

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ICA
CON FINES DE PREVENCIÓN DE INUNDACIONES
EN LA CIUDAD DE ICA”**

Presentado por:

HUGO GUIDO TARAZONA ROLDÁN

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÍCOLA

**Lima – Perú
2016**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO
ICA CON FINES DE PREVENCIÓN DE INUNDACIONES EN LA
CIUDAD DE ICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRICOLA

Presentado por:

BACH. HUGO GUIDO TARAZONA ROLDÁN

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

DR. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
PRESIDENTE

MG.SC. TORIBIO SEBASTIAN SANTAYANA VELA
MIEMBRO

ING. HERMES ALBERTO VALDIVIA ASPILCUETA
MIEMBRO

MG.SC GONZALO RAMCES FANO MIRANDA
ASESOR

LIMA – PERU

2016

DEDICATORIA

«Dedico esta tesis de manera muy especial a mi querida madre Elizabeth Roldan Vigo quien es el motor que impulsó mi inspiración y convicción para realizar esta investigación, tu apoyo emocional y amor incondicional fue la clave de que pueda seguir y terminar lo que inicié es por eso que te lo dedico a ti y sólo a ti».

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a las personas que hicieron posible la realización de esta investigación. Primeramente quiero agradecer a Dios quien vive en el espíritu de cada uno de nosotros y hace posible que la bondad de las personas prevalezca por sobre todas las cosas.

A mis padres Elizabeth Roldan Vigo y Hugo Tarazona Espinoza, quienes son los cimientos y la fortaleza que me brindan su apoyo constante para que pueda seguir avanzando en mi vida profesional. Agradezco también a mi abuelita Juana Vigo Zegarra quien desde el cielo me protege y bendice mi camino.

También quiero agradecer a mi patrocinador el Ingeniero Gonzalo Fano Miranda quien siempre estuvo disponible a ayudarme y brindarme sus conocimientos. Y esta Tesis no se pudo realizar sin el apoyo del personal del SENAMHI de la Dirección Regional de Ica, quienes me brindaron su calidez y amabilidad para brindarme la información necesaria para la elaboración de la presente investigación.

RESUMEN

En la presente investigación se ha estudiado la incidencia de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas en la generación de caudales máximos, para la cuenca del río Ica, con la finalidad de identificar las zonas vulnerables a inundaciones en el valle del río Ica. Se analizó y pronosticó la información pluviométrica, mediante herramientas estadísticas para distintos periodos de retorno (10, 25, 50, 100 años). Esta información pluviométrica obtenida fue procesada de modo que se obtuvieron precipitaciones instantáneas para una tormenta de seis horas. Luego con dicha información se aplicó un modelo hidrológico, y mediante un proceso sistematizado de precipitación-escorrentía se obtuvieron los caudales máximos. Con estos caudales se realizó la simulación de la escorrentía superficial para el valle del río Ica mediante la aplicación de un modelo hidráulico para los periodos de retorno mencionados. De esta manera, con la ayuda de sistemas de información geográfica (SIG), información hidrográfica y topográfica, se determinaron las zonas vulnerables a inundaciones en el valle del río Ica.

Palabras Claves: Periodo de retorno, modelo hidrológico, precipitación-escorrentía escorrentía superficial, modelo hidráulico, SIG.

ABSTRACT

This investigation has studied the influence of maximum annual precipitation in 24 hours into the generation of maximum flows on basin Ica river in order to identify areas vulnerable to floods on Ica river valley. This rainfall has been analyzed and predicted for different return periods (10, 25, 50, 100 years) with statistics tools. This new information has been processed so that the result was instantaneous rainfall for a six hours storm.

Then the Hydrologic Model has been applied through a systematic process precipitation-runoff, this way maximum flows have been calculated. With this data, run-off has been simulated, by the application of a Hydraulic Model on Ica river valley for the return periods mentioned before. This way, with geographic information system (GIS), topographic and hydrographic GIS datasets for basin Ica river, areas vulnerable to floods have been determined.

Keywords: Return Periods, Hydrologic Model, precipitation-runoff, Surface run-off Hydraulic Model, GIS.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 HIDROLOGÍA.....	5
2.2 EL CICLO HIDROLÓGICO	5
2.3 CUENCA HIDROGRÁFICA	6
2.4 EL CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA EN ESTUDIO	7
2.5 PRECIPITACIÓN	10
2.6 INFILTRACIÓN	10
2.6.1 MÉTODO SCS PARA ABSTRACCIONES	10
2.7 NÚMERO DE CURVA	11
2.8 TORMENTA.....	11
2.9 PLUVIOMETRÍA	12
2.10 PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE UN ÁREA.....	12
2.11 DIAGRAMA DE CAJAS.....	14
2.12 ANÁLISIS DE DOBLE MASA.....	15
2.13 PRUEBAS DE T DE STUDENT Y F DE FISHER	15
2.14 ESTADISTICA HIDROLÓGICA.....	16
2.15 ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	17
2.16 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD EN LA HIDROLOGÍA.....	18
2.17 PRUEBAS DE AJUSTE	19
2.18 HISTOGRAMAS	20
2.19 TORMENTA DE DISEÑO	21
2.20 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA.....	21
2.21 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	23
2.22 ESTACIÓN HIDROMÉTRICA.....	23

2.23	HIDROGRAMA DE CAUDAL	23
2.23.1	HIDROGRAMA ANUAL	25
2.24	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	26
2.25	MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	26
2.26	MODELO HIDRAULICO HEC-RAS	30
2.27	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	31
2.28	EXTENSIÓN HEC-GEORAS.....	32
2.29	EXTENSIÓN HEC-GEOHMS.....	32
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1	MATERIALES.....	33
3.1.1	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA	33
3.1.2	INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	33
3.1.3	EQUIPOS Y SOFTWARES	37
3.2	UBICACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO.....	38
3.2.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	38
3.2.2	LÍMITES HIDROGRÁFICOS.....	38
3.2.3	UBICACIÓN POLÍTICA	38
3.3	METODOLOGÍA.....	41
3.3.1	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA.....	41
3.3.2	ANÁLISIS ESTADISTICO DE SALTOS Y TENDENCIAS	42
3.3.3	COMPLETACIÓN DE DATOS FALTANTES	43
3.3.4	DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA	45
3.3.5	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA EN ESTUDIO ..	47
3.3.6	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	50
3.3.7	POLÍGONOS DE THIESSEN	51
3.3.8	ANÁLISIS DE FRECUENCIA	52
3.3.9	PRUEBA DE AJUSTE.....	54
3.3.10	ELABORACIÓN DE LAS CURVAS I-D-F.....	55
3.3.11	HISTOGRAMA DE PRECIPITACIONES INSTANTANEAS.....	60
3.3.12	CÁLCULO DE LAS ABSTRACCIONES	61

3.3.13 APLICACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO HEC-HMS	67
3.3.14 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	70
3.3.15 APLICACIÓN DE LA EXTENSION HEC-GEORAS.....	73
3.3.16 APLICACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRAULICO HEC-RAS.....	74
3.3.17 CÁLCULO DE LAS AREAS DE INUNDACIÓN	78
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1 INSUMOS PARA EL MODELO HIDROLOGICO	81
4.1.1 PARÁMETROS GEOMORFOLOGICOS DE LA CUENCA	81
4.1.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	82
4.1.3 POLIGONOS DE THIESSEN	82
4.1.4 NUMERO DE CURVA	83
4.2 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA	84
4.2.1 ANÁLISIS DE DIAGRAMAS DE CAJAS	84
4.2.2 ANÁLISIS DE DOBLE MASA	86
4.3 PRECIPITACIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA.....	90
4.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÓLOGICO	97
4.4.1 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 10 AÑOS	98
4.4.2 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 25 AÑOS	98
4.4.3 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 50 AÑOS	99
4.4.4 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS	100
4.5 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO	100
4.5.1 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 10 AÑOS	101
4.5.2 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 25 AÑOS	102
4.5.3 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 50 AÑOS	103
4.5.4 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS	104
4.6 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO	105
4.6.1 MAPAS DE INUNDACIÓN	105
4.6.2 SECCIONES TRANSVERSALES	109
4.6.3 PROFUNDIDAD DE LA LÁMINA DE INUNDACIÓN	111
4.6.4 ÁREAS DE INUNDACIÓN.....	114

V. CONCLUSIONES	117
VI. RECOMENDACIONES	118
VII. BIBLIOGRAFÍA	119

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Periodos del Ciclo Hidrológico del río Ica.....	9
Cuadro 2: Límites del Número de Curva	11
Cuadro 3: Distribuciones de probabilidad usados en la hidrología	18
Cuadro 4: Ecuaciones para el cálculo del Tiempo de Concentración.....	24
Cuadro 5: Estaciones Hidrometeorológicas	34
Cuadro 6: Información pluviométrica máximas anuales	35
Cuadro 7: Información hidrométrica máximas anuales	36
Cuadro 8: Información pluviométrica máximas anuales en 24 horas.....	44
Cuadro 9: Rango de Pendientes.....	48
Cuadro 10: Cálculo del tiempo de concentración para las subcuencas.....	50
Cuadro 11: Precipitaciones máximas en 24 horas (Método de Gumbel).....	53
Cuadro 12: Ajuste de los datos hidrometeorológicos a la Distribución Gumbel	55
Cuadro 13: Coeficientes para las precipitaciones máximas	56
Cuadro 14: Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración	57
Cuadro 15: Intensidad (mm/h) para diferentes tiempos de duración.....	57
Cuadro 16: Resultados de la primera regresión.....	58
Cuadro 17: Cuadro de ecuaciones de Curvas I-D-F	59
Cuadro 18: Número de Curva para complejos hidrológicos suelo-cubierta	64
Cuadro 19: Caudales ingresados para la calibración del modelo	70
Cuadro 20: Resumen de la calibración de las abstracciones iniciales	71
Cuadro 21: Resumen del error porcentual del caudal pico	72
Cuadro 22: Datos de Flujo.....	75
Cuadro 23: Áreas de desborde del río en el valle de Ica.....	79
Cuadro 24: Parámetros geomorfológicos de las subcuencas.....	81
Cuadro 25: Tiempos de concentración de las subcuencas	82
Cuadro 26: Áreas de los polígonos Thiessen en cada subcuenca	83

Cuadro 27: Numero curva para cada subcuenca	84
Cuadro 28: Análisis estadístico de Saltos y Tendencias.....	89
Cuadro 29: Calibración del HEC-HMS para un TR=10años.....	98
Cuadro 30: Calibración del HEC-HMS para un TR=25 años.....	99
Cuadro 31: Calibración del HEC-HMS para un TR=50años.....	99
Cuadro 32: Calibración del HEC-HMS para un TR=100años.....	100
Cuadro 33: Áreas de Inundación para el valle del río Ica	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El Ciclo hidrológico	6
Figura 2: Cuenca hidrográfica	7
Figura 3: Periodos del Ciclo Hidrológico del río Ica.....	9
Figura 4: Método del SCS para el cálculo de abstracciones	11
Figura 5: Métodos para estimar la precipitación areal.....	14
Figura 6: Histograma de precipitación.....	20
Figura 7: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	22
Figura 8: Componentes de un Hidrograma de Caudales durante una Tormenta.....	25
Figura 9: Esquema del Sistema hidrológico global	28
Figura 10: Ubicación geográfica de la cuenca en estudio	40
Figura 11: Cuenca delimitada en ArcGIS	47
Figura 12: Mapa de pendientes de la cuenca.....	49
Figura 13: Polígonos Thiessen de la cuenca en estudio.....	51
Figura 14: Caudales para cada Periodo de Retorno	54
Figura 15: Gráfica de la Regresión Potencial T vs. D	58
Figura 16: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia	59
Figura 17: Histogramas de precipitación instantánea	60
Figura 18: Mapa de Uso de Suelo de la Cuenca.....	62
Figura 19: Mapa de Tipo de Suelo de la Cuenca.....	63
Figura 20: Mapa de Clasificación de los Número de Curva	65
Figura 21: Esquema de Funcionamiento del Modelo Hidrológico.....	68
Figura 22: Procedimiento de calibración	71
Figura 23: Creación del Proyecto	74
Figura 24: Identificación de la primera sección de desborde.....	76
Figura 25: Identificación de la segunda sección de desborde	77
Figura 26: Identificación de la tercera sección de desborde	77
Figura 27: Ubicación de las secciones en el valle de Ica	80
Figura 28: Diagrama de Cajas: Challaca, San Camilo y Tambo	85
Figura 29: Diagrama de Cajas: Chocorvos, Cusicancha y Córdova.....	86
Figura 30: Curva Doble Masa; San Camilo-Córdova.....	87
Figura 31: Curva Doble Masa: Chocorvos-Challaca.....	88
Figura 32: Curva Doble Masa: Tambo-Cusicancha	89

Figura 33: Curvas IDF para la Estación Challaca	90
Figura 34: Histogramas de precipitación para la Estación Challaca	91
Figura 35: Curvas IDF para la Estación Chocorvos	91
Figura 36: Histogramas de precipitación para la Estación Chocorvos	92
Figura 37: Curvas IDF para la Estación Córdova.....	93
Figura 38: Histogramas de precipitación para la Estación Córdova.....	93
Figura 39: Curvas IDF para la Estación Cusicancha	94
Figura 40: Histogramas de precipitación para la Estación Cusicancha	94
Figura 41: Curvas IDF para la Estación San Camilo	95
Figura 42: Histogramas de precipitación para la Estación San Camilo	96
Figura 43: Curvas IDF para la Estación Tambo	96
Figura 44: Histogramas de precipitación para la Estación Tambo	97
Figura 45: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=10 años.....	101
Figura 46: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=25 años.....	102
Figura 47: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=50 años.....	103
Figura 48: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=100 años.....	104
Figura 49: Mapa de Inundación en la sección 13+500 km. TR= 100 años.....	106
Figura 50: Mapa de Inundación en la sección 22.5 km. TR= 100 años.....	107
Figura 51: Mapa de Inundación en la sección 28+00 km. TR= 100 años.....	108
Figura 52: Sección Transversal del río Ica en la sección 13+500 km.	109
Figura 53: Sección Transversal del río Ica en la sección 22+500 km.	110
Figura 54: Sección Transversal del río Ica en la sección 28+00 km	111
Figura 55: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 13+500 km.	112
Figura 56: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 22+500 km.	113
Figura 57: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 28+00 km.	114

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Regresiones Potenciales	124
Anexo 2: Precipitación Instantánea (mm)	128
Anexo 3: Cálculo del Numero de Curva	131

I. INTRODUCCIÓN

El impacto fuertemente negativo de las lluvias extraordinarias sobre la vida, la salud, el bienestar y la economía de la población es innegable. El conocimiento científico de las circunstancias vinculadas a estas enormes anomalías climáticas es muy importante. El pronóstico hidrológico de las descargas es sólo un aspecto del problema, a la ingeniería le interesa conocer la probabilidad de ocurrencia de eventos de determinada magnitud para su consideración en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras de ingeniería y para la ocupación territorial (Rocha, 2007).

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos del mundo real, los modelos de simulación de diferentes tipos proveen medios de extrapolación cuantitativa o predicción, que permiten simular estados de un sistema hidrológico real cuando no hay datos disponibles en el espacio o en el tiempo y conocer el impacto de futuros cambios hidrológicos, ayudando de este modo a la conservación del medio ambiente.

Un modelo hidrológico es una representación simplificada del sistema real cuyo objetivo es estudiar la operación del mismo y predecir su salida. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo. Abarcan una gran diversidad de problemas y funcionalidades tales como predicción de crecidas, riesgos hidrológicos, desbordes de ríos, inundaciones, etc.

Para solucionar estos eventos catastróficos se implementan por lo general un «sistema de alerta temprana», el cual consiste en un conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por un tipo de peligro se

preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños, para ello se realizan una serie de estudios hidrológicos, hidráulicos, etc.

La presente investigación se enfoca en la aplicación de la hidrología, hidráulica y los sistemas de información geográfica (SIG), de modo que se realice un modelo, de la cuenca hidrográfica del río Ica, con la finalidad de conocer la ocurrencia de eventos de máximos y la identificación de las zonas vulnerables, para la prevención de desbordes del río Ica.

1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El valle del río Ica registra a lo largo de su historia una considerable cantidad de inundaciones causando daños catastróficos a la población. La primera gran inundación se registra el 17 de marzo de 1908, cuando la ciudad no superaba los 8.000 habitantes. Después ocurrieron otras grandes inundaciones en 1925, 1929, 1932, 1963 y en 1998. Esta última, la más catastrófica de su historia por el saldo de 120.000 damnificados y pérdidas de millones de dólares en infraestructura.

Las últimas inundaciones se registraron el 22 de Diciembre de 1997, con caudales variables entre 20 y 200 m³/s .El 29 de enero de 1998, a las 21 horas, se registró en la estación La Achirana, una descarga del orden de 450 m³/s, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), magnitud que superó todos los registros. Esto ocasionó el colapso de diques y terraplenes cercanos a la bocatoma La Achirana.

Debido a estos eventos presentados en la ciudad de Ica, el SENAMHI decide implantar un Sistema de Alerta Temprana (SAT), mediante el cual se pueda observar, transmitir analizar y comparar datos con el fin de realizar las alertas oportunas.

La presente investigación, como una medida de prevención frente a estos eventos, propone la aplicación de una metodología que ayude a la identificación de las zonas vulnerables a inundaciones en el valle del río Ica.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las áreas de inundación, para distintos periodos de retorno, en el valle del río Ica.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular las precipitaciones máximas instantáneas de las estaciones pluviométricas involucradas en el área de estudio.

- Determinar los caudales máximos para distintos periodos de retorno mediante el HEC-HMS.

- Identificar las zonas que presentan riesgo de desborde del río en el valle de Ica con el uso del HEC-RAS.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

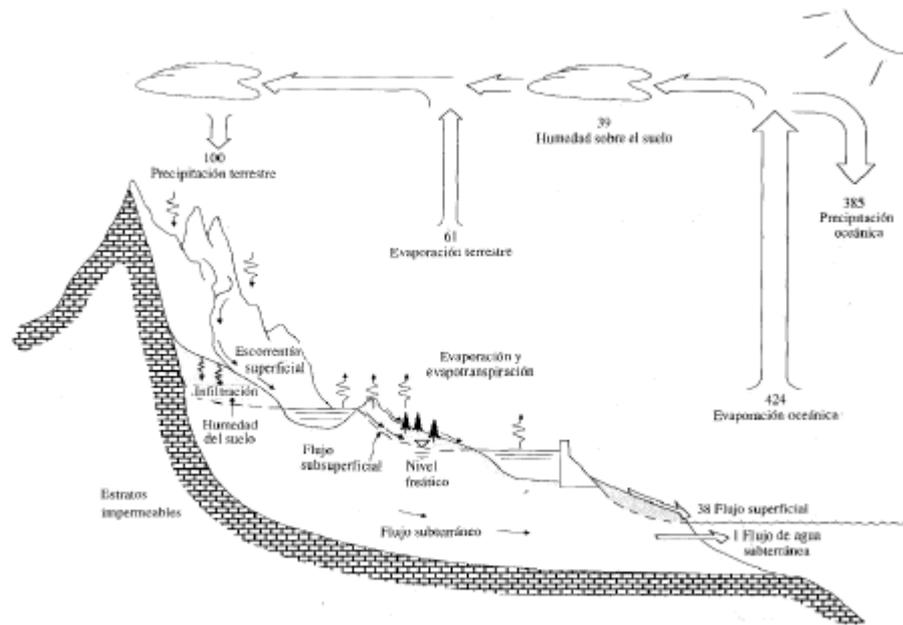
2.1 HIDROLOGÍA

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente (Chow et al, 1994).

2.2 EL CICLO HIDROLÓGICO

Las ciencias hídricas están relacionadas con las aguas de la tierra: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos. Puede considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas. En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico (Ver Figura 1). El cuál es el foco central de la hidrología. No tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua que precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como escorrentía superficial. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora y por tal dándose una retroalimentación del ciclo (Chow et al, 1994).

Figura 1: El Ciclo hidrológico



Fuente: Chow et al, 1994

2.3 CUENCA HIDROGRÁFICA

Es un espacio geográfico cuyos aportes de agua son alimentados exclusivamente por precipitaciones que caen en el interior y el excedente de agua o en materia sólida transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario (Llamas, 1993).

Constituye una unidad hidrológica descrita como una unidad físico-biológica y también como unidad socio-política para la planificación y ordenamiento de los recursos naturales.

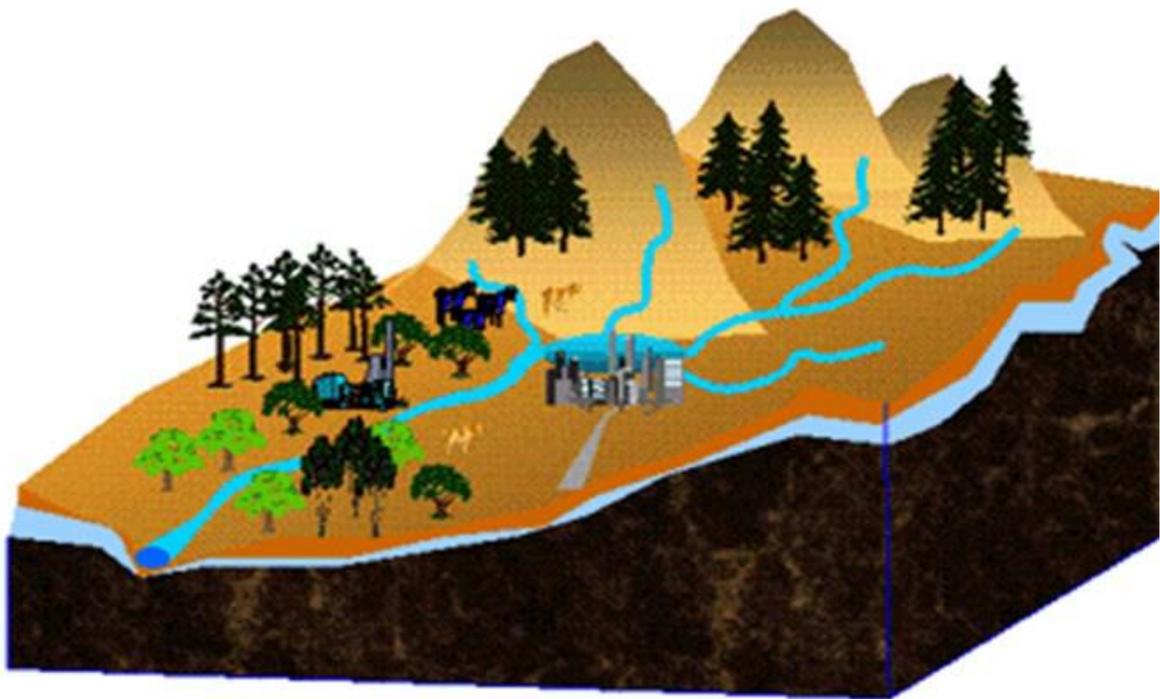
En el interior de la cuenca se pueden delimitar subcuencas o microcuencas. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios. Las cuencas pueden subdividirse en tres zonas de funcionamiento hídrico principales:

- Zona de cabecera
- Zona de captación-transporte
- Zona de emisión

Para un mejor concepto de definición de una cuenca se la clasifica en función del tipo de aguas en circulación. Así se considera una cuenca hidrográfica como una unidad morfológica donde sólo se consideran a las aguas superficiales y cuenca hidrológica como un concepto más integral, donde se incluyen las aguas superficiales y subterráneas.

Cada cuenca hidrográfica posee características propias de sí misma, entre las más trascendentes se puede mencionar las siguientes:

Figura 2: Cuenca hidrográfica



FUENTE: Ordoñez, 2011

2.4 EL CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA EN ESTUDIO

Las precipitaciones pluviales que se producen sobre las laderas del flanco occidental al de la cordillera de los Andes, procedentes del ascenso de las nubes desde el Océano Atlántico hacia la cordillera Occidental, que son de carácter netamente convectivo y concentradas en los meses de verano (diciembre a abril), en su inicio son depositadas en su mayor porcentaje en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial, denominándose a este primer proceso como retención

superficial (gastos de intercepción, de almacenamiento superficial y evaporación durante la precipitación).

De este modo, conjuntamente que el proceso de infiltración, se alimentan o abastecen los acuíferos, los que se sitúan en las altiplanicies de la región. Estos acuíferos en época de estiaje se “agotan” gradualmente aportando directamente a la escorrentía superficial, haciendo factible la presencia de un significativo caudal base de estiaje. Contribuye de manera importante a la formación de este “caudal base” los deshielos de los nevados permanentes situados en la parte superior.

Otro porcentaje o excedente de precipitación llega a drenar por la red hidrográfica existente en la cuenca del río Ica, que junto al aporte subterráneo conforma el caudal total de salida del sistema o cuenca.

Consiguientemente este caudal total es el resultado de restar a la precipitación total de los gastos de realimentación de la cuenca (fracción de la precipitación que no contribuye a la formación o generación de escorrentía fluvial o de agua del subsuelo) o gastos de evapotranspiración, infiltración, menos gasto subterráneo).

Las características hidrológicas fundamentales del ciclo hidrológico de la cuenca del río Ica están influenciadas principalmente por los rasgos climatológicos de la zona (que son medidos por la red de estaciones hidrometeorológicas situadas en la cuenca), aspectos fisiográficos, geológicos y vegetación del ámbito (Peña et al, 2010).

El régimen natural del río se divide en tres periodos que conforman el ciclo hidrológico, los cuales se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Periodos del Ciclo Hidrológico del río Ica

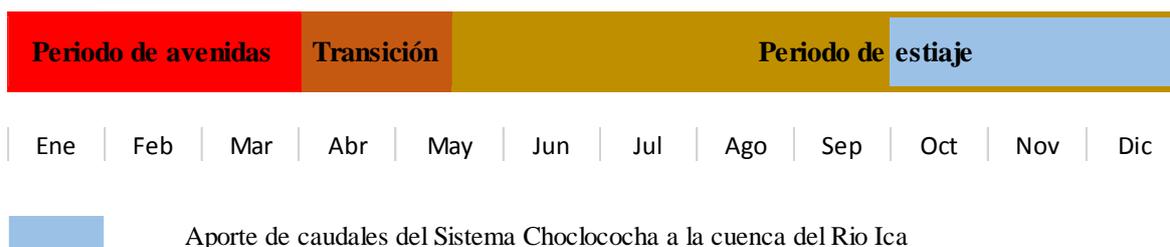
Descripción	Periodo de avenidas		Periodo de transicion		Periodo de estiaje	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Fecha más temprana	29 Nov.	1 Mar.		27 Mar.		29 Nov.
Fecha más tardía	3 Feb.	5 May.		14 Jun.		3 Feb.
Rango de variación	66 días	65 días		79 días		66 días
Término medio	1 Ene.	31 Mar.		15 May.		1 Ene.
Duración media	3 meses		1.5 meses		7.5 meses	
Porcentaje del volúmen	83%		13%		4%	
Promedio	31.36 m ³ /s		10.12 m ³ /s		0.63 m ³ /s	

FUENTE: ONERN, 1971

En este cuadro se observa que el río Ica descarga el 83 por ciento de su volumen anual durante el periodo de avenidas y sólo el 4 por ciento durante el periodo de estiaje. Asimismo, el periodo de transición entre el fin de avenidas y principio del estiaje es de pequeña duración. Con el fin de reducir el periodo de estiaje, que dura más de la mitad del año, se emplean las descargas reguladas del Sistema Choclococha, generalmente los tres últimos meses del año, con un caudal promedio de 10 m³/s; con lo cual el periodo de estiaje se reduce a cuatro meses y medio. Ver figura 3.

Debido a que la presente investigación trata con eventos extremos, los cuales se presentan en épocas de máximas avenidas, el Sistema Choclococha no será considerado para el estudio.

Figura 3: Periodos del Ciclo Hidrológico del río Ica



2.5 PRECIPITACIÓN

Se conoce como precipitación a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre y proviene de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la Hidrología, y junto a la evaporación constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico.

2.5.1 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

El exceso de precipitación o precipitación efectiva, es aquella que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca (Chow et al, 1994).

2.6 INFILTRACIÓN

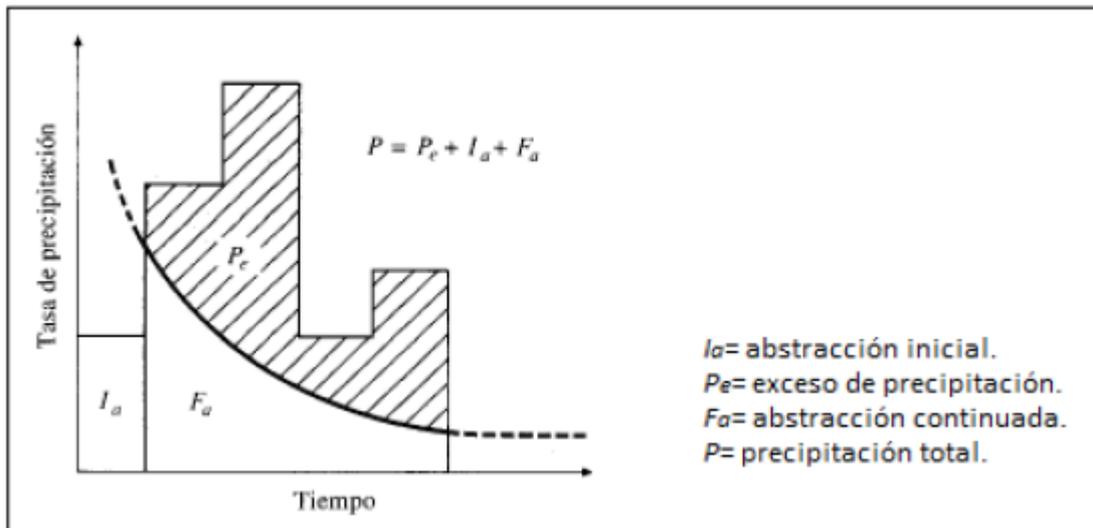
Es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Existen diversos factores que influyen en la tasa de infiltración, tales como la condición del suelo y la cubierta vegetal, propiedades del suelo como la conductividad hidráulica o la porosidad, el contenido de humedad, entre otros (Chow et al, 1994).

Existen diversos métodos que permiten calcular la infiltración, entre los más conocidos está el método del SCS (Servicio de Conservación de Suelos).

2.6.1 MÉTODO SCS PARA ABSTRACCIONES

El Servicio de Conservación de Suelos desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S , que es la máxima cantidad de lluvia que la cuenca puede absorber. Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es la precipitación menos la abstracción inicial (Chow et al, 1994).

Figura 4: Método del SCS para el cálculo de abstracciones



FUENTE: Chow *et al*, 1994

2.7 NÚMERO DE CURVA

Es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, las que varían entre cero y cien; donde un área con CN igual a cero no tiene escurrimiento y otra con CN igual a cien es impermeable y toda la precipitación genera escurrimiento (Soil Conservation Service, 1972).

Cuadro 2: Límites del Número de Curva

CN	SUPERFICIE
0	Sin escurrimiento
100	Impermeable

FUENTE: Soil Conservation Service, 1972

2.8 TORMENTA

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. De acuerdo a esta definición una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días; pueden abarcar extensiones de terrenos muy variables, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones.

2.9 PLUVIOMETRÍA

Es la ciencia que trata sobre la determinación de la cantidad de precipitación que llega a la superficie terrestre, para lo cual se mide con una regla graduada en milímetros, la altura que alcanzaría en el suelo la lámina de agua si no se filtrara o escurriera. En América Latina la precipitación es medida en milímetros, mientras que en los Estados Unidos la precipitación es medida en pulgadas (Chow et al, 1994).

Se han desarrollado gran variedad de instrumentos para obtener información de la precipitación. La información obtenida puede ser de diversa índole; se puede mencionar: la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el tiempo de inicio y de término de la precipitación, y la cantidad e intensidad de la precipitación, siendo esta última la que más interesa para la determinación de las tormentas de diseño.

2.10 PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE UN ÁREA

Para evaluar la cantidad promedio de precipitación sobre un área en un intervalo de tiempo determinado es necesario basarse en los valores puntuales registrados en cada medidor que conforma la red. Pero como la contribución de cada instrumento al total de la tormenta es desconocida, han surgido varios métodos que intentan darnos una aproximación de la distribución de la precipitación dentro del área en consideración, entre estos métodos se tiene (Chow et al, 1994).

2.10.1 MÉTODO DE LA MEDIA ARITMÉTICA

Es una forma sencilla para determinar la lluvia promedio sobre un área. Consiste en hallar la media aritmética de las cantidades conocidas para todos los puntos en el área (Ver Figura 6). Este método proporciona buenos resultados, si la distribución de tales puntos sobre el área es uniforme y la variación en las cantidades individuales de los medidores no es muy grande.

2.10.2 MÉTODO DE THIESSEN

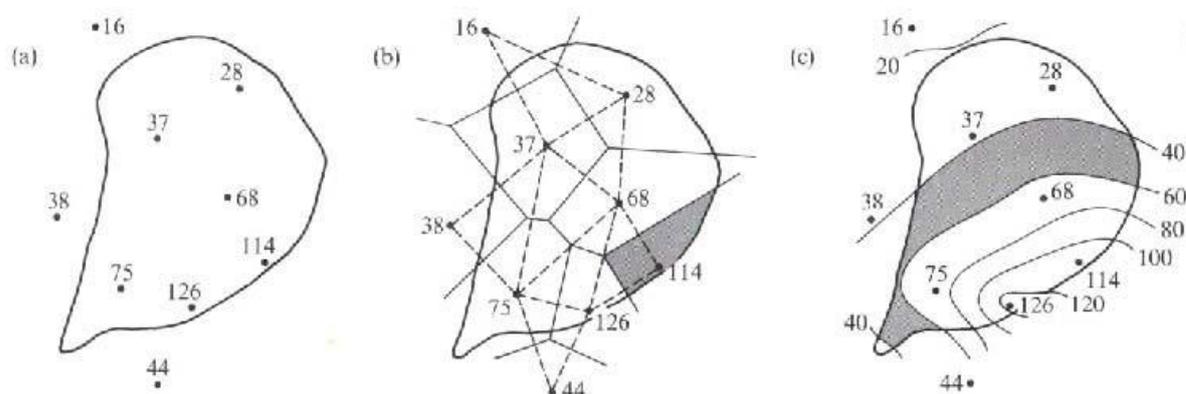
Se emplea cuando la distribución de los pluviómetros no es uniforme dentro del área en consideración. Para su cálculo se define la zona de influencia de cada estación mediante el trazo de líneas entre estaciones cercanas, éstas líneas se bisecan con perpendiculares y se asume que toda el área encerrada dentro de los límites formados por la intersección de estas perpendiculares en torno a la estación ha tenido una precipitación de la misma cantidad que la de la estación (Ver Figura 4). A veces es necesario hacer una pequeña variación a esta técnica para corregir posibles efectos orográficos, y en lugar de trazar perpendiculares al punto medio de la distancia entre las estaciones se dibujan líneas que unen las estaciones desde los puntos de altitud media.

Calculando el área encerrada por cada estación y relacionándola con el área total, se sacan pesos relativos para cada pluviómetro y posteriormente el valor de la precipitación promedio se obtiene a partir de un promedio ponderado.

2.10.3 MÉTODO DE LAS ISOYETAS

Las isoyetas son contornos de igual altura de precipitación (Ver Figura N° 5), que se calculan a partir de interpolación entre pluviómetros adyacentes. Las áreas entre isoyetas sucesivas son medidas y se multiplica por el promedio de precipitación entre la isoyetas adyacentes, el promedio total para el área es entonces la sumatoria de éste producto entre el área total considerada. Este método tiene la ventaja que las isoyetas pueden ser trazadas para tener en cuenta efectos locales, y por ello es posiblemente el que mejor nos aproxima a la verdadera precipitación promedio del área.

Figura 5: Métodos para estimar la precipitación areal



Donde:

- (a) Método de la media aritmética.
- (b) Método de los polígonos de Thiessen.
- (c) Método de las isoyetas.

FUENTE: Chow *et al*, 1994

2.11 DIAGRAMA DE CAJAS

El diagrama de cajas o boxplot es un método para representar la distribución de una muestra univariada unimodal. Sintetiza información sobre la posición, dispersión y forma de la distribución a través de cinco estadísticos descriptivos: la mediana, el primer y tercer cuartil, la mínima y máxima observación regular. El boxplot provee además un criterio para clasificar dentro de las observaciones a aquellas que sean potenciales datos atípicos.

Es una de las herramientas más difundidas en el análisis exploratorio de datos. Es particularmente útil para comparar distribuciones en distintas muestras sin recurrir a supuestos sobre las distribuciones involucradas.

Dado un conjunto de datos univariado y unimodal, $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, el boxplot se construye dibujando una línea a la altura de la mediana, Q_2 , una caja limitada por el primer, Q_1 , y tercer, Q_3 , cuartil y bigotes, desde los bordes de la caja hasta las observaciones más alejadas (de la mediana) que no superen los límites del intervalo:

$$[Q_1 - 1.5 * RIC, Q_3 + 1.5 * RIC]$$

Si todos los datos cayeran dentro del intervalo, es decir que fueran todos regulares, los bigotes corresponderán al máximo y mínimo de la muestra. Aquellos datos que excedieran el intervalo, se marcarán y clasificarán como potenciales datos atípicos.

2.12 ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Un análisis de doble masa permite evaluar la consistencia de una serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en una estación "X" en base a los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "Y", situadas en una zona climática similar y cuya homogeneidad haya sido verificada. Este sistema de homogeneización de series, se utiliza cuando se desea verificar la ocurrencia de un cambio relativo en la variable observada medida o registrada en una estación meteorológica.

2.13 PRUEBAS DE T DE STUDENT Y F DE FISHER

El análisis estadístico de presencia de Saltos y Tendencias de la información pluviométrica se realiza mediante los estadísticos T de Student para la comprobación de variaciones en la media, y F de Fischer en la evaluación de variancias. Estos test prueban si dos series de datos corresponden a una misma población.

Los valores estadísticos de T y F son comparados con los valores críticos esperados obtenidos de las Tablas estadísticas con una probabilidad del 95% (o un grado de significancia de = 0.05) y con N_1+N_2-2 grados de libertad para la prueba T Student y con N_1-1, N_2-1 grados de libertad para la prueba F. Si $|T| < T_c$ y $F < F_c$, entonces se cumple la hipótesis nula (no existen cambios significativos tanto en la media como en la varianza respectivamente), aun presentando quiebres en la curva de Doble Masa; de lo contrario se cumple la hipótesis alterna (lo contrario a la hipótesis nula).

2.14 ESTADISTICA HIDROLÓGICA

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, o determinística, y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se conoce con el nombre de proceso estocástico.

En el modelamiento hidrológico de una cuenca, numerosos fenómenos extremos de lluvias no pueden pronosticarse en base a una información determinística, con la suficiente destreza y tiempo de anticipación, para poder tomar las decisiones adecuadas a su ocurrencia. Los parámetros fundamentales que se requieren conocer para poder controlar los daños ocasionados por estos fenómenos son los caudales y precipitaciones máximas en años futuros.

