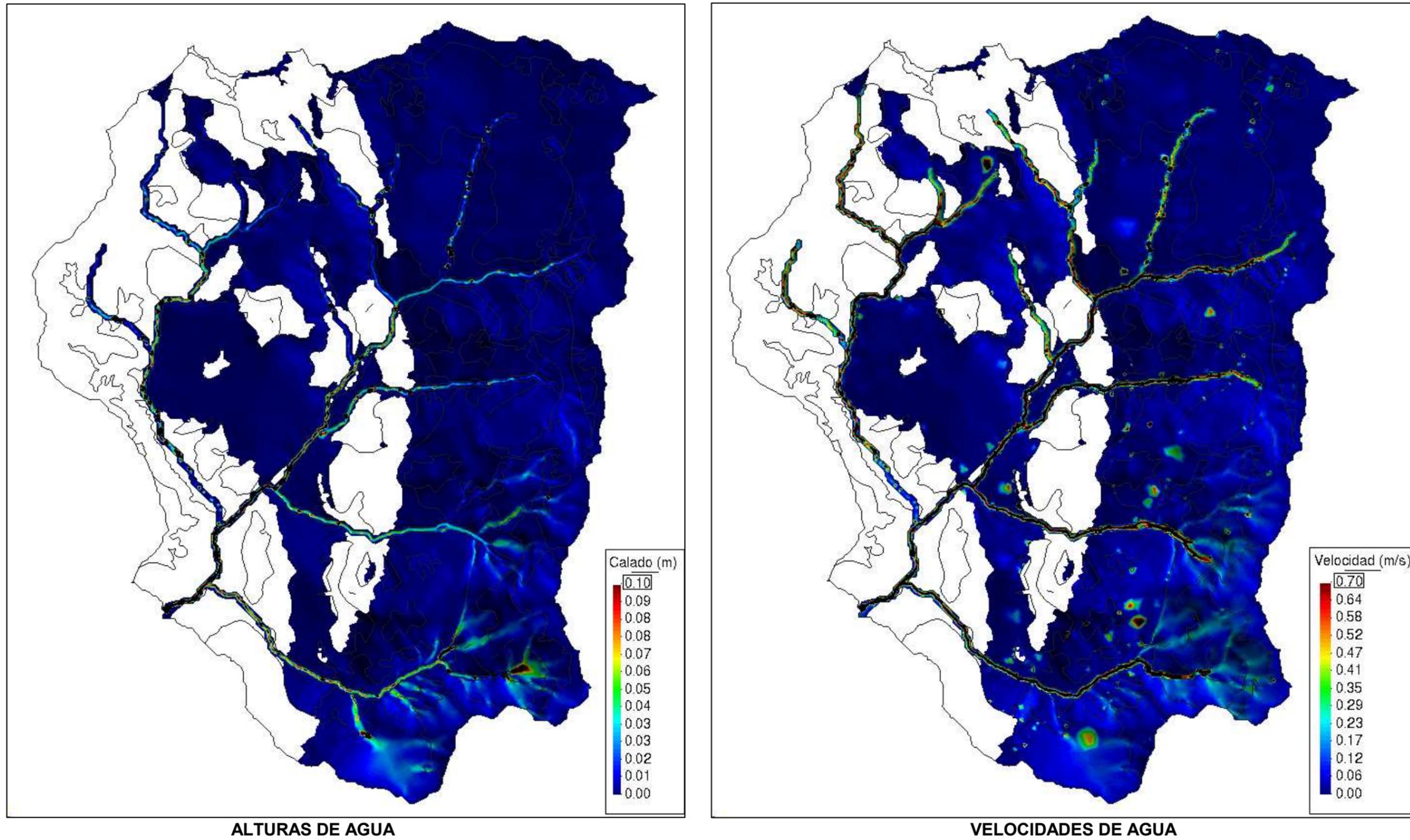


GRAFICO 5.3.3B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 3 (18/02/1977)



Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

■ Calado > 0.1 m

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 0.7 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

■ Velocidad > 0.7 m/s.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.3.4
RESULTADOS IBER - Tormenta 4 (24/04/1977)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
24-abr-77	16:00	0.00	0.0
24-abr-77	17:00	0.00	0.0
24-abr-77	18:00	0.03	0.0
24-abr-77	19:00	104.85	148.2
24-abr-77	20:00	288.80	253.2
24-abr-77	21:00	163.64	153.2
24-abr-77	22:00	80.09	63.2
24-abr-77	23:00	48.85	45.2
24-abr-77	0:00	26.60	27.2
24-abr-77	1:00	15.71	21.2
24-abr-77	2:00	10.14	15.2
24-abr-77	3:00	7.73	12.8
25-abr-77	4:00	7.57	10.4
25-abr-77	5:00	6.88	9.6
25-abr-77	6:00	5.27	8.8
25-abr-77	7:00	5.00	8.0
25-abr-77	8:00	5.28	7.2
25-abr-77	9:00	4.69	6.0
25-abr-77	10:00	4.15	4.8
25-abr-77	11:00	3.73	3.6
25-abr-77	12:00	3.26	2.4
25-abr-77	13:00	2.73	1.2
25-abr-77	14:00	2.30	0.0

**GRAFICO 5.3.4A
Hidrograma de la Tormenta**

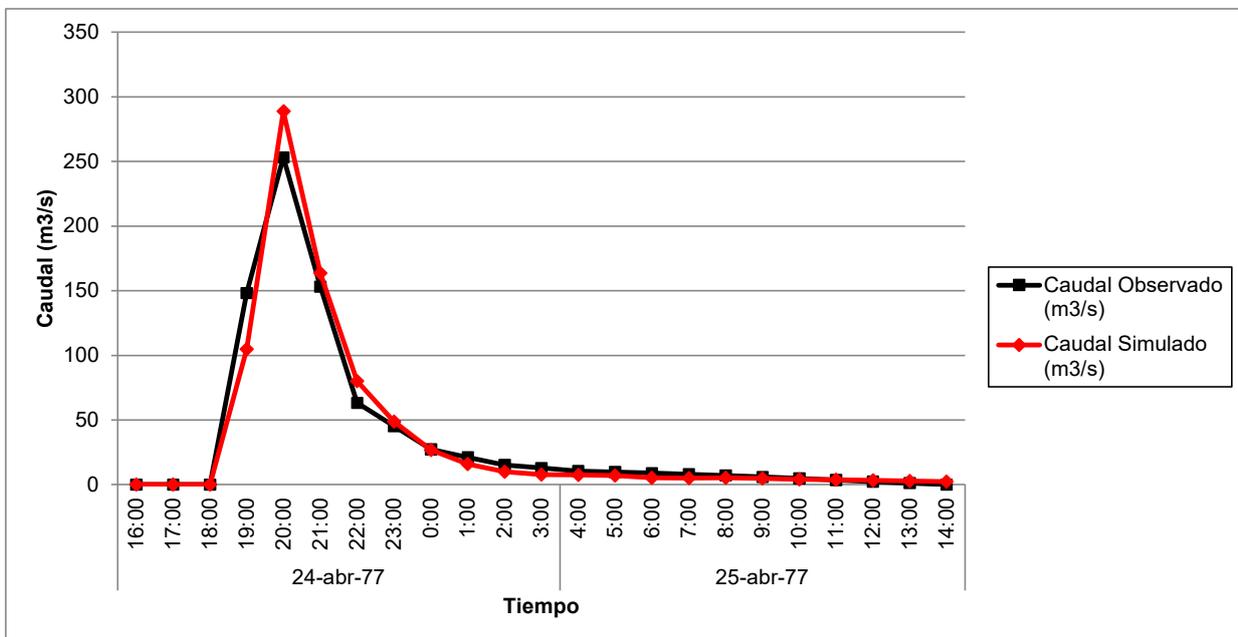
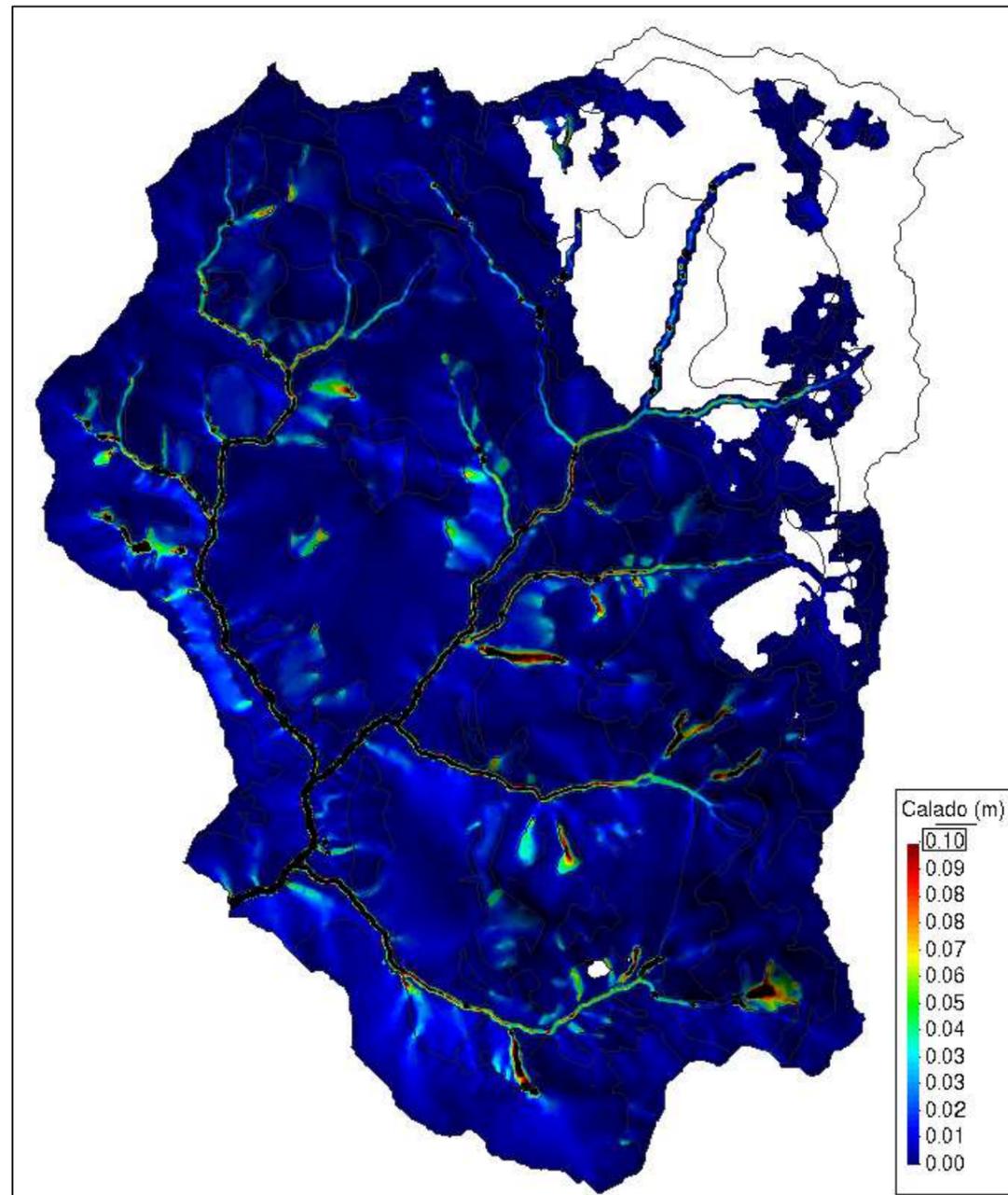


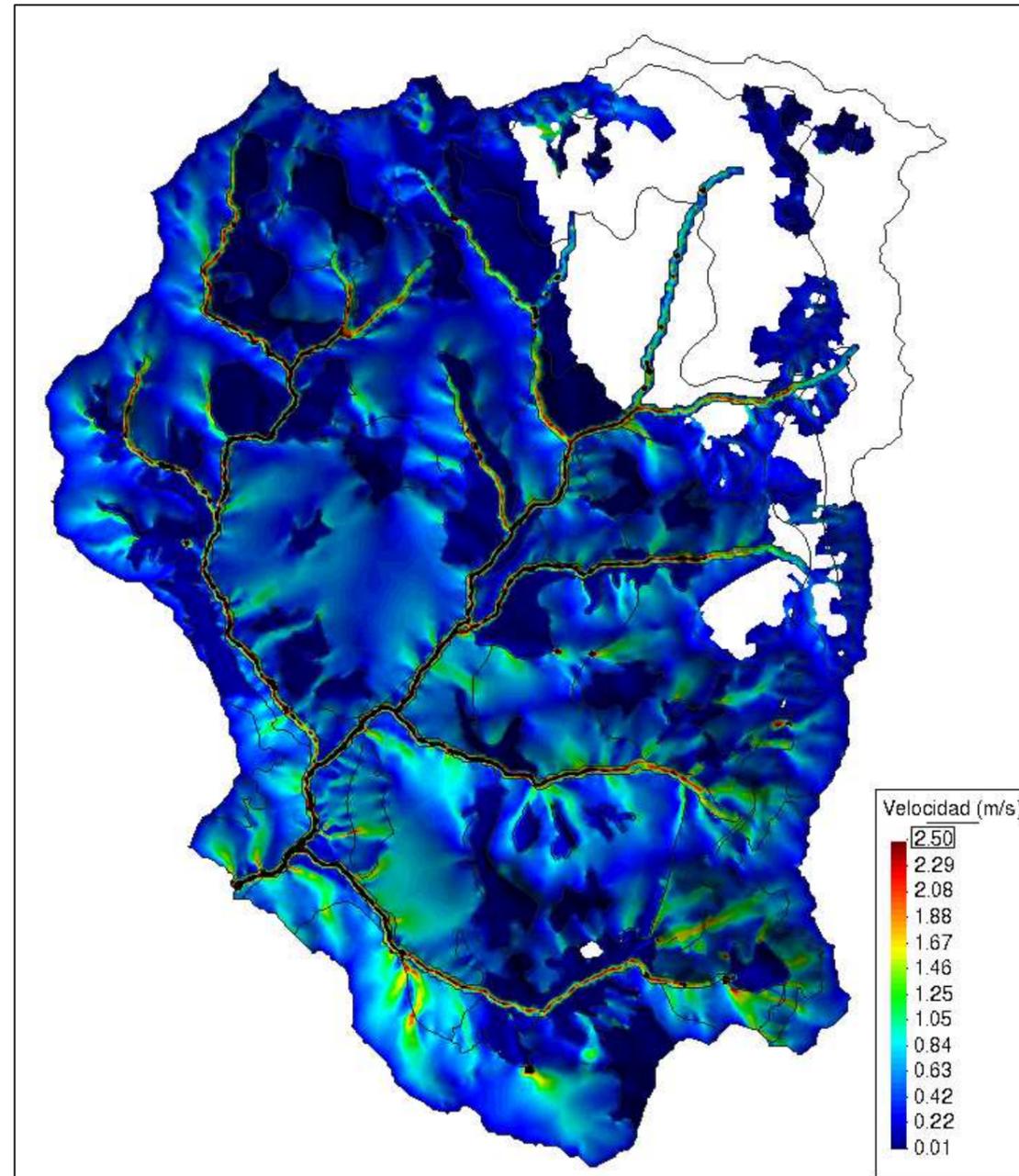
GRAFICO 5.3.4B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 4 (24/04/1977)



