



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN DE HIDROGRAMAS DE CRECIDAS  
USANDO PROYECCIONES DE PRECIPITACIONES  
DIARIAS DEL MODELO CLIMATICO MK3.6.  
APLICACIÓN EN LA CUENCA BUTAMALAL EN  
BUTAMALAL, VIII REGION, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MANUEL ANDRÉS DÍAZ COFRÉ

PROFESOR GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MIGUEL LAGOS ZUÑIGA  
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE  
2015

# Resumen

El trabajo de título se centró en la modelación de hidrogramas de crecidas futuras, asociadas al cambio climático, en la cuenca Butamalal en Butamalal en la VIII Región de Chile. Los modelos de circulación global (GCM) que proyectan las variables meteorológicas para diferentes escenarios climáticos futuros, proporcionan los valores de la variable precipitación a escala mensual o diaria. Para estimar hidrogramas de crecidas, se requiere esta información a escalas temporales horarias o a mayor resolución.

El objetivo general fue explorar metodologías para desagregar los valores futuros de precipitación diaria de manera de obtener los hietogramas requeridos por un modelo hidrológico aplicado en HEC-HMS, que permitió derivar hidrogramas de crecidas para eventos, además se estableció una metodología para determinar o modelar los caudales en forma continua en Matlab. Para ello se analizó en primer lugar, las metodologías de desagregación tradicionalmente usadas en Chile como son el método de Varas, distribuciones propias de ciertas zonas y curvas IDF. Luego, se calibró y validó el modelo hidrológico usando los antecedentes observados a la escala temporal deseada, y se analizaron los hidrogramas obtenidos al usar los hietogramas simulados con el método de desagregación seleccionado.

Previo al análisis de los eventos de crecidas futuros, se debió hacer un tratamiento de los datos de precipitación proyectados por el modelo GCM MK3.6 para el escenario de cambio climático escogido, que corresponde al más desfavorable de aquellos pertenecientes a la comunicación más reciente del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, denominado RCP 8.5. Dicho tratamiento, se refiere al escalamiento espacial y temporal de la información, usando los antecedentes medidos en estaciones en el área de interés.

Los resultados obtenidos mostraron, descensos significativos entre el 10% y el 20% de las precipitaciones medias mensuales en la cuenca de estudio, para las 10 corridas del escenario RCP 8.5. También se observó una disminución de los caudales medios anuales entre el 8% y el 17%, dependiendo de la proyección a utilizar. Además, se observa una dispersión en las proyecciones de los caudales máximos instantáneos obtenidos del escenario RCP 8.5. Luego, para ciertas proyecciones se observó descensos de los caudales en el rango del 6% al 34% dependiendo del periodo de retorno. Sin embargo, otra proyección mostró aumentos de los caudales máximos instantáneos del orden del 32% dependiendo del periodo de retorno.

Respecto a la distribución de precipitaciones, para crecidas asociadas a un periodo de retorno de 10, 20 y 50 años de precipitación máxima diaria, bajo una condición de humedad media, se observó una desviación estándar de 29, 36 y 43 [m<sup>3</sup>/s] respectivamente, para los caudales máximos instantáneos asociados a diferentes distribuciones de precipitaciones.

Finalmente este trabajo concluye respecto a las variaciones del cambio climático, que a pesar de que las precipitaciones anuales disminuyen para todas las proyecciones, los resultados de caudales máximos instantáneos muestran que hay posibles proyecciones donde eventos extremos pueden darse con mayor frecuencia, generando crecidas de mayor magnitud a las que se tendría si no se considerase cambio climático, factor importante a tener en cuenta para la construcción de obras hidráulicas en la zona de estudio.

# Agradecimientos

*La vida está constituida de múltiples etapas, hoy con este trabajo de memoria se pone fin a una de ellas. Ciertamente al final de cada etapa no queda más que agradecer a todas las personas que hicieron posible llevar a cabo este proceso.*

*En primera instancia quisiera agradecer a mis padres, ya que sin ellos nada de esto sería posible. Agradecer sus incansables palabras de ánimo, y los esfuerzos que han realizado para desarrollarme, no solo en mi época universitaria sino desde el momento en que nací, nunca cerrándome las puertas para yo crecer como ser humano.*

*Luego, agradecer a mis hermanos que a pesar de estar lejos, siempre me brindaron su apoyo, siempre los sentí a mi lado y siempre supe que estarían tras el teléfono cuando los necesitase.*

*Agradecer profundamente a la profesora Ximena Vargas, quien me guio en este proceso y siempre me ayudo con una excelente disposición ante cualquier duda o consulta. De quien aprendí y sentí motivación para desarrollarme en esta bella área de la ingeniería que es la hidrología.*

*Agradecer la oportunidad de haber conocido excelentes personas dentro y fuera de la universidad durante todo este proceso, que hicieron el desarrollo del mismo una experiencia más enriquecedora y entretenida.*

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	General .....	2
1.2.2	Específicos.....	2
1.3	Estructura de Informe.....	3
<b>2</b>	<b>Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
2.1	Cambio Climático .....	5
2.2	Modelación Climática .....	8
2.2.1	CSIRO-MK3.6.....	9
2.3	Métodos de Procesamiento de Información .....	10
2.3.1	Proceso de escalamiento.....	11
2.4	Modelación Hidrológica.....	13
2.4.1	Infiltraciones Mediante Curva Número .....	13
2.4.2	Índices de Modelación Hidrológica.....	16
2.4.3	Modelación Hidrologica en HEC-HMS .....	17
2.4.4	SCS Hidrograma Unitario.....	18
2.4.5	Método de Recesión Para la Estimación del Flujo Base.....	20
2.5	Precipitaciones Máximas .....	22
2.6	Métodos de Segregación .....	24
2.6.1	Curvas IDF y Distribución de Bloques Alternados .....	24
2.6.2	Distribución de Varas .....	26
<b>3</b>	<b>Caracterización Zona de Estudio.....</b>	<b>28</b>
3.1	Antecedentes Zona de Estudio .....	28
3.2	Geología e Hidrogeología .....	29



3.3	Topografía y Delimitación de la Cuenca.....	32
3.4	Uso de Suelo .....	34
3.5	Clima.....	38
3.6	Información Disponible .....	40
<b>4</b>	<b>Modelación Hidrológica.....</b>	<b>44</b>
4.1	Análisis de Información .....	44
4.1.1	Procesamiento Información Modelo de Circulación Global.....	44
4.1.2	Distribución de Tormentas .....	49
4.1.3	Análisis de Duración de Tormentas.....	56
4.1.4	Análisis de los Antecedentes de Humedad en la Zona .....	59
4.2	Proceso de Calibración.....	61
4.2.1	Etapas de Calibración .....	62
4.2.2	Parámetros Calibrados.....	63
4.3	Proceso de Validación.....	66
<b>5</b>	<b>Impacto de Cambio Climático.....</b>	<b>68</b>
5.1	Proyecciones .....	68
5.1.1	Desagregación de Precipitaciones Horarias.....	68
5.1.2	Análisis de Frecuencia Precipitaciones Proyectadas .....	69
5.1.3	Proyección de Caudales .....	70
5.2	Análisis de Resultados .....	75
5.2.1	Análisis de Proyección de Precipitaciones .....	75
5.2.2	Análisis de Proyección de Volúmenes.....	79
5.2.3	Análisis de Caudales Medios Mensuales.....	83
5.2.4	Análisis de Crecidas Orientado a la Distribución de Tormentas .....	86
5.2.5	Análisis de Proyección de Caudales Máximos .....	103
5.3	Síntesis de Caudales Futuros.....	112
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>114</b>

<b>Bibliografía.....</b>	<b>119</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>123</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>124</b>
A.1 Escalamiento Temporal de Modelo de Cambio Climático.....	124
A.1.1 Escalamiento Temporal Escenario 2.....	124
A.1.2 Escalamiento Temporal Escenario 3.....	126
A.1.3 Escalamiento Temporal Escenario 9.....	129
A.2 Precipitación Máxima Acumulada para estimación de coeficientes de duración.....	132
A.3 Regresiones de Curva IDF .....	132
A.4 Curvas de Probabilidad Acumulada Para la Estimación de Duraciones Mediante Árbol de Decisión .....	134
<b>Anexo B.....</b>	<b>135</b>
B.1 Gráficos de Calibración.....	135
B.2 Gráficos de Validación.....	143
<b>Anexo C .....</b>	<b>149</b>
C.1 Análisis de Frecuencia de Proyecciones de Precipitaciones .....	149
C.2 Resultados Curvas de Variación Estacional .....	150
C.3 Caudales Máximos .....	151
C.3.1 Series de Caudales Máximos Por Año.....	151
C.3.2 Serie de Excedencia Anual .....	153
C.3.3 Análisis de frecuencia Caudales Máximos y Máximos Instantáneos .....	156
C.4 Hidrogramas de Crecidas Para Precipitación Máxima .....	158
C.5 Hidrogramas de Crecidas Para Caudal Máximo .....	166
C.6 Caudales Máximos Asociados a Precipitaciones de Periodo de Retorno 10, 20 y 50 años.....	174

# Índice de Tablas

Tabla 2.1 Trayectorias representativas de concentración (Moss et al., 2010).....	7
Tabla 2.2 Potenciales efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Pachauri & Reisinger, 2007).....	8
Tabla 2.3 Resolución modelo CSIRO-MK3.6 (Gómez, 2013) .....	10
Tabla 2.4 Clasificación de clases de antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracción de lluvia SCS.....	15
Tabla 2.5 Hidrograma unitario adimensional del SCS. ....	20
Tabla 3.1 Propiedades geomorfológicas Cuenca Butamalal .....	33
Tabla 3.2 Superficies uso de suelo Cuenca Butamalal sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF). ....	35
Tabla 3.3 Superficies uso de suelo Cuenca Butamalal sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF). ....	37
Tabla 4.1 Antecedentes de distancias a estación Cañete y ubicación puntos GCM.....	44
Tabla 4.2 Valores promedio de precipitación de registros observados y <i>ensembles</i> futuros .....	46
Tabla 4.3 Porcentaje de variación de precipitación en <i>ensembles</i> proyectados respecto al registro observado .....	46
Tabla 4.4 Distribución promedio mensual de intensidad media de precipitación diaria de registros observados y <i>ensembles</i> efectuados mensualmente.....	48
Tabla 4.5 Distribución de grupos en las tormentas estudiadas según metodología de Varas .....	50
Tabla 4.6 Resultados de análisis de Frecuencia con distribución Log-Pearson Cuenca Butamalal en Butamalal. ....	52

Tabla 4.7 Coeficientes de duración para los años 2012, 2013 y 2014 para las estaciones de Estero Nonguén en Concepción, Estación Pte. Camino Contulmo y Concepción .....	53
Tabla 4.8 Coeficientes de correlación para coeficientes de duración entre estaciones, años 2012, 2013 y 2014 .....	53
Tabla 4.9 Coeficientes de correlación, entre los coeficientes de duración de las estaciones y el valor de Concepción .....	53
Tabla 4.10 Resumen de coeficientes obtenidos con la interpolación de la Ecuación 2.12. ....	54
Tabla 4.11 Valores de Curva IDF Cuenca Butamalal en Butamalal .....	55
Tabla 4.12 Promedio anual de antecedentes de humedad para precipitaciones ocurridas dentro de los 5 días previos a cada evento.....	60
Tabla 4.13 Clasificación de clases de humedad antecedente modificada para el método de abstracción de lluvia SCS en la región de estudio .....	60
Tabla 4.14 Parámetros de calibración por evento.....	64
Tabla 4.15 Índices de modelación hidrológica para eventos calibrados.....	65
Tabla 4.16 Parámetros finales de la calibración efectuada. ....	66
Tabla 4.17 Asignación de grupo de antecedente de humedad, e índices de modelación hidrológica para eventos de validación. ....	67
Tabla 5.1 Cantidad de días con eventos de precipitación en un determinado rango para diferentes <i>ensembles</i> . ....	79
Tabla 5.2 Frecuencia relativa respecto a la cantidad de días con eventos de precipitación y el total de días con eventos de precipitación, para determinados rangos, en diferentes <i>ensembles</i> .....	79
Tabla 5.3 Volúmenes medios mensuales, para los 3 <i>ensembles</i> futuros considerando medios, máximos, mínimos y registro histórico, según la distribución de bloques alternados.....	82

Tabla 5.4 Volúmenes medios mensuales, para los 3 <i>ensembles</i> futuros considerando medios, máximos, mínimos y registro histórico, según la distribución de Varas. ....	82
Tabla 5.5 Resumen de variación de los caudales medios mensuales entre el registro histórico y las proyecciones realizadas mediante bloques alternados .....	85
Tabla 5.6 Resumen de variación de los caudales medios mensuales entre el registro histórico y las proyecciones promediadas realizadas mediante Varas. ....	86
Tabla 5.7: Caudales máximos instantáneos asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados, y 3 condiciones de humedad .....	89
Tabla 5.8: Caudales máximos instantáneos asociados a Precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 50% y 3 condiciones de humedad.....	90
Tabla 5.9 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.....	91
Tabla 5.10 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.....	92
Tabla 5.11 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.....	93
Tabla 5.12 Resumen de caudales máximos horarios por escenario, para 3 periodos de retorno (10, 20 y 50 años) y 4 distribuciones de precipitaciones. ....	96
Tabla 5.13 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución bloques alternados. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad .....	97

Tabla 5.14 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas $p=50\%$ , grupo 1. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad .....	98
Tabla 5.15 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas $p=50\%$ , grupo 2. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad .....	99
Tabla 5.16 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas $p=50\%$ , grupo 3. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad .....	100
Tabla 5.17 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas $p=50\%$ , grupo 3. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad .....	101
Tabla 5.18 Caudales máximos horarios e instantáneos obtenidos del análisis de frecuencia. Distribución bloques alternados .....	106
Tabla 5.19 Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con $P=10\%$ . .....	107
Tabla 5.20: Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con $P=50\%$ . .....	108
Tabla 5.21: Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con $P=90\%$ . .....	109
Tabla 5.22 Caudales máximos asociados a precipitaciones con 3 periodos de retorno y 3 condiciones de humedad. ....	112
Tabla 5.23 Caudales máximos asociados a 3 periodos de retorno y 4 distribuciones de precipitaciones. ....	113
Tabla 5.24 Caudales máximos asociados a precipitaciones con 3 periodos de retorno y 3 condiciones de humedad. ....	113
Tabla A.1 Precipitación máxima acumulada para 3 años, en dos diferentes estaciones, aplicado a 10 diferentes periodos de duración. ....	132

Tabla C.1 Resultados del análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, para diferentes métodos de segregación de precipitaciones, para periodos de retorno de 10, 20 y 50 años .....	149
Tabla C.2 Valores de curva de variación estacional para proyecciones de escenarios futuros mediante segregación de precipitaciones de bloques alternados.....	150
Tabla C.3 Valores de curva de variación estacional para registro histórico mediante segregación de precipitaciones de bloques alternados.....	150
Tabla C.4 Valores de curva de variación estacional para proyecciones de escenarios futuros mediante el promedio de la segregación de precipitaciones de Varas (10, 50 y 90%).....	150
Tabla C.5 Valores de curva de variación estacional para registro histórico mediante el promedio de la segregación de precipitaciones de Varas (10, 50 y 90%).....	150
Tabla C.6 Caudales máximos para una distribución de precipitación de bloques alternados.....	151
Tabla C.7 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=10% .....	151
Tabla C.8 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=50% .....	152
Tabla C.9 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=90% .....	152
Tabla C.10 Caudales máximos históricos para todas las distribuciones de precipitaciones.....	153
Tabla C.11 Caudales máximos para una distribución de precipitación de bloques alternados....	153
Tabla C.12 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=10% .....	154
Tabla C.13 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=50% .....	154
Tabla C.14 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=90% .....	155
Tabla C.15 Caudales máximos históricos para todas las distribuciones de precipitaciones.....	155

Tabla C.16 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	158
Tabla C.17 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	159
Tabla C.18 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	160
Tabla C.19 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	161
Tabla C.20 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	162
Tabla C.21 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	163
Tabla C.22 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	164
Tabla C.23 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	165
Tabla C.24 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	166
Tabla C.25 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	167
Tabla C.26 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	168
Tabla C.27 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	169



Tabla C.28 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	170
Tabla C.29 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	171
Tabla C.30 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	172
Tabla C.31 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad. ....	173
Tabla C.32 Límite superior de caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de Varas, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3 .....	174
Tabla C.33 Límite inferior de caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de Varas, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3 .....	175
Tabla C.34 Caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de bloques alternados, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3.....	176

# Índice de Figuras

Figura 2.1 Análisis de las diferencias entre 1961 y 1990. (a) Variación en la temperatura global promedio, (b) Variación global promedio en el nivel del mar, (c) Variación en la cobertura de nieve en el hemisferio norte. (Adaptado de Pachauri & Reisinger, 2007).....	6
Figura 2.2 Esquema de escalamiento entre GCM y resoluciones menores (Adaptado de Wilby et al., 2002).....	11
Figura 2.3 Ilustración del método de recesión para la estimación del flujo base.....	21
Figura 2.4 Distribución de Varas, 4 grupos con 3 probabilidades de excedencia 10, 50 y 90%. ..	27
Figura 3.1 Zona de estudio (Google Earth).....	29
Figura 3.2 Distribución tipos de suelos zona de estudio (Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986).	30
Figura 3.3 Mapa Geológico zona de estudio (modificado publicación digital SERNAGEOMIN, 2003) .....	31
Figura 3.4 Mapa Hidrogeológico zona de estudio (modificado de DGA, 1986) .....	31
Figura 3.5 Cuenca Butamalal en Butamalal delimitada mediante Quantum GIS .....	32
Figura 3.6 Curva hipsométrica Cuenca Butamalal en Butamalal.....	34
Figura 3.7 Uso de suelo Cuenca Butamalal. Sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF). .....	35
Figura 3.8 Uso de suelo Cuenca Butamalal (Sistema de Información Territorial SIT CONAF)...	36
Figura 3.9 Grafico de comparación de anomalías en las temperaturas entre mediciones y proyecciones esperadas para la zona de concepción Chile (Adaptado, Grupo Berkeley Earth)....	39
Figura 3.10 Ubicación de estaciones Cuenca Cañete (Google Earth) .....	40

Figura 3.11 Curva de Variación Estacional Estero Cabrería (Registro estación Butamalal).....	42
Figura 3.12 Mapa de Isoyetas distribuidos en zona de estudio, estaciones en la zona y curvas de Nivel topográfico zona de estudio (DGA 1986, Balance Hídrico de Chile).....	43
Figura 4.1 Esquema de ponderación de distancias y ubicación puntos GCM .....	45
Figura 4.2 Registro anual proyectado para estación Cañete (Proyecciones MK3.6) .....	46
Figura 4.3 Curva de duración de precipitaciones a nivel anual datos proyectados 2006-2065 .....	48
Figura 4.4 Análisis promedio de <i>ensemble</i> representativo.....	49
Figura 4.5 Curva de probabilidad acumulada para determinar grupo de Varas .....	50
Figura 4.6 Análisis de Frecuencia distribución Log-Pearson Cuenca Butamalal. ....	51
Figura 4.7 Interpolación Coeficiente A en función de la frecuencia, Ecuación 2.11. ....	55
Figura 4.8 Curvas IDF Cuenca Butamalal en Butamalal .....	56
Figura 4.9 Grupo 1 y Grupo 2, con sus respectivas probabilidades de ocurrencia y estadísticas de duraciones según los registros de los años 2012 al 2014 .....	57
Figura 4.10 Grupo 3 y Grupo 4, con sus respectivas probabilidades de ocurrencia y estadísticas de duraciones según los registros de los años 2012 al 2014 .....	57
Figura 4.11 Agrupación de cantidad de eventos con una misma duración para registros observados y registros estimados, entre los años 2012 y 2014.....	59
Figura 4.12 Calibración del evento 1, 25 de mayo del 2012.....	63
Figura 4.13 Relación entre coeficiente de almacenamiento y abstracción inicial.....	65
Figura 4.14 Validación evento 13, 29 de agosto del 2014 .....	67

Figura 5.1 Hietogramas para precipitación de 144 [mm], duración 24 horas, CN =83 y AMC =2, para distribución IDF con bloques alternados y distribuciones de Varas grupo 1 ,2 ,3 y 4 respectivamente con un periodo de retorno de Varas de un 50%.....	68
Figura 5.2 Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, línea base y <i>ensembles</i> . Distribución de bloques alternados (izquierda) y Varas 10% (Derecha). .....	69
Figura 5.3 Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, línea base y <i>ensembles</i> . Distribución de Varas 50% (izquierda) y Varas 90% (Derecha). .....	70
Figura 5.4 Gráfico comparativo entre el programa generado en HEC-HMS y el programa generado en Matlab.....	71
Figura 5.5 Interfaz generada en HEC-HMS para evento de precipitación del año 2040, bajo el <i>ensemble</i> 3 y con desagregación de Varas grupo 3 y probabilidad de excedencia 50%. .....	71
Figura 5.6 Interfaz generada en Matlab para evento de precipitación del año 2014, bajo el <i>ensemble</i> 3 y con desagregación de Varas grupo 3 y probabilidad de excedencia 50%.....	72
Figura 5.7 Hietograma e hidrogramas para el año 2050 según el modelo de distribución de precipitaciones de bloques alternados según curva IDF. <i>Ensemble 2</i> . .....	73
Figura 5.8 Hietograma e hidrogramas para el año 2050 según el modelo de distribución de precipitaciones de Varas para una probabilidad de excedencia de Varas del 50%. <i>Ensemble 2</i> . ..	73
Figura 5.9 Hietograma e hidrogramas para generación en el año 1990 de línea base según el modelo de distribución de precipitaciones de bloques alternados según curva IDF.....	74
Figura 5.10 Hietograma e hidrogramas para generación en el año 1990 de línea base según el modelo de distribución de precipitaciones de Varas para una probabilidad de excedencia de Varas del 50%.....	74
Figura 5.11 Diagrama de barras de precipitaciones mensuales, para los 3 <i>ensembles</i> futuros considerando valores promedios, máximos y mínimos. ....	75

Figura 5.12 Precipitaciones medias mensuales distribuidas por mes, con sus máximos, mínimos y promedios mensuales (Izquierda <i>ensemble 2</i> y derecha <i>ensemble 3</i> ).....	76
Figura 5.13 Precipitaciones medias mensuales distribuidas por mes, con sus máximos, mínimos y promedios mensuales (Izquierda <i>ensemble 9</i> y derecha línea base histórica).....	77
Figura 5.14 Histograma de días con precipitaciones según su magnitud. ....	77
Figura 5.15 Histograma de frecuencia relativa de precipitaciones.....	78
Figura 5.16 Diagrama de barras de volúmenes medios mensuales, para los 3 <i>ensembles</i> futuros considerando medios, máximos y mínimos, según la distribución de bloques alternados. ....	80
Figura 5.17 Diagrama de barras de volúmenes medios mensuales, para los 3 <i>ensembles</i> futuros considerando medios, máximos y mínimos, según la distribución de Varas.....	81
Figura 5.18: Curva de variación estacional con distribución de precipitaciones de bloques alternados .....	84
Figura 5.19 Curva de variación estacional con distribución de precipitaciones de Varas.....	84
Figura 5.20 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados. Condiciones de humedad AMC1 (izquierda), AMC2 (centro) y AMC3 (derecha).....	89
Figura 5.21 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). ....	90
Figura 5.22 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). ....	91

Figura 5.23 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	92
Figura 5.24 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	93
Figura 5.25 Diagrama de barras de caudales máximos instantáneos para todos los escenarios simulados a base de Precipitación asociada a periodo de retorno 10 años .....	94
Figura 5.26 Diagrama de barras de caudales máximos para todos los escenarios, periodo de retorno 20 años .....	94
Figura 5.27 Diagrama de barras de caudales máximos para todos los escenarios, periodo de retorno 50 años .....	95
Figura 5.28 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).....	97
Figura 5.29 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas P=50%, grupo 1. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	98
Figura 5.30 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas P=50%, grupo 2. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	99
Figura 5.31 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas P=50%, grupo 3. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	100

Figura 5.32 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas P=50%, grupo 4. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	101
Figura 5.33 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 10 años .....	102
Figura 5.34 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 20 años .....	103
Figura 5.35 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 50 años. ....	103
Figura 5.36 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Distribución de precipitaciones mediante bloques alternados. ....	105
Figura 5.37 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=10%. ....	107
Figura 5.38 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=50%. ....	108
Figura 5.39 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=90%. ....	109
Figura A.1 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 2. ....	124
Figura A.2 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 2. ....	124
Figura A.3 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 2. ....	125

Figura A.4 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 2.....	125
Figura A.5 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 2. ....	125
Figura A.6 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 3.....	126
Figura A.7 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 3. ....	126
Figura A.8 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 3. ....	127
Figura A.9 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 3. ....	127
Figura A.10 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 3.....	127
Figura A.11 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 3. ....	128
Figura A.12 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 3. ....	128
Figura A.13 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 9. ....	129
Figura A.14 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 9. ....	129
Figura A.15 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 9. ....	130
Figura A.16 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 9.....	130
Figura A.17 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 9. ....	130
Figura A.18 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 9. ....	131
Figura A.19 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 2 y 5 años. ....	132
Figura A.20 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 10 y 25 años. ....	133
Figura A.21 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 50 y 100 años. ....	133
Figura A.22 Regresión intensidad duración, para periodo de retorno 500 años .....	133



Figura A.23 Curva de probabilidad acumulada del grupo 1 y 2 del árbol de decisión.....	134
Figura A.24 Curva de probabilidad acumulada del grupo 3 y 4 del árbol de decisión.....	134
Figura B.1 Calibración 1 HEC-HMS.....	135
Figura B.2 Calibración 2 HEC-HMS.....	135
Figura B.3 Calibración 3 HEC-HMS.....	136
Figura B.4 Calibración 1 HEC-HMS.....	136
Figura B.5 Calibración 5 HEC-HMS.....	136
Figura B.6 Calibración 6 HEC-HMS.....	137
Figura B.7 Calibración 7 HEC-HMS.....	137
Figura B.8 Calibración 8 HEC-HMS.....	137
Figura B.9 Calibración 9 HEC-HMS.....	138
Figura B.10 Calibración 10 HEC-HMS.....	138
Figura B.11 Calibración 11 HEC-HMS.....	138
Figura B.12 Calibración 12 HEC-HMS.....	139
Figura B.13 Calibración 13 HEC-HMS.....	139
Figura B.14 Calibración 14 HEC-HMS.....	139
Figura B.15 Calibración 15 HEC-HMS.....	140
Figura B.16 Calibración 16 HEC-HMS.....	140
Figura B.17 Calibración 17 HEC-HMS.....	140

Figura B.18 Calibración 18 HEC-HMS.....	141
Figura B.19 Calibración 19 HEC-HMS.....	141
Figura B.20 Calibración 20 HEC-HMS.....	141
Figura B.21 Calibración 21 HEC-HMS.....	142
Figura B.22 Calibración 22 HEC-HMS.....	142
Figura B.23 Calibración 23 HEC-HMS.....	142
Figura B.24 Calibración 24 HEC-HMS.....	143
Figura B.25 Validación 1 HEC-HMS.....	143
Figura B.26 Validación 2 HEC-HMS.....	144
Figura B.27 Validación 3 HEC-HMS.....	144
Figura B.28 Validación 4 HEC-HMS.....	144
Figura B.29 Validación 5 HEC-HMS.....	145
Figura B.30 Validación 6 HEC-HMS.....	145
Figura B.31 Validación 7 HEC-HMS.....	145
Figura B.32 Validación 8 HEC-HMS.....	146
Figura B.33 Validación 9 HEC-HMS.....	146
Figura B.34 Validación 10 HEC-HMS.....	146
Figura B.35 Validación 11 HEC-HMS.....	147
Figura B.36 Validación 12 HEC-HMS.....	147

Figura B.37 Validación 13 HEC-HMS.....	147
Figura B.38 Validación 14 HEC-HMS.....	148
Figura C.1(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Distribución de precipitaciones mediante bloques alternados. ....	156
Figura C.2(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=10%. ....	156
Figura C.3(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=50%. ....	157
Figura C.4(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=90%. ....	157
Figura C.5 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).....	158
Figura C.6 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). ....	159
Figura C.7 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). ....	160

Figura C.8 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....161

Figura C.9 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....162

Figura C.10 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....163

Figura C.11 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....164

Figura C.12 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....165

Figura C.13 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....166

Figura C.14 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....167

Figura C.15 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....168

Figura C.16 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	169
Figura C.17 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	170
Figura C.18 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	171
Figura C.19 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	172
Figura C.20 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha). .....	173

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

Tomando en cuenta la importancia del agua para el desarrollo de la sociedad, no solo como un recurso de consumo humano, sino también como un recurso utilizado en la agricultura, en la producción de energía y en la industria, en general, es de vital importancia saber la disponibilidad de agua bajo ciertas condiciones atmosféricas. Cuando no se dispone de suficiente información hidrológica de la cuenca los modelos de simulación hidrológica son de utilidad para predecir el comportamiento de la cuenca en eventos de tormenta.

En los últimos años se ha producido un incremento de los gases invernadero y como consecuencia ha producido un aumento de la radiación neta terrestre, esto provoca efectos sobre el clima, por ejemplo cambios en la intensidad de las precipitaciones y en la temperatura. Una muestra de esto es que en Chile, entre los años 1979 - 2006, se produjo un aumento de la temperatura de  $+0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en el valle central y en la Cordillera de los Andes, mientras que en el sector costero, hubo una disminución de temperatura de  $-0.20^{\circ}\text{C}/\text{década}$  (Falvey & Garreaud, 2009).

El panel intergubernamental de cambio climático, conocido como IPCC por sus siglas en inglés “Intergovernmental Panel on Climate Change”, ha generado múltiples escenarios de cambio climático, para las que se tiene diferentes proyecciones de forzamiento radiativo, entre las condiciones más desfavorables para el medio ambiente con la más alta emisión de gases de efecto invernadero, se encuentra la trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5, la que combina supuestos de aumento de la población y el relativo bajo incremento en la tasa de mejoramiento en el cambio de tecnologías para el uso de la energía. Cabe mencionar que el escenario RCP8.5 no presenta ninguna posible alternativa de mitigación en la producción de gases invernaderos (Riahi et al., 2011). Investigaciones efectuadas en el continente asiático mediante las proyecciones de IPCC han mostrado que habrá un incremento promedio en las precipitaciones en la región norte del continente asiático durante 2011 - 2040, por otra parte el promedio de las precipitaciones en la región sur del continente asiático tenderán a decrecer durante el mismo periodo, este estudio fue efectuado bajo condiciones de RCP8.5. La incerteza en la climatología en las proyecciones respecto

a la localización geográfica son ineludibles y es necesario hacer un mejor desarrollo en el entendimiento de futuros cambios sobre el planeta (Chong-Hai & Ying, 2012). Por otra parte, se ha seleccionado el modelo de cambio climático MK3.6, que corresponde a un modelo oceánico atmosférico desarrollado por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y el instituto Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE) que proporciona un conjunto de diez series temporales factibles de ocurrir en el futuro y que ha sido usado en estudios anteriores en Chile (Gómez & Vargas, SOCHID 2012).

Este trabajo de memoria se centra en estudiar el impacto del escenario de cambio climático más crítico (escenario futuro de forzante radiativa de 8.5 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]), en el desarrollo de caudales medios mensuales y caudales máximos en una cuneca costera de la VIII de región de Bío Bío, donde se consideran 2 metodologías de distribución de precipitaciones. Todo esto con el objetivo de presentar cambios en el comportamiento hidrológico para obras hidráulicas posteriores, de control o abastecimiento. Por otra parte, en el desarrollo de esta memoria no se toman en cuenta las variaciones en la temperatura, ya que como se discute a lo largo de este trabajo no aportan información necesaria para el estudio. Cabe mencionar que esta memoria persigue complementar estudios previos realizados en la región (Raddatz, 2011 y Silva 2015)

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

La memoria tiene como objetivo principal modelar hidrogramas de crecidas mediante el programa HEC-HMS, utilizando la información pluviométrica y fluviométrica disponible, para posteriormente aplicar proyecciones de precipitaciones diarias del modelo de cambio climático CSIRO-MK3.6 y de esta forma estimar las crecidas proyectadas futuras en la cuenca de estudio.

### **1.2.2 Específicos**

Los objetivos específicos que se persiguen en este trabajo, serán desarrollados en el orden que se presenta a continuación:

- Procesar y escalar espacial y temporalmente datos del modelo de circulación global MK3.6 para estimar proyecciones de precipitación en la región de interés, con el objetivo de determinar hidrogramas de crecidas proyectados futuros.
- Explorar metodologías para desagregar valores futuros de precipitación diaria de manera de obtener los hietogramas requeridos por un modelo hidrológico.
- Implementar un modelo hidrológico en HEC-HMS y Matlab que permita estimar hidrogramas de crecidas continuos para datos de precipitaciones, generando una metodología de calibración y validación para el modelo.
- Analizar el impacto en las crecidas en la zona de estudio para el escenario de cambio climático RCP 8.5, bajo diferentes proyecciones.

### **1.3 Estructura de Informe**

El presente documento está organizado según se detalla a continuación:

El Capítulo 2 corresponde a la revisión bibliográfica, donde se revisan referencias de cambio climático y modelos de circulación global, además de métodos de procesamiento de información. También se revisa la bibliografía referente a la modelación hidrológica y sus componentes a tratar, además se estudia la metodología en el manejo de datos de precipitaciones y sus segregaciones en tormentas.

El Capítulo 3 muestra la caracterización de la zona de estudio y su delimitación. Además de sus antecedentes de uso de suelos, climáticos y topográficos, se añade, la información hidrológica e hidrogeológica. Por otra parte, se presenta en este capítulo la información disponible, tanto pluviométrica como fluviométrica necesarias para el desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo 4 se presentan los procesos de modelación hidrológica, específicamente el análisis de la información de precipitaciones, además de los procesos de calibración y validación del modelo hidrológico efectuado mediante el software HEC-HMS.

El Capítulo 5 muestra los efectos del cambio climático y un análisis del impacto en las precipitaciones, caudales y volúmenes, para 3 corridas pertenecientes al escenario futuro de forzante radiativa de 8.5 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]. Además se presenta un análisis de crecidas para diferentes periodos de retorno, considerando diferentes distribuciones de precipitaciones.



Finalmente, el Capítulo 6 contiene conclusiones respecto de los resultados del presente trabajo.

## 2 Revisión Bibliográfica

### 2.1 Cambio Climático

En los últimos 200 años en la historia de la humanidad se ha incrementado el uso de energías fósiles, con el objetivo de llevar a cabo diferentes procesos que han permitido el desarrollo de la de la sociedad. Sin embargo, el uso de estas energías ha provocado consecuencias, como la contaminación de mares, ríos, lagunas, tierra, acuíferos y el aire; es en este último donde las emisiones de gases a la atmósfera debido a procesos de combustión tales como el óxido y el monóxido carbono, han provocado cambios en las temperaturas y el clima (IPCC, 2013).

La emisión de gases de efecto invernadero produce cambios considerables en la atmósfera, alterando así de esta forma su composición química y, en conjunto con la radiación solar, provocan aumentos en la temperatura global. Estos efectos se pueden ver reflejados en variaciones en las temperaturas, alteración en las líneas costeras, inundaciones, deshielo en los polos, cambio en las precipitaciones y alteraciones en los regímenes hidrológicos (Gómez, 2013). El estudio de Pachauri y Reisinger en el año 2007, refleja que el cambio climático ha puesto en riesgo de extinción a aproximadamente un 20% a un 30% de diferentes especies animales y vegetales.

El IPCC, establecido en 1988, señala tajantemente que el cambio climático global no es puramente un efecto de equilibrio natural, sino una condición donde la participación del ser humano ha provocado un aumento de este fenómeno, destruyendo el equilibrio natural del ecosistema.

La Figura 2.1, muestra las diferencias que han ocurrido en diferentes factores climáticos entre los años 1961y 1990, notando así el impacto y la importancia que conlleva el estudio del cambio climático y los agentes físicos que irrumpen o lo alteran. De esta forma para el quinto reporte de resumen de cambio climático, se elaboraron un conjunto de nuevos escenarios, estos se encuentran enfocados en aspectos físicos del cambio climático y no en escenarios sociales. Por tanto, en estos nuevos escenarios el foco es con mayor preponderancia en el incremento de la radiación solar que permanece dentro de la atmósfera. Estos escenarios son conocidos como Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) (Taylor et al., 2009).

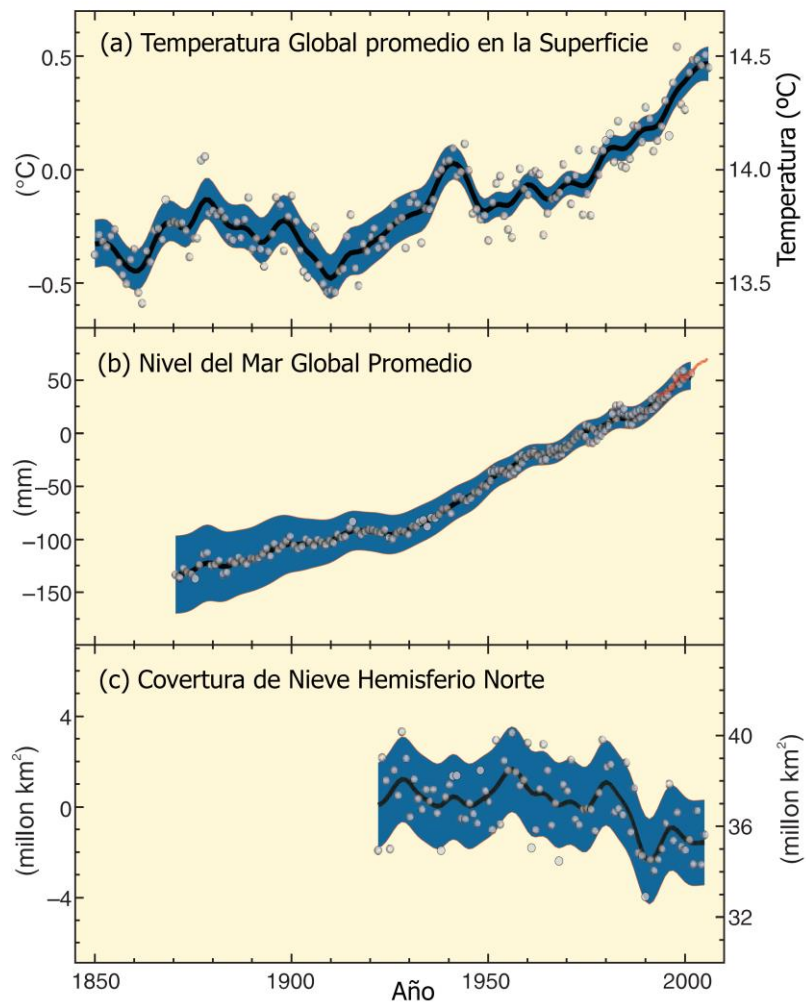


Figura 2.1 Análisis de las diferencias entre 1961 y 1990. (a) Variación en la temperatura global promedio, (b) Variación global promedio en el nivel del mar, (c) Variación en la cobertura de nieve en el hemisferio norte. (Adaptado de Pachauri & Reisinger, 2007)

En la Tabla 2.1, se muestra la cantidad de radiación que queda atrapada en la atmósfera, el equivalente en partículas de CO<sub>2</sub> atmosférico y el comportamiento esperado para cada uno de los escenarios.

Expertos de panel intergubernamental de cambio climático señalan que existe abundante evidencia que apunta a que, aún con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI (Gases de Efecto Invernadero) seguirán aumentando en los próximos decenios. De mantenerse las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el sistema climático

mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente con efectos más notorios que los observados durante el siglo XX. Aun en el caso que se mantuvieran constantes las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y aerosoles en los niveles del año 2000, cabría esperar un aumento promedio de las temperaturas medias de aproximadamente 0,1°C por decenio (IPCC, 2007).

Tabla 2.1 Trayectorias representativas de concentración (Moss et al., 2010).

Nombre	Radiación Forzante [Wm <sup>-2</sup> ]	Concentración atmosférica [ppm]	Comportamiento
<b>RCP 8.5</b>	> 8.5 en el año 2100	>1370 CO <sub>2</sub> -equiv-2100	Aumenta
<b>RCP 6.0</b>	6 después de estabilizarse el año 2100	850 CO <sub>2</sub> -equiv-2100 Se estabiliza después del año 2100	Estabilizado
<b>RCP 4.5</b>	6 después de estabilizarse el año 2100	650 CO <sub>2</sub> -equiv-2100 Se estabiliza después del año 2100	Estabilizado
<b>RCP 2.6</b>	3 como radiación máxima antes del año 2100 con descenso posterior	490 CO <sub>2</sub> -equiv como concentración máxima antes del año 2100 con descenso posterior	Valor máximo a mediados de siglo y posterior descenso

Considerando lo anterior, es posible observar que diversos efectos del cambio climático afectarán directamente los recursos hídricos de múltiples formas, como las que se presentan en la Tabla 2.2.

Adicionalmente a estos efectos, se esperan otros de gran magnitud proyectados a otros sectores que también son susceptibles a variaciones del clima, y que tienen una relación que puede ser directa o indirecta en con el funcionamiento de las sociedades. Se proyecta que sectores tales como la agricultura, la silvicultura, los ecosistemas, la salud humana, la industria y los asentamientos también se verán afectados por estas alteraciones (Taylor et al, 2009).

Tabla 2.2 Potenciales efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Pachauri & Reisinger, 2007).