El caudal pico es el caudal máximo que se registra durante el aumento inusual del caudal de agua de un cauce natural o artificial, superando ampliamente los valores medios normales. La predicción de la magnitud de la creciente, ha sido siempre motivo de controversia debido a que los métodos que analizan caudales pico, deben realizar una proyección hacia el futuro, aplicando teoría de probabilidades, con alto grado de incertidumbre.

Si se puede suponer que las ocurrencias son temporalmente independientes, esto es, el tiempo y la magnitud de su evento no tiene relación con los eventos anteriores, entonces se puede usar el análisis de frecuencias para describir la probabilidad de cualquier evento o de una combinación de ellos, durante el intervalo de tiempo necesario para tomar una decisión. Los fenómenos hidrológicos que se describen en general mediante el análisis de frecuencias son las precipitaciones y los caudales anuales máximos.

En el análisis probabilístico, una serie es una secuencia de datos, como son las observaciones, diarias, estacionales o anuales de una variable hidrológica. Si el registro de estas observaciones contiene todos los eventos que ocurrieron dentro de un periodo dado, a la serie se llama serie de duración completa. Una serie que contiene solo el evento con la magnitud más grande que ocurrió en cada año se denomina serie de máximos anuales. El uso de las series de máximos anuales es muy común en el análisis probabilístico. (Chow et al, 1994).

2.15 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones, período de retorno mayor que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (Ashkar et al, 1994).

2.15.1 PERIODO DE RETORNO

Es necesario saber dos conceptos; uno de ellos es el periodo de retorno, «T» que es el número promedio de años dentro del cual se espera que un evento sea igualado o excedido solo una vez. El segundo concepto es la probabilidad de excedencia, que es la probabilidad asociada al periodo de retorno, donde la variable aleatoria toma un valor igual o superior a cierto número «X» (Pizarro y Novoa, 1986).

Se define como:

$$P(x) = \frac{1}{T}$$

La probabilidad de que un valor de la variable aleatoria no sea excedido, está dado por la función de distribución de probabilidad $F(x)$, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Luego la probabilidad de que la variable aleatoria sea mayor que X, se expresa como:

$$P(x > X) = 1 - F(x) = \frac{1}{T}$$

2.16 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD EN LA HIDROLOGÍA

Una distribución de probabilidades es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una serie hidrometeorológica. Las funciones de distribución de probabilidades principales que se usan en hidrología generalmente en el análisis de eventos máximos son:

- Distribución Normal.
- Distribución Log Normal.
- Distribución Gumbel.
- Distribución Log Pearson Tipo III.

Cuadro 3: Distribuciones de probabilidad usados en la hidrología

DISTRIBUCIÓN	FUNCIÓN
NORMAL	$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$ <p>Donde: x = Variable aleatoria μ = Media de la población σ = Desviación estándar de la población</p>
LOG NORMAL	$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\beta}\right)^2}$ <p>Donde: x = Variable aleatoria σ = Media estándar de la variable aleatoria β = desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria</p>
GUMBEL	$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$ <p>Donde: x = Representa el valor a asumir por la variable aleatoria e = Constante de Neper</p>
PEARSON TIPO III	$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x-\delta}{\alpha} \right\}^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}}$ <p>Donde: α, β, δ = Parámetros de la función, se estimas en función de \bar{x} $\Gamma(\beta)$ = Función Gamma</p>

FUENTE: Chow, *et al.*, 1994

2.17 PRUEBAS DE AJUSTE

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

2.17.1 TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Este procedimiento es un test no paramétrico que permite probar si dos muestras provienen del mismo modelo probabilístico (Bois, et al. 1998).

Así mismo es necesario determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada; una vez determinadas ambas frecuencias, se obtiene el valor absoluto de las diferencias entre ambas. Este test es válido para distribuciones continuas y sirve tanto para muestras grandes como para muestras pequeñas (Pizarro, et al. 1986).

Para la aplicación de este test, se necesita en primer lugar determinar la frecuencia observada acumulada.

$$Fn(x) = \frac{n}{N + 1}$$

En donde:

$F_n(x)$: Frecuencia observada acumulada.

n: N° de orden del dato.

N: N° total de datos.

Luego se calcula la frecuencia teórica acumulada $F(x)$, determinada para cada una de las funciones. Una vez obtenidas ambas frecuencias, se procede a calcular el valor absoluto de las diferencias entre ambas, en la i-énima posición de orden, que se denomina Dc.

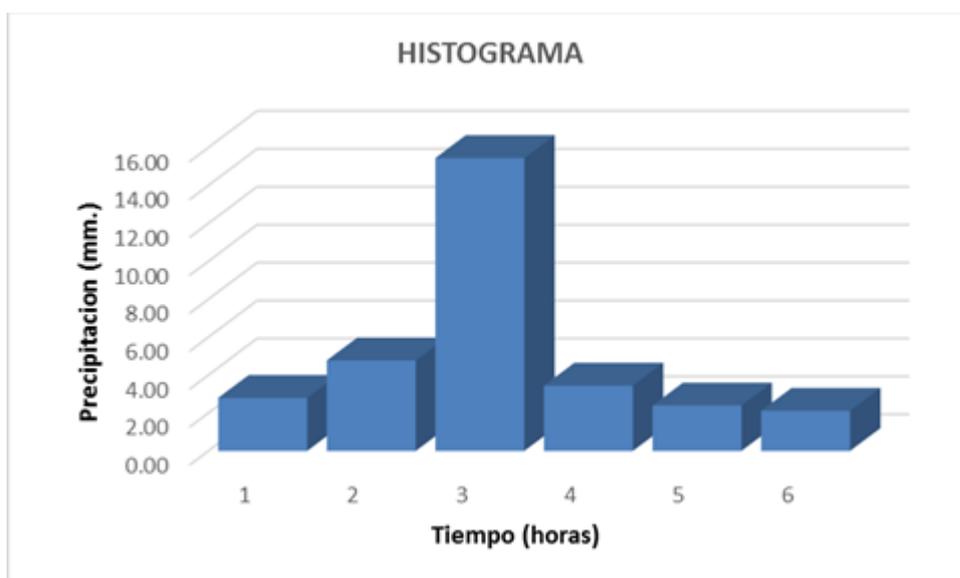
$$Dc = \text{Sup}|F_n(x)_i - F(x)_i|$$

Si la diferencia absoluta es menor que la diferencia tabulada por tabla, definida en base al tamaño de la muestra, se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de significancia asumido (0.05 y 0.01 son los más usuales). Si esta comparación resulta una diferencia grande entre las funciones de distribución muestral y la distribución propuesta, entonces se rechaza.

2.18 HISTOGRAMAS

La intensidad de la precipitación varía en cada instante durante el curso de una misma tormenta de acuerdo a las características de ésta. Cuando se hace el análisis de tormentas es indispensable determinar estas variaciones porque de ellas dependen muchas condiciones que hay que fijar para las obras de ingeniería. Esto se consigue mediante el histograma de precipitación, que es un gráfico de forma escalonada que representa la variación de la intensidad (en mm/h) de la tormenta en el transcurso de la misma (en minutos u horas). Mediante este histograma es muy sencillo determinar a qué hora la precipitación adquirió su máxima intensidad y cuál fue el valor de ésta.

Figura 6: Histograma de precipitación



FUENTE: Elaboración propia

2.19 TORMENTA DE DISEÑO

Se define una tormenta de diseño como un patrón de precipitación para ser usado en el diseño de un sistema hidrológico. Generalmente se emplean como dato de entrada en el análisis de modelos de lluvia - escorrentía para estimar hidrogramas de avenidas en cuencas.

La selección de una tormenta de diseño está íntimamente relacionado con los cálculos o estudios previos al diseño de obras de ingeniería. En efecto, las dimensiones de estas obras dependen principalmente de las tormentas y de la frecuencia con que estas se presenten en el lugar donde se está diseñando la obra. Quiere decir entonces, que debemos conocer su intensidad por unidad de tiempo, el tiempo de duración que determina las dimensiones de la obra y la frecuencia con que se presenta determinada tormenta, bien definida en sus características de intensidad, duración y frecuencia.

2.20 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. Comúnmente se utiliza la intensidad promedio, que puede expresarse como:

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

Donde P es la profundidad de lluvia (mm) y T_d es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del período de retorno, T, que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Las curvas intensidad – duración – frecuencia son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de la misma y la frecuencia con la que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno.

Las curvas de intensidad – duración – frecuencia pueden expresarse como ecuaciones con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica. La ecuación general es el siguiente:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n}$$

Donde:

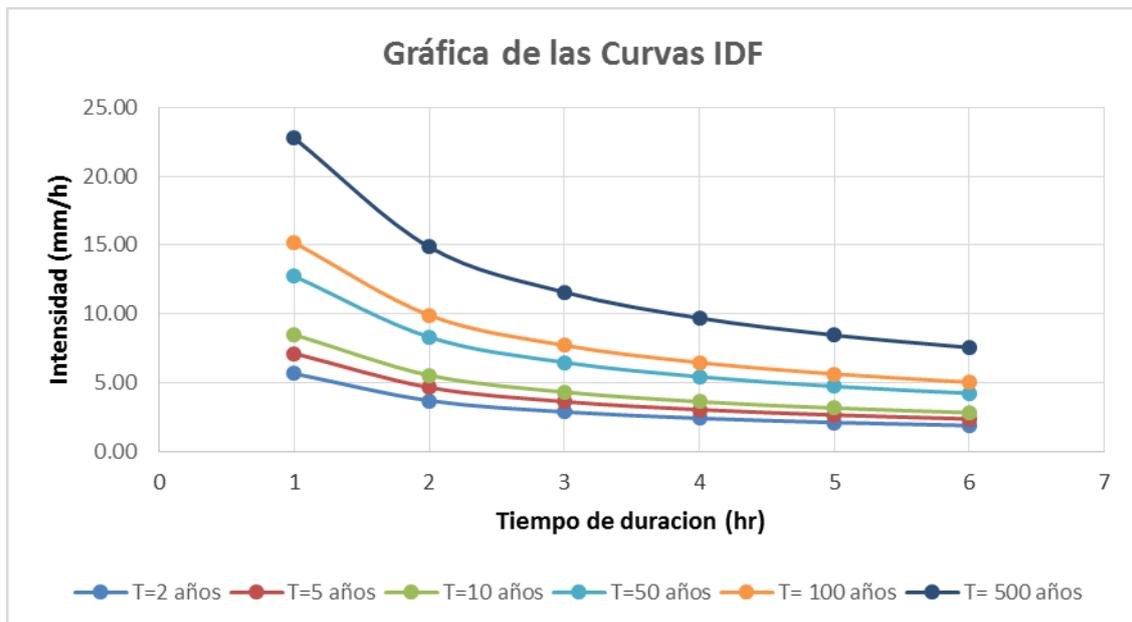
I = Intensidad máxima (mm/h)

K, m, n = factores característicos de la zona de estudio

T = período de retorno en años

t = duración de la precipitación (min.)

Figura 7: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia



FUENTE: Elaboración propia

2.21 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Es el tiempo requerido por una gota de agua para recorrer desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca.

Transcurrido el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración t_c . El tiempo de concentración real depende de muchos factores, como la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá un mayor tiempo de concentración). Otro factor es la pendiente, mientras mayor sea, producirá flujos más rápidos y en menor tiempo de concentración. Además influyen; el área, las características del suelo, cobertura vegetal, etc. Las fórmulas más comunes generalmente incluyen la pendiente, la longitud del cauce mayor desde la divisoria y el área. (Chow et al, 1994). Ver cuadro 4.

2.22 ESTACIÓN HIDROMÉTRICA

Las estaciones hidrométricas registran caudales mínimos, medios y máximos que fluyen por un punto determinado de una cuenca. Esta información hidrológica permite cuantificar la oferta hídrica de la cuenca y estimar los caudales máximos para distintos periodos de retorno, con el propósito de solucionar problemas que implica el diseño de obras hidráulicas (Chow, et al. 1994).

2.23 HIDROGRAMA DE CAUDAL

El Hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular (Chow et al, 1994).

Un hidrograma de caudal es una gráfica en la que se muestra la tasa de flujo como una función del tiempo en un punto dado de la corriente. Existen dos tipos de hidrogramas de caudales.

Cuadro 4: Ecuaciones para el cálculo del Tiempo de Concentración

MÉTODO Y FECHA	FÓRMULA PARA t_c (minutos)
	$t_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$
Kirpich (1940)	<p>L= longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m.</p> <p>S= pendiente promedio de la cuenca, m/m</p> $t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$
California Culverts Practice (1942)	<p>L= longitud del curso de agua más largo, m.</p> <p>H= diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.</p> $t_c = \frac{525(0.0000276 \cdot i + c)L^{0.33}}{S^{0.333} \cdot i^{0.667}}$
Izzard (1946)	<p>i= intensidad de lluvia, mm/h</p> <p>c= coeficiente de retardo</p> <p>L= longitud de la trayectoria de flujo, m.</p> <p>S= pendiente de la trayectoria de flujo, m/m.</p> $t_c = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{0.333}}$
Federal Aviation Administration (1970)	<p>C= coeficiente de escorrentía del método racional.</p> <p>L= longitud de flujo superficial, m.</p> <p>S= pendiente de la superficie, m/m.</p>

FUENTE: Chow et al, 1994

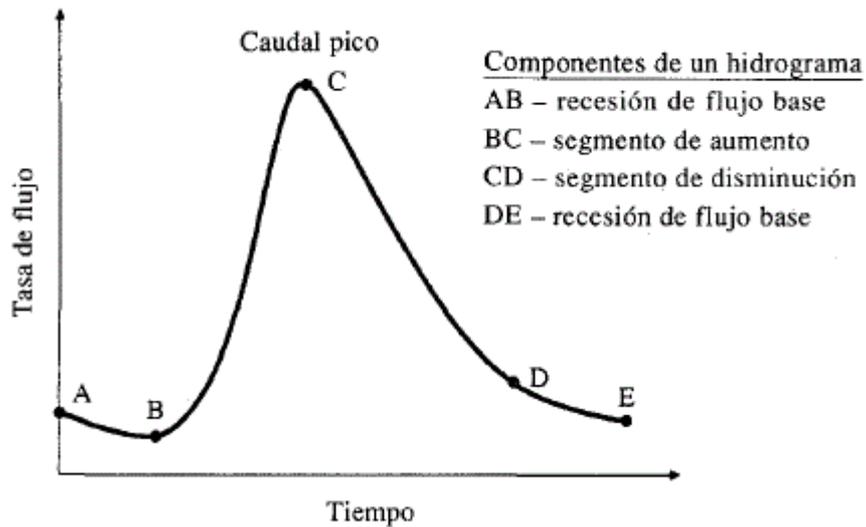
2.23.1 HIDROGRAMA ANUAL

Es una gráfica de caudal vs. tiempo en un año, que muestra el balance a largo plazo de la precipitación, evaporación y caudal en una cuenca (Chow et al, 1994).

2.23.1 HIDROGRAMA DE TORMENTA

Un hidrograma de tormenta está compuesto por la esorrentía directa y el flujo base. Los componentes de un hidrograma de tormenta son la recesión del flujo base, el segmento de aumento y el segmento de disminución. En la siguiente figura se muestran los componentes de un hidrograma de tormenta.

Figura 8: Componentes de un Hidrograma de Caudales durante una Tormenta



FUENTE: Chow, et al. 1994

2.24 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para estimar el comportamiento de las variables que permiten reproducir el ciclo hidrológico de una cuenca, se han elaborado modelos hidrológicos, como una representación aproximada del balance hídrico, considerando por un lado las variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura del aire como datos de entrada y por otro, las características físicas de la cuenca. Para una mejor gestión de los recursos hídricos y toma de decisiones, es de importancia la modelación hidrológica, la cual es útil para estudiar el comportamiento de los regímenes de caudales ante variaciones en las condiciones predominantes como lluvia o evapotranspiración. En base a ella podemos lograr un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos dentro de la cuenca.

Además nos permite realizar simulaciones y pronósticos del comportamiento hidrológico mediante simplificaciones matemáticas de los procesos físicos en la cuenca. Estos modelos de lluvia escurriénta pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados, o estar basados en ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las variables dentro de una cuenca hidrográfica (Chow et al, 1994).

2.25 MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

El *software* HEC-HMS es uno de los modelos de simulación hidrológica más utilizado. Las siglas HEC significan Hydrologic Engineering Center (Centro de Ingeniería Hidrológica), el centro de investigación del U.S. Army Corps of Engineers, ubicado en Davis, California mientras que las siglas HMS significan Hydrologic Model System (Sistema de Modelación Hidrológica).

Es un sistema de modelación hidrológica diseñado para simular la precipitación – escurriénta, procesado de sistemas de cuencas hidrográficas. Este programa se puede aplicar en un amplio rango de áreas geográficas para resolver diferentes tipos de problemas hidrológicos como el suministro de agua en una cuenca e inundaciones.

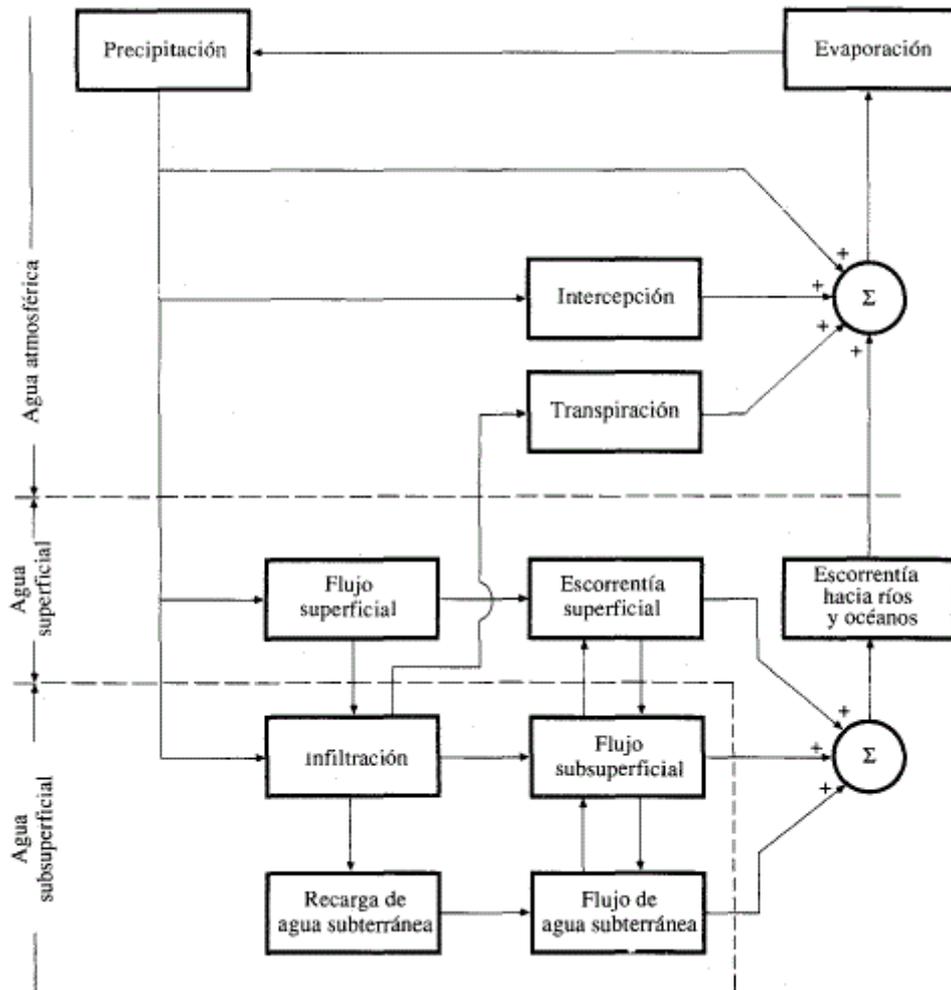
Este programa produce hidrogramas que se puede utilizar directamente o en conjunto con otros *softwares* para el estudio de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de flujo, futuro impacto urbanizacional, diseño de aliviaderos de reservorios, reducción de daños de inundaciones, etc. (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

Los fenómenos hidrológicos son bastante complejos y numerosos, y posiblemente nunca se les entienda en su totalidad. Por ello, estos son representados en forma simplificada a través del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, los cuales forman un todo. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema, que tiene como componentes la precipitación, evaporación, escorrentía, entre otros. Estos componentes se pueden agrupar en subsistemas del ciclo hidrológico total, que pueden analizarse individualmente y combinar los resultados en función a las interacciones de los subsistemas para analizar el sistema total en su conjunto. Ver Figura 9.

Un sistema hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas

La entrada al sistema es básicamente la precipitación y la salida es el caudal. Los procesos hidrológicos considerados en el Modelo Hidrológico HEC-HMS, son: la precipitación sobre el área de la cuenca; abstracciones o pérdidas; la transformación del exceso de precipitación en escorrentía directa y el flujo base (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

Figura 9: Esquema del Sistema hidrológico global



FUENTE: U.S. Army Corps of Engineers, 2008

2.25.1 PRECIPITACIÓN SOBRE EL ÁREA DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La precipitación incluye la lluvia y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre. El cálculo de la precipitación sobre un área o precipitación areal permite determinar la precipitación sobre la superficie de cada subcuenca.

La precipitación es medida en estaciones pluviométricas, las cuales están ubicadas en determinados puntos de la cuenca, por lo que solo se conoce la precipitación en estos puntos. Por lo tanto, las láminas de precipitación medidas en las estaciones deben distribuirse en toda la superficie de la cuenca. Existen diversos métodos para calcular la precipitación areal, entre ellos tenemos los siguientes: el método de la media aritmética el método de Thiessen y el método de las isoyetas. (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

2.25.2 ABSTRACCIONES

Las Abstracciones incluyen la intercepción de precipitación por la vegetación del terreno, el almacenamiento en depresiones en la superficie del suelo a medida que el agua se acumula en hundimientos en la en la superficie, e infiltración de agua en el suelo. Las abstracciones por intercepción y almacenamiento en depresiones se estiman con base en la naturaleza de la vegetación y de la superficie del terreno o se suponen despreciables en una tormenta grande (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

2.25.3 TRANSFORMACIÓN DEL EXCESO DE PRECIPITACIÓN EN ESCORRENTÍA DIRECTA

El componente de escorrentía superficial para cada subcuenca representa el movimiento del agua sobre la superficie del terreno hacia el cauce de los ríos. Para cada subcuenca, hay que especificar su área superficial. Los datos de entrada para este componente son los datos de precipitación.

El exceso de precipitación, también conocido como precipitación efectiva, es la porción de la precipitación total que no es retenida en la superficie terrestre ni tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca. (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

2.25.4 FLUJO BASE

El flujo base está conformado por la cantidad de agua almacenada en la cuenca durante la lluvia anterior y el flujo subsuperficial. Existen diversos métodos para cuantificar el flujo base (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

- Constante mensual: Consiste en dar un valor constante del flujo base para cada mes.
- Reservorio lineal: Este método debe emplearse conjuntamente con el método del SMA para el cálculo de infiltración. En él, se simula el almacenamiento y movimiento del flujo subsuperficial como almacenamiento y movimiento a través de reservorios.
- Método de recesión exponencial del flujo base: En este método se describe el decaimiento exponencial del flujo base durante una lluvia o tormenta.

2.26 MODELO HIDRAULICO HEC-RAS

El Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) es un modelo unidimensional que permite ejecutar análisis hidráulicos del flujo de agua en lámina libre en régimen permanente y no permanente.

Para el análisis hidráulico en régimen permanente, HEC-RAS es capaz de realizar cálculos de los perfiles de la superficie del agua en flujo gradualmente variado. Perfiles de la superficie del agua en régimen subcrítico, supercrítico y mixto pueden ser calculados. Los perfiles de la lámina de agua son calculados de sección en sección resolviendo la ecuación de energía por medio del procedimiento iterativo del Paso Estándar (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

2.27 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Es un conjunto de programas, equipamientos, metodologías, datos y personas (usuarios) perfectamente integrados, de forma que se hace posible la recolección, almacenamiento procesamiento y el análisis de datos georeferenciados, así como la producción de información derivada de su aplicación (Teixeira, 1995).

En un SIG como técnica se insiste con sistemas de información con base tecnológica en equipos y programas, cuya utilidad se centra en el tratamiento de datos referenciados geográficamente, donde sus funcionalidades son: La captura, modelado, almacenamiento recuperación, intercambio, manipulación, análisis y presentación de la información, siendo sinónimo de Tecnología Geoespacial. Sin embargo el SIG ciencia explora los preceptos fundamentales que subyacen bajo la tecnología y busca establecer un cuerpo doctrinal. Definiéndose como una ciencia multidisciplinar basada en el estudio de la naturaleza de la información geográfica y en la aplicación de las tecnologías geoespaciales, la estructura de los datos, algoritmos y los procesos, la visualización, las herramientas analíticas y las cuestiones éticas de gestión e institucionales. Siendo la geomática como núcleo central de la ciber-cartografía, la que comprende tanto al SIG técnica y SIG ciencia.

Integrar los SIG y los modelos hidrológicos implica conectar los datos geoespaciales que describen el entorno físico, con los modelos de procesos hidrológicos que describen el movimiento del agua a través del medio, es la búsqueda de la relaciones entre patrones y procesos en el espacio geográfico (Burrough, et al. 1986).

Las líneas actuales de investigación en modelos hidrológicos , basadas en sistemas de información geográfica (SIG), información de satélite y sistemas computacionales modernos, ofrecen mayores posibilidades en la subdivisión de la cuenca en subunidades menores más homogéneas, dónde se les aplica un modelo agregado, dándonos la posibilidad de poder responder mejor científicamente a los eventos hidrometeorológicos de la naturaleza.

Los investigadores en hidrología encuentran cada vez más efectiva la utilización de los *SIG* debido a su capacidad de gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real. La capacidad de los *SIG*-técnica como potentes calculadoras del territorio, permite emplear ecuaciones que ayudan a interpretar los procesos hidrológicos a partir de bases de datos presentando estos resultados en mapas. Esta visión no solo es distribuida sino también integral u holística; el *SIG*-técnica como paradigma del mapa permite suministrar a los procesos de decisión, una información que resume factores climatológicos, meteorológicos, geomorfológicos, ecológicos, o sociales entre otros (Del Río, 2010).

2.28 EXTENSIÓN HEC-GEORAS

El programa HEC-GeoRAS es una extensión para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). Se trata de un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades específicamente diseñadas para procesar datos georeferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo en HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

2.29 EXTENSIÓN HEC-GEOHMS

HEC-GeoHMS es una extensión para ArcGIS, que ha sido desarrollada como un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales para ingenieros e hidrólogos con una limitada experiencia en sistemas de información geográfica (SIG). Este programa permite visualizar información espacial, documentar características de la cuenca, realizar análisis espaciales delinear cuencas y ríos, construir las entradas para modelos hidrológicos. Mediante el HEC-GeoHMS a través de sus interfaces, menús, herramientas, se pueden vincular proyectos realizados en HEC-HMS con el ArcGIS (U.S. Army Corps of Engineers. 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

La información cartográfica utilizada en la investigación fueron las siguientes Cartas Nacionales: 27- M; 28-M; 28-N; 28-L; 29-M; 29-L, a una escala de 1:100,000 elaborado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional), en el Sistema de Coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), en el Datum WGS1984, Zona 18 Sur.

Además se obtuvo información de Uso y Tipo de Suelo, administrada por el PETACC (Proyecto Especial Tambo Ccaracocha), en formato shape a una escala de 1:500,000 y un TIN (superficie irregular de triángulos), correspondientes de la zona de estudio.

3.1.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

La información pluviométrica ha sido obtenida a partir de las estaciones meteorológicas administradas por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) de la DR05 (Dirección Regional de Ica). Se ha recolectado información pluviométrica máxima anual en 24 horas. Las estaciones meteorológicas que influyeron en la investigación fueron: Challaca, San Camilo, Santiago de Chocorvos, Cusicancha, Córdova y Tambo. Ver cuadro 5.

La información hidrométrica, también se obtuvo del SENAMHI de la Dirección Regional de Ica. Se ha recolectado información hidrométrica máxima anual en 24 horas de la Estación Hidrológica La Achirana ubicada en el distrito de San José de Los Molinos.

Cuadro 5: Estaciones Hidrometeorológicas

ESTACIONES	CAT.	UBICACIÓN GEOGRAFICA			COORDENADAS		
		DEPARTAM.	PROVINCIA	DISTRITO	Latitud	Longitud	Altura
CHALLACA	CO	Huancavelica	Huaytará	Stgo.Chocorvos	13°47'25.72"	75°22'55.66"	1799
CHOCORVOS	CO	Huancavelica	Huaytará	Stgo.Chocorvos	13°49'31.04"	75°15'30.37"	2603
CORDOVA	PLU	Huancavelica	Huaytará	Cordova	14° 02´	75° 10´	3240
CUSICANCHA	CO	Huancavelica	Huaytará	Cusicancha	13° 30´ 17"	75° 17´ 08"	3550
SAN CAMILO	MAP	Ica	Ica	Parcona	14°04'24.17"	75°42'39.52"	406
TAMBO	CO	Huancavelica	Huaytará	Tambo	13°41'30.55"	75°16'26.13"	3136
LA ACHIRANA	HLG	Ica	Ica	S.J.Los Molinos	13°55´ 29.0"	75°40´ 43.0"	489

CO: Climática Ordinaria; **MAP:** Meteorológica Principal; **PLU:** Pluviométrica; **HLG:** Hidrológica

FUENTE: Maestro de Estaciones Hidrometeorológicas SENAMHI – DR05

La información pluviométrica e hidrométrica será entregada, con mayor detalle en hojas Excel, en un CD, como un complemento a lo que se ofrece en la presente investigación.

Cuadro 6: Información pluviométrica máximas anuales



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología
e Hidrología del Perú - SENAMHI

Dirección Regional
de Ica

INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA MÁXIMAS ANUALES (mm.)

Año	ESTACIONES PLUVIOMETRICAS					
	CHOCORVOS	CORDOVA	CUSICANCHA	TAMBO	SAN CAMILO	CHALLACA
1965	12.10	10.10	8.40	35.00	11.20	3.00
1966	12.00	13.50	18.70	8.00	10.50	5.20
1967	20.00	84.00	23.50	10.50	5.70	28.20
1968	10.40	20.80	12.30	24.00	0.90	3.80
1969	9.60	17.40	23.00	20.00	0.40	3.00
1970	10.00	30.50	18.30	13.30	2.70	14.30
1971	24.00	32.30	28.60	18.20	1.20	12.70
1972	31.20	22.10	26.90	20.40	26.50	31.50
1973	10.20	16.40	12.60	19.90	8.30	11.30
1974	6.00	11.00	9.70	25.30	12.20	13.50
1975	7.00	11.20	6.30	27.00	1.70	6.00
1976	7.00	24.40	9.00	32.30	17.20	12.60
1977	20.40	28.80	21.00	20.40	6.70	11.00
1978	35.00	18.00	30.00	23.00	14.20	7.50
1979	9.00	13.00	18.00	22.00	2.00	6.00
1980	5.80	14.00	12.00	23.00	0.80	19.50
1981	8.20	37.30	20.00	30.00	0.90	14.70
1982	8.50	22.60	10.10	15.70	2.50	12.70
1983	7.30	20.00	5.00	40.00	2.20	
1984	22.30	61.00	25.00	42.00	1.20	
1985	20.00	19.90	11.90	30.00	3.20	
1986	55.00	32.30	20.90	30.00	4.10	
1987	6.90	33.10	9.00	22.00	1.60	
1988	3.20	19.50	0.20	20.00	15.30	
1989	30.10	33.30	0.20	26.20	5.50	
1990	3.40	19.00	0.20	31.00	1.30	
1991	3.70	24.40	21.00	40.20	2.50	
1992	3.20	3.10	0.20	14.20	1.00	
1993	9.20	22.10	36.00	50.00	1.80	
1994	6.80	15.30	19.80	30.00	1.20	
1995	20.20	40.20	11.20	47.00	3.00	
1996	11.30	26.00	10.80	27.00	3.60	
1997	17.80	26.30	20.90	30.00	8.00	
1998	15.80	27.50	39.90	45.00	4.60	
1999	28.70	41.70	19.30	22.40	6.40	
2000	26.20	35.50	16.00	25.00	8.00	4.70
2001	22.20	51.30	20.20	15.00	6.40	20.80
2002	17.20	27.70	20.10	23.00	0.60	14.50
2003	16.80	22.30	18.90	20.00	8.00	3.40
2004	35.00	26.70	11.80	19.00	6.40	9.90
2005	27.60	24.10	12.40	27.00	0.60	18.00
2006	24.00	52.00	25.70	36.00	8.00	23.20
2007	14.00	23.50	16.00	12.50	6.40	7.00
2008	29.50	31.00	19.50	25.00	0.60	17.00
2009	16.80	21.80	17.50	28.00	8.00	17.50
2010	19.00	20.70	25.30	28.00	6.40	10.90
2011	13.40	39.60	15.60	23.00	0.60	10.20
2012	36.80	49.00	54.50	38.00	8.00	18.80

Ica, 11 de Junio del 2013



Ing° DARIO AL FIERRO ZAPATA
DIRECTOR REGIONAL
SENAMHI - ICA



Cuadro 7: Información hidrométrica máximas anuales



INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA MÁXIMAS ANUALES

ESTACION: HLG-LA ACHIRANA

PARAMETRO:	CAUDALES MAXIMOS ANUALES (m ³ /s)	LATITUD:	13° 55'29"	DEPARTAMENTO:	ICA
AÑOS:	2002-2012	LONGITUD:	75° 40'43"	PROVINCIA:	ICA
		ALTITUD:	489 m.s.n.m.	DISTRITO:	LOS MOLINOS

Años	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Caudales Maximos Anuales (m³/s)	11.74	112	59.26	23.5	103.8	115.64	107.11	218.96	51.56	128.74	128.52

Ica, 14 de Junio del 2013




Ing° DARIÓ EL PIERNO ZAPATA
 DIRECTOR REGIONAL
 SENAMHI - ICA



3.1.3 EQUIPOS Y SOFTWARES

En la presente investigación se han utilizado los siguientes equipos de gabinete y programas de cómputo:

a. EQUIPOS

- Laptop Lenovo, Modelo B590, procesador Intel Core i5, memoria RAM de 4GB
- Impresora HP Deskjet F4180

b. SOFTWARES

- ArcGIS 10.1
- HEC-HMS 4.0
- HEC-RAS 4.0
- Hidroesta 1.0
- Minitab 15
- Microsoft Office 2013

3.2 UBICACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO

3.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Latitud Sur : 13°04' - 13°57'

Longitud Oeste: 74°58' - 75°41'

3.2.2 LÍMITES HIDROGRÁFICOS

Norte: con la cuenca del Río Pisco.

Sur: con la cuenca del Río San José.

Este: con la cuenca del Río Pampas.

Oeste: con el Océano Pacífico.

3.2.3 UBICACIÓN POLÍTICA

La zona en estudio se encuentra ubicada en el sector superior de la cuenca del río Ica, comprendiendo dentro de su territorio parte de las regiones Costa y Sierra políticamente, forma parte de la provincia de Ica. Tiene un área de 2 581 km², de la cual 2 127 km² corresponde a la cuenca imbrífera o húmeda por encontrarse por encima de los 2 500 m.s.n.m, que representa el 82 por ciento del área total de la cuenca.

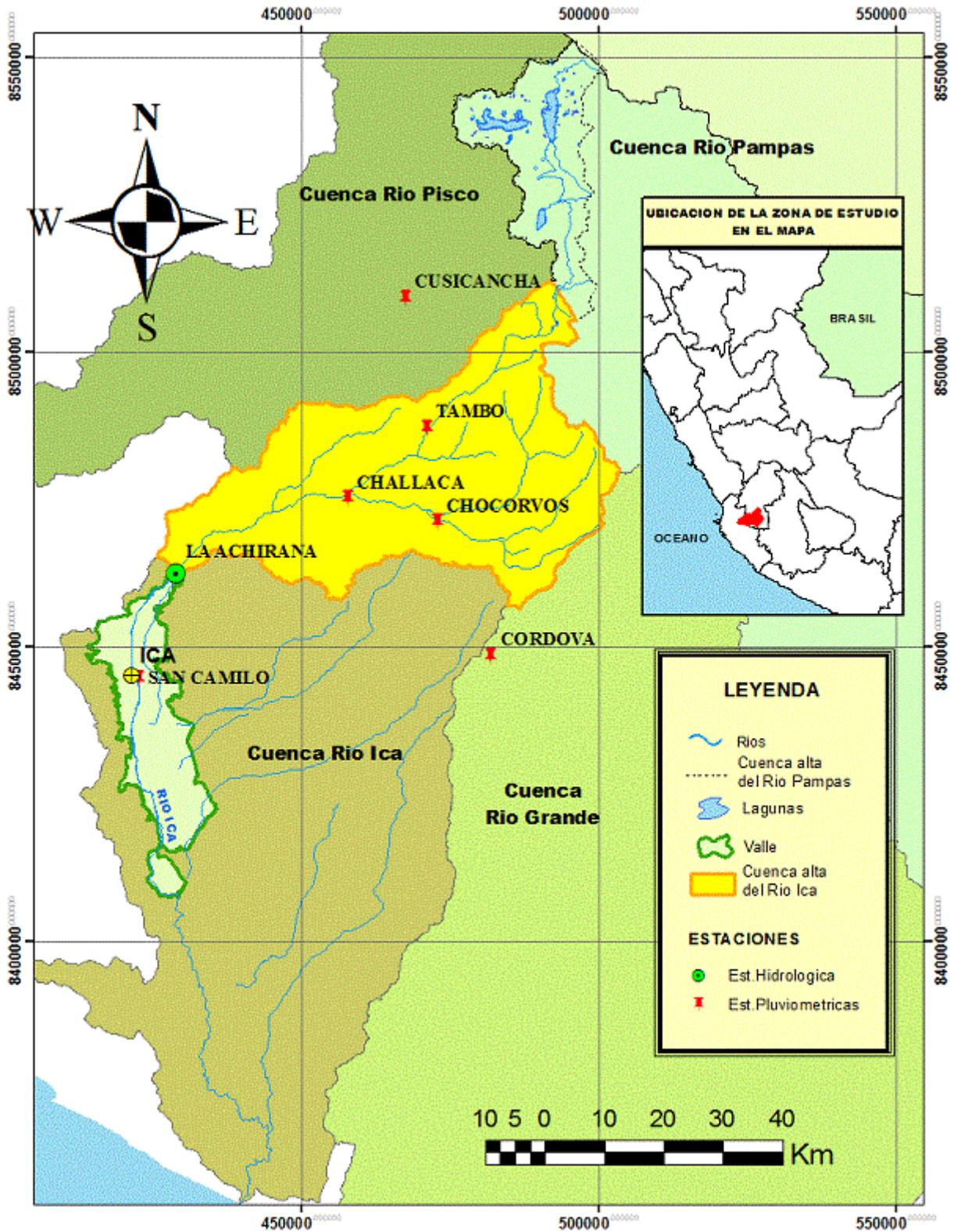
Con el motivo de reducir el periodo de estiaje del río Ica, que dura más de la mitad del año, se emplean las descargas reguladas del Sistema Choclococha, generalmente los tres últimos meses del año, con un caudal promedio de 10 m³/s.