ALTURAS DE AGUA

Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

■ Calado > 0.1 m



VELOCIDADES DE AGUA

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 2.5 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

■ Velocidad > 2.5 m/s.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE TORMENTAS UTILIZANDO MODELOS AGREGADOS Y DISTRIBUIDOS

**TABLA 5.3.5
RESULTADOS IBER - Tormenta 5 (01/03/1978)**

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
01-mar-78	12:00	0.00	0.0
01-mar-78	13:00	0.00	0.0
01-mar-78	14:00	0.07	0.0
01-mar-78	15:00	0.18	0.0
01-mar-78	16:00	0.05	0.0
01-mar-78	17:00	0.15	3.0
01-mar-78	18:00	4.87	5.0
01-mar-78	19:00	12.75	17.0
01-mar-78	20:00	26.19	27.0
01-mar-78	21:00	27.77	28.0
01-mar-78	22:00	29.19	29.0
01-mar-78	23:00	28.52	29.0
02-mar-78	0:00	29.14	30.0
02-mar-78	1:00	28.36	27.0
02-mar-78	2:00	23.91	25.0
02-mar-78	3:00	20.27	23.0
02-mar-78	4:00	16.47	17.0
02-mar-78	5:00	13.47	15.0
02-mar-78	6:00	10.81	12.0
02-mar-78	7:00	8.83	10.0
02-mar-78	8:00	7.21	8.0
02-mar-78	9:00	5.83	7.0
02-mar-78	10:00	4.88	7.0
02-mar-78	11:00	4.37	5.0
02-mar-78	12:00	3.82	4.0
02-mar-78	13:00	3.22	4.0
02-mar-78	14:00	2.74	3.0
02-mar-78	15:00	2.36	2.0
02-mar-78	16:00	2.06	1.0
02-mar-78	17:00	1.80	1.0
02-mar-78	18:00	1.54	0.0

**GRAFICO 5.3.5
Hidrograma de la Tormenta**

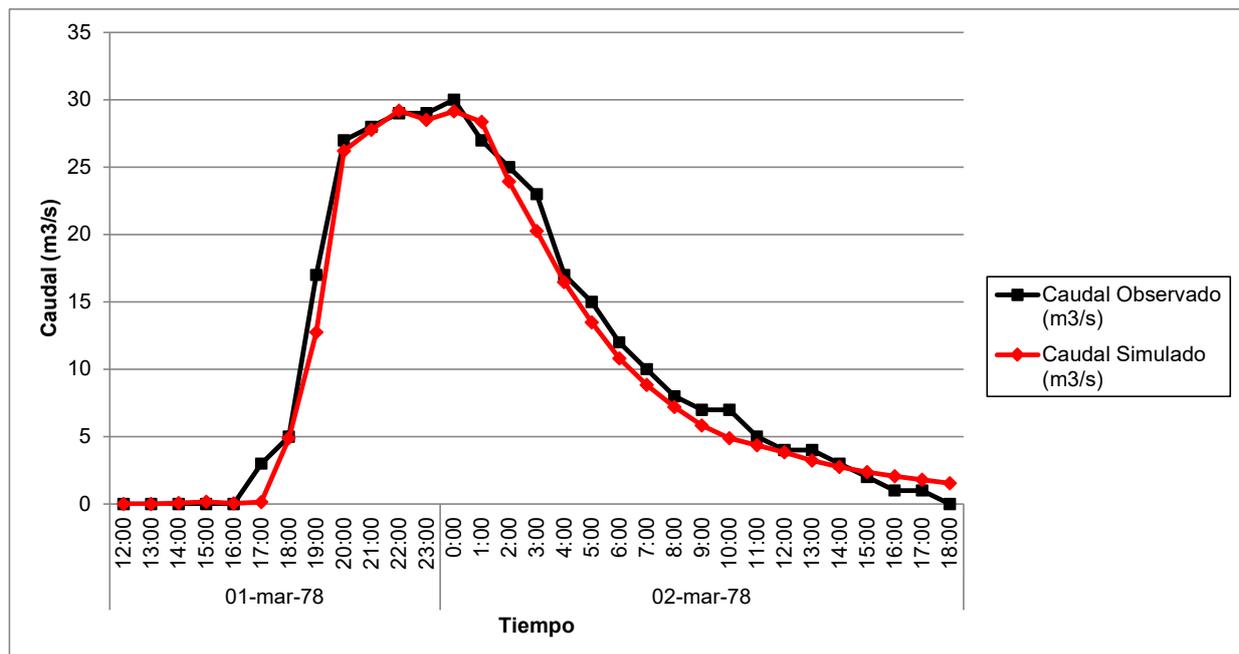
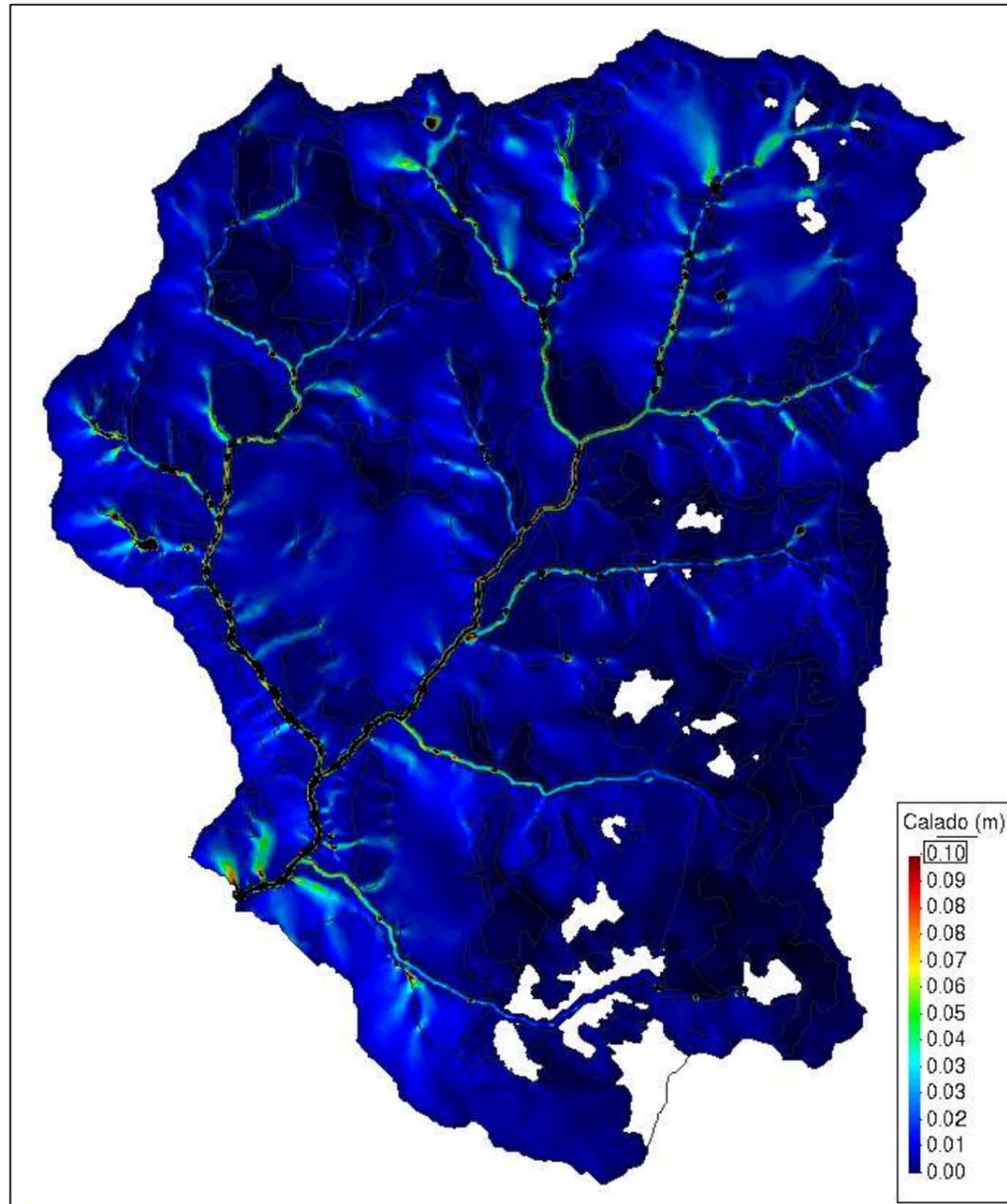


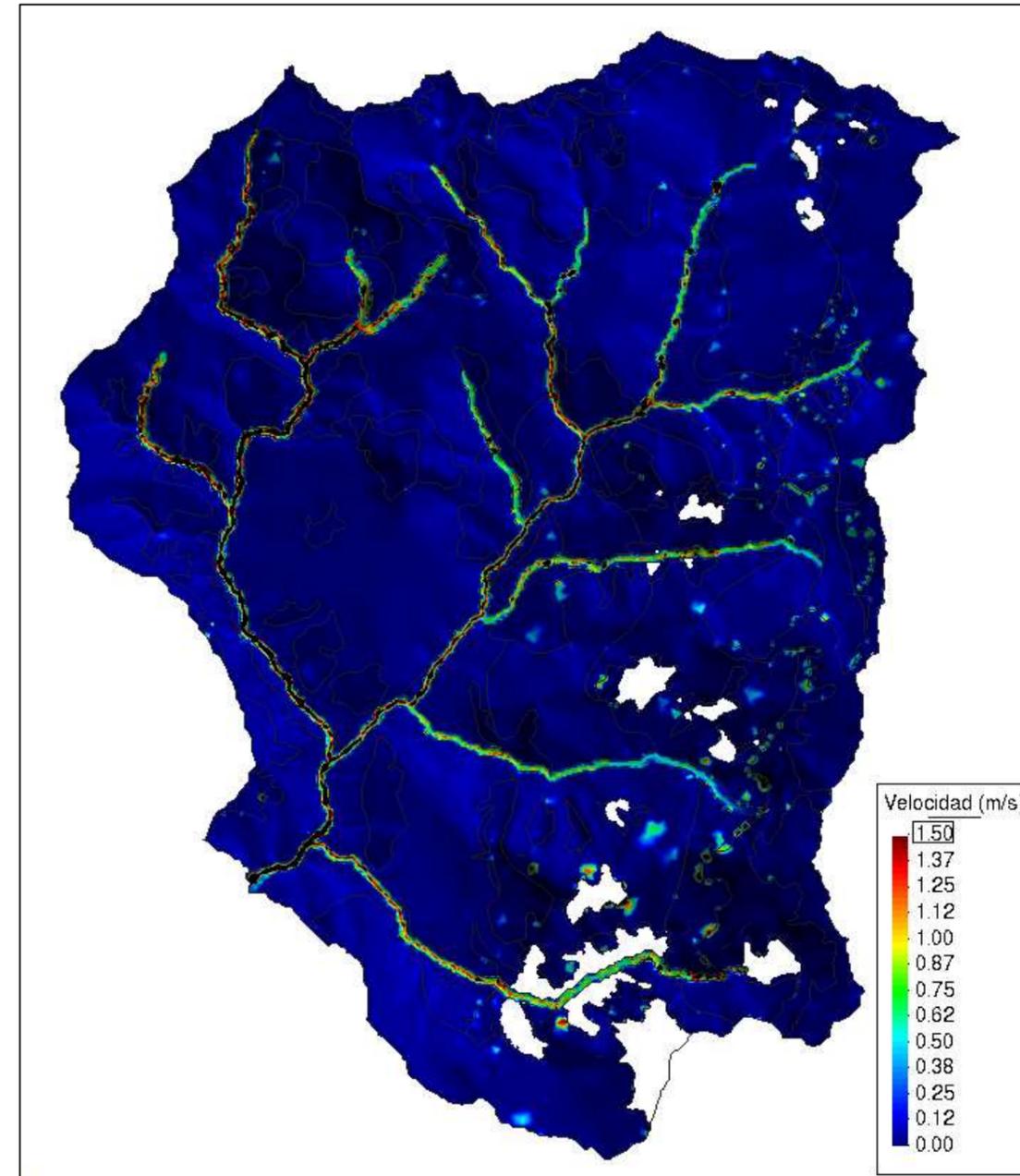
GRAFICO 5.3.5B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 5 (01/03/1978)



ALTURAS DE AGUA

Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

█ Calado > 0.1 m



VELOCIDADES DE AGUA

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 1.5 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

█ Velocidad > 1.5 m/s.