<b>Fenómenos y dirección de la tendencia</b>	<b>Probabilidad de tendencias de proyecciones de cambio para el siglo XXI</b>	<b>Efecto sobre Recursos Hídricos</b>
En áreas terrestres, días y noches frecuentemente muy cálidos y menos frecuentemente fríos	Prácticamente seguro	Dependiendo del deshielo, efecto sobre algunos suministros hídricos
Aumento de la frecuencia, en la mayoría de las regiones, de episodios de Precipitación intensa.	Muy probable	Aumento de la demanda de agua; problemas de calidad del agua (por ejemplo, por proliferación de algas)
Aumento de la frecuencia, en la mayoría de las regiones, de episodios de precipitación intensa.	Muy probable	Efectos adversos sobre la calidad del agua superficial y subterránea; contaminación de los suministros hídricos; posiblemente, menor escasez de agua.
Áreas afectadas por el aumento de sequías.	Probable	Mayores extensiones afectadas por estrés hídrico.
Aumento de la intensidad de los ciclones tropicales.	Probable	Cortes de corriente eléctrica causantes de la alteraciones del suministro hídrico público.
Mayor incidencia de subidas extremas del nivel del mar (con excepción de los tsunamis).	Probable	Menor disponibilidad de agua dulce por efecto de la intrusión de agua salada.

## 2.2 Modelación Climática

Considerando los antecedentes señalados anteriormente sobre cambio climático, la comunidad científica ha realizado diversas investigaciones con el fin de comprender los efectos, impactos y consecuencias que éste tendrá sobre el planeta. Para esto se ha hecho un esfuerzo en desarrollar predicciones de variables meteorológicas en periodos futuros de manera poder estimar las variaciones a las que estas se verán sujetas; es por lo antes mencionado que se han desarrollado diversos modelos de circulación global o como sus siglas en inglés denominan GCM, Global Circulation Model.

Los modelos de circulación global consideran diversas condiciones y escenarios, sobre los cuales desarrollan proyecciones, tomando en cuenta la integración de otros dos modelos: un modelo de predicción atmosférica y un modelo de predicción oceánico. Los modelos de predicción atmosférica, se componen de un conjunto de ecuaciones matemáticas que tienen la intención de parametrizar procesos físicos, a través de procedimientos numéricos y condiciones iniciales, esto con la finalidad de modelar los procesos que relacionan las propiedades atmosféricas y los mecanismos físicos que actúan en el proceso. Por otra parte los modelos oceánicos, operan de igual manera que un modelo de predicción meteorológico, con la salvedad que actúan en procesos que se dan en los océanos. De igual forma estos también incluyen todas las componentes necesarias de un modelo, como las ecuaciones por las que se rige, además la inclusión de procesos físicos, procedimientos numéricos y las condiciones iniciales.

Ya que ambos modelos interactúan conjuntamente, estos tienen ciertas variables en común (temperatura, precipitación, entre otras), es posible realizar una integración de ambos, realizando un proceso de acoplamiento dinámico, dando origen entonces a un modelo integrado y global.

Estos modelos a pesar de buscar un mismo objetivo y en algunos casos trabajar conjuntamente, presentan distintos planteamientos, como por ejemplo distintas definiciones de resolución en la cual se calcula, o diferentes ecuaciones sobre las cuales se desarrollan. Cabe mencionar que se han desarrollado más de una veintena de modelos globales climáticos diferentes. Luego, estos modelos presentan diferentes principios e hipótesis y la confianza en la validez de un resultado se basa en el tipo, la cantidad, la calidad y la coherencia de la evidencia (por ejemplo, los datos, la comprensión mecánica, la teoría, los modelos y el juicio experto) (IPCC, 2013).

### **2.2.1 CSIRO-MK3.6**

El modelo acoplado oceánico - atmosférico MK3.6 es desarrollado en conjunto por dos instituciones australianas: el Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO – y el instituto Queensland Climate Change Centre of Excellence –QCCCE – en el marco del proyecto de inter comparación de modelos acoplados, fase 5 – CMIP5. Este modelo presenta una resolución horizontal de aproximadamente  $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$  y cada punto atmosférico está relacionado con dos puntos oceánicos, con el fin de mejorar las interacciones interanuales entre ambas componentes. Este modelo es una actualización de la versión anterior del modelo CSIRO-MK3.5

desarrollado por los mismos institutos (Gordon et al., 2010). La mejora considerable que presenta, es que incorpora una dinámica interactiva de los aerosoles a nivel atmosférico, con el fin de modelar de mejor manera las forzantes radiativas atmosféricas (Collier et al., 2011).

El modelo basa las forzantes y directrices de sus proyecciones, en el contexto entregado por el CMIP5 y por lo tanto, está basado en las proyecciones de los escenarios RCP (Taylor et al., 2009). Además, cumple con las exigencias para considerarse un modelo valido como fuente de información para estudios de proyección (Collier et al., 2011).

En estudios anteriores se ha observado que el modelo CSIRO-MK3.6 representa de manera adecuada la estacionalidad del hemisferio (Gómez, 2013) y que presenta puntos de información cercanos a los puntos de análisis, aumentando la representatividad de los datos. Por lo tanto se le selecciona como el modelo a utilizar dentro de este estudio.

## 2.3 Métodos de Procesamiento de Información

En la sección anterior, se describió el modelo de proyección climática a utilizar. Este entrega una serie de registros para distintas variables meteorológicos. Estas variables pueden ser aplicadas a modelos hidrológicos, con la finalidad de realizar un proceso de modelación. Cabe mencionar que en este trabajo de título solo se utilizaran los registros de precipitación del modelo. En la Tabla 2.3 se observa que la resolución del modelo global es demasiado gruesa para la escala del análisis que se quiere realizar, haciendo que se pierda representatividad, ya que en el desarrollo de trabajos locales hay factores tales como la orografía del lugar, que generan grandes variaciones.

Tabla 2.3 Resolución modelo CSIRO-MK3.6 (Gómez, 2013)

<b>Horizonte</b>		<b>Vertical</b>	
Atmósfera	Océano	Atmósfera	Océano
1.87° x 1.87°	1.25° x 1.25°	16	20

Por lo tanto la información proporcionada por el modelo debe ser procesada y ajustada a las dimensiones del trabajo requerido, mediante un proceso denominado escalamiento.

### 2.3.1 Proceso de escalamiento

Los procesos de escalamiento tienen enfoques físicos o estadísticos, además estos procesos tienen algunos beneficios debido a sus bajas necesidades computacionales y su facilidad de aplicación, esto en relación a la implementación de un modelo climático global. Investigaciones desarrolladas muestran que proyecciones regionales tienen una aceptable aproximación empírica respecto a la precisión de modelos climáticos regionales numéricos (Hewitson & Crane, 2006). En la Figura 2.2 se muestra la relación en el escalamiento entre un modelo global y resoluciones menores.

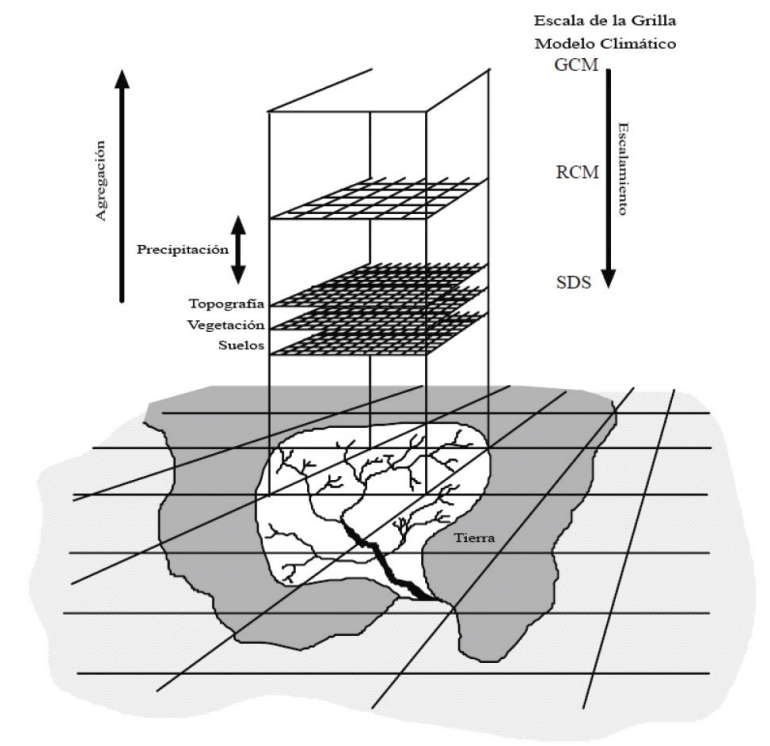


Figura 2.2 Esquema de escalamiento entre GCM y resoluciones menores (Adaptado de Wilby et al., 2002).

#### 2.3.1.1 Escalamiento espacial

Esta metodología de escalamiento corresponde a la ponderación de la información en los puntos geográficos entregados por la grilla del GCM, respecto a los puntos donde se pretende determinar esta información en la región de trabajo. Entre los métodos de ponderación los más comunes utilizados en la literatura son:



Método del punto más cercano: Consiste en seleccionar el punto de la malla más cercano al lugar a representar.

Método del inverso de la distancia: Consiste en ponderar respecto al inverso de la distancia de los puntos que forman la grilla que rodea al lugar de interés. Se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad 2.1$$

Donde:

$X$ : Variable meteorológica en el punto de interés.

$X_i$ : Variable meteorológica en el nodo  $i$  de la grilla del modelo climático.

$d_i$ : Distancia entre punto de interés y nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

Método del cuadrado inverso de la distancia: Consiste en el mismo procedimiento del punto anterior, con la salvedad que la ponderación es con el cuadrado de la distancia, haciendo que los puntos más lejos influyan aún menos. Se calcula mediante a la ecuación 2.2.

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \quad 2.2$$

Donde:

$X$ : Variable meteorológica en el punto de interés.

$X_i$ : Variable meteorológica en el nodo  $i$  de la grilla del modelo climático.

$d_i$ : Distancia entre punto de interés y nodo  $i$  de la grilla del modelo climático

### **2.3.1.2 Escalamiento Temporal**

Una vez que el registro de datos del modelo GCM es escalado espacialmente se procede a hacer un escalamiento temporal, llamado también corrección de sesgo, con el objetivo de encontrar funciones de transferencia que permitan relacionar los datos del modelo, con los datos observados en las estaciones en el periodo de registro. La función de transferencia consiste en tomar la serie meteorológica ya escalada espacialmente y ajustarla a las observaciones locales mediante correlaciones estadísticas determinadas a base de las curvas de duración. Para hacer coincidir las curvas de duración del registro observado con el registro modelado en el período de línea base, se establece a nivel mensual una regresión lineal entre los valores asociados a igual probabilidad. Se considera que ésta se mantiene en el futuro, lo que permite escalar temporalmente el registro proyectado.

## **2.4 Modelación Hidrológica**

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos o físicos para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Los modelos basados en ecuaciones físicas buscan modelar el comportamiento de los procesos físicos dentro de una cuenca; otro tipo de modelo son los conceptuales, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados (Ven te Chow, 1994).

Dentro del marco de modelación hidrológica, en este trabajo de memoria se utilizan variados procesos, como la modelación hidrológica mediante HEC-HMS, Procesos de infiltración modelados mediante la curva número, modelación de hidrogramas mediante el hidrograma unitario SCS y finalmente el flujo base se determina mediante el método de recesión.

### **2.4.1 Infiltraciones Mediante Curva Número**

El Soil Conservation Service (SCS) desarrolló un método para calcular las abstracciones en una tormenta, considerando la escorrentía directa siempre menor a la precipitación. De forma similar, después de que la escorrentía se inicia, la retención potencial máxima debe ser menor que la lámina adicional de agua retenida en la cuenca. Por lo tanto existe una cierta cantidad de precipitación llamada abstracción inicial, en la que no ocurrirá escorrentía.

La ecuación 2.3 propuesta por el SCS señala que las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales deben ser iguales. Además combinada con la ecuación de continuidad 2.4, se puede establecer la precipitación en exceso señalada en la ecuación 2.5. (Ven te Chow, 1994)

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad 2.3$$

$$P = P_e + I_a + F_a \quad 2.4$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad 2.5$$

Donde:

$F_a$ : Lámina de agua retenida en la cuenca.

$S$ : Retención potencial máxima.

$P_e$ : Precipitación en exceso

$I_a$ : Abstracción inicial.

$P$ : Precipitación.

El estudio experimental efectuado por el SCS reflejo una relación empírica para la abstracción inicial, señalada como 0.2 veces la retención potencial máxima. De esta forma la ecuación 2.5 puede representarse como la ecuación 2.6. (Ven te Chow, 1994)

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad 2.6$$

Al representarse gráficamente la información de la ecuación 2.5 para muchas cuencas el SCS encontró una forma de estandarizar las curvas generadas. Esta estandarización se le denominó un número adimensional entre 0 y 100 llamado Curva Número (CN), donde 100 corresponde a

superficies impermeables y superficies de agua, mientras que valores menores a 100 corresponden a superficies naturales filtrantes. Esta relación entre la CN y la retención potencial máxima en milímetros, se describe en la ecuación 2.7.

$$S = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4 \quad 2.7$$

Un aspecto más a considerar, son las condiciones de antecedentes de humedad (AMC por sus siglas en inglés) normales (AMC II), donde la ecuación 2.8 describe la equivalencia de condiciones secas (AMC I), mientras que la equivalencia para condiciones húmedas está descrita por la ecuación 2.9 (AMC III) (Ponce, 1989).

$$CN(I) = \frac{CN(II)}{2.3 - 0.013 * CN(II)} \quad 2.8$$

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0.43 + 0.0057 * CN(II)} \quad 2.9$$

La Tabla 2.4 muestra la clasificación efectuada por el SCS para determinar el grupo según los antecedentes de lluvia. Se debe tener en cuenta que los antecedentes de humedad mostrados provienen de en el oeste de los Estados Unidos, por lo tanto se debe tener precaución antes de usar, ya que podrían verse alterados según la características geográficas y climáticas de la zona de interés.

Tabla 2.4 Clasificación de clases de antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracción de lluvia SCS.

Grupo	Lluvia Antecedente 5 días [mm]	
	Estación Inactiva	Estación de Crecimiento
I	Menos de 13	Menos de 36
II	13 a 28	36 a 53
III	Sobre 28	Sobre 53

## 2.4.2 Índices de Modelación Hidrológica

Para evaluar la calidad de un modelo hidrológico se utilizan distintos índices. Sin embargo, cada uno de ellos presenta características según su definición, que pueden entregar un buen resultado a pesar de presentar errores sistemáticamente, o en algunos casos sobre valorar algunos errores (Krause, 2005). Es por esto que se utiliza un conjunto de tres índices de evaluación, para lograr una mayor precisión de resultados.

### Coefficiente de Determinación – $r^2$

El coeficiente de correlación  $r^2$  se define como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación, definido por Bravais-Pearson. Este se define en la ecuación 2.10.

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad 2.10$$

Donde los valores O corresponden a los valores observados y los P corresponden a los valores predichos por el modelo. Una falencia de este indicador, es que no reconoce problemas de subestimación o sobrestimación sistemática, por lo que no se recomienda su uso como único indicador. Su valor varía entre 0 y 1, donde un valor de 1 representa una mejor concordancia entre los datos observados y los modelados.

### Índice de Nash-Sutcliffe – E(NS)

El índice de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe en 1970, definido en la ecuación 2.11.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad 2.11$$

Donde los valores O corresponden a los valores observados y los P corresponden a los valores predichos por el modelo. Su valor varía entre  $-\infty$  y 1. Si su valor es menor a cero, quiere decir que el promedio de los valores observados representa una mejor estimación que la modelación hecha.

El problema de este índice, es que sobrestima el error producido por valores singulares muy grandes, mientras que menosprecia el error de valores pequeños mal modelados.

### **Índice de Nash-Sutcliffe Logarítmico – Ln(E(NS))**

Representa una variación del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Su fórmula es la misma que la de este último con la salvedad de que se usan los valores logarítmicos de la variable, para evitar así el problema de la diferencia entre valores muy grandes y muy pequeños. Es importante mencionar el índice Ln(NS) permite identificar mejor el ajuste de los flujos base o pequeños. Este se muestra en la ecuación 2.12.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(o_i) - \ln(P_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(o_i) - \ln(\bar{o}))^2} \quad 2.12$$

### **2.4.3 Modelación Hidrológica en HEC-HMS**

El software HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”), fue diseñado para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada, además el programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Por otra parte puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada. Por otra parte es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. Surge como evolución del programa HEC-1 pero incluye muchas mejoras, como una interface gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso (Centro de modelación hidrológica, 1990. Manual de usuario).

El modelo permite realizar descripciones físicas y meteorológicas de la cuenca, estimar parámetros, analizar simulaciones y conexiones con el sistema de información geográfica (ArcGIS). Además el tiempo de simulación puede ser controlado por especificaciones de control, como por ejemplo, la fecha, hora de inicio y de término.

HEC-HMS contiene variadas componentes hidrológicas para la modelación de una cuenca, como por ejemplo, sub cuencas, tramos de tránsito, uniones, embalses, fuentes, sumideros y derivaciones. Dentro de la modelación de la cuenca el programa permite, definir el área de las cuencas, el método que se usará para la obtención del hidrograma, metodología de infiltración y método de estimación de flujo base.

Respecto a las características meteorológicas, HEC-HMS posee una variedad de métodos para calcular diferentes aspectos de interés hidrológicos, como por ejemplo la entrada de precipitación requerida por un elemento sub cuenca, este puede usar datos de lluvia puntual o de varias estaciones, además puede representar lluvia sólida o líquida junto con evapotranspiración, además incluye numerosos métodos de infiltración. Sin embargo, los métodos de modelación a utilizar en este trabajo incluyen el método de curva número, hidrograma unitario SCS y el método de recesión para estimación de flujo base.

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

- Precipitación histórica o de diseño.
- Características del suelo.
- Información morfométrica de las sub cuencas.
- Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
- Características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

Es importante mencionar que para el proceso de calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan, registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas) además de condiciones iniciales de humedad de suelo las que son difíciles de estimar.

#### **2.4.4 SCS Hidrograma Unitario**

Como se mencionó anteriormente, el software HEC-HMS posee variados métodos de modelación de hidrogramas. Sin embargo para la realización de este trabajo de memoria, se

consideró la modelación de hidrogramas unitarios del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS).

El SCS desarrolló un hidrograma unitario adimensional a partir de una serie de hidrogramas observados en variadas cuencas, ubicadas en diferentes zonas geográficas de los Estados Unidos.

Este hidrograma se construye sintéticamente con la relación existente entre el caudal máximo y el tiempo al máximo. Por lo que para una modelación continua, este depende de variables como el tiempo de retraso o “lag time”, el tiempo de duración de la tormenta, el tiempo base, área de la cuenca y la forma adimensional del hidrograma descrito en la Tabla 2.5.

Las ecuaciones que permiten estimar los valores de tiempo al máximo están dados por la Ecuación 2.13. Mientras que el tiempo base y el caudal pico están descritos por las ecuaciones 2.14 y 2.15 respectivamente (Aron, G. y E. White, 1982):

$$tp = \frac{D}{2} + lag\_time \quad 2.13$$

Donde:

*tp*: Tiempo al máximo.

*D*: Duración de la tormenta.

*lag\_time*: Tiempo de retraso.

$$tb = 2.67 * tp \quad 2.14$$

Donde:

*tb*: Tiempo base.

*tp*: Tiempo al máximo.



$$qp = 0.555 * \frac{A}{tb} \quad 2.15$$

Donde:

$qp$ : Caudal máximo.

$A$ : Área de la cuenca.

$tb$ : Tiempo Base.

Tabla 2.5 Hidrograma unitario adimensional del SCS.

<b>t/tp</b>	<b>q/qp</b>	<b>t/tp</b>	<b>q/qp</b>
<b>0</b>	0	<b>1.7</b>	0.46
<b>0.1</b>	0.03	<b>1.8</b>	0.39
<b>0.2</b>	0.1	<b>1.9</b>	0.33
<b>0.3</b>	0.19	<b>2</b>	0.28
<b>0.4</b>	0.31	<b>2.2</b>	0.207
<b>0.5</b>	0.47	<b>2.4</b>	0.147
<b>0.6</b>	0.66	<b>2.6</b>	0.107
<b>0.7</b>	0.82	<b>2.8</b>	0.077
<b>0.8</b>	0.93	<b>3</b>	0.055
<b>0.9</b>	0.99	<b>3.2</b>	0.04
<b>1</b>	1	<b>3.4</b>	0.029
<b>1.1</b>	0.99	<b>3.6</b>	0.021
<b>1.2</b>	0.93	<b>3.8</b>	0.015
<b>1.3</b>	0.86	<b>4</b>	0.011
<b>1.4</b>	0.78	<b>4.5</b>	0.005
<b>1.5</b>	0.68	<b>5</b>	0
<b>1.6</b>	0.56		

### 2.4.5 Método de Recesión Para la Estimación del Flujo Base

Uno de los aspectos importantes al momento de modelar hidrogramas de crecidas es el flujo base y la estimación del mismo, ya que de su variabilidad depende el flujo de escorrentía directa de la crecida a analizar.

HEC HMS posee variadas formas de modelar el flujo base, sin embargo una de las más completas en cuanto a la cantidad de información disponible, es el método de recesión. Este método

consiste básicamente en identificar dos tramos, un tramo de descarga y un tramo de carga, como se muestra en la Figura 2.3. (Centro de Ingeniería Hidrológica HEC-1, 1990)

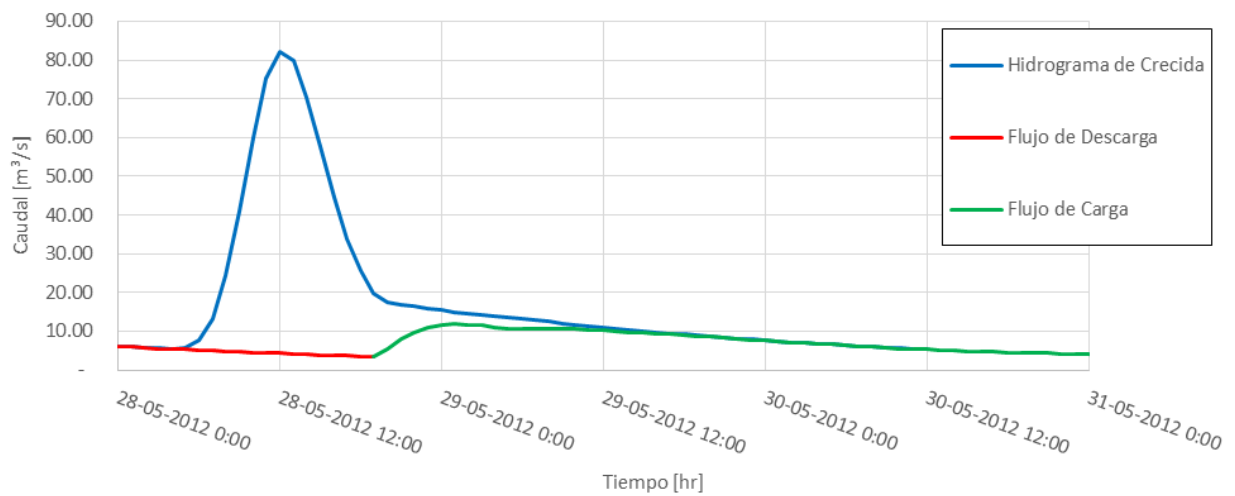


Figura 2.3 Ilustración del método de recesión para la estimación del flujo base

De esta forma, el tramo de descarga está definido cuando el caudal instantáneo es mayor que el caudal máximo multiplicado por una constante de decaimiento, el caudal del flujo base esta descrito por la Ecuación 2.16.

$$Qb = Qo * K^t \quad 2.16$$

Donde:

$Qb$ : Caudal del flujo base.

$Qo$ : Caudal flujo inicial.

$K$ : Constante de recesión.

$t$ : Tiempo.

Por otra parte, el tramo de carga se aplica cuando caudal instantáneo es menor o igual que el caudal máximo del evento multiplicado por una constante de decaimiento, el caudal del flujo base queda descrito por la Ecuación 2.18. Cabe mencionar que en este caso el flujo base depende de la Ecuación 2.17.

$$Q_t = Q_r * K^{(t-tr)} \quad 2.17$$

Donde:

$Q_t$ : Flujo total.

$Q_r$ : Caudal cuando la recesión comienza.

$K$ : Constante de recesión.

$t$ : Tiempo.

$tr$ : Tiempo cuando la recesión comienza.

$$Q_b = Q_t - Q_d \quad 2.18$$

Donde:

$Q_b$ : Caudal del flujo base.

$Q_t$ : Flujo Total.

$Q_d$ : Flujo de Escorrentía Directa.

## 2.5 Precipitaciones Máximas

La estimación de precipitaciones diarias para una probabilidad de excedencia definida, constituye un problema de gran importancia. Debido a que permite el cálculo de los caudales que se deben evacuar durante las tormentas. Por lo tanto es necesario contar con información pluviométrica de la zona de estudio o sus alrededores, sin embargo hay casos donde no toda la información se encuentra disponible.

La metodología para estimar precipitaciones de cualquier duración y período de retorno se realiza mediante la aplicación de 2 factores, el Coeficiente de Duración (CD) y el Coeficiente de Frecuencia (CF).

Se denomina CD a la relación entre 2 precipitaciones de igual período de retorno y diferente duración, adoptándose como precipitación base, la de un día (24 horas) y un período de retorno de 10 años (Francisco Berrios, 2008). De esta manera se tiene que:

$$CD_t = \frac{P_t^{10}}{P_{24}^{10}} \rightarrow P_t^{10} = CD_t * P_{24}^{10} \quad 2.19$$

Donde:

$CD_t$ : Coeficiente de duración en un tiempo t.

$P_t^{10}$ : Precipitación de duración t y periodo de retorno 10 años.

$P_{24}^{10}$ : Precipitación de duración 24 horas y periodo de retorno 10 años.

El Coeficiente de frecuencia es la relación entre 2 precipitaciones de igual duración y diferente período de retorno, adoptándose como precipitación base la de período de retorno de 10 años. De esta manera se tiene que:

$$CF_t^T = \frac{P_t^T}{P_t^{10}} \rightarrow P_t^T = CF_t^T * P_t^{10} \quad 2.20$$

Donde:

$CF_t^T$ : Coeficiente de frecuencia para un periodo de retorno T y una duración de tiempo t.

$P_t^T$ : Precipitación de duración t y periodo de retorno T años.

$P_t^{10}$ : Precipitación de duración t y periodo de retorno 10 años.

De esta forma con las ecuaciones 2.19 y 2.20 es posible obtener una función general para  $P_t^T$

$$P_t^T = CF_t^T * CD_t * P_{24}^{10} \quad 2.21$$

Es así como es posible, con una precipitación de periodo de retorno 10 años, duración 24 horas y los coeficientes de duración y frecuencia, obtener la precipitación para un periodo de retorno T y duración t.

## 2.6 Métodos de Segregación

Existen variadas formas de distribución para la segregación de un evento de precipitación, en el caso de este estudio se utilizaran las metodologías de bloques alternados a través de la curva IDF, y la metodología de distribución de Varas.

### 2.6.1 Curvas IDF y Distribución de Bloques Alternados

Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978).

En este cálculo, la intensidad se define como la tasa temporal de precipitación, esta se expresa en la ecuación 2.22 (Chow et al 1994).

$$I = \frac{P}{T_d} \quad 2.22$$

Donde P es la profundidad de lluvia en milímetros o pulgadas, y  $T_d$  es la duración, dada usualmente en horas.

Es importante mencionar que la determinación de las intensidades de lluvia, son a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos (Aros, 1997). Por otra parte, la generación de curvas IDF para la zona de estudio, permite generar hietogramas de tormentas desagregando registros de precipitación a nivel diario.

Otra forma de expresar la curva IDF es mediante la ecuación 2.23, que es la representación matemática de las curvas de Intensidad - Duración – Frecuencia.

$$I = \frac{K * F^m}{d^n} \quad 2.23$$

Donde I es la intensidad en milímetros por hora, F es el periodo de retorno en años, d es la duración de la tormenta en minutos y donde K, m y n son parámetros de ajuste. De esta manera es posible mediante regresiones obtener estos parámetros y estimar así la curva IDF.

Cabe mencionar que la Ecuación 2.23 puede segregarse en dos ecuaciones exponenciales, que permiten realizar el ajuste de interpolación por separado, esto facilita establecer un valor para los parámetros de ajuste.

$$A = K * F^m \quad 2.24$$

La Ecuación 2.24 toma el numerador de la Ecuación 2.23, con el objetivo de parametrizar las constantes K y m. De forma similar la Ecuación 2.25 toma el valor de A sobre la Ecuación 2.24, para así encontrar el valor de la constante n.

$$I = A * d^{-n} \quad 2.25$$

Con la curva IDF parametrizada, es posible aplicarla en un evento de precipitación a escala diaria, con el objetivo de distribuirla en intervalos de tiempo menores (En este estudio se utiliza una escala horaria), a través de la metodología de bloques alternados. La aplicación consiste en dado un evento de precipitación y una duración, se calcula mediante la curva IDF el valor del periodo de retorno. Posteriormente para este periodo de retorno se estima un paso (por ejemplo 60 min, si se trabaja a escala horaria) y se calcula el valor de la intensidad de precipitación para cada tiempo estimado de la suma acumulada del paso, hasta lograr la duración total del evento (60, 120, 180 min, etc...). Luego, con la intensidad calculada para la serie de tiempo se estima la precipitación acumulada, de esta forma luego se desagrega la precipitación acumulada según el paso y la duración del evento. Finalmente la serie de precipitaciones se distribuye alternadamente.

## 2.6.2 Distribución de Varas

Varas (1985) estudió la distribución de 296 tormentas registradas en distintas estaciones pluviográficas en Chile. Para cada una de las tormentas se ubicaron los intervalos más lluviosos de 4, 6, 8 y 12 horas de duración, clasificando cada tormenta en cuatro grupos dependiendo si la mayor precipitación se observaba en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total del temporal. Así el Grupo I se formó con aquellos temporales en los cuales la mayor proporción de la lluvia cae en el primer cuarto de la duración total de la tormenta. El Grupo II lo forman aquellas tormentas en que la mayor parte de la lluvia cae en el segundo cuarto de la duración y así sucesivamente. Los hietogramas de tormentas clasificadas se expresaron en forma adimensional, calculando el porcentaje de lluvia acumulada en función del porcentaje de tiempo acumulado y se efectuó un análisis de frecuencia de las lluvias.

Los resultados se presentan como curvas de distribución de lluvia acumulada, asociadas a diferentes niveles de probabilidad. Este estudio tiene como resultado las curvas de distribución promedio mostrada en Figura 2.4. Las cuales son aplicables en diferentes lugares de Chile, para el cálculo de hietogramas representativos importantes para el desarrollo de la ingeniería, cuando no se cuenta con suficiente información pluviográfica. Además de permitir generar hietogramas de tormentas desagregando registros de precipitación a nivel diario.

Como se muestra en la Figura 2.4 las curvas de Varas presentan en las abscisas un porcentaje acumulado del tiempo de duración de un evento de tormenta, mientras que las ordenadas muestran el porcentaje acumulado de la magnitud del evento. Luego, en cada grupo se tiene 3 curvas las cuales tienen asociada una probabilidad de excedencia, la forma de estas curvas según su probabilidad de excedencia fueron estimadas a través del estudio realizado por Varas al set de tormentas en 1985.

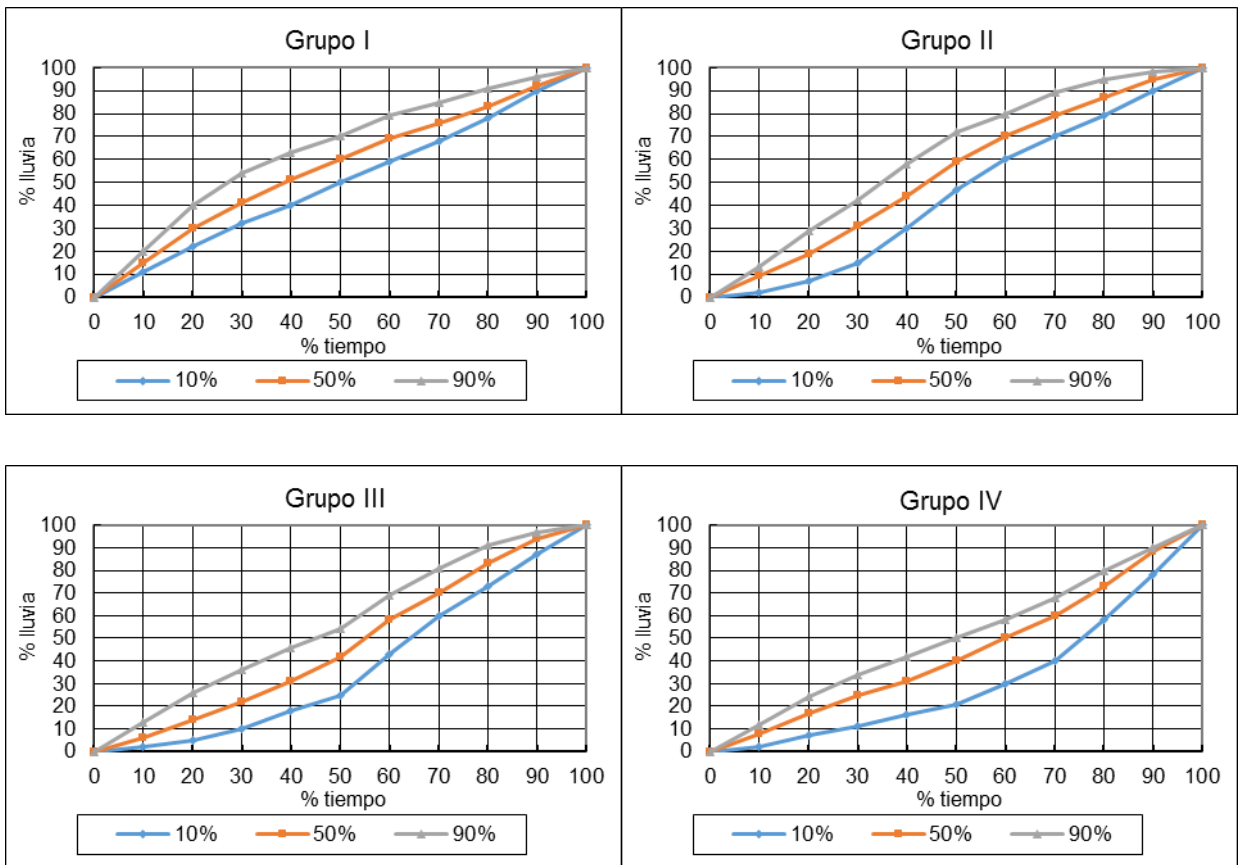


Figura 2.4 Distribución de Varas, 4 grupos con 3 probabilidades de excedencia 10, 50 y 90%.



# 3 Caracterización Zona de Estudio

## 3.1 Antecedentes Zona de Estudio

La VIII región del Bío-Bío limita al norte con la Región del Maule, al este con Argentina, al sur con la Región de la Araucanía y al oeste con el océano Pacífico. Posee una superficie de 37.068,7 km<sup>2</sup>. La región se extiende entre los 36°00' y 38°18' grados de latitud sur y desde 71°00' grados longitud Oeste hasta el Océano Pacífico. El sistema hidrográfico está conformado por dos cuencas principales que son las de los ríos Itata y Bío-Bío. La Región del Bío-Bío es considerada la puerta al sur de Chile. Además es la segunda región en importancia del país por el tamaño de su población, su desarrollo industrial, siderúrgico, petroquímico, portuario, forestal y pesquero.

La región está compuesta por las provincias de Arauco, Bío-Bío, Concepción y Ñuble, las provincias se encuentran divididas en 54 comunas, además su capital regional es la ciudad de Concepción. La zona de estudio, esquematizada en la Figura 3.1, corresponde a la cuenca de Butamalal en Butamalal, la que es una sub-cuenca de la cuenca de Cañete en la zona costera de la VIII región. Cabe mencionar que esta pertenece a la provincia de Arauco, entre los 37°42' y 37°43' grados de latitud sur y desde 73°13' y 73°15' grados longitud Oeste. El desarrollo de la zona de estudio se encuentra principalmente en la actividad forestal y en menor medida la actividad agrícola. Cabe destacar que al ser esta una cuenca alta, abastece con recursos hídricos la parte baja de la cuenca, que tiene una rica producción agrícola.

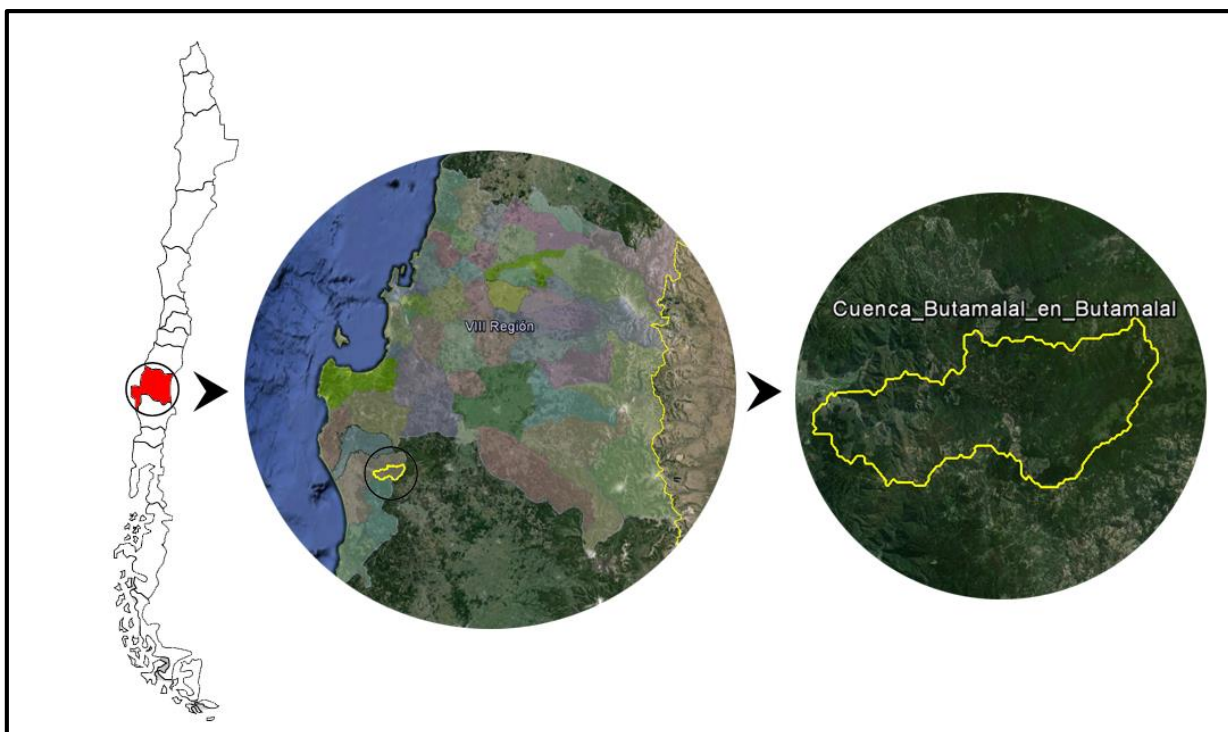


Figura 3.1 Zona de estudio (Google Earth)

## 3.2 Geología e Hidrogeología

La cuenca de Butamalal se encuentra en el sector sur de la región del Bío-Bío esta es una cuenca costera precordillerana, que transporta el agua del estero Cabrería, donde se realiza el estudio. Posteriormente aguas abajo se une al río Cayucupil, donde finalmente con aportes del río Caramávida y río Peleco forman el río Paicaví que desemboca en el Océano Pacífico.

Dada su ubicación este estero precordillerano presenta condiciones de pendiente inclinada del orden del 6%. Cabe mencionar que las condiciones topográficas de la zona son de gran importancia ya que en base a esta se hacen supuestos importantes, como que la topografía condiciona la distribución de precipitaciones en la cuenca, para así de esta forma extrapolar las precipitaciones medidas puntualmente a la cuenca mediante el método de las isoyetas y así tener presente las componentes de precipitación orográfica cuando corresponde.

Respecto a la caracterización del suelo en la región, se observa en la Figura 3.2 la presencia principalmente de 2 tipos de suelos: los Molisoles y los Ultisoles. Los Molisoles identificados en la parte baja de la cuenca en zonas de pastizales con clima templado-húmedos. Estos suelos son oscuros, con buena descomposición de materia orgánica, además son suelos productivos debido a

su alta fertilidad, generalmente son bien estructurados y se forman a partir de sedimentos minerales en este tipo de climas y con dominancia de arcillas. Por otra parte los Ultisoles ubicados en la parte alta de la cuenca son suelos propios de climas cálidos y húmedos, están presentes donde hay densa vegetación, principalmente bosques y vegetación forestal, poseen colores rojo y amarillo, que es resultado de la acumulación de óxido de hierro. Los principales nutrientes, como el calcio y el potasio, son típicamente deficientes en Ultisoles, lo que significa que generalmente no se pueden utilizar para la agricultura sedentaria (Grunwald, 2013).

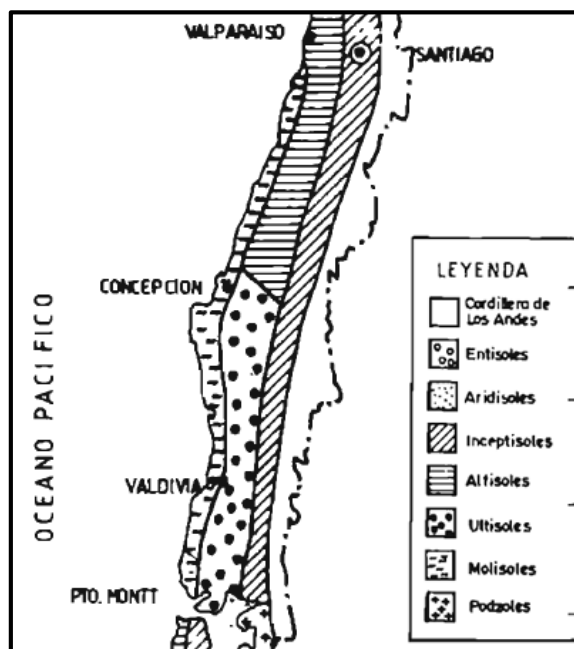


Figura 3.2 Distribución tipos de suelos zona de estudio (Mapa Hidrogeológico de Chile, 1986)

La composición geológica de la zona de estudio, esta principalmente constituida por 3 tipos de roca (ver Figura 3.3). En la parte alta de la cuenca se tiene presencia de rocas intrusivas, caracterizada principalmente por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, este tipo roca es habitual en sectores precordilleranos perteneciente al periodo Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma.). La parte inferior de la cuenca está caracterizada geológicamente por rocas metamórficas del periodo Paleozoico-Triásico con presencia de metapelitas, metabasitas, y en menor proporción neises y rocas ultramáficas con protolitos, se distinguen además esquistos pelíticos en el sector. En bastante menor medida en la cuenca baja, hay presencia de rocas sedimentarias que caracterizan el valle de cañete aguas abajo de la zona de estudio. Cabe mencionar que estas se encuentran dentro del periodo Pleistoceno-Holoceno, y están compuestas principalmente por depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa.