El sistema Choclococha está referido a un conjunto de lagunas (Choclococha, Ccaracocha y Orcococha), un canal de derivación y un túnel trasandino, como se puede apreciar en la figura 10, que permiten la derivación trasandina de los recursos hídricos de una parte de la cuenca alta del río Pampas perteneciente a la vertiente del Atlántico, mientras que la cuenca del Río Ica pertenece a la vertiente del Pacífico.

Geográficamente se encuentra comprendido entre las coordenadas: 13°10'-13°34' S y 75°01'-75°20' W, la altitud promedio es de 4 600 m.s.n.m. políticamente pertenece al distrito de Pilpichaca, provincia de Huaytará, en Huancavelica El acceso (a Santa Inés, Santa Ana, Castrovirreyna, Huancavelica, campamento PETACC),Es posible desde el Km.233 de la Panamericana Sur (San Clemente,Pisco,Ica),por la carretera Antigua Los Libertadores, que atraviesa de Oeste este el valle de Pisco, pasando por Humay, Huáncano y Huaytará de donde se avanza hacia el Noreste a Rumichaca (km 200),continuando al Norte por una carretera afirmada hasta Santa Inés ,distante 60 km.; otra ruta es desde San Clemente, pasando por Huáncano, Ticrapo, Castrovirreyna y Santa Inés, km 132 de la Carretera Antigua Los Libertadores.

Este sistema permite derivar los recursos hídricos de aproximadamente 392 km² de la cuenca alta del rio Pampas, hacia la laguna Pariona punto de origen del rio Ica (Vertiente del Pacifico). Comprende las provincias de Huaytará y Castrovirreyna.

Figura 10: Ubicación geográfica de la cuenca en estudio



FUENTE: Elaboración propia

3.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para esta investigación constituyó en la aplicación del modelo matemático HEC-HMS para el análisis hidrológico de la cuenca alta, o de recepción, del río Ica, de modo que se obtengan hidrogramas de caudales máximos, los cuales fueron calibrados con los caudales de la estación La Achirana, para diferentes periodos de retorno. El HEC-HMS fue complementado con la incorporación del modelo hidráulico HEC-RAS para la simulación de dichos caudales a lo largo del cauce del río en las partes bajas de la cuenca, específicamente, en el valle de Ica, sin embargo no se realizó la calibración del modelo hidráulico, debido a la carencia de la información requerida.

Además se utilizó sistemas de información geográfica (SIG) como herramientas de apoyo para ambos modelos matemáticos.

3.3.1 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

Antes de utilizar los datos pluviométricos recopilados, se los sometió a pruebas de consistencia, como son los Diagramas de Cajas y las Curvas de Doble Masa.

a. DIAGRAMA DE CAJAS

Mediante los diagramas de cajas se realizó un análisis de modo que se representó la información pluviométrica de cada estación, según su posición, dispersión y forma de la distribución a través de cinco estadísticos descriptivos: la mediana, el primer y tercer cuartil, la mínima y máxima observación regular. Además se identificaron algunos valores atípicos.

b. CURVA DE DOBLE MASA

Se realizó el análisis de doble masa para las ocho estaciones pluviométricas, de las cuales se tomaron los registros de las precipitaciones máximas anuales de dieciocho años en común, comprendiendo las series históricas desde 1965 a 1982.

El método de doble masa se realizó a partir del ploteo de la precipitación promedio acumulada en el eje de las abscisas y de las precipitaciones acumuladas en el eje de las ordenadas, mediante el uso del *software* Microsoft Office Excel.

Se agrupó las estaciones en pares, según su cercanía geográfica, de modo que la información pluviométrica, se conformó por cuatro bloques, en los cuales se detectaron los cambios en las pendientes que presentaron las gráficas.

3.3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SALTOS Y TENDENCIAS

El análisis estadístico de presencia de Saltos y Tendencias de la información pluviométrica, se realizó mediante los estadísticos T de Student para la comprobación de variaciones en la media, y F de Fisher en la evaluación de variancias.

Los valores de T y F fueron comparados con los valores críticos con un grado de significancia de $= 0.05$ y con $N1+N2-2$ grados de libertad para la prueba T Student y con $N1-1$ $N2-1$ grados de libertad para la prueba F de Fisher.

Las pruebas estadísticas se realizaron en una hoja de cálculo en Excel, de modo que, como se puede apreciar en la Tabla 7, en todos los casos se cumple la premisa: $|T| < T_c$ y $F < F_c$.

De esta manera se aprobó la hipótesis nula de que no existen cambios significativos tanto en la media como en la varianza respectivamente a pesar de haberse detectado saltos en las curvas de Doble Masa. Por lo tanto los datos no requieren de realizar corrección alguna.

3.3.3 COMPLETACIÓN DE DATOS FALTANTES

La completación de datos se realizó entre estaciones pertenecientes y cercanas a la cuenca. Para obtener una base de datos de uso común se completó la serie de datos utilizando el método de correlación múltiple.

Este método es recomendable para la estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, en base a datos pluviométricos consistentes de una estación cercana.

Se estableció una correlación como la siguiente expresión.

$$Y = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + \dots + n \cdot X_i$$

Donde:

Y: valor de precipitación estimada

X_i: valor de precipitación en estaciones con información completa

a,b,c: constantes de regression.

Cuadro 8: Información pluviométrica máxima anual en 24 horas

Año	ESTACIONES PLUVIOMETRICAS					
	CHOCORVOS	CORDOVA	CUSICANCHA	TAMBO	SAN CAMILO	CHALLACA
1965	12.10	10.10	8.40	35.00	11.20	3.00
1966	12.00	13.50	18.70	8.00	10.50	5.20
1967	20.00	84.00	23.50	10.50	5.70	28.20
1968	10.40	20.80	12.30	24.00	0.90	3.80
1969	9.60	17.40	23.00	20.00	0.40	3.00
1970	10.00	30.50	18.30	13.30	2.70	14.30
1971	24.00	32.30	28.60	18.20	1.20	12.70
1972	31.20	22.10	26.90	20.40	26.50	31.50
1973	10.20	16.40	12.60	19.90	8.30	11.30
1974	6.00	11.00	9.70	25.30	12.20	13.50
1975	7.00	11.20	6.30	27.00	1.70	6.00
1976	7.00	24.40	9.00	32.30	17.20	12.60
1977	20.40	28.80	21.00	20.40	6.70	11.00
1978	35.00	18.00	30.00	23.00	14.20	7.50
1979	9.00	13.00	18.00	22.00	2.00	6.00
1980	5.80	14.00	12.00	23.00	0.80	19.50
1981	8.20	37.30	20.00	30.00	0.90	14.70
1982	8.50	22.60	10.10	15.70	2.50	12.70
1983	7.30	20.00	5.00	40.00	2.20	11.67
1984	22.30	61.00	25.00	42.00	1.20	23.10
1985	20.00	19.90	11.90	30.00	3.20	14.27
1986	55.00	32.30	20.90	30.00	4.10	27.14
1987	6.90	33.10	9.00	22.00	1.60	14.15
1988	3.20	19.50	0.20	20.00	15.30	11.27
1989	30.10	33.30	0.20	26.20	5.50	23.88
1990	3.40	19.00	0.20	31.00	1.30	11.20
1991	3.70	24.40	21.00	40.20	2.50	8.02
1992	3.20	3.10	0.20	14.20	1.00	6.86
1993	9.20	22.10	36.00	50.00	1.80	5.81
1994	6.80	15.30	19.80	30.00	1.20	6.87
1995	20.20	40.20	11.20	47.00	3.00	19.95
1996	11.30	26.00	10.80	27.00	3.60	13.28
1997	17.80	26.30	20.90	30.00	8.00	13.22
1998	15.80	27.50	39.90	45.00	4.60	8.56
1999	28.70	41.70	19.30	22.40	6.40	21.33
2000	26.20	35.50	16.00	25.00	8.00	4.70
2001	22.20	51.30	20.20	15.00	6.40	20.80
2002	17.20	27.70	20.10	23.00	0.60	14.50
2003	16.80	22.30	18.90	20.00	8.00	3.40
2004	35.00	26.70	11.80	19.00	6.40	9.90
2005	27.60	24.10	12.40	27.00	0.60	18.00
2006	24.00	52.00	25.70	36.00	8.00	23.20
2007	14.00	23.50	16.00	12.50	6.40	7.00
2008	29.50	31.00	19.50	25.00	0.60	17.00
2009	16.80	21.80	17.50	28.00	8.00	17.50
2010	19.00	20.70	25.30	28.00	6.40	10.90
2011	13.40	39.60	15.60	23.00	0.60	10.20
2012	36.80	49.00	54.50	38.00	8.00	18.80

FUENTE: Elaboración propia

3.3.4 DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA

El proceso para delimitar una cuenca fue realizado mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual proporcionó un modo más rápido y sencillo para delimitar la cuenca en estudio mediante sus aplicaciones.

Para un mejor análisis y uso del HEC-HMS, la cuenca en estudio, se dividió en diez subcuencas. Durante este proceso se utilizó la herramienta ArcHydro, siguiendo el siguiente procedimiento.

a. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Para la delimitación de la cuenca se contó con un Modelo de elevación digital (DEM), el cual se elaboró a partir de las curvas de nivel mediante el ArcGIS, con la ayuda del comando 3D Analyst Tools, se creó un Tin y luego un archivo raster.

b. REMOCIÓN DE DEPRESIONES

Primeramente se eliminaron las depresiones existentes en el DEM, mediante un auto-procesamiento, estableciendo un umbral promedio para pixeles vecinos. Este procedimiento llenó las depresiones a través de partes del relieve y aislando las depresiones. Al finalizar este proceso se creó un archivo raster «Fill» (denominado por default por el software).

c. DIRECCIÓN DE FLUJO

Uno de los primeros pasos del análisis de la información topográfica fue la definición de la dirección del flujo hidrológico superficial para cada elemento del DEM.

Mediante la creación de la dirección de flujo ,denominado «Fdr» por el software, se calcularon variables hidrológicas de interés, tales como el área de drenaje aguas arriba de cada píxel, delineación de subcuencas, la definición de la red de drenaje, la determinación de longitud y pendiente de los tramos de río, etc.

d. FLUJO ACUMULADO

Basándose en el raster de dirección de flujo se calculó el área de drenaje de cada pixel. En el ArcHydro esto se hizo utilizando la herramienta Terrain Processing /Direction flow. El resultado fue un archivo raster «Fac».

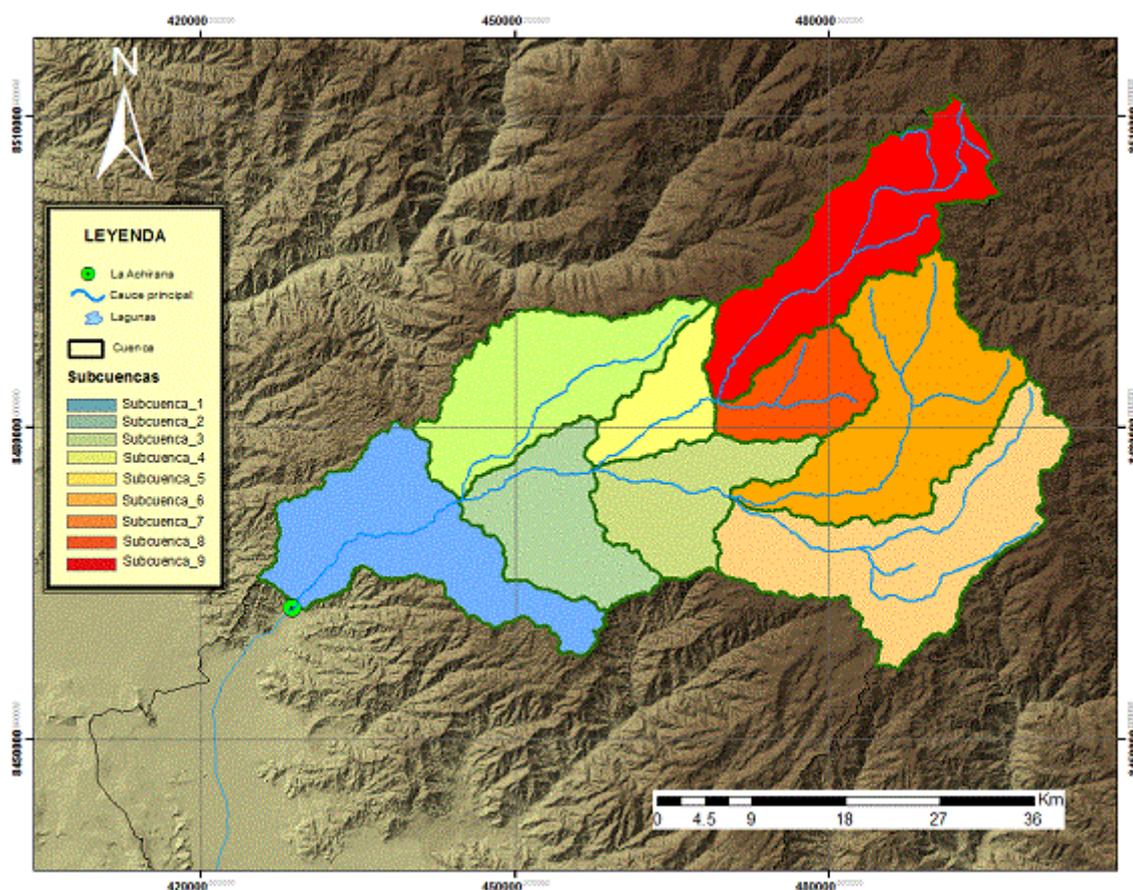
e. RED DE DRENAJE

El objetivo de la creación de un *raster* de la red de drenaje, sufijo «Str», fue la reclasificación de los valores para generar un nuevo archivo en el que los píxeles deben tener un valor de uno, si pertenecían a la red de drenaje. Este nuevo archivo se obtuvo de la reclasificación de todos los píxeles en la capa de entrada área acumulada que contiene un valor mayor que un umbral especificado.

f. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En este paso se realizó la delimitación de la cuenca, en donde el objetivo fue la generación del polígono de la cuenca hidrográfica, a partir de los raster base obtenidos anteriormente (Fill, Fdr, Fac, Str) .Una vez calculada la red de drenaje se definió cuáles son sus cuencas de captación, generándose un nuevo archivo raster (sufijo «Catchment»). Luego la cuenca tuvo un punto de salida o descarga , en este caso fue la estación hidrológica La Achirana la cual estuvo georeferenciada en formato shape .Este fue el punto de referencia que genere la cuenca ,mediante el archivo raster «BathPoint» (denominado por default) , se lo ubicó en un lugar perteneciente a una red de drenaje ,para que finalmente mediante la herramienta Watershed Processing/Batch Watershed Delineation para delimitar la cuenca y Subbatch Watershed Delineation para generar las subcuencas.

Figura 11: Cuenca delimitada en ArcGIS



FUENTE: Elaboración propia

3.3.5 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA EN ESTUDIO

Para caracterizar la cuenca hidrográfica se cuantificó los parámetros que describen la estructura física y territorial con el fin de establecer las posibilidades y limitaciones de sus recursos naturales. Algunos de los parámetros geomorfológicos sirven de base para identificar la vulnerabilidad y considerar peligros a los desastres naturales.

a. AREA DE LA CUENCA

Se calcularon las áreas de las nueve subcuencas, mediante el ArcGIS con su herramienta calculate geometry.

b. LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL

Se calculó la longitud del cauce principal de cada subcuenca, determinándola como la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba, de las subcuencas. Como el Área, este parámetro fue muy importante para el proceso de generación de escorrentía. Se utilizó el ArcGIS y su herramienta ArcHydro, además del comando «longest flow Path for Catchments».

c. PENDIENTE PROMEDIO DE LA CUENCA

Para calcular la pendiente promedio de la cuenca de río Ica se utilizó la herramienta ArcGIS, a partir de las curvas de nivel (o vectores con información altitudinal) se crea un TIN con la herramienta Create TIN de 3D Analyst. Posteriormente se procedió a crear el mapa de pendientes transformando el TIN a Raster con ayuda de la extensión Conversion from TIN to Raster. Luego mediante el comando «Slope» en Surface Analysis se obtuvo un nuevo raster, el cual se utilizó para clasificarlo según sus rangos de pendiente en porcentajes, basados en el Reglamento de Clasificación de Tierras (ver cuadro 9). Luego se creó un mapa de pendientes, como se muestra a continuación, en donde se aprecian los rangos definidos de las pendientes en porcentaje. Para saber cuál es la pendiente promedio de la cuenca, se utilizó la herramienta «Zonal Statistics as Table».

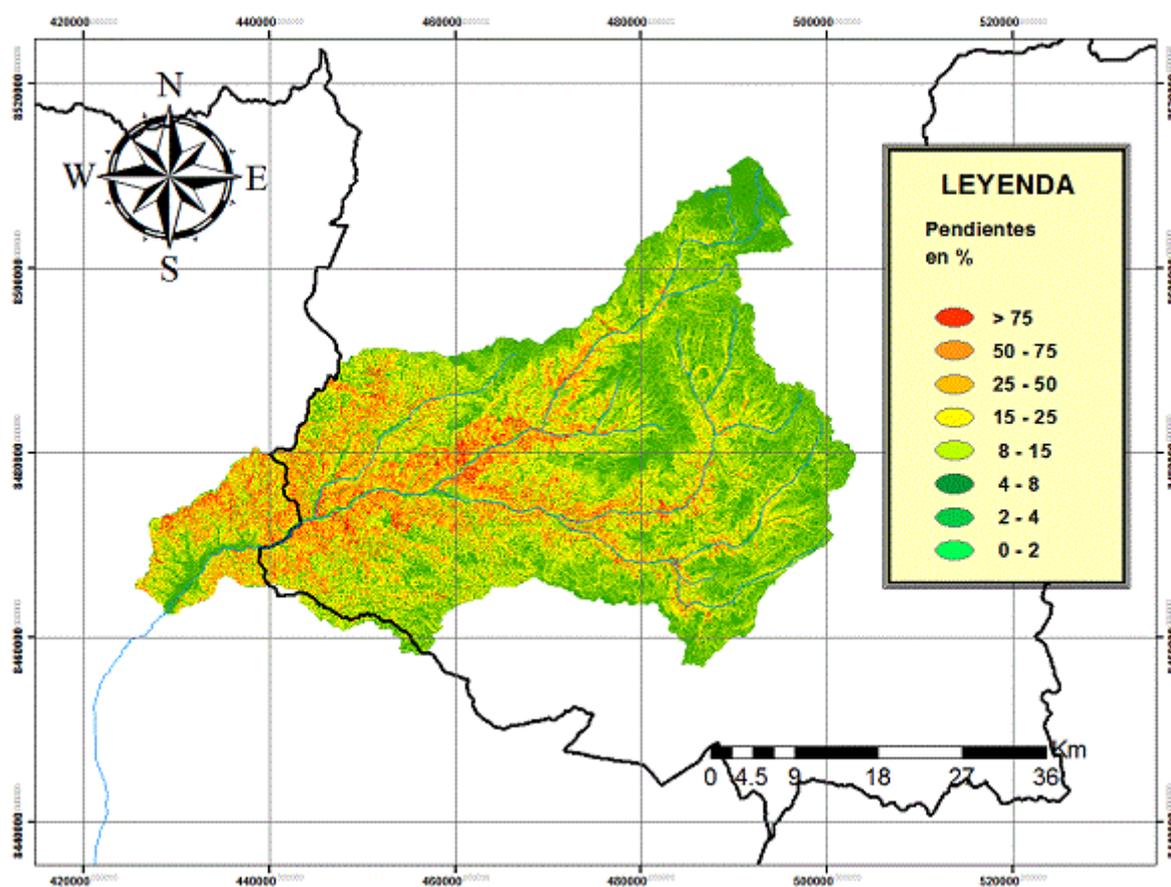
Cuadro 9: Rango de Pendientes

Simbolo	%	Definición
A	0 – 2	Plano
B	2 – 4	Ligeramente inclinada
C	4 – 8	Moderadamente inclinada
D	8 – 15	Fuertemente inclinada
E	15 – 25	Moderadamente empinada
F	25 – 50	Empinada
G	50 – 75	Muy empinada
H	> 75	Extremadamente empinada

FUENTE: ONERN, 1975

Se obtuvo un valor de pendiente promedio de la cuenca igual a 4.95, en porcentaje. Según los rangos de pendiente establecidos la cuenca fue definida como moderadamente inclinada. Del mismo modo se realizó un procedimiento similar para determinar la pendiente promedio de las nueve subcuencas.

Figura 12: Mapa de pendientes de la cuenca



FUENTE: Elaboración propia

3.3.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En este estudio para determinar el tiempo de concentración, en minutos, se utilizó la fórmula de Kirpich (1940).

$$t_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$$

Donde:

L = longitud del cauce mayor de la cuenca (m)

S = pendiente promedio de la cuenca (m/m)

Cuadro 10: Cálculo del tiempo de concentración para las subcuencas

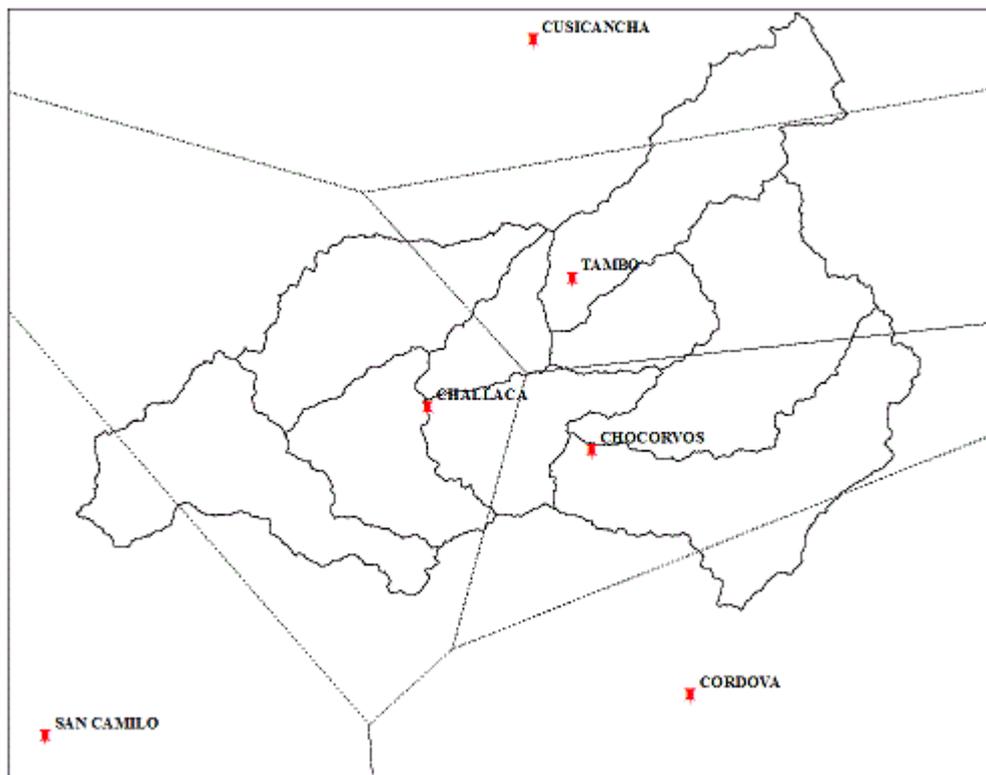
Cálculo del Tiempo de concentración para cada Subccuenca				
Descripcion	Longitud del cauce mayor (m)	Pendiente promedio (m/m)	<i>T_c</i> (min)	<i>T_c</i> (hr)
Subcuenca_1	43522.46	0.059	216.68	3.61
Subcuenca_2	26473.90	0.060	145.96	2.43
Subcuenca_3	37187.22	0.059	191.96	3.20
Subcuenca_4	28355.32	0.058	156.05	2.60
Subcuenca_5	25176.16	0.064	137.57	2.29
Subcuenca_6	45903.83	0.050	240.56	4.01
Subcuenca_7	45521.19	0.052	235.23	3.92
Subcuenca_8	19833.39	0.051	124.72	2.08
Subcuenca_9	49254.62	0.046	260.80	4.35

FUENTE: Elaboración propia

3.3.7 POLÍGONOS DE THIESSEN

Para el cálculo de la precipitación areal se usó el método de Thiessen mediante el cual se crearon los polígonos en ArcGIS con el comando «Create Thiessen Polygons», ubicado en Analysis tools/Proximity. Para esto se partió de la distribución espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio. Con estos polígonos se obtuvo el área de influencia que tienen las estaciones pluviométricas sobre cada una de las subcuencas.

Figura 13: Polígonos Thiessen de la cuenca en estudio



FUENTE: Elaboración propia

3.3.8 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Para el análisis de frecuencia se utilizó la información pluviométrica, obtenida de ocho estaciones meteorológicas (Challaca, Chocorvos, Córdova, Cusicancha, San Camilo Tambo). Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas correspondieron al periodo de 1965 al 2012. Además se analizó la información hidrométrica de la Estación La Achirana. Los caudales máximos anuales en 24 horas se registraron desde el 2002 al 2012.

Se utilizó un modelo probabilístico de distribución de Valor Extremo Tipo I (Gumbel) o distribución doble exponencial. Debido a que se evaluaron eventos extremos que incluyeron la selección de datos hidrometeorológicos máximos a partir de una secuencia de observaciones registradas.

La función de distribución de probabilidad de Valor Extremo Tipo I (VEI), tiene la forma:

$$F(X) = e^{-e^{-(x-u)/\alpha}}$$

Donde:

$F(x)$ = Probabilidad de que se presente un valor menor que X .

e = base de los logaritmos neperianos

α ; μ = parámetros de la función.

Los parámetros de ajuste se estiman como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} * s}{\pi}$$

$$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha$$

Siendo:

\bar{x} = media aritmética de la muestra

S = desviación típica de la muestra

Para el cálculo de la precipitación máxima que se producirá para un determinado periodo de retorno, se realizaron las siguientes ecuaciones.

$$P(x < x_T) = 1 - \frac{1}{T}$$

entonces:
$$F(x_T) = \frac{T-1}{T}$$

Luego de la funcion de distribucion de Probabilidad, se despejó la variable X_T .

$$(X_T - u)/\alpha = -\ln(-\ln(F(X_T)))$$

Finalmente se obtiene la expresión:

$$X_T = u - \ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) * \alpha$$

Para la determinación de las precipitaciones máximas en 24 horas, mediante el modelo probabilístico de distribución de Gumbel, se utilizaron los distintos periodos de retorno que se muestran en el cuadro 11.

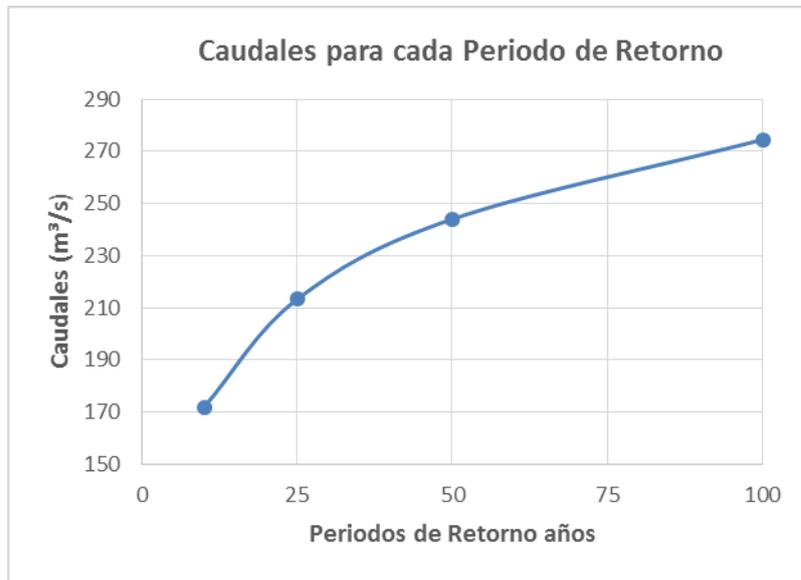
Cuadro 11: Precipitaciones máximas en 24 horas (Método de Gumbel)

T (años)	X _T Precipitacion Maxima (mm.)					
	Challaca	Chocorvos	Cordova	Cusicancha	San Camilo	Tambo
2	12.04	15.07	25.08	15.67	4.17	24.58
5	18.22	24.73	37.82	24.78	8.87	32.93
10	22.32	31.12	46.25	30.82	11.99	38.45
25	27.49	39.20	56.91	38.44	15.92	45.43
50	31.33	45.20	64.82	44.10	18.84	50.61
100	35.14	51.15	72.67	49.72	21.74	55.75
500	43.94	64.90	90.81	62.69	28.44	67.63

FUENTE: Elaboración propia

Del mismo modo se calcularon los caudales para los distintos periodos de retorno por medio del modelo probabilístico de distribución de Valor Extremo Tipo I (Gumbel). Como se muestra en la figura 15, correspondiendo un valor de caudal de 171.9, 213.3, 244 y 274.5 m³/s, para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años respectivamente.

Figura 14: Caudales para cada Periodo de Retorno



Fuente: Elaboración propia

3.3.9 PRUEBA DE AJUSTE

Para determinar el ajuste mediante la distribución de Gumbel de las distintas series de datos de las estaciones meteorológicas; Challaca, Chocorvos, Córdova, Cusicancha, Tambo y la estación hidrométrica La Achirana, se realizó el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

Los datos se ajustaron a la Distribución de Gumbel con una probabilidad del 95 por ciento es decir con un nivel de significación; $\alpha = 0.05$, la hipótesis se ACEPTA debido a que el delta teórico (Dc), es menor que el delta tabular (Dt).

Los datos pluviométricos de la estación Huamaní, en cambio, no aprobaron la hipótesis con un nivel de significación; $\alpha = 0.05$, debido a que el delta teórico fue mayor que el delta tabulado por tabla. Por lo tanto al no ajustarse a la Distribución de Gumbel, no fue tomado en cuenta para el estudio.

Cuadro 12: Ajuste de los datos hidrometeorológicos a la Distribución Gumbel

ESTACIONES	FUNCION DE GUMBEL AJUSTADA	TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV		
		Dt	Dc	Resultado
PLU-CHALLACA	$e^{-e^{-0.1833(x-10.038)}}$	0.1963	0.0703	ACEPTA
PLU-CHOCORVOS	$e^{-e^{-0.1173(x-11.9456)}}$	0.1963	0.0862	ACEPTA
PLU-CORDOVA	$e^{-e^{-0.08895(x-20.955)}}$	0.1963	0.0593	ACEPTA
PLU-CUSICANCHA	$e^{-e^{-0.12434(x-12.7202)}}$	0.1963	0.1064	ACEPTA
PLU-SAN CAMILO	$e^{-e^{-0.24093(x-2.6459)}}$	0.1963	0.1304	ACEPTA
PLU-TAMBO	$e^{-e^{-0.1358(x-21.8857)}}$	0.1963	0.0659	ACEPTA
HLG-ACHIRANA	$e^{-e^{-0.0229(x-73.6038)}}$	0.3926	0.2214	ACEPTA

FUENTE: Elaboración propia

3.3.10 ELABORACIÓN DE LAS CURVAS I-D-F

La realización de los procedimientos precipitación – escorrentía, para utilizarse en el diseño del sistema hidrológico, requirió la obtención de precipitaciones instantáneas, que conformen la entrada al Modelamiento Hidrológico en el HEC-HMS. Para esto se elaboraron las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, mediante las cuales se definieron los histogramas de diseño que determinaron la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta

Las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia Curvas IDF, se representaron matemáticamente mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n}$$

Donde:

I = Intensidad máxima (mm/h)

T = Período de retorno en años

t = Duración de la precipitación (min.)

K, m, n = Parámetros de ajuste

Se igualó: $d = K * T^n$; obteniendo: $I = \frac{d}{t^n}$, luego: $I = d * t^{-n}$

En donde se obtuvo una expresión, con la forma de la ecuación de Intensidad, con la cual se iniciaron las regresiones potenciales.

a. PRIMERA REGRESIÓN

Se partió de los datos de precipitación máximas en 24 horas, para los diferentes tiempos de retorno, obtenidos por el Método de Gumbel.

Estos datos de precipitación máximas fueron calculados para una duración de lluvia de 24 horas, por lo tanto deben de ser reducidos a tiempos de duraciones en horas, para lo cual se los multiplicó por unos coeficientes. Ver Cuadro 13.

Cuadro 13: Coeficientes para las precipitaciones máximas

Duración (horas)	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Coefficientes	0.25	0.31	0.38	0.44	0.50	0.56	0.64	0.79	0.90	1.00

FUENTE: MTC. Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. 2003

Debido a que se consideró una tormenta de duración como máximo de seis horas para la zona de estudio, sólo se utilizaron los coeficientes respectivos, obteniendo la precipitación máxima para una duración de tormenta de seis horas .Ver cuadro 14.

Cuadro 14: Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración

Tiempo de duracion hr	Cociente	Precipitacion maxima mm por tiempos de duracion						
		2	5	10	25	50	100	500
24	1	15.0690	24.7279	31.1230	39.2032	45.1975	51.1476	64.8973
6	0.61	9.1921	15.0840	18.9850	23.9139	27.5705	31.2000	39.5874
5	0.57	8.5893	14.0949	17.7401	22.3458	25.7626	29.1541	36.9915
4	0.52	7.8359	12.8585	16.1840	20.3857	23.5027	26.5968	33.7466
3	0.46	6.9317	11.3749	14.3166	18.0335	20.7909	23.5279	29.8528
2	0.39	5.8769	9.6439	12.1380	15.2892	17.6270	19.9476	25.3100
1	0.3	4.5207	7.4184	9.3369	11.7610	13.5593	15.3443	19.4692

FUENTE: Elaboración propia

Luego se calculó la Intensidad al dividir las precipitaciones obtenidas por los tiempos de duración (ver Cuadro 15). Como resultado de la primera regresión se obtuvieron los parámetros «d» y «n».

Cuadro 15: Intensidad (mm/h) para diferentes tiempos de duración

Tiempo (Hr)	Intensidad de la Precipitación (mm/hr) según el Tiempo de Duración						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24	0.628	1.030	1.297	1.633	1.883	2.131	2.704
6	1.532	2.514	3.164	3.986	4.595	5.200	6.598
5	1.718	2.819	3.548	4.469	5.153	5.831	7.398
4	1.959	3.215	4.046	5.096	5.876	6.649	8.437
3	2.311	3.792	4.772	6.011	6.930	7.843	9.951
2	2.938	4.822	6.069	7.645	8.814	9.974	12.655
1	4.521	7.418	9.337	11.761	13.559	15.344	19.469

FUENTE: Elaboración propia

b. SEGUNDA REGRESIÓN

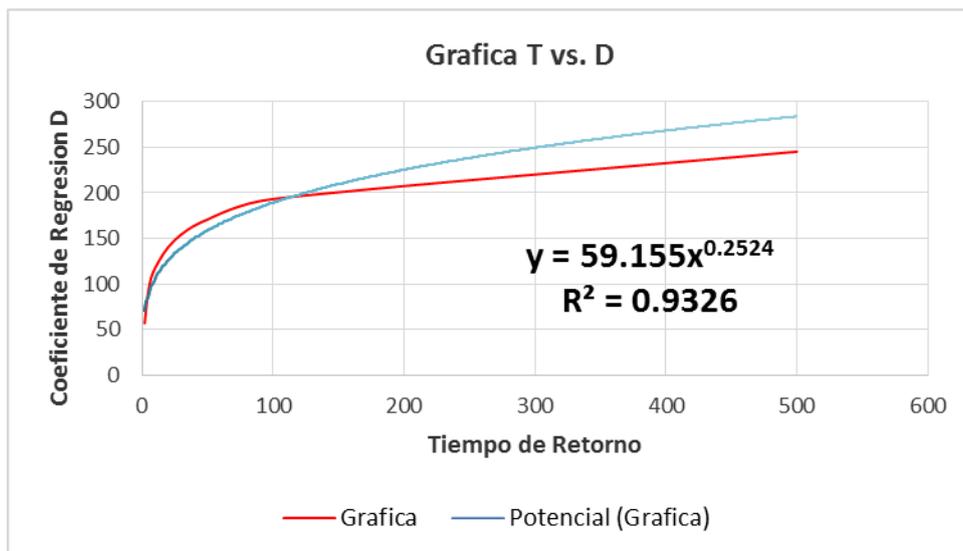
En función al cambio de variable se realizó una nueva regresión potencial, a partir de los resultados obtenidos en la primera regresión potencial. En la cual se incluyeron los Tiempos de Retorno y el coeficiente de regresión d (ver Cuadro 16). De modo que se obtuvieron las variables k; m. Completando así el cálculo de los parámetros para la formulación de las ecuaciones de las Curvas I-D-F (ver Cuadro 17).

Cuadro 16: Resultados de la primera regresión

Resumen de aplicación de Regresion Potencial		
Periodo de Retorno (años)	Coficiente de regresión (D)	Coficiente de regresión (n)
2	56.9687	-0.616
5	93.4846	-0.616
10	117.6613	-0.616
25	148.2086	-0.616
50	170.8704	-0.616
100	193.3648	-0.616
500	245.3460	-0.616
Promedio		-0.616

FUENTE: Elaboración propia

Figura 15: Gráfica de la Regresión Potencial T vs. D



FUENTE: Elaboración propia

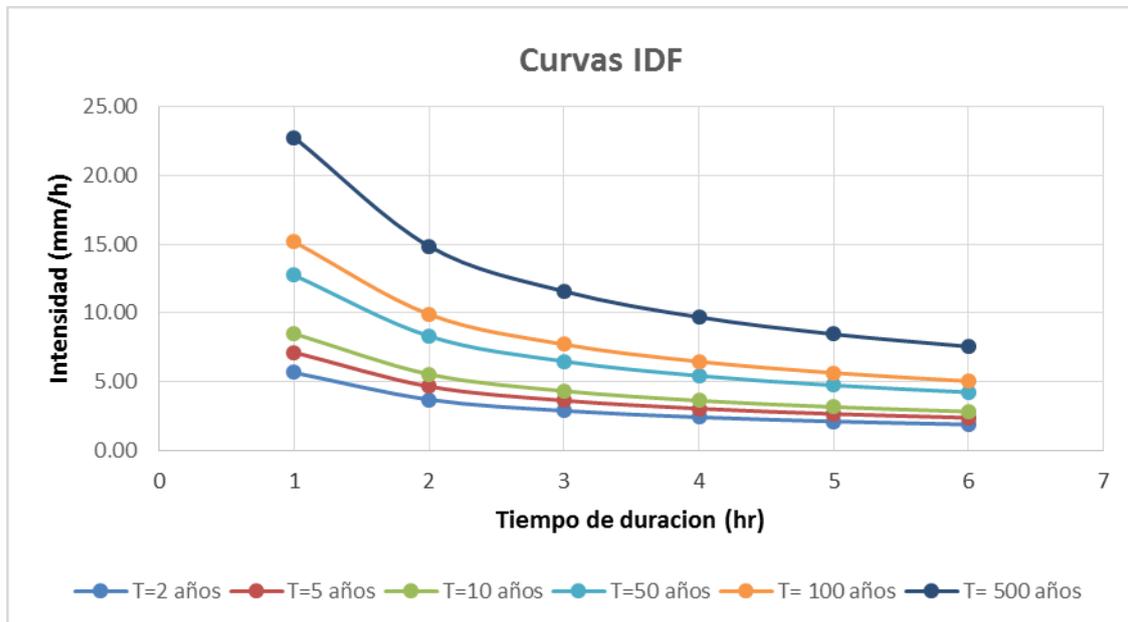
Cuadro 17: Cuadro de ecuaciones de Curvas I-D-F

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia				
ESTACIONES	Parámetros de Ajuste			Ecuaciones I-D-F
	k	m	n	
CO-CHALLACA	46.13	0.225	0.616	$I = 46.13 * T^{0.225} * t^{-0.616}$
CO-CHOCORVOS	59.16	0.252	0.616	$I = 59.16 * T^{0.252} * t^{-0.616}$
CO-CORDOVA	96	0.224	0.616	$I = 96 * T^{0.224} * t^{-0.616}$
CO-CUSICANCHA	60.81	0.241	0.616	$I = 60.81 * T^{0.241} * t^{-0.616}$
CO-SAN CAMILO	17.95	0.325	0.616	$I = 17.95 * T^{0.325} * t^{-0.616}$
CO-TAMBO	91.48	0.178	0.616	$I = 91.48 * T^{0.178} * t^{-0.616}$

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 17 se puede apreciar cómo se representaron gráficamente las Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia para distintos periodos de retorno y una duración de tormenta de seis horas.