TABLA 5.3.6
RESULTADOS IBER - Tormenta 6 (07/03/1979)

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
07-mar-79	14:00	0.00	0.0
07-mar-79	15:00	0.00	0.0
07-mar-79	16:00	0.00	0.0
07-mar-79	17:00	0.04	0.0
07-mar-79	18:00	0.00	0.0
07-mar-79	19:00	0.00	0.0
07-mar-79	20:00	0.02	0.0
07-mar-79	21:00	0.10	0.0
07-mar-79	22:00	0.07	0.0
07-mar-79	23:00	0.19	7.6
07-mar-79	0:00	6.00	14.3
07-mar-79	1:00	23.40	21.3
08-mar-79	2:00	25.49	27.9
08-mar-79	3:00	36.66	35.8
08-mar-79	4:00	46.00	43.3
08-mar-79	5:00	44.04	41.3
08-mar-79	6:00	37.66	39.3
08-mar-79	7:00	31.77	34.9
08-mar-79	8:00	27.93	30.7
08-mar-79	9:00	22.31	27.8
08-mar-79	10:00	18.69	24.8
08-mar-79	11:00	16.90	22.0
08-mar-79	12:00	14.96	19.2
08-mar-79	13:00	14.99	16.4
08-mar-79	14:00	13.92	13.6
08-mar-79	15:00	12.63	11.0
08-mar-79	16:00	11.18	9.2
08-mar-79	17:00	9.76	7.7
08-mar-79	18:00	8.64	6.0
08-mar-79	19:00	7.62	4.5
08-mar-79	20:00	6.63	2.8
08-mar-79	21:00	5.98	1.1
08-mar-79	22:00	5.38	0.0

GRAFICO 5.3.6
Hidrograma de la Tormenta

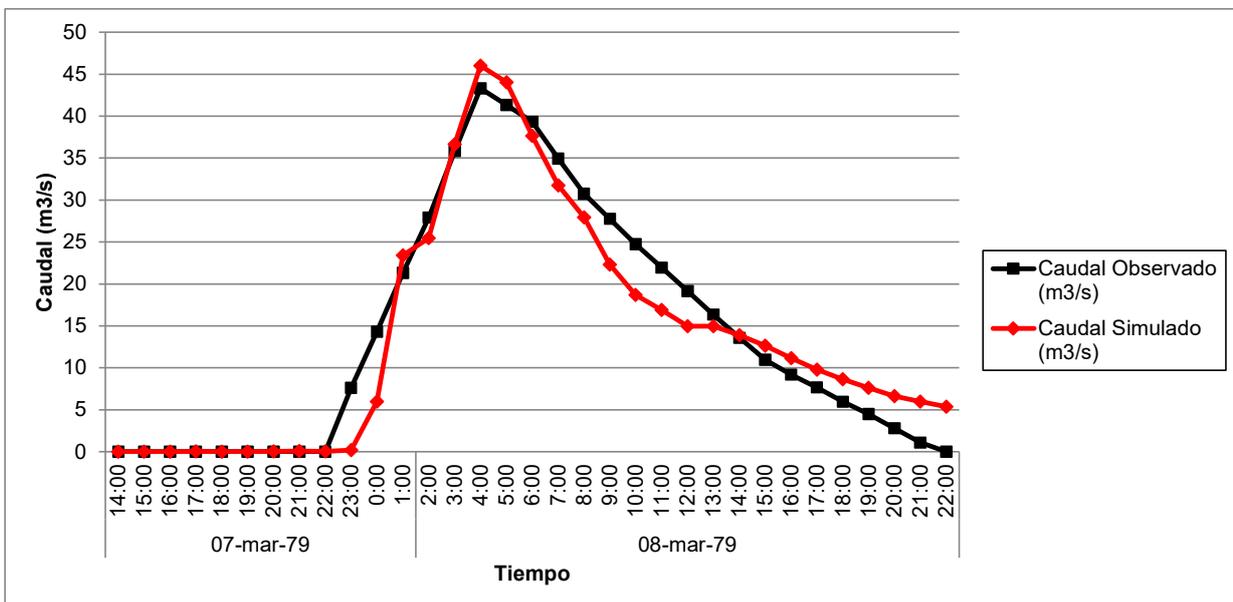
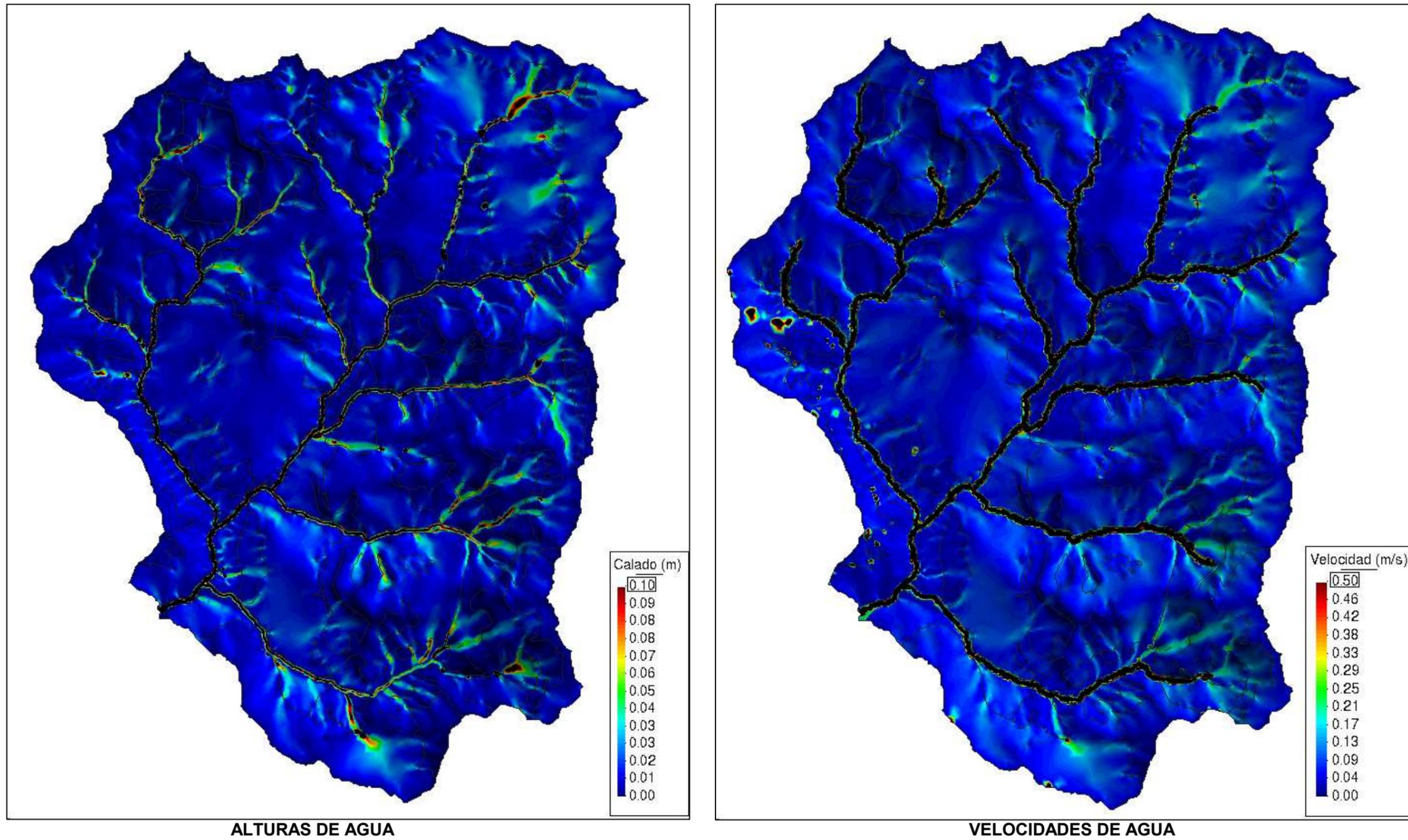


GRAFICO 5.3.6B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 6 (07/03/1979)



Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

— Calado > 0.1 m

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 1.5 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

— Velocidad > 1.5 m/s.

TABLA 5.3.7
RESULTADOS IBER - Tormenta 7 (23/04/1977)

Fecha	Hora	Caudal Simulado (m ³ /s)	Caudal Observado (m ³ /s)
23-abr-77	22:00	0.00	0.0
23-abr-77	23:00	0.00	0.0
23-abr-77	0:00	0.06	0.0
23-abr-77	1:00	0.18	0.0
23-abr-77	2:00	0.17	0.0
23-abr-77	3:00	0.03	4.0
23-abr-77	4:00	0.07	8.0
23-abr-77	5:00	61.64	56.6
23-abr-77	6:00	105.70	105.2
23-abr-77	7:00	87.62	89.2
23-abr-77	8:00	75.65	73.3
23-abr-77	9:00	53.30	52.3
24-abr-77	10:00	37.53	31.3
24-abr-77	11:00	27.36	22.4
24-abr-77	12:00	21.17	13.4
24-abr-77	13:00	16.34	9.5
24-abr-77	14:00	13.46	5.5
24-abr-77	15:00	11.37	2.8
24-abr-77	16:00	9.26	0.0

GRAFICO 5.2.7
 Hidrograma de la Tormenta

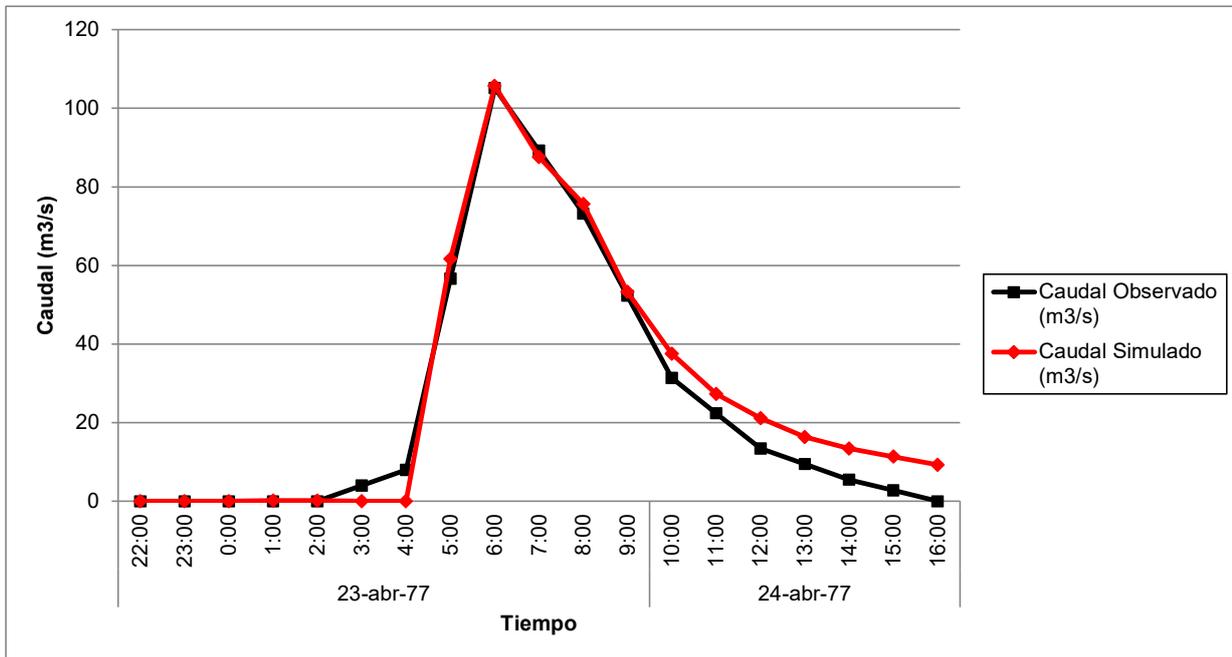
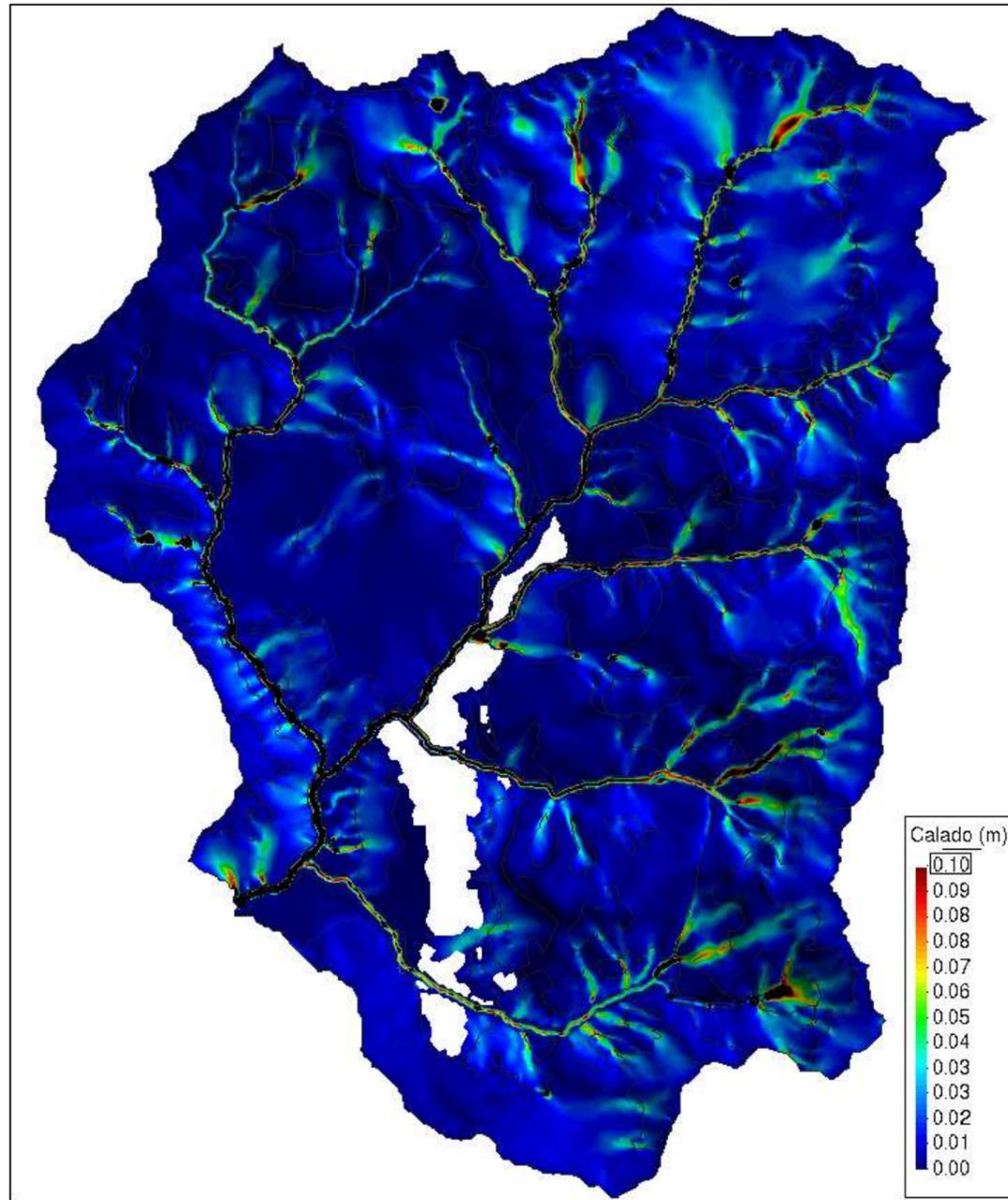