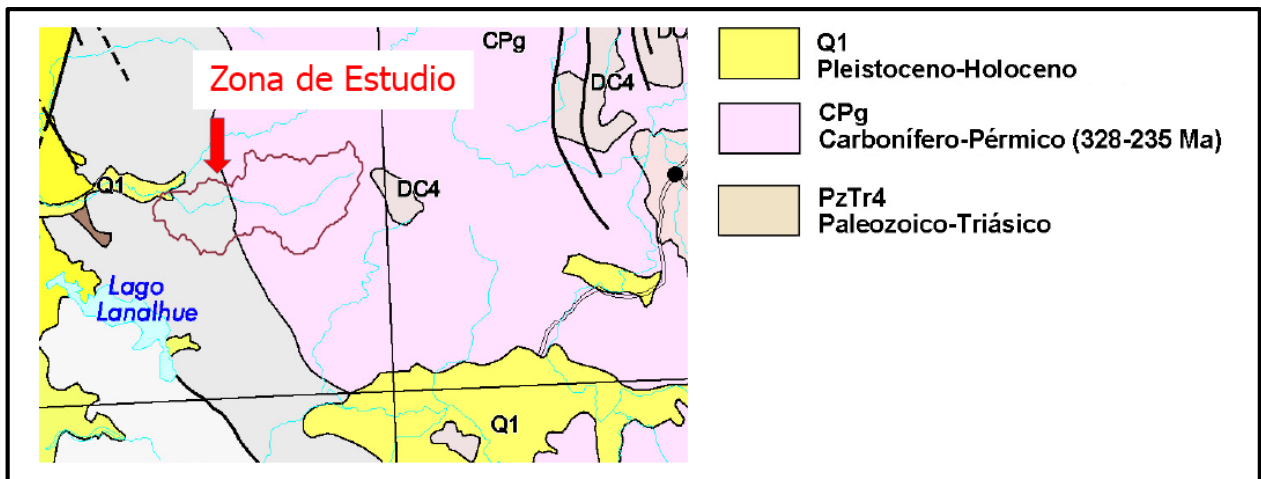


Figura 3.3 Mapa Geológico zona de estudio (modificado publicación digital SERNAGEOMIN, 2003)

Respecto a la distribución hidrogeológica de la zona de estudio (ver Figura 3.4) se toma como antecedente el mapa hidrogeológico de Chile realizado por la DGA en 1986, que muestra en la región una nula importancia hidrogeológica, con permeabilidades muy bajas o ausentes, caracterizada por rocas plutónicas y metamórficas de basamento impermeable.



Figura 3.4 Mapa Hidrogeológico zona de estudio (modificado de DGA, 1986)

### 3.3 Topografía y Delimitación de la Cuenca

El levantamiento topográfico y delimitación de la zona de estudio, comienza con la extracción de información mediante una imagen satelital de elevación del sitio ASTER GDEM<sup>1</sup> (Proyecto de la NASA y el gobierno de Japón). Este sitio básicamente proporciona un DEM (Modelo de Elevación Digital) que contiene información espacial y altimétrica obtenida mediante satélites para un cierto lugar, en este caso mediante el satélite ASTER. Estos DEM's en particular tienen resolución espacial de 30x30 metros.

Mediante el software Quantum GIS (sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre, que posee soporte en GRASS) es posible manejar los DEM obtenidos desde ASTER GDEM. GRASS es un software que posee herramientas de procesamiento digital de imágenes, que permiten determinar diferentes componentes geográficas y topográficas de utilidad para delimitar una cuenca. Una imagen gráfica de la zona de estudio se puede apreciar en la Figura 3.5

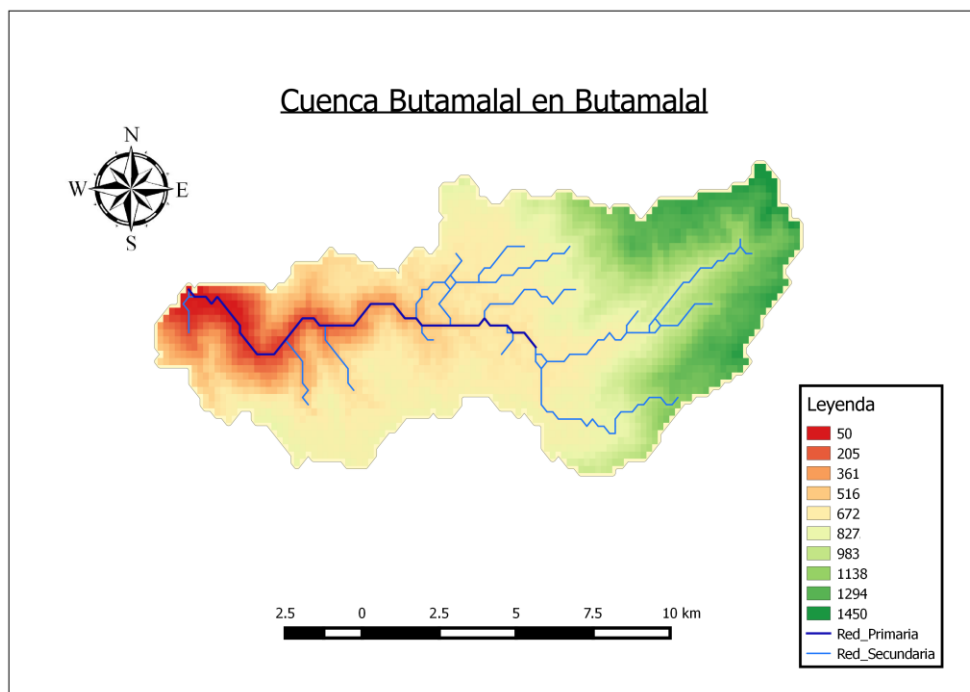


Figura 3.5 Cuenca Butamalal en Butamalal delimitada mediante Quantum GIS

<sup>1</sup> <http://gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp/>

Una vez definida y delimitada digitalmente la cuenca en la cual se realiza el modelo hidrológico, se lleva a cabo un análisis geomorfológico, esto es mediante la utilización de las propiedades extraídas de la imagen digital. La caracterización de la cuenca de estudio, se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Propiedades geomorfológicas Cuenca Butamalal

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Área	[km]	122.8
Largo cauce	[km]	22.1
Altura Mínima	[m]	49.0
Altura Máxima	[m]	1507
Pendiente	[%]	6.6%
Pendiente Mínima	[%]	0.2%
Pendiente Máxima	[%]	29.8%
Altura Promedio	[m]	790.9
Altura Ponderada	[m]	781.3

La curva hipsométrica que describe la cuenca de Butamalal, se encuentra representada en la Figura 3.6. Donde además se aprecia la línea de nieve definida para fines de cálculo de crecidas de diseño de origen pluvial, en este caso se recomienda utilizar la línea de nieves de Escobar y Vidal (DGA. Manual de cálculo de crecidas, 1995). Se observa que según estos cálculos existe un área del 1% de aporte nival en la cuenca. Luego se decide optar por descartar el aporte nival en este estudio, esto basado en la curva de variación estacional histórico (Figura 3.11), donde se observa una cuenca principalmente pluvial. Por otra parte, como se muestra en la Figura 3.9, las temperaturas en los últimos 70 años no han mostrado variaciones drásticas, lo que haría presumir que las condiciones de temperatura no se verán muy alteradas en el futuro. Además, según el resumen del IPCC del año 2013 en el peor de los casos habrá un aumento de la temperatura en la región, por lo que será menos probable que exista aporte nival en la zona.

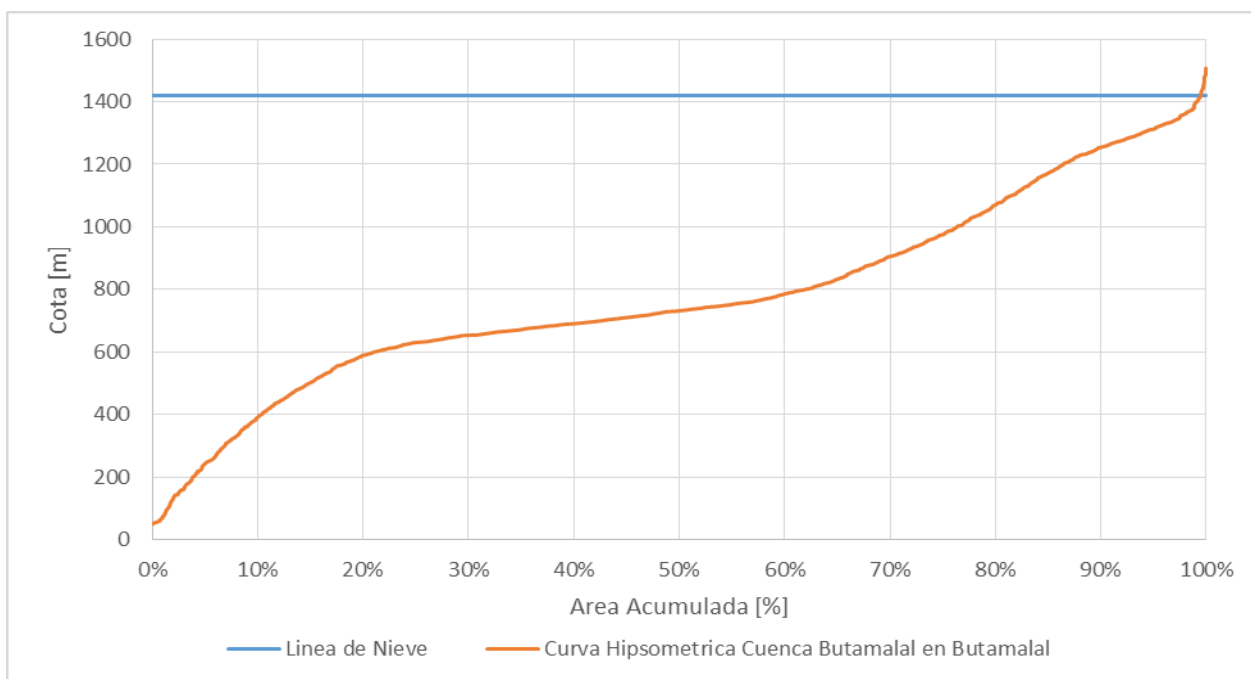


Figura 3.6 Curva hipsométrica Cuenca Butamalal en Butamalal

### 3.4 Uso de Suelo

Para el estudio de uso de suelo se utilizaron los antecedentes reunidos por la CONAF<sup>2</sup>. Estos muestran que el área en la zona de estudio está constituido básicamente por 9 tipos de suelo, señalados en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.7. La cobertura de suelo predominante (42% del área en la zona de interés) son las plantaciones forestales compuestas por Pino insigne y Eucalipto. Son árboles de edades promedio de 23 y 9 años que alcanzan en promedio los 28 y 20 metros, respectivamente. El segundo uso de suelo con mayor importancia son los renovales que ocupan el 25% del área; estos son bosques jóvenes constituidos por especies como: Coigue, Rauli, Lingue, Avellano, Luma, Quila, Laurel, Radal y Roble. Posteriormente se encuentran los bosques adultos y nativos de la zona que cubren el 22% del área donde se pueden apreciar especies como: Araucaria, Coihue, Nirre, Chaura, Tihuen y el Chacai.

---

<sup>2</sup> <http://sit.conaf.cl/>

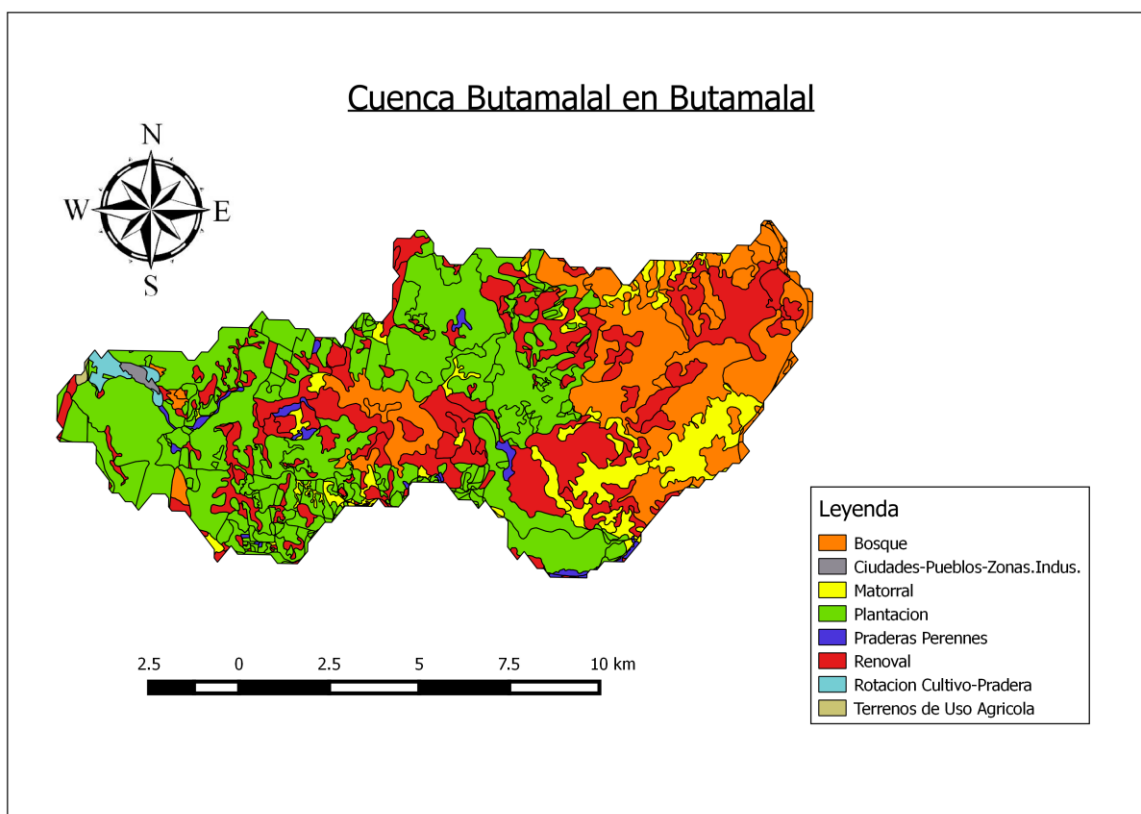


Figura 3.7 Uso de suelo Cuenca Butamalal. Sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF).

Tabla 3.2 Superficies uso de suelo Cuenca Butamalal sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF).

Tipo de Suelo	Superficie	Superficie
	[Km <sup>2</sup> ]	[%]
<b>Plantaciones</b>	51.34	42.1%
<b>Bosques</b>	27.18	22.3%
<b>Praderas</b>	1.57	1.3%
<b>Matorrales</b>	9.26	7.6%
<b>Rotación Cultivo-Pradera</b>	1.86	1.5%
<b>Terrenos de Uso Agrícola</b>	0.08	0.1%
<b>Ciudades-Pueblos-Zonas Indus.</b>	0.23	0.2%
<b>Renoval</b>	30.49	25.0%
<b>Total</b>	122.00	100%

La clasificación de suelo antes descrita, puede segregarse según su densidad de superficie y características de absorción en 27 tipos de suelos en total, mostrados en la Figura 3.8 y descritos en la Tabla 3.3. En este los bosques se distribuyen entre bosque nativo adulto-renoval denso y semi-denso, con alturas entre los 12-20 m y bosque nativo adulto-renoval abierto, con alturas entre, 8-



12 m. Además se incluyen los bosques nativos adultos denso, semi-denso y renewal con alturas entre 20-32m, 12-20m y 8-11m respectivamente. En cuanto a los renovales se tienen renovales entre 4-8m, renovales densos, semi-densos y abiertos con alturas entre, 8-12m, 4-8m y 2-4m respectivamente.

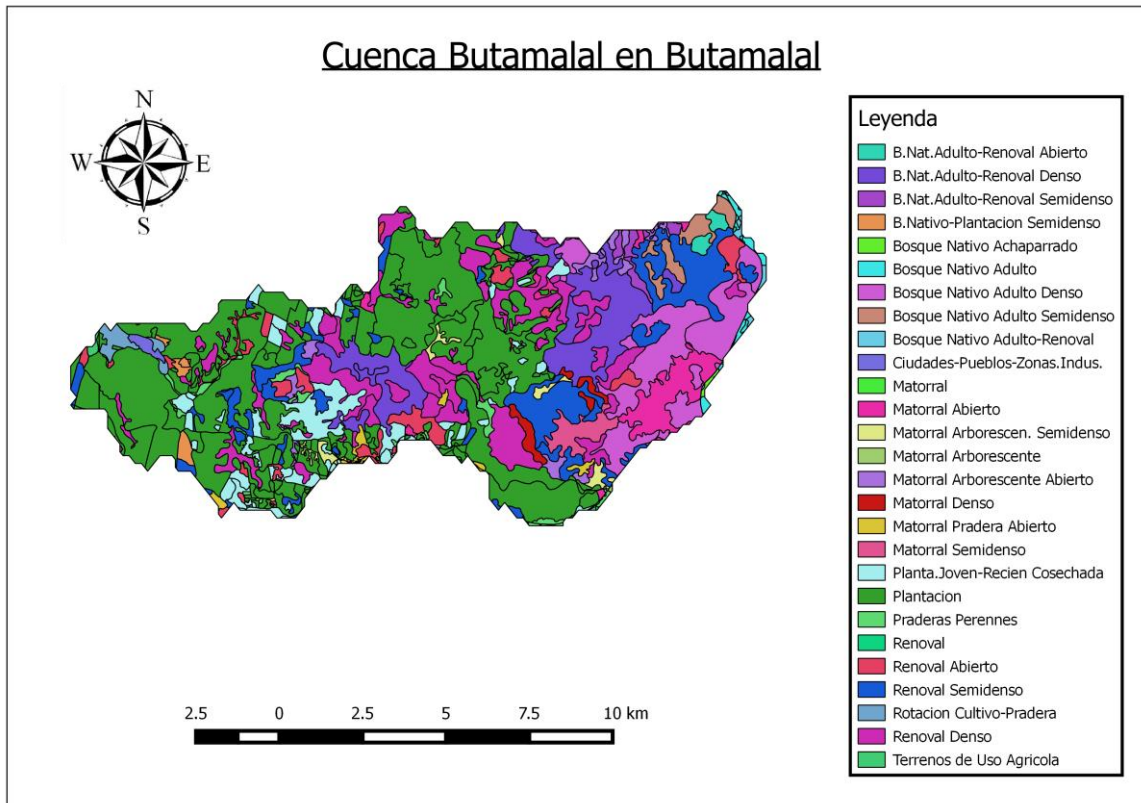


Figura 3.8 Uso de suelo Cuenca Butamalal (Sistema de Información Territorial SIT CONAF).

Tabla 3.3 Superficies uso de suelo Cuenca Butamalal sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF).

Tipo de Suelo	Superficie	Superficie	Superficie
	[Ha]	[Km <sup>2</sup> ]	[%]
<b>Plantación</b>	4196.14	41.96	34.39%
<b>Praderas Perennes</b>	157.05	1.57	1.29%
<b>Matorral Denso</b>	65.66	0.66	0.54%
<b>Rotación Cultivo-Pradera</b>	185.57	1.86	1.52%
<b>Matorral Arborescen. Semidenso</b>	76.91	0.77	0.63%
<b>Planta Joven Recién Cosechada</b>	937.39	9.37	7.68%
<b>Terrenos de Uso Agrícola</b>	7.86	0.08	0.06%
<b>Ciudades-Pueblos-Zonas.Indus.</b>	22.91	0.23	0.19%
<b>Matorral Pradera Abierto</b>	57.06	0.57	0.47%
<b>Matorral Arborescente Abierto</b>	174.65	1.75	1.43%
<b>Matorral Abierto</b>	443.41	4.43	3.63%
<b>B. Nativo - Plantación Semidenso</b>	42.20	0.42	0.35%
<b>Matorral</b>	1.28	0.01	0.01%
<b>Matorral Arborescente</b>	1.78	0.02	0.01%
<b>Matorral Semidenso</b>	104.91	1.05	0.86%
<b>B.Nat. Adulto-Renoval Abierto</b>	39.12	0.39	0.32%
<b>B.Nat. Adulto-Renoval Denso</b>	850.38	8.50	6.97%
<b>B.Nat. Adulto-Renoval Semidenso</b>	121.74	1.22	1.00%
<b>Bosque Nativo Achaparrado</b>	12.69	0.13	0.10%
<b>Bosque Nativo Adulto</b>	610.46	6.10	5.00%
<b>Bosque Nativo Adulto Denso</b>	731.88	7.32	6.00%
<b>Bosque Nativo Adulto Semidenso</b>	240.84	2.41	1.97%
<b>Bosque Nativo Adulto-Renoval</b>	68.81	0.69	0.56%
<b>Renoval</b>	255.42	2.55	2.09%
<b>Renoval Abierto</b>	470.46	4.70	3.86%
<b>Renoval Denso</b>	1207.62	12.08	9.90%
<b>Renoval Semidenso</b>	1115.78	11.16	9.15%
<b>Total</b>	12200.00	122.00	100.00%

Otra característica que puede notarse en el uso de suelo son los matorrales que se clasifican en matorral denso, abierto, pradera y absorbente. Se encuentran presentes especies como Maqui, Roble, Boldo, Pasto miel y Trevo.

### 3.5 Clima

La VIII región del Bío Bío está marcada por la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del río Bío Bío. En la franja costanera, en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa, se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante, con precipitaciones que fluctúan entre 1200 [mm] y 2000 [mm] anuales de norte a sur de la región.

Hacia el interior el clima templado costero húmedo posee también temperaturas menos extremas donde las precipitaciones alcanzan 1330 [mm] anuales con un período seco de cuatro meses. En el valle longitudinal las temperaturas presentan un mayor contraste entre día y noche. En la parte norte de la región predomina el clima templado mediterráneo abarcando toda la zona intermedia, bordes orientales de la Cordillera de la Costa y los sectores más bajos de la precordillera.

En cuanto a la zona de estudio predomina un clima templado cálido lluvioso sin estaciones secas, clasificándose la cuenca como de régimen pluvial.

El grupo Berkeley Earth<sup>3</sup> ha desarrollado estudios de los efectos climáticos, mediante promedios a gran escala de los cambios de temperatura a partir de datos de estaciones meteorológicas. La Figura 3.9 resume parte de estos estudios donde se observa que a pesar de existir un aumento de la temperatura global, en la zona de estudio la temperatura permanece con una tendencia constante, no mostrando aumentos ni disminuciones considerables en los 70 años mostrados a excepción de un salto en el año 1976. Este análisis haría presumir que en la zona de estudio el impacto del cambio climático no afecta en gran medida las temperaturas.

---

<sup>3</sup> <http://berkeleyearth.lbl.gov/stations/153934>

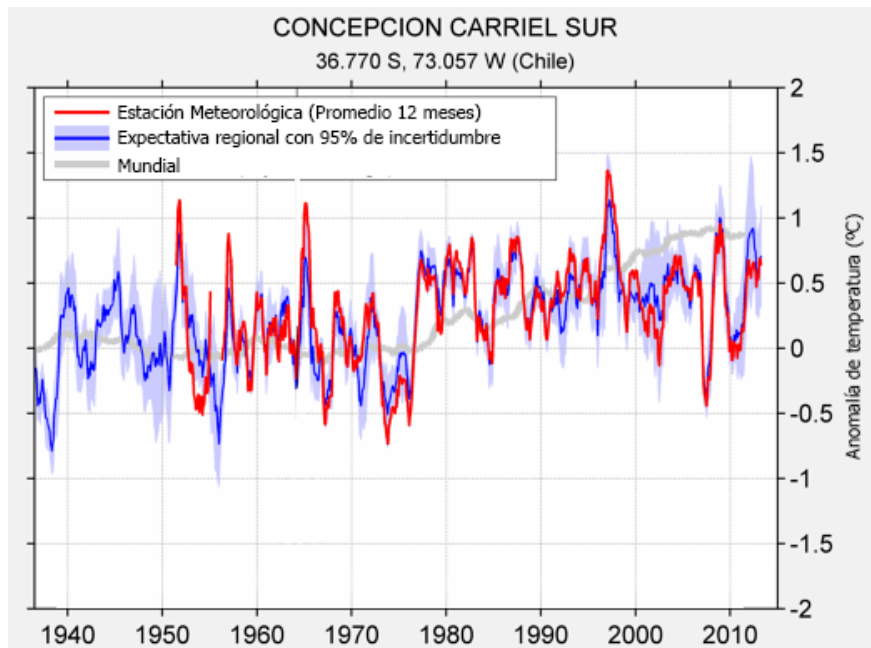


Figura 3.9 Grafico de comparación de anomalías en las temperaturas entre mediciones y proyecciones esperadas para la zona de concepción Chile (Adaptado, Grupo Berkeley Earth)

### 3.6 Información Disponible

La información disponible a utilizar son principalmente estaciones pluviométricas y fluviométricas, en el caso de las estaciones fluviométricas se utiliza la estación de Butamalal en Butamalal; en cuanto a las estaciones pluviométricas se utilizan 3 estaciones que son: Estación Cañete, Estación Puente Camino a Contulmo y Estación Estero Nonguén. La información de estas estaciones se resume en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.10 se muestra su ubicación.

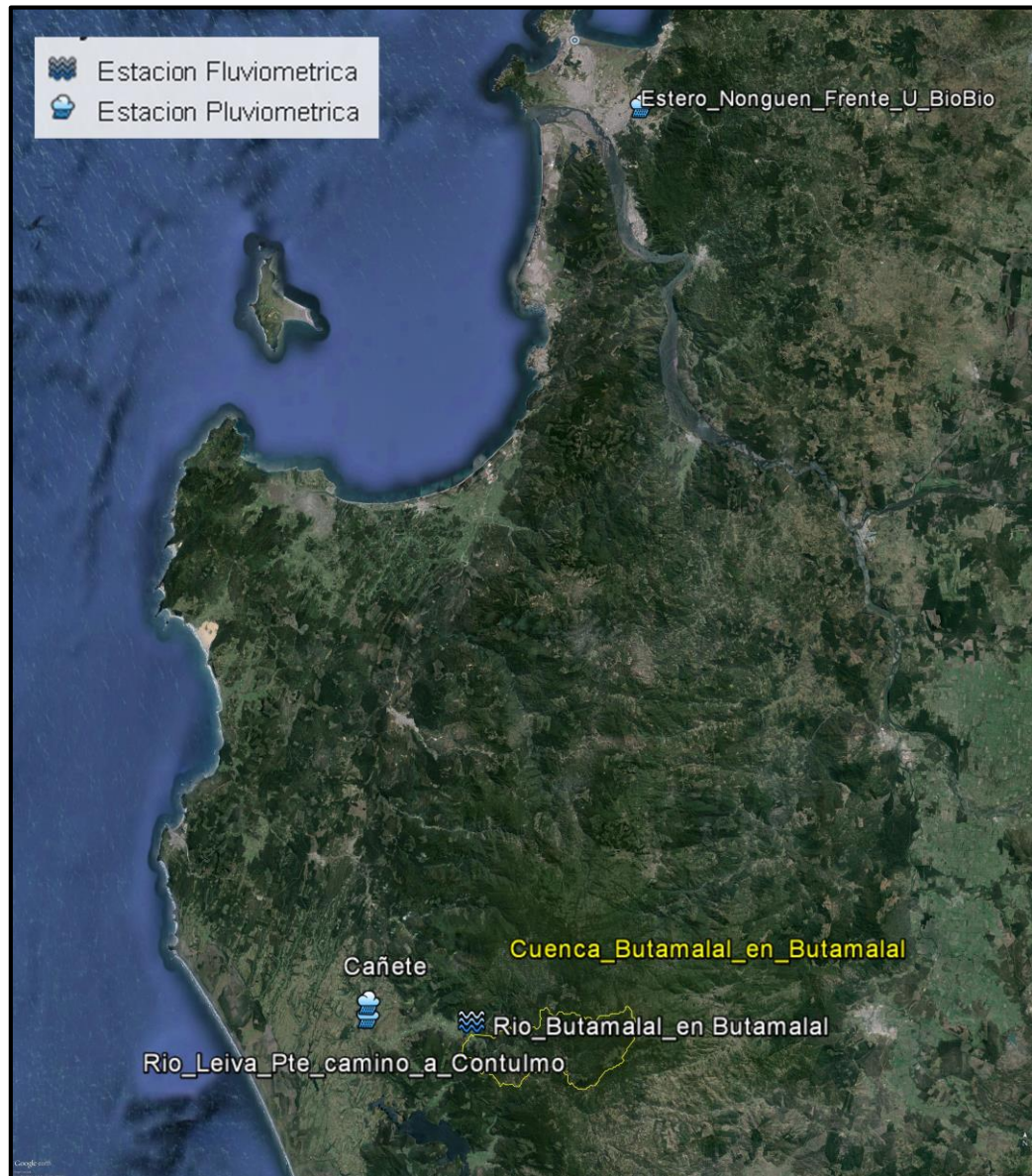


Figura 3.10 Ubicación de estaciones Cuenca Cañete (Google Earth)

Tabla 3.4 Estaciones de interés para el estudio

Estación	Código	Tipo	Variable	Inicio	Fin	Ubicación	Altitud
<b>CAÑETE</b>	08821005-0	Pluviométrica	Precipitaciones Diarias Precipitaciones Máximas en 24 horas	01-01-1970	31-12-2005	641628m E 5815272m S	78 m.s.n.m.
<b>RIO LEIVA EN PUENTE CAMINO A CONTULMO</b>	08821006-9	Pluviométrica	Precipitaciones Horarias	01-01-2012	31-12-2014	641527m E 5813639m S	48 m.s.n.m.
<b>ESTERO NONGUÉN FRENTE U. DEL BIO-BIO</b>	08220008-8	Pluviométrica	Precipitaciones Horarias	01-01-2012	31-12-2014	676926m E 5923162m S	20 m.s.n.m.
<b>RIO BUTAMALAL EN BUTAMALAL</b>	08821002-6	Fluviométrica	Caudales Horarios y Caudales Medios Mensuales	01-01-2000	31-12-2014	654040m E 5813014m S	51 m.s.n.m.

La información requerida de cada estación tiene un uso en particular para el desarrollo de este trabajo de memoria, debido a sus fortalezas y diferencias. Es así como sus características son descritas a continuación.

- Estación Pluviométrica Cañete: Cañete es la estación con el registro de datos más largo y completo en la zona de estudio, con más de 30 años de información, sin embargo solo posee datos de precipitación diaria y máxima en 24 horas, por lo que no es posible hacer con ella, directamente, un análisis de tormentas. Su ubicación es 13 km aguas abajo de la zona de estudio y pertenece a la cuenca de Cañete, donde la zona de Butamalal es una sub-cuenca de Cañete. La utilización de estos registros permiten la proyección de modelos climáticos, y análisis de frecuencia. En la actualidad se encuentra vigente.
- Estación Pluviométrica Puente Camino a Contulmo: Esta es la estación con el registro de datos más corto, con tan solo 3 años de información, sin embargo esta tiene datos horarios, por lo que es de suma importancia para el análisis de tormentas. Su ubicación es 12.5 km aguas abajo de la zona de estudio y al igual que la estación Cañete pertenece a la cuenca de Cañete. En la actualidad se encuentra vigente.
- Estación Pluviométrica Estero Nonguén: La estación en cuestión posee registros desde el 2004, sin embargo su utilización será entre los años 2012 y 2014 pues sus registros son

horarios. Se explica su uso por la necesidad de verificar los coeficientes de duración de utilidad para la cuenca. Esto será explicado en mayor detalle en capítulos posteriores.

- Estación Fluviométrica Río Butamalal en Butamalal: esta será la única estación fluviométrica utilizada en este estudio. Tiene alrededor de 15 años útiles de mediciones. La estación mide los caudales del estero Cabrería a nivel horario en la desembocadura hacia el río Cayupil, la información utilizada de esta estación permitirán realizar la calibración y validación de los modelos que buscan como objetivo el análisis de crecidas. Cabe mencionar que esta es una cuenca principalmente pluvial, como se puede observar en las curvas de variación estacional de la Figura 3.11.

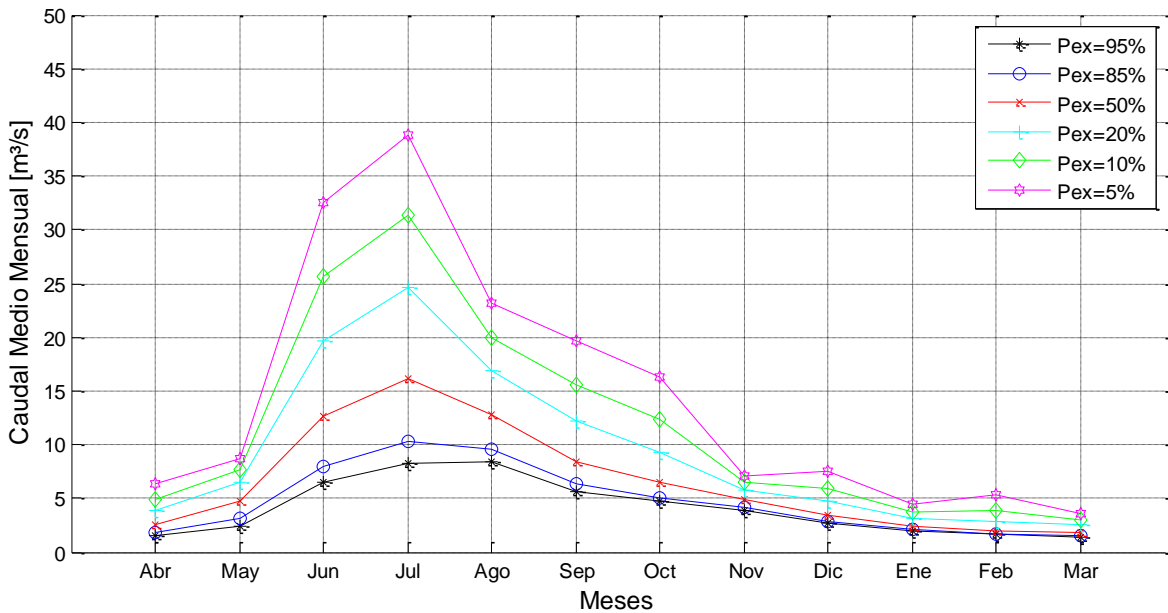


Figura 3.11 Curva de Variación Estacional Estero Cabrería (Registro estacion Butamalal)

Del balance hídrico efectuado por la DGA en 1987, se obtienen las isoyetas para estimar los coeficientes de transposición  $k$ , señalados en la Tabla 3.5, para proyectar las precipitaciones dentro de la cuenca.

La Figura 3.12 muestra cómo se distribuyen las isoyetas en el área de estudio. Es interesante notar que las isoyetas de mayor precipitación se concentran en el centro de la cuenca. Al ser la zona de estudio una cuenca costera, se esperaría la manifestación de un efecto orográfico más marcado, sin embargo, las mayores precipitaciones no se dan en la parte alta de la cuenca sino en la parte media.



Tabla 3.5 Coeficientes de proyección isoyetas

Nombre Estaciones	Isoyeta [mm]	X [m]	Y [m]	Coef_k
<b>Estación Pluviométrica Cañete</b>	1552.1	641628	5815272	1.453
<b>Estación Pluviométrica Contulmo</b>	1533.9	641527	5813639	1.470

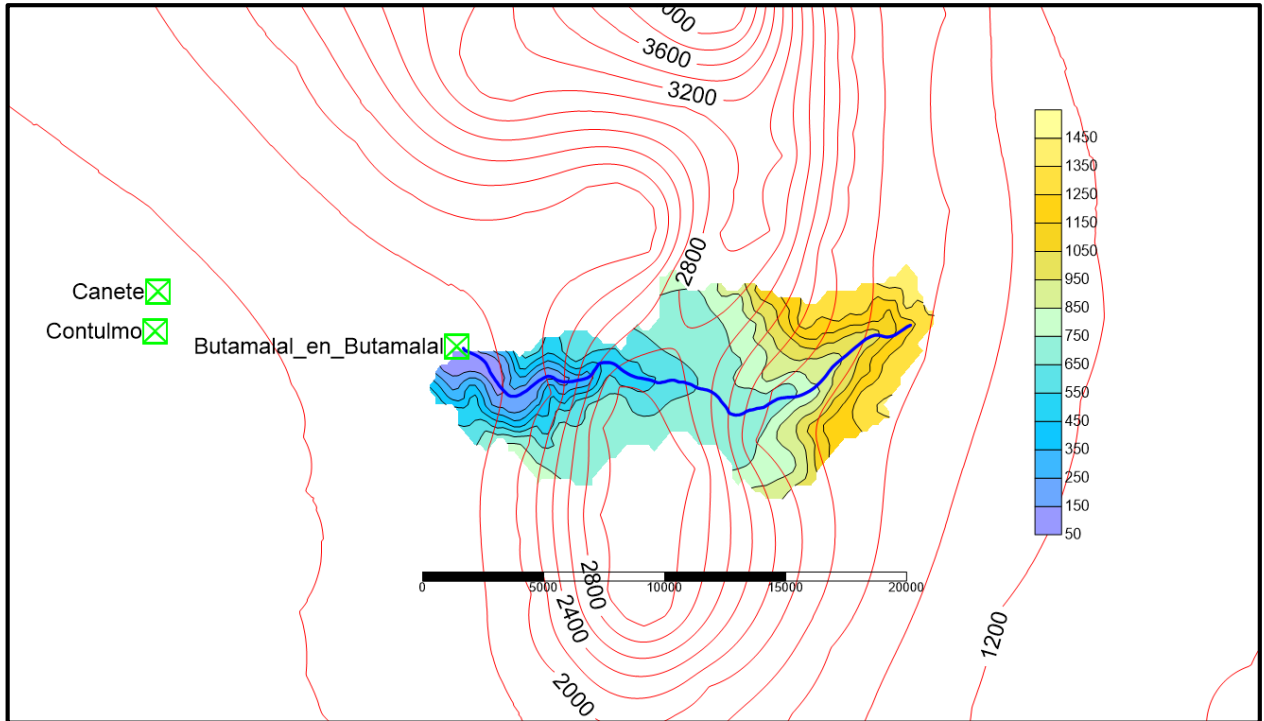


Figura 3.12 Mapa de Isoyetas distribuidos en zona de estudio, estaciones en la zona y curvas de Nivel topográfico zona de estudio (DGA 1986, Balance Hídrico de Chile).



# 4 Modelación Hidrológica

## 4.1 Análisis de Información

### 4.1.1 Procesamiento Información Modelo de Circulación Global

El procesamiento de información del modelo MK3.6, comienza con el escalamiento espacial y es seguido por el escalamiento temporal, para esto es necesario extraer los registros históricos del modelo y compararlos con los datos registrados en la estación Cañete.

#### 4.1.1.1 Escalamiento espacial

Este proceso se hace entre los años 1970 y 2005 para la modelación RCP 8.5 que tiene 10 conjuntos de datos, como se mencionó en capítulos anteriores, debido a que la simulación fue realizada en 10 oportunidades, variando las condiciones iniciales. La información se resume en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.1.

Tabla 4.1 Antecedentes de distancias a estación Cañete y ubicación puntos GCM

<b>Puntos</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Distancia [km]</b>
<b>P1</b>	-38.24	-73.13	57.09
<b>P2</b>	-36.34	-73.13	163.66
<b>P3</b>	-36.34	-75.00	216.27
<b>P4</b>	-38.24	-75.00	149.24

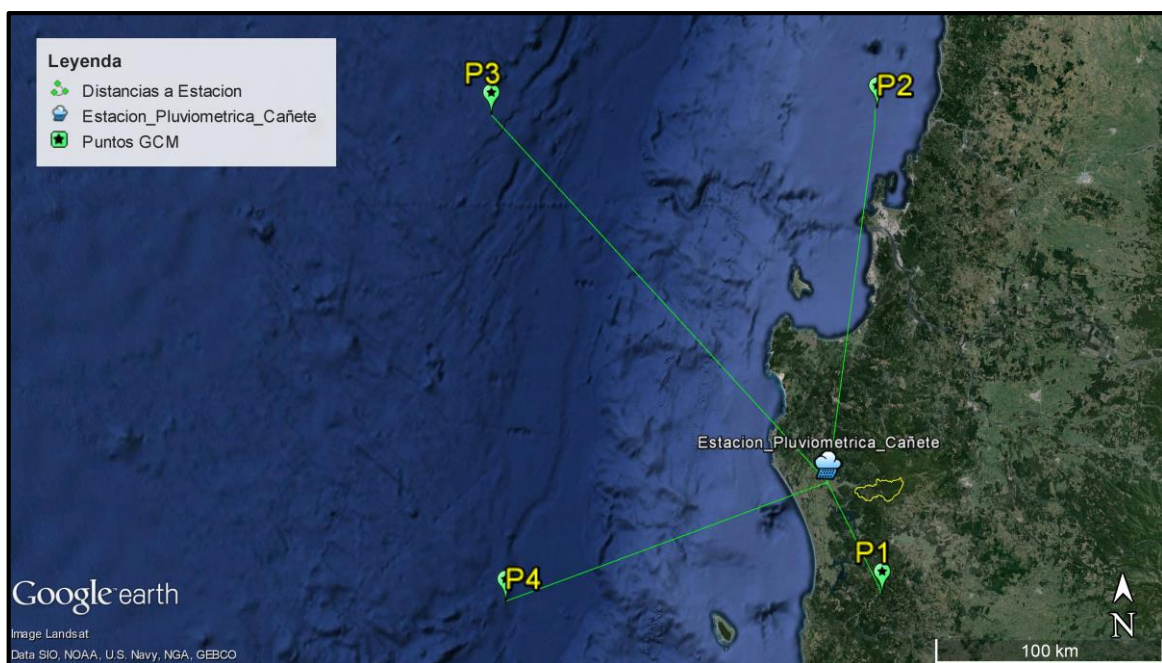


Figura 4.1 Esquema de ponderación de distancias y ubicación puntos GCM

En la ponderación de las distancias, para estimar el escalamiento correspondiente a los puntos geográficos del modelo de cambio climático, respecto a la estación que se busca escalar, se utilizó el método del cuadrado inverso de la distancias, descrito por la Ecuación 2.2.