Figura 16: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia



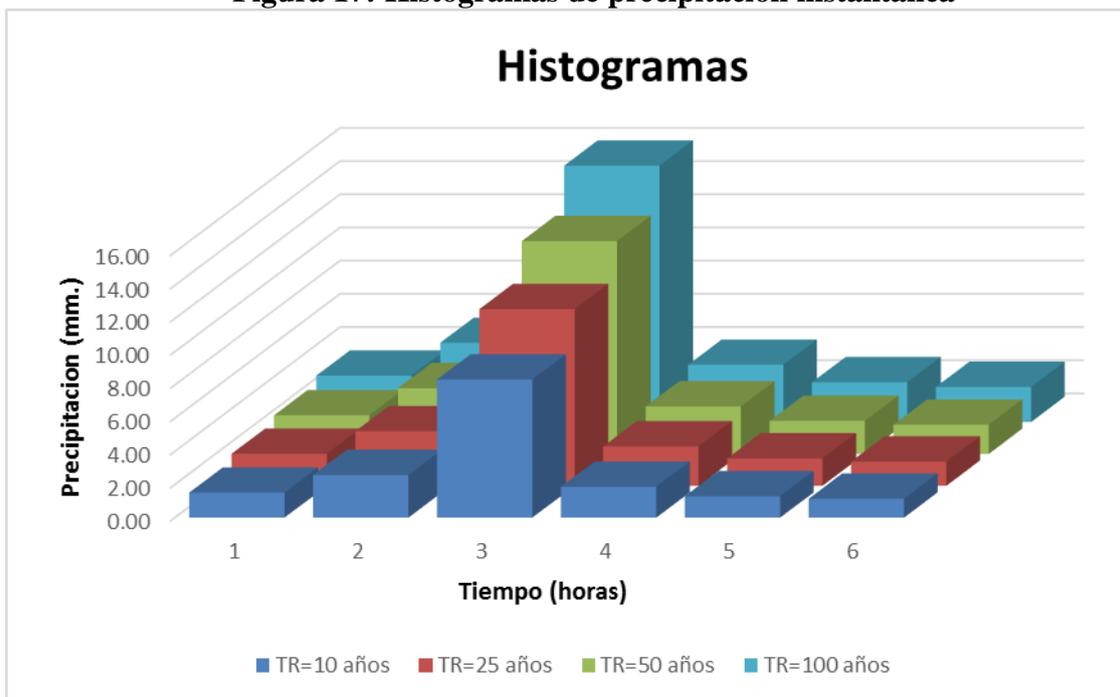
FUENTE: Elaboración propia

3.3.11 HISTOGRAMA DE PRECIPITACIONES INSTANTANEAS

Los histogramas de precipitaciones instantáneas se calcularon a partir las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, para distintos periodos de retorno y una duración de tormenta de seis horas para cada estación pluviométrica, mediante el método de los bloques alternos. Este método resulto ser una forma simple para desarrollar un histograma de diseño utilizando una curva-duración-frecuencia.

El histograma producido por este método especificó la profundidad de precipitación en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Dt , sobre una duración total de $Td = n.Dt$. Después de haber seleccionado el periodo de retorno, la intensidad fue leída en una curva IDF para cada una de las duraciones $Dt, 2Dt, 3Dt, 4Dt, \dots$ y la profundidad de precipitación correspondiente se determinó al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encontró la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Dt . Estos incrementos o bloques se reordenaron en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida Td y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central. Las precipitaciones instantáneas obtenidas para los distintos periodos se muestran en el anexo 2.

Figura 17: Histogramas de precipitación instantánea



FUENTE: Elaboración propia

3.3.12 CÁLCULO DE LAS ABSTRACCIONES

Para el cálculo de las abstracciones o pérdidas, primeramente se determinó el Curve Number (CN) correspondiente a la zona específica en estudio y luego se utilizó el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

a. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

El Número de Curva se determinó empleando el software ArcGIS, partiendo de la información obtenida del Mapa de Uso del suelo y el Mapa de Tipo del Suelo, propios de la zona de estudio.

MAPA DE USO DEL SUELO

Mediante el Mapa de uso del suelo se determinó el impacto, producido por la presencia o ausencia de cubierta vegetal, en la velocidad con que escurre el agua en la cuenca, además de la cantidad de agua infiltrada en el suelo y la cantidad de agua interceptada.

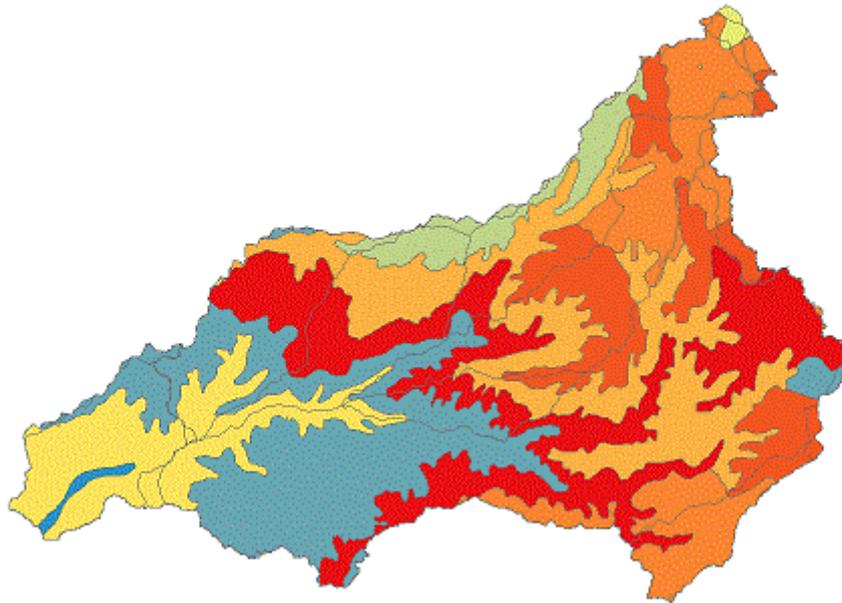
Para la representación cartográfica del uso del suelo en la cuenca, se utilizó la herramienta ArcGIS.

MAPA DE TIPO DEL SUELO

Para el uso del Mapa de Tipo de Suelo se realizó la clasificación definida por el Soil Conservation Service:

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelo salinos.

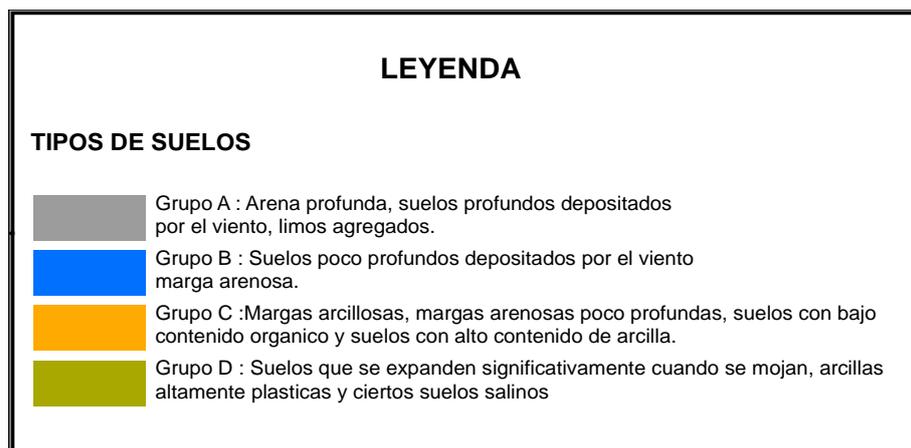
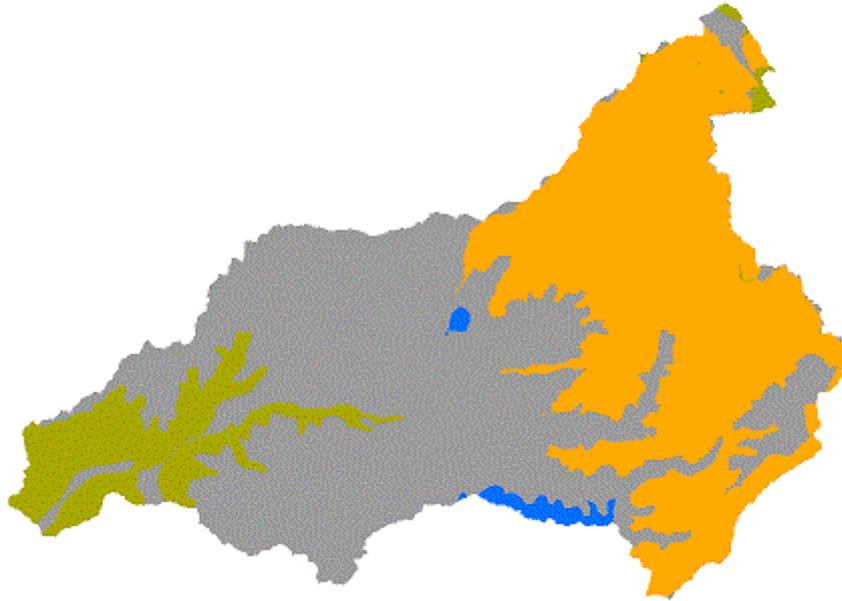
Figura 18: Mapa de Uso de Suelo de la Cuenca



LEYENDA	
DESCRIPCION	
	Cultivos en Limpio, Calidad Agrologica Alta - Cultivos Permanentes.
	Laguna
	Nevado
	Pastoreo de paramo, Calidad Agrologica Baja - Proteccion. Limitacion por suelo y erosion
	Pastoreo de paramo, Calidad Agrologica Media. Proteccion. Limitacion por suelo, erosion y clima.
	Proteccion (formacion de nivales)
	Proteccion (formacion litica)
	Proteccion (limitacion por suelo y erosion)
	Proteccion - Pastoreo - Cultivos en Limpio. Calidad Agrologica Baja, limitacion por suelo.
	Proteccion - Pastoreo de paramo, Calidad Agrologica Baja, limitacion por suelo, erosion y clima.
	Proteccion - Pastoreo, Calidad Agrologica Baja - Cultivos en Limpio, Calidad Agrologica Baja.

FUENTE : PETACC (Proyecto Especial Tambo Ccaracocho)

Figura 19: Mapa de Tipo de Suelo de la Cuenca



FUENTE : PETACC (Proyecto Especial Tambo Ccaracocha)

MAPA DEL NÚMERO DE CURVA

El Número de Curva se obtuvo por medio del comando «Generate CN Grid » ubicado en la barra de herramientas del HEC-GeoHMS.

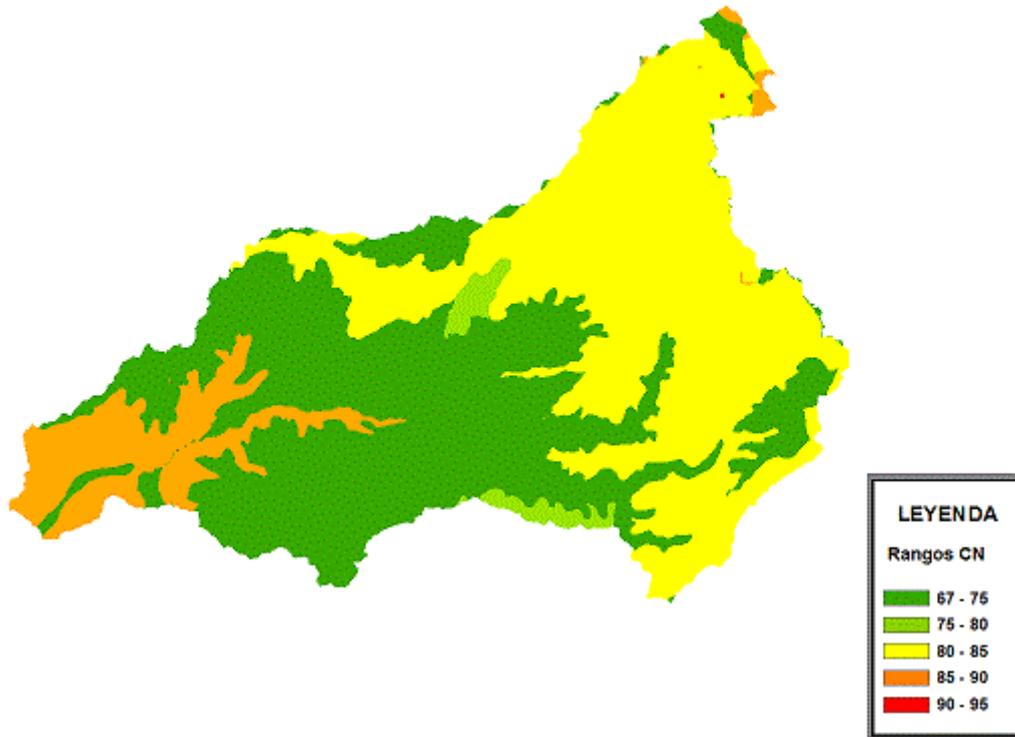
El procesamiento sistematizado de este comando del ArcGIS consistió en vincular los usos reales del suelo y los grupos hidrológicos del suelo, de tal manera que se generó un Número de Curva para cada combinación. Como referencia se utilizaron los valores de una tabla, que el Soil Conservation Service elaboró, en la cual para una cuenca compuesta por varios tipos de suelo con diferente uso de este, se puede calcular un CN compuesto. El CN de cada subcuenca según su porcentaje de área se presenta en el Anexo 3.

Cuadro 18: Número de Curva para complejos hidrológicos suelo-cubierta

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA	GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : 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,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
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 ³ :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

FUENTE : Soil Conservation Service, 1972

Figura 20: Mapa de Clasificación de los Número de Curva



FUENTE : Elaboración propia

Luego se relacionó el Número de Curva con la retención potencial máxima S mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (SI)$$

b. MÉTODO DEL SCS PARA ABSTRACCIONES

Se utilizó el método del Soil Conservation Service (SCS), desarrollado en 1972, para el cálculo de las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para esto se asumió la hipótesis, que consistió en que las relaciones de las dos cantidades reales (P_e , F_a) y las dos cantidades potenciales (P , S) fuesen iguales.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Donde:

P = precipitación total

P_e = exceso de precipitación

F_a = abstracción continuada

I_a = abstracción inicial

S = retención potencial máxima

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando las ecuaciones anteriores y resolviendo para P_e , se resolvió:

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

La cual fue la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de la precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método SCS.

Finalmente se utilizó la ecuación empírica desarrollada por el SCS para el cálculo de abstracciones, a partir de la retención potencial máxima.

$$I_a = 0.2S$$

:

3.3.13 APLICACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO HEC-HMS

Por medio del HEC-HMS se simuló la escorrentía superficial que resultó del producto de la precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos.

Los elementos hidrológicos se ubicaron en una red de cauces y los cálculos se procesaron en secuencia de aguas arriba hacia aguas abajo.

El modelo HEC-HMS se aplicó para la obtención de los caudales máximos para distintos periodos de retorno. Se generaron hidrogramas de caudales máximos, para una tormenta de 6 horas, en su punto de descarga, la estación hidrométrica, La Achirana.

Para la aplicación del HEC-HMS se utilizaron cuatro de sus principales componentes:

- El Modelo de la Cuenca (*Basin Model*).
- Series de Datos Instantáneos (*Time Series Data*).
- El Modelo Meteorológico (*Meteorologic Model*).
- Especificaciones de control (*Control Specifications*).

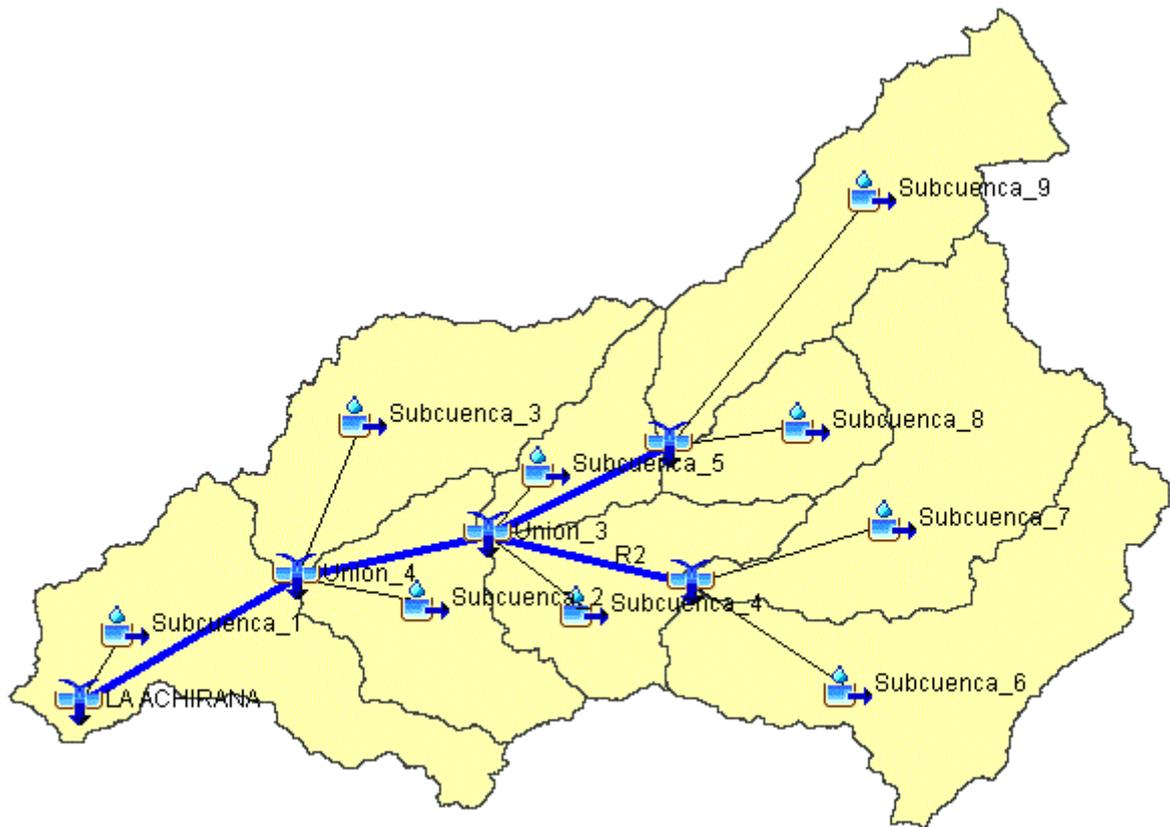
a. MODELO DE LA CUENCA

El modelo representó una cuenca como un sistema de componentes interconectados; es decir, como un sistema hidrológico. Cada componente modeló un aspecto del proceso precipitación-escorrentía dentro de cada subcuenca; entre estos componentes se tuvo la escorrentía superficial en la subcuenca (subbasin), el tránsito en ríos o canales (reach), y los puntos de salida, análisis y combinación de hidrogramas (junction).

En el desarrollo del modelo, la cuenca fue dividida en subcuencas. Esto se realizó con la finalidad de representar la variación de las características físicas de la cuenca, como la pendiente, la tasa de infiltración, la precipitación, entre otros.

El Modelo Hidrológico desarrollado para la cuenca integral del Río Ica, se conformó por nueve componentes de escorrentía superficial, cuatro componentes de tránsito de caudales y cinco puntos de combinación de hidrogramas. Su esquema de funcionamiento se muestra en la figura 22.

Figura 21: Esquema de Funcionamiento del Modelo Hidrológico



FUENTE: Elaboración propia

Mediante estos componentes el HEC-HMS realizó el cálculo de la escorrentía directa al cuál se le fue adicionado el flujo base para obtener el hidrograma de caudales de la cuenca mediante la sistematización de los siguientes métodos matemáticos.

MÉTODO DE CLARK UNIT HYDROGRAPH

Mediante este método se determinó el hidrograma unitario de la cuenca, transformando el exceso de precipitación en escorrentía directa. En este procedimiento se ingresaron los tiempos de concentración (t_c) de cada subcuenca.

MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

Con este método se calculó el exceso de precipitación, el cual es el producto de restar las abstracciones de la precipitación. En este procedimiento se ingresaron las abstracciones iniciales (I_a) y números de curva (CN) de cada subcuenca.

MÉTODO DE RECESIÓN CONSTANTE DEL FLUJO BASE

El hidrograma de caudal de la cuenca, está compuesto por la suma del hidrograma de escorrentía directa y el flujo base. Este método se utilizó para obtener el drenaje de almacenamientos naturales de las subcuencas. Para la constante de recesión se utilizó el valor de 0.6 por ser un flujo superficial.

b. SERIES DE DATOS INSTANTÁNEOS

Por medio del comando Time Series Data se ingresaron las series de datos de precipitación instantáneas calculadas a partir de las Curvas IDF y los caudales para la calibración del modelo.

c. MODELO METEOROLÓGICO

Con el modelo meteorológico se calculó la precipitación areal sobre cada subcuenca. Este modelo estuvo vinculado con la realización de los polígonos de Thiessen, ya que permitió el ingreso del porcentaje de influencia de las estaciones pluviométricas en cada subcuenca. Al emplear este método, se agregaron los siguientes datos en cada subcuenca. Las estaciones cuyas áreas de influencia estaban contenidas dentro de la subcuenca, y los pesos relativos de cada estación.

d. ESPECIFICACIONES DE CONTROL

En las especificaciones de control se estableció la fecha y hora del inicio y término del cómputo del modelo, y el intervalo de tiempo del mismo para los tiempos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

3.3.14 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

El procedimiento realizado para la calibración del modelo hidrológico siguió una metodología básicamente iterativa (ver figura 23), que consistió en lo siguiente.

Se ingresaron los caudales máximos para los distintos periodos de retorno, obtenidos a partir del modelo probabilístico de la distribución de Gumbel.

Cuadro 19: Caudales ingresados para la calibración del modelo

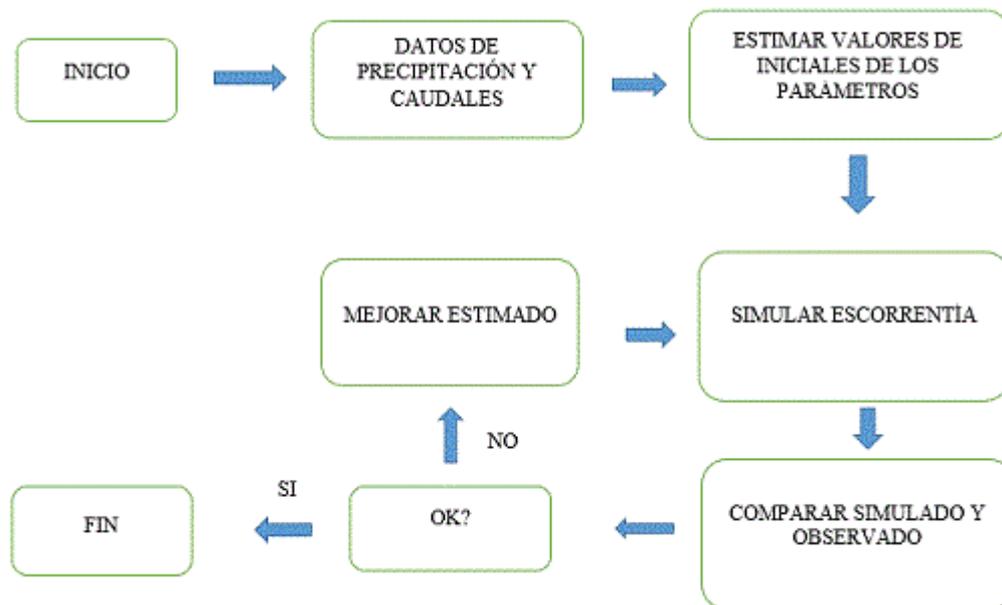
Periodo Retorno	Caudales
años	Q(m³/s)
10	171.87
25	213.27
50	243.98
100	274.47

FUENTE: Elaboración propia

Luego de correr el programa, se obtuvieron los caudales pico de los hidrogramas resultantes de la cuenca, simulados por el HEC-HMS. Luego estos son comparados con los caudales mencionados en el cuadro anterior, de modo que la diferencia entre estos fuese la mínima posible.

Durante el proceso iterativo de la calibración, se observó cómo varía el hidrograma de caudales al modificar la abstracción inicial de modo que al aumentarla, los caudales en el punto de descarga disminuyen y viceversa. En el cuadro 20 se muestran las abstracciones iniciales (Ia) calibradas.

Figura 22: Procedimiento de calibración



FUENTE: HEC-HMS Technical Reference Manual. 2000

Cuadro 20: Resumen de la calibración de las abstracciones iniciales

Descripción	Calibración de las Abstracciones Iniciales			
	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100
Subcuenca 1	14.2	14.2	14.2	14.2
Subcuenca 2	22.2	22.2	22.2	22.2
Subcuenca 3	17.9	17.9	17.9	17.9
Subcuenca 4	23.6	23.6	23.6	23.6
Subcuenca 5	19.4	19.4	19.4	21.5
Subcuenca 6	14.8	14.8	17.0	22
Subcuenca 7	10.2	13.0	16.5	22
Subcuenca 8	10.7	13.0	16.5	21.5
Subcuenca 9	9.0	12.7	16.5	20.5

FUENTE: Elaboración propia

Para optimizar los parámetros del modelo se utilizó una función objetivo propio del HEC-HMS, denominado Error Porcentual de Caudales Pico.

Esta función determinó el ajuste del valor pico del hidrograma calculado con el del observado. Cuantificó el ajuste como el valor absoluto de la diferencia de los caudales picos, expresado en porcentaje. Su ecuación es la siguiente:

$$Z = 100 \left| \frac{q_s(\text{pico}) - q_o(\text{pico})}{q_o(\text{pico})} \right|$$

Donde:

q_s = Caudal simulado

q_o = Caudal observado

Cuadro 21: Resumen del error porcentual del caudal pico

Cuadro resumen del Error Porcentual de los caudales pico			
Tiempo de Retorno	Condiciones medias de la humedad del suelo		
	QMAX Observado (m ³ /s)	QMAX Simulado (m ³ /s)	Z (%)
10	171.9	171.3	0.35
25	213.3	212.5	0.36
50	244.0	243.3	0.28
100	274.5	274.1	0.14

FUENTE : Elaboración propia

Una vez aplicado el modelo hidrológico, del cual se obtuvo como resultado los caudales máximos para los tiempos de retorno de 10, 25, 50, 100 años. Lo siguiente fue ver como transitan dichas avenidas a lo largo del cauce, aguas abajo de la estación hidrométrica La Achirana y analizar cuáles son las zonas vulnerables ante un eventual desborde del río.

3.3.15 APLICACIÓN DE LA EXTENSION HEC-GEORAS

El HEC-GeoRAS es una extensión que se aplica al ArcGIS, para su compatibilidad con el software HEC-RAS. Con esta herramienta se crearon varias capas mediante el comando Create RAS Layers para la elaboración de los archivos raster de la geometría del cauce del río.

a. LÍNEA DEL CAUCE

Con el comando «Stream Centerline» se creó el layer del cauce del río. Se utilizó por defecto el nombre river. Luego, mediante un fichero vectorial de líneas en una geodatabase, se digitalizó el eje del río, en dirección de aguas arriba hacia aguas abajo. Para este análisis se tomó en consideración las zonas que atraviesa el río, al seguir su curso dentro del ámbito del valle de Ica.

b. LÍNEAS DE BANCO

Por medio del comando «Bank Lines» se creó el layer de los bordes del cauce del río. Se generó la capa y luego se procedió a digitalizarla del mismo modo como se hizo con el eje del río.

c. LÍNEAS DE CENTRO DEL SOBREFLUJO

Con el comando «FlowPath Centerlines» se creó el layer de las márgenes que definen los límites superiores del río. Se caracterizó y clasificó a cada FlowPath para definir su tipo, es decir, flujo en el cauce, flujo en el banco derecho o izquierdo. Para esto se utilizó la herramienta «Assing Line Type».

d. LÍNEAS DE CORTE DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Por medio del comando «XS Cut Lines» se creó el layer de las secciones transversales. Luego de que se generó la capa XS Cut Lines se procedió a realizar la digitalización utilizando el editor de forma automática con la herramienta «Construct XS Cut Lines».

e. CREACIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL CAUCE

Con el comando «Stream Center Line Attributes» se creó los atributos como la topología longitud y elevación, obteniéndose como resultado la capa River 3D.

f. CREACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Por medio del comando «XS Cut Line Attributes» se creó los atributos, al igual que el caso anterior, se generó las secciones transversales en 3D, obteniéndose la capa XS CutLines3D.

g. EXPORTAR DE ARCGIS A HEC-RAS

Con el comando «Export RAS Data» se exportó los archivos generados en ArcGIS, para ser utilizados en el HEC-RAS.

3.3.16 APLICACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRAULICO HEC-RAS

Luego de haber creado los layers de la geometría del río, se procedió a crear el Modelo Hidráulico en el *software* HEC-RAS, mediante el cual se simuló la escorrentía superficial en el valle del río Ica, generada por los caudales máximos, para los distintos periodos de retorno, calculados para la estación La Achirana.

a. CREACIÓN DEL PROYECTO

Una vez ingresado al HEC-RAS, se creó el proyecto con la herramienta «New Project».

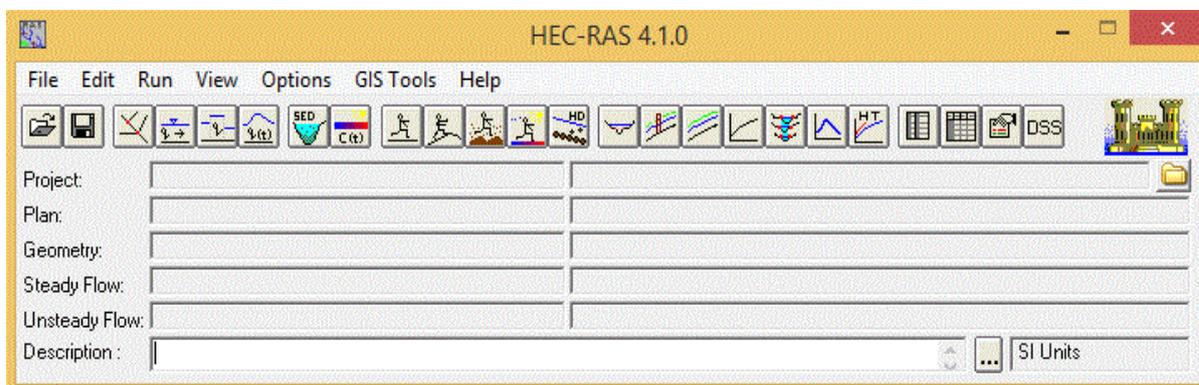


Figura 23: Creación del Proyecto

b. GEOMETRÍA DEL CAUCE

Mediante el comando «Geometric Data», se importó el archivo con los datos geométricos del cauce del río generado anteriormente en ArcGIS. Luego se incorporó las características propias del río, como los valores del coeficiente de rugosidad de Manning con el comando «Manning's values». En este caso se usó el coeficiente de Manning para ríos principales regulares, $n= 0.03$ por presentar cantos rodados en el lecho del río. Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow, 1983.

c. DATOS DE FLUJO

Con el comando «Steady Flow Data», se ingresó los datos de caudales para los tiempos de retorno obtenidos en el HEC-HMS.

Cuadro 22: Datos de Flujo

TR (años)	CAUDAL (m³/s)
10	171.30
25	212.50
50	243.30
100	274.10

FUENTE: Elaboración propia

Luego se ingresó las condiciones límites que son necesarias en la simulación, para esto se utilizó el comando «Steady Flow Boundery Conditions», en la cual se seleccionó la condición de borde de profundidad normal (Normal Depth), que para el caso del río Ica fue del cinco por ciento.

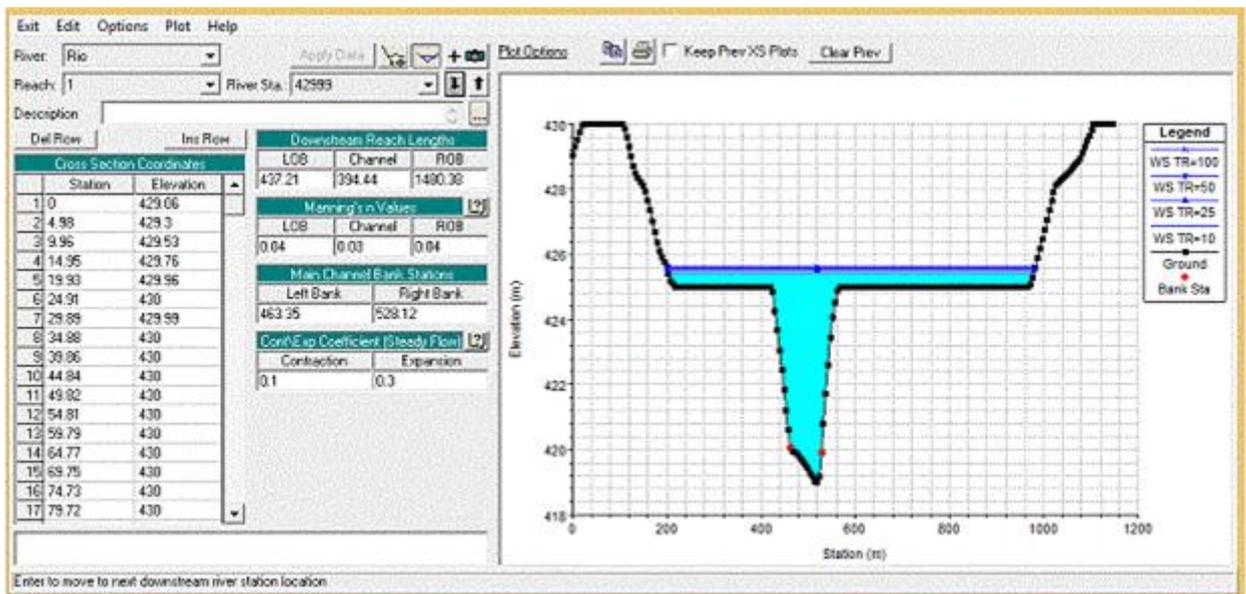
d. SIMULACIÓN DEL MODELO

Finalmente se corrió el programa con el comando «Steady Flow Analysis», obteniéndose como resultado la simulación del modelo hidráulico para unos supuestos eventos de máximas avenidas, en donde se aprecia principalmente la variación del nivel del cauce del río Ica según el tiempo de retorno que se seleccione.

e. IDENTIFICACION DE LAS SECCIONES DE DESBORDE

Para identificar las zonas que presentan vulnerabilidad a desborde del río se realizó un procedimiento que se basó en analizar los 111 cortes transversales, trazados a lo largo de 52 kilómetros del río, pertenecientes al valle de Ica, con una distancia entre cada tramo de aproximadamente 500 metros. Este análisis se realizó utilizando la capa XS Cut Lines y la geometría del cauce. Para esto se ingresó al HEC RAS y se utilizó la herramienta Cross Section.

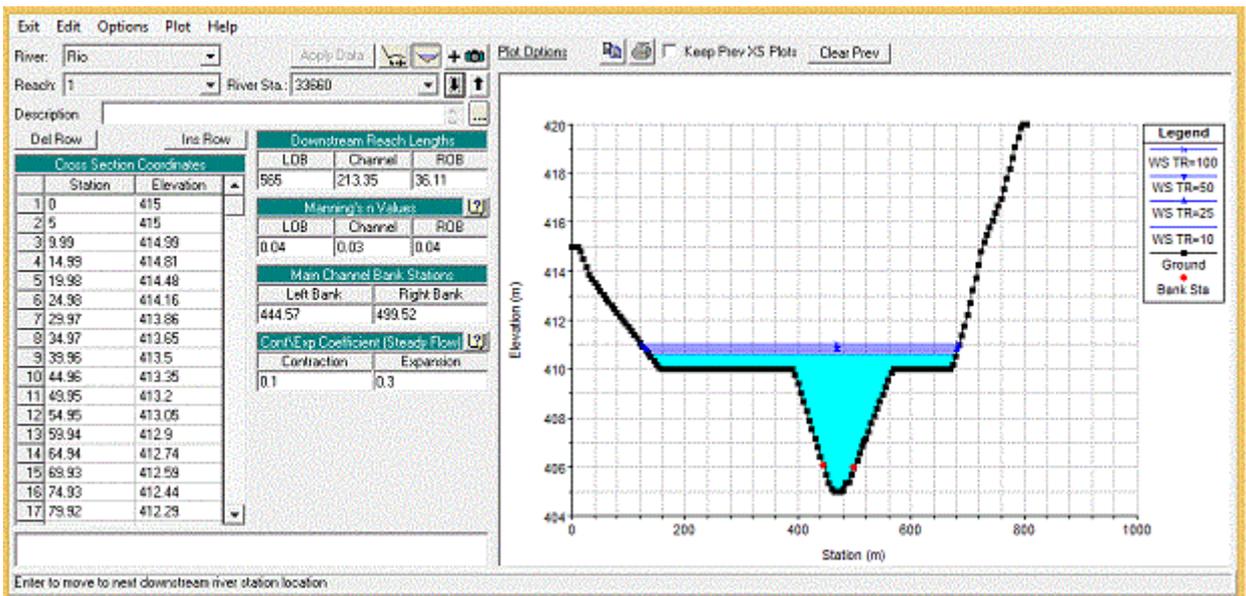
Figura 24: Identificación de la primera sección de desborde



FUENTE: Elaboración propia

Siguiendo con el procedimiento, se identificó la segunda sección vulnerable a desborde del río Ica, ubicándose a unos 22.5 km, aguas debajo de la estación La Achirana. Como se puede apreciar en la figura 26 se muestra el perfil de la sección transversal, el cual presenta una profundidad del río de cinco metros. Este procedimiento se realizó en las 111 secciones transversales de modo que se realizó un análisis a cada una de estas, además gracias a que el modelo hidráulico HEC-RAS procesó la información topográfica en formato DEM (modelo de elevación digital).