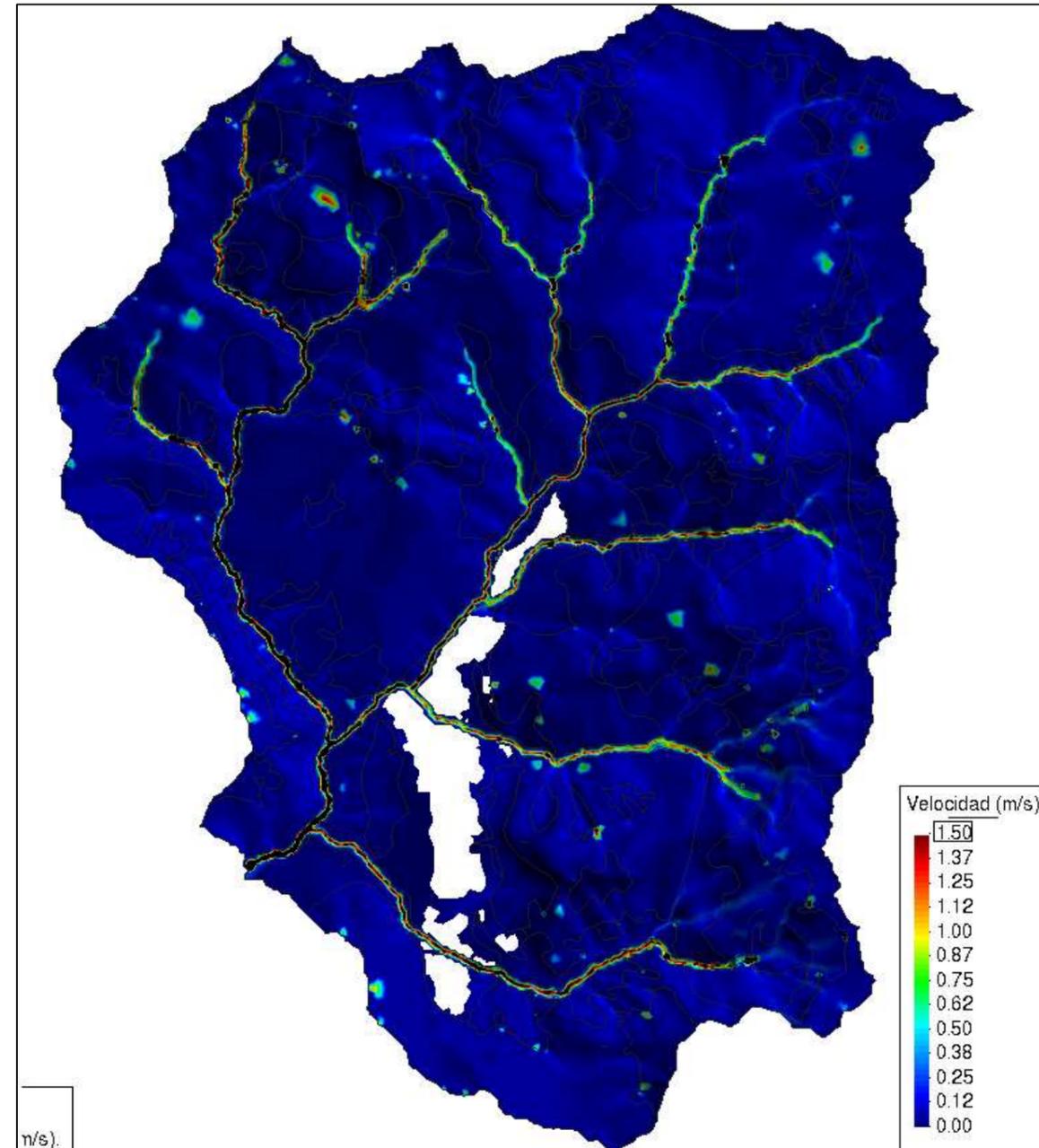
GRAFICO 5.3.7B
RESULTADOS IBER - TORMENTA 7 (23/04/1977)



ALTURAS DE AGUA

Nota: Se visualizan las alturas de agua menores a 0.1 m. (Flujos de escorrentía)

— Calado > 0.1 m



VELOCIDADES DE AGUA

Nota: Se visualizan las velocidades de agua menores a 1.5 m/s (Flujos de escorrentía en ladera)

— Velocidad > 1.5 m/s.

ANEXO 5.4: RESULTADOS

1.1 MODELO HIDROGRAMA UNITARIO HEC-HMS

1.1.1 Tiempo de Concentración

Se ha determinado el tiempo de concentración en función a las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 4.4.1.3. La Tabla 1.1 muestra los valores obtenidos para tiempo de concentración y de retardo.

Tabla 1.1: Tiempo de Concentración y Retardo (min)

Autor	Tiempo de Concentración	Tiempo de Retardo
Kirpich	133	80
California Culverts Practice	149	89
Izzard	130	78
Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley	141	85
Ecuación de retardo SCS (AMC I)	816	490
Ecuación de retardo SCS (AMC II)	487	292
Ecuación de retardo SCS (AMC III)	323	194

Fuente: Elaboración propia

1.1.2 Tormenta 1

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.1 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.2 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.2: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 1

Simulación	CN	Tlag	la
Inicial	72.8	292	19.0
Calibración 1	72.8	322.5	19.0
Calibración 2	58.29	420.7	9.5
Calibración 3	53.20	441.6	4.8
Calibración 4	55.46	331.4	9.5
Calibración 5	53.18	337.8	6.1
Calibración 6	53.19	324.4	6.1

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.3 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.3: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 1

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	46.7	42.9	-8.1%	1.601	1.113	-30.5%	0.796
Calibración 1	46.7	39.6	-15.3%	1.601	1.112	-30.6%	0.819
Calibración 2	46.7	40.8	-12.5%	1.601	1.425	-11.0%	0.806
Calibración 3	46.7	44.3	-5.1%	1.601	1.611	0.6%	0.568
Calibración 4	46.7	45.6	-2.3%	1.601	1.300	-18.9%	0.874
Calibración 5	46.7	51.9	11.1%	1.601	1.501	-6.3%	0.847
Calibración 6	46.7	45.0	-3.6%	1.601	1.502	-6.2%	0.920

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.92, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.1 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

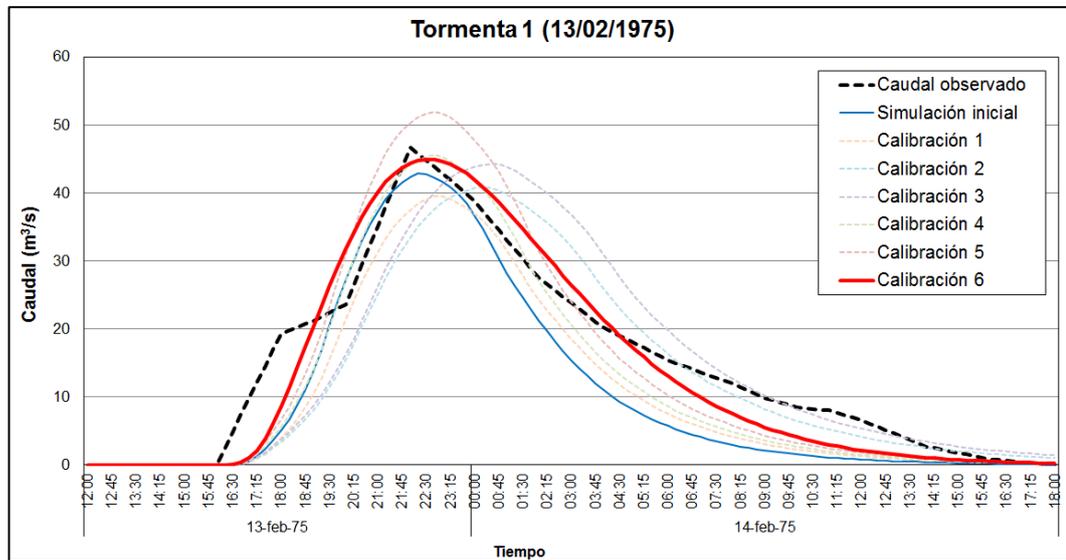


Figura 1.1 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 1.

Fuente: Elaboración propia

1.1.3 Tormenta 2

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.4 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.4: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 2

Simulación	CN	Tlag	Ia
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	72.26	274.8	19.0
Calibración 2	69.95	293.6	9.5
Calibración 3	65.81	295.4	4.8
Calibración 4	70.40	294.0	9.6
Calibración 5	73.50	288.8	8.1
Calibración 6	74.83	249.9	7.9

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.5 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.5: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 2

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	260.8	226.3	-13.3%	10.249	6.171	-39.8%	0.469
Calibración 1	260.8	233.0	-10.7%	10.249	6.071	-40.8%	0.470
Calibración 2	260.8	285.1	9.3%	10.249	7.713	-24.7%	0.580
Calibración 3	260.8	287.5	10.2%	10.249	7.789	-24.0%	0.600
Calibración 4	260.8	287.8	10.3%	10.249	7.793	-24.0%	0.580
Calibración 5	260.8	284.7	9.1%	10.249	8.989	-12.3%	0.700
Calibración 6	260.8	260.6	-0.1%	10.249	9.335	-8.9%	0.870

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.87, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.2 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

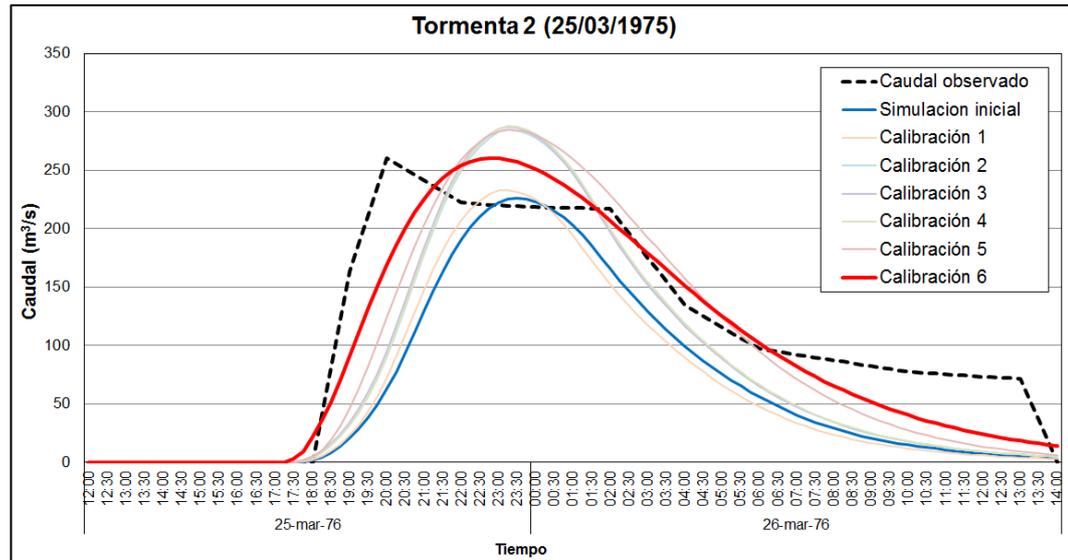


Figura 1.2 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 2.
Fuente: Elaboración propia

1.1.4 Tormenta 3

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.6 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.6: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 3

Simulación	CN	Tlag	Ia
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	72.80	292.0	19.0
Calibración 2	63.05	296.0	9.5
Calibración 3	63.20	296.0	9.4
Calibración 4	55.59	244.4	9.6
Calibración 5	63.03	243.9	9.6
Calibración 6	63.05	243.9	9.6

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.7 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.7: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 3

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	21.2	3.9	-81.5%	0.677	0.098	-85.5%	-0.64
Calibración 1	21.2	3.9	-81.5%	0.677	0.098	-85.5%	-0.64
Calibración 2	21.2	20.3	-4.0%	0.677	0.528	-22.0%	0.74
Calibración 3	21.2	20.6	-2.8%	0.677	0.535	-21.0%	0.73
Calibración 4	21.2	20.9	-1.0%	0.677	0.485	-28.4%	0.74
Calibración 5	21.2	17.9	-15.6%	0.677	0.614	-9.3%	0.94
Calibración 6	21.2	17.9	-15.5%	0.677	0.615	-9.2%	0.94

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 15%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.94, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.3 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

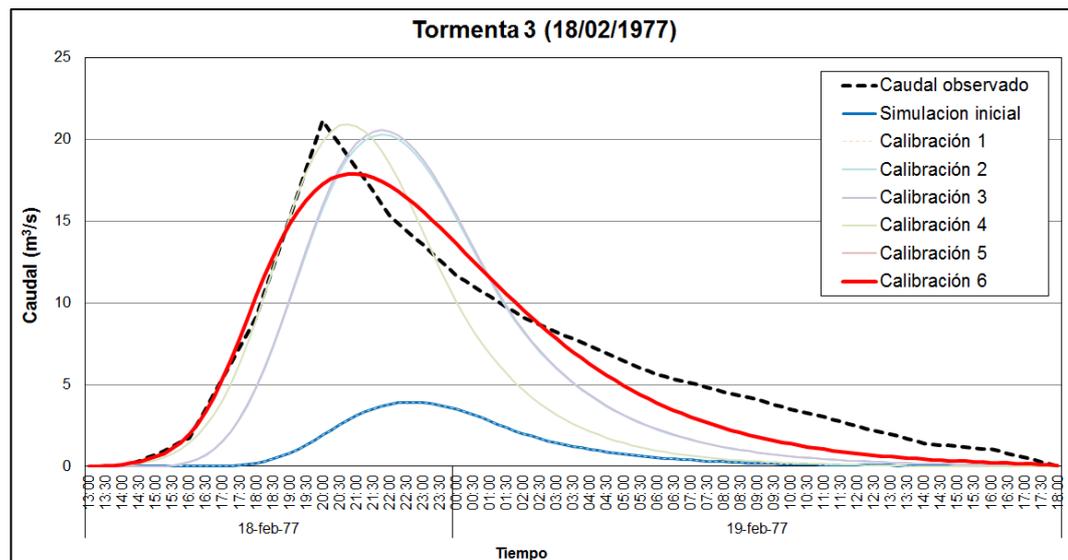


Figura 1.3 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 3.