#### 4.1.1.2 Escalamiento Temporal

Este proceso se realiza entre los años 1970 y 2005 como se describe en capítulos anteriores, consiste en estimar una función de transferencia a escala diaria pero a nivel mensual para cada corrida o *ensemble* (*ensemble* hace referencias a las diferentes proyecciones realizadas para un escenario de cambio climático), con el objetivo de corregir el sesgo de los datos ya escalados espacialmente. La función de transferencia (ver Anexo A.1) se supone válida para obtener los registros futuros entregados por el modelo de cambio climático. La Figura 4.2 muestra la precipitación anual obtenida del registro diario acumulado entre los años 2006-2065.

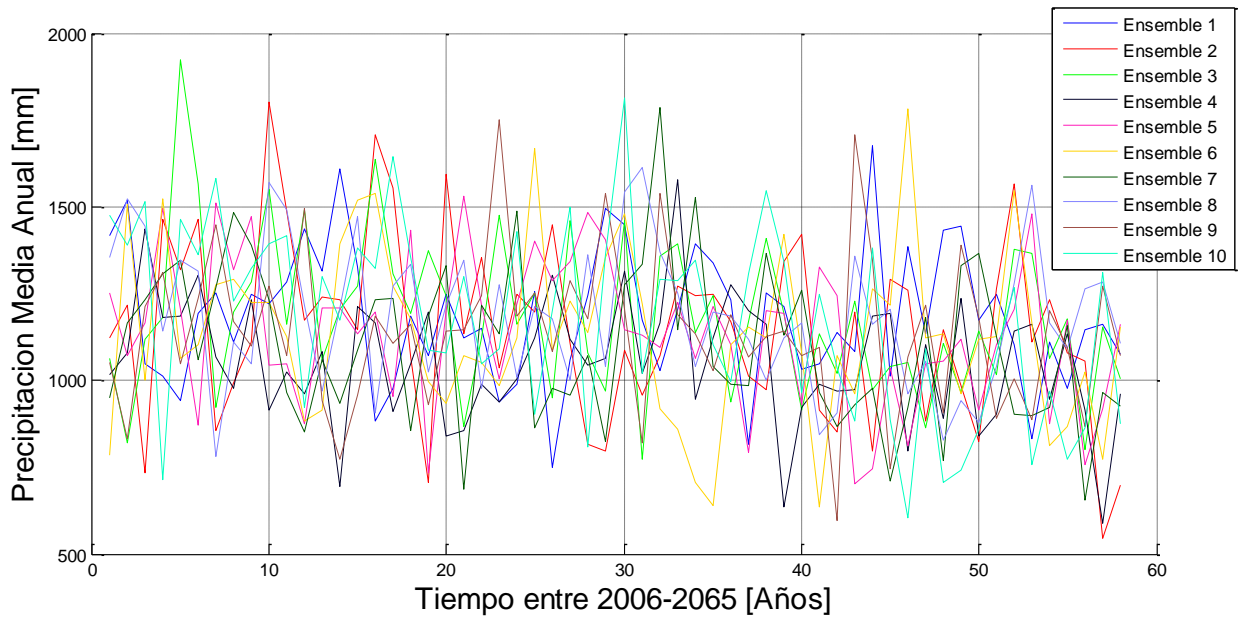


Figura 4.2 Registro anual proyectado para estación Cañete (Proyecciones MK3.6)

#### 4.1.1.3 Discriminación de *Ensembles*

De los resultados obtenidos se pueden realizar variados análisis preliminares comparativos, entre las proyecciones efectuadas bajo los diferentes *ensembles* y los datos registrados de la estación pluviométrica. A continuación en las Tablas 4.2 y 4.3, se resume lo antes descrito.

Tabla 4.2 Valores promedio de precipitación de registros observados y *ensembles* futuros

Precipitación	Observado	<i>Ensembles</i>									
	1995-2005	2006-2065									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Promedio Diaria [mm]</b>	3.6	3.3	3.2	3.2	3	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1	3.2
<b>Promedio mensual [mm]</b>	105.5	94.6	92.9	93.8	85.2	91.3	91.2	88.8	95.0	92.2	94.3
<b>Promedio anual [mm]</b>	1239.	1184.5	1149.0	1165.7	1058.0	1131.8	1133.6	1097.7	1178.1	1139.7	1167

Tabla 4.3 Porcentaje de variación de precipitación en *ensembles* proyectados respecto al registro observado

Precipitación	<i>Ensembles</i>									
	2006-2065									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Promedio Diaria</b>	-9%	-11%	-10%	-19%	-13%	-13%	-15%	-9%	-12%	-10%
<b>Promedio mensual</b>	-10%	-12%	-11%	-19%	-13%	-14%	-16%	-10%	-13%	-11%
<b>Promedio anual</b>	-4%	-7%	-6%	-15%	-9%	-9%	-11%	-5%	-8%	-6%

En la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3, se observa un decaimiento en las precipitaciones proyectadas futuras respecto a las observadas en el periodo histórico, esto se realiza utilizando promedios diarios, mensuales y anuales con la totalidad del registro. Mostrando así que el *ensemble* 4 como el más desfavorable donde la disminución es cercana al 19% a nivel diario y mensual, y un decaimiento del 15% a nivel anual. Por otra parte el *ensemble* 1 fue el que mostró el menor decaimiento en las precipitaciones respecto al registro observado, con un 9% a nivel diario, un 10% a nivel mensual y un 4% a nivel anual.

Luego para un análisis más detallado, se hace una comparación de los promedios diarios mensuales para cada *ensemble*, esto se muestra en la Tabla 4.4. Aquí se observa que el *ensemble* 4 es el más desfavorable con un decaimiento promedio anual del 17%, por el contrario el *ensemble* más favorable es el 1 con un decaimiento del 8%. Es importante notar que para el *ensemble* 1, hay 3 meses donde en promedio se superaron las precipitaciones observadas, los meses marzo, abril y mayo. El *ensemble* 2, muestra 3 meses donde en promedio se superaron las precipitaciones del registro observado, meses de abril, julio y octubre. En cuanto al *ensemble* 3, solo el mes de abril tiene un aumento de precipitaciones promedio por sobre las observadas, mientras tanto el *ensemble* 4, tiene 3 meses donde las precipitaciones promedio son mayores a las observadas, meses de febrero julio y noviembre. Posteriormente el *ensemble* 5 se comporta de forma similar al *ensemble* 4, con 3 meses donde las precipitaciones promedio son excedidas al valor observado. El *ensemble* 6 tuvo un alza en las precipitaciones observadas solo en el mes de agosto. Por otro lado, el *ensemble* 7 tiene 3 meses donde las precipitaciones fueron excedidas a las observadas, luego el *ensemble* 8 muestra 4 meses donde las precipitaciones promedio son mayores a las observadas, meses de abril, mayo, octubre y diciembre. A su vez el *ensemble* 9 tiene 3 meses donde las precipitaciones promedio son superadas. Finalmente el *ensemble* 10 muestra que hay dos meses donde las precipitaciones promedios son superiores a las observadas, meses de noviembre y diciembre.

Tabla 4.4 Distribución promedio mensual de intensidad media de precipitación diaria de registros observados y *ensembles* efectuados mensualmente

<i>Precipitaciones [mm]</i>	<i>años</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
<i>obs</i>	1970-2005	0.9	1.0	1.3	2.7	6.4	8.6	6.9	5.0	3.4	2.5	1.6	1.2
<i>Ens 1</i>	2006-2065	0.7	0.8	1.5	2.7	6.6	8.3	6.6	4.2	2.7	2.3	1.3	1.2
<i>Ens 2</i>	2006-2065	0.6	0.6	1.1	2.8	5.7	8.0	7.1	4.3	2.7	2.7	1.0	1.0
<i>Ens 3</i>	2006-2065	0.9	0.9	0.8	2.9	5.8	8.4	6.7	4.9	2.9	1.8	1.4	0.9
<i>Ens 4</i>	2006-1965	0.8	1.1	1.1	2.3	5.4	8.1	6.9	4.0	0.9	1.6	1.7	0.9
<i>Ens 5</i>	2006-1965	0.6	1.1	1.3	3.1	5.4	7.0	6.8	4.5	3.1	1.7	1.5	1.0
<i>Ens 6</i>	2006-1965	0.6	0.8	1.0	2.3	5.4	7.9	6.7	5.2	3.0	1.9	1.3	1.0
<i>Ens 7</i>	2006-1965	0.8	1.1	1.0	2.4	6.8	5.8	7.2	4.0	2.6	2.5	1.1	0.5
<i>Ens 8</i>	2006-1965	0.8	0.9	0.8	3.2	6.7	7.6	6.7	3.9	2.8	2.7	1.3	1.3
<i>Ens 9</i>	2006-1965	0.5	1.0	1.1	2.0	6.6	7.7	6.6	4.2	3.6	2.0	0.9	0.9
<i>Ens 10</i>	2006-1965	0.5	0.8	1.2	2.3	6.1	7.5	6.3	4.6	3.3	2.3	1.9	1.2

Una forma alternativa de observar la validez de un *ensemble*, es mediante la curva de duración para las precipitaciones proyectadas futuras para las 10 proyecciones modelados. Así de esta forma ver los comportamientos límites de cada proyección. Se observa en la Figura 4.3 la curva de duración a escala anual donde, el *ensemble 10* y el *ensemble 4* son los más lejanos al resto de los otros *ensembles*. Por otra parte, la Figura 4.3 muestra que para eventos con probabilidades de excedencia entre 0 y 70% la precipitación histórica en términos anuales se encuentra en general, por sobre las 10 proyecciones. Luego, para probabilidades de excedencia superiores a 80% las precipitaciones históricas anuales son inferiores a las proyectadas por los *ensembles*.

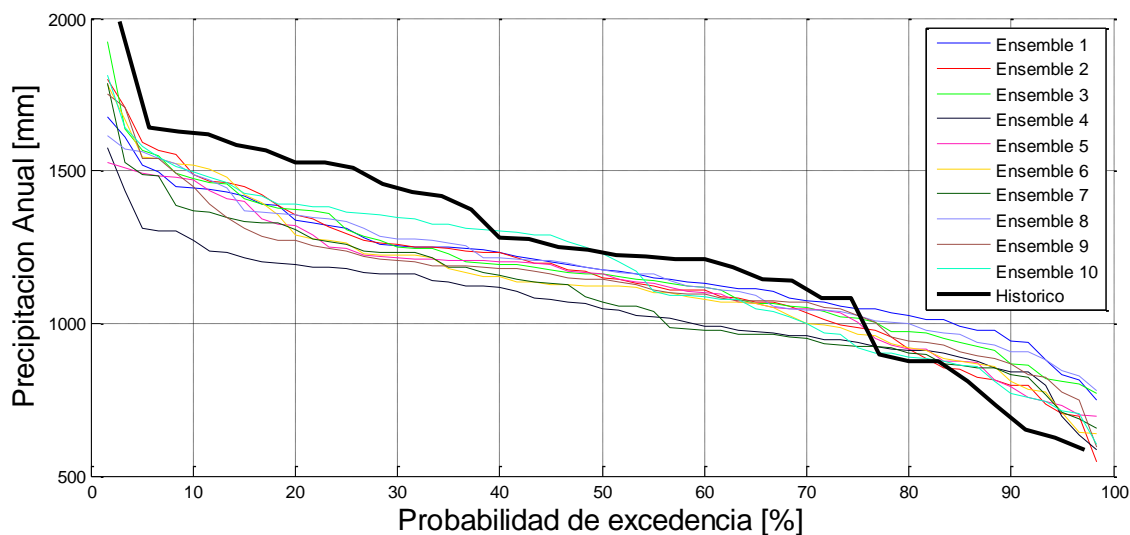


Figura 4.3 Curva de duración de precipitaciones a nivel anual datos proyectados 2006-2065

Otro análisis a estudiar, es la variación de los 10 *ensembles* respecto al promedio mensual de los mismos, con la finalidad descartar las proyecciones más alejadas al promedio en cuestión. Para este caso sería el *ensemble 4* y *ensemble 7*, como se muestra en la Figura 4.4.

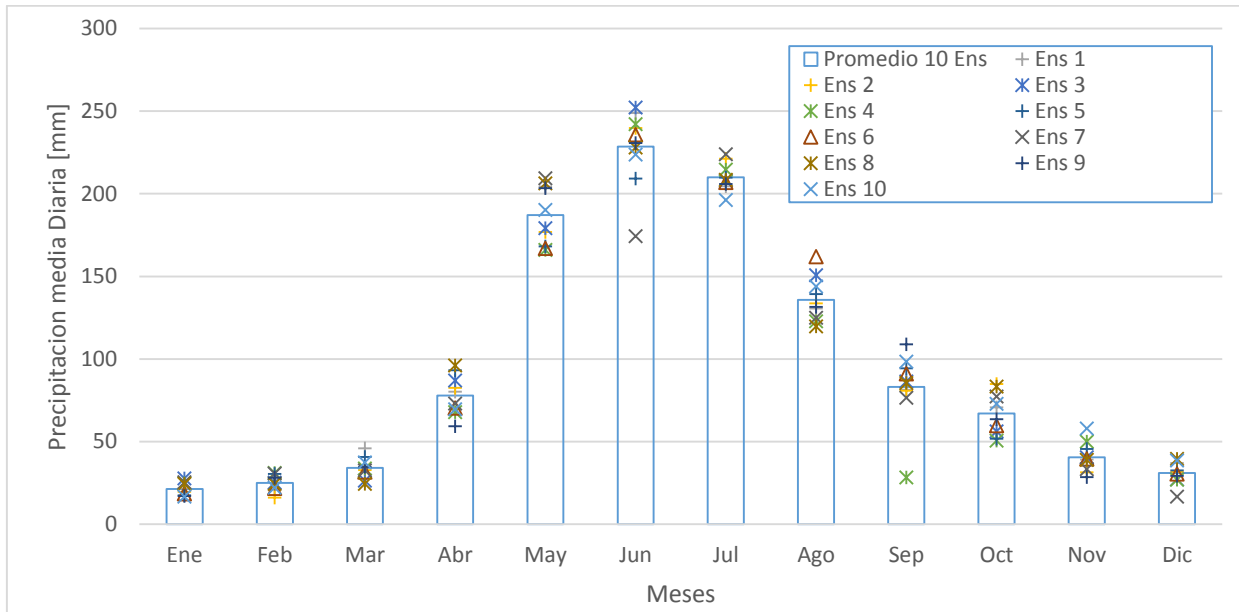


Figura 4.4 Análisis promedio de *ensemble* representativo

Finalmente bajo el análisis antes expuesto se aceptan como válidos y representativos para el estudio de crecidas, los *ensembles* 2, 3 y 9.

## 4.1.2 Distribución de Tormentas

Como se ha expuesto anteriormente a lo largo de este trabajo, al hacer una proyección de datos futuros bajo condiciones de cambio climático, se busca como objetivo hacer un análisis de crecidas. Sin embargo, las proyecciones del modelo de circulación global se disponen a escala diaria, por ello se requiere definir metodologías de segregación de datos a escalas horarias de tormenta, lo que se expone a continuación.

### 4.1.2.1 Distribución de Varas

Para encontrar el comportamiento de la distribución de Varas se analizaron los años 2012, 2013 y 2014 de la estación Rio Leiva, en Puente Camino a Contulmo.

El proceso consiste en analizar alrededor de 183 tormentas con duraciones superiores a 3 horas cuyo registro se encuentra a nivel horario. Este análisis tiene como objetivo observar en que porcentaje del tiempo la tormenta concentró sus precipitaciones y fue más intensa, considerando los 4 grupos (Varas, 1985) ya mencionados en el capítulo 2.

La Tabla 4.5 muestra cómo se distribuyen estas 183 tormentas en los 4 grupos ya mencionados, notando así que el grupo 2, correspondiente a las concentraciones de precipitación en el segundo cuarto del tiempo, es el que tiene el mayor volumen de precipitaciones, seguido de cerca por el grupo 3.

De esta forma, es posible estimar una distribución de probabilidades acumulada (Figura 4.5) que permite para un número aleatorio entre 0 y 1 estimar un grupo de varas para un evento de precipitación, es así que para una metodología de desagregación de Varas se utilizan números aleatorios para cada evento de precipitación y así asignar el grupo que corresponda.

Tabla 4.5 Distribución de grupos en las tormentas estudiadas según metodología de Varas

Grupo	Porcentaje
Grupo1	18%
Grupo2	39%
Grupo3	34%
Grupo4	9%

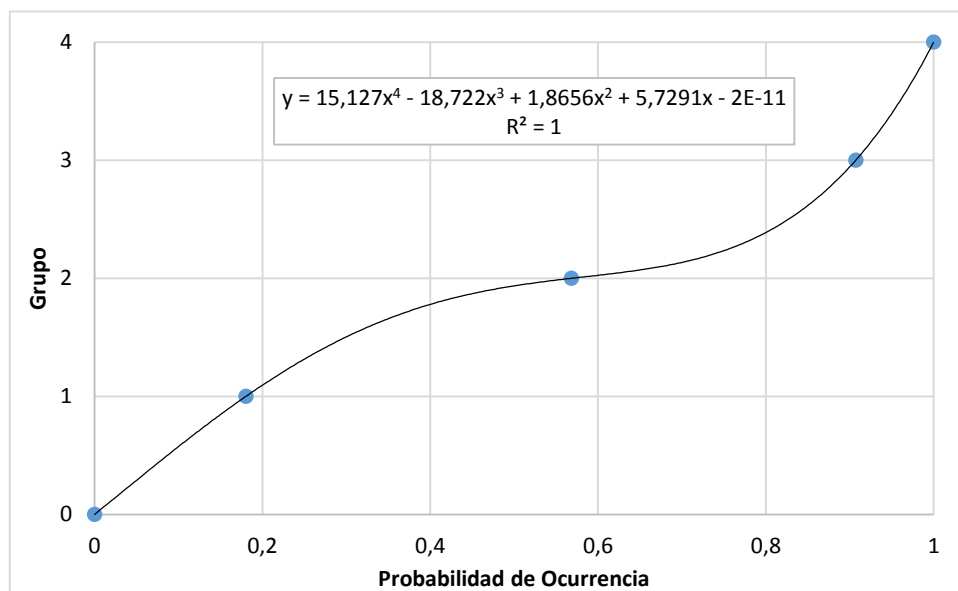


Figura 4.5 Curva de probabilidad acumulada para determinar grupo de Varas

### 4.1.2.2 Curvas IDF

Conseguir una desagregación de precipitaciones a partir de la metodología de bloques alternados mediante la curva IDF. Depende principalmente de los periodos de registro y las duraciones observadas de las tormentas. Se describen a continuación algunas de las metodologías.

#### Análisis de Frecuencia

El registro a tomar para este análisis corresponde a la precipitación máxima diaria para la estación Cañete entre los años 1970 y 2014, a este registro se le aplica el coeficiente de proyección de las isoyetas para ser transpuestas a la cuenca y luego el correspondiente factor para que sea la máxima en 24 horas. La idea de este análisis es, que mediante estos resultados se obtenga la representación numérica de la ecuación 2.23, ya que de esta forma, para una misma duración, tener variadas precipitaciones con diferentes periodos de retorno.

El análisis de frecuencia arroja como mejor resultado una distribución de tipo log Pearson, que se muestra la Figura 4.6.

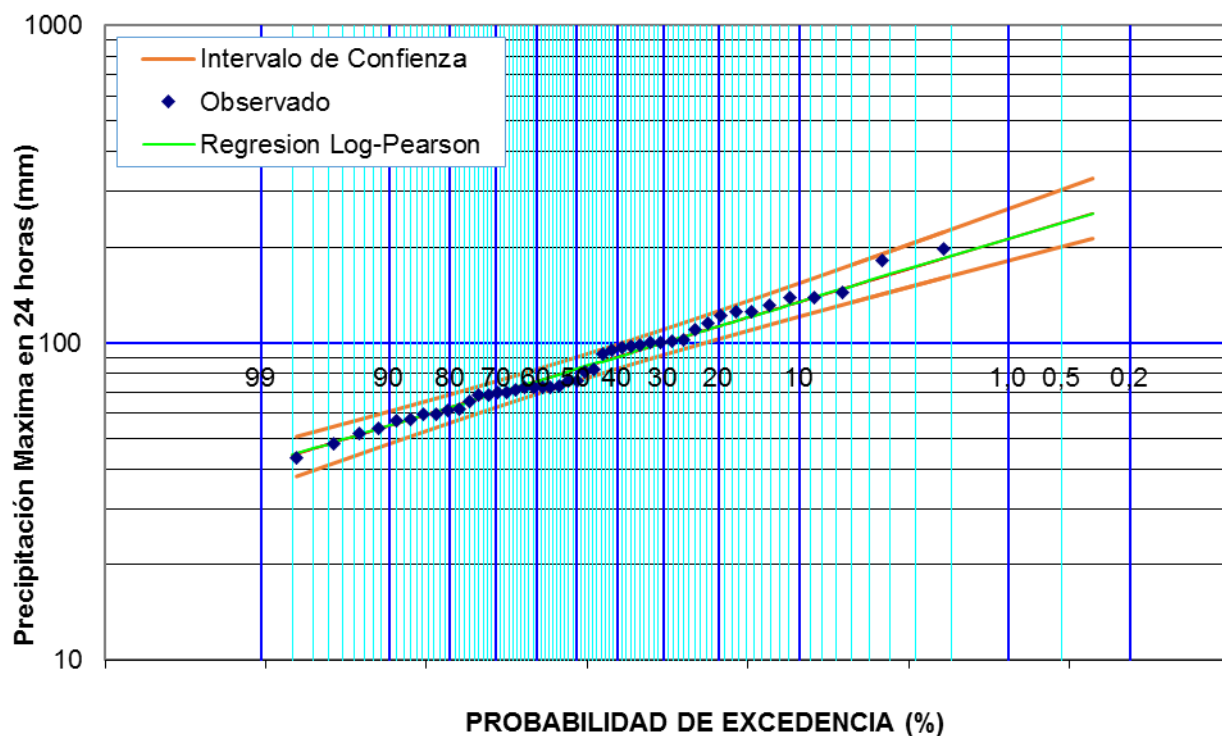


Figura 4.6 Análisis de Frecuencia distribución Log-Pearson Cuenca Butamalal.



Tabla 4.6 Resultados de análisis de Frecuencia con distribución Log-Pearson Cuenca Butamalal en Butamalal.

<b>Periodo de Retorno</b>	<b>Precipitaciones</b>
[Años]	[mm]
<b>2</b>	83
<b>5</b>	113
<b>10</b>	135
<b>25</b>	164
<b>50</b>	188
<b>100</b>	213
<b>500</b>	278

### **Coefficientes de duración**

Continuando con la metodología de obtención de la curva IDF, se llega al punto donde es necesario para un registro con variada frecuencias pero misma duración, desagregar estas en múltiples duraciones, representando de alguna forma la ecuación 2.21. Para ello se recurre a los coeficientes de duración que se encuentran presentes en estudios de diferentes zonas en Chile.

La DGA en el año 1992, realizó un estudio de precipitaciones máximas donde se determinó los coeficientes de duración para 24 horas abarcando determinadas zonas de Chile. Sin embargo, para lugar de interés el sector más cercano es la ciudad de Concepción que se encuentra a 113 km de la zona de estudio.

Para validar la utilización de estos coeficientes en el lugar de interés, se ocupan los 3 años del registro horario disponible (2012 a 2014) en esta zona, dados por la estación Rio Leiva Puente Camino a Contulmo. Posteriormente se obtiene para estos 3 años los coeficientes de duración para el registro de precipitaciones máximas anuales en 24 horas. Luego se realiza la misma metodología con la estación Estero Nonguén Frente U. del Bío Bío en el mismo rango de años, y se procede a comparar si hay una correlación entre el sector de Concepción y la zona de estudio en estos 3 años. La Tabla 4.7, muestra los coeficientes de duración que se obtuvieron en ambas estaciones en los 3 años, además de los valores para los coeficientes de duración dados por la literatura (DGA, 1992). La Tabla 4.8, muestra la correlación que existe entre los coeficientes de duración de cada estación con respecto a la otra estación en el mismo año.

Tabla 4.7 Coeficientes de duración para los años 2012, 2013 y 2014 para las estaciones de Estero Nonguén en Concepción, Estación Pte. Camino Contulmo y Concepción

Horas	Coeficientes de Duración									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
<b>Concepción</b>	0.20	0.31	0.39	0.48	0.57	0.64	0.71	0.78	0.89	1
<b>Pte. Camino a Contulmo-2012</b>	0.24	0.41	0.64	0.67	0.71	0.72	0.73	0.79	0.92	1
<b>Pte. Camino a Contulmo-2013</b>	0.21	0.33	0.54	0.61	0.63	0.67	0.74	0.82	0.98	1
<b>Pte. Camino a Contulmo-2014</b>	0.26	0.39	0.53	0.63	0.75	0.79	0.85	0.92	0.95	1
<b>Esteros Nonguén Concepción-2012</b>	0.20	0.31	0.41	0.57	0.71	0.75	0.78	0.80	0.87	1
<b>Esteros Nonguén Concepción-2013</b>	0.20	0.41	0.68	0.85	0.91	0.92	0.92	0.95	0.95	1
<b>Esteros Nonguén Concepción-2014</b>	0.16	0.23	0.30	0.43	0.53	0.61	0.62	0.68	0.81	1

En el Anexo A.2 se encuentra el detalle para las precipitaciones máximas acumuladas para distintas duraciones, en las dos diferentes estaciones para los 3 años de estudio (2012-2014).

Tabla 4.8 Coeficientes de correlación para coeficientes de duración entre estaciones, años 2012, 2013 y 2014

Año	Correlación
<b>2012</b>	0.95
<b>2013</b>	0.91
<b>2014</b>	0.96

De la Tabla 4.8 se observa que existe una correlación importante entre las estaciones, que permite acreditar de cierta forma que los valores de coeficientes de duración que se obtuvieron en Concepción, son válidos para la zona de estudio. Luego, se hace un análisis extra, que se muestra en la Tabla 4.9, que señala la correlación en cada año para cada estación, con respecto a los coeficientes de duración que se tiene de la literatura.

Tabla 4.9 Coeficientes de correlación, entre los coeficientes de duración de las estaciones y el valor de Concepción

Ubicación-Año	Correlación
Pte. Camino a Contulmo-2012	0.95
Pte. Camino a Contulmo-2013	0.98
Pte. Camino a Contulmo-2014	0.98
Esteros Nonguén Concepción-2012	0.98
Esteros Nonguén Concepción -2013	0.87
Esteros Nonguén Concepción -2014	0.99

El análisis de la Tabla 4.9, muestra que existe una buena correlación entre el valor de Concepción y los antecedentes observados en ambas estaciones para el mismo periodo de años, por

lo que aplicar los coeficientes de la literatura de Concepción sobre la zona de estudio, es una práctica con un cierto grado de confiabilidad que permite obtener un buen resultado respecto a la desagregación del valor diario de precipitación.

### **Ecuación Curva IDF**

Mediante los antecedentes presentados es posible generar la Curva IDF gráficamente, sin embargo si se quiere parametrizar ésta bajo una ecuación, se debe hacer un análisis adicional. Este consiste en basarse en la Ecuación 2.24 y determinar el parámetro A interpolando la intensidad en función de la duración manteniendo constante la frecuencia. Es importante mencionar que para este caso se analizan 7 frecuencias diferentes y se hacen 7 interpolaciones de manera que se obtienen 7 valores diferentes para el parámetro A. Sin embargo el coeficiente de regresión n permanece constante independiente de la frecuencia aplicada. En el Anexo A.3 se muestran las gráficas de cada interpolación y en la Tabla 4.10 se presenta el resumen de los coeficientes obtenidos por las interpolaciones.

Tabla 4.10 Resumen de coeficientes obtenidos con la interpolación de la Ecuación 2.12.

<b>Resumen de aplicación de regresión potencial</b>		
<b>Periodo de Retorno (años)</b>	<b>Término de regresión (A)</b>	<b>Coef. de regresión (n)</b>
<b>2</b>	139	-0.493
<b>5</b>	190	-0.493
<b>10</b>	227	-0.493
<b>25</b>	277	-0.493
<b>50</b>	317	-0.493
<b>100</b>	359	-0.493
<b>500</b>	468	-0.493

Para la Ecuación 2.25, se realiza un análisis similar, donde se interpola el término de regresión A en función de los periodos de retorno con la finalidad de buscar el coeficiente de regresión m y la constante de regresión K.

En la Figura 4.7 se observa la correlación para este parámetro para diferentes periodos de retorno. De esta forma se parametriza finalmente la Ecuación 4.1, ecuación de las curvas IDF.

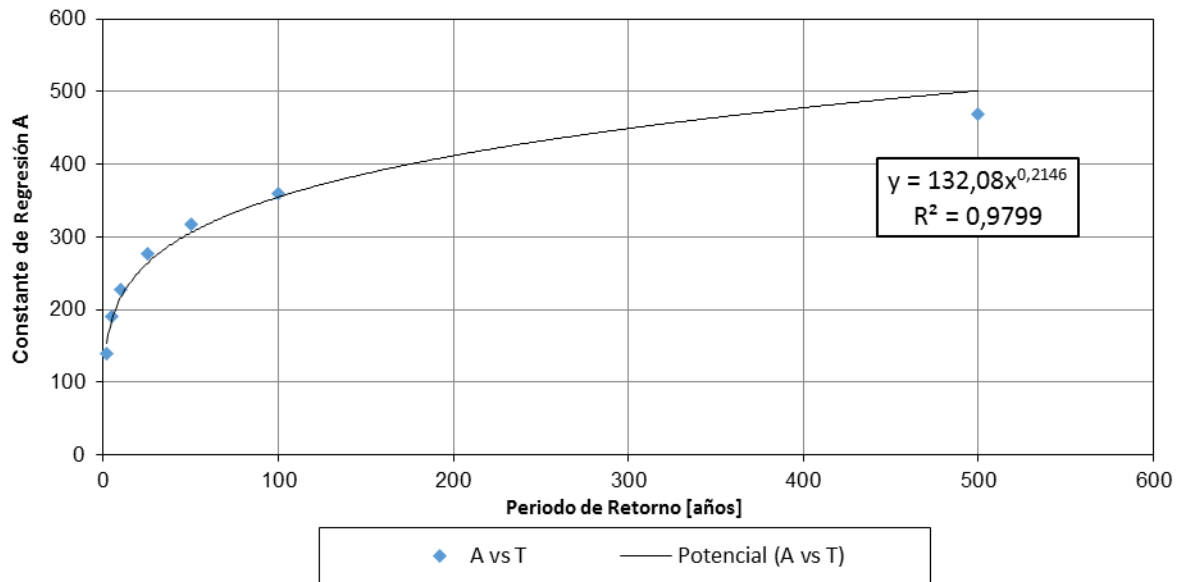


Figura 4.7 Interpolación Coeficiente A en función de la frecuencia, Ecuación 2.11.

$$I = \frac{132.0772 * F^{0.214649}}{d^{0.49272}} \quad 4.1$$

La Curva IDF queda caracterizada en la Figura 4.8 para 7 diferentes periodos de retorno. Esta fue graficada mediante la aplicación de la Ecuación 4.1 y sus resultados se resumen en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Valores de Curva IDF Cuenca Butamalal en Butamalal

Frecuencia	Duración en Horas											
	años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>2</b>	20.4	14.5	11.9	10.3	9.2	8.4	7.8	7.3	6.9	6.6	6.3	6.0
<b>5</b>	24.8	17.6	14.4	12.5	11.2	10.3	9.5	8.9	8.4	8.0	7.6	7.3
<b>10</b>	28.8	20.5	16.8	14.5	13.0	11.9	11.0	10.3	9.8	9.3	8.8	8.5
<b>25</b>	35.1	24.9	20.4	17.7	15.9	14.5	13.4	12.6	11.9	11.3	10.8	10.3
<b>50</b>	40.7	28.9	23.7	20.6	18.4	16.8	15.6	14.6	13.8	13.1	12.5	12.0
<b>100</b>	47.2	33.6	27.5	23.8	21.4	19.5	18.1	16.9	16.0	15.2	14.5	13.9
<b>500</b>	66.7	47.4	38.8	33.7	30.2	27.6	25.6	23.9	22.6	21.4	20.5	19.6

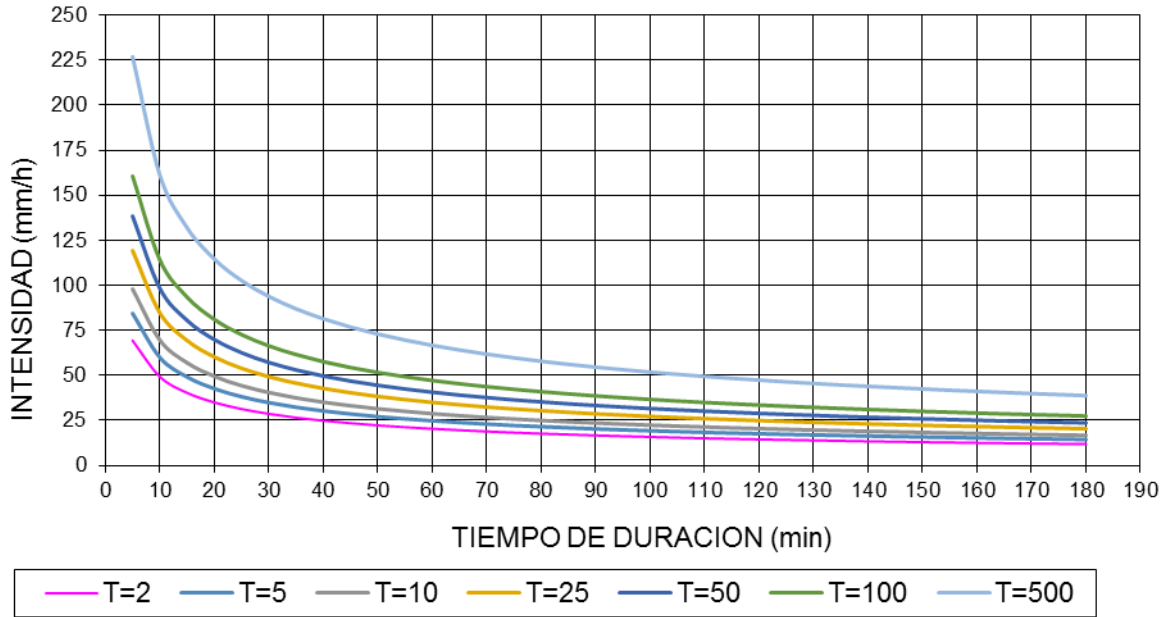


Figura 4.8 Curvas IDF Cuenca Butamalal en Butamalal

### 4.1.3 Análisis de Duración de Tormentas

Se han mostrado diferentes métodos de distribución de tormentas, sin embargo es necesario para estos procesos saber la duración de una tormenta, de esta forma para el análisis de tormentas, se opta por hacer un análisis estadístico de las mismas.

El análisis se lleva a cabo tomando en cuenta los 3 años de información disponibles de precipitaciones a nivel horario, de la Estación Puente Camino a Contulmo (2012-2014). La información disponible del modelo de circulación global es a escala diaria, por lo tanto se tiene las precipitaciones totales a nivel diario para esos años. El método a implementar consiste en un análisis estadístico diario representado en 24 horas, el análisis probabilístico entonces corresponde a determinar la probabilidad de tener una determinada duración dado un evento de precipitación, como se muestra en la ecuación 4.1.

$$Prob(\text{Determinada Duración} \setminus \text{Evento de Precipitación}) = X \quad 4.1$$

Se tiene 3 años disponibles con información, de estos 3 años, 556 días poseen un evento de precipitación, estos se clasifican por día según la magnitud de la precipitación en 4 grupos según

la magnitud de la precipitación y luego en 6 subgrupos según la duración que tuvo el evento. Esto se resume en las Figuras 4.9 y 4.10.

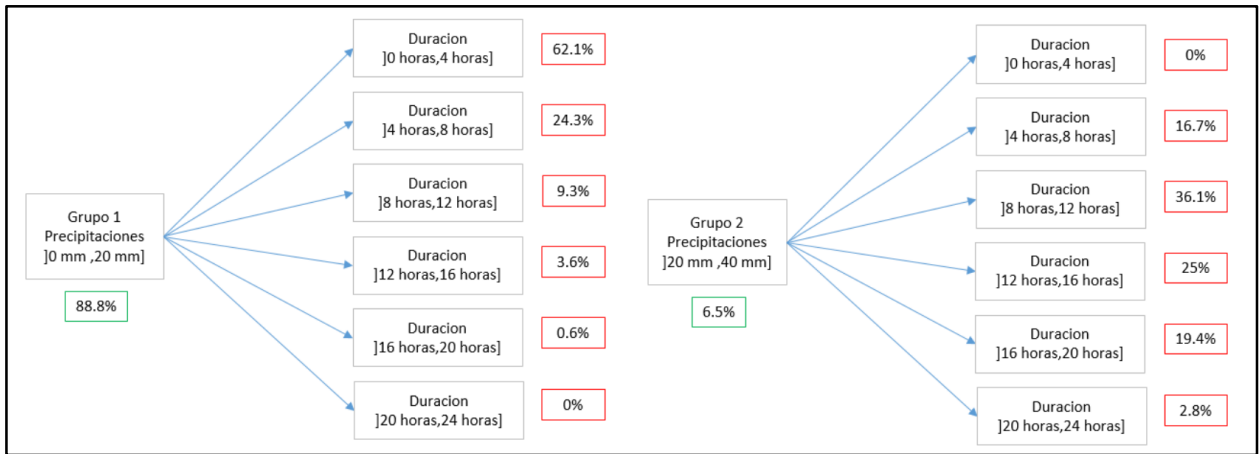


Figura 4.9 Grupo 1 y Grupo 2, con sus respectivas probabilidades de ocurrencia y estadísticas de duraciones según los registros de los años 2012 al 2014

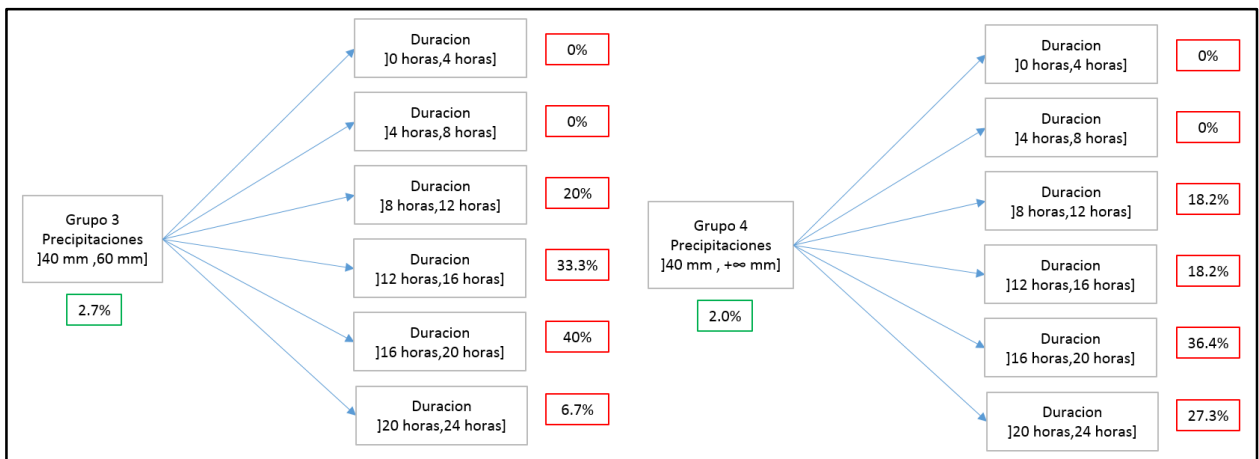


Figura 4.10 Grupo 3 y Grupo 4, con sus respectivas probabilidades de ocurrencia y estadísticas de duraciones según los registros de los años 2012 al 2014

De estos estadísticos es posible estimar las curvas acumuladas de probabilidades en función de la duración. La razón de tomar la duración como variable independientes, es que al momento de interpolar y parametrizar esta curva mediante una ecuación polinómica, resulta más exacta y se acopla de mejor forma a los datos estimados. Con coeficientes de correlación del orden de 0.99, como se puede observar en las Figuras incluidas en el Anexo 1, donde se muestran las curvas de probabilidad acumulada para cada grupo.

Es importante mencionar la complejidad de escoger la duración como variable independiente, ya que el objetivo es estimar la duración en función de una probabilidad y no es trivial la solución de ecuaciones polinómica de cuarto o quinto orden. Es así como la metodología incluye resolver la ecuación numéricamente dada una probabilidad para cada día, y de esta manera estimar la duración requerida.

La metodología probabilística de asignación de duraciones, consiste en seguir un árbol de decisión. Esto comienza con asignar un número aleatorio entre 0 y 1 para cada día que presente un evento de precipitación, luego dependiendo del valor de la precipitación total diaria se le asigna un grupo de los anteriormente mencionados, para este grupo se resuelve la ecuación polinómica obtenida de la curva de probabilidades acumuladas, y se estima una duración para el evento según el número aleatorio generado. Esta metodología se realiza para todos los días que presenten un evento de precipitación.