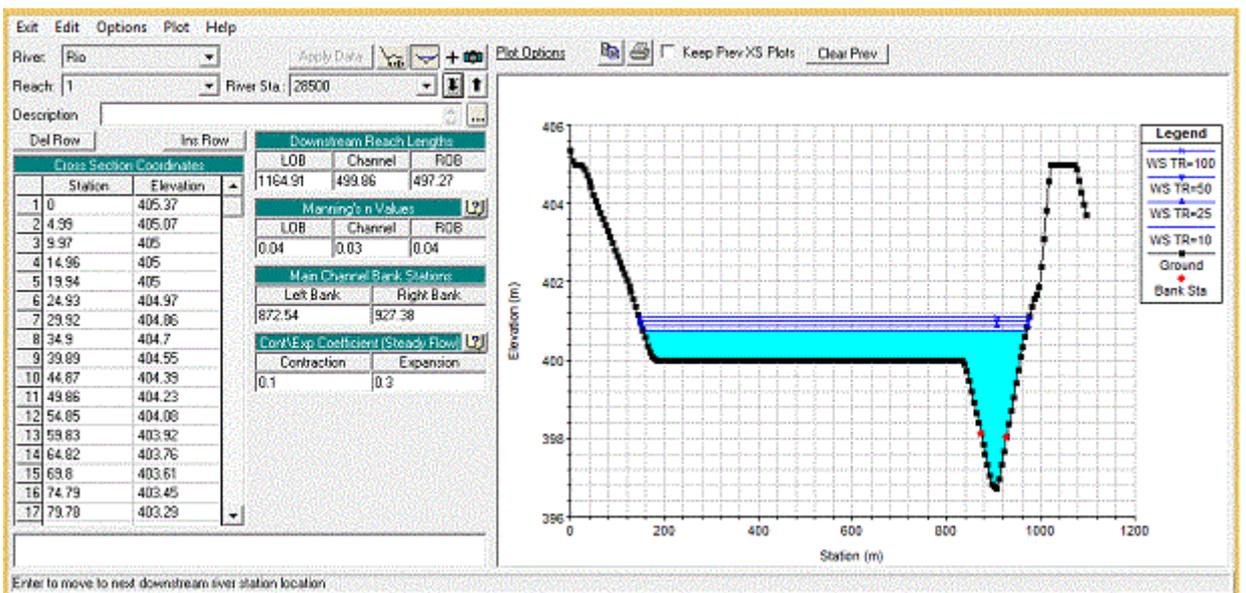
Figura 25: Identificación de la segunda sección de desborde



FUENTE: Elaboración propia

Finalmente se identificó la tercera sección de desborde, a unos 28 km. de la estación la Achirana, a partir de la geometría del río y los cortes transversales realizados. Como se puede apreciar en la figura 27, el análisis realizado se basó básicamente en la disposición topográfica del terreno, mostrando un desborde del río en su margen izquierda, lo que no sucedió en la margen derecha, al presentar una pendiente mayor en dicho borde del río. Para ver la ubicación estas tres secciones de desborde, en el ámbito del valle de Ica, ver la figura 28.

Figura 26: Identificación de la tercera sección de desborde



FUENTE: Elaboración propia

3.3.17 CÁLCULO DE LAS AREAS DE INUNDACIÓN

Para el cálculo de las áreas de inundación se utilizó el ArcGIS, al cual se exportaron los archivos generados en el HEC-RAS, luego con el HEC-GeoRAS se obtuvo un archivo *raster*, el cual se superpuso al plano topográfico del lugar. De esta manera se pudo identificar las zonas vulnerables a desbordes del río.

Para este procedimiento se utilizó la herramienta «RAS Mapping», ubicada en el menú del HEC-GeoRAS.

a. IMPORTAR RAS DATA

Con este comando se importó desde ArcGIS, el proyecto realizado en HEC-RAS, para esto se convirtieron los archivos exportados en formato SDF al formato XML, con el comando «Convert RAS Export SDF to XML».

b. GENERACIÓN DE LA SUPERFICIE DE AGUA

Al ingresar al comando «Inundation Mapping», se despliega otro, el «Water Surface Generation», con esta herramienta se obtuvieron los archivos layer y topográficos de la superficie del cauce en estudio.

c. DELINEACIÓN DEL PLANO DE INUNDACIÓN

Ubicado en la misma dirección se ubica el comando «Floodplain Delineation», mediante el cual se obtuvieron los rasters de profundidad del cauce para cada tiempo de retorno.

Luego de aplicar el Modelo Hidrológico y el Modelo Hidráulico con el soporte de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica, es posible obtener las áreas de inundación.

El cálculo de las áreas de inundación se realizó mediante el uso del ArcGIS, con el uso de su extensión HEC-GeoRAS, con la herramienta *Inundation mapping*.

Como resultado de este procedimiento se obtuvo un archivo raster para cada periodo de retorno, mediante el cual se pudo determinar cómo varía el nivel de agua del río a lo largo de su curso dentro del ámbito del valle de Ica. Además se obtuvieron las áreas de desborde del río, como se puede apreciar en el cuadro 23, se muestra un resumen de las áreas de desborde obtenidas, en formato shape file, para los distintos periodos de retorno, a partir de los cuales se determinaron las áreas afectadas en el valle del río Ica.

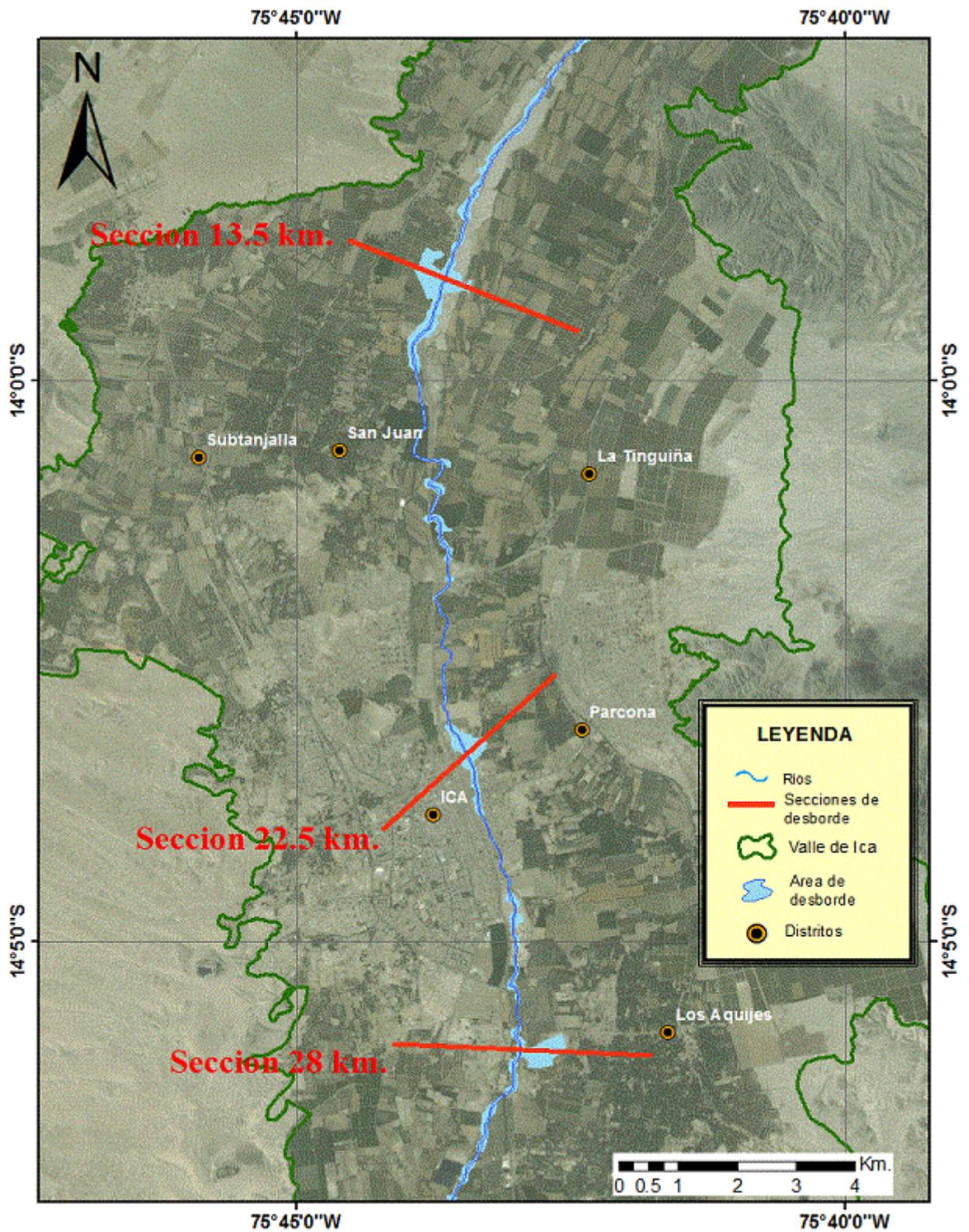
Cuadro 23: Areas de desborde del río en el valle de Ica

Tiempo de Retorno (años)	Area Total	Influencia del río	Areas de desborde	Unidades
10	983.91	164.77	819.14	ha
25	1024.19	164.77	859.42	ha
50	1064.80	164.77	900.03	ha
100	1102.98	164.77	938.21	ha

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 28 se puede apreciar el área total de desborde del río Ica, para un periodo de retorno de 100 años, obtenido en el modelo hidráulico, de esta manera se identificaron tres secciones de desborde, para cada periodo de retorno. Se consideró como punto de partida la estación La Achirana, de modo que fueron categorizadas según su distancia en kilómetros. Las secciones de desborde identificadas fueron denominadas de la siguiente manera: sección 13.5 km., sección 22.5 km y sección 28 km.

Figura 27: Ubicación de las secciones en el valle de Ica



Fuente: Elaboración propia

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INSUMOS PARA EL MODELO HIDROLOGICO

Para la aplicación del modelo hidrológico, se requiere ciertos parámetros, los cuales se calcularon y los resultados se muestran a continuación.

4.1.1 PARÁMETROS GEOMORFOLOGICOS DE LA CUENCA

En el cuadro 24 se muestra un resumen del cálculo de los parámetros geomorfológicos de cada subcuenca, como son el área, la longitud del cauce principal y la pendiente.

Cuadro 24: Parámetros geomorfológicos de las subcuencas

Descripcion	Area (km²)	Longitud del cauce principal (km.)	Pendiente (%)
<i>Subcuenca_1</i>	284.73	43.52	0.0585
<i>Subcuenca_2</i>	177.29	26.47	0.0604
<i>Subcuenca_3</i>	250.50	37.19	0.0585
<i>Subcuenca_4</i>	163.92	28.36	0.0583
<i>Subcuenca_5</i>	94.93	25.18	0.0637
<i>Subcuenca_6</i>	345.11	45.90	0.0496
<i>Subcuenca_7</i>	334.50	45.52	0.0517
<i>Subcuenca_8</i>	108.98	19.83	0.051
<i>Subcuenca_9</i>	287.87	49.25	0.0463

FUENTE: Elaboración propia

4.1.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En el cuadro 25 se pueden apreciar los tiempos de concentración obtenidos para cada subcuenca.

Cuadro 25: Tiempos de concentración de las subcuencas

Tiempo de concentracion para cada Subccuenca	
Descripcion	T_c (hr)
Subcuenca_1	3.61
Subcuenca_2	2.43
Subcuenca_3	3.20
Subcuenca_4	2.60
Subcuenca_5	2.29
Subcuenca_6	4.01
Subcuenca_7	3.92
Subcuenca_8	2.08
Subcuenca_9	4.35

FUENTE: Elaboración propia

4.1.3 POLIGONOS DE THIESSEN

En el cuadro 26 se muestran los porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas en cada subcuenca, en el HEC-HMS se los denomina como pesos relativos.

Cuadro 26: Áreas de los polígonos Thiessen en cada subcuenca

PESOS RELATIVOS DE LAS ESTACIONES EN LAS SUBCUENCAS			
Descripción	Estaciones	Area (km²)	Porcentaje %
Subcuenca_1	San Camilo	53.42	18.76
	Challaca	231.31	81.24
	Total	284.73	100
Subcuenca_2	Challaca	177.29	100
	Total	177.29	100
Subcuenca_3	Tambo	45.30	18.08
	Challaca	205.20	81.92
	Total	250.50	100
Subcuenca_4	Challaca	69.39	42.33
	Chocorvos	94.52	57.66
	Total	163.92	100
Subcuenca_5	Challaca	41.72	43.95
	Tambo	53.05	55.89
	Total	94.93	100
Subcuenca_6	Cordova	50.43	14.61
	Chocorvos	288.37	83.56
	Tambo	6.32	1.83
	Total	345.11	100
Subcuenca_7	Chocorvos	158.66	47.43
	Tambo	175.84	52.57
	Total	334.50	100
Subcuenca_8	Chocorvos	7.88	7.23
	Tambo	101.10	92.77
	Total	108.98	100
Subcuenca_9	Tambo	181.44	63.03
	Cusicancha	106.42	36.97
	Total	287.86	100

FUENTE: Elaboración propia

4.1.4 NUMERO DE CURVA

En el cuadro 27 se muestra un resumen del proceso de determinación del Número de Curva para cada subcuenca, para condiciones medias de humedad del suelo.

Cuadro 27: Numero curva para cada subcuenca

Descripción	Numero de Curva
Subcuenca 1	78.21
Subcuenca 2	69.63
Subcuenca 3	73.93
Subcuenca 4	68.25
Subcuenca 5	72.38
Subcuenca 6	77.45
Subcuenca 7	82.36
Subcuenca 8	76.36
Subcuenca 9	83.80

FUENTE: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

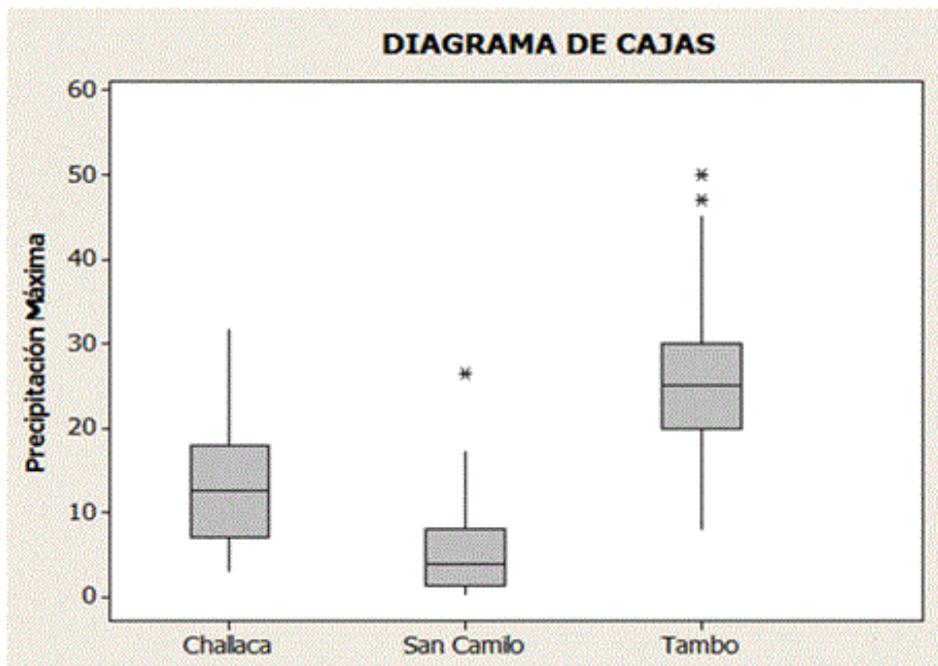
Los resultados del análisis de consistencia de la información pluviométrica se presentan de modo que se muestran los diagramas de cajas y las curvas de doble masa de las estaciones meteorológicas.

4.2.1 ANÁLISIS DE DIAGRAMAS DE CAJAS

En la figura 29 se muestran los diagramas de cajas para las estaciones de Challaca, San Camilo y Tambo. En la primera se puede apreciar que la información pluviométrica se distribuye simétricamente entre el primer cuartil (6.5), la media (12.6) y el tercer cuartil (17.3). Del mismo modo los datos de la estación Tambo muestran una distribución similar entre su media (25) y los cuartiles (20 y 30). Y en la estación San Camilo se puede apreciar de que la información en el primer cuartil (1.3) y la media (3.9) está más concentrada respecto a los datos entre esta y el tercer cuartil (8).

Además se pueden apreciar que la estaciones de San Camilo y Tambo presentan datos atípicos, uno y dos respectivamente, mientras que la estación de Challaca no lo presenta.

Figura 28: Diagrama de Cajas: Challaca, San Camilo y Tambo

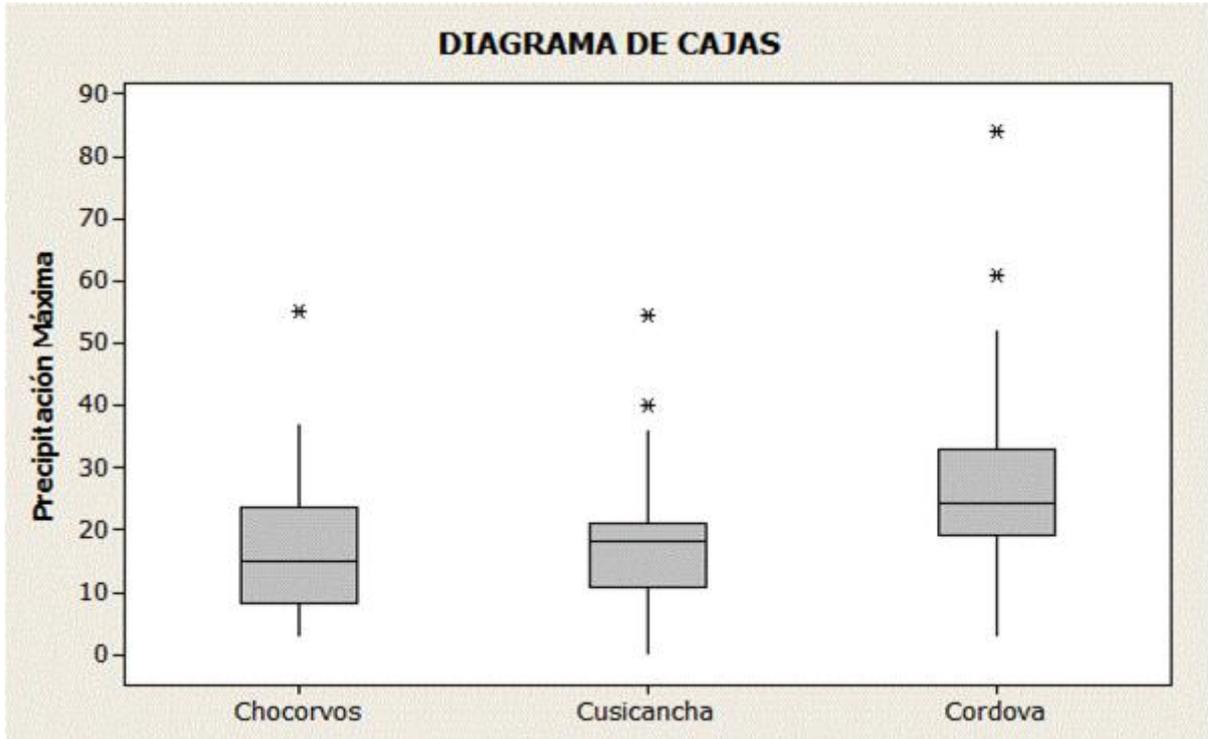


FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestran los diagramas de cajas de las estaciones de Chocorvos, Cusicancha y Córdova. En la primera, se puede apreciar como los datos pluviométricos comprendidos entre el primer cuartil (8.4) y la media (14.9), se encuentran ligeramente más concentrados que los comprendidos entre la media y el tercer cuartil (22.7). En la estación Cusicancha, sus datos se encuentran dispersos entre el primer cuartil (11.1) y la media (18.15), mientras que por otro lado la información pluviométrica está más concentrada entre la media y el tercer cuartil (21). Además se muestra el diagrama de cajas de la estación Córdova en la cual se puede apreciar como sus datos están más concentrados entre el primer cuartil (19.4) y la mediana (24.3) con respecto a los datos comprendidos entre la media y el tercer cuartil (32.5), encontrándose más dispersos.

Además se puede observar que las estaciones de Cusicancha y Córdova presentan dos datos atípicos, mientras que la estación de Chocorvos sólo uno.

Figura 29: Diagrama de Cajas: Chocorvos, Cusicancha y Córdova

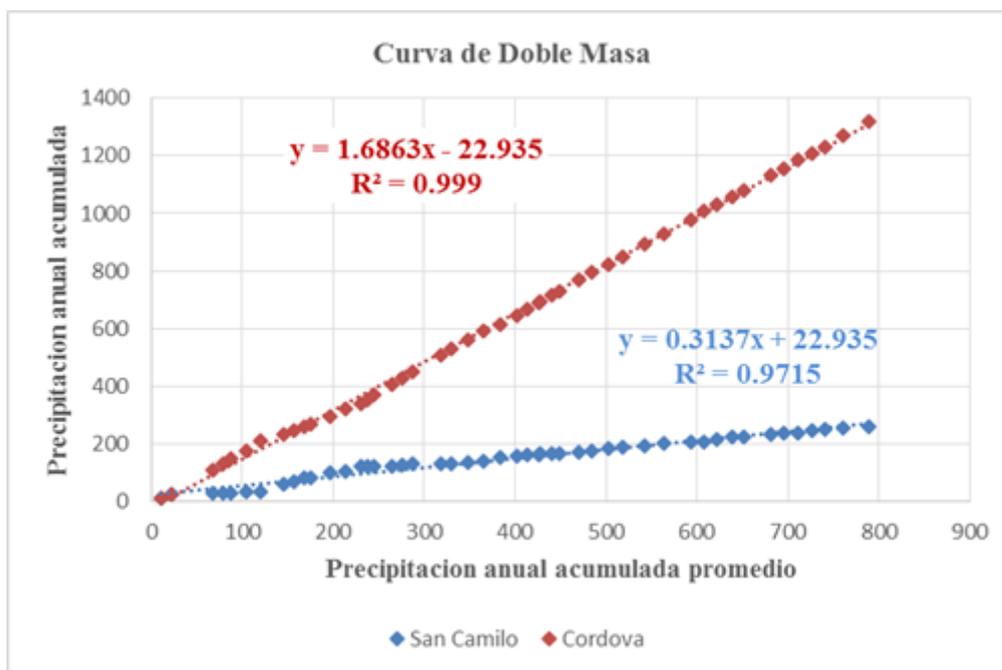


FUENTE: Elaboración propia

4.2.2 ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Como se puede apreciar en la figura 31 se agruparon las estaciones pluviométricas de San Camilo y Córdova por presentar cercanía geográfica. En la estación de San Camilo se puede apreciar algunos cambios en la pendiente, en los periodos 1965-1988 y 1989-2012 con una variación, de 4.5 - 6.4 y 8.7-45.5, en la media y en la varianza respectivamente. Del mismo modo en la estación de Córdova se observan saltos en los periodos 1965-19864 y 1985-2012 con variaciones de la media de: 25.4-28.9 y 329.8-124.5 en la varianza.

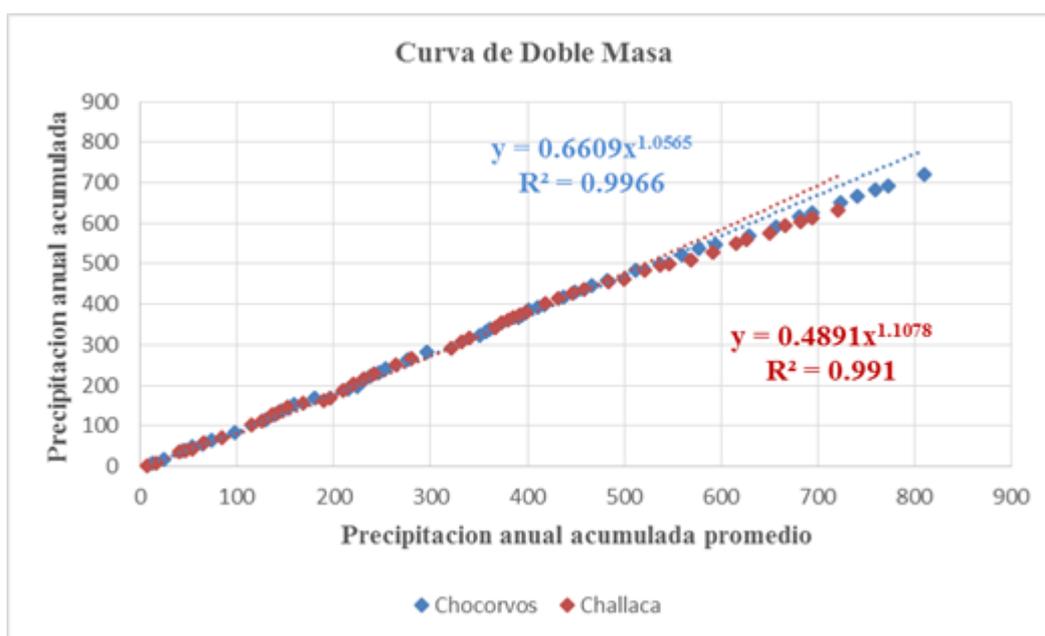
Figura 30: Curva Doble Masa; San Camilo-Córdova



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 32 se agruparon las estaciones pluviométricas de Chocorvos y Challaca, en las que se puede apreciar como las curvas muestran similitud en su pendientes, sin embargo en la estación de Chocorvos se detectan algunos saltos en los periodos ; 1965-1986 y 1987-2012 con variaciones de la media de: 15.9-17.6 y 145-100.9 en la varianza. En la estación de Challaca se puede apreciar algunos cambios en la pendiente, en los periodos 1965-1985 y 1986-2012 con una variación, de 12.6 - 13.6 y 60-41.7, en la media y en la varianza respectivamente.

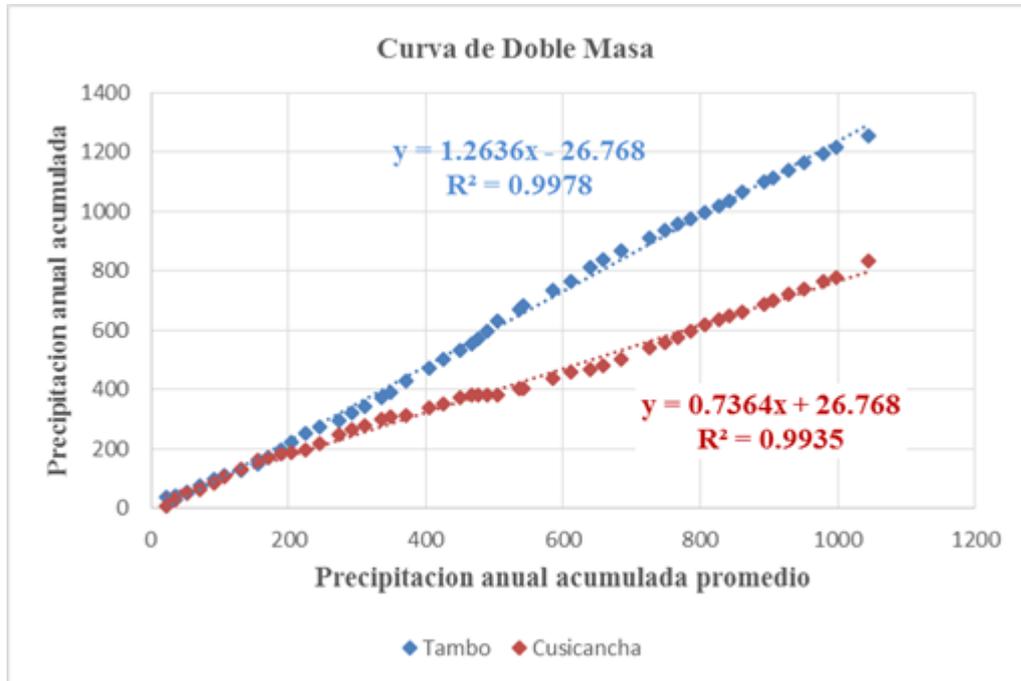
Figura 31: Curva Doble Masa: Chocorvos-Challaca



FUENTE: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 33 se agruparon las estaciones pluviométricas de Tambo y Cusicancha por presentar cercanía geográfica. En la estación Tambo se puede apreciar algunos cambios en la pendiente, en los periodos 1965-1995 y 1996-2012 con una variación, de 26.15 - 26.11 y 104.6-65.75, en la media y en la varianza respectivamente. Del mismo modo en la estación de Cusicancha se observan saltos en los periodos 1965-1987 y 1988-2012 con variaciones de la media de: 16.5-18.13 y 56.3-155.5 en la varianza.

Figura 32: Curva Doble Masa: Tambo-Cusicancha



FUENTE: Elaboración propia

En el cuadro 28 se muestra un resumen del Análisis Doble Masa realizado, en el cuál se aprecian los periodos de quiebre detectados, las variaciones tanto en la media como en la varianza, además de los estadísticos T de Student y F de Fischer, los cuales como se aprecia son menores a los valores de tabla, por lo tanto no existen cambios significativos en dichos parámetros estadísticos.

Cuadro 28: Análisis estadístico de Saltos y Tendencias

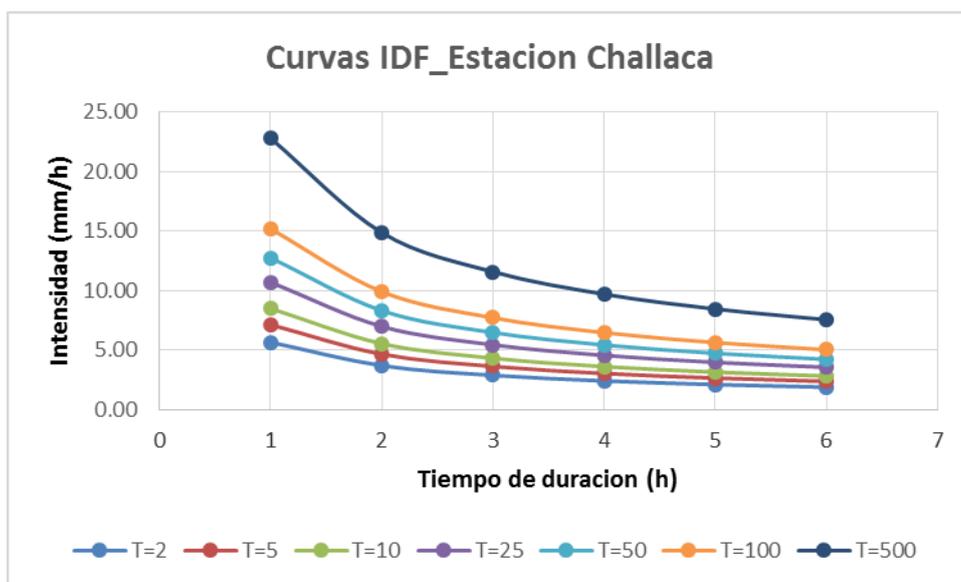
ESTACIONES	PERIODOS DE QUIEBRE		MEDIA	VARIANZA	T	Tc	F	Fc
Chocorvos	1965	1986	15.955	145.192	0.531	1.679	1.438	1.995
	1987	2012	17.646	100.939				
Challaca	1965	1985	12.645	60.201	0.470	1.679	1.441	1.990
	1986	2012	13.609	41.766				
Tambo	1965	1995	26.148	104.627	0.013	1.679	1.591	2.194
	1996	2012	26.112	65.750				
Cusicancha	1965	1987	16.530	56.289	0.532	1.679	0.362	0.493
	1988	2012	18.128	155.497				
San Camilo	1989	2012	4.454	8.743	1.283	1.679	0.192	0.496
	1965	1988	6.383	45.516				
Cordova	1985	2012	28.889	124.563	0.819	1.679	0.378	0.503
	1965	1984	25.420	329.807				

FUENTE: Elaboración propia

4.3 PRECIPITACIÓN MÁXIMA INSTANTÁNEA

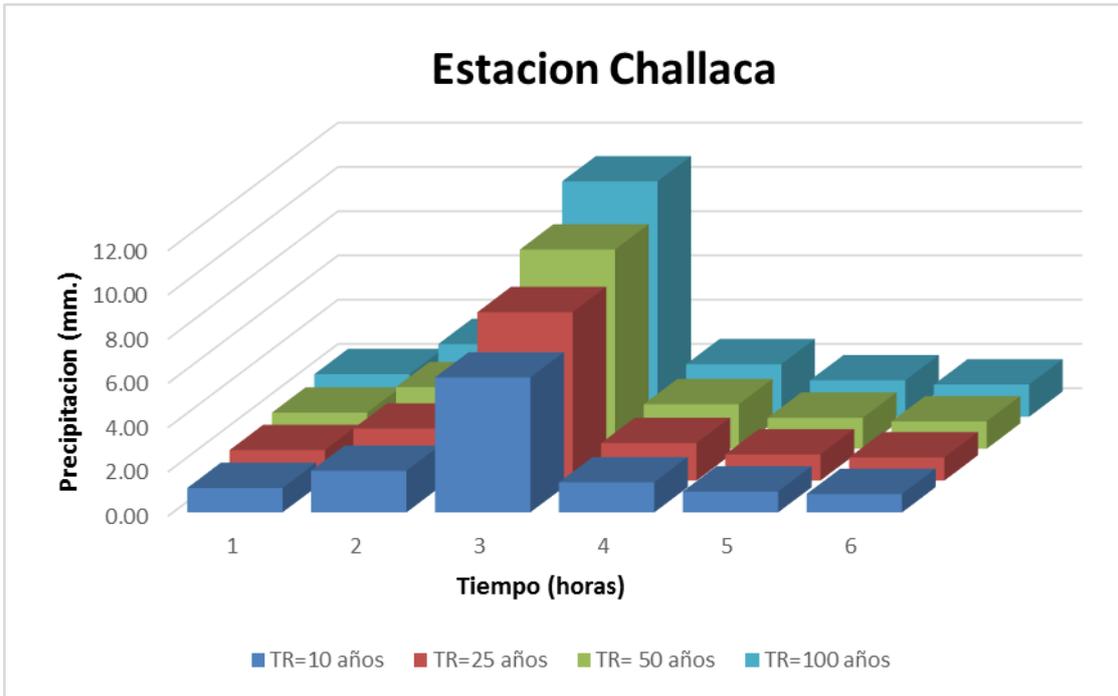
Los resultados del cálculo de precipitación instantánea se presentan de tal manera que se muestran los histogramas de precipitación instantáneas para distintos periodos de retorno y una duración de tormenta de seis horas, las cuales se obtuvieron a partir de las Curvas de Intensidad-Duración –Frecuencia para cada estación pluviométrica, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 33: Curvas IDF para la Estación Challaca



En la figura 35 se obtuvieron los histogramas de precipitación instantánea a partir de las curvas IDF de la estación de Challaca, para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas. Como se puede apreciar en el histograma para un periodo de retorno de 100 años se muestra una profundidad de precipitación máxima, inferior a los 12 milímetros, esto es debido a la altitud en que se encuentra la estación, para este caso a unos 1 799 m.s.n.m. En comparación con otras estaciones a mayor altitud, se obtiene mayor profundidad de precipitación, como se verán a continuación.

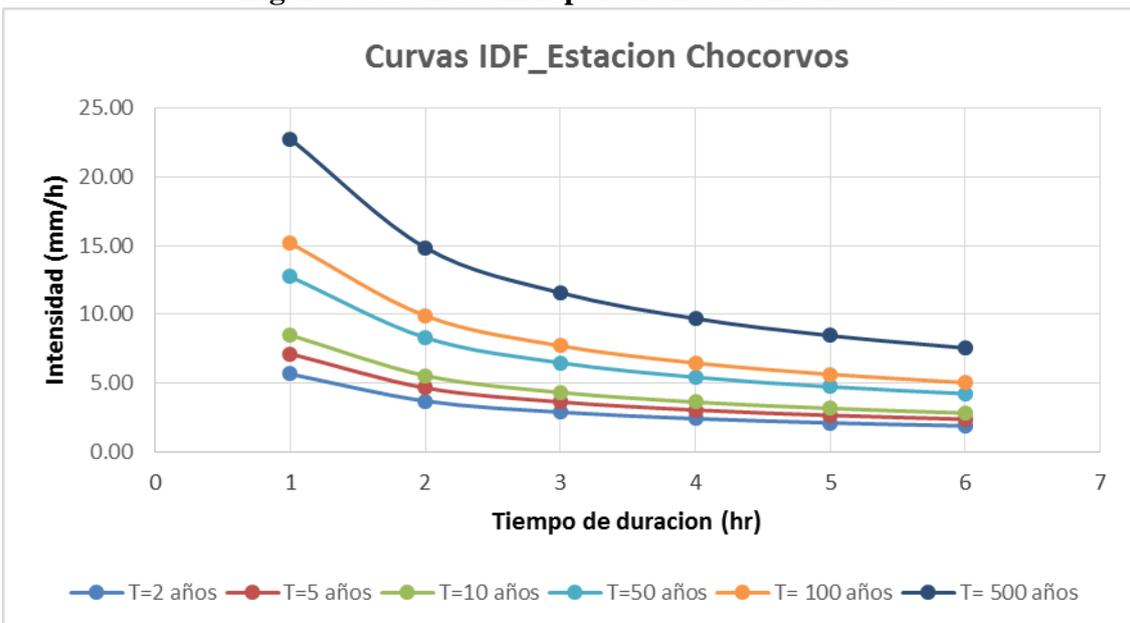
Figura 34: Histogramas de precipitación para la Estación Challaca



FUENTE: Elaboración Propia

En la figura 36 se muestran las Curvas I-D-F para la estación pluviométrica de Chocorvos de tal manera que se pueda determinar la intensidad de la precipitación, mediante la intersección de un determinado periodo de retorno y la selección de una duración de tormenta.