Fuente: Elaboración propia

1.1.5 Tormenta 4

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un

mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.8 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.8: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 4

Simulación	CN	Tlag	Ia
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	72.80	194.7	19.3
Calibración 2	72.80	127.2	19.3
Calibración 3	72.80	55.3	27.3
Calibración 4	40.32	75.7	7.1
Calibración 5	40.32	50.0	7.6
Calibración 6	40.32	50.5	7.6

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.9 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.9: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 4

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	253.2	118.1	-53.4%	2.885	3.975	37.8%	-0.85
Calibración 1	253.2	169.2	-33.2%	2.885	4.051	40.4%	-0.81
Calibración 2	253.2	245.2	-3.2%	2.885	4.075	41.2%	-0.78
Calibración 3	253.2	246.9	-2.5%	2.885	2.592	-10.2%	-0.07
Calibración 4	253.2	216.2	-14.6%	2.885	2.259	-21.7%	0.27
Calibración 5	253.2	277.7	9.7%	2.885	2.214	-23.3%	0.43
Calibración 6	253.2	237.6	-6.1%	2.885	2.214	-23.3%	0.45

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 23%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.45, que es considerado como un ajuste bueno.

La Figura 1.4 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

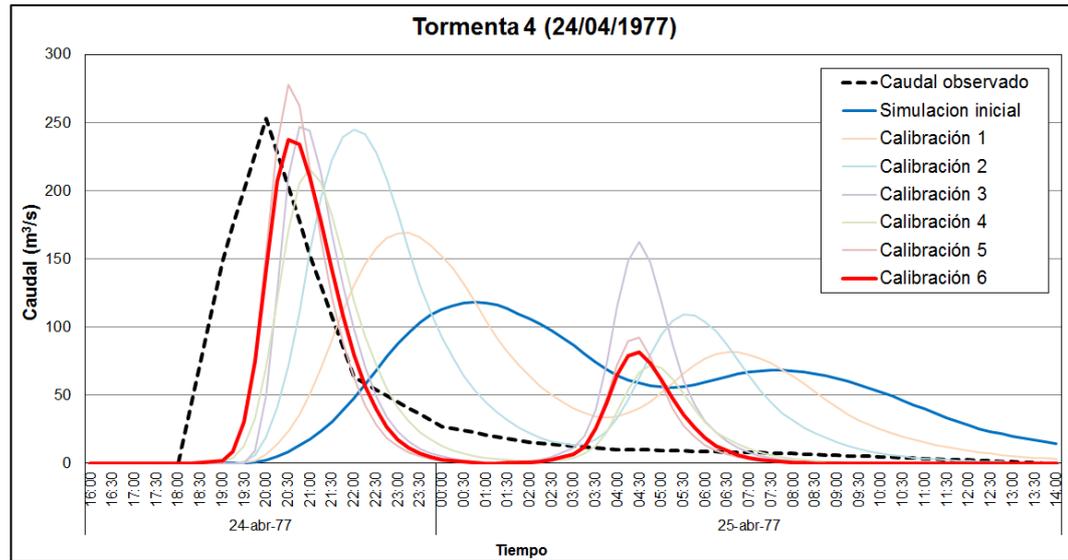


Figura 1.4 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 4.
Fuente: Elaboración propia

1.1.6 Tormenta 5

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.10 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.10: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 5

Simulación	CN	Tlag	Ia
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	53.50	430.0	18.9
Calibración 2	53.20	301.7	19.5
Calibración 3	56.62	273.1	19.2

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.11 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.11: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 5

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	30.0	86.8	189.3%	1.220	2.212	81.3%	-2.39
Calibración 1	30.0	30.2	0.7%	1.220	1.080	-11.5%	0.71
Calibración 2	30.0	39.1	30.2%	1.220	1.023	-16.2%	0.81
Calibración 3	30.0	31.9	6.2%	1.220	1.189	-2.5%	0.99

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.99, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.5 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

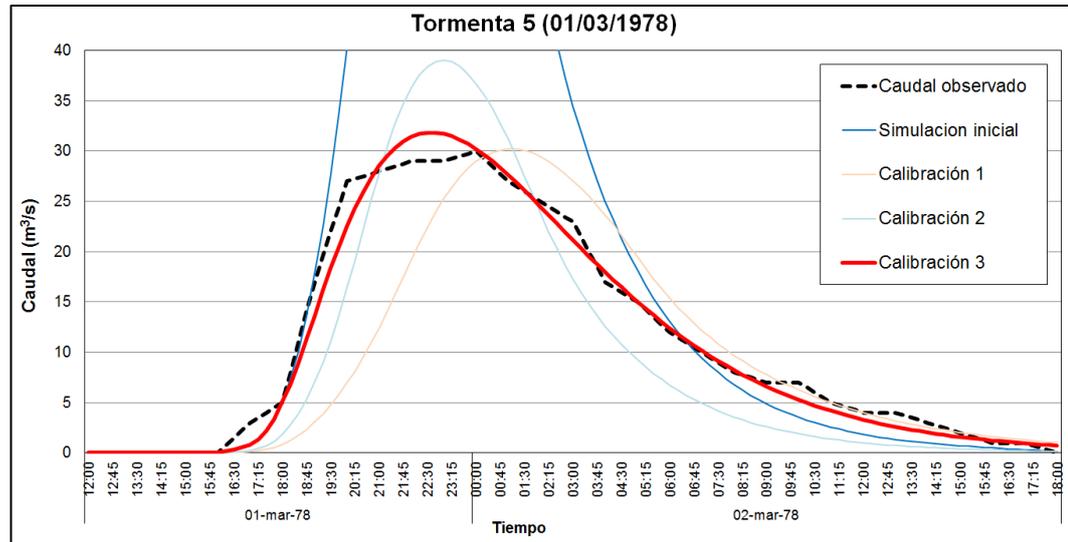


Figura 1.5 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 5.
Fuente: Elaboración propia

1.1.7 Tormenta 6

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.12 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.12: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 6

Simulación	CN	Tlag	Ia
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	72.80	292.0	21.9
Calibración 2	70.50	319.2	20.4
Calibración 3	70.70	303.5	18.5

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.13 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.13: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 6

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	43.3	66.5	53.5%	1.664	1.772	6.5%	0.53
Calibración 1	43.3	51.4	18.7%	1.664	1.373	-17.5%	0.80
Calibración 2	43.3	50.1	15.7%	1.664	1.433	-13.9%	0.86
Calibración 3	43.3	40.1	-7.5%	1.664	1.656	-0.5%	0.99

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.99, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.6 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

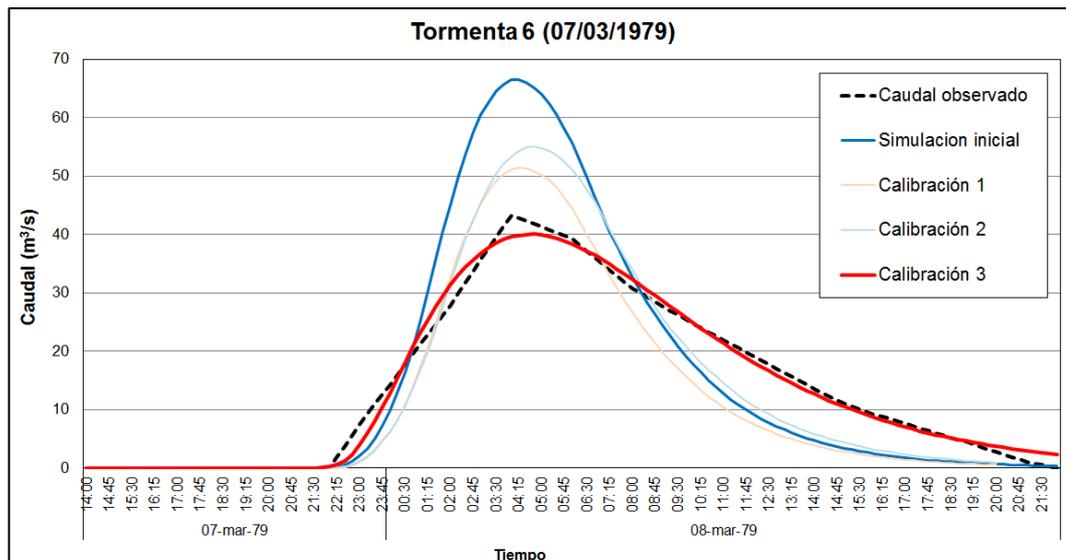


Figura 1.6 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 6.
Fuente: Elaboración propia

1.1.8 Tormenta 7

Al igual que la tormenta anterior, se considera como punto de partida para la simulación a la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.14 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.14: Parámetros Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 7

Simulación	CN	Tlag	la
Inicial	72.80	292.0	19.0
Calibración 1	53.50	292.0	19.3
Calibración 2	40.76	117.5	12.9
Calibración 3	41.45	100.4	11.6

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.15 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.15: Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 7

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	105.2	134.6	28.0%	1.705	3.191	87.2%	-1.64
Calibración 1	105.2	66.7	-36.6%	1.705	1.577	-7.5%	-0.02
Calibración 2	105.2	96.8	-8.0%	1.705	1.536	-9.9%	0.96
Calibración 3	105.2	91.5	-13.0%	1.705	1.678	-1.6%	0.97

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 13%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.97, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.7 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo..

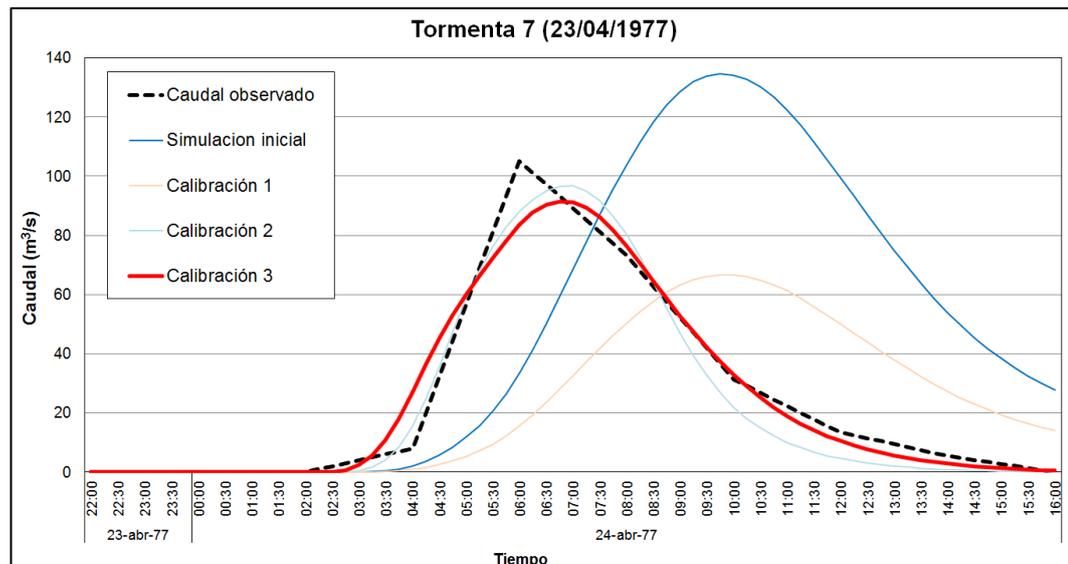


Figura 1.7 Resultados Modelamiento Hec-HMS, Tormenta 7.

Fuente: Elaboración propia

Los Tablas 1.16 y 1.17 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación. En el Anexo V se detallan los resultados obtenidos en el modelamiento en HMS.

Tabla 1.16: Resumen Parámetros Calibrados, Modelamiento Hec-HMS

Tormenta	CN	Tlag	la
Tormenta 1	53.19	324.4	6.1
Tormenta 2	74.83	249.9	7.9
Tormenta 3	63.05	243.9	9.6
Tormenta 4	40.32	50.5	7.6
Tormenta 5	56.62	273.1	19.2
Tormenta 6	70.7	303.5	18.5
Tormenta 7	41.45	100.4	11.6

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC); a excepción de la Tormenta 4, la cual es única que ocurre a finales del mes abril, en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una mejor concentración de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el tiempo de retardo es menor que en las demás tormentas.

Tabla 1.17: Resumen Resultados Calibrados, Modelamiento Hec-HMS

Tormenta	Caudal			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1	46.7	45	-3.6%	1.601	1.502	-6.2%	0.95
Tormenta 2	260.8	260.6	-0.1%	10.249	9.335	-8.9%	0.87
Tormenta 3	21.2	17.9	-15.6%	0.677	0.615	-9.2%	0.94
Tormenta 4	253.2	237.6	-6.2%	2.885	2.214	-23.3%	0.45
Tormenta 5	30	31.9	6.3%	1.22	1.189	-2.5%	0.99
Tormenta 6	43.3	40.1	-7.4%	1.664	1.656	-0.5%	0.99
Tormenta 7	105.2	91.5	-13.0%	1.705	1.678	-1.6%	0.97
	Promedio		-5.6%	Promedio		-7.4%	0.88

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que 6 de las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, mientras que tormenta restante tiene un ajuste bueno.