Para comprobar esta metodología se toman 555 datos del registro observado y del registro estimado, correspondiente a los años 2012 y 2014. Posteriormente, se agrupa la cantidad de eventos con una misma duración en ambos registros, esto se puede observar en la Figura 4.11. Luego, al comparar ambos registros con la agrupación según la cantidad de eventos para determinadas duraciones, se obtiene un coeficiente de correlación de 0.92 y en 555 datos 61 son completamente iguales, la desviación estándar de la diferencia entre los valores observado y estimado es del orden de las 3 horas con un promedio de 3.9 horas. De esta forma la estimación es bastante aceptable, considerando que se determinó en base a valores aleatorios.

Es importante señalar que como se dispone de tan pocos datos horarios para hacer un análisis estadístico más completo, se decide hacer los grupos de 20 [mm] de precipitaciones, para así de esta manera abarcar la mayor cantidad de datos posibles en la mayor cantidad de escenarios posibles.

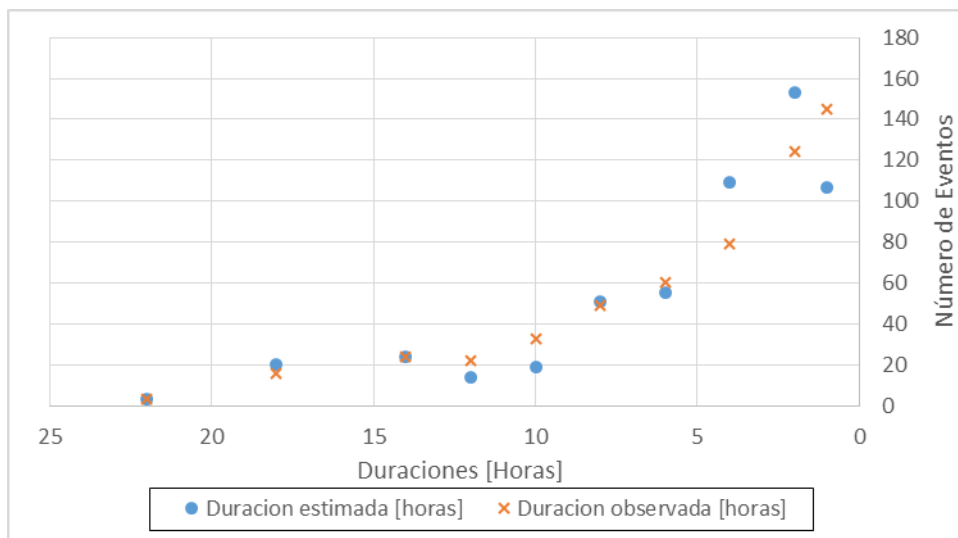


Figura 4.11 Agrupación de cantidad de eventos con una misma duración para registros observados y registros estimados, entre los años 2012 y 2014.

#### 4.1.4 Análisis de los Antecedentes de Humedad en la Zona

Un aspecto importante al momento de asignar una curva número en la calibración, es la estimación de los antecedentes de humedad. Como se explicó en capítulos anteriores, la cantidad de precipitación caída en días previos altera la humedad del suelo, provocando mayor o menor infiltración lo que se refleja en cambios en la curva número.

Existen valores en la literatura para antecedentes de humedad, estos provienen del oeste de los Estados Unidos, por lo que no necesariamente sean factibles en la región de estudio. De esta forma se opta por hacer un análisis de los antecedentes de humedad en la zona de estudio.

Este análisis consiste, en tomar las precipitaciones diarias observadas entre los años 1970 y 2010. De esta forma se calcula la cantidad de precipitación acumulada caída los 5 días previos para cada día. Posteriormente se discrimina según estación de crecimiento (estaciones primavera-verano, donde hay desarrollo vegetal) o inactiva (estaciones otoño-invierno, donde el desarrollo vegetal disminuye) y se promedia anualmente. Este análisis se resume en la Tabla 4.12.



Tabla 4.12 Promedio anual de antecedentes de humedad para precipitaciones ocurridas dentro de los 5 días previos a cada evento.

Estación Inactiva		Estación Crecimiento		Estación Inactiva		Estación Crecimiento	
Años	Promedio Anual [mm]	Años	Promedio Anual [mm]	Años	Promedio Anual [mm]	Años	Promedio Anual [mm]
1970	22.86	1970	46.83	1991	30.62	1991	46.19
1971	22.61	1971	44.44	1992	27.66	1992	46.52
1972	17.73	1972	41.70	1993	20.10	1993	63.41
1973	17.74	1973	44.43	1994	23.39	1994	40.18
1974	25.78	1974	48.38	1995	17.35	1995	54.28
1975	30.73	1975	49.81	1996	14.09	1996	35.89
1976	29.37	1976	35.72	1997	24.83	1997	66.76
1977	24.02	1977	73.66	1998	12.11	1998	38.52
1978	29.14	1978	59.18	1999	25.02	1999	45.32
1979	36.50	1979	56.09	2000	25.52	2000	53.67
1980	23.43	1980	61.68	2001	14.97	2001	62.15
1981	27.44	1981	47.68	2002	38.51	2002	41.15
1982	32.80	1982	61.15	2003	22.78	2003	44.64
1983	46.54	1983	45.98	2004	21.23	2004	37.02
1984	31.00	1984	59.47	2005	22.58	2005	59.86
1985	26.70	1985	41.35	2006	18.33	2006	63.58
1986	18.59	1986	57.67	2007	20.77	2007	41.18
1987	13.87	1987	25.87	2008	21.74	2008	57.05
1988	15.43	1988	26.41	2009	25.19	2009	47.29
1989	20.39	1989	30.94	2010	20.88	2010	51.56
1990	15.98	1990	32.52				

La Tabla 4.13 muestra el promedio como valor límite para el grupo 1 y el máximo como valor límite para el grupo 3, estos valores se tomaron del registro de la Tabla 4.12, para establecer así los antecedentes de humedad a utilizar en el análisis según los estadísticos encontrados.

Tabla 4.13 Clasificación de clases de humedad antecedente modificada para el método de abstracción de lluvia SCS en la región de estudio

Grupo	Lluvia Antecedente 5 días [mm]	
	Estación Inactiva	Estación de Crecimiento
I	Menos de 23	Menos de 48
II	23 a 46	48 a 73
III	Sobre 46	Sobre 73

EL objetivo de estimar estos antecedentes de humedad corregidos para la zona de estudio, es incorporar estos en las proyecciones. La forma de incorporación corresponde a estudiar

previamente las precipitaciones proyectadas por el modelo GCM y estudiar para cada evento de precipitación la cantidad de agua llovida los 5 días previos, considerando si el evento se encuentra dentro de una estación crecimiento o inactiva.

## **4.2 Proceso de Calibración**

El proceso de calibración se realizó, a través del software de modelación hidrológica HEC-HMS, con el objetivo de encontrar los parámetros que permitan modelar los hidrogramas de crecidas en la cuenca de Butamalal en Butamalal.

Como se mencionó en capítulos anteriores, solo se disponía de 3 años con información para calibrar y validar, por lo que se opta por utilizar el periodo 2012 y 2013 para calibrar y el año 2014 para validar.

Respecto a la determinación de parámetros, hay que tener en cuenta que el modelo se divide en 4 aspectos principales, estos son:

- Modelación de Hidrogramas
- Infiltración
- Flujo Base
- Evaporación y evapotranspiración

La modelación hidrológica se realiza a través del método “SCS Hidrograma Unitario” el cual requiere antecedentes meteorológicos y el área de la cuenca, además de un parámetro a estimar, que es el tiempo de retardo o “lag time”.

Las infiltraciones se determinan mediante el método de la “Curva Número”. En particular, en el software HEC-HMS no es posible aplicarlo en forma continua, pues se adopta un único valor de la curva número. En consecuencia, se opta por hacer el análisis a través de eventos.

El método de la curva número se rige por dos parámetros principales que son la asignación de un coeficiente de curva número CN, y la abstracción inicial Ia. Aunque la literatura señala una correlación en el coeficiente de almacenamiento S y la abstracción inicial, en la calibración se opta por obtener esta correlación. Por otra parte, dentro de la metodología de la curva número hay que

tener presente los antecedentes de humedad, que generan un cambio tanto en la curva número como en la abstracción inicial.

Respecto a la estimación del flujo base se ocupa el método de recesión, que consta de 3 parámetros: El caudal inicial, la constante de recesión K y la razón al instante del máximo.

En cuanto a la evaporación ésta se considera despreciable debido a que cuando llueve las temperaturas en la zona no son elevadas, por lo que estas pérdidas no afectan de gran forma el hidrograma de crecidas.

#### **4.2.1 Etapas de Calibración**

Por lo anteriormente descrito, el programa para ejecutarse tiene como datos de entrada 6 parámetros, los que son: el tiempo de retardo, la curva número, la abstracción inicial, el caudal inicial, el coeficiente de recesión y el coeficiente de relación caudal base. Para la calibración se toman 24 eventos de precipitación. La metodología para escoger los eventos, se basa en tomar los más significativos en cuanto a la crecida que pueden formar. La modalidad de HEC-HMS permite hacer corridas de simulación y de optimización, en este caso, primero se simula y en base a la simulación se corre la optimización. La función objetivo de optimización busca minimizar el error cuadrático medio entre las diferencias de caudal al instante del máximo y el volumen de agua generada por la crecida. Cabe mencionar que este programa de optimización requiere como datos de entrada valores cercanos a los buscados. Esto implica que en una corrida de optimización no se encuentra siempre la mejor combinación de parámetros, sino que debe hacerse un proceso iterativo. Además para cada evento se considera la condición de humedad pertinente. Finalmente se corroboran las calibraciones para cada evento con tres índices de modelación hidrológica, que son: el Coeficiente  $r^2$ , el Índice de Nash-Sutcliffe y el Índice de Nash-Sutcliffe-Logarítmico. La Figura 4.12 muestra como ejemplo uno de los hidrogramas simulados durante la calibración; el resto de los gráficos de calibración se adjuntan en el Anexo B.1 de este trabajo.

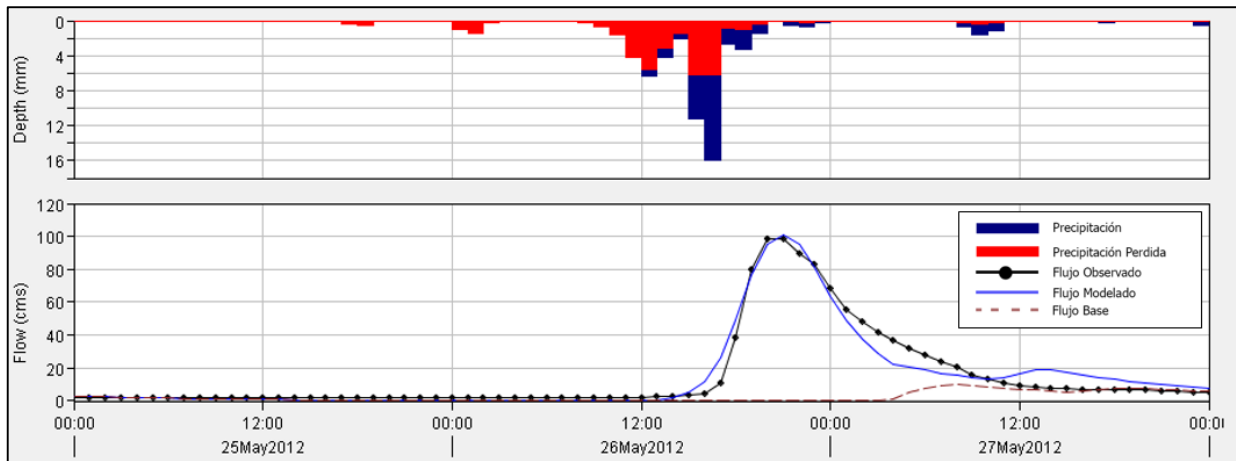


Figura 4.12 Calibración del evento 1, 25 de mayo del 2012

#### 4.2.2 Parámetros Calibrados

Los parámetros de calibración se muestran en la Tabla 4.14 para cada uno de los eventos. Donde, CN corresponde al valor de la curva número real que cumple la calibración. Luego, CNII corresponde a la curva número transportada dependiendo del antecedente de humedad del suelo, este se define previamente según los antecedentes de precipitación para posteriormente asignar un grupo, por lo tanto grupo representa el antecedente de humedad en el cual está ubicado el evento de precipitación. Finalmente, AMC indica según los antecedentes y fechas si el evento a analizar se encuentra dentro de una estación inactiva (con número 1) o una estación de crecimiento (con número 2).

Respecto a los coeficientes Coef\_R y Coef\_RU corresponden a los coeficientes que permiten modelar el comportamiento del flujo base.

Tabla 4.14 Parámetros de calibración por evento

	Fecha Inicio	Fecha Término	S [mm]	Ia [mm]	CN	CNII	T lag [min]	Coef_R	Coef_RU	Grupo	AMC
1	25-5-2012	28-5-2012	55.76	10.00	82	82	259	0.23	0.90	II	1
2	28-5-2012	1-6-2012	84.67	16.00	75	75	292	0.22	0.50	II	1
3	1-6-2012	3-6-2012	16.21	4.50	94	87	350	0.10	0.92	III	1
4	10-6-2012	19-6-2012	136.77	27.00	65	82	347	0.20	0.91	I	1
5	19-6-2012	27-6-2012	16.21	2.00	94	87	487	0.20	0.91	III	1
6	20-7-2012	23-7-2012	25.12	5.00	91	81	470	0.20	0.99	III	1
7	14-8-2012	19-8-2012	71.64	17.00	78	89	419	0.23	0.85	I	1
8	19-9-2012	24-9-2012	119.53	19.00	68	83	300	0.20	0.98	I	2
9	4-10-2012	10-10-2012	75.87	15.33	77	89	304	0.70	0.90	I	2
10	6-1-2013	8-1-2013	63.50	10.00	80	90	478	0.20	0.90	I	2
11	15-2-2013	17-2-2013	169.33	33.00	60	78	413	0.20	0.99	I	2
12	9-5-2013	11-5-2013	84.67	12.00	75	88	450	0.20	0.83	I	1
13	26-5-2013	30-5-2013	119.53	22.00	68	83	292	0.20	0.70	I	1
14	31-5-2013	4-6-2013	48.38	12.00	84	70	390	0.18	0.60	III	1
15	14-6-2013	17-6-2013	67.52	7.00	79	79	398	0.40	0.81	II	1
16	17-6-2013	19-6-2013	41.35	6.00	86	86	392	0.30	0.90	II	1
17	21-6-2013	24-6-2013	63.50	15.00	80	80	310	0.19	0.70	II	1
18	26-6-2013	30-6-2013	44.82	7.00	85	85	354	0.20	0.88	II	1
19	1-7-2013	7-7-2013	84.67	19.00	75	75	297	0.20	0.83	II	1
20	2-8-2013	6-8-2013	89.24	15.00	74	87	344	0.13	0.99	I	1
21	6-8-2013	10-8-2013	19.12	4.00	93	85	373	0.23	0.80	III	1
22	4-9-2013	8-9-2013	93.95	23.00	73	87	497	0.26	0.93	I	2
23	8-9-2013	11-9-2013	16.21	2.01	94	87	681	0.31	1.00	III	2
24	19-10-2013	21-10-2013	93.95	17.00	73	87	434	0.50	0.90	I	2

La Figura 4.14 muestra la relación entre la abstracción inicial y el coeficiente de almacenamiento. La relación es de 0.19 con una correlación de 0.9. Por otra parte se sabe que teóricamente esta relación es cercana a 0.2, lo que demuestra una buena relación entre la curva número y la abstracción inicial obtenidos de la calibración.

Los índices de modelación hidrológica que se obtienen al comparar lo caudales observados con lo modelados se ven reflejados para cada evento en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Índices de modelación hidrológica para eventos calibrados

Evento	Coef r2	Coef E(NS)	Coef Ln (E(NS) )
1	0.95	0.95	0.49
2	0.97	0.96	0.91
3	0.96	0.95	0.93
4	0.86	0.85	0.88
5	0.91	0.9	0.88
6	0.92	0.98	0.98
7	0.96	0.96	0.98
8	0.87	0.87	0.85
9	0.87	0.82	0.74
10	0.95	0.93	0.92
11	0.96	0.92	0.87
12	0.89	0.88	0.92
13	0.98	0.98	0.97
14	0.96	0.95	0.75
15	0.91	0.9	0.88
16	0.94	0.93	0.9
17	0.98	0.98	0.96
18	0.62	0.51	0.78
19	0.95	0.94	0.94
20	0.95	0.94	0.81
21	0.96	0.95	0.95
22	0.94	0.93	0.84
23	0.97	0.96	0.96
24	0.93	0.93	0.90
<b>Promedio</b>	0.92	0.91	0.87

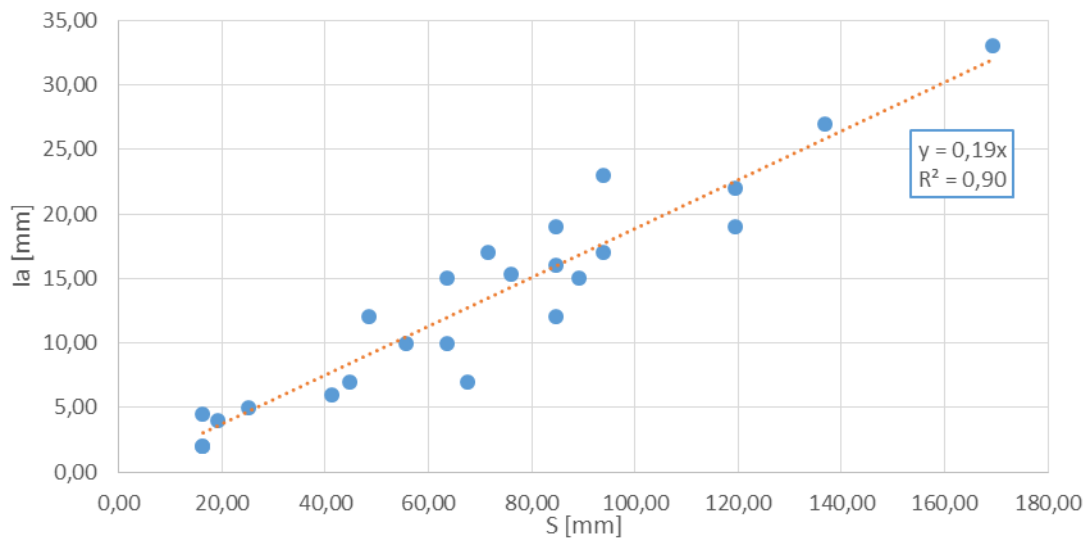


Figura 4.13 Relación entre coeficiente de almacenamiento y abstracción inicial.

Lo parámetros finales se obtienen como el promedio de los parámetros calibrados por eventos. Estos se resumen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Parámetros finales de la calibración efectuada.

<b>Parámetros</b>	
CN (II)	83
CN(I)	67
CN(III)	92
S (II)	52.02
S(I)	125.10
S(III)	22.09
Ia (II)	9.82
Ia(I)	23.61
Ia(III)	4.17
Lag Time [min]	389
Relación Umbral caudal base	0.9
Coefficiente de recesión	0.2

### 4.3 Proceso de Validación

El proceso de validación se efectúa en el software HEC-HMS. Este consiste en tomar los parámetros obtenidos de la calibración y hacer una simulación para cada evento seleccionado. En este caso se toman 14 eventos del año 2014. Al igual que en el proceso de calibración, se debe tener en cuenta los antecedentes de humedad para cada evento.

Respecto a los antecedentes de humedad se tienen 3 posibles curvas número, con 3 posibles abstracciones iniciales asociadas a cada curva número. De esta forma se debe analizar las precipitaciones previamente para saber a qué grupo de humedad pertenece cada evento. La Tabla 4.17 muestra la asignación de antecedentes de humedad previa a la simulación.

Mediante los índices de modelación ya descritos en capítulos anteriores, se verifica la veracidad de la calibración. La Tabla 4.17 muestra los índices hidrológicos de correlación para cada evento que se utiliza en la validación. Por otra parte la Figura 4.14 muestra como ejemplo el resultado final gráfico para la validación del evento de validación 13; el resto de los gráficos de validación se adjuntan en el Anexo B.2 de este trabajo.

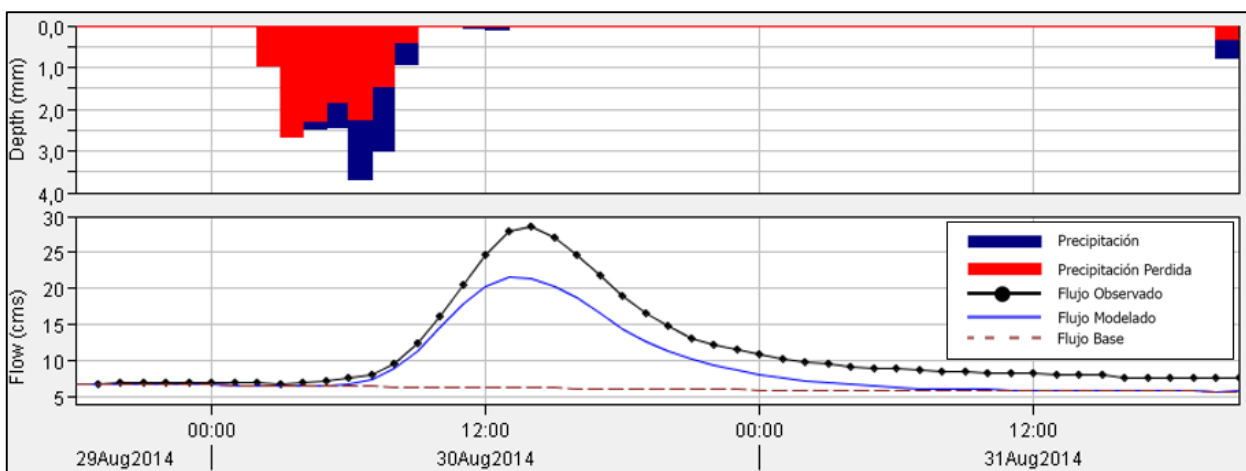


Figura 4.14 Validación evento 13, 29 de agosto del 2014

Tabla 4.17 Asignación de grupo de antecedente de humedad, e índices de modelación hidrológica para eventos de validación.

Evento	Fecha Inicio	Fecha Termino	AMC	Coef r2	Coef E(NS)	Coef Ln (E(NS) )
1	21/01/2014	24/01/2014	I	0.92	0.31	0.6
2	04/02/2014	06/02/2014	II	0.89	0.77	0.89
3	10/04/2014	13/04/2014	III	0.96	0.9	0.95
4	29/04/2014	02/05/2014	I	0.93	0.54	0.61
5	12/05/2014	18/05/2014	III	0.91	0.93	0.87
6	28/05/2014	31/05/2014	I	0.9	0.83	0.84
7	10/06/2014	14/06/2014	III	0.93	0.93	0.95
8	14/06/2014	18/06/2014	III	0.84	0.82	0.96
9	20/06/2014	26/06/2014	III	0.61	0.82	0.95
10	13/07/2014	20/07/2014	I	0.64	0.69	0.82
11	24/07/2014	30/07/2014	I	0.84	0.87	0.92
12	21/08/2014	23/08/2014	II	0.95	0.95	0.98
13	29/08/2014	31/08/2014	III	0.97	0.92	0.96
14	07/09/2014	17/09/2014	III	0.91	0.94	0.98
Promedio				0.87	0.8	0.88



# 5 Impacto de Cambio Climático

## 5.1 Proyecciones

### 5.1.1 Desagregación de Precipitaciones Horarias

Como se vio en los capítulos anteriores, las precipitaciones son proyectadas desde un modelo de circulación global, estas se encuentran a nivel diario. Por lo tanto, para hacer un análisis de crecidas es necesario desagregarlas a nivel horario. Como se discute en el capítulo 4, se usan arboles de decisión aplicadas a dos metodologías de desagregación que son los bloques alternados a través de la curva IDF y por otra parte mediante la utilización de distribución de Varas. La Figura 5.1 muestra los hietogramas para un mismo evento pero con diferentes distribuciones de precipitación.

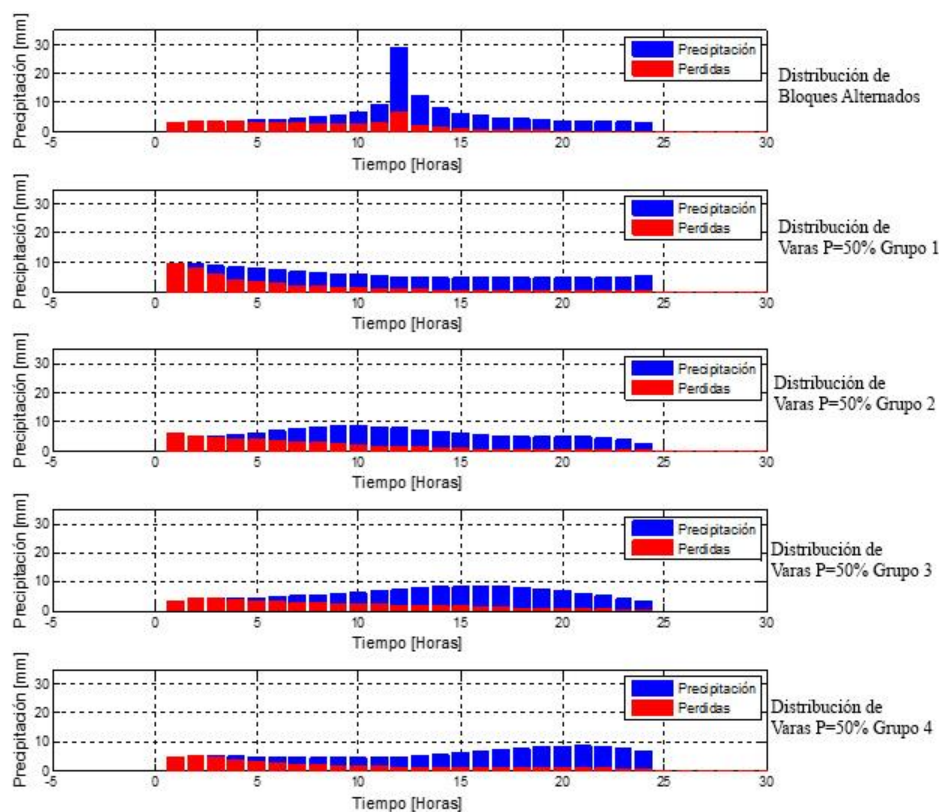


Figura 5.1 Hietogramas para precipitación de 144 [mm], duración 24 horas,  $CN = 83$  y  $AMC = 2$ , para distribución IDF con bloques alternados y distribuciones de Varas grupo 1 ,2 ,3 y 4 respectivamente con un periodo de retorno de Varas de un 50%.

Se debe tener en cuenta que cada uno de los grupos de Varas tiene 3 posibles formas, que dependen de una probabilidad de excedencia que asigna Varas para la desagregación. Por otra parte se tienen 3 modelos de proyecciones futuras de precipitaciones diarias, por lo que las proyecciones de las precipitaciones horarias para Varas son 12 en total.

### 5.1.2 Análisis de Frecuencia Precipitaciones Proyectadas

Inicialmente, se realiza un análisis de la precipitación máxima en 24 horas entre los años proyectados (2006-2065) y los años tomados como línea base (1977-2007). Como se muestra en las Figuras 5.2 y 5.3, el análisis se realiza para las 4 diferentes formas de segregación de precipitaciones que corresponden a la distribución mediante bloques alternados, y la distribución mediante varas, para probabilidad de excedencia de 10, 50 y 90%. Los resultados se resumen en la adjunta en el Anexo C.1. Como es la misma precipitación en todos los ensamble y solo varia la forma en que se distribuye la tormenta, no se deberían esperar variaciones, sin embargo existen pequeñas variaciones atribuibles al error que existe al aproximar las curva de varas mediante una parametrización polinómica. Cabe mencionar que el análisis de las Figuras 5.2 y 5.3 se hace para periodos de retorno de 10, 20 y 50 años.

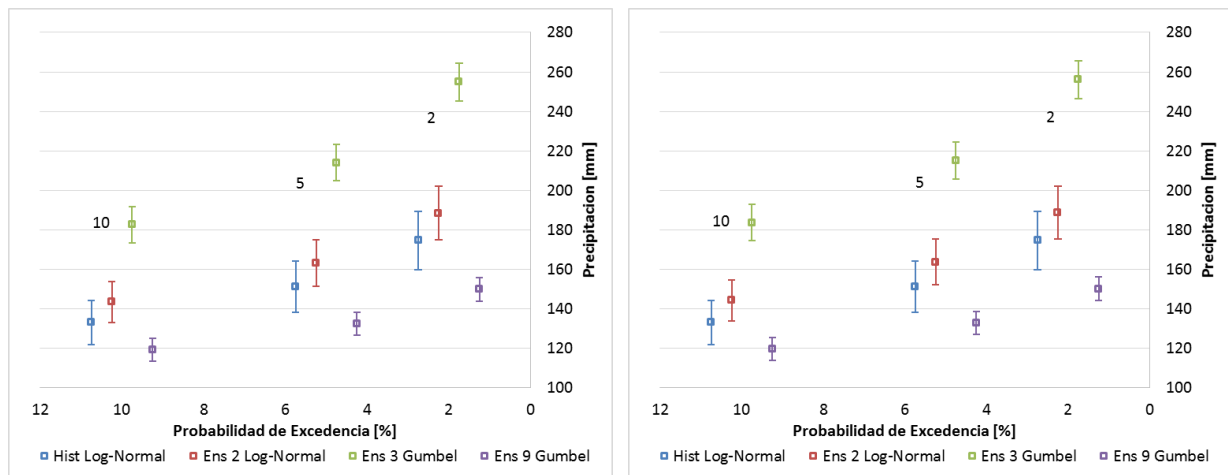


Figura 5.2 Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, línea base y *ensembles*. Distribución de bloques alternados (izquierda) y Varas 10% (Derecha).

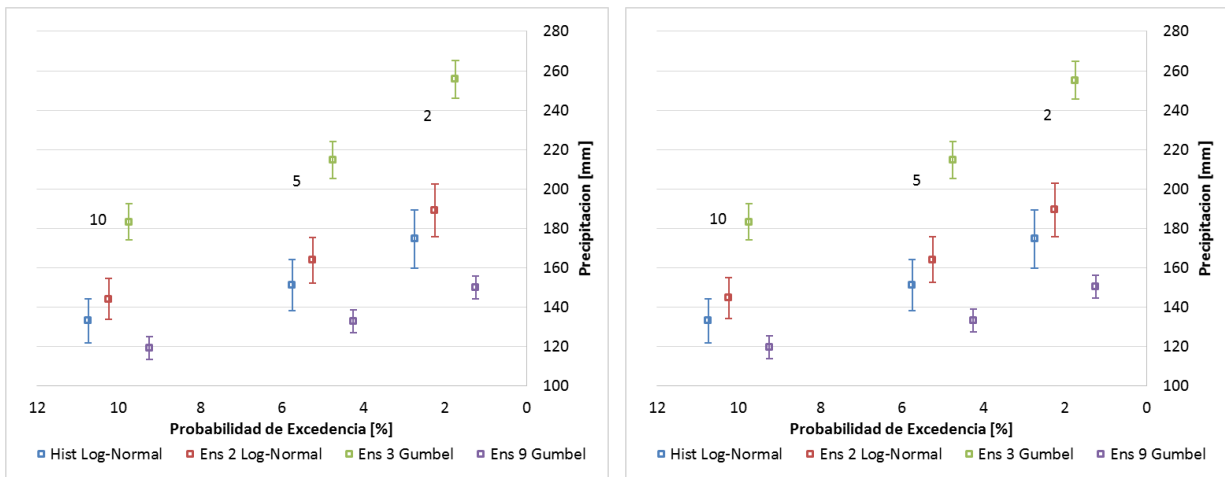


Figura 5.3 Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, línea base y *ensembles*. Distribución de Varas 50% (izquierda) y Varas 90% (Derecha).

### 5.1.3 Proyección de Caudales

#### 5.1.3.1 Generación de Hidrogramas Mediante Matlab

En el capítulo anterior se describen los procesos de calibración y validación efectuados mediante el software HEC-HMS. Sin embargo para las proyecciones futuras donde el rango de tiempo son 71 años, es inviable hacer un análisis evento por evento ya que se debe tener en cuenta que son 12 sets de datos.

Bajo estas limitantes, se opta por hacer un programa en la plataforma Matlab que permita analizar eventos continuos, a través de funciones que modelan hidrogramas, considerando el efecto de los antecedentes de humedad del suelo, característica que no permite HEC-HMS.

Para mostrar la validez del programa en Matlab, la Figura 5.4 muestra un evento cualquiera en el año 2040 para el *ensemble* 3 con la desagregación de Varas, donde se comparan el hidrograma generado por HEC-HMS y el hidrograma generado por Matlab. Por otra parte las Figuras 5.5 y 5.6 muestran la interfaz gráfica de ambos programas para la misma crecida.

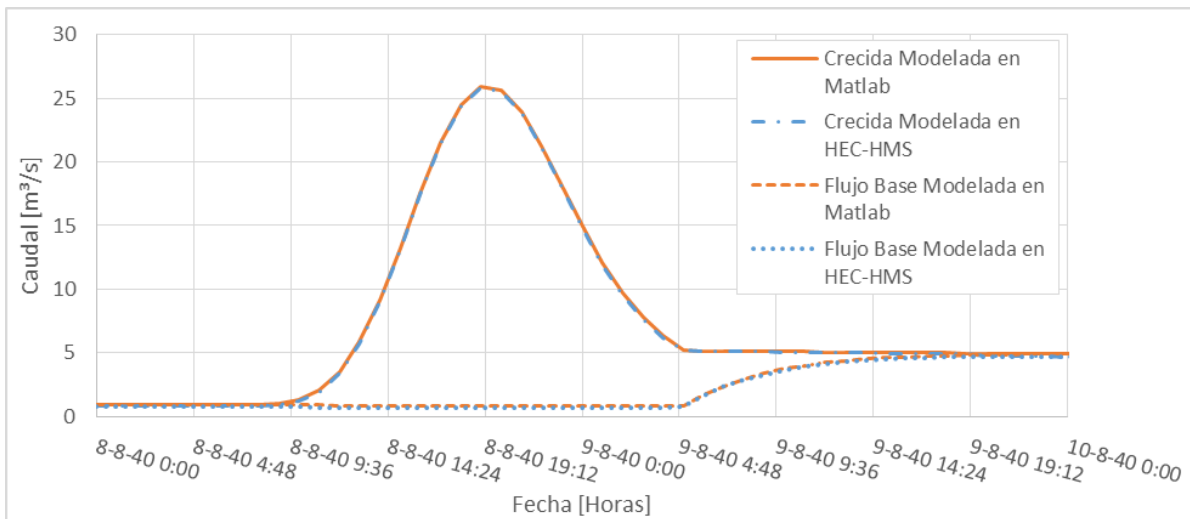


Figura 5.4 Gráfico comparativo entre el programa generado en HEC-HMS y el programa generado en Matlab.

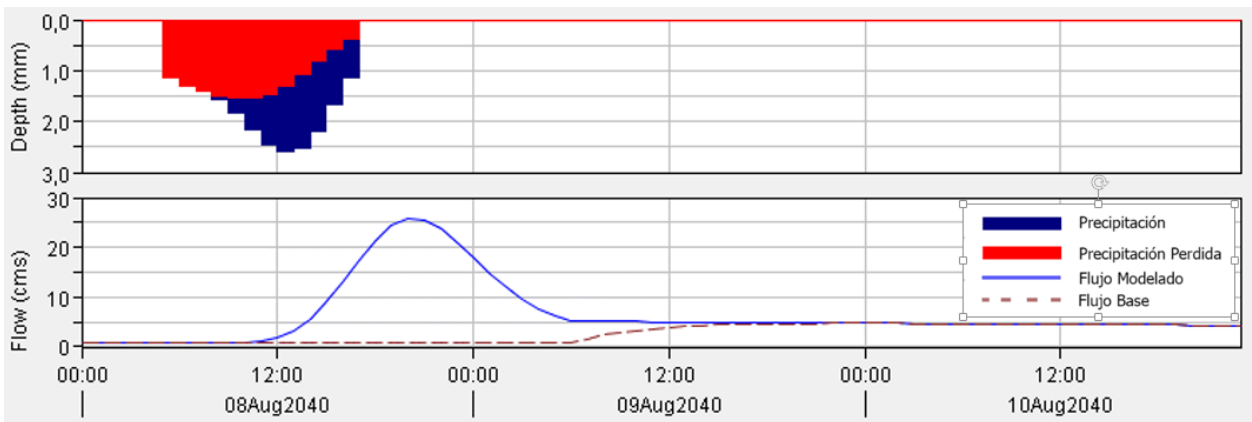


Figura 5.5 Interfaz generada en HEC-HMS para evento de precipitación del año 2040, bajo el *ensemble 3* y con desagregación de Varas grupo 3 y probabilidad de excedencia 50%.

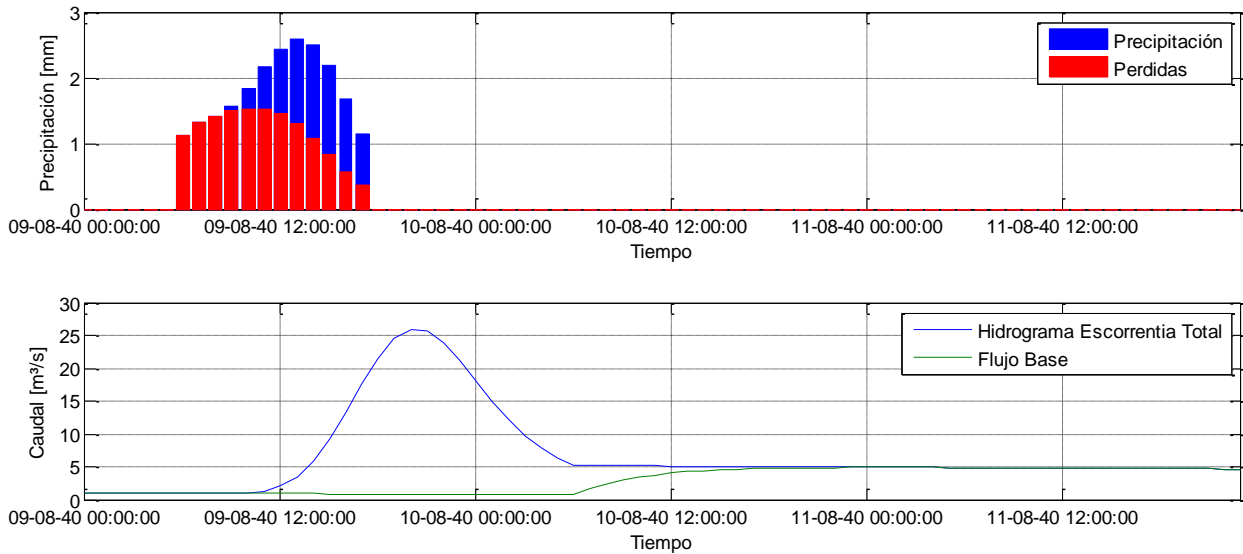


Figura 5.6 Interfaz generada en Matlab para evento de precipitación del año 2014, bajo el *ensemble 3* y con desagregación de Varas grupo 3 y probabilidad de excedencia 50%.

### 5.1.3.2 Generación Continua de Hidrogramas

Con el programa en Matlab se determinan los caudales a nivel horario. Esto se hace para los 3 *ensembles* con una distribución de precipitación de bloques alternados, como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.7. De igual forma se realiza esto para las distribuciones de precipitaciones de Varas asignando en cada una la probabilidad de excedencia de Varas, como se muestra en un ejemplo la Figura 5.8. En total se cuenta para cada año con 4 tipos de distribución de precipitaciones, además como son 3 modelos de proyecciones futuras, finalmente se tiene 12 proyecciones para cada año. El rango de proyección de caudales se realiza entre los años 2008 y 2065.