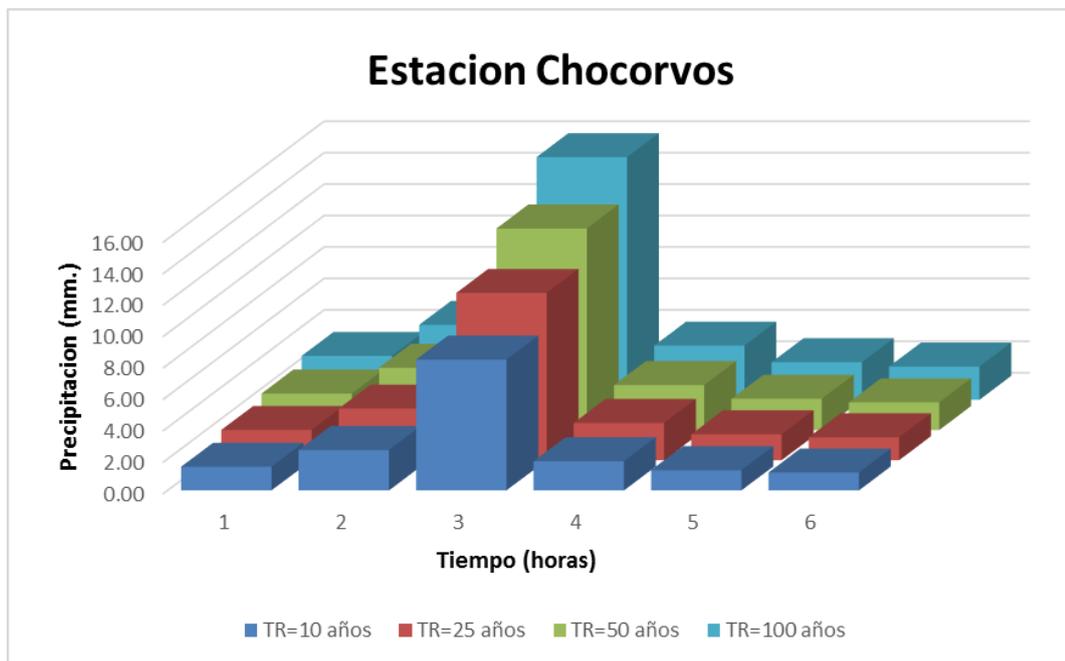
Figura 35: Curvas IDF para la Estación Chocorvos



FUENTE: Elaboración Propia

A partir de las curvas I-D-F se determinaron los histogramas de precipitación instantáneas para la estación de Chocorvos tal cual se muestran en la figura 37 para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas. Como se puede apreciar en el histograma para un periodo de retorno de 100 años se muestra una profundidad de precipitación máxima de 16 milímetros, ubicándose a unos 2 603 m.s.n.m.

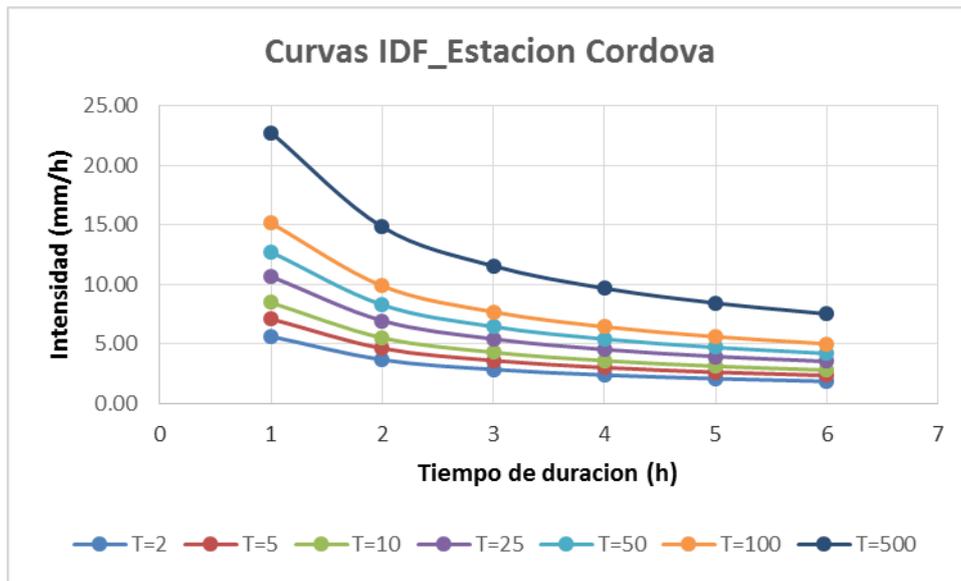
Figura 36: Histogramas de precipitación para la Estación Chocorvos



FUENTE: Elaboración propia

A continuación en la figura 38 se muestran las Curvas I-D-F para la estación pluviométrica de Córdova de tal manera que se pueda determinar la intensidad de la precipitación mediante la intersección de un determinado periodo de retorno y la selección de una duración de tormenta.

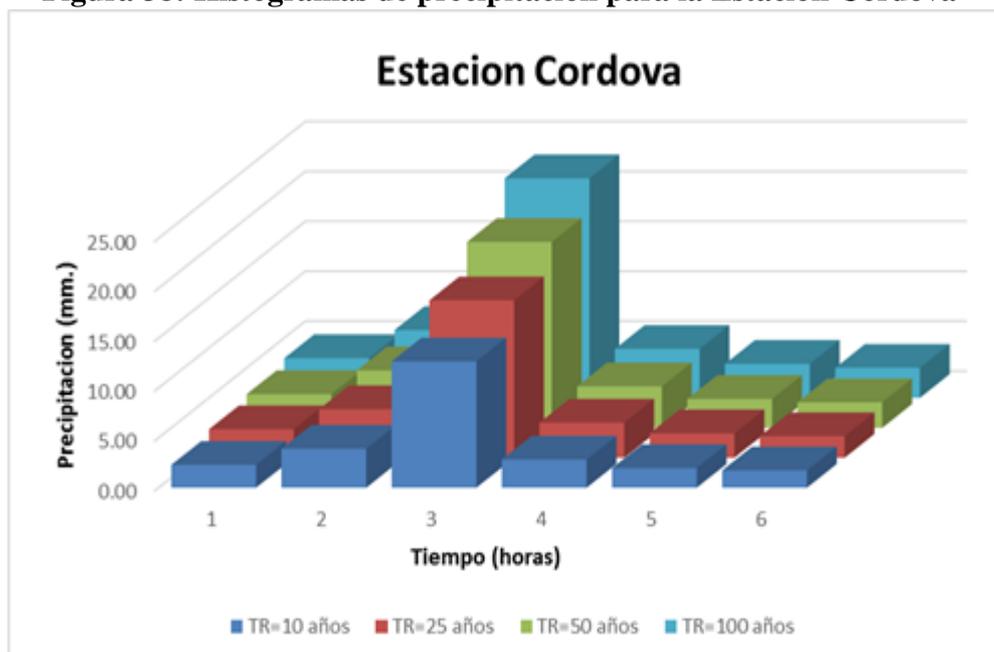
Figura 37: Curvas IDF para la Estación Córdoba



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 39 se pueden apreciar, los histogramas de precipitación instantáneas, que se obtuvieron a partir de las curvas I-D-F para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas. El histograma de la estación Córdoba, para un periodo de retorno de 100 años nos muestra una profundidad de precipitación máxima, próxima a los 25 milímetros, siendo esta la mayor de todas las estaciones analizadas, esto se relaciona con su altitud de 3 240 m.s.n.m.

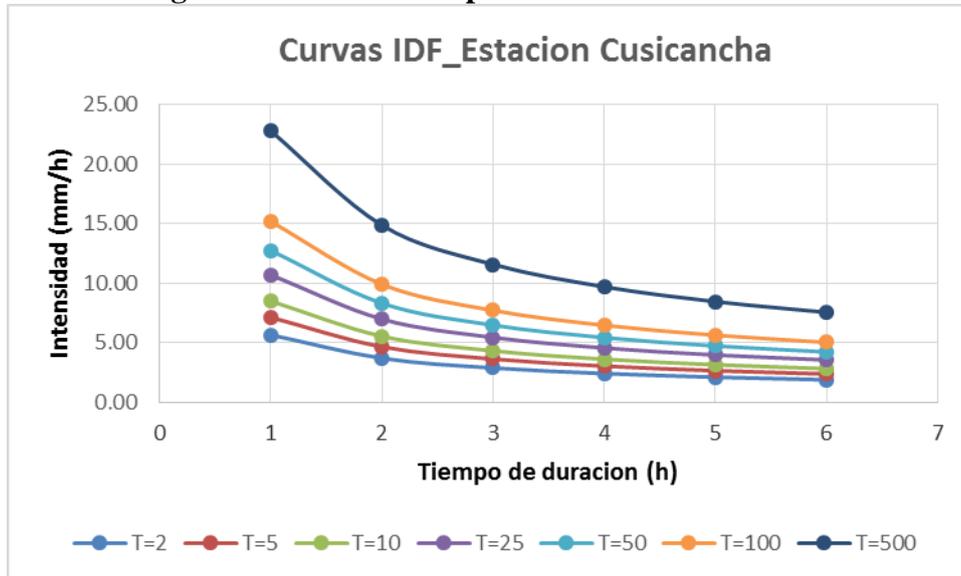
Figura 38: Histogramas de precipitación para la Estación Córdoba



FUENTE: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 40 se muestran las Curvas I-D-F para la estación pluviométrica de Cusicancha de tal manera que se pueda determinar la intensidad de la precipitación, mediante la intersección de un determinado periodo de retorno y la selección de una duración de tormenta.

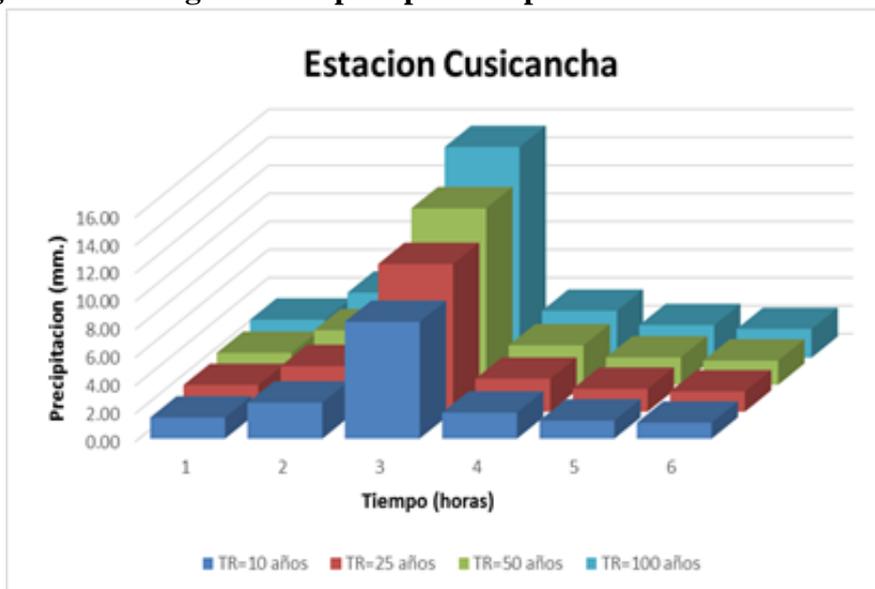
Figura 39: Curvas IDF para la Estación Cusicancha



FUENTE: Elaboración propia

De la misma manera que en los casos anteriores en la figura 41 se pueden apreciar las curvas I-D-F, a partir de las cuales se determinaron los histogramas de precipitación instantáneas de la estación Cusicancha .para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas.

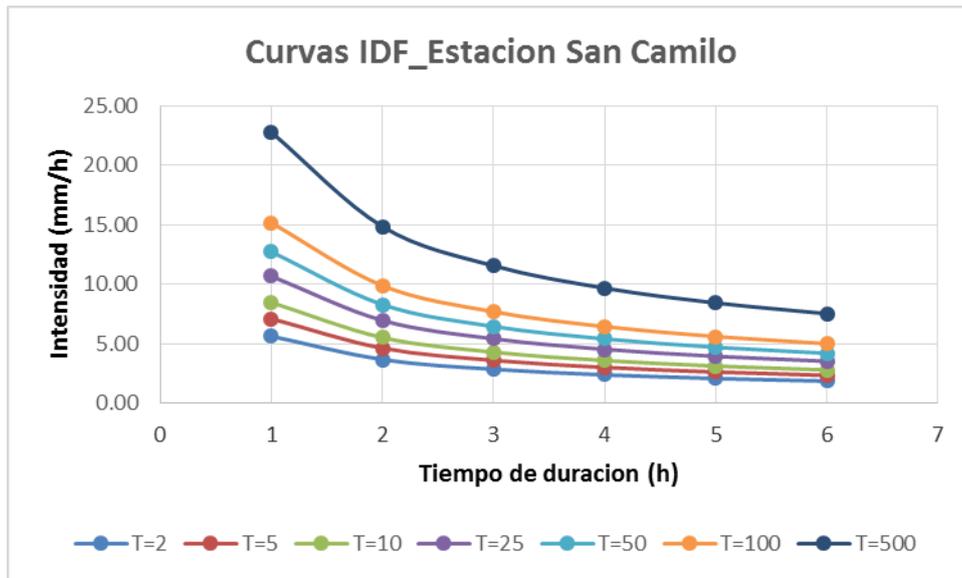
Figura 40: Histogramas de precipitación para la Estación Cusicancha



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 42 se muestran las Curvas I-D-F para la estación pluviométrica de San Camilo de tal manera que se pueda determinar la intensidad de la precipitación, mediante la intersección de un determinado periodo de retorno y la selección de una duración de tormenta .

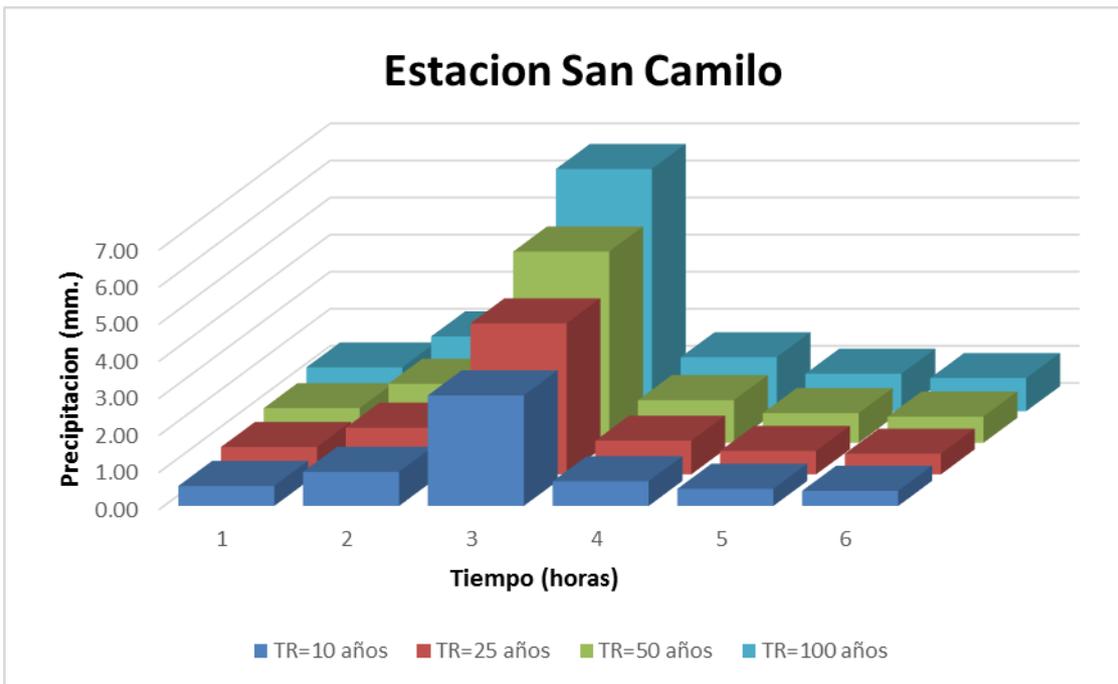
Figura 41: Curvas IDF para la Estación San Camilo



FUENTE: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 43, los histogramas de precipitación instantáneas de la estación San Camilo, los cuales se obtuvieron a partir de las curvas I-D-F para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas. El histograma de la estación San Camilo, para un periodo de retorno de 100 años nos muestra una profundidad de precipitación cercana a los 7 milímetros, siendo esta la más baja de todas las estaciones analizadas, esto se debe a que se ubica dentro del ámbito del valle de Ica con una altitud de 406 m.s.n.m.

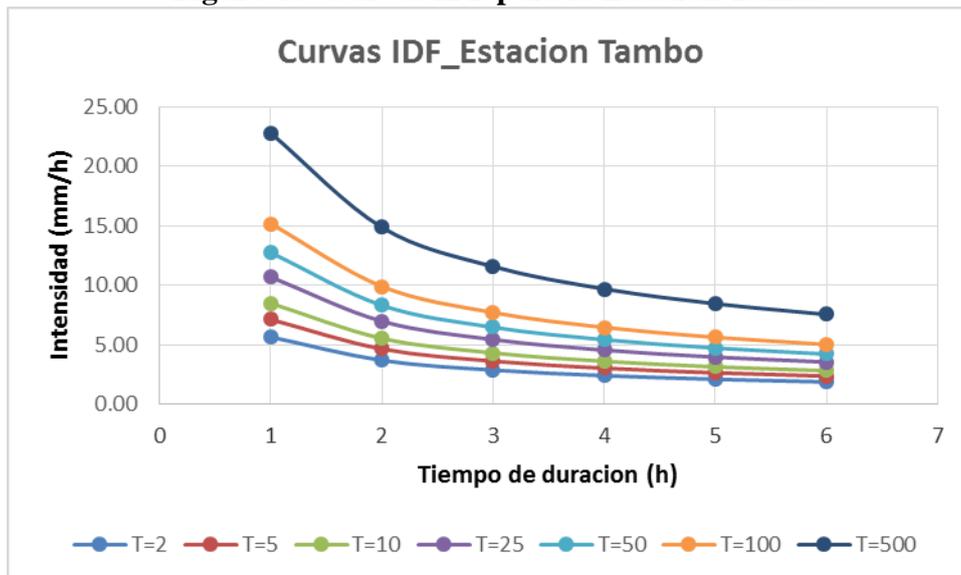
Figura 42: Histogramas de precipitación para la Estación San Camilo



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 44 se muestran las Curvas I-D-F para la estación pluviométrica Tambo de tal manera que se pueda determinar la intensidad de la precipitación, mediante la intersección de un determinado periodo de retorno y la selección de una duración de tormenta.

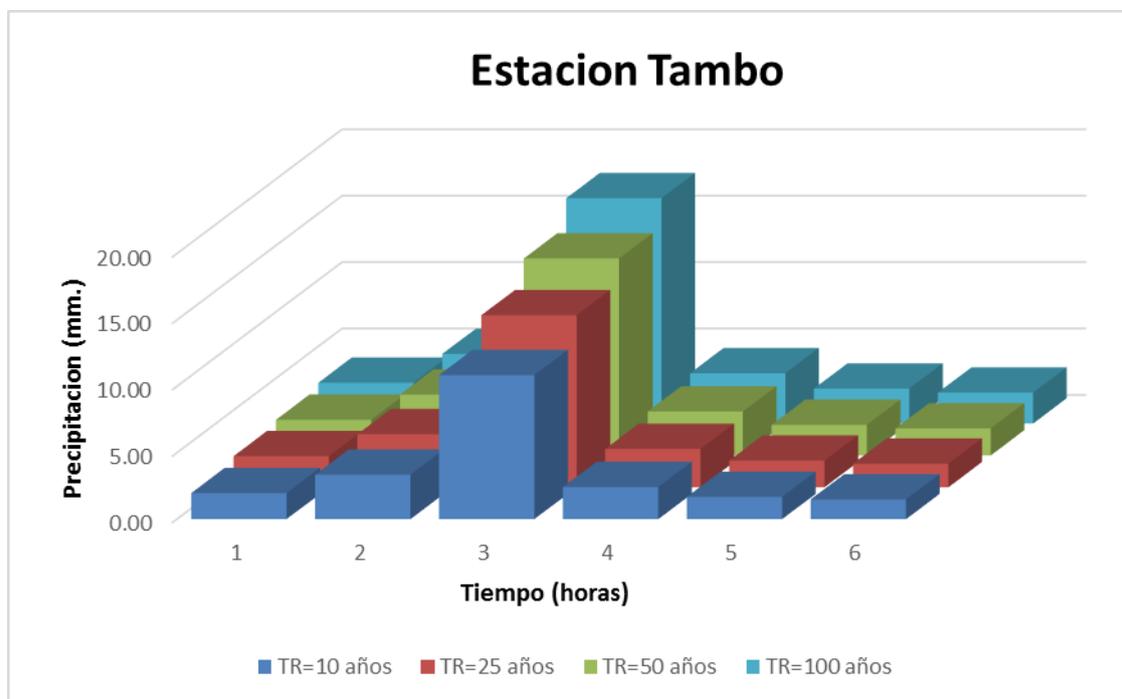
Figura 43: Curvas IDF para la Estación Tambo



FUENTE: Elaboración propia

Del mismo modo que en los casos anteriores en la figura 45 se pueden apreciar las curvas I-D-F, a partir de las cuales se determinaron los histogramas de precipitación instantáneas de la estación Cusicancha .para los periodos de retorno de 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y una duración de tormenta de 6 horas. El histograma de precipitación de la estación Tambo, muestra una profundidad de precipitación máxima próxima a los 20 milímetros, para un periodo de retorno de 100 años, esto es debido a que está ubicada a unos 3 136 m.s.n.m.

Figura 44: Histogramas de precipitación para la Estación Tambo



FUENTE: Elaboración propia

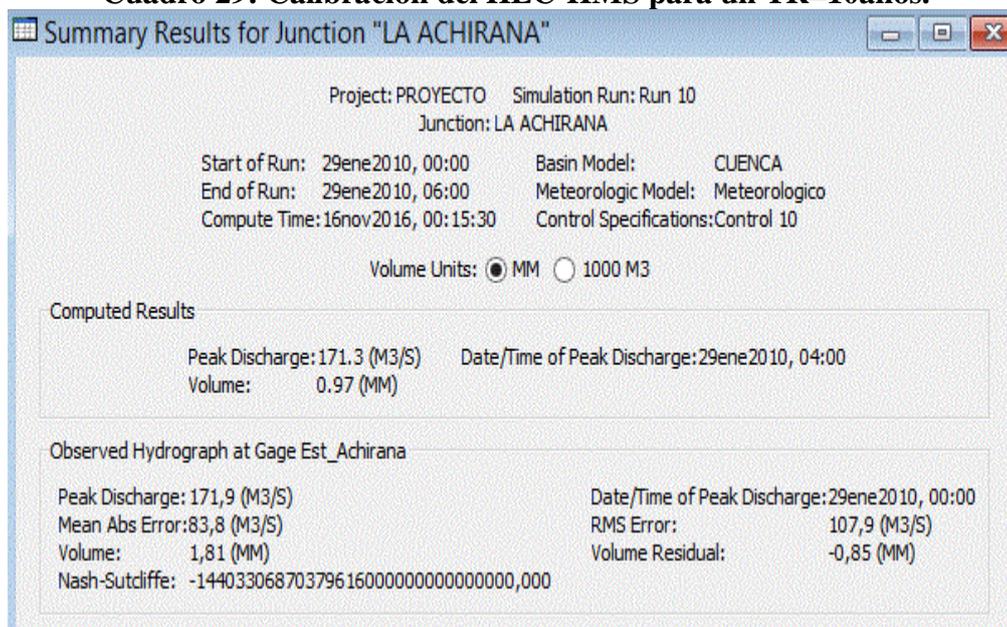
4.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÓLOGICO

Los resultados de la calibración del modelo hidrológico se presentan en unos cuadros que muestran los caudales pico, de los hidrogramas resultantes de la cuenca, y de los caudales observados. Estos cuadros están expuestos desde: (1) Calibración para un tiempo de retorno de 10 años, (2) Calibración para un tiempo de retorno de 25 años, (3) Calibración para un tiempo de retorno de 50 años, (4) Calibración para un tiempo de retorno de 100 años.

4.4.1 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 10 AÑOS

En el cuadro 29, se puede observar el cuadro de la calibración del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 10 años y una duración de tormenta de 6 años. Este cuadro muestra puntualmente un caudal pico del hidrograma de caudales, simulado en el HEC- HMS, de 171.3 m³/s y el caudal máximo observado de 171.9 m³/s., el cual se determinó mediante el modelo probabilístico de Gumbel (ver figura 15), para un periodo de retorno de 10 años.

Cuadro 29: Calibración del HEC-HMS para un TR=10años.

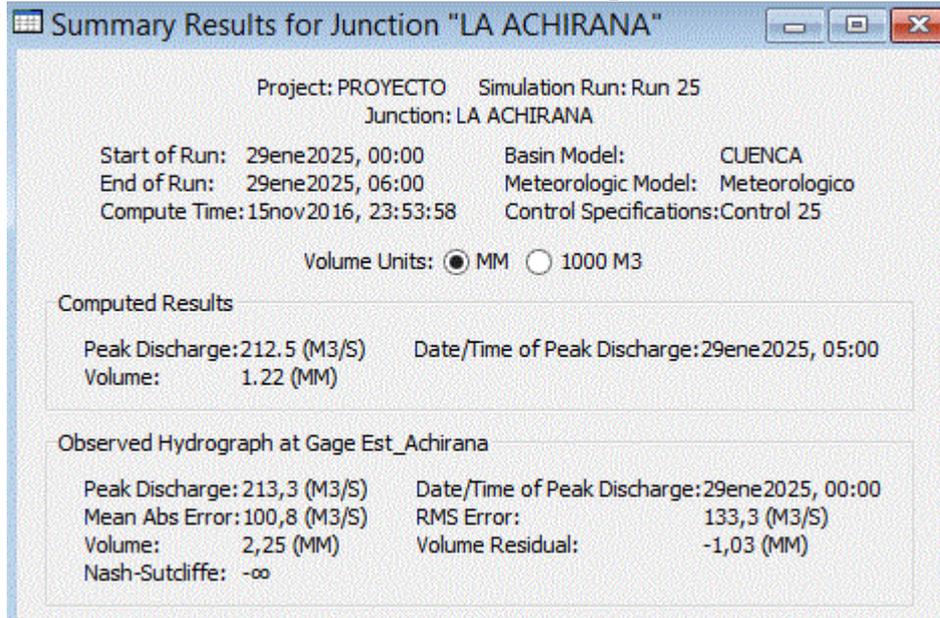


FUENTE: Elaboración propia

4.4.2 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 25 AÑOS

En el cuadro 30, se puede observar el cuadro de la calibración del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 25 años y una duración de tormenta de 6 años. Este cuadro muestra puntualmente un caudal pico del hidrograma de caudales, simulado en el HEC HMS, de 212.5 m³/s y el caudal máximo observado de 213.3 m³/s., el cual se determinó mediante el modelo probabilístico de Gumbel (ver figura 15), para un periodo de retorno de 25 años.

Cuadro 30: Calibración del HEC-HMS para un TR=25 años.

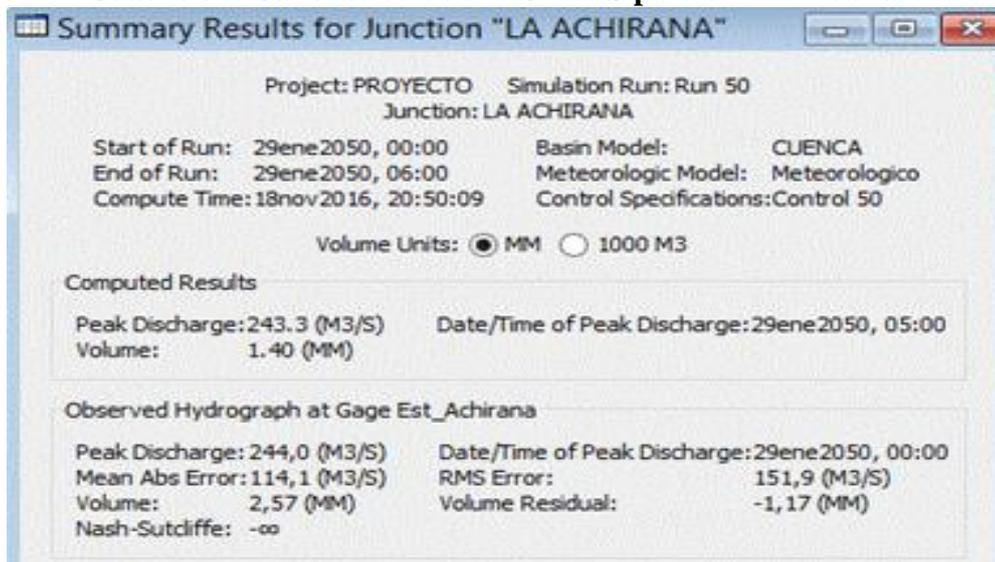


FUENTE: Elaboración propia

4.4.3 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 50 AÑOS

En el cuadro 31, se puede observar el cuadro de la calibración del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 50 años y una duración de tormenta de 6 años. Este cuadro muestra puntualmente un caudal pico del hidrograma de caudales, simulado en el HEC HMS, de 243.3 m³/s y el caudal máximo observado de 244 m³/s, el cual se determinó mediante el modelo probabilístico de Gumbel (ver figura 15), para un periodo de retorno de 50 años.

Cuadro 31: Calibración del HEC-HMS para un TR=50 años.

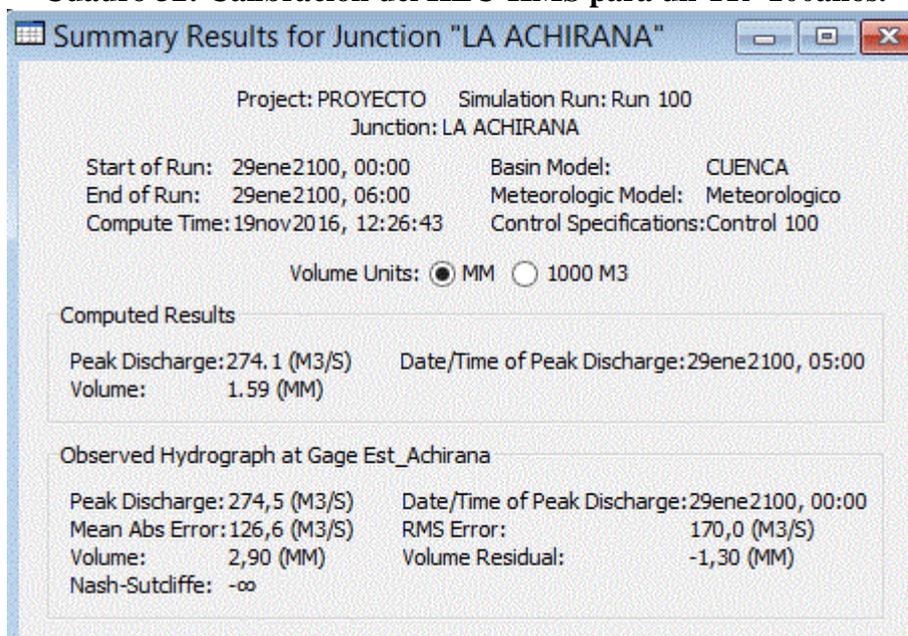


FUENTE: Elaboración propia

4.4.4 CALIBRACIÓN PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS

En el cuadro 32, se puede observar el cuadro de la calibración del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 50 años y una duración de tormenta de 6 años. Este cuadro muestra puntualmente un caudal pico del hidrograma de caudales, simulado en el HEC HMS, de 274.1 m³/s y el caudal máximo observado de 274.5 m³/s, el cual se determinó mediante el modelo probabilístico de Gumbel (ver figura 15), para un periodo de retorno de 100 años.

Cuadro 32: Calibración del HEC-HMS para un TR=100años.



FUENTE: Elaboración propia

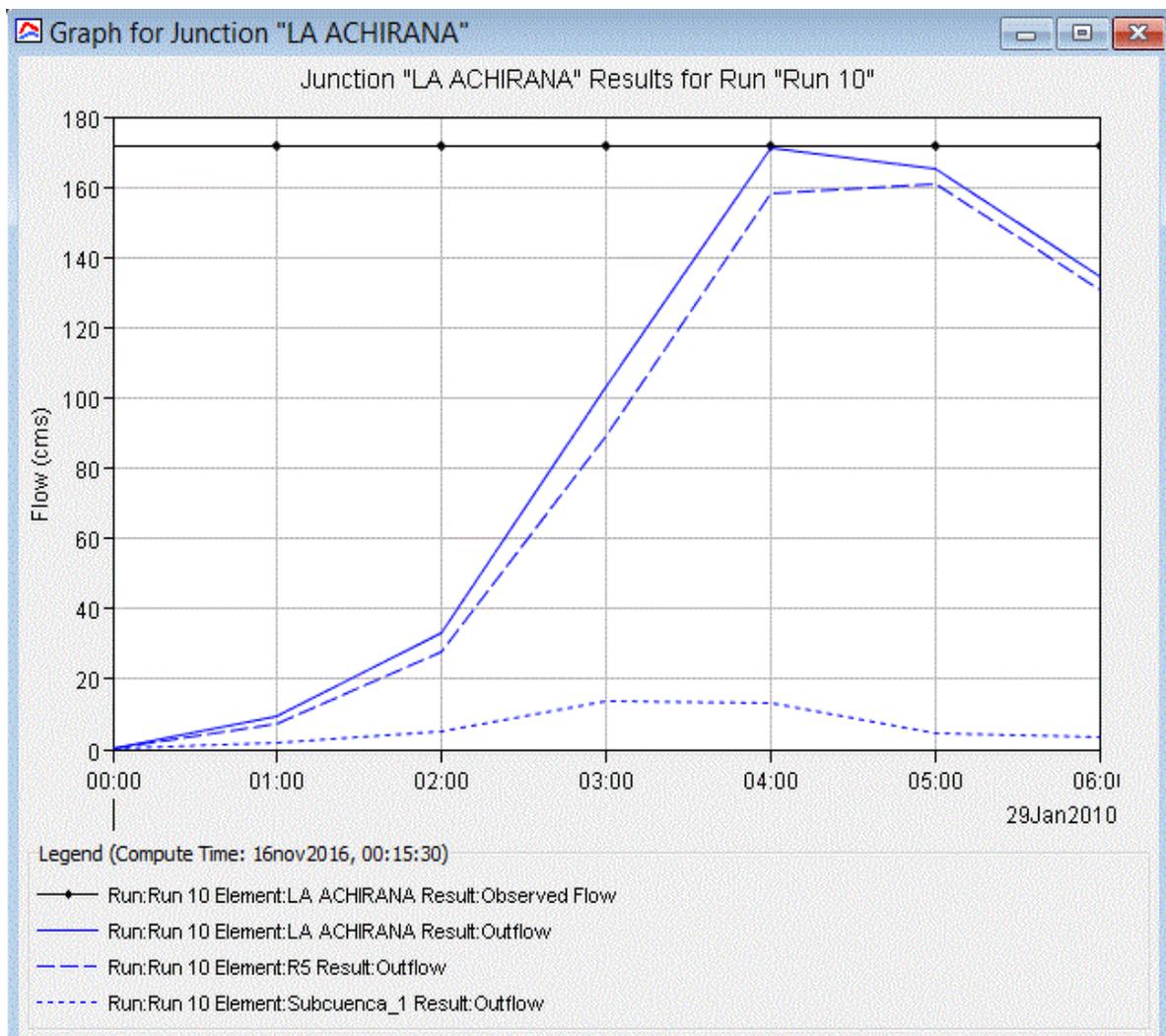
4.5 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

Los resultados del modelamiento hidrológico están representados por los hidrogramas de caudales de la cuenca en su punto de descarga, la estación La Achirana, para una tormenta de 6 horas. Estos hidrogramas están expuestos desde: (1) Hidrogramas para un tiempo de retorno de 10 años, (2) Hidrogramas para un tiempo de retorno de 25 años, (3) Hidrogramas para un tiempo de retorno de 50 años, (4) Hidrogramas para un tiempo de retorno de 100años.

4.5.1 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 10 AÑOS

En la figura: 46, se puede observar el hidrograma de caudales resultante de la cuenca para un periodo de retorno de 10 años y para una duración de tormenta de seis horas para las condiciones medias de humedad del suelo. Como se puede apreciar el caudal pico del hidrograma simulado tiene un valor muy aproximado al del caudal pico observado.

Figura 45: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=10 años.

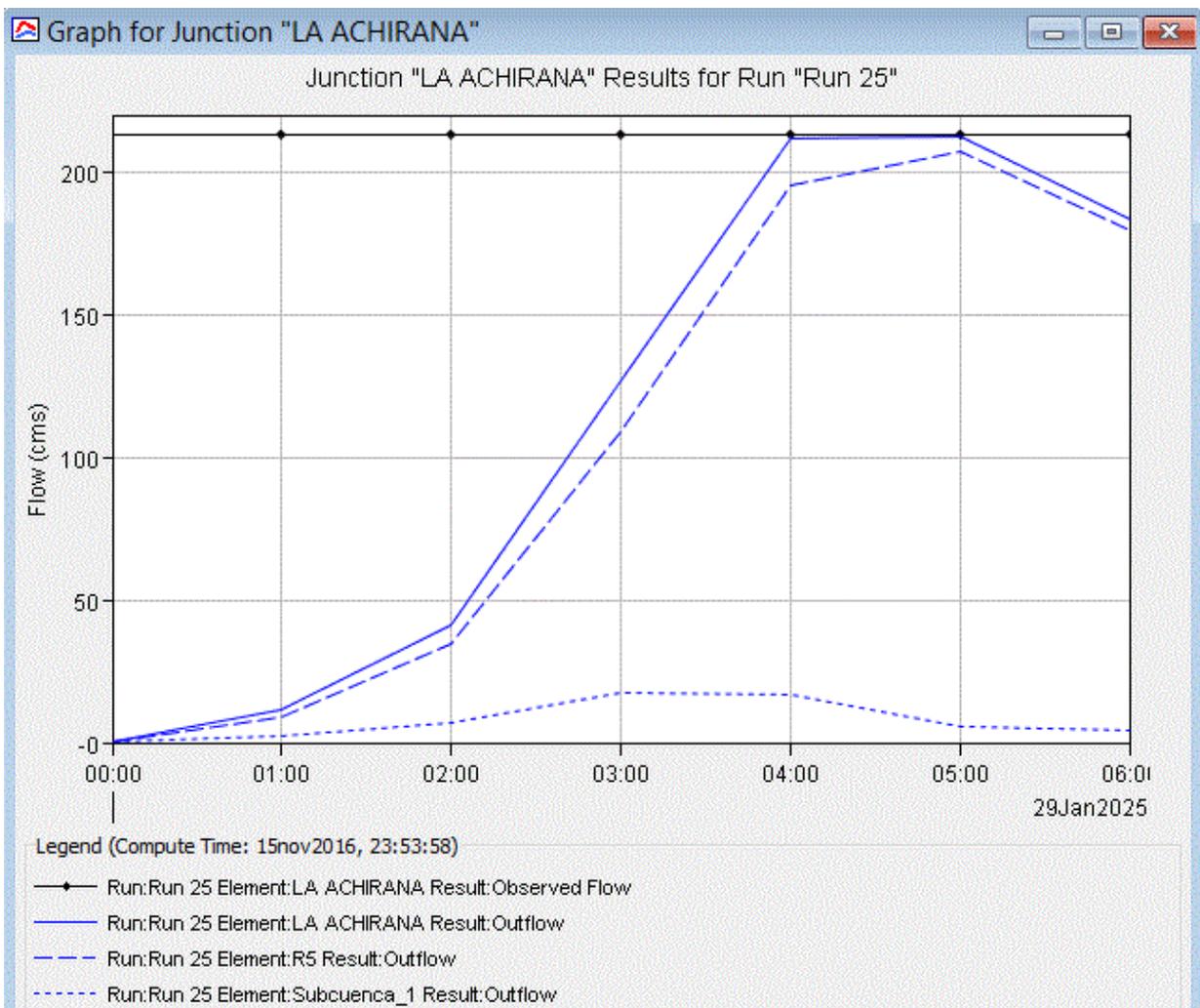


FUENTE: Elaboración propia

4.5.2 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 25 AÑOS

En la figura: 47, se puede observar el hidrograma de caudales resultante de la cuenca para un periodo de retorno de 25 años y para una duración de tormenta de seis horas y condiciones medias de humedad del suelo. Como se puede apreciar el caudal pico del hidrograma simulado y el caudal pico observado, al igual que el caso anterior, la diferencia es casi nula

Figura 46: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=25 años.