1.2 MODELO TANQUES DE ALMACENAMIENTO TETIS

1.2.1 Tormenta 1

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.18 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.18: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 1

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	30.0%
Calibración 1	0.82	0.57	0.25	37.0%
Calibración 2	0.71	0.80	0.30	28.6%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.19 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.19: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 1

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	46.7	9.5	-79.7%	1.601	0.188	-88.3%	-0.62
Calibración 1	46.7	46.6	-0.2%	1.601	1.314	-17.9%	0.85
Calibración 2	46.7	47.9	2.6%	1.601	1.293	-19.2%	0.84

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 19%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.84, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.8 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

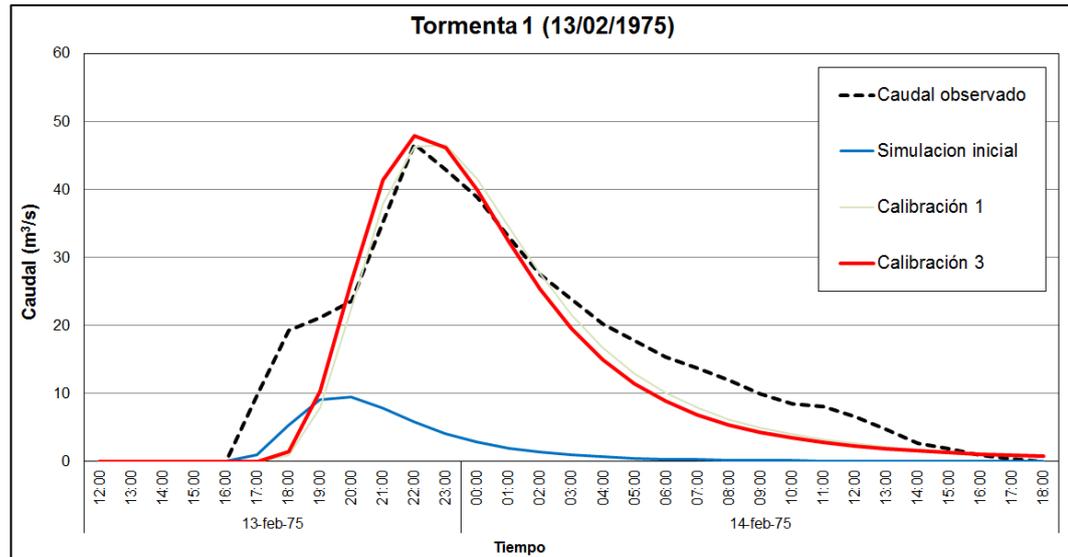


Figura 1.8 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 1.
Fuente: Elaboración propia

1.2.2 Tormenta 2

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.20 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.20: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 2

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	50.0%
Calibración 1	0.92	1.49	0.14	57.5%
Calibración 2	1.05	0.96	0.15	62.0%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.21 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.21 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 2

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	263.5	483.4	83.4%	10.627	6.528	-38.6%	-1.29
Calibración 1	263.5	374.7	42.2%	10.627	10.389	-2.2%	0.43
Calibración 2	263.5	322.5	22.4%	10.627	9.000	-15.3%	0.52
Calibración 3	263.5	288.4	10%	10.627	10.249	-19.4%	0.55

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 22%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.56, que es considerado como un ajuste bueno.

La Figura 1.9 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

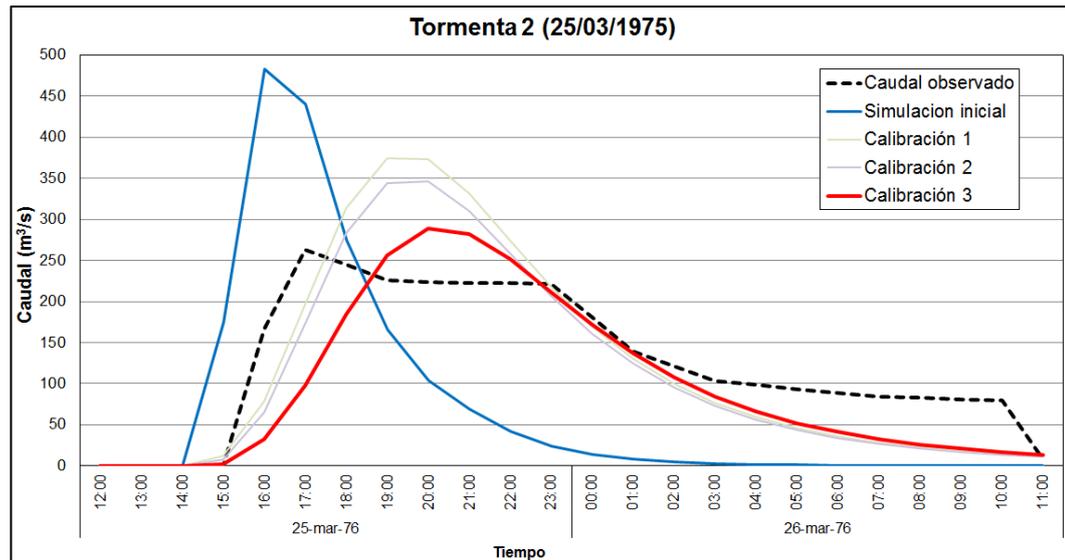


Figura 1.9 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 2.
Fuente: Elaboración propia

1.2.3 Tormenta 3

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.22 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.22: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 3

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	30.0%
Calibración 1	0.85	1.22	0.38	37.4%
Calibración 2	0.89	0.99	0.42	39.3%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.23 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.23: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 3

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	21.2	10.1	-52.2%	0.677	0.180	-73.4%	-0.05
Calibración 1	21.2	20.2	-4.6%	0.677	0.531	-21.6%	0.86
Calibración 2	21.2	21.6	2.0%	0.677	0.545	-19.5%	0.84

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 20%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.84, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.10 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

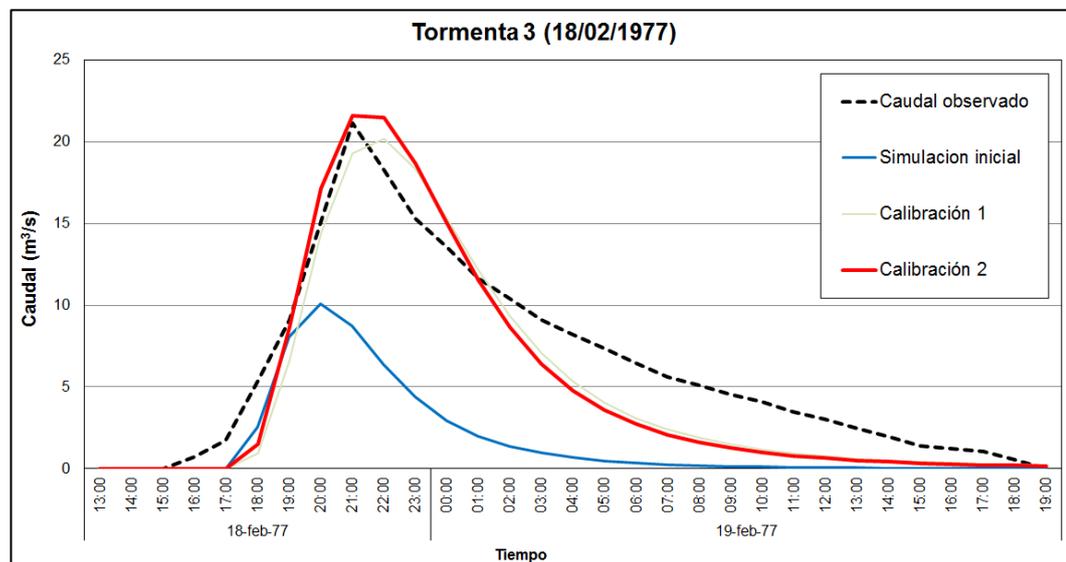


Figura 1.10 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 3.
Fuente: Elaboración propia

1.2.4 Tormenta 4

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.24 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.24: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 4

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	50.0%
Calibración 1	1.40	1.39	2.01	58.1%
Calibración 2	1.41	2.00	2.50	59.0%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.25 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.25: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 4

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	253.2	320.2	26.5%	2.885	5.001	73.3%	-0.01
Calibración 1	253.2	240.8	-4.9%	2.885	2.907	0.8%	0.71
Calibración 2	253.2	268.5	6.0%	2.885	2.697	-6.5%	0.74

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.74, que es considerado como un ajuste muy bueno.

La Figura 1.11 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

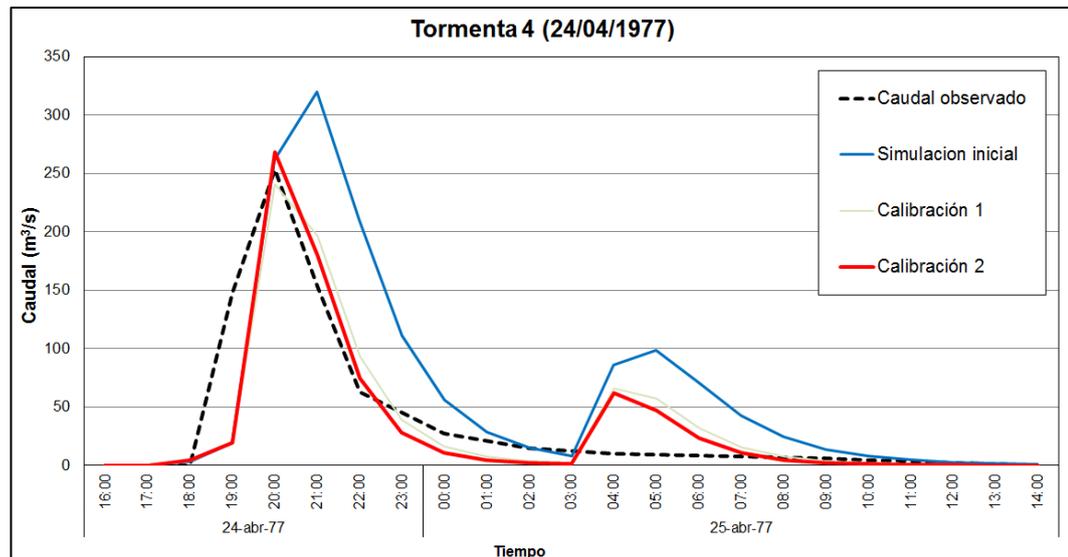


Figura 1.11 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 4.

Fuente: Elaboración propia

1.2.5 Tormenta 5

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.26 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.26: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 5

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	35.0%
Calibración 1	0.28	5.79	0.28	35.8%
Calibración 2	0.83	1.07	0.50	44.3%
Calibración 3	0.81	0.98	0.58	41.0%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.27 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.27: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 5

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	30.4	40.9	34.4%	1.270	0.670	-47.2%	0.24
Calibración 1	30.4	26.6	-12.4%	1.270	1.303	2.6%	0.83
Calibración 2	30.4	31.9	4.8%	1.270	1.127	-11.3%	0.96
Calibración 3	30.4	31.1	2.4%	1.270	1.103	-13.1%	0.95

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 13%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.95, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.12 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

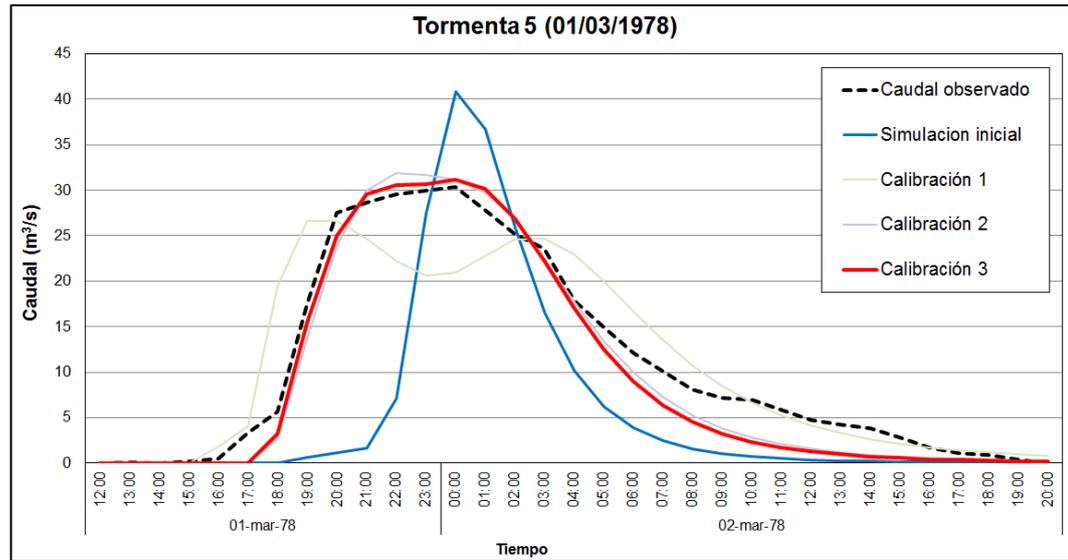


Figura 1.12 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 5.
Fuente: Elaboración propia

1.2.6 Tormenta 6

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.28 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.28: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 6

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	45.0%
Calibración 1	1.00	4.41	0.17	60.3%
Calibración 2	0.99	4.70	0.21	59.5%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.29 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.29: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 6

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	43.3	54.3	25.2%	1.664	1.074	-35.5%	-0.13
Calibración 1	43.3	41.5	-4.2%	1.664	1.584	-4.8%	0.93
Calibración 2	43.3	43.3	0.0%	1.664	1.507	-9.4%	0.95

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.84, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.13 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

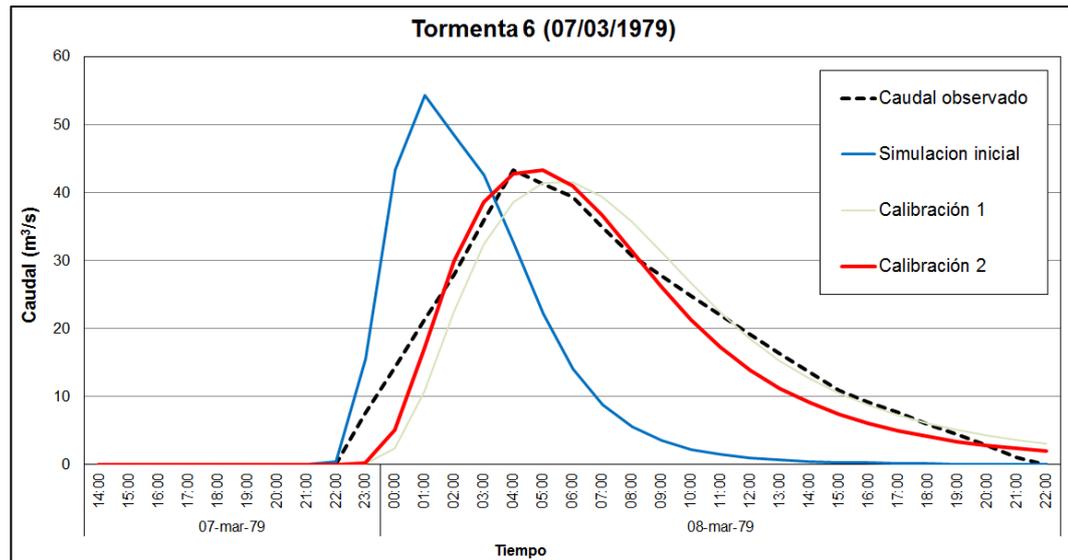


Figura 1.13 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 6.
Fuente: Elaboración propia