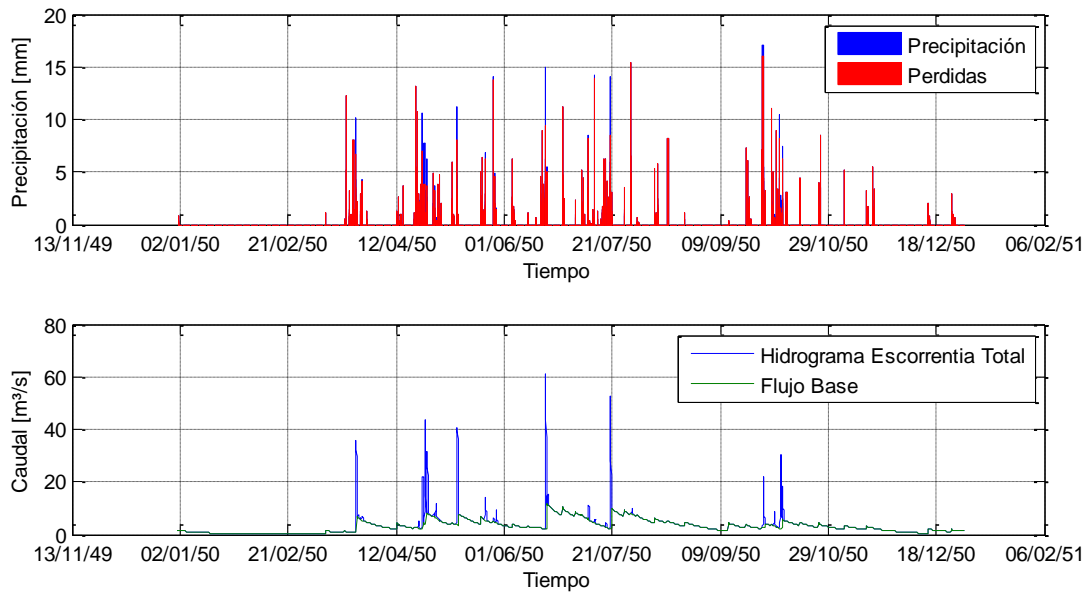


Figura 5.7 Hietograma e hidrogramas para el año 2050 según el modelo de distribución de precipitaciones de bloques alternados según curva IDF. *Ensemble 2.*

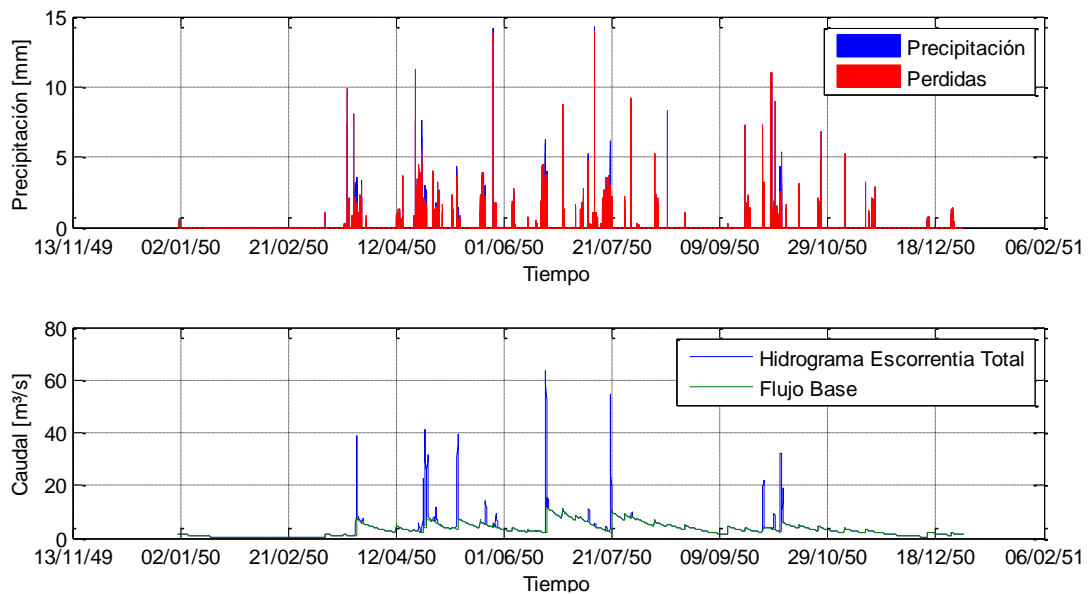


Figura 5.8 Hietograma e hidrogramas para el año 2050 según el modelo de distribución de precipitaciones de Varas para una probabilidad de excedencia de Varas del 50%. *Ensemble 2.*

Con esta herramienta, considerando que solo se tiene 15 años de registro para caudales y esto es una poca cantidad de datos para formar una línea base valida, se opta por hacer una simulación histórica de 31 años (1977 - 2007), con las precipitaciones diarias que fueron medidas en este periodo de tiempo. Cabe mencionar que en este caso se consideran los dos tipos de distribución de precipitaciones, generando así 4 escenarios de distribución de precipitaciones para cada año. La

Figura 5.9, muestra un ejemplo de una simulación mediante la metodología de bloques alternados, mientras que la Figura 5.10, enseña una simulación mediante la metodología de Varas.

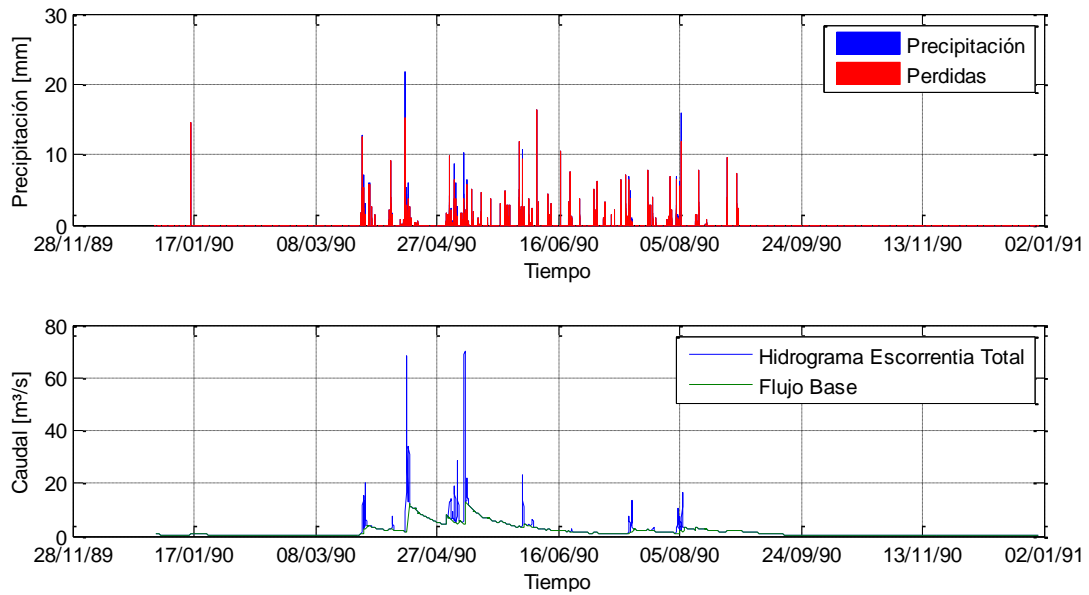


Figura 5.9 Hietograma e hidrogramas para generación en el año 1990 de línea base según el modelo de distribución de precipitaciones de bloques alternados según curva IDF.

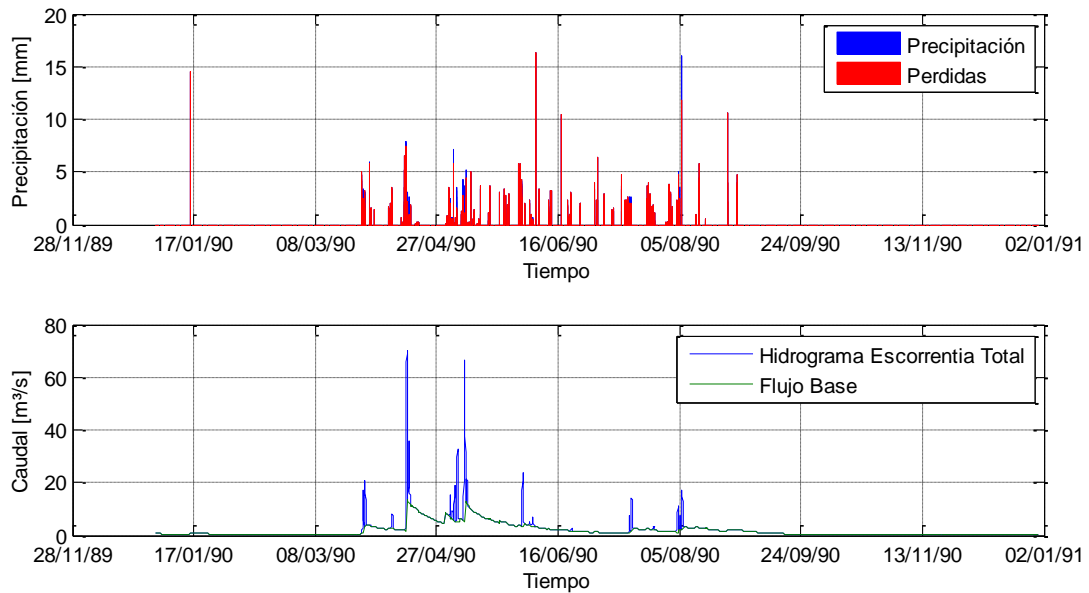


Figura 5.10 Hietograma e hidrogramas para generación en el año 1990 de línea base según el modelo de distribución de precipitaciones de Varas para una probabilidad de excedencia de Varas del 50%.

## 5.2 Análisis de Resultados

### 5.2.1 Análisis de Proyección de Precipitaciones

El análisis de precipitaciones corresponde al registro histórico medido y proyectado con isoyetas en la cuenca entre los años 1976 y 2007. Mientras que las proyecciones futuras corresponden a los *ensembles* entregados por el modelo de circulación global, *ensembles* 2, 3 y 9 que abarcan un periodo de tiempo entre los años 2006 y 2065.

De los 3 *ensembles* de proyecciones futuras, se realiza un análisis conjunto entre estos escenarios considerando para cada mes la precipitación mensual. De esta forma, se realiza un análisis de valores promedios, máximos y mínimos por mes para obtener así un rango de factibilidad para los 3 casos, como se muestra en la Figura 5.11. Además se le añade la precipitación promedio mensual de la línea base histórica.

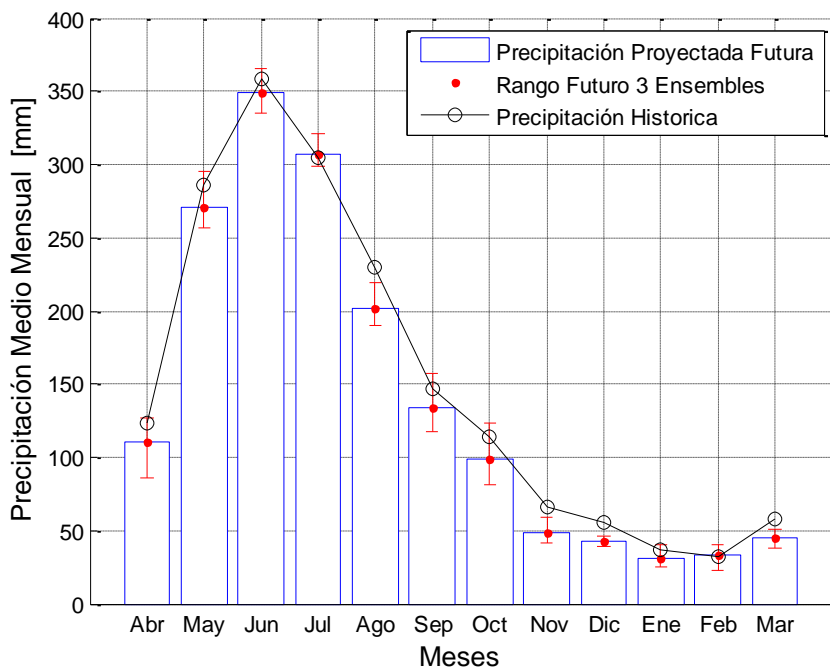


Figura 5.11 Diagrama de barras de precipitaciones mensuales, para los 3 *ensembles* futuros considerando valores promedios, máximos y mínimos.

Se observa en la Figura 5.11 que la dispersión es variable para cada mes, siendo en abril donde la amplitud es mayor, seguida por octubre, septiembre, agosto y mayo. Por otra parte diciembre es la que tiene una menor variabilidad, seguida por enero, marzo y febrero.



La precipitación mensual histórica promedio se encuentra por sobre la media proyectada futura en 10 de los 12 meses: abril, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y marzo. Además, si se analiza intervalo dado por los 3 *ensembles* futuros, se observa que en 4 de los 12 meses (agosto, noviembre, diciembre y marzo) el valor promedio histórico está por sobre el límite máximo proyectado. Luego, la precipitación medio mensual del registro histórico para 8 de los 12 meses está por debajo del máximo límite de las precipitaciones medio mensuales proyectadas futuras, y en ningún caso el registro histórico está por debajo del mínimo de las precipitaciones medias mensuales proyectadas futuras.

Resumiendo, el cambio climático provoca descensos significativos de las precipitaciones en algunos meses. Un análisis más específico de las precipitaciones y su comportamiento mensual debido al cambio climático, se realiza un análisis por separado para cada *ensemble*. En las Figuras 5.12 y 5.13 se muestra la precipitación promedio mensual para cada mes con los valores máximos y mínimos presentes en cada mes, esto se lleva a cabo para los 3 *ensembles* escogidos y el registro histórico

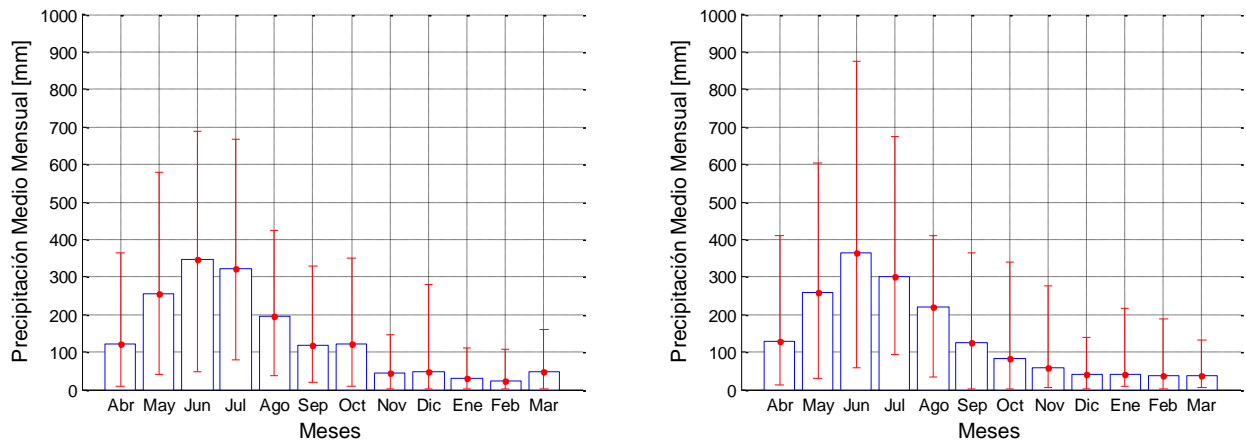


Figura 5.12 Precipitaciones medias mensuales distribuidas por mes, con sus máximos, mínimos y promedios mensuales (Izquierda *ensemble 2* y derecha *ensemble 3*).

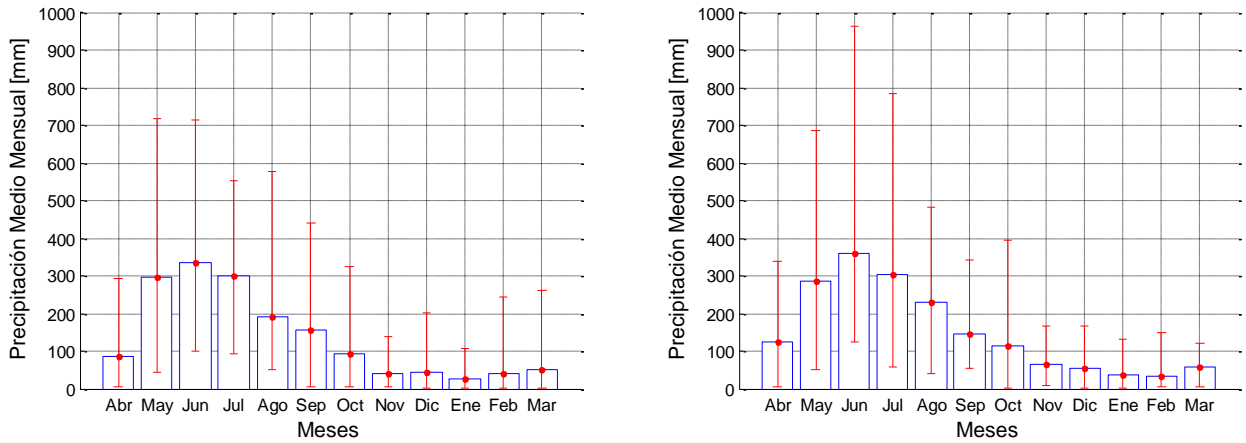


Figura 5.13 Precipitaciones medias mensuales distribuidas por mes, con sus máximos, mínimos y promedios mensuales (Izquierda *ensemble 9* y derecha línea base histórica).

El siguiente análisis corresponde a un conteo de magnitudes, que se ve reflejado en las Figura 5.14, donde, se consideran eventos separados en los cuales se observa la cantidad de días con precipitaciones según la magnitud de la precipitación. Mientras que, la Figura 5.15 muestra la ponderación por el total de eventos de precipitaciones registrados en cada *ensemble*, para así de esta forma hacer una comparación grafica en los diferentes escenarios.

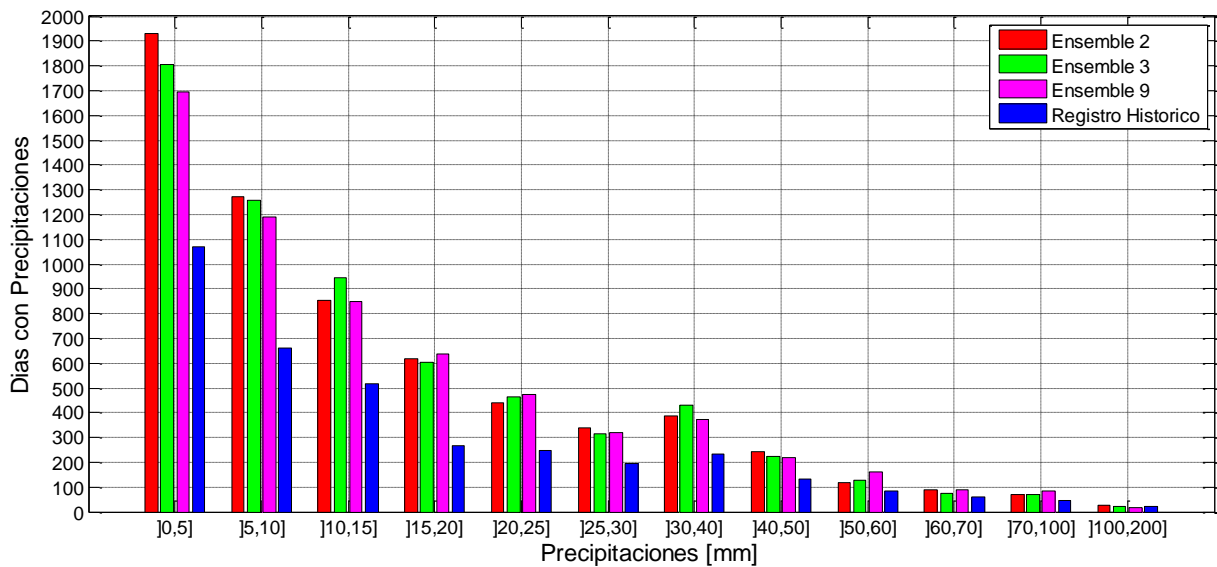


Figura 5.14 Histograma de días con precipitaciones según su magnitud.

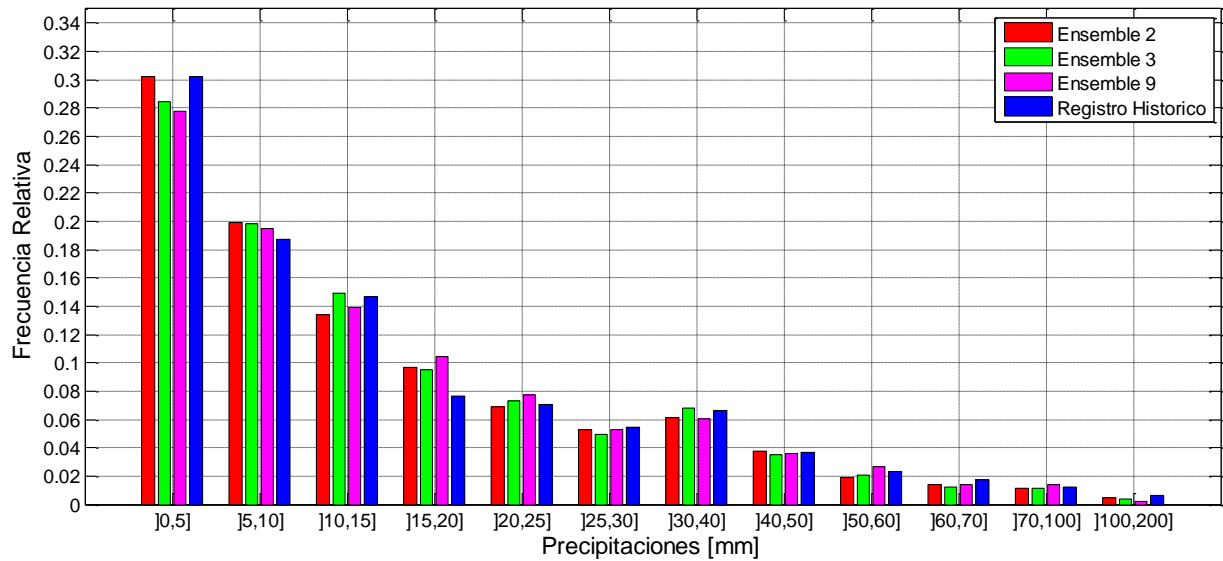


Figura 5.15 Histograma de frecuencia relativa de precipitaciones.

De este análisis se observa, que en cuanto a cómo se distribuyen porcentualmente los eventos según la magnitud de las precipitaciones, todos los *ensembles* tienen un comportamiento similar incluyendo el histórico. Sin embargo el *ensemble 2* es el que posee la mayor cantidad de eventos de precipitación, seguido por el *ensemble 3* y el *ensemble 9*. Por otra parte el *ensemble 3* es el que tiene la mayor cantidad de agua caída, seguido por el *ensemble 2* y finalmente el *ensemble 9*.

En las Tablas 5.1 y 5.2 se puede tener una apreciación más detallada respecto a cómo se distribuyen los eventos de precipitación según su magnitud, notando así que cuando se hace un análisis mediante frecuencias relativas, no se aprecian variaciones considerables entre los distintos *ensembles*. Por lo tanto, se puede inferir que a pesar de existir variaciones en la cantidad de eventos con precipitaciones en cada *ensemble* estas son casi despreciables, es así como hay una correspondencia en el comportamiento de los diferentes eventos.

Tabla 5.1 Cantidad de días con eventos de precipitación en un determinado rango para diferentes *ensembles*.

Precipitaciones [mm]						
	]0,5]	]5,10]	]10,15]	]15,20]	]20,25]	]25,30]
<i>Ensemble 2</i>	1932	1271	854	620	440	338
<i>Ensemble 3</i>	1807	1259	945	601	464	315
<i>Ensemble 9</i>	1696	1191	850	636	472	320
<b>Registro Histórico</b>	1068	663	517	269	248	194

Precipitaciones [mm]						
	]30,40]	]40,50]	]50,60]	]60,70]	]70,100]	]100,200]
<i>Ensemble 2</i>	389	241	119	87	71	28
<i>Ensemble 3</i>	430	224	129	76	72	24
<i>Ensemble 9</i>	371	220	161	87	85	15
<b>Registro Histórico</b>	235	130	83	61	44	21

Tabla 5.2 Frecuencia relativa respecto a la cantidad de días con eventos de precipitación y el total de días con eventos de precipitación, para determinados rangos, en diferentes *ensembles*.

Precipitaciones [mm]						
	]0,5]	]5,10]	]10,15]	]15,20]	]20,25]	]25,30]
<i>Ensemble 2</i>	0.302	0.199	0.134	0.097	0.069	0.053
<i>Ensemble 3</i>	0.285	0.198	0.149	0.095	0.073	0.050
<i>Ensemble 9</i>	0.278	0.195	0.139	0.104	0.077	0.052
<b>Registro Histórico</b>	0.302	0.188	0.146	0.076	0.070	0.055

Precipitaciones [mm]						
	]30,40]	]40,50]	]50,60]	]60,70]	]70,100]	]100,200]
<i>Ensemble 2</i>	0.061	0.038	0.019	0.014	0.011	0.004
<i>Ensemble 3</i>	0.068	0.035	0.020	0.012	0.011	0.004
<i>Ensemble 9</i>	0.061	0.036	0.026	0.014	0.014	0.002
<b>Registro Histórico</b>	0.067	0.037	0.023	0.017	0.012	0.006

### 5.2.2 Análisis de Proyección de Volúmenes

Con la proyección de caudales en un modelo continuo, es posible estimar el volumen total generado por los hidrogramas de escorrentía directa. Para un estudio completo se realiza un análisis de los volúmenes medios mensuales tanto para las proyecciones que se generan con una distribución de precipitaciones mediante el método de bloques alternados determinada por la curva IDF (Figura 5.16), y por la distribución de precipitaciones generada por el método de Varas (Figura 5.17). Hay que tomar en cuenta que en este análisis se consideraron los 3 *ensembles* de estudio, para así de esta forma estimar el promedio entre estos *ensembles* y el rango de factibilidad en el

que estos escenarios se encuentran. Además, se añade el registro histórico que fue simulado durante 30 años.

Por otra parte, para el caso de las generaciones de caudales usando la distribución de precipitaciones de Varas para el análisis del rango de factibilidad, además de usar los 3 *ensembles*, se tomaron en cuenta las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 90% de Varas para este rango de factibilidad. Del mismo modo la simulación histórica se llevó a cabo considerando estas 3 probabilidades de excedencia, por lo tanto para el análisis se considera un rango de volúmenes históricos según esta probabilidad.

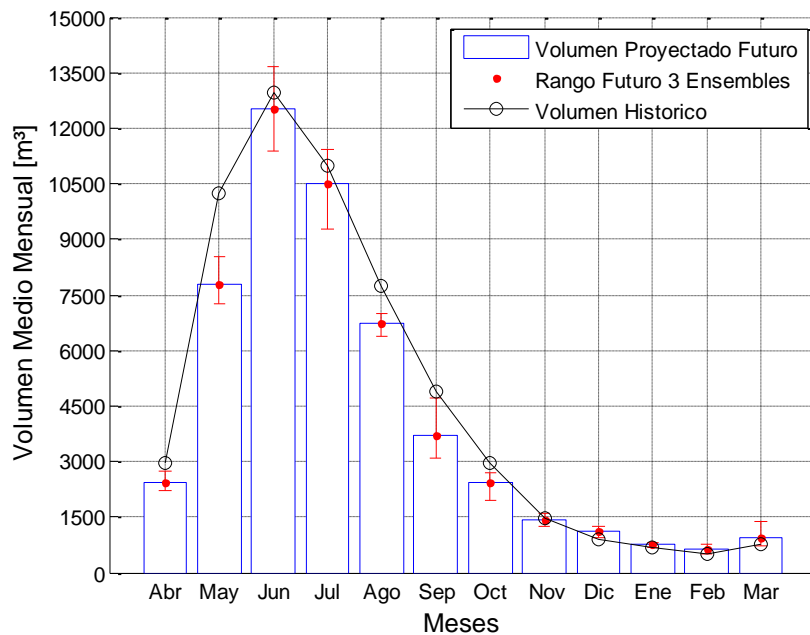


Figura 5.16 Diagrama de barras de volúmenes medios mensuales, para los 3 *ensembles* futuros considerando medios, máximos y mínimos, según la distribución de bloques alternados.

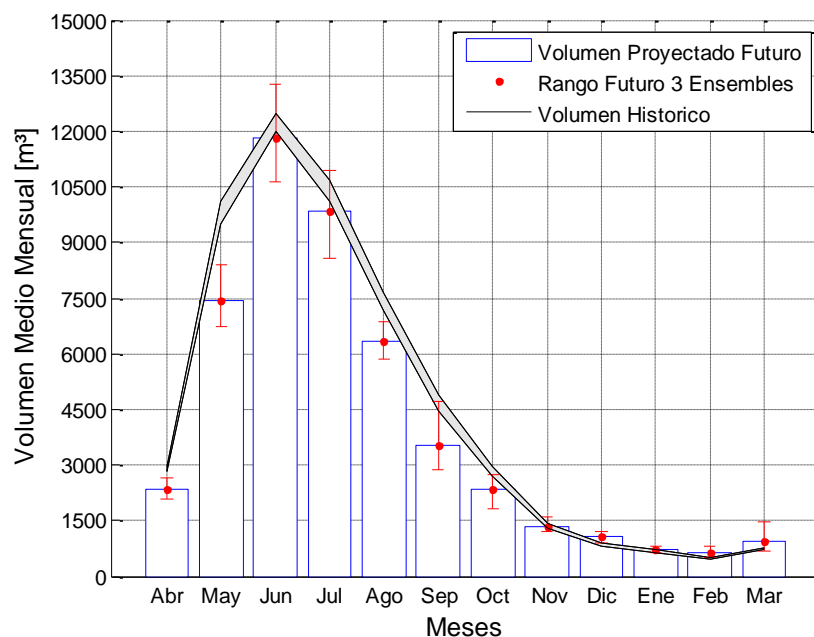


Figura 5.17 Diagrama de barras de volúmenes medios mensuales, para los 3 *ensembles* futuros considerando medios, máximos y mínimos, según la distribución de Varas.

De las Figuras 5.16 y 5.17 se puede observar que los volúmenes se concentran en las temporadas de otoño invierno, siendo en junio donde en ambos casos se concentran los mayores volúmenes y en febrero es donde se encuentran los menores volúmenes.

De las Tablas 5.3 y 5.4 se observa que para un análisis de la distribución de bloques alternados, el volumen medio mensual histórico se encuentra por sobre la media proyectada futura en 8 de los 12 meses. Mientras que para un análisis de la distribución de Varas, el rango del volumen medio mensual histórico se encuentra por sobre la media proyectada futura en 7 de los 12 meses. Además, si se analiza según el rango de factibilidad de los 3 *ensembles* futuros mediante distribución de bloques alternados, se observa que en 5 de los 12 meses el registro histórico está por sobre el límite máximo proyectado. Mientras que para un análisis de la distribución de Varas, el rango del volumen medio mensual histórico, se encuentra por sobre el límite máximo proyectado para 4 de los 12 meses.

Tabla 5.3 Volúmenes medios mensuales, para los 3 *ensembles* futuros considerando medios, máximos, mínimos y registro histórico, según la distribución de bloques alternados.

Volúmenes <i>Ensembles</i> 2, 3 y 9 [m <sup>3</sup> /s]						
	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>PROM</b>	2438	7801	12518	10525	6717	3715
<b>MIN</b>	2195	7242	11387	9291	6396	3105
<b>MAX</b>	2743	8535	13678	11427	7003	4698
	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>PROM</b>	2421	1412	1106	756	645	962
<b>MIN</b>	1931	1251	937	690	525	710
<b>MAX</b>	2711	1582	1230	807	767	1392
Volúmenes Históricos [m <sup>3</sup> /s]						
	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>Histórico</b>	2973	10263	12946	10975	7763	4905
	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>Histórico</b>	2956	1461	907	685	484	759

Tabla 5.4 Volúmenes medios mensuales, para los 3 *ensembles* futuros considerando medios, máximos, mínimos y registro histórico, según la distribución de Varas.

Volúmenes <i>Ensembles</i> 2, 3 y 9 [m <sup>3</sup> /s]						
	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>PROM</b>	2346	7453	11810	9865	6326	3547
<b>MIN</b>	2076	6751	10618	8593	5841	2867
<b>MAX</b>	2674	8413	13289	10951	6850	4697
	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>PROM</b>	2339	1358	1068	739	643	951
<b>MIN</b>	1833	1204	896	657	499	679
<b>MAX</b>	2724	1603	1196	803	817	1448
Volúmenes Históricos [m <sup>3</sup> /s]						
	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>Histórico Min</b>	2833	9474	11992	10119	7157	4463
<b>Histórico Max</b>	2951	10106	12489	10672	7675	4877
	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>Histórico Min</b>	2709	1308	823	624	443	727
<b>Histórico Max</b>	2942	1428	916	702	498	784

Por otra parte, se puede notar que la distribución medio mensual de los volúmenes entre las dos distribuciones no se encuentra mayormente afectada, por el tipo de desagregación de la precipitación. Sin embargo no así su magnitud, debido a que se observa que mediante una distribución de bloques alternados los volúmenes generados por la escorrentía directa son mayores que los generados por la distribución de Varas, hay una diferencia en los volúmenes del orden del

4%, para los meses de abril, mayo y noviembre, y de hasta un 6% para los meses de junio, julio y agosto. Mientras que para los meses de enero, febrero y marzo estas diferencias en los volúmenes son menores al 2%. Esto se atribuye en primera instancia a que la distribución de Varas se determina mediante el ajuste de una regresión polinómica, por lo que la parametrización a pesar de ser factible tiene un error acumulado a tener en cuenta. En segunda instancia se debe notar que como la distribución de precipitaciones es diferente, al buscar los antecedentes de humedad estos pueden variar generando cambios en la curva número lo que implica un cambio en la cantidad de agua infiltrada.

### **5.2.3 Análisis de Caudales Medios Mensuales**

Para el análisis de los caudales medios mensuales generados en la cuenca de Butamalal en Butamalal, se determinan las curvas de variación estacional producto de los caudales medios mensuales obteniéndose la Figura 5.18 para el método de bloques alternados bajo los *ensembles* 2, 3 y 9. En este caso se le añaden los máximos y mínimos para cada probabilidad, lo que genera un intervalo de confianza debido a las 3 proyecciones del modelo de cambio climático. Por otra parte se le añade conjuntamente la simulación histórica realizada mediante la misma metodología de bloques alternados.

Del mismo modo la Figura 5.19 representa la curva de variación estacional considerando las distribuciones de Varas para los *ensembles* 2, 3 y 9. Se incluye el valor promedio de las 3 proyecciones del modelo de cambio climático y los máximos y mínimos para cada probabilidad lo que genera un intervalo de confianza de la proyección. En forma similar en la Figura 5.19 se presenta la simulación histórica realizada mediante las distribuciones de Varas. En este caso se simuló considerando las distribuciones asociadas a las 3 probabilidades de excedencia (10, 50 y 90%), lo que genera el rango de incertidumbre de la estimación.



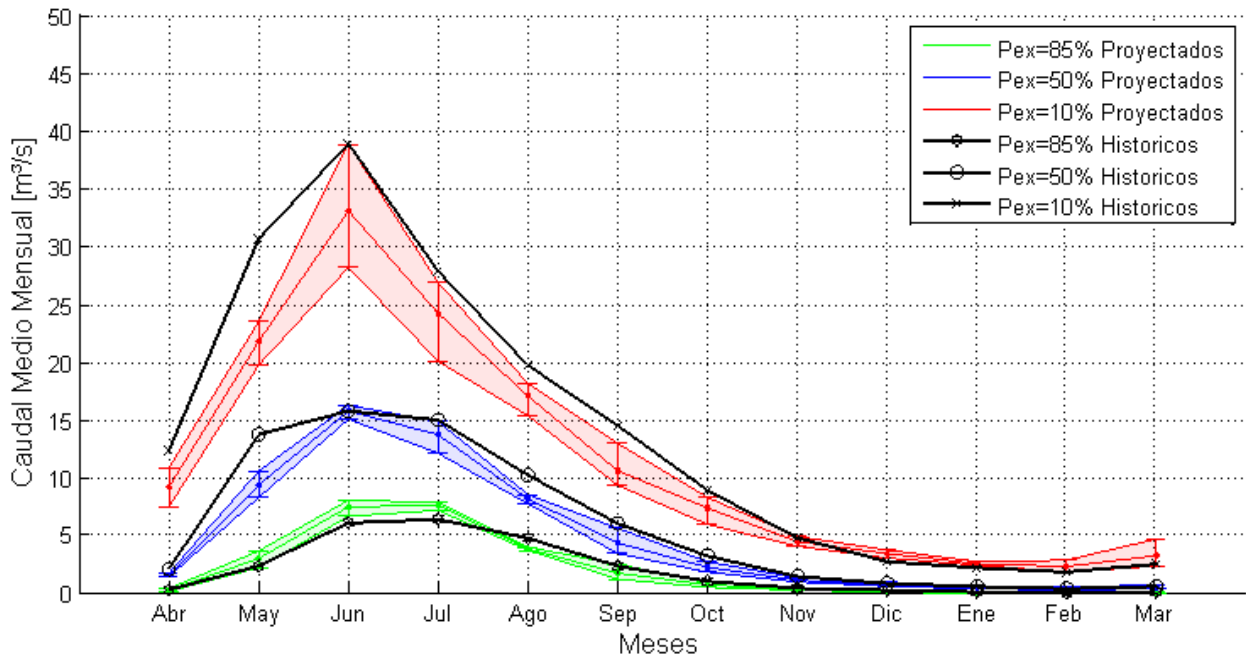


Figura 5.18: Curva de variación estacional con distribución de precipitaciones de bloques alternados

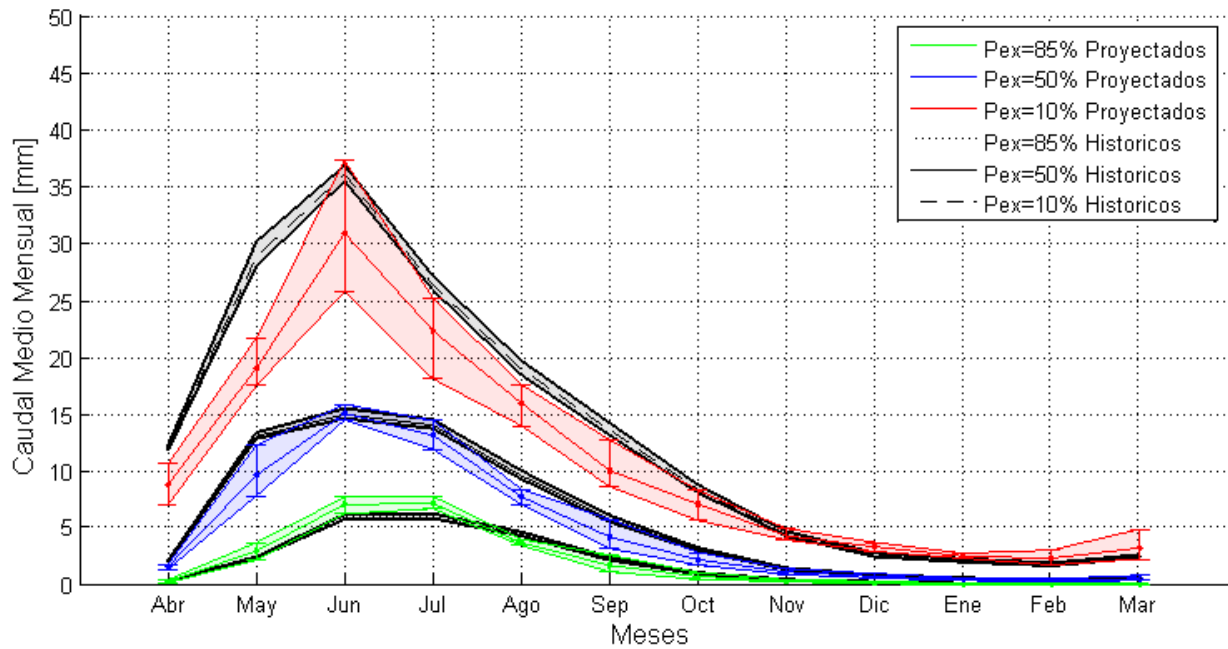


Figura 5.19 Curva de variación estacional con distribución de precipitaciones de Varas

A partir de ahora, cuando se nombra a la curva de variación estacional proyectada promedio, máxima o mínima de un determinado periodo de retorno, hace referencia al promedio, al máximo o al mínimo respectivamente, que es formado por los 3 *ensembles* del modelo de cambio climático.

Como se puede apreciar con mayor detalle en la Tabla 5.5, existe una variabilidad entre el aumento y disminución de los caudales medios mensuales para cada probabilidad de excedencia. Por ejemplo para una probabilidad de excedencia del 50% solo se observa disminución de los caudales entre 0.1 y 30%. Luego, entre abril y noviembre, para probabilidades de excedencia medias y bajas se aprecia que los caudales medios mensuales promedios proyectados son inferiores (-19%) a los históricos modelados, mientras que para probabilidades de excedencia bajas entre los meses de diciembre a marzo (época de estiaje) estos aumentan entre 15 a 28%. Por otra parte, para probabilidades de excedencia altas la variabilidad en el aumento y los descensos de caudales medios mensuales sigue una lógica diferente manifestando alzas entre mayo y julio de un 23%, agregándose además el mes de febrero con un incremento del 10%, mientras que el resto de los meses para probabilidades de excedencia alta presentan descensos en los caudales medios mensuales entre el 4% y el 36%.

Tabla 5.5 Resumen de variación de los caudales medios mensuales entre el registro histórico y las proyecciones realizadas mediante bloques alternados

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>85</b>	-4%	26%	23%	19%	-19%	-25%
<b>50</b>	-23%	-32%	0%	-8%	-20%	-27%
<b>10</b>	-25%	-29%	-15%	-13%	-13%	-27%
<b>Pex [%]</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>85</b>	-27%	-21%	-29%	-36%	10%	-31%
<b>50</b>	-30%	-21%	-12%	-17%	-2%	-12%
<b>10</b>	-17%	-6%	25%	15%	26%	28%

Mientras tanto, la Tabla 5.6 muestra que entre abril y noviembre para probabilidades de excedencia bajas, se observa que los caudales medios mensuales promedios proyectados son inferiores (-19%) a los históricos modelados, mientras que entre los meses de diciembre a marzo (época de estiaje) estos aumentan entre 17 a 29%. Posteriormente, para probabilidades de excedencia medias se aprecia en general una disminución de los caudales medios mensuales entre el 6 y 28%, con la excepción de los meses de junio y febrero que presentan pequeñas alzas menores al 2%. Finalmente los caudales medios mensuales asociados a probabilidades de excedencia altas presentan un aumento de los caudales entre mayo y julio (20%), incluyendo además el mes de febrero (12%), sin embargo para el resto de los meses se aprecia un descenso en los caudales entre el 1 y el 33%.

Tabla 5.6 Resumen de variación de los caudales medios mensuales entre el registro histórico y las proyecciones promediadas realizadas mediante Varas.

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>
<b>85</b>	-1%	23%	19%	19%	-17%	-24%
<b>50</b>	-22%	-26%	0%	-6%	-19%	-27%
<b>10</b>	-26%	-34%	-14%	-15%	-16%	-26%
<b>Pex [%]</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>85</b>	-25%	-18%	-26%	-33%	12%	-27%
<b>50</b>	-28%	-18%	-10%	-15%	1%	-11%
<b>10</b>	-15%	-3%	27%	17%	29%	28%

Realizando un análisis comparativo entre los caudales medios mensuales promedios que se generaron bajo la utilización de dos métodos de distribución de precipitaciones, se observa que hay un comportamiento similar en cuanto a la forma en que se distribuyen las curvas de variación estacional. Sin embargo, esto no es así en cuanto a la magnitud de los caudales, debido a que los caudales medios mensuales generados mediante la utilización de la metodología de bloques alternados para la generación de precipitaciones, muestran ser en promedio un 3% superior a los generados mediante la metodología de distribución de precipitaciones de Varas. Esto de alguna forma muestra la importancia de metodología a utilizar, al momento de generar una distribución de precipitaciones.