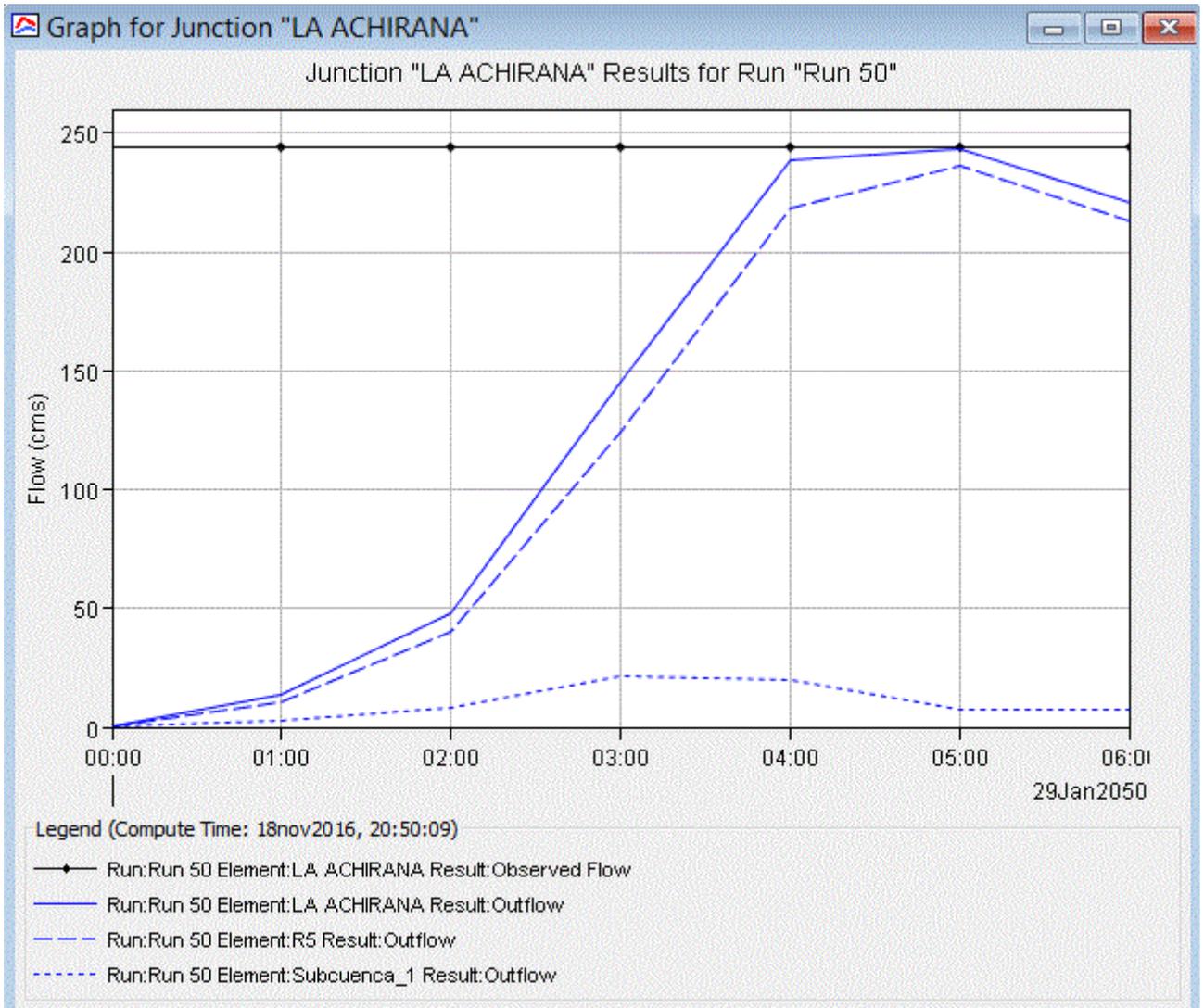


FUENTE: Elaboración propia

4.5.3 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 50 AÑOS

En la figura 48, se puede observar el hidrograma de caudales resultante de la cuenca para un periodo de retorno de 50 años y una duración de tormenta de seis horas, para las condiciones normales del suelo. Como se puede apreciar, la diferencia entre el caudal pico del hidrograma simulado, y el observado es mínima.

Figura 47: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=50 años.

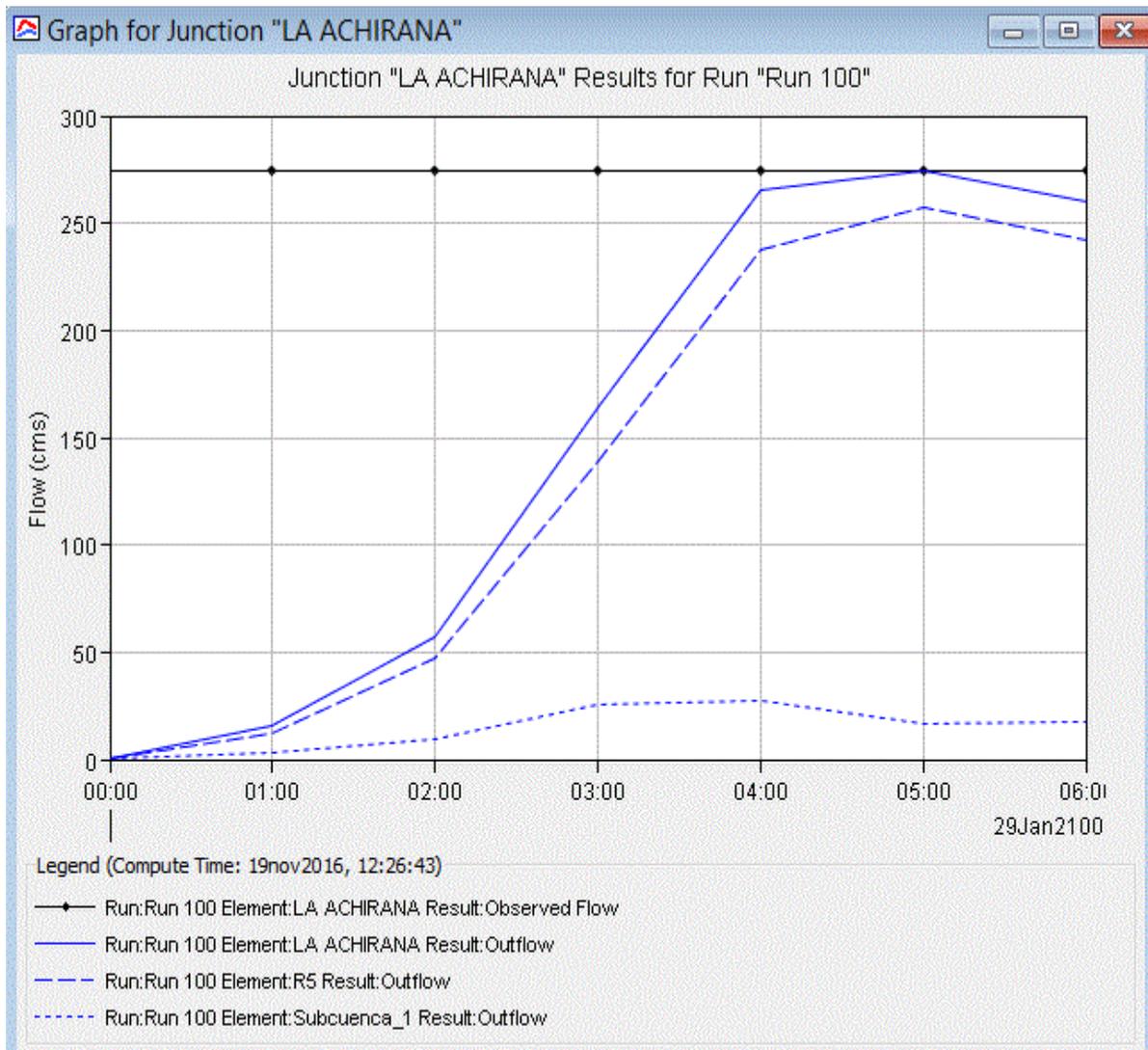


FUENTE: Elaboración propia

4.5.4 HIDROGRAMAS PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS

En la figura: 49, se puede observar el hidrograma de caudales de la cuenca para un periodo de retorno de 100 años y una duración de tormenta de 6 horas, para las condiciones medias de humedad del suelo. También se puede apreciar una mínima diferencia entre el caudal pico observado y el caudal pico del hidrograma simulado.

Figura 48: Hidrograma resultante de la cuenca para un TR=100 años.



FUENTE: Elaboración propia

4.6 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO

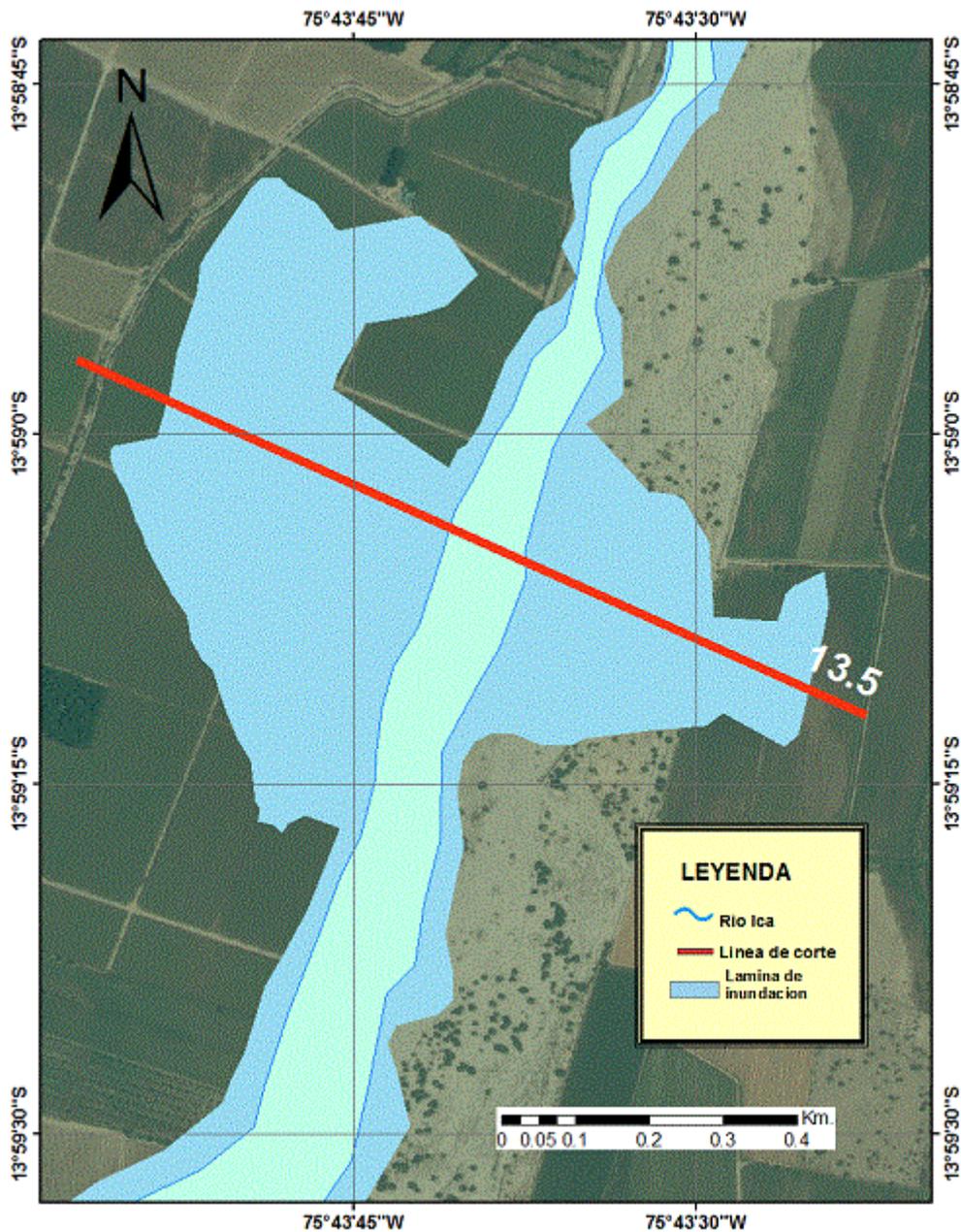
Los resultados del modelamiento hidráulico, simulado en el HEC-RAS, están expuestos desde: (1) Mapas de Inundación, (2) Secciones Transversales, (3) Profundidad de la Lámina de Inundación y (4) Areas de Inundación.

4.6.1 MAPAS DE INUNDACIÓN

Los mapas de inundación nos muestran la ubicación de las secciones transversales analizadas e identificadas como vulnerables a desborde del río Ica, de esta manera es posible realizar comparaciones con zonas afectadas en inundaciones anteriores como la ocurrida en 1998, la más catastrófica en la ciudad de Ica en su historia, en la cual se registran, parte de los distritos de La Tinguilla, San Juan Bautista, Pariona, Ica y Los Aquijes, como áreas afectadas, territorios que fueron analizados y se muestran a continuación.

En la figura 50 se puede apreciar la primera sección identificada como vulnerable a desborde del Río Ica, ubicándose a unos 13.5 km. aguas debajo de la estación La Achirana. La lámina de inundación comprende la margen derecha del río perteneciente al distrito de San Juan Bautista, inundando aproximadamente 27.8 ha de áreas de cultivo. En la margen izquierda, el desborde del río abarca parte del distritos de La Tinguilla afectando 16.3 ha en zonas agrícolas.

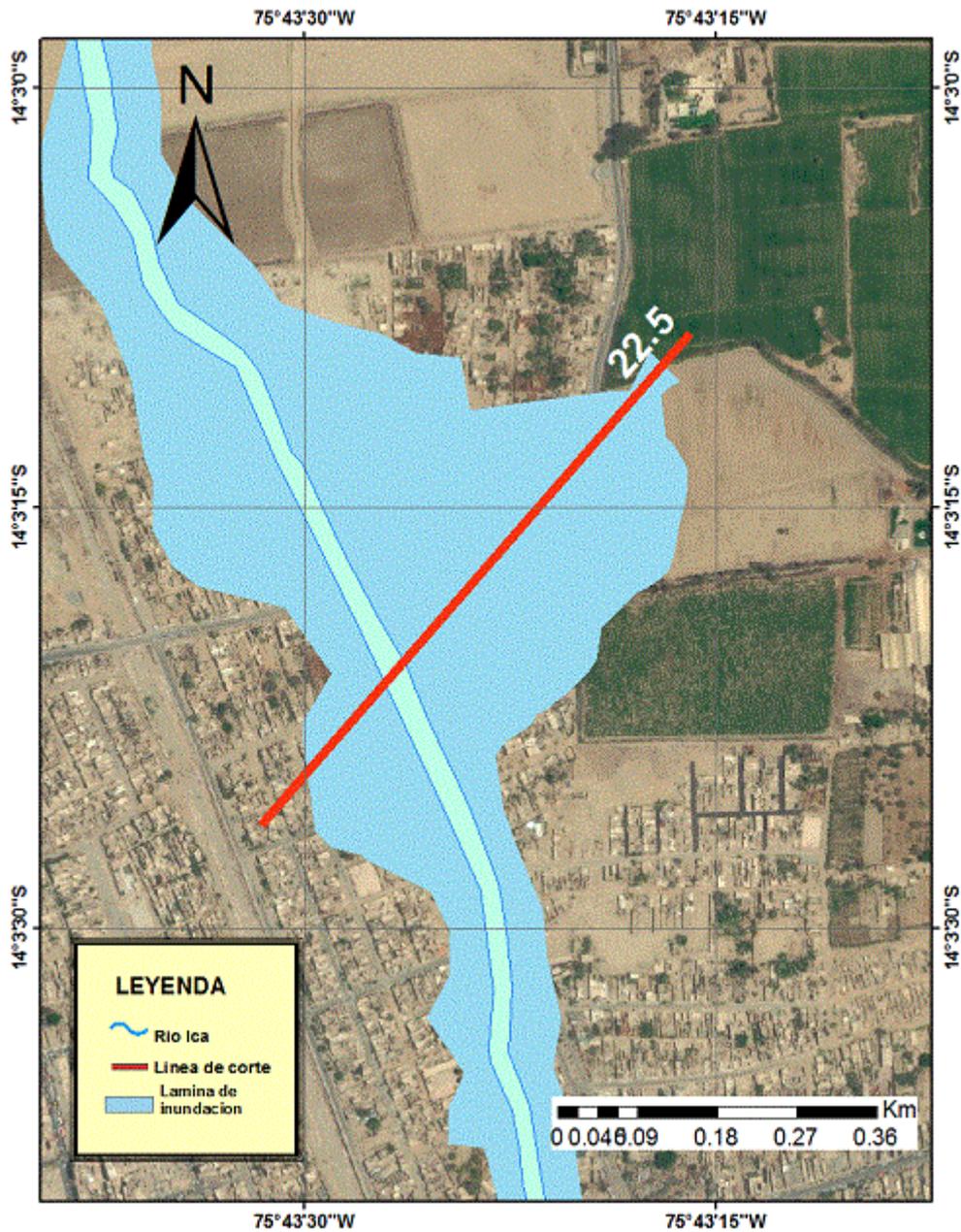
Figura 49: Mapa de Inundación en la sección 13+500 km. TR= 100 años.



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 51 se puede apreciar la segunda sección identificada como vulnerable a desborde del Río Ica, ubicándose a unos 22.5 km. aguas debajo de la estación La Achirana. La lámina de inundación comprende la margen derecha del río perteneciente al distrito de Ica, teniendo 9.3 ha de área afectada en zonas urbanas. En la margen izquierda, el desborde del río se expande entre los distritos de Pariona y La Tinguña afectando 16.74 ha en zonas urbanas.

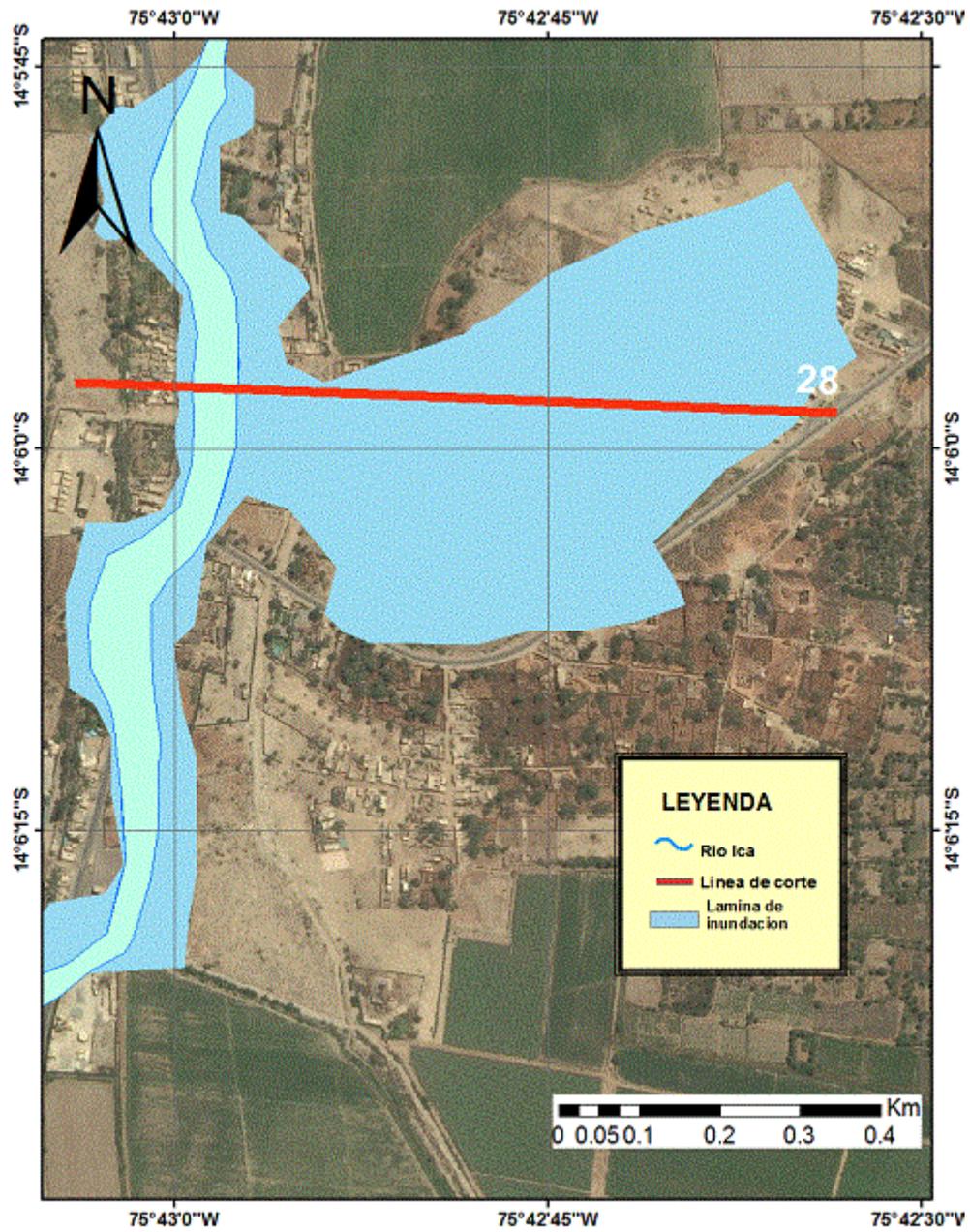
Figura 50: Mapa de Inundación en la sección 22.5 km. TR= 100 años.



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 52 se puede apreciar la segunda sección identificada como vulnerable a desborde del Río Ica, ubicándose a unos 28.5 km. aguas debajo de la estación La Achirana. La lámina de inundación comprende la margen derecha del río perteneciente al distrito de Ica, teniendo 0.67 ha de área afectada en zonas urbanas. En la margen izquierda, el desborde del río abarca parte del distrito de Los Aquijes afectando 26.3 ha en zonas urbanas.

Figura 51: Mapa de Inundación en la sección 28+00 km. TR= 100 años.

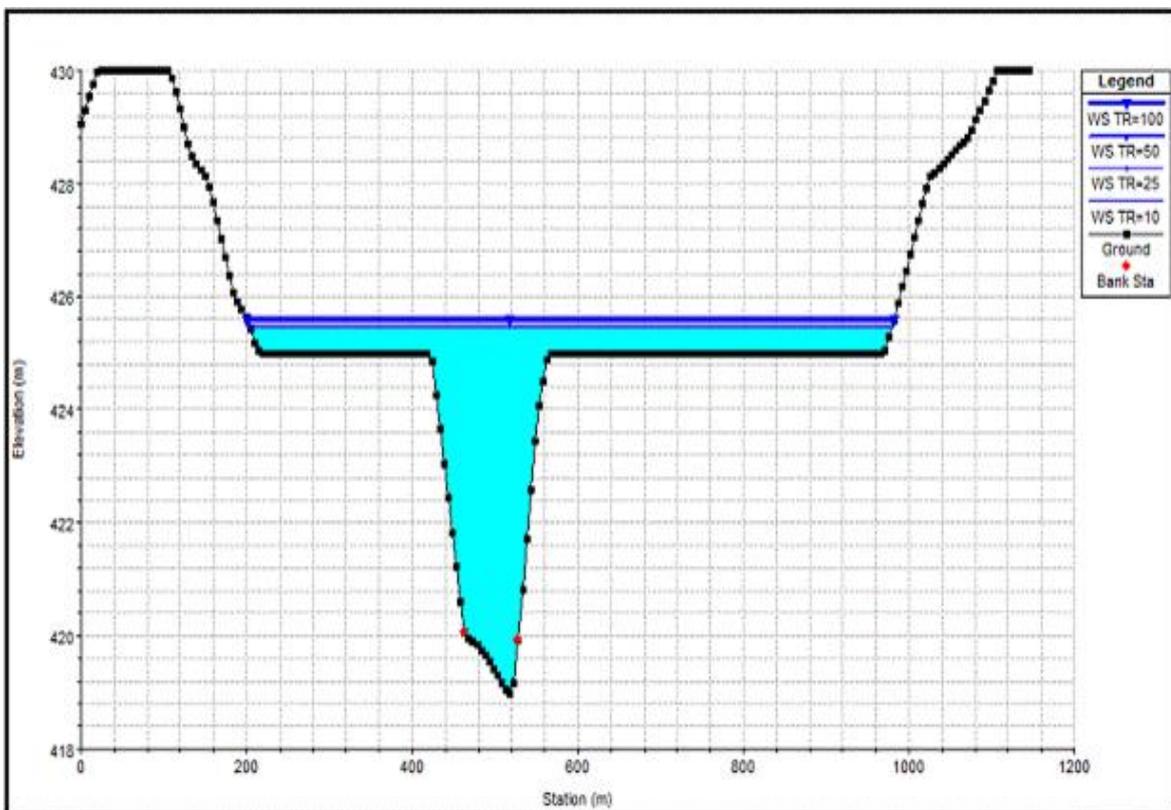


FUENTE: Elaboración propia

4.6.2 SECCIONES TRANSVERSALES

En la figura 53, se puede apreciar la sección transversal 13+500 km., resultante de la simulación en el HEC-RAS, en la cual se observa como los bordes del río han sido sobrepasados por la lámina de agua y han sido inundadas ambas márgenes del río, 220 metros por la margen izquierda del río, partiendo del cero en el eje de las abscisas y 440 metros por la margen derecha.

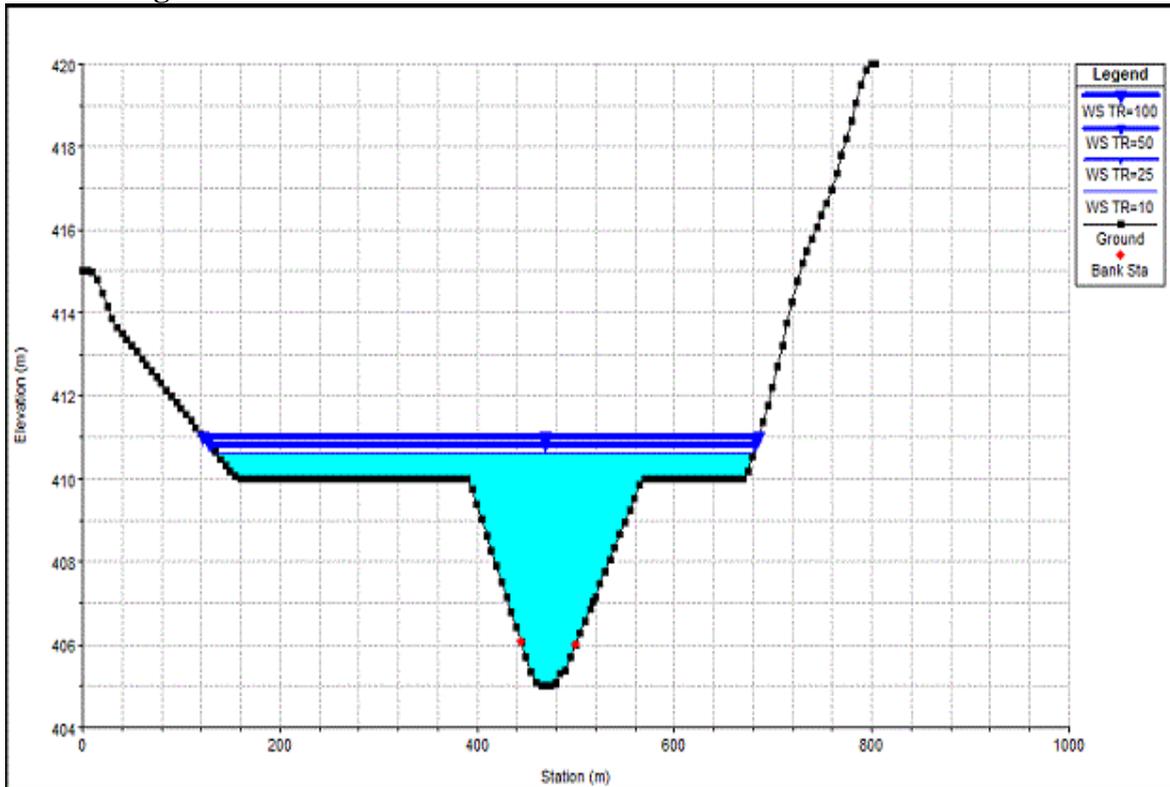
Figura 52: Sección Transversal del río Ica en la sección 13+500 km.



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 54, se puede apreciar la sección transversal 22+500km., resultante de la simulación en el HEC-RAS, en la cual se observa como los bordes del río han sido sobrepasados por la lámina de agua y han sido inundadas ambas márgenes del río, 280 metros por la margen izquierda, partiendo de cero en el eje de las abscisas y 120 metros por la margen derecha del río, del mismo modo que el caso anterior, pero en esta sección se puede apreciar una mayor pendiente en la margen derecha del río.

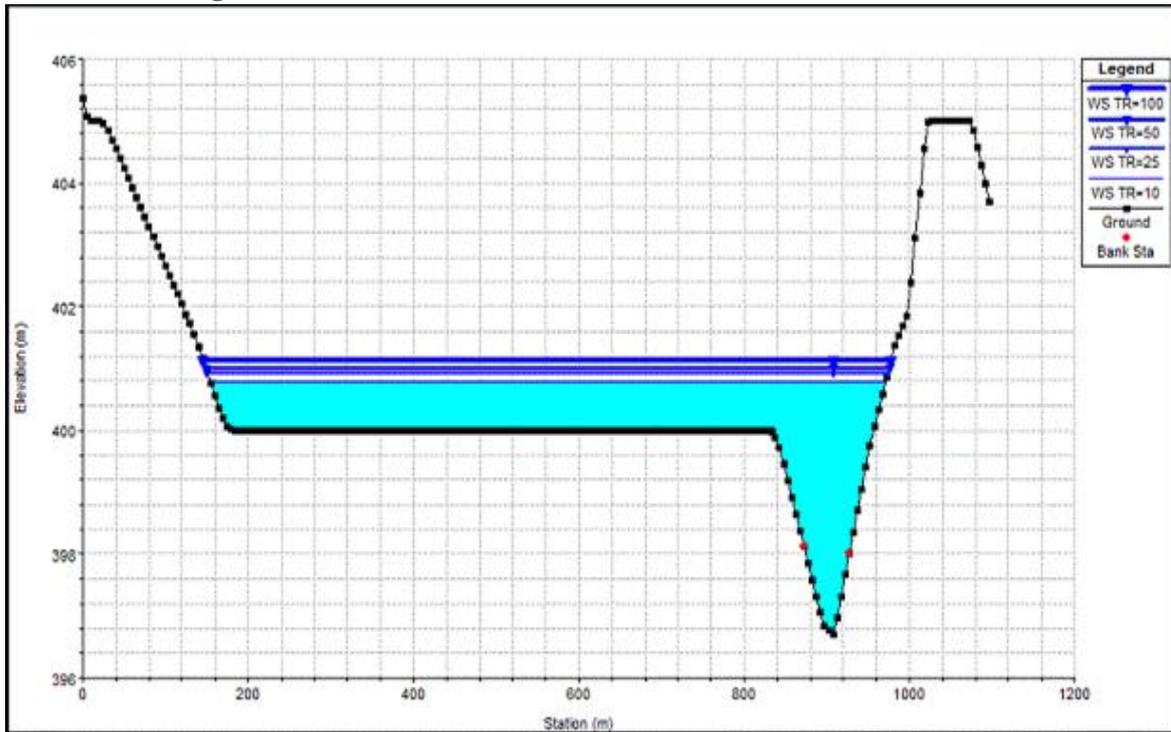
Figura 53: Sección Transversal del río Ica en la sección 22+500 km.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 55, se puede apreciar la sección transversal 28+00km., la cual presenta una profundidad del río de cinco metros, resultante de la simulación en el HEC-RAS, en la cual se observa que la llanura de inundación se extiende notoriamente por la margen izquierda unos 700 metros, en comparación al caso anterior el río, también desbordó por ambas márgenes, debido a que en este sector la margen derecha del río Ica es favorecida por la disposición topográfica del terreno, la cual muestra mayor altitud en sus cotas de nivel en dicho sector.

Figura 54: Sección Transversal del rio Ica en la sección 28+00 km

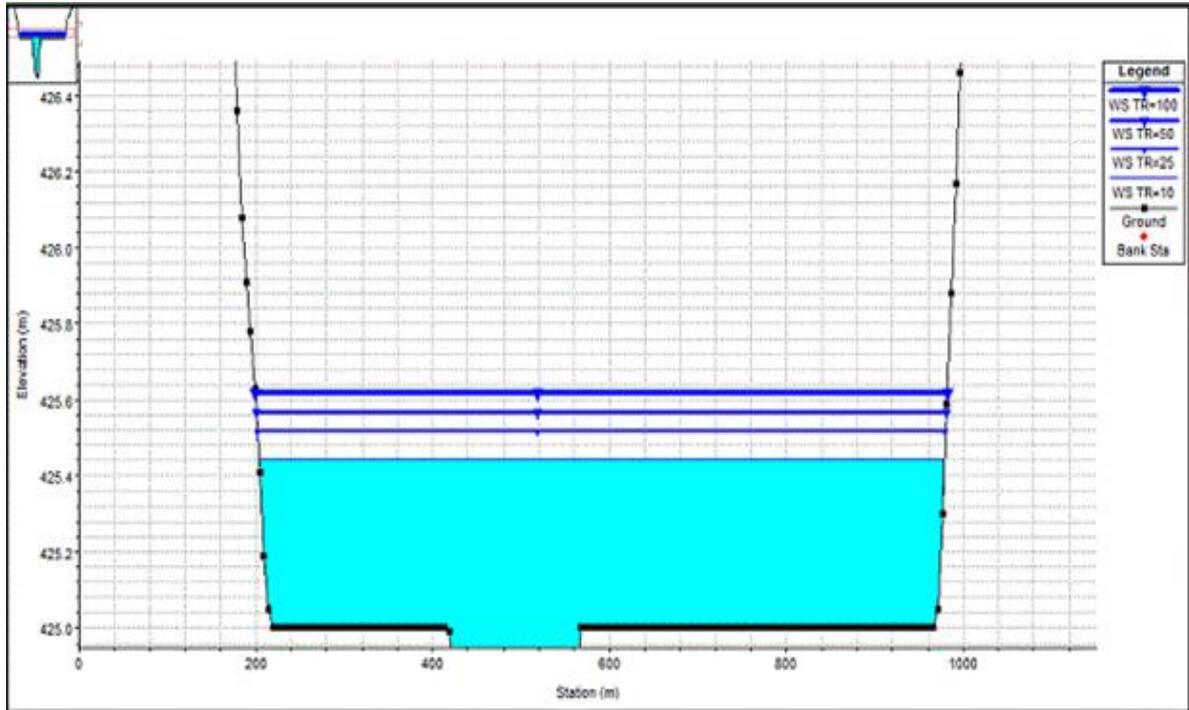


Fuente: Elaboración propia

4.6.3 PROFUNDIDAD DE LA LÁMINA DE INUNDACIÓN

En la figura 56, se puede observar el espesor de la lámina de inundación, para la sección 13+500 km. Se realizó un *zoom* a las secciones transversales de los sectores identificados de este modo se puede observar como varia la magnitud de la profundidad de los *raster* calculados para los distintos periodos de retorno, determinando su mayor espesor de lámina de inundación, igual a 65 centímetros, para el periodo de retorno de cien años.

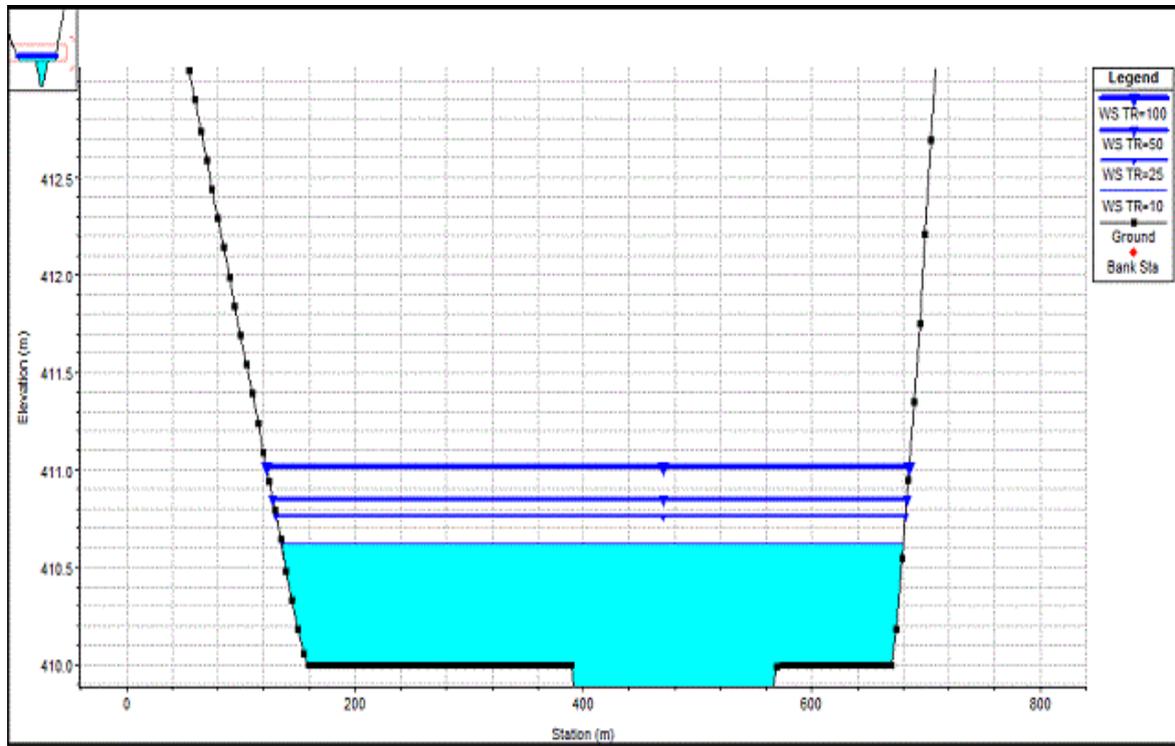
Figura 55: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 13+500 km.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 57, se puede observar el espesor de la lámina de inundación, para la sección 22+500 km. Del mismo modo que el caso anterior se realizó un *zoom* a las secciones transversales de los sectores identificados de esta manera se puede observar como varía la magnitud de la profundidad de los *raster* calculados para los distintos periodos de retorno. A comparación de la sección anterior, en esta se puede apreciar un nivel de riesgo mayor al presentarse una profundidad de la llanura de inundación de aproximadamente un metro.