1.2.7 Tormenta 7

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.2 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.30 muestra los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.30: Parámetros Modelamiento TETIS, Tormenta 7

Simulación	FC1	FC3	FC9	% Inic
Inicial	1.00	1.00	1.00	40.0%
Calibración 1	0.93	4.04	0.87	48.7%

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.31 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.31: Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 7

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	105.2	123.9	17.8%	1.705	1.716	0.6%	0.89
Calibración 1	105.2	105.3	0.1%	1.705	1.535	-10.0%	0.96

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.96, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.14 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

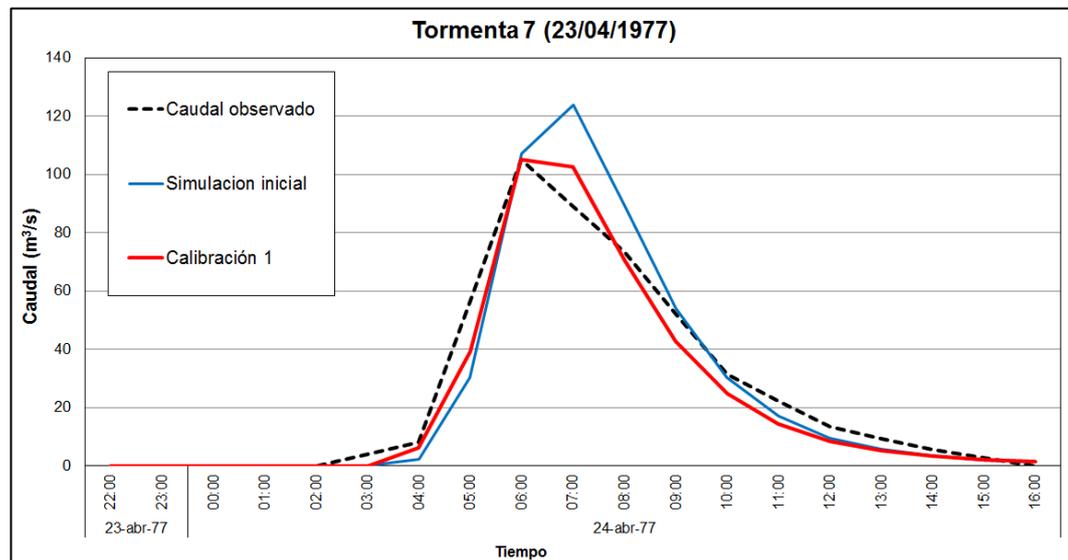


Figura 1.14 Resultados Modelamiento TETIS, Tormenta 7.
Fuente: Elaboración propia

Los Tablas 1.32 y 1.33 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación.

Tabla 1.32: Resumen Parámetros Calibrados, Modelamiento TETIS

Tormenta	FC1	FC3	FC9	% Inic
Tormenta 1	0.71	0.80	0.30	28.6%
Tormenta 2	1.05	0.96	0.15	62.0%
Tormenta 3	0.89	0.99	0.42	39.3%
Tormenta 4	1.41	2	2.5	59.0%
Tormenta 5	0.81	0.98	0.58	41.0%
Tormenta 6	0.99	4.7	0.21	59.5%
Tormenta 7	0.93	4.04	0.87	48.7%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC), además los factores correctores relacionado a las pérdidas son cercanos a 1; a excepción de la Tormenta 4, la cual es única que ocurre a finales del mes abril, en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una mejor concentración de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el factor corrector que aplica a las velocidades es mayor que en las demás tormentas.

El Anexo IV muestra los mapas de parámetros de ingreso al modelo hidrológico TETIS para las siete tormentas analizadas.

Tabla 1.33: Resumen Resultados Calibrados, Modelamiento TETIS

Tormenta	Caudal			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1	46.7	47.9	2.6%	1.601	1.293	-19.2%	0.84
Tormenta 2	260.8	322.5	23.7%	10.249	9.000	-12.2%	0.56
Tormenta 3	21.2	21.6	1.9%	0.677	0.545	-19.5%	0.84
Tormenta 4	253.2	268.5	6.0%	2.885	2.697	-6.5%	0.74
Tormenta 5	30	31.1	3.7%	1.22	1.103	-9.6%	0.95
Tormenta 6	43.3	43.3	0.0%	1.664	1.664	0.0%	0.95
Tormenta 7	105.2	105.3	0.1%	1.705	1.535	-10.0%	0.96
	Promedio		5.4%	Promedio		-11.0%	0.83

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que 5 de las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, mientras que las 2 tormentas restantes tienen un ajuste bueno y muy bueno. Se observa que generalmente tienen una menor eficiencia de ajuste que el modelo HMS.

En el Anexo V se detallan los resultados obtenidos en el modelamiento en HMS.

1.3 MODELO DISCRETIZACIÓN HIDROLÓGICA DESACOPLADA IBER

1.3.1 Tormenta 1

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC I). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.34 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.34: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 1

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	188	0.3	2.20	0.13	0.10
Calibración 1	300	0.4	1.50	0.35	0.30
Calibración 2	450	0.3	2.00	0.38	0.10
Calibración 3	550	0.4	1.74	0.35	0.10
Calibración 4	800	0.4	1.78	0.35	0.10
Calibración 5	900	0.4	1.34	0.35	0.13
Calibración 6	1000	0.4	0.97	0.35	0.14

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.35 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.35: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 1

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	46.7	32.7	-30.0%	1.601	0.373	-76.7%	-0.28
Calibración 1	46.7	63.4	35.7%	1.601	1.679	4.9%	0.28
Calibración 2	46.7	65.4	40.1%	1.601	1.300	-18.8%	0.32
Calibración 3	46.7	57.7	23.6%	1.601	1.452	-9.3%	0.53
Calibración 4	46.7	40.2	-13.9%	1.601	1.147	-28.4%	0.64
Calibración 5	46.7	41.4	-11.3%	1.601	1.462	-8.7%	0.81
Calibración 6	46.7	48.9	4.8%	1.601	1.620	1.2%	0.87

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 5%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.87, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.15 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

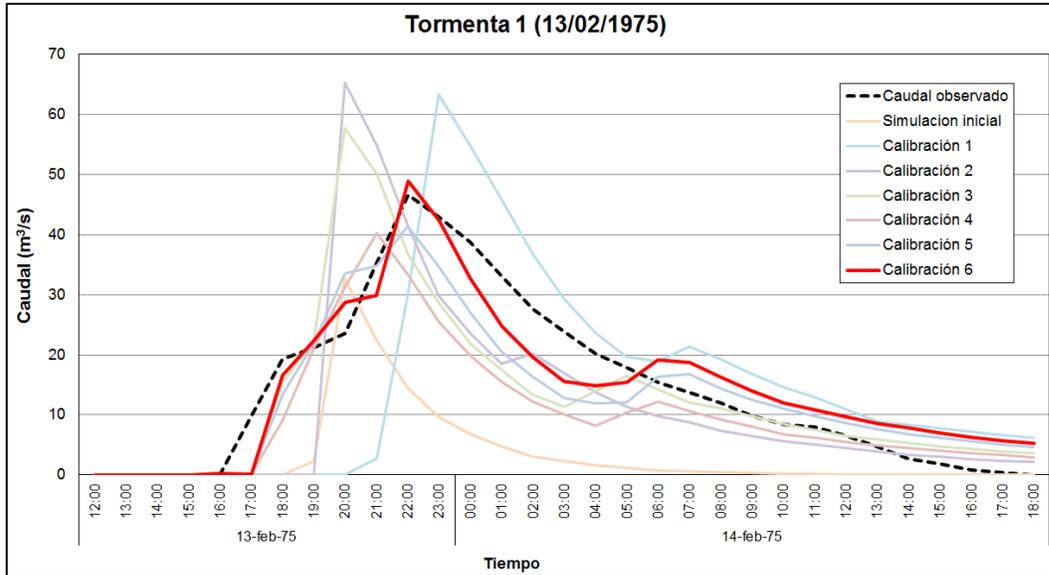


Figura 1.15 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 1.
Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Tormenta 2

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC II y III). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.36 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.36: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 2

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	300	0.5	0.50	0.58	0.40
Calibración 1	250	0.6	0.30	0.6	0.35
Calibración 2	800	0.7	0.45	0.65	0.40
Calibración 3	800	0.75	0.37	0.55	0.35
Calibración 4	1100	0.75	0.43	0.55	0.45
Calibración 5	1100	0.75	0.41	0.6	0.40

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.37 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.37: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 2

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	260.8	226.5	-13.2%	10.249	5.533	-46.0%	0.53
Calibración 1	260.8	276.1	5.9%	10.249	7.416	-27.6%	0.75
Calibración 2	260.8	295.8	13.4%	10.249	7.962	-22.3%	0.77
Calibración 3	260.8	328.8	26.1%	10.249	9.365	-8.6%	0.90
Calibración 4	260.8	280.5	7.6%	10.249	7.664	-25.2%	0.78
Calibración 5	260.8	274.2	5.1%	10.249	8.837	-13.8%	0.93

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 14%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.93, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.16 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

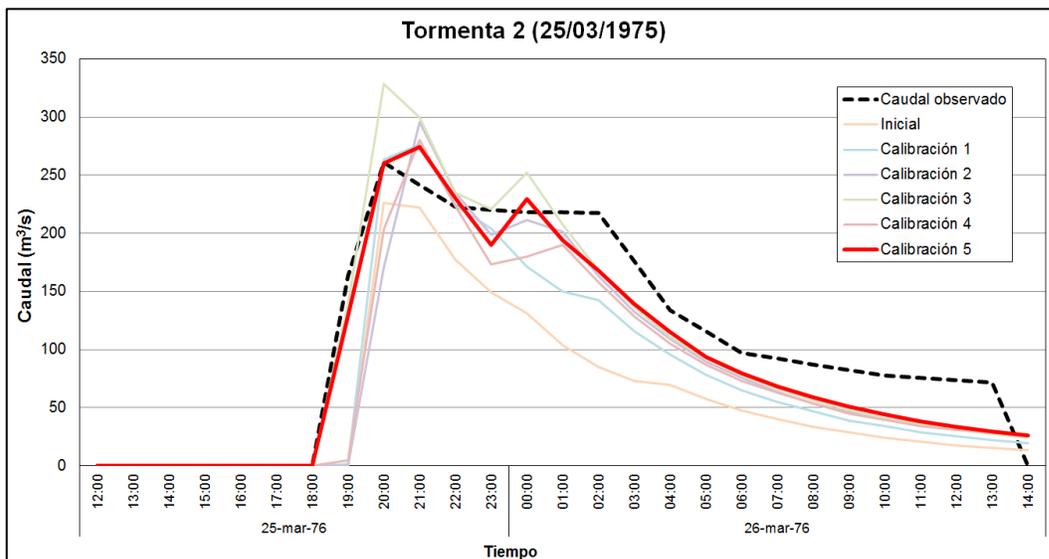


Figura 1.16 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 2.

Fuente: Elaboración propia

1.3.3 Tormenta 3

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC I y II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.38 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.38: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 3

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	1100	0.4	0.66	0.38	0.10
Calibración 1	1100	0.4	0.69	0.38	0.025
Calibración 2	1100	0.4	0.69	0.38	0.10
Calibración 3	1100	0.4	0.80	0.38	0.10

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.39 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.39: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 3

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	21.15	28.5	35.0%	0.677	0.789	16.6%	0.27
Calibración 1	21.15	26.4	24.8%	0.677	0.689	1.8%	0.48
Calibración 2	21.15	26.5	25.1%	0.677	0.708	4.5%	0.46
Calibración 3	21.15	21.7	2.7%	0.677	0.649	-4.1%	0.92

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 4%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.92, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.17 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

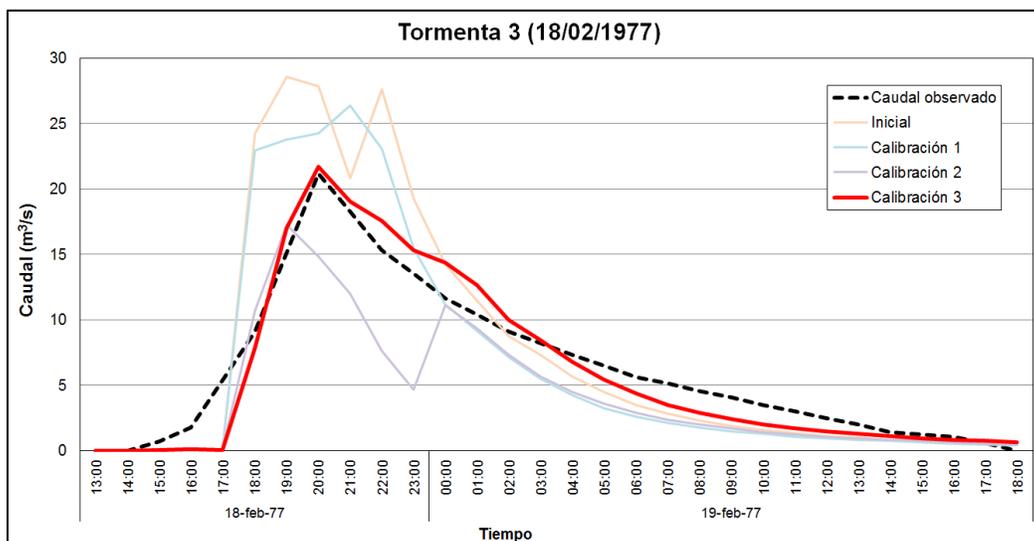


Figura 1.17 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 3.
Fuente: Elaboración propia

1.3.4 Tormenta 4

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC III). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.40 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.40: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 4