Del análisis efectuado, se puede notar una disminución de los caudales medios mensuales promedios en los meses de otoño a inicios de primavera para el promedio de *ensembles* del modelo de cambio climático, en comparación con el registro histórico simulado. Sin embargo, si se analizan los caudales medios mensuales máximos generados por las proyecciones de cambio climático, se observa que en el mes de junio, se presentan valores superiores o cercanos al valor histórico. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo se observa un alza de los caudales medios mensuales tanto para el promedio de *ensembles* del modelo de cambio climático como para los valores mínimos, en comparación con el registro histórico simulado.

#### **5.2.4 Análisis de Crecidas Orientado a la Distribución de Tormentas**

El estudio de análisis de crecidas que se presenta a continuación tiene como principal objetivo ver el impacto de la distribución de tormentas y como las condiciones de humedad produce efectos en la crecida. Por lo tanto, en este aspecto se utilizan los registros históricos y proyectados promedios, cabe mencionar, que en esta sección no se busca comparar el efecto del cambio

climático, sino más bien, se encuentra orientado a la distribución de tormentas para un posterior análisis de caudales máximos.

Para el análisis de crecidas se consideran variados aspectos, ya que como se ha mostrado durante este trabajo existen variados escenarios. El análisis de crecidas se divide en dos partes. Primero, se selecciona las precipitaciones máximas de duración 24 horas asociadas a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, Cabe mencionar que cada *ensemble* tiene una precipitación máxima de duración 24 horas diferente asociada al periodo de retorno, sin embargo para este análisis se tomó una precipitación intermedia entre las proyecciones. La segunda parte corresponde, en tomar los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, para luego encontrar la precipitación de duración 24 horas tal que desarrolle este caudal máximo. Al igual que en la primera parte cada *ensemble* tiene un caudal máximo diferente asociada al periodo de retorno, sin embargo para este análisis se tomó un caudal intermedio entre las proyecciones.

Por otra parte, la crecida también dependerá de cómo está distribuida la precipitación, es decir, mediante la metodología de desagregación de bloques alternados, o la metodología de desagregación de Varas. A su vez, Varas puede desagregarse mediante 4 grupos y cada grupo tiene 3 probabilidades de excedencia, 10%, 50% y 90%. Por lo tanto, son 12 distribuciones mediante Varas. Luego, como se están analizando 3 periodos de retorno (10, 20, 50 años) se tienen 39 escenarios. Sin embargo existe una variable muy importante que define la magnitud de la crecida, que es su antecedente de humedad, ya que como se ha señalado en capítulos anteriores los antecedentes de humedad impactan directamente en la capacidad de infiltración del suelo, y esto se ve reflejado en las magnitudes del hidrograma de esorrentía total. Luego, el análisis se lleva a cabo considerando 3 escenarios de antecedentes de humedad, lo que implica 117 escenarios.

Una de la de las consideraciones que se hace en el análisis, es tomar una tormenta de duración 24 horas para determinar el hidrograma. Se toma este valor para la duración debido a que el modelo para determinar duraciones probabilísticamente considera como máximo evento una tormenta de 24 horas. Luego de esta forma también se puede observar la distribución de precipitaciones y la influencia de los antecedentes de humedad.

#### **5.2.4.1 Crecidas Asociadas a Precipitaciones Máximas**

La precipitación máxima se determina a través de la ecuación que da como resultado al parametrizar la curva IDF, de tal forma que satisfaga los criterios de periodo de retorno y duración del evento.

Como se explicó anteriormente para este caso se analizan 117 escenarios de crecidas. La forma de presentarlos gráficamente corresponde a mostrar para cada distribución de precipitaciones 3 escenarios puestos paralelamente según su antecedente de humedad. Donde, cada gráfico contiene además el hidrograma de crecida asociado a su periodo de retorno, como se observa en la Figura 5.20.

En la Figura 5.20 se presentan los hidrogramas de crecidas asociados a precipitación diaria máxima de períodos de retorno 10, 20 y 50 años para la distribución de bloques alternados (resumen Tabla 5.7) y en las Figuras 5.21 a 5.24 para los 4 grupos de distribución de Varas con probabilidad de excedencia del 50% (resumen Tablas 5.8 a 5.11) . En el Anexo C.4 se encuentran los hidrogramas de crecidas para las otras probabilidades de excedencia de Varas.

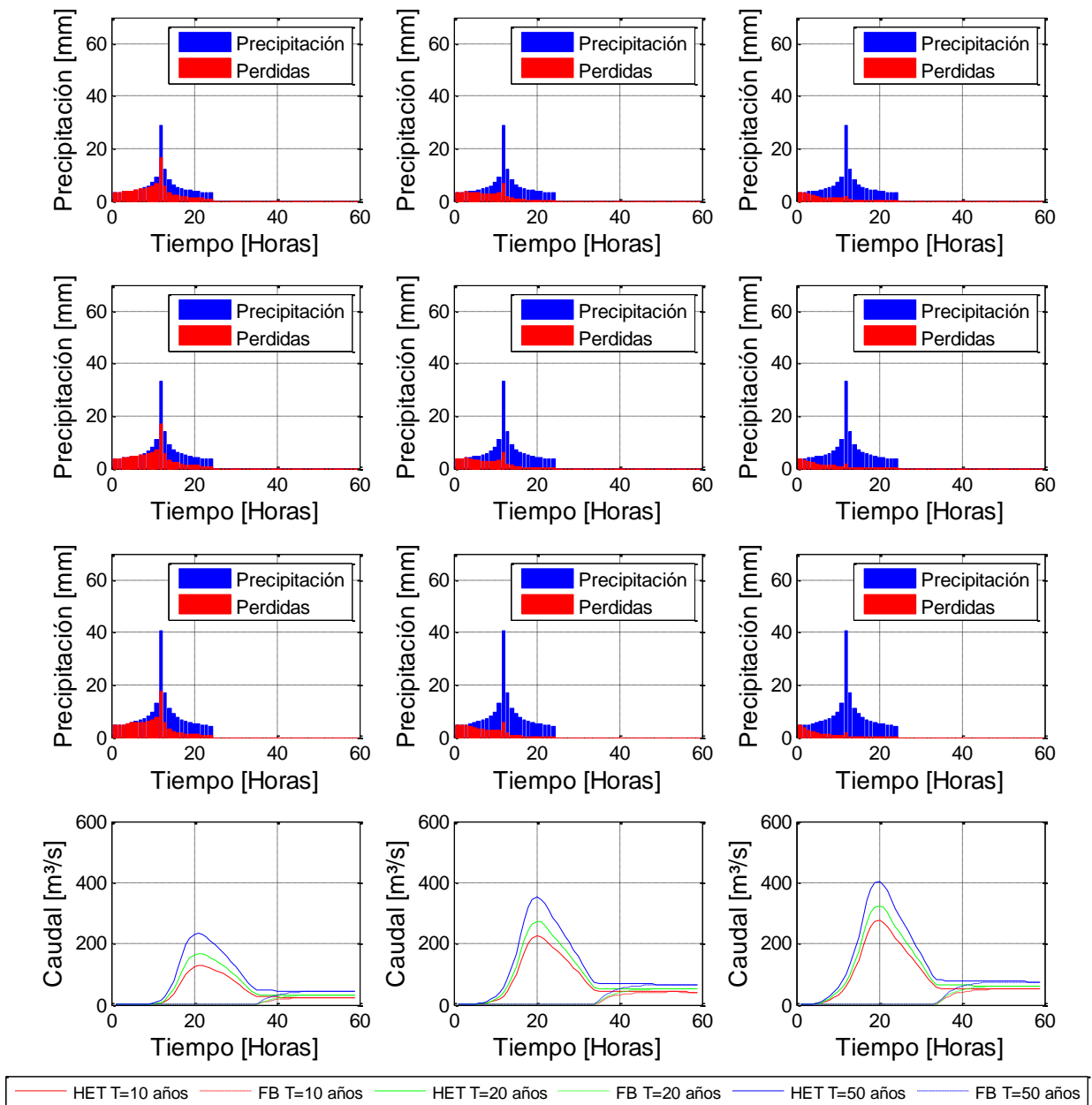


Figura 5.20 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados. Condiciones de humedad AMC1 (izquierda), AMC2 (centro) y AMC3 (derecha)

Tabla 5.7: Caudales máximos instantáneos asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados, y 3 condiciones de humedad

T	Precipitación	Qmax AMC 1	Qmax AMC 2	Qmax AMC 3
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	144	128	168	235
20	167	223	273	350
50	203	274	324	402

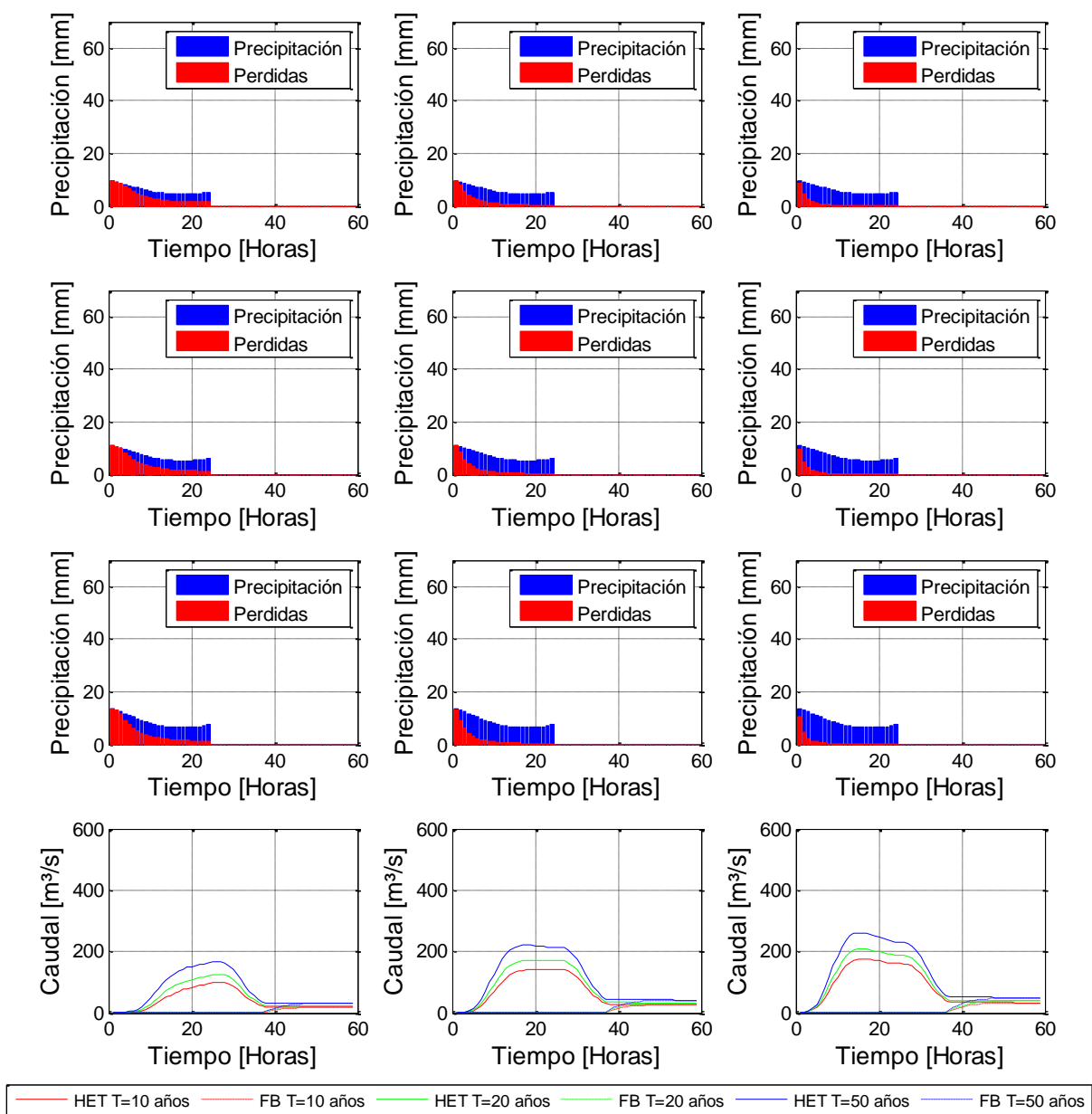


Figura 5.21 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.8: Caudales máximos instantáneos asociados a Precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 50% y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 1	Qmax AMC 2 Grupo 1	Qmax AMC 3 Grupo 1
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	144	100	143	176
20	167	126	171	209
50	203	168	220	261

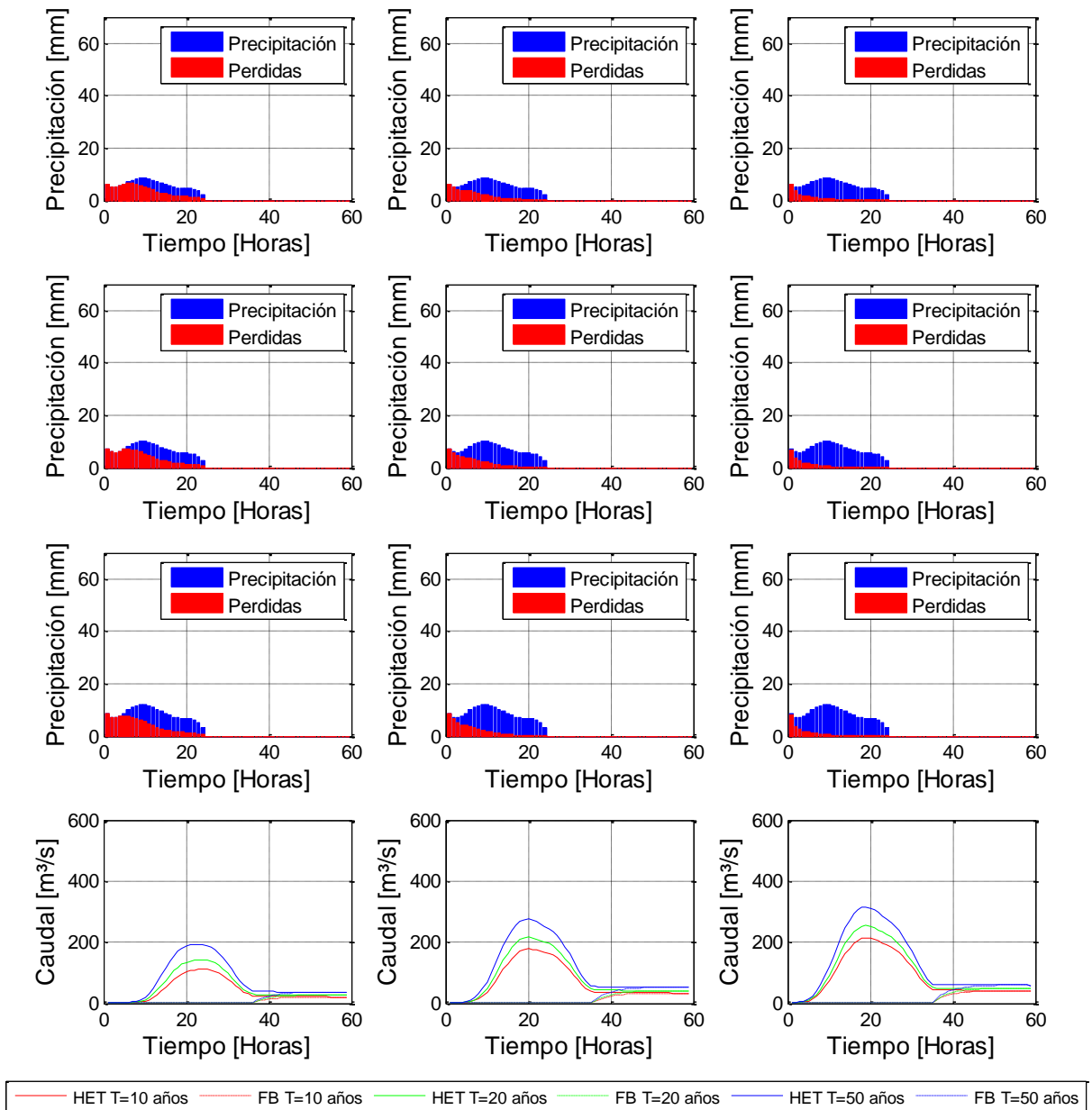


Figura 5.22 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.9 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 2	Qmax AMC 2 Grupo 2	Qmax AMC 3 Grupo 2
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	144	110	177	215
20	167	141	215	254
50	203	193	275	315



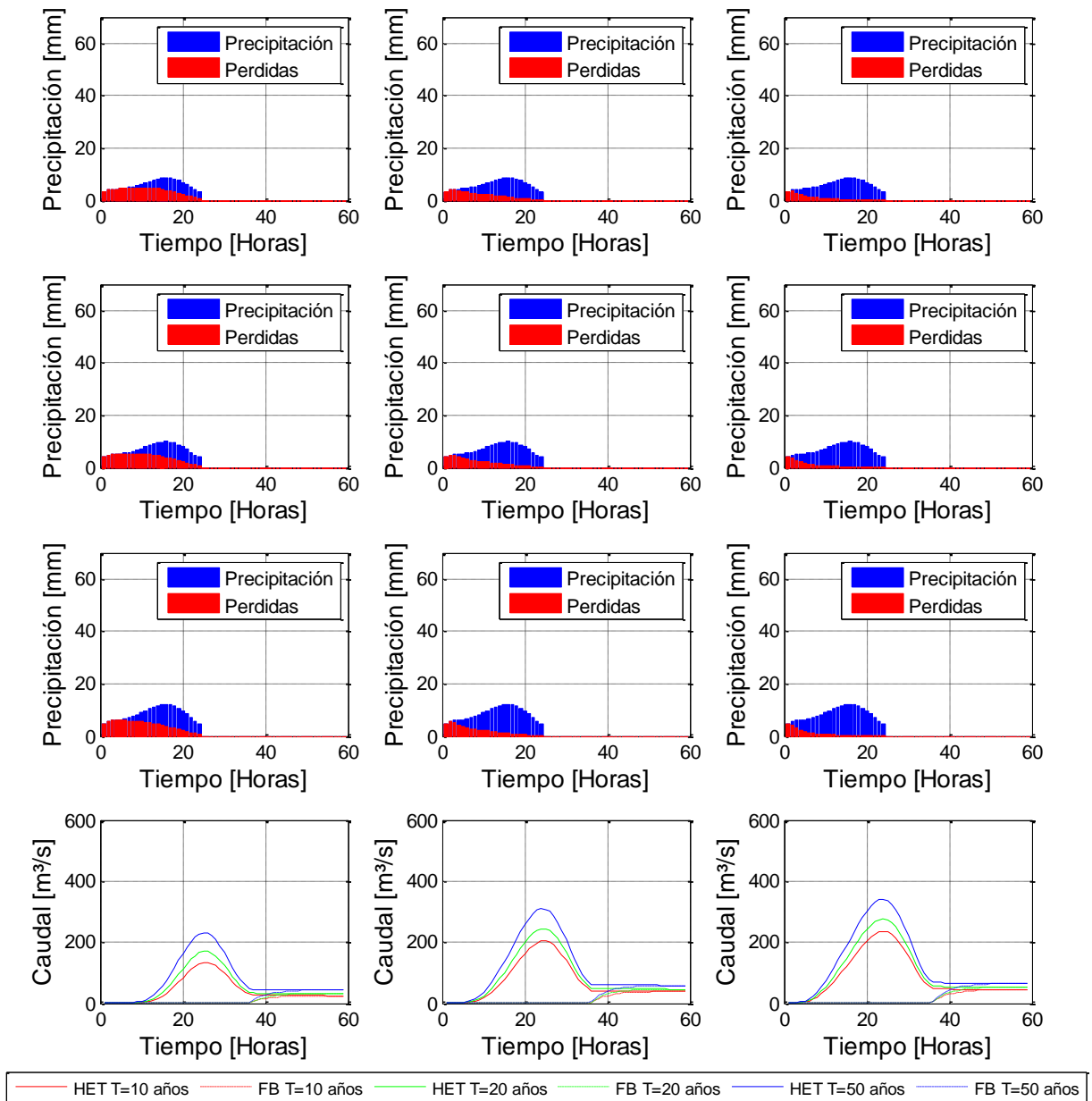


Figura 5.23 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.10 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T [años]	Precipitación [mm]	Qmax AMC 1 Grupo 3 [m³/s]	Qmax AMC 2 Grupo 3 [m³/s]	Qmax AMC 3 Grupo 3 [m³/s]
10	144	133	203	235
20	167	169	244	276
50	203	229	309	340

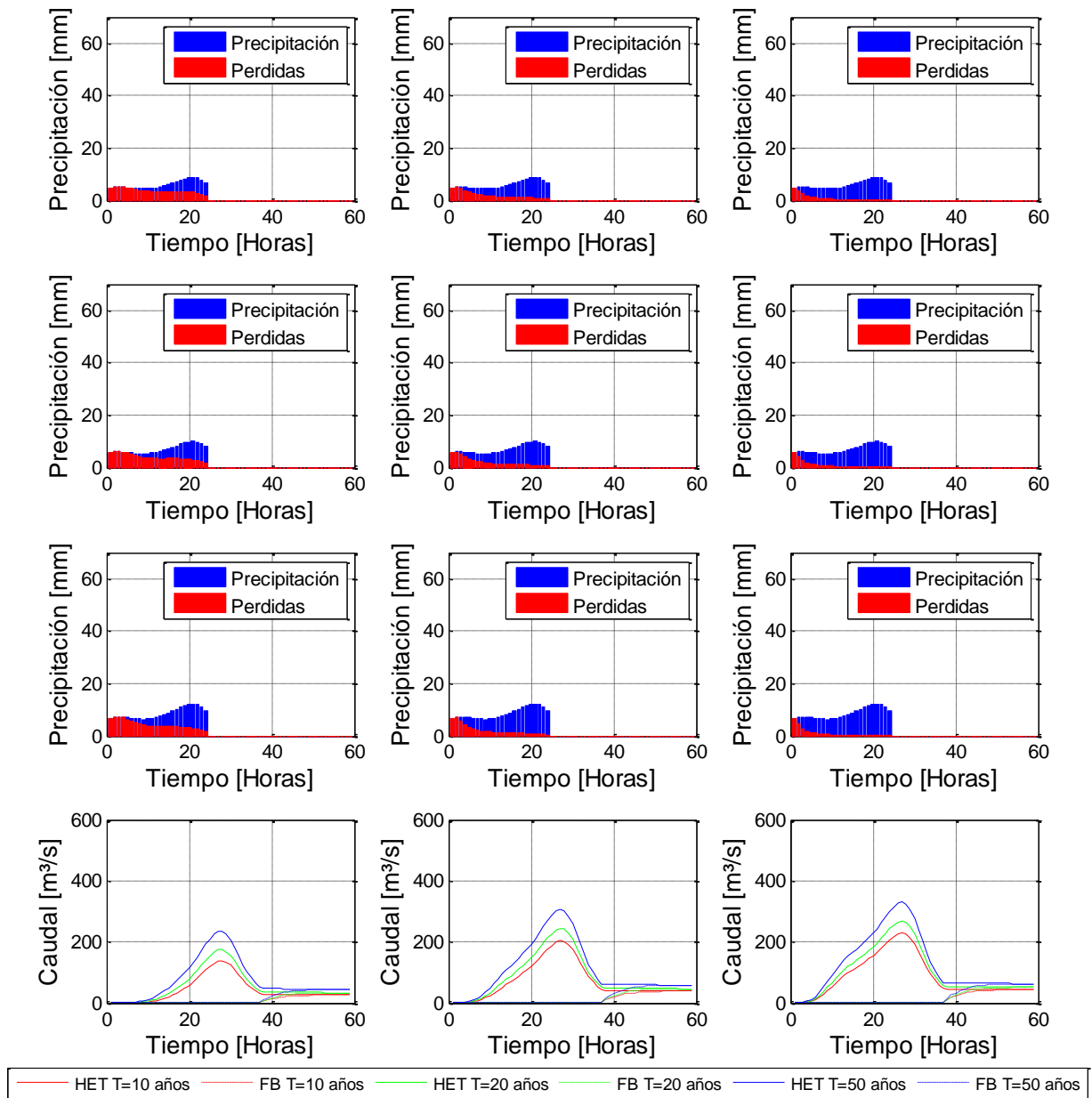


Figura 5.24 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 50%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.11 Resumen de crecidas mediante distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 50%, para 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 4	Qmax AMC 2 Grupo 4	Qmax AMC 3 Grupo 4
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	144	138	204	230
20	167	175	244	269
50	203	235	306	330

De las Figuras 5.20 a la 5.24, se aprecia que para una misma precipitación la condición de humedad afecta notoriamente el desarrollo del hidrograma tanto en magnitud como en su forma. En la Figura 5.25 se resumen los caudales máximos de crecida, bajo todas las distribuciones de precipitación estudiadas. Para un periodo de retorno de 10 años, se observa que, independiente de la condición de humedad, la distribución del grupo 4 de Varas con una probabilidad de excedencia del 10%, genera el hidrograma con mayor caudal máximo. Por otra parte, el menor valor de caudal máximo ocurre para una condición baja de humedad, con la distribución del grupo 1 de Varas con una probabilidad de excedencia del 90%; para las condiciones de humedad media y alta, el menor valor de caudal máximo está dado por la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%.

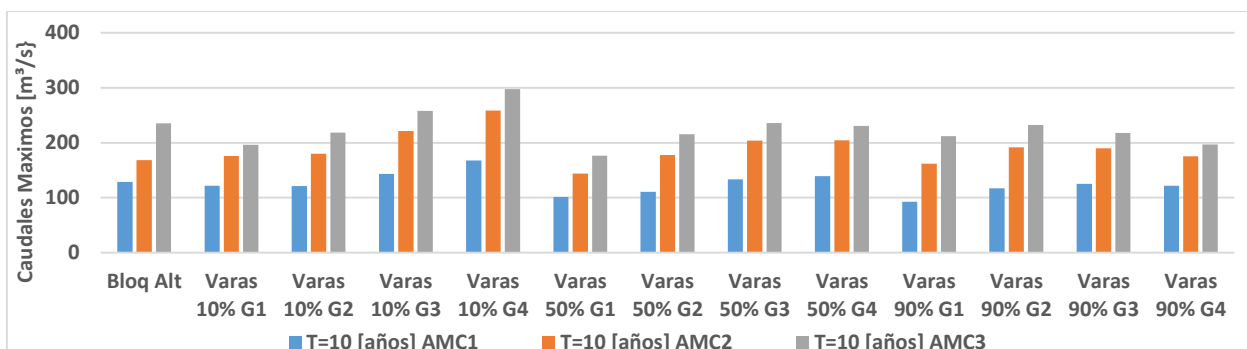


Figura 5.25 Diagrama de barras de caudales máximos instantáneos para todos los escenarios simulados a base de Precipitación asociada a periodo de retorno 10 años

De manera similar, en las Figuras 5.26 y 5.27 se presentan los caudales máximos instantáneos obtenidos a base de la precipitación asociada a los períodos de retorno de 20 y 50 años.

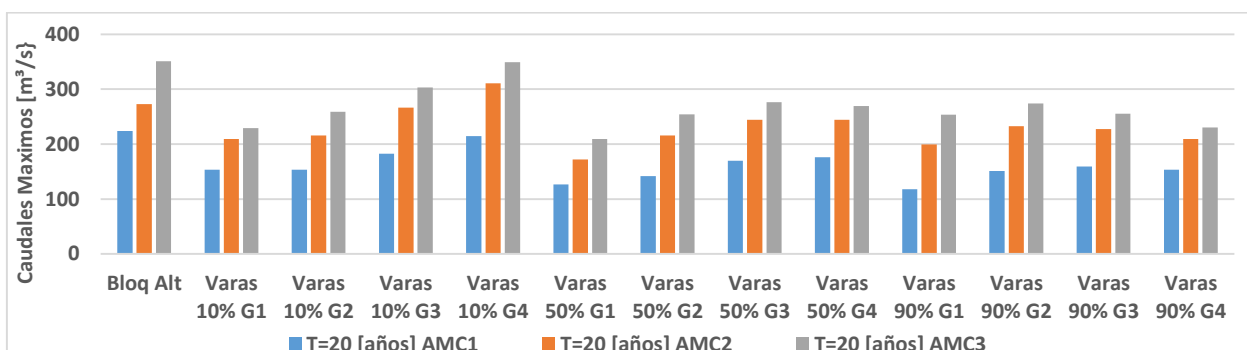


Figura 5.26 Diagrama de barras de caudales máximos para todos los escenarios, periodo de retorno 20 años

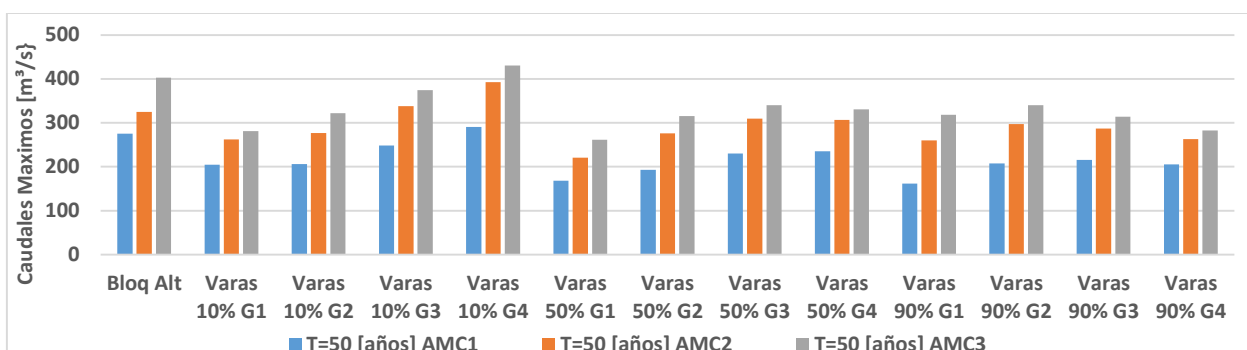


Figura 5.27 Diagrama de barras de caudales máximos para todos los escenarios, periodo de retorno 50 años

De la Figura 5.26 se observa que para un periodo de retorno de 20 años, en condiciones de humedad baja y alta, el hidrograma que genera el caudal máximo de crecida es al distribuir la precipitación según bloques alternados. Para una condición de humedad media, el máximo caudal de crecida ocurre con la distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 10% al igual que para el período de retorno 10 años. Igualmente, el menor valor de caudal máximo para una condición baja de humedad, está dado por la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 90% mientras que para una condición de humedad media y alta, el menor valor de caudal máximo está dado por la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%.

Del mismo modo, en la Figura 5.27 se confirma que para un periodo de retorno de 50 años el hidrograma que genera el caudal máximo de crecida, independiente de la condición de humedad es generado por la precipitación distribuidas según el grupo 4 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%. Al igual que para T=10 años, el menor valor de caudal máximo para una condición baja de humedad, está dado por la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 90% mientras que para una condición de humedad media y alta, esto ocurre cuando la precipitación se distribuye según el grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%.

#### 5.2.4.2 Crecidas Asociadas a Caudales Máximos

Los caudales máximos horarios se determinaron para periodos de retorno de 10, 20 y 50 años mediante los análisis de frecuencia efectuados a las series anuales de máximos (Esto se aborda con mayor detalle en la sección 5.2.4 Análisis de proyección de caudales máximos). En el análisis de frecuencia de cada distribución se tiene un intervalo de confianza, por lo que se toma un caudal

dentro de este rango y se procede a buscar las precipitaciones tal que satisfagan el caudal máximo buscado. Los caudales se obtienen al tomar los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, para luego encontrar la precipitación de duración 24 horas tal que desarrolle este caudal máximo. En estricto rigor cada *ensemble* tiene un caudal máximo diferente asociada al periodo de retorno, sin embargo para este análisis se tomó un caudal promedio entre las proyecciones, como se muestra en la Tabla 5.12. Se observa además, que para los periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, el caudal máximo es mayor con la distribución de bloques alternados. Mientras que el menor caudal máximo para estos mismos periodos de retorno corresponde a la distribución de precipitación de Varas asociada a una probabilidad de excedencia del 50%.

Como se explica anteriormente, en este caso se analizan 117 escenarios de crecidas. La forma de presentarlos gráficamente corresponde en mostrar para cada caudal asociado a un periodo de retorno, su distribución de precipitación respectiva. Esto se aplica para 3 escenarios puestos paralelamente según su antecedente de humedad como se observa en la Figura 5.28.

Tabla 5.12 Resumen de caudales máximos horarios por escenario, para 3 periodos de retorno (10, 20 y 50 años) y 4 distribuciones de precipitaciones.

<b>T</b> [Años]	<b>Hist</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>Ens 2</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>Ens 3</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>Ens 9</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>Promedio</b> [m <sup>3</sup> /s]
<b>Bloques Alternados</b>					
<b>10</b>	334	307	398	214	313
<b>20</b>	399	363	483	243	372
<b>50</b>	483	435	592	280	448
<b>Varas P=10%</b>					
<b>10</b>	315	295	388	211	302
<b>20</b>	370	351	467	229	354
<b>50</b>	442	426	569	250	422
<b>Varas P=50%</b>					
<b>10</b>	289	273	362	197	280
<b>20</b>	339	324	436	214	328
<b>50</b>	404	392	531	233	390
<b>Varas P=90%</b>					
<b>10</b>	294	273	364	198	282
<b>20</b>	346	324	439	216	331
<b>50</b>	414	394	535	236	395

A continuación, se presentan los hidrogramas de crecidas para la distribución de precipitación de bloques alternados en la Figura 5.28 y en las Figuras 5.29 a 5.32 para cada grupo de distribución de precipitaciones según Varas con probabilidad de excedencia del 50%. En el Anexo C.5 se encuentran los hidrogramas de crecidas para las otras probabilidades de excedencia

de Varas. Por otra parte las Tablas 5.13 a 5.17 muestran los caudales máximos promedio para cada escenario considerando sus antecedentes de humedad y distribución de precipitación posible.

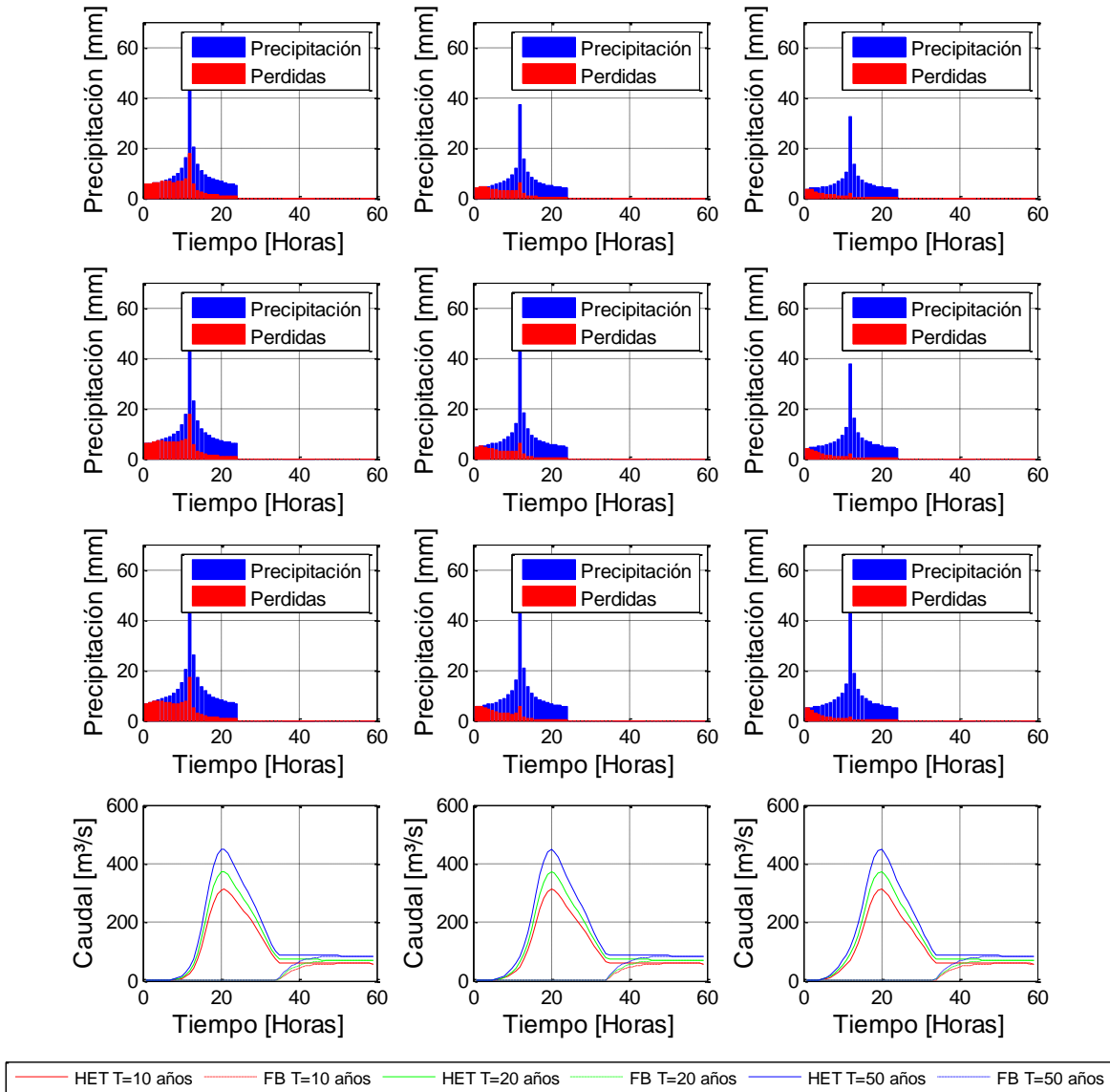


Figura 5.28 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de bloques alternados. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.13 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución bloques alternados. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

T	Q max	PP AMC 1	PP AMC 2	PP AMC 3
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	313	244	186	162
20	372	274	214	190
50	448	312	249	225

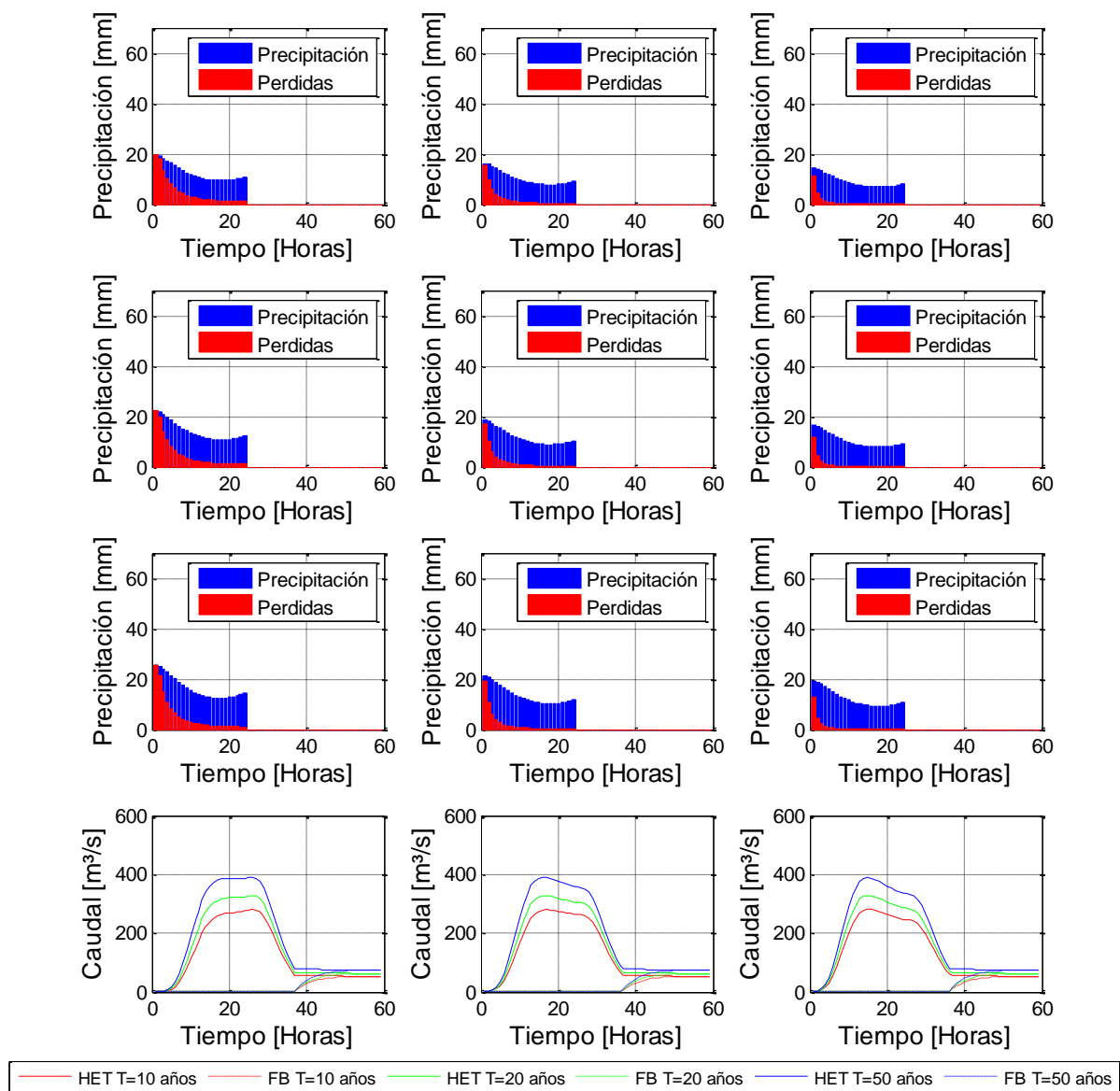


Figura 5.29 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas  $P=50\%$ , grupo 1. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.14 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas  $p=50\%$ , grupo 1. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