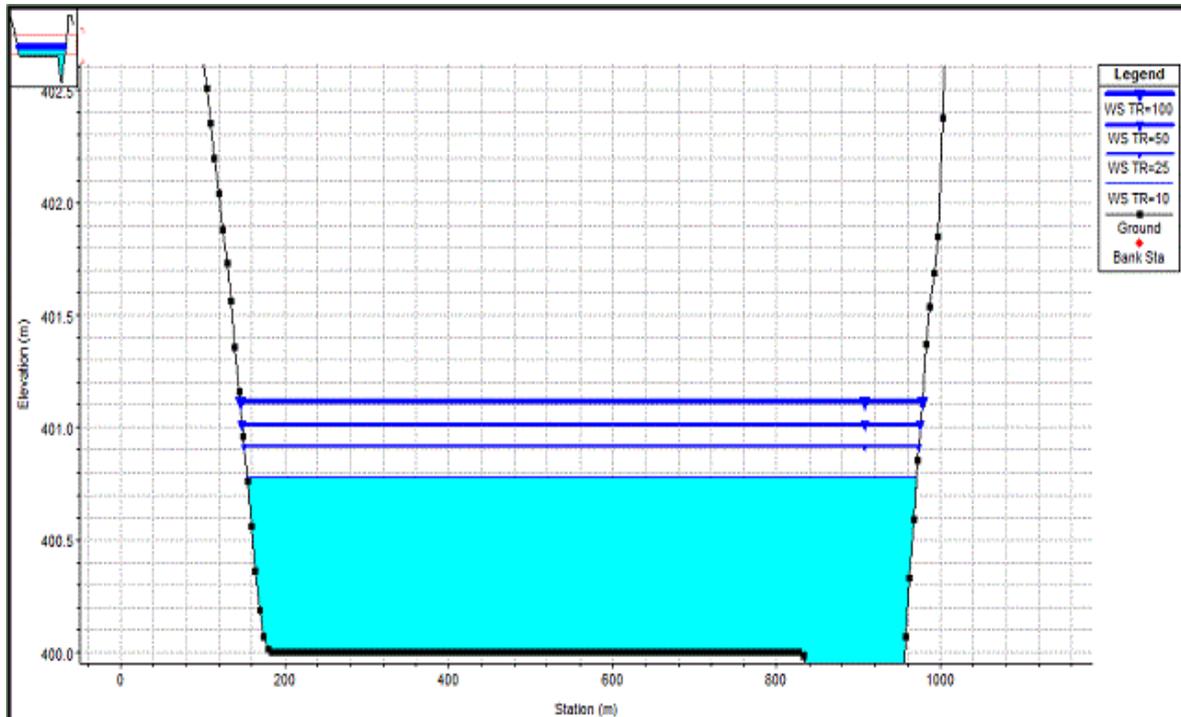
Figura 56: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 22+500 km.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 58, se puede observar el espesor de la lámina de inundación, para la sección 28+00 km. El *zoom* realizado a la sección transversal nos muestra como varía la magnitud de la profundidad de los *raster* calculados para los distintos periodos de retorno. Al igual que el caso anterior se obtiene un máximo espesor de lámina de agua de un metro, para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 57: Profundidad de la lámina de Inundación en la sección 28+00 km.



Fuente: Elaboración propia

4.6.4 ÁREAS DE INUNDACIÓN

En el cuadro 33 se pueden apreciar las el áreas de las zonas vulnerables al desborde del río Ica, tanto para la margen derecha e izquierda , para los distintos periodos de retorno, según el análisis realizado en cada una de las tres secciones transversales identificadas.

Cuadro 33: Áreas de Inundación para el valle del río Ica

Tiempos de Retorno (años)	Secciones de desborde	Margen derecha	Margen izquierda	Area afectada	Area total afectada	Unidades
TR=10	Seccion 13.5	24.97	13.8	38.77	86.19	ha
	Seccion 22.5	7.7	14.94	22.64		ha
	Seccion 28	0.38	24.4	24.78		ha
TR=25	Seccion 13.5	25.84	14.62	40.46	89.8	ha
	Seccion 22.5	8.29	15.53	23.82		ha
	Seccion 28	0.46	25.06	25.52		ha
TR=50	Seccion 13.5	26.93	15.44	42.37	93.55	ha
	Seccion 22.5	8.8	16.13	24.93		ha
	Seccion 28	0.55	25.7	26.25		ha
TR=100	Seccion 13.5	27.82	16.3	44.12	97.17	ha
	Seccion 22.5	9.3	16.74	26.04		ha
	Seccion 28	0.67	26.34	27.01		ha

FUENTE: Elaboración propia

Esta tesis tuvo como propósito calcular las áreas de inundación en el valle del río Ica, para esto se requirió previamente de la obtención de caudales máximos para diferentes periodos de retorno. Los cuales se generaron a partir de la aplicación de un Modelo Hidrológico para la cuenca en estudio.

Además de la presente investigación, se suman los aportes de instituciones como la Autoridad Nacional del Agua, la cual realizó el Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del pacífico elaborado en el 2010, en donde la cuenca del río Ica, forma parte de dicho estudio. Analizado para los periodos de retorno de 25, 50, 75, 100 y 200. Para la realización de una comparación entre ambas investigaciones se tomaron los periodos de retorno coincidentes de 25, 50 y 100 años. Obteniendo caudales máximos de 195, 240 y 310 m³/s y los obtenidos en la presente investigación fueron: 212.5, 243 y 274 m³/s. Como se puede apreciar se tiene bastante aproximación en el caudal máximo para el periodo de retorno de 50 años. De esta manera esta investigación, además aporta a los estudios hidrológicos realizados para evaluar las máximas avenidas en las cuencas de la vertiente del Pacífico.

Una vez obtenidos los caudales máximos, para diferentes periodos de retorno, se procedió a la aplicación del Modelo Hidráulico HEC RAS, mediante el cual se identificaron las secciones vulnerables a desborde del río Ica y para tener una referencia de la ubicación de dichas secciones, se revisó el informe realizado por el Senamhi de la Dirección Regional de Ica, en el cual hace referencia a los lugares específicos de la ciudad de Ica que sufrieron los daños catastróficos de la inundación del año 1998, menciona lo siguiente: el río desborda en la margen izquierda, a 100 metros aguas arriba del puente Socorro, ubicado en La Tinguña, distrito analizado en la sección 22.5 km. categorizado en la presente investigación como zona vulnerable a desborde del río Ica.

Además se menciona en el informe de que; casi al final del tramo de la ciudad, a 400 m aguas abajo del puente Cutervo, por donde se ubica la toma de La Poruma, por la margen derecha del río se produjo una grieta por el muro de encauzamiento de concreto, inundando parte de las urbanizaciones Manzanilla y Luren, pertenecientes a Los Aguijes, distrito analizado en la tercera sección de desborde ubicado a tres kilómetros aproximadamente aguas abajo del puente Cutervo.

De esta manera, la presente investigación corrobora resultados obtenidos anteriormente expuestos en otros estudios hidrológicos realizados y sucesos catastróficos ocurridos en la ciudad de Ica, en donde los lugares más afectados, causados por la inundación de 1998 podrían repetirse.

V. CONCLUSIONES

- A partir de la elaboración de las Curvas-Intensidad-Duración-Frecuencia se determinaron las precipitaciones máximas instantáneas para los distintos periodos de retorno, con una duración de tormenta de seis horas, las cuales se ingresaron al Modelo Hidrológico.
- El Modelo Hidrológico, permitió el cálculo de los caudales máximos, para diferentes periodos de retorno, los cuales fueron: 171.3, 212.5, 243.3, 274.1 m³/s, con porcentajes de error de 0.35; 0.36; 0.28 y 0.14 por ciento. Debido a estas diferencias porcentuales entre los caudales pico simulados y observados próximas a cero, se concluye que el Modelo Hidrológico está calibrado.
- El Modelo Hidráulico aplicado para el valle del río Ica, influyó determinantemente en la realización del análisis para la identificación de las zonas de riesgo de inundación concluyendo así de que las secciones: 13+500 km.; 22+500 km. y 28+00 km. presentan vulnerabilidad de desborde del río, con unas áreas de inundación de 86.19, 89.8, 93.55 y 97.17 hectáreas, para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación o mejoramiento de las estaciones hidrométricas en distintos sectores de la cuenca, de modo que se tenga un mejor registro de caudales permitiendo de esta manera una mejor calibración de los modelos matemáticos aplicados tanto para la simulación hidrológica como para la hidráulica.
- Al realizar la calibración del modelo hidrológico es recomendable comenzar por las subcuencas altas o de captación, de modo que los hidrogramas de las subcuencas aguas abajo, se van ajustando de ese modo se obtiene una mejor calibración.
- Se recomienda la construcción de estructuras hidráulicas de encauzamiento y defensas ribereñas para el control integral de las máximas avenidas en las secciones identificadas como vulnerables a desborde del río Ica.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Apaella, R. 2010. Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico. 185p.
- Argota, T. 2011. Simulación hidrológica de la cuenca del Rio Amajac Estado de Hidalgo aplicando el modelo SWAT. Tesis Mag.Sc. México D.F. Instituto Politécnico Nacional. 131 p.
- Ashakar, F., Ouarda, R. y Bobée, B. 1993. Robust estimators in hidrologic frequency analysis in Engineering Hydrology. C.Y, p 347-352.
- Bois, P. y Varas, E. 1998. Hidrología probabilística. Santiago. Universidad Católica de Chile. 156 p.
- Burrough, P., McDonnell, R. y Lloyd, C. 1986. U.S. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University. 327 p.
- Chavarri, E. 2002. Balance hidrológico de la cuenca integral del Rio Ica. 74 p.
- Chow, V., Maidment, D y Mays, L.1994. Applied Hydrology. McGraw-Hill. 582 p. International Edition.
- Chow, V. 1983. Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill. 655 p. International Edition.
- Del Río, J. 2010. Introducción al tratamiento de datos espaciales en la hidrología. Bubok. 348 p.
- HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) Technical Reference Manual. 2000 Washington, D.C.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 2007. Evaluación de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Mala. 257 p.

- Llamas, J. 1993. Hidrología general. Principios y aplicaciones. Universidad del País Vasco, Quebec, Canadá.
- MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones). 2003. Manual de Hidrología Hidráulica y Drenaje. 209 p.
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1971. Evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa. 457 p.
- Ordoñez, J. 2011. Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integrada de los Recursos Hídricos. 41 p. (Cartilla Técnica).
- Peña, F., Pinto W. y Sánchez, M. 2010 Hidrogeología de la cuenca del Rio Ica Regiones Ica y Huancavelica. 335 p. (Boletín Técnico nº 3).
- PETACC (Proyecto Especial Tambo – Ccaracocha). 2007. Recrecimiento de la presa Choclococha y canal Ingahuasi. 192 p.
- Pizarro, R. y Novoa, P. 1986. Determinación de valores probabilísticos para variables hidrológicas. Chile. 78 p.
- Rocha, A. 2007. Problemática de las inundaciones y huaicos en el Perú. 12 p.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. National Engineering Handbook. Section 4 Hydrology. SCS, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Solano, T. y Vintimilla, N. 2013. Estudio fluviomorfológico del Rio Vices y determinación de las áreas de inundación de la zona de influencia del proyecto Pacalori Aplicando Hec-GeoRAS. Universidad de Cuenca. 150 p.

- SENAMHI (Servicio Nacional de meteorología e hidrología). 2013. Proyecto implementación de un centro de pronóstico hidrometeorológico en la región Ica.
- Teixeira, A. 1995. Qual e melhor definição de SIG? Factor GIS 11, p. 20-24.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2008. HEC RAS River Analysis System. User's manual. Disponible en <http://www.hec.usace.army.mil>.

ANEXOS

Anexo 1: Regresiones Potenciales

Anexo 1.1: Regresión Potencial para $T = 2$ años

Anexo 1.2: Regresión Potencial para $T = 5$ años

Anexo 1.3: Regresión Potencial para $T = 10$ años

Anexo 1.4: Regresión Potencial para $T = 25$ años

Anexo 1.5: Regresión Potencial para $T = 50$ años

Anexo 1.6: Regresión Potencial para $T = 100$ años

Anexo 1.7: Regresión Potencial para $T = 500$ años

Periodo de retorno para T =2 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	0.6279	3.1584	-0.2021	9.975253631	0.040855405	-0.638390964
2	1080	0.7618	3.0334	-0.1181	9.20165968	0.01395873	-0.358390129
3	720	1.0046	2.8573	0.0020	8.164348995	3.97119E-06	0.005694045
4	480	1.2809	2.6812	0.1075	7.189054573	0.011556888	0.288241392
5	360	1.5320	2.5563	0.1853	6.534682475	0.034322241	0.473587317
6	300	1.7179	2.4771	0.2350	6.136129711	0.05521978	0.582095984
7	240	1.9590	2.3802	0.2920	5.665405555	0.085279999	0.695086888
8	180	2.3106	2.2553	0.3637	5.086254072	0.132292689	0.820289113
9	120	2.9385	2.0792	0.4681	4.322994654	0.219135074	0.973303526
10	60	4.5207	1.7782	0.6552	3.161821869	0.429293982	1.165054119
Suma	4980	18.654	25.257	1.989	65.438	1.022	4.007
$D = \log(d) =$	56.9687		$d =$	1.7556		$n =$	-0.6164

Periodo de retorno para T =5 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	1.0303	3.1584	0.0130	9.975253631	0.000168394	0.040985033
2	1080	1.2501	3.0334	0.0970	9.20165968	0.009400621	0.294111062
3	720	1.6485	2.8573	0.2171	8.164348995	0.047130957	0.620317325
4	480	2.1019	2.6812	0.3226	7.189054573	0.104075173	0.86498676
5	360	2.5140	2.5563	0.4004	6.534682475	0.160293333	1.02345788
6	300	2.8190	2.4771	0.4501	6.136129711	0.202583497	1.114934354
7	240	3.2146	2.3802	0.5071	5.665405555	0.25718212	1.207079539
8	180	3.7916	2.2553	0.5788	5.086254072	0.33503779	1.305406958
9	120	4.8219	2.0792	0.6832	4.322994654	0.466793018	1.42054346
10	60	7.4184	1.7782	0.8703	3.161821869	0.757438048	1.547541335
Suma	4980	30.610	25.257	4.140	65.438	2.340	9.439
$\log(d) =$	93.4846		$d =$	1.9707		$n =$	-0.6164

Periodo de retorno para T =10 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	1.2968	3.1584	0.1129	9.975253631	0.012739701	0.356485276
2	1080	1.5734	3.0334	0.1969	9.20165968	0.038750086	0.597130723
3	720	2.0749	2.8573	0.3170	8.164348995	0.10048283	0.905746594
4	480	2.6455	2.6812	0.4225	7.189054573	0.178506633	1.132825637
5	360	3.1642	2.5563	0.5003	6.534682475	0.250260179	1.278816175
6	300	3.5480	2.4771	0.5500	6.136129711	0.302485016	1.362382948
7	240	4.0460	2.3802	0.6070	5.665405555	0.368479204	1.444847442
8	180	4.7722	2.2553	0.6787	5.086254072	0.460658265	1.530694279
9	120	6.0690	2.0792	0.7831	4.322994654	0.613270886	1.628240388
10	60	9.3369	1.7782	0.9702	3.161821869	0.941293438	1.72516729
Suma	4980	38.527	25.257	5.139	65.438	3.267	11.962
$\log(d) =$	117.6613		$d =$	2.0706		$n =$	-0.6164

Periodo de retorno para T =25 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	1.6335	3.1584	0.2131	9.975253631	0.045415939	0.673079123
2	1080	1.9819	3.0334	0.2971	9.20165968	0.088262637	0.901200728
3	720	2.6135	2.8573	0.4172	8.164348995	0.174080989	1.192165234
4	480	3.3323	2.6812	0.5227	7.189054573	0.273257446	1.401592912
5	360	3.9857	2.5563	0.6005	6.534682475	0.360600229	1.535059606
6	300	4.4692	2.4771	0.6502	6.136129711	0.422794175	1.610689262
7	240	5.0964	2.3802	0.7073	5.665405555	0.500223427	1.683439509
8	180	6.0112	2.2553	0.7790	5.086254072	0.606775526	1.756762503
9	120	7.6446	2.0792	0.8834	4.322994654	0.780317839	1.836657248
10	60	11.7610	1.7782	1.0704	3.161821869	1.145847472	1.903408941
Suma	4980	48.529	25.257	6.141	65.438	4.398	14.494
log(d) =	148.2086		d=	2.1709		n=	-0.6164
Periodo de retorno para T =50 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	1.8832	3.1584	0.2749	9.975253631	0.075571918	0.868244809
2	1080	2.2850	3.0334	0.3589	9.20165968	0.128797438	1.088646035
3	720	3.0132	2.8573	0.4790	8.164348995	0.229463468	1.368729278
4	480	3.8418	2.6812	0.5845	7.189054573	0.341679573	1.567275693
5	360	4.5951	2.5563	0.6623	6.534682475	0.43863241	1.69302201
6	300	5.1525	2.4771	0.7120	6.136129711	0.506971858	1.763758794
7	240	5.8757	2.3802	0.7691	5.665405555	0.591450306	1.83052065
8	180	6.9303	2.2553	0.8408	5.086254072	0.70686273	1.896123265
9	120	8.8135	2.0792	0.9451	4.322994654	0.893307243	1.965136747
10	60	13.5593	1.7782	1.1322	3.161821869	1.281958284	2.0132868
Suma	4980	55.950	25.257	6.759	65.438	5.195	16.055
log(d) =	170.8704		d=	2.2327		n=	-0.6164
Periodo de retorno para T =100 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	2.1312	3.1584	0.3286	9.975253631	0.107987238	1.037882504
2	1080	2.5858	3.0334	0.4126	9.20165968	0.170234012	1.251573189
3	720	3.4098	2.8573	0.5327	8.164348995	0.283805622	1.522198457
4	480	4.3475	2.6812	0.6382	7.189054573	0.407355768	1.711286897
5	360	5.2000	2.5563	0.7160	6.534682475	0.512661648	1.830322673
6	300	5.8308	2.4771	0.7657	6.136129711	0.586342756	1.89680658
7	240	6.6492	2.3802	0.8228	5.665405555	0.676948353	1.958363337
8	180	7.8426	2.2553	0.8945	5.086254072	0.800062156	2.017255412
9	120	9.9738	2.0792	0.9989	4.322994654	0.997721241	2.076810919
10	60	15.3443	1.7782	1.1859	3.161821869	1.406469372	2.108792455
Suma	4980	63.315	25.257	7.296	65.438	5.950	17.411
log(d) =	193.3648		d=	2.2864		n=	-0.6164
Periodo de retorno para T =500 años							
Nº	x	y	$x_i = \log x$	$y_i = \log y$	x_i^2	y_i^2	$x_i * y_i$
1	1440	2.7041	3.1584	0.4320	9.975253631	0.186637524	1.364462034
2	1080	3.2809	3.0334	0.5160	9.20165968	0.266251647	1.565233863
3	720	4.3265	2.8573	0.6361	8.164348995	0.404668547	1.817651024
4	480	5.5163	2.6812	0.7416	7.189054573	0.550038523	1.988531357
5	360	6.5979	2.5563	0.8194	6.534682475	0.67142534	2.094648276
6	300	7.3983	2.4771	0.8691	6.136129711	0.755389992	2.152944721
7	240	8.4367	2.3802	0.9262	5.665405555	0.857791326	2.204480834
8	180	9.9509	2.2553	0.9979	5.086254072	0.995731508	2.250454051
9	120	12.6550	2.0792	1.1023	4.322994654	1.214980428	2.291801452
10	60	19.4692	1.7782	1.2893	3.161821869	1.66241865	2.292656024
Suma	4980	80.336	25.257	8.330	65.438	7.565	20.023
log(d) =	245.3460		d=	2.3898		n=	-0.6164

Anexo 2: Precipitación Instantánea (mm)

Anexo 2.1: Precipitación Instantánea (mm) para T = 10 años

Anexo 2.2: Precipitación Instantánea (mm) para T = 25 años

Anexo 2.3: Precipitación Instantánea (mm) para T = 50 años

Anexo 2.4: Precipitación Instantánea (mm) para T = 100 años

Precipitaciones instantaneas (mm.) para un TR = 10 años						
Instante (horas)	Estaciones Pluviometricas					
	Challaca	Chocorvos	Cordova	Cusicancha	San Camilo	Tambo
1	1.10	1.51	2.29	1.51	0.54	1.96
2	1.88	2.57	3.91	2.57	0.92	3.35
3	6.10	8.32	12.65	8.32	2.98	10.85
4	1.36	1.86	2.82	1.86	0.67	2.42
5	0.95	1.29	1.96	1.29	0.46	1.68
6	0.84	1.14	1.73	1.14	0.41	1.49

Precipitaciones instantaneas (mm.) para un TR = 25 años						
Instante (horas)	Estaciones Pluviometricas					
	Challaca	Chocorvos	Cordova	Cusicancha	San Camilo	Tambo
1	1.38	1.93	2.85	1.91	0.74	2.35
2	2.35	3.29	4.87	3.25	1.26	4.00
3	7.61	10.65	15.77	10.53	4.07	12.96
4	1.70	2.37	3.52	2.35	0.91	2.89
5	1.18	1.65	2.44	1.63	0.63	2.01
6	1.04	1.46	2.16	1.44	0.56	1.77

Precipitaciones instantaneas (mm.) para un TR = 50 años						
Instante (horas)	Estaciones Pluviometricas					
	Challaca	Chocorvos	Cordova	Cusicancha	San Camilo	Tambo
1	1.63	2.32	3.37	2.28	0.93	2.68
2	2.78	3.96	5.75	3.88	1.59	4.58
3	9.00	12.82	18.63	12.58	5.16	14.83
4	2.01	2.86	4.15	2.81	1.15	3.31
5	1.39	1.99	2.89	1.95	0.80	2.30
6	1.23	1.76	2.55	1.72	0.71	2.03

Precipitaciones instantaneas (mm.) para un TR = 100 años						
Instante (horas)	Estaciones Pluviometricas					
	Challaca	Chocorvos	Cordova	Cusicancha	San Camilo	Tambo
1	1.92	2.79	3.98	2.72	1.18	3.07
2	3.28	4.77	6.79	4.64	2.02	5.24
3	10.64	15.45	22.00	15.03	6.53	16.96
4	2.37	3.45	4.91	3.35	1.46	3.78
5	1.65	2.39	3.41	2.33	1.01	2.63
6	1.46	2.12	3.01	2.06	0.89	2.32

Anexo 3: Cálculo del Numero de Curva

Anexo 3.1: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 1

Anexo 3.2: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 2

Anexo 3.3: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 3

Anexo 3.4: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 4

Anexo 3.5: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 5

Anexo 3.6: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 6

Anexo 3.7: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 7

Anexo 3.8: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 8

Anexo 3.9: Cálculo del Numero de Curva para la Subcuenca 9

CN para la Subcuenca 1					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CNpond
Pastizales	A	67	2625390.29	0.929263699	0.622606679
Pastizales	A	67	50582.48	0.017903801	0.011995546
Formación Lítica	D	89	47818.07	0.016925329	0.015063543
Formación Lítica	D	89	1108795.83	0.392461158	0.349290431
Pastizales	A	67	384224.08	0.135997109	0.091118063
Pastizales	A	67	658518.29	0.233084257	0.156166452
Pastizales	A	67	844037.08	0.298749113	0.200161906
Formación Lítica	D	89	111977077.86	39.63457694	35.27477347
Pastizales	A	67	191461.57	0.06776832	0.045404774
Pastizales	A	67	24916725.81	8.819339681	5.908957586
Pastizales	A	67	8786687.01	3.11007064	2.083747329
Pastizales	A	67	122501.02	0.043359553	0.029050901
Pastizales	A	67	3630.54	0.001285038	0.000860976
Pastizales	A	67	32.60	1.15398E-05	7.73164E-06
Pastizales	A	67	11997.44	0.004246523	0.002845171
Formación Lítica	D	89	5293.67	0.00187371	0.001667602
Formación Lítica	D	89	9779.24	0.003461388	0.003080635
Formación Lítica	D	89	1.40	4.95903E-07	4.41354E-07
Formación Lítica	D	89	41305.62	0.014620232	0.013012007
Formación Lítica	D	89	0.80	2.83634E-07	2.52434E-07
Formación Lítica	D	89	6512.12	0.00230498	0.002051432
Formación Lítica	D	89	1087.08	0.000384776	0.000342451
Formación Lítica	D	89	519.04	0.000183715	0.000163507
Formación Lítica	D	89	249.32	8.82479E-05	7.85407E-05
Pastizales	A	67	1.43	5.06862E-07	3.39597E-07
Pastizales	A	67	545111.08	0.192943479	0.129272131
Formación Lítica	D	89	1117978.10	0.395711245	0.352183008
Formación Lítica	D	89	76.01	2.69035E-05	2.39441E-05
Pastizales	A	67	173578.41	0.061438529	0.041163815
Pastizales	A	67	56234.19	0.019904236	0.013335838
Pastizales	A	67	4443.04	0.001572625	0.001053659
Pastizales	A	67	251540.00	0.089033235	0.059652268
Pastizales	A	67	7022648.08	2.485684489	1.665408608
Formación Lítica	D	89	6571637.80	2.326048231	2.070182925
Formación Lítica	D	89	5835.18	0.002065376	0.001838185
Formación Lítica	D	89	5454.03	0.001930469	0.001718117
Formación Lítica	D	89	1086.72	0.000384646	0.000342335
Formación Lítica	D	89	7.32	2.59214E-06	2.307E-06
Formación Lítica	D	89	13660.39	0.004835132	0.004303267
Formación Lítica	A	67	6333501.40	2.241759236	1.501978688
Formación Lítica	A	67	55829.66	0.019761055	0.013239907
Formación Lítica	A	67	112777.77	0.039917985	0.02674505
Pastizales	A	67	10603320.71	3.753072846	2.514558807
Pastizales	A	67	71087149.59	25.16148084	16.85819217
Formación Lítica	D	89	23105369.73	8.178205503	7.278602897
Pastizales	A	67	2748637.86	0.972887494	0.651834621
Pastizales	A	67	10.81	3.82742E-06	2.56437E-06
Pastizales	A	67	2716.60	0.000961546	0.000644236
Pastizales	A	67	510.26	0.000180608	0.000121007
Pastizales	A	67	2312.91	0.000818661	0.000548503
Pastizales	A	67	461.23	0.000163254	0.00010938
Pastizales	A	67	2338.11	0.000827581	0.000554479
Pastizales	A	67	1042.20	0.00036889	0.000247156
Pastizales	A	67	111.66	3.95221E-05	2.64798E-05
Formación Lítica	A	67	904101.10	0.320008929	0.214405982
TOTAL			284725600.00	100%	78.21

CN para la Subcuenca 2					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area_m2	Porcentaje	CNpond
Cultivos	A	67	1083062.48	0.610900176	0.40930312
Cultivos	A	67	1919988.78	1.082967518	0.72558824
Formación Lítica	D	89	7354.91	0.004148531	0.00369219
Cultivos	A	67	198153.51	0.111768265	0.07488474
Formación Lítica	A	67	406676.20	0.229385257	0.15368812
Cultivos	A	67	11738337.99	6.620996375	4.43606757
Cultivos	A	67	99301995.82	56.01117935	37.5274902
Formación Lítica	D	89	21222222.62	11.97037086	10.6536301
Cultivos	A	67	11480431.21	6.475524346	4.33860131
Cultivos	A	67	14417710.33	8.13229334	5.44863654
Formación Lítica	A	67	14755140.51	8.322620452	5.5761557
Formación Lítica	A	67	758525.63	0.427845531	0.28665651
TOTAL			177289600.00	100%	69.63

CN para la Subcuenca 3					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m²	Porcentaje %	CN pond
Pastizales	A	67	1022652.55	0.410684757	0.275158787
Pastizales	A	67	68538.23	0.027524113	0.018441156
Pastizales	A	67	4006.00	0.001608759	0.001077868
Pastizales	A	67	21760.86	0.008738895	0.00585506
Pastizales	A	67	77122.95	0.030971634	0.020750995
Pastizales	A	67	177961.49	0.071467158	0.047882996
Formación Lítica	D	89	1962.25	0.000788016	0.000701334
Pastizales	A	67	22641.27	0.009092457	0.006091946
Pastizales	A	67	2840.69	0.001140786	0.000764327
Pastizales	A	67	162994.42	0.065456566	0.043855899
Pastizales	A	67	73712.36	0.029601983	0.019833329
Pastizales	A	67	37877.55	0.015211162	0.010191479
Pastizales	A	67	67113.41	0.026951924	0.018057789
Pastizales	A	85	24482066.14	9.83169836	8.356943606
Pastizales	A	67	8959150.10	3.597885116	2.410583028
Pastizales	A	67	2201207.88	0.883978164	0.59226537
Pastizales	A	67	59067483.73	23.7207791	15.892922
Pastizales	A	67	45663690.55	18.33797968	12.28644639
Pastizales	A	67	1062.24	0.000426584	0.000285811
Formación Lítica	D	89	25371094.08	10.18872111	9.067961786
Formación Lítica	D	89	6.02	2.41572E-06	2.14999E-06
Formación Lítica	D	89	3203.80	0.001286608	0.001145082
Formación Lítica	D	89	3896.56	0.001564812	0.001392683
Pastizales	A	85	40336213.58	16.19853008	13.76875057
Pastizales	A	67	20426565.63	8.203058953	5.496049499
Pastizales	A	67	19648692.54	7.890674632	5.286752003
Pastizales	A	67	434858.05	0.174633675	0.117004562
Formación Lítica	A	67	671191.98	0.269542493	0.18059347
TOTAL			250499600	100%	73.93

CN para la Subcuenca 4					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Cultivos	A	67	6994532.41	4.27	2.86
Cultivos	C	85	5354145.28	3.27	2.78
Cultivos	A	67	4970060.33	3.03	2.03
Cultivos	A	67	2427758.07	1.48	0.99
Formación Lítica	A	67	144950.40	0.09	0.06
Cultivos	C	85	628318.33	0.38	0.33
Cultivos	C	85	280319.70	0.17	0.15
Cultivos	A	67	21715524.24	13.25	8.88
Cultivos	A	67	47143607.49	28.76	19.27
Formación Lítica	D	89	3926629.97	2.40	2.13
Cultivos	B	77	643650.91	0.39	0.30
Formación Lítica	A	67	9938.44	0.01	0.00
Cultivos	A	67	13520201.66	8.25	5.53
Cultivos	A	67	7371897.85	4.50	3.01
Cultivos	A	67	17675882.31	10.78	7.22
Cultivos	A	67	27895097.41	17.02	11.40
Formación Lítica	A	67	3215085.20	1.96	1.31
TOTAL			163917600	100%	68.25

CN para la Subcuenca 5					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Pastizales	C	85	2702119.76	2.85	2.42
Pastizales	C	85	2597201.13	2.74	2.33
Pastizales	A	77	5197673.56	5.48	4.22
Pastizales	B	77	3632048.60	3.83	2.95
Pastizales	A	67	661921.50	0.70	0.47
Pastizales	A	67	376874.72	0.40	0.27
Pastizales	A	67	8191657.64	8.63	5.78
Pastizales	A	67	14647724.82	15.43	10.34
Formación Lítica	A	67	408742.26	0.43	0.29
Pastizales	A	85	18157197.35	19.13	16.26
Pastizales	A	67	5496733.35	5.79	3.88
Pastizales	A	67	18626555.14	19.62	13.15
Pastizales	A	67	12262955.00	12.92	8.66
Formación Lítica	A	67	1963639.76	2.07	1.39
TOTAL			94923044.58	100%	72.38

CN para la Subcuenca 6					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Pastizales	A	67	864612.32	0.25	0.17
Cultivos	C	85	62277887.59	18.08	15.36
Cultivos	C	85	26118350.55	7.58	6.44
Pastizales	A	67	63648636.33	18.47	12.38
Pastizales	A	67	11676494.33	3.39	2.27
Pastizales	A	67	16711722.90	4.85	3.25
Matorrales	A	67	35915443.00	10.42	6.98
Cultivos	B	77	19354041.34	5.62	4.33
Cultivos	C	85	27384700.31	7.95	6.76
Cultivos	C	85	466985.89	0.14	0.12
Cultivos	C	85	1827052.10	0.53	0.45
Cultivos	C	85	5431666.33	1.58	1.34
Pastizales	A	67	231782.34	0.07	0.05
Pastizales	A	67	1086643.36	0.32	0.21
Pastizales	A	67	5479303.77	1.59	1.07
Cultivos	C	85	10433131.60	3.03	2.57
Cultivos	C	85	55389865.08	16.08	13.67
Cultivos	A	67	241288.26	0.07	0.05
TOTAL			344539607.40	100%	77.45

CN para la Subcuenca 7					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Pastizales	A	67	226026.51	0.067571292	0.04527277
Pastizales	A	67	58046.77	0.017353254	0.01162668
Cultivos	C	85	305177.21	0.091233627	0.07754858
Pastizales	A	67	281460.39	0.084143412	0.05637609
Cultivos	C	85	8211943.77	2.454984792	2.08673707
Cultivos	C	85	293223.73	0.087660098	0.07451108
Pastizales	A	67	1401307.43	0.418924985	0.28067974
Cultivos	C	85	9697852.70	2.899201645	2.4643214
Cultivos	C	85	7609.28	0.002274817	0.00193359
Cultivos	C	85	29922651.66	8.945464902	7.60364517
Cultivos	C	85	9073860.43	2.712657317	2.30575872
Cultivos	C	85	148360.82	0.044352904	0.03769997
Cultivos	C	85	1238666.10	0.370302881	0.31475745
Cultivos	C	85	3288918.87	0.983231989	0.83574719
Cultivos	C	85	7358417.90	2.199820719	1.86984761
Cultivos	C	85	103703076.17	31.00234025	26.3519892
Pastizales	A	67	64394.93	0.019251053	0.01289821
Cultivos	C	85	69623740.70	20.81422248	17.6920891
Cultivos	C	85	28445870.91	8.503976945	7.2283804
Cultivos	D	89	377548.26	0.112869166	0.10045356
Cultivos	C	85	13623310.41	4.072728798	3.46181948
Pastizales	A	67	37796041.35	11.29923795	7.57048943
Pastizales	A	67	2897882.12	0.866330401	0.58044137
Pastizales	A	67	1763584.37	0.527228744	0.35324326
Pastizales	A	67	6564.60	0.001962508	0.00131488
Pastizales	A	67	0.71	2.12796E-07	1.4257E-07
Pastizales	A	67	4581399.52	1.369622889	0.91764734
Pastizales	A	67	103862.37	0.031049963	0.02080348
TOTAL			334500800	100%	82.36

CN para la Subcuenca 8					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Cultivos	C	85	2169012.58	1.990321514	1.69177329
Cultivos	C	85	115843.73	0.106300104	0.09035509
Pastizales	A	67	37197971.14	34.13346835	22.8694238
Cultivos	C	85	2141747.99	1.965303076	1.67050761
Cultivos	C	85	48455324.27	44.4634002	37.7938902
Pastizales	A	67	14637025.67	13.4311748	8.99888712
Pastizales	A	67	457244.06	0.419574649	0.28111501
Cultivos	C	85	1596831.75	1.465279006	1.24548715
Cultivos	C	85	2206998.81	2.0251783	1.72140156
TOTAL			108978000.00	100%	76.36

CN para la Subcuenca 9					
Uso de Suelo	Tipo de Suelo	CN	Area m ²	Porcentaje %	CN pond
Cultivos	C	85.00	4870808.45	1.699481017	1.444558864
Pastizales	A	67.00	169868.16	0.059268952	0.039710198
Pastizales	A	67.00	306450.34	0.106924042	0.071639108
Cultivos	D	89.00	1980229.61	0.690924856	0.614923122
Cultivos	D	89.00	1222835.54	0.426661365	0.379728615
Pastizales	A	67.00	2475612.15	0.863769515	0.578725575
Pastizales	A	67.00	2406249.83	0.839568204	0.562510697
Pastizales	A	67.00	4024271.19	1.404114444	0.940756678
Pastizales	A	67.00	22263.64	0.007768041	0.005204587
Pastizales	A	67.00	259931.11	0.09069295	0.060764276
Pastizales	A	67.00	315446.37	0.110062861	0.073742117
Pastizales	A	67.00	3691.52	0.001288013	0.000862969
Cultivos	C	85.00	4380529.50	1.528417062	1.299154502
Pastizales	A	67.00	447991.52	0.156309387	0.104727289
Pastizales	A	67.00	19410.48	0.006772539	0.004537601
Pastizales	A	67.00	162200.43	0.056593592	0.037917707
Cultivos	D	89.00	73552.62	0.025663354	0.022840385
Cultivos	D	89.00	205855.09	0.071825205	0.063924433
Cultivos	D	89.00	3522711.88	1.229114639	1.093912029
Pasto	A	67.00	723541.37	0.252451893	0.169142769
Pasto	C	85.00	9452545.17	3.298101588	2.803386349
Pasto	C	85.00	44932691.92	15.67753234	13.32590249
Pasto	C	85.00	47981967.09	16.74145947	14.23024055
Pasto	A	67.00	603415.16	0.21053848	0.141060782
Cultivos	C	85.00	42831469.24	14.9443916	12.70273286
Cultivos	C	85.00	14062823.23	4.906680558	4.170678474
Cultivos	D	89.00	104389.00	0.03642252	0.032416042
Cultivos	D	89.00	45894.25	0.01601303	0.014251597
Cuerpo de Agua	D	100.00	88539.84	0.030892568	0.030892568
Pasto	C	85.00	20883190.25	7.286384954	6.193427211
Pasto	A	77.00	10564253.91	3.685989538	2.838211944
Cultivos	D	89.00	63605.70	0.022192761	0.019751557
Pastizales	A	67.00	1719461.89	0.599940004	0.401959803
Pastizales	A	67.00	20.69	7.21741E-06	4.83566E-06
Pastizales	A	67.00	308016.26	0.107470412	0.072005176
Pastizales	C	85.00	39784720.24	13.88134588	11.799144
Pastizales	A	67.00	1676627.80	0.584994698	0.391946448
Pastizales	C	85.00	7697718.02	2.685822236	2.282948901
Cultivos	C	85.00	12511712.25	4.365480121	3.710658103
Cultivos	D	89.00	584884.31	0.204072853	0.18162484
Cuerpo de Agua	D	100.00	40038.10	0.013969751	0.013969751
Cultivos	C	85.00	878346.55	0.306465199	0.26049542
Cultivos	C	85.00	734617.55	0.256316501	0.217869025
Pastizales	A	67.00	637205.63	0.222328363	0.148960004
Cultivos	C	85.00	206401.85	0.072015978	0.061213581
Cultivos	C	85.00	617633.56	0.215499444	0.183174527
TOTAL			287866800	100%	83.80