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	550	0.8	3.50	0.19	0.030
Calibración 1	550	0.8	6.00	0.19	0.030
Calibración 2	550	0.8	6.00	0.19	0.025
Calibración 3	550	0.8	7.67	0.15	0.025

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.41 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.41: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 4

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	253.2	209.9	-17.1%	2.885	3.297	14.3%	0.49
Calibración 1	253.2	178.5	-29.5%	2.885	2.854	-1.1%	0.56
Calibración 2	253.2	319.3	26.1%	2.885	2.960	2.6%	0.67
Calibración 3	253.2	288.8	14.1%	2.885	2.870	-0.5%	0.96

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 14%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.96, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.18 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

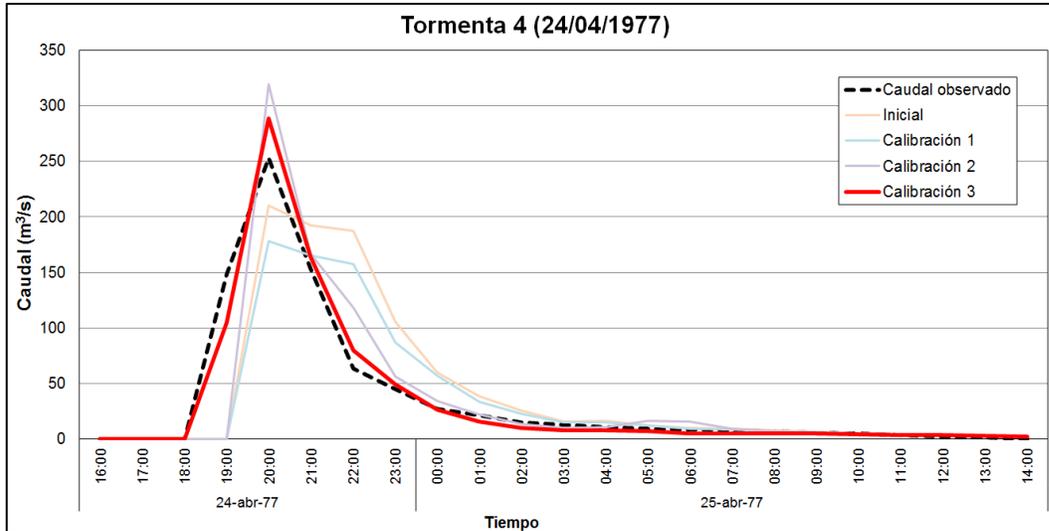


Figura 1.18 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 4.
Fuente: Elaboración propia

1.3.5 Tormenta 5

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC I y II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.42 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.42: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 5

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	700	0.3	0.50	0.19	0.04
Calibración 1	900	0.3	0.38	0.32	0.05
Calibración 2	900	0.3	0.43	0.40	0.05
Calibración 3	900	0.35	0.25	0.38	0.04

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.43 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.43: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 5

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	30	34.5	15.1%	1.220	0.845	-30.8%	0.69
Calibración 1	30	40.3	34.2%	1.220	1.256	2.9%	0.88
Calibración 2	30	32.9	9.6%	1.220	1.179	-3.4%	0.96

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Calibración 3	30	29.2	-2.7%	1.220	1.156	-5.3%	0.98

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 5%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.98, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.19 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

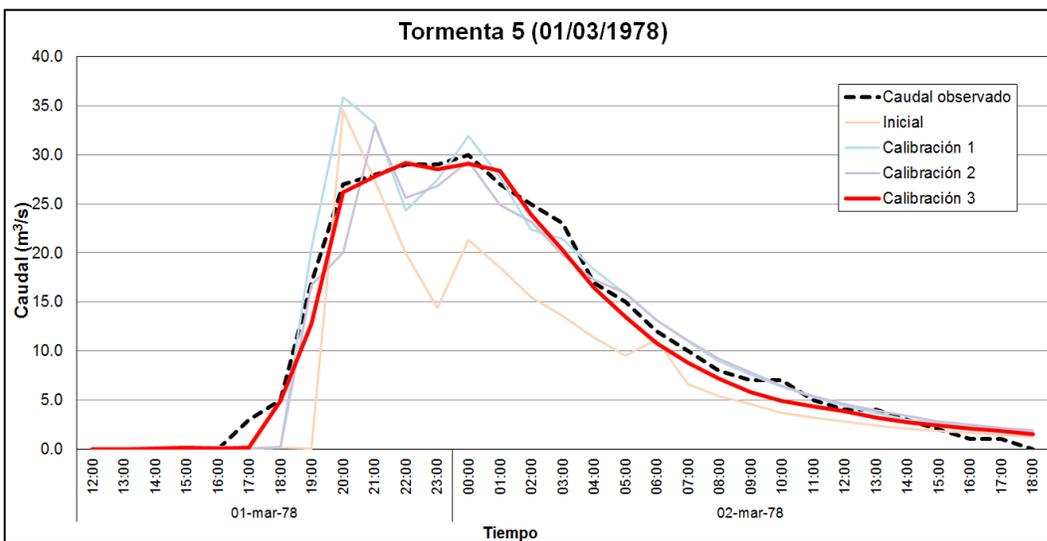


Figura 1.19 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 5.
Fuente: Elaboración propia

1.3.6 Tormenta 6

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC III). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.44 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.44: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 6

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	1200	0.7	0.90	0.38	0.05
Calibración 1	1200	0.8	0.75	0.70	0.20
Calibración 2	1200	0.8	0.75	0.70	0.03

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Calibración 3	1200	0.8	0.75	0.60	0.03
Calibración 4	1200	0.8	0.75	0.60	0.05

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.45 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.45: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 6

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	43.33	39.3	-9.4%	1.664	0.943	-43.4%	0.60
Calibración 1	43.33	46.2	6.6%	1.664	1.424	-14.4%	0.54
Calibración 2	43.33	44.2	2.0%	1.664	1.503	-9.7%	0.87
Calibración 3	43.33	46.9	8.4%	1.664	1.634	-1.8%	0.91
Calibración 4	43.33	46.0	6.2%	1.664	1.616	-2.9%	0.94

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 6%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.94, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.20 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

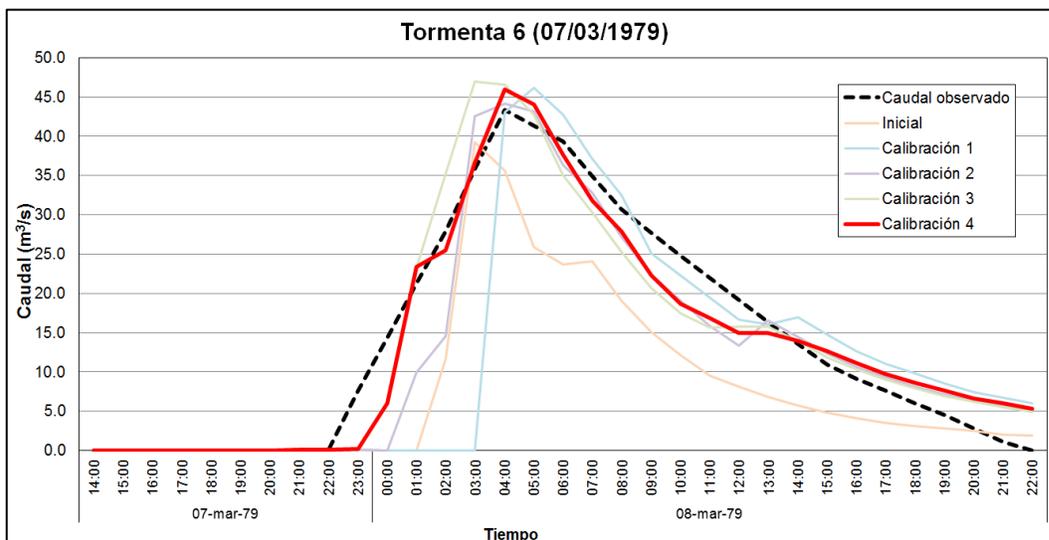


Figura 1.20 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 6.
Fuente: Elaboración propia

1.3.7 Tormenta 7

Como punto de partida para la simulación, se han considerado los parámetros que se muestran en el capítulo 4.5.3 para la condición de humedad antecedente normal (AMC I y II). Posteriormente se ha ido ajustando los parámetros del modelo hasta obtener un mejor ajuste en los resultados. La Tabla 1.46 muestra el promedio los parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 1.46: Resumen de Parámetros, Modelamiento IBER, Tormenta 7

Simulación	Su	Sat	K	nt	nc
Inicial	550	0.35	7.67	0.48	0.03
Calibración 1	600	0.35	4.00	0.48	0.03
Calibración 2	600	0.35	1.50	0.38	0.04
Calibración 3	900	0.40	1.00	0.38	0.05
Calibración 4	900	0.40	0.97	0.38	0.04

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 1.47 muestra el resumen de los resultados obtenidos durante la calibración del modelo.

Tabla 1.47: Resumen de Resultados, Modelamiento IBER, Tormenta 7

Simulación	Qm	Qc	%Δ	Vm	Vc	%Δ	NSE
Inicial	105.17	21.1	-79.9%	1.705	0.373	-78.1%	-0.04
Calibración 1	105.17	22.2	-78.9%	1.705	0.384	-77.5%	-0.02
Calibración 2	105.17	47.7	-54.6%	1.705	0.870	-48.9%	0.47
Calibración 3	105.17	77.4	-26.4%	1.705	1.456	-14.6%	0.90
Calibración 4	105.17	105.7	0.5%	1.705	1.875	10.0%	0.98

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que tanto el caudal pico y el volumen, tienen una variación menor al 10%, y un factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.98, que es considerado como un ajuste excelente.

La Figura 1.21 muestra los hidrogramas obtenidos en cada calibración de la simulación, y además está comparado con los datos observados en campo.

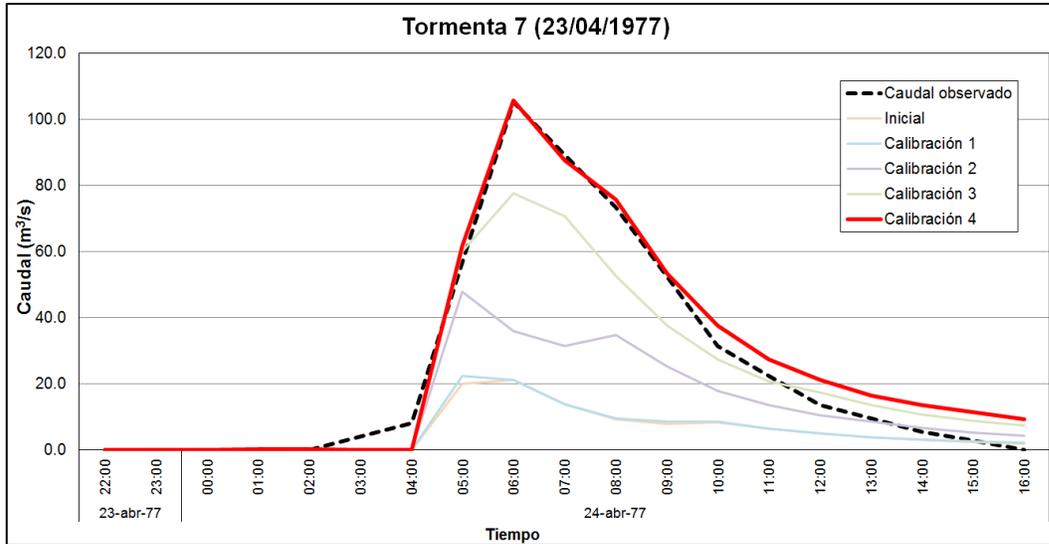


Figura 1.21 Resultados Modelamiento IBER, Tormenta 7.
Fuente: Elaboración propia

Los Tablas 1.48 y 1.49 resumen, respectivamente, los parámetros calibrados y los resultados de su simulación. El Anexo IV muestra los mapas de parámetros calibrados de ingreso al modelo hidrológico IBER para las siete tormentas analizadas.

Tabla 1.48: Resumen Parámetros Calibrados, Modelamiento IBER

Tormenta	Su	Sat	K	nt	nc
Tormenta 1	1000	0.40	0.97	0.35	0.140
Tormenta 2	1100	0.75	0.41	0.60	0.400
Tormenta 3	1100	0.40	0.80	0.38	0.100
Tormenta 4	550	0.80	7.67	0.15	0.025
Tormenta 5	900	0.35	0.25	0.38	0.040
Tormenta 6	1200	0.80	0.75	0.60	0.050
Tormenta 7	900	0.40	0.97	0.38	0.040

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los parámetros calibrados concuerdan con el criterio de la humedad antecedente (AMC); a excepción de la Tormenta 4, la cual es única que ocurre a finales del mes abril, en este momento del año los cultivos han pasado la fase de cosecha, produciéndose una mejor concentración de vegetación, lo que produciría velocidades de flujo en ladera mayores. Por tal motivo, en la Tormenta 4, el coeficiente de Manning es menor que en las demás tormentas.

Tabla 1.49: Resumen Resultados Calibrados, Modelamiento IBER

Tormenta	Caudal			Volumen			NSE
	Observado	Simulado	%Δ	Observado	Simulado	%Δ	
Tormenta 1	46.7	48.9	4.7%	1.601	1.620	1.2%	0.87
Tormenta 2	260.8	274.2	5.1%	10.249	8.837	-13.8%	0.93
Tormenta 3	21.2	21.7	2.4%	0.677	0.649	-4.1%	0.92
Tormenta 4	253.2	288.8	14.1%	2.885	2.870	-0.5%	0.96
Tormenta 5	30	29.2	-2.7%	1.22	1.156	-5.2%	0.98
Tormenta 6	43.3	46.0	6.2%	1.664	1.616	-2.9%	0.94
Tormenta 7	105.2	105.7	0.5%	1.705	1.875	10.0%	0.98
		Promedio	4.3%		Promedio	-2.2%	0.94

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que todas las tormentas analizadas presentan un ajuste excelente, y presentan una bondad de ajuste ligeramente mejor que el modelo HMS.

En el Anexo V se muestran los resultados de alturas de agua y velocidades máximas en toda el área la subcuenca Barrios, para cada uno de las simulaciones calibradas de cada tormenta.