<b>T</b> [años]	<b>Q max</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>PP AMC 1 Grupo 1</b> [mm]	<b>PP AMC 2 Grupo 1</b> [mm]	<b>PP AMC 3 Grupo 1</b> [mm]
<b>10</b>	280	299	247	217
<b>20</b>	328	340	281	250
<b>50</b>	390	392	325	293

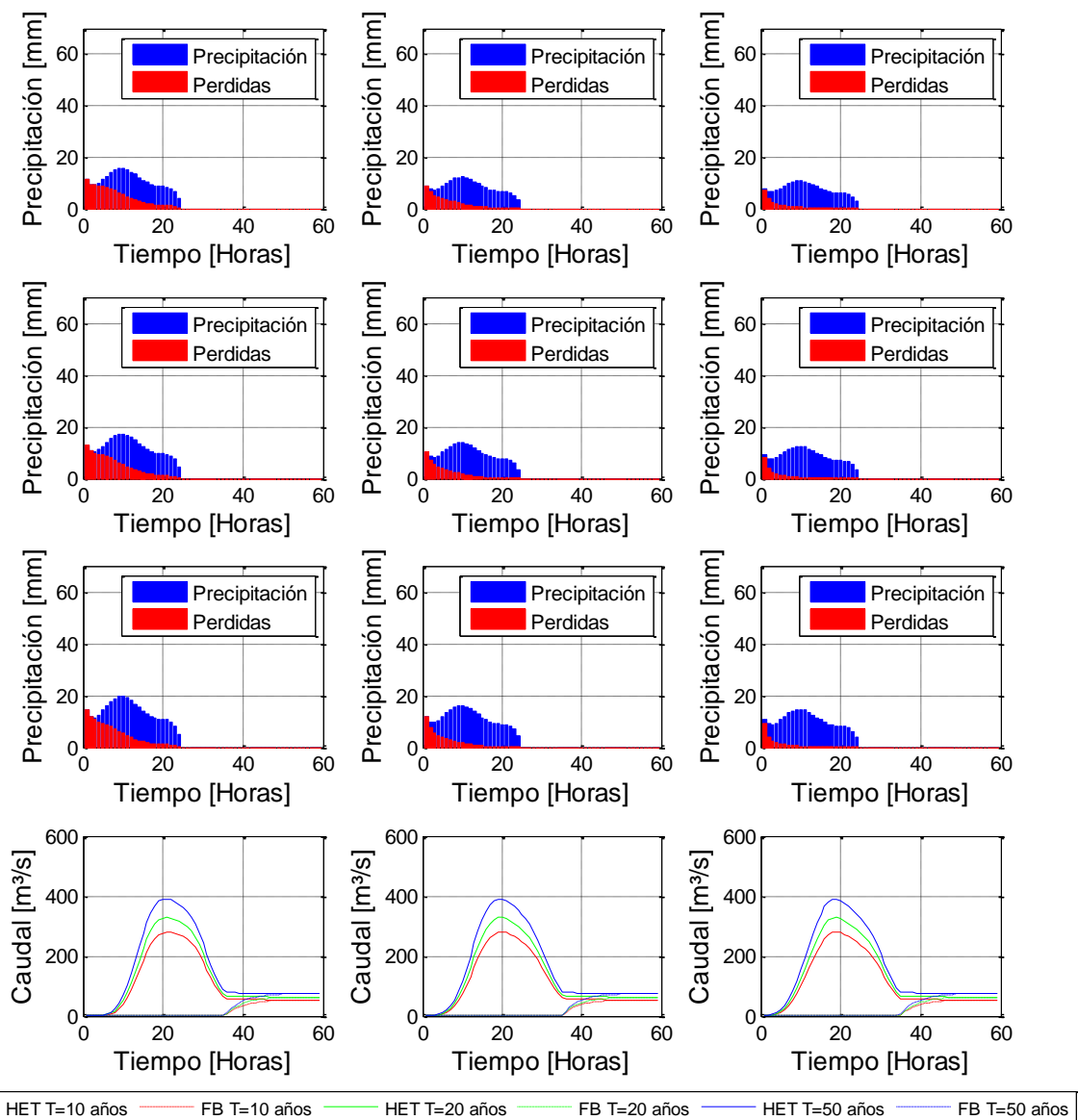


Figura 5.30 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas P=50%, grupo 2. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.15 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas p=50%, grupo 2. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

<b>T</b>	<b>Q max</b>	<b>PP AMC 1 Grupo 2</b>	<b>PP AMC 2 Grupo 2</b>	<b>PP AMC 3 Grupo 2</b>
<b>[años]</b>	<b>[m³/s]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>10</b>	280	262	207	183
<b>20</b>	328	292	236	212
<b>50</b>	390	332	273	249



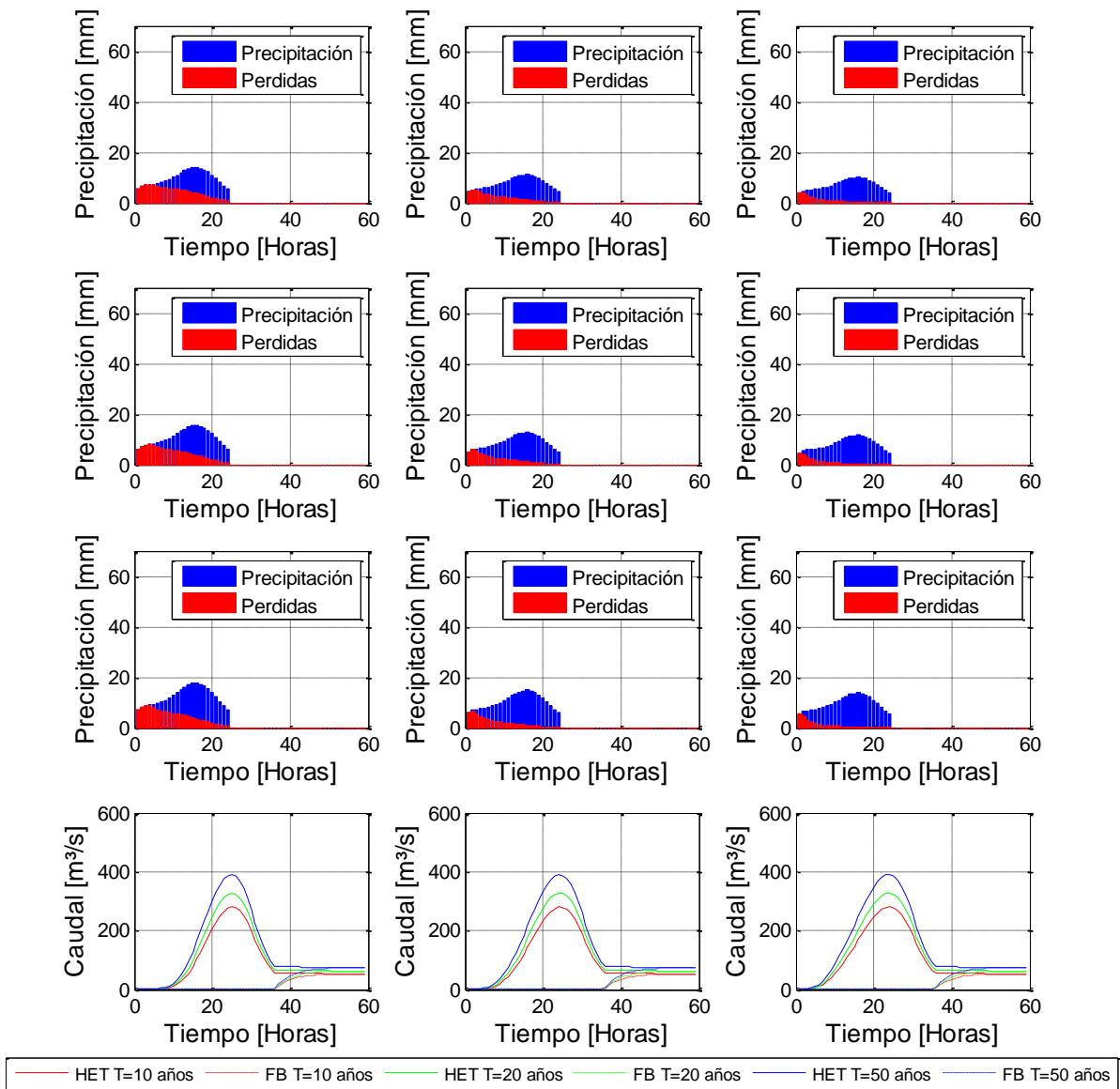


Figura 5.31 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas  $P=50\%$ , grupo 3. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.16 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas  $p=50\%$ , grupo 3. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

<b>T</b>	<b>Q max</b>	<b>PP AMC 1 Grupo 3</b>	<b>PP AMC 2 Grupo 3</b>	<b>PP AMC 3 Grupo 3</b>
<b>[años]</b>	<b>[m³/s]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>10</b>	280	233	188	170
<b>20</b>	328	261	214	197
<b>50</b>	390	297	249	232

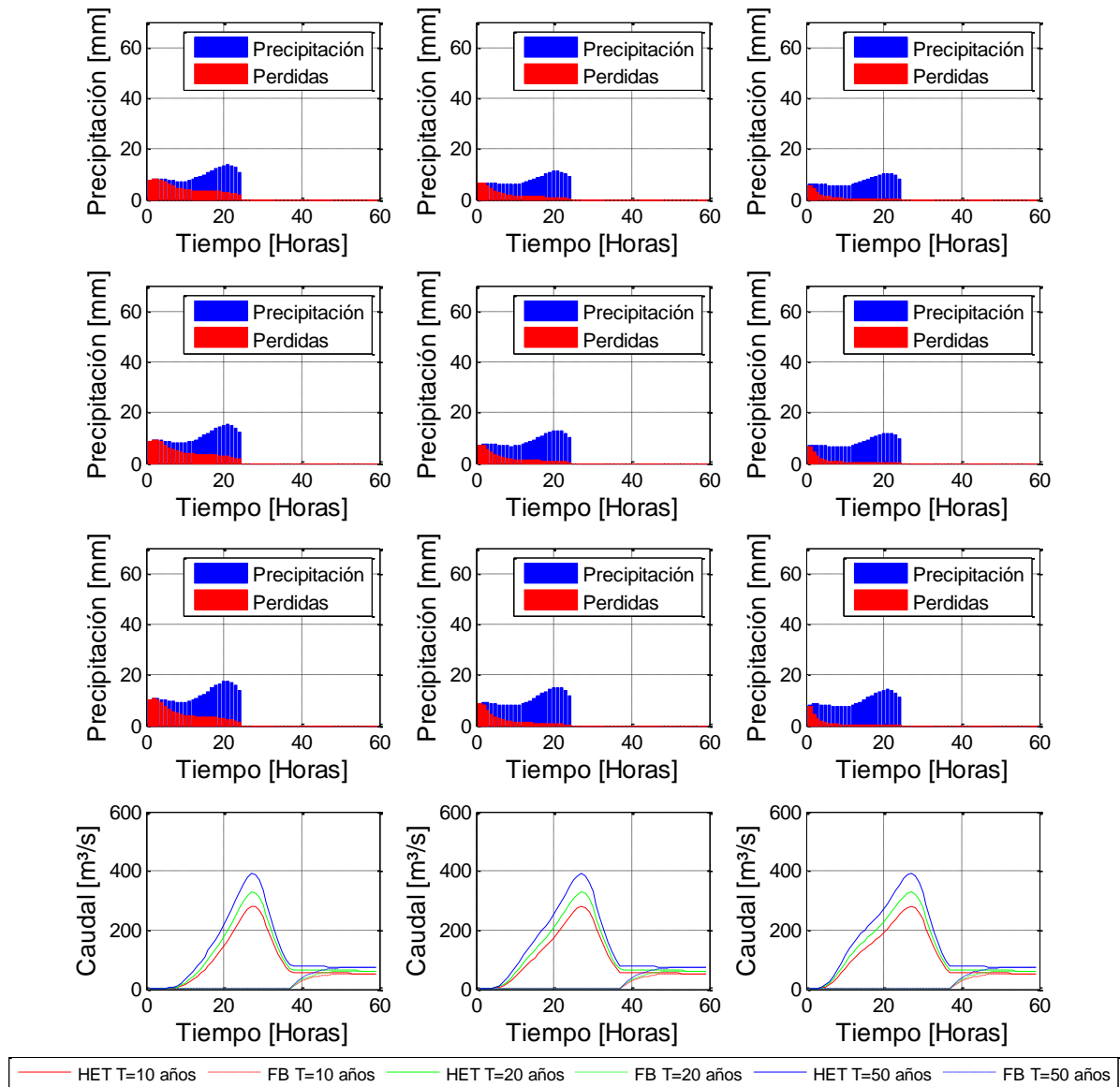


Figura 5.32 Hidrogramas de crecidas asociados a caudales máximos de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas  $P=50\%$ , grupo 4. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla 5.17 Resumen de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo. Distribución de Varas  $p=50\%$ , grupo 3. Periodos de retorno 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 4	PP AMC 2 Grupo 4	PP AMC 3 Grupo 4
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	280	231	188	174
20	328	259	216	202
50	390	295	252	239

En la Figura 5.33, se resumen las precipitaciones necesarias para alcanzar los caudales máximos para los periodos de retorno estudiados (10, 20 y 50 años). Para un periodo de retorno de 10 años, el gráfico muestra que en una condición de humedad baja, la precipitación máxima requerida para alcanzar el caudal máximo, es la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%. Para condiciones de humedad media y alta, la precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo, sigue una distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%. Por otra parte, el menor valor de precipitaciones para alcanzar el caudal máximo para condiciones de humedad bajas, medias y altas, está dado por la distribución del grupo 4 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%.

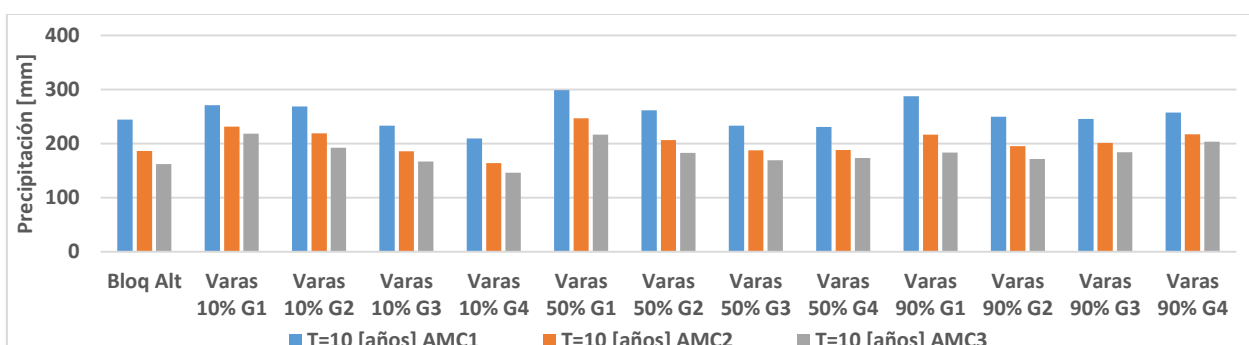


Figura 5.33 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 10 años

La Figura 5.34 presenta un comportamiento similar al periodo de retorno 10 años, donde, para un periodo de retorno de 20 años, se obtiene que en una condición de humedad baja, la máxima precipitación que genera el caudal máximo sigue la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%. Para condiciones de humedad medias y altas, el hidrograma que genera el caudal máximo, se obtiene con una precipitación máxima con distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%. Por otra parte, el menor valor de precipitación para alcanzar el caudal máximo para condiciones de humedad bajas, medias y altas, está dado por la distribución del grupo 4 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%.

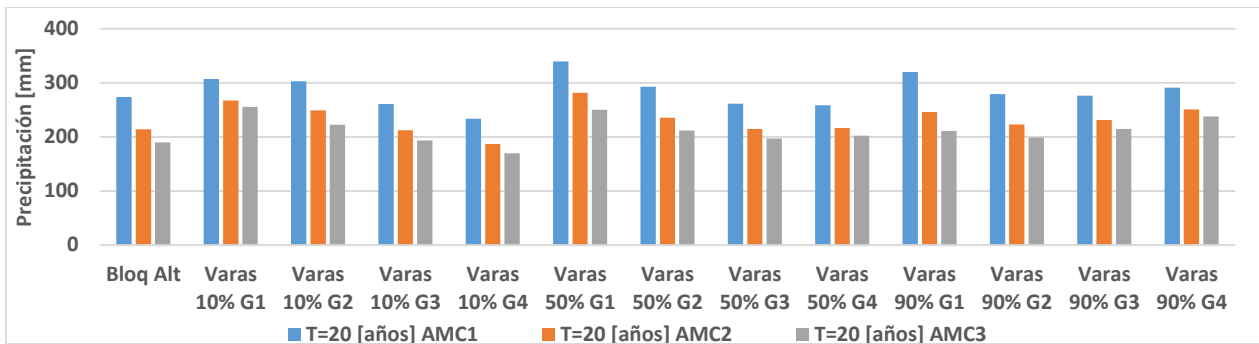


Figura 5.34 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 20 años

Del mismo modo que para los periodos de retorno anteriores, para un periodo de retorno de 50 años en la Figura 5.35 se muestra que para condición de humedad baja, el hidrograma que genera el caudal máximo requiere una precipitación distribuida según el grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 50%. Para condiciones de humedad medias y altas, la precipitación máxima necesaria para alcanzar el caudal máximo en el hidrograma, sigue la distribución del grupo 1 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%. Por otra parte, el menor valor de precipitación necesaria para alcanzar el caudal máximo bajo condiciones de humedad bajas, medias y altas, está dado por la distribución del grupo 4 de Varas, con una probabilidad de excedencia del 10%.

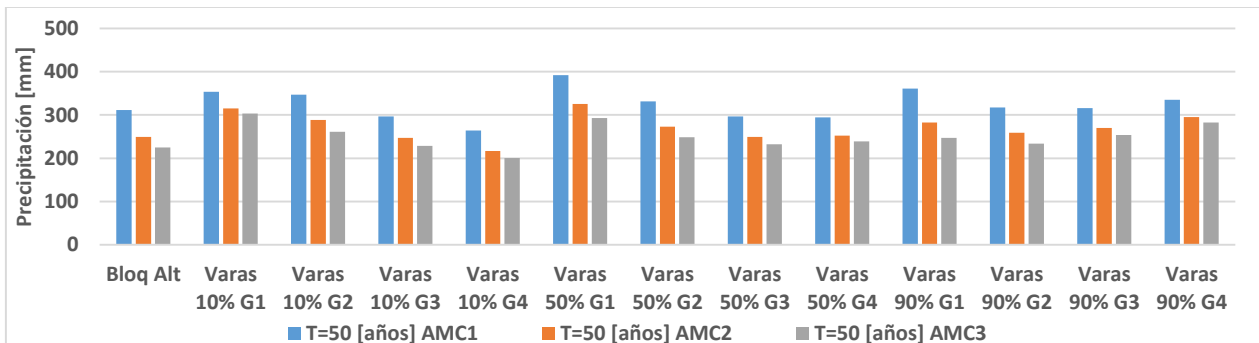


Figura 5.35 Diagrama de barras de precipitaciones máximas para todos los escenarios, periodo de retorno 50 años.

### 5.2.5 Análisis de Proyección de Caudales Máximos

Efectuado el análisis de distribución de tormentas se procede a hacer el estudio de caudales máximos involucrando el efecto del cambio climático. Las proyecciones de caudales se efectuaron mediante la modelación continua anteriormente descrita entre los años 2008 y 2065, además de la

utilización de una simulación histórica entre los años 1977 y 2007. En este caso para el análisis se consideran los *ensembles* 2, 3 y 9 de cambio climático para las proyecciones futuras. También se utilizan las dos metodologías de desagregación de precipitaciones como son el método de bloques alternados mediante la utilización de la curva IDF y la metodología de distribución de Varas. En el caso de Varas como se ha discutido, se considera cada distribución con probabilidad de excedencia de 10%, 50% y 90%.

#### **5.2.5.1 Análisis de Caudales Máximos Asociados a Periodos de Retorno 10, 20 y 50 años**

Para el análisis de caudales máximos, se toma el máximo caudal horario anual del registro de caudales modelados entre los años 2008 y 2065. Esto se realiza para los 3 *ensembles* en estudio, considerando la distribución de precipitaciones de bloques alternados y la distribución de precipitaciones de Varas con 3 probabilidades de excedencia (10%, 50% y 90%).

Además, para el análisis en cuestión se tomó el registro histórico simulado de 30 años entre 1977 y 2007, esto con la finalidad de obtener el caudal máximo horario para las diferentes distribuciones. Posteriormente, se hace un análisis de frecuencia con los caudales máximos para todos los casos anteriormente mencionados. En cada análisis de frecuencia se consideran los *ensembles* 2, 3 y 9 del modelo de cambio climático, además del registro simulado histórico. Paralelamente, también se genera la serie de excedencia anual, donde se toma una cantidad de caudales máximos igual al número de años de la serie anual de máximos, tal que estos caudales sean los mayores valores pero de distintas crecidas, para así tener valores independientes, formando así la serie de caudales máximos instantáneos del registro.

Por lo tanto en resumen, se consideran 58 caudales máximos (Descritos en el Anexo C.3) para el análisis de frecuencia de los *ensembles* del modelo de cambio climático, ya sea para para los caudales máximos horarios, como para los caudales máximos instantáneos. En cuanto a la simulación histórica se consideran 31 (Descritos en el Anexo C.3) caudales máximos, tanto para los caudales máximos horarios, como para los caudales máximos instantáneos.

Es importante mencionar, que el ajuste de la función densidad de probabilidades que se utilizó en cada caso es validado mediante test chi-cuadrado, además de un criterio gráfico que busca ajustar de mejor forma la interpolación al set de datos.

En la Figura 5.36 se comparan los ajustes del análisis de frecuencias para la distribución de precipitaciones mediante bloques alternados usando la serie máximos horarios y la serie de excedencias anuales para cada uno de los *ensembles*, además se incluye el intervalo de confianza para la determinada distribución. Se aprecia una gran incertidumbre en los resultados aunque los caudales máximos proyectados más frecuentes ( $T < 2$  años) serían mayores que los del registro histórico pero sólo en uno de los *ensembles* se obtienen caudales superiores a los simulados en el período de registro histórico para períodos de retorno mayores a 10 años. En la Tabla 5.18 se resumen los valores de caudal máximo horario e instantáneo obtenidos para períodos de retorno de 10, 20 y 50 años. Se observa, que en general los caudales máximos instantáneos son superiores, a los caudales máximos horarios. Además, la diferencia promedio existente entre los *ensembles* futuros proyectados y la serie histórica, muestra que el análisis de caudales máximos horario tiende a ser ligeramente inferior a la serie caudales máximos instantáneos, notando así que la diferencia más grande, es con el *ensemble 9* y en contraparte la menor diferencia es con el *ensemble 2*.

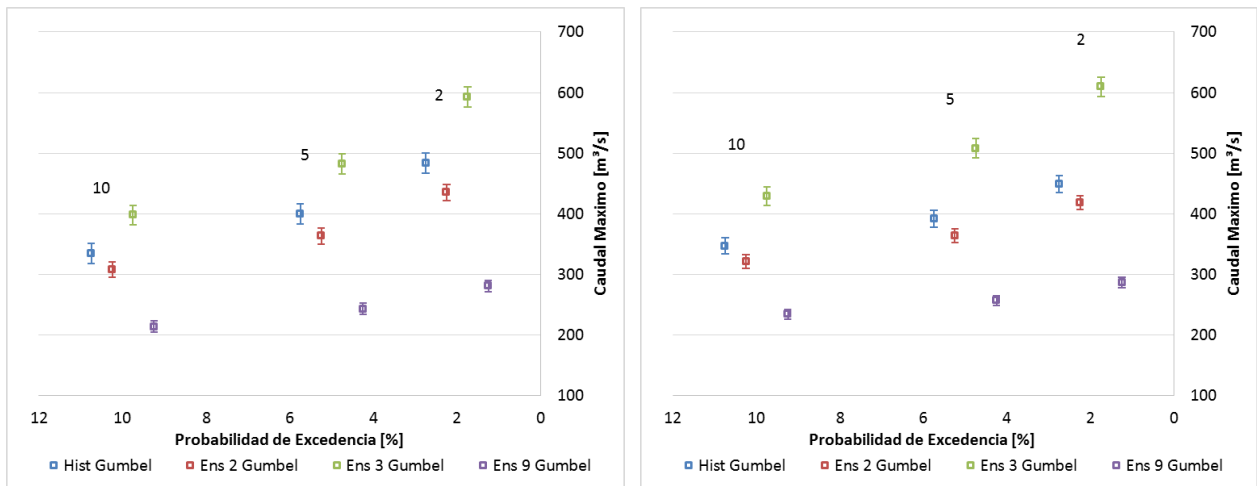


Figura 5.36 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Distribución de precipitaciones mediante bloques alternados.

Tabla 5.18 Caudales máximos horarios e instantáneos obtenidos del análisis de frecuencia.  
Distribución bloques alternados

<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>	<b>Diferencia de caudales [m3/s]</b>		
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>10</b>	10	334	307	398	214	27	63	121
<b>20</b>	5	399	363	483	243	36	83	157
<b>50</b>	2	483	435	592	280	49	109	203
<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>	<b>Diferencia de caudales [m3/s]</b>		
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>10</b>	10	347	321	429	234	26	82	113
<b>20</b>	5	391	363	508	257	28	117	134
<b>50</b>	2	449	418	610	286	30	161	162

En las Figuras 5.37 a 5.39 y en las Tablas 5.19 a 5.21 se presentan los resultados obtenidos con los caudales máximos horarios y caudales máximos instantáneos usando la distribución de Varas para las probabilidades 10, 50 y 90%, respectivamente. Se observa una gran incertidumbre en los resultados aunque los caudales máximos proyectados más frecuentes ( $T < 2$  años) serían mayores que los del registro histórico pero sólo en uno de los *ensembles* se obtienen caudales superiores a los simulados en el período de registro histórico para períodos de retorno mayores a 10 años. En las tablas ya mencionadas se observa que en general los caudales de la serie de excedencia anual son superiores, a los caudales máximos horarios. Sin embargo, para el *ensemble* 2 esto no ocurre. Luego, la diferencia promedio existente entre los *ensembles* futuros proyectados y la serie histórica, muestra que el análisis de caudales máximos horarios tiende a ser ligeramente inferior a la serie de caudales máximos instantáneos, notando así que las diferencias más grande, es con el *ensemble* 9 y en contraparte la menor diferencia es con el *ensemble* 2.

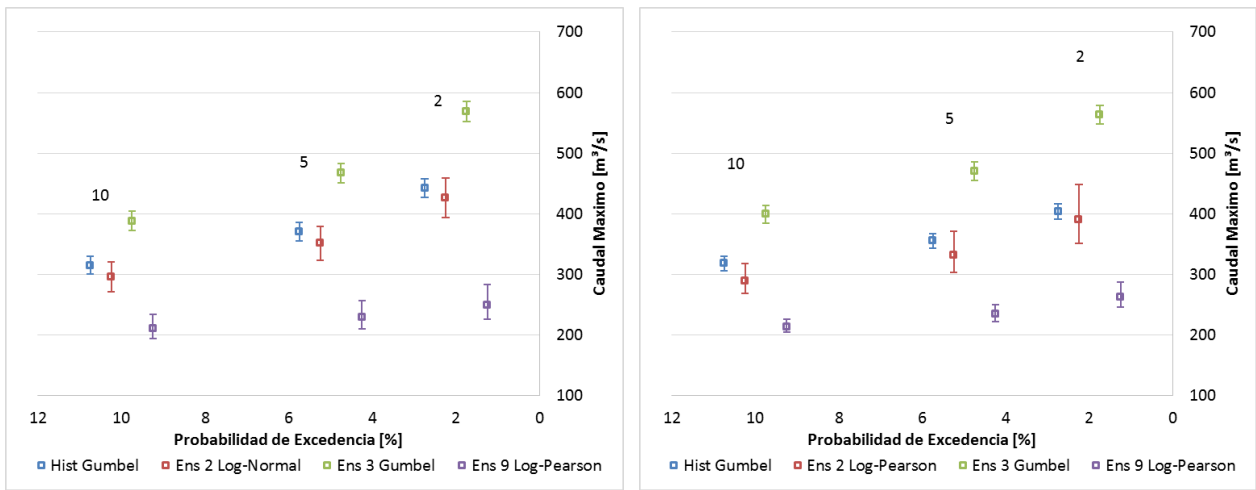


Figura 5.37 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=10%.

Tabla 5.19 Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con P=10%.

T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m3/s]		
		Gumbel	Log-Normal	Gumbel	Log-Pearson	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	315	295	388	211	19	73	104
20	5	370	351	467	229	19	96	141
50	2	442	426	569	250	16	127	193
T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m3/s]		
		Gumbel	Log-Pearson	Gumbel	Log-Pearson	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	318	289	399	213	28	81	105
20	5	355	331	471	234	24	116	121
50	2	403	390	563	263	13	160	141



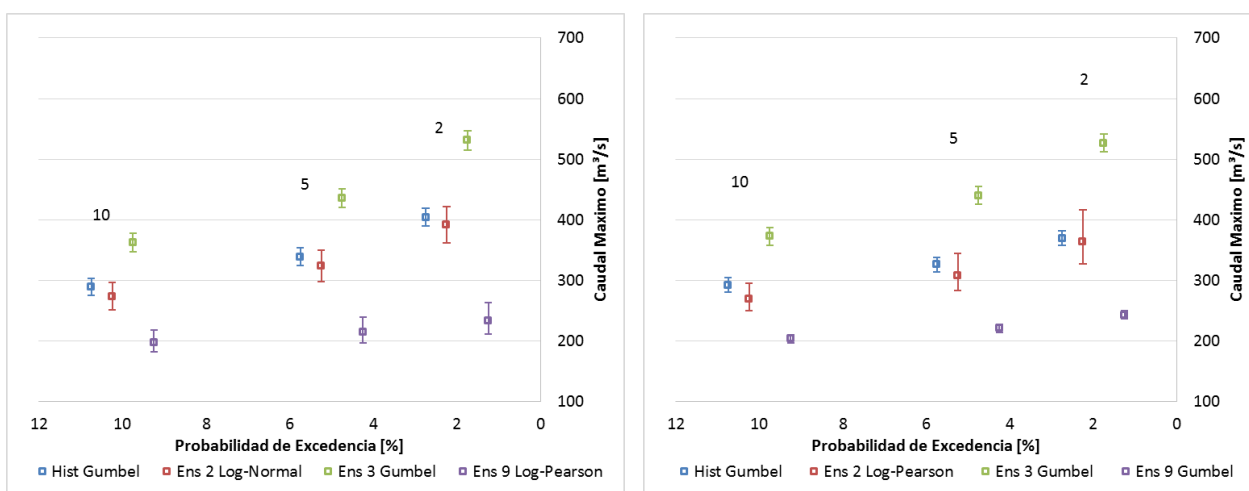


Figura 5.38 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=50%.

Tabla 5.20: Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con P=50%.

T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m3/s]		
		Gumbel	Log-Normal	Gumbel	Log-Pearson	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	289	273	362	197	16	73	92
20	5	339	324	436	214	15	97	125
50	2	404	392	531	233	12	127	171
T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m3/s]		
		Gumbel	Log-Pearson	Gumbel	Gumbel	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	292	269	373	203	23	81	89
20	5	326	308	440	220	18	114	105
50	2	369	363	527	243	6	157	126

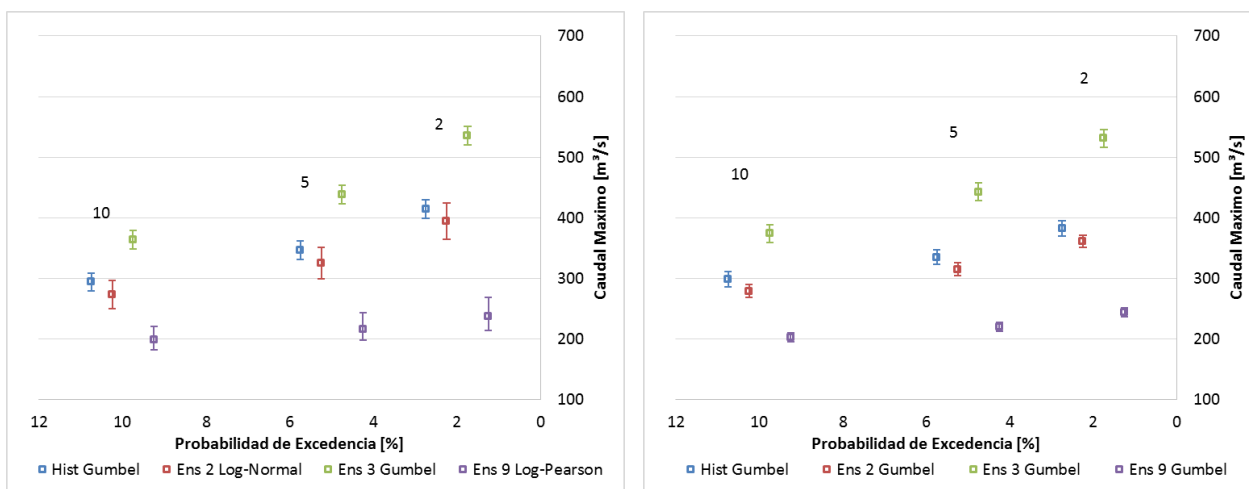


Figura 5.39 (a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo horario. (b) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo instantáneos. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=90%.

Tabla 5.21: Caudales máximos horarios e instantáneos asociados a distintos períodos de retorno. Distribución de precipitación Varas grupo II con P=90%.

T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m³/s]		
		Gumbel	Log-Normal	Gumbel	Log-Pearson	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	294	273	364	198	21	70	95
20	5	346	324	439	216	22	92	130
50	2	414	394	535	236	20	121	178
T	P_exc	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Diferencia de caudales [m³/s]		
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	esc2-esch	esc3-esch	esc9-esch
[Años]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	10	298	279	374	202	19	76	96
20	5	335	315	442	220	20	108	115
50	2	382	361	531	243	21	149	139

En las Figuras 5.36, a 5.39, se observa una variabilidad en el análisis de frecuencia de los caudales máximos, donde se aprecia que los *ensembles* generados por el modelo de cambio climático, proyectan diferentes pendientes en el análisis. En todos los escenarios presentados, es interesante destacar que cuando se analiza la tendencia de las regresiones existe un punto de inflexión entre las proyecciones, es decir, hay un rango donde las proyecciones se cruzan conjuntamente haciendo que exista una variabilidad entre caudales de baja probabilidad de excedencia y caudales de alta probabilidad de excedencia. Este punto de inflexión se encuentra en periodos de retornos menores a los 2 años (ver Anexo C.3).

Los resultados muestran diferencias en los caudales máximos generados por las diferentes metodologías de distribución de precipitaciones. Para los caudales máximos horarios se observan diferencias del 8 al 17%. Luego, para los caudales máximos instantáneos las diferencias entre métodos de distribución, son del orden del 13 y 18%. Otro aspecto a tomar en cuenta es como la distribución de Varas (independiente de la probabilidad de excedencia asociada a Varas) muestra diferencias menores en promedio entre las proyecciones y el registro histórico, esto en comparación con la distribución de bloques alternados.

Es importante destacar, que en este estudio se utilizaron variadas distribuciones como: log normal, log Pearson y Gumbel. El criterio de selección de la función densidad de probabilidades a utilizar depende fundamentalmente del set de datos que se analice particularmente, la importancia de asignar una correcta distribución es vital para la obtención de un registro confiable, ya que esta distribución puede sobre estimar o sub estimar los resultados

Finalmente, los dos aspectos a destacar son la variabilidad que existe en los caudales máximos instantáneos generados según el tipo de *ensemble* del modelo de cambio climático que se considere, y por otro lado, como para un mismo escenario la forma en que se distribuye la precipitación, influencia la magnitud de los caudales. En lo que respecta a la distribución de precipitaciones, los resultados muestran que una distribución mediante la metodología de bloques alternados, genera mayores caudales máximos instantáneos, en comparación con la utilización de la metodología de distribución de precipitaciones de Varas.

#### **5.2.5.2 Análisis de Caudales Máximos Asociados a Precipitaciones con Periodos de Retorno 10, 20 y 50 años**

En la sección anterior se estudiaron los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años. En este caso se estudiarán los caudales máximos asociados a precipitaciones máximas diarias con periodos de retorno 10, 20 y 50 años, obtenidas en la sección 5.1.2. Con el objetivo de observar la influencia del cambio climático bajo diferentes proyecciones.

Es claro que independiente de la distribución de tormenta (bloques alternados o Varas de probabilidad de excedencia 10, 50 o 90%) la precipitación debería ser la misma. Pero como se ve en la sección 5.1.2 hay variaciones mínimas (Desviaciones estándar entre precipitaciones con diferente distribución, de 0 a 0.5 [mm]), que se atribuye a la metodología de distribución de

precipitaciones, en el caso de Varas la distribución se realiza mediante la parametrización de una curva polinómica, la cual tiene errores asociados. Por lo tanto, se opta por promediar las precipitaciones de cada proyección (Tabla Anexo C.1) asociadas a cada probabilidad de excedencia. Por otra parte, como se analiza en la sección 5.2.3 la diferenciación en la metodología de distribución de tormentas, influye en la generación de caudales máximos. Por lo tanto, se caracteriza un rango de caudales máximos superiores e inferiores dependiendo de la distribución de tormenta. Según el análisis previo las distribuciones que generan los rangos superiores e inferiores de caudales máximos instantáneos para una misma precipitación diaria son: la distribuciones de bloques alternados, distribución de varas grupo 4 con probabilidad de excedencia 10%, distribución de varas grupo 1 con probabilidad de excedencia 90% y distribución de varas grupo 1 con probabilidad de excedencia 50%. De esta forma se genera un rango de caudales máximos instantáneos para el registro histórico y cada una de las proyecciones.

Entonces, con las precipitaciones asociadas a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años se procede a determinar los caudales máximos que generan estas precipitaciones, resumidos en la Tabla 5.22. Donde además se consideran los 3 antecedentes de humedad (AMC 1, AMC 2 y AMC 3) y un rango posible de caudales máximos instantáneos según la distribución de precipitaciones.

Se observa de la Tabla 5.22 que para los 3 periodos de retorno (10, 20 y 50 años), los caudales máximos de los *ensembles* 2 y 3 son superiores al histórico y a su vez superiores al *ensemble* 9. Por otro lado, los caudales máximos para estos periodos de retorno del *ensemble* 9 son inferiores a los caudales máximos del registro histórico. El detalle de los caudales máximos para todas las distribuciones de precipitaciones según sus antecedentes de humedad se encuentran en el Anexo C.6.

Tabla 5.22 Caudales máximos asociados a precipitaciones con 3 periodos de retorno y 3 condiciones de humedad.

<b>Rango superior de caudales máximos de crecida</b>								
<b>Histórico</b>					<i>Ensemble 2</i>			
<b>T</b>	Pp	Caudal max			Pp	Caudal max		
	Log-Normal	AMC 1	AMC 2	AMC 3	Log-Normal	AMC 1	AMC 2	AMC 3
<b>[Años]</b>	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]
<b>10</b>	133	146	233	273	144	167	257	297
<b>20</b>	151	181	273	313	164	207	303	342
<b>50</b>	175	230	327	366	189	259	359	397
<i>Ensemble 3</i>					<i>Ensemble 9</i>			
<b>T</b>	Pp	Caudal max			Pp	Caudal max		
	Gumbel	AMC 1	AMC 2	AMC 3	Gumbel	AMC 1	AMC 2	AMC 3
<b>[Años]</b>	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]
<b>10</b>	183	247	345	384	119	119	201	241
<b>20</b>	215	314	418	455	133	146	233	273
<b>50</b>	255	401	508	543	150	179	271	310
<b>Rango inferior de caudales máximos de crecida</b>								
<b>Histórico</b>					<i>Ensemble 2</i>			
<b>T</b>	Pp	Caudal max			Pp	Caudal max		
	Log-Normal	AMC 1	AMC 2	AMC 3	Log-Normal	AMC 1	AMC 2	AMC 3
<b>[Años]</b>	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]
<b>10</b>	133	81	130	160	144	92	143	176
<b>20</b>	151	100	151	186	164	114	167	204
<b>50</b>	175	126	182	220	189	142	201	240
<i>Ensemble 3</i>					<i>Ensemble 9</i>			
<b>T</b>	Pp	Caudal max			Pp	Caudal max		
	Gumbel	AMC 1	AMC 2	AMC 3	Gumbel	AMC 1	AMC 2	AMC 3
<b>[Años]</b>	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[mm]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]	[m <sup>3</sup> s]
<b>10</b>	183	135	193	231	119	66	113	140
<b>20</b>	215	177	236	277	133	81	130	160
<b>50</b>	255	228	291	335	150	98	150	184

### 5.3 Síntesis de Caudales Futuros

Según los resultados obtenidos en los acápites anteriores que se sintetizan en las Tablas 5.23 y 5.24, los caudales máximos y caudales máximos instantáneos asociados a los escenarios futuros e histórico. La Tabla 5.23 muestra los caudales asociados a periodos de retorno de 10, 20 y 50 años para diferentes distribuciones de precipitaciones en distintas proyecciones.

Tabla 5.23 Caudales máximos asociados a 3 periodos de retorno y 4 distribuciones de precipitaciones.

T	Caudales Máximos Horarios				Caudales Máximos Instantáneos			
	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9
[Años]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
Bloques Alternados					Bloques Alternados			
10	334	307	398	214	347	321	429	234
20	399	363	483	243	391	363	508	257
50	483	435	592	280	449	418	610	286
Varas P=10%					Varas P=10%			
10	315	295	388	211	318	289	399	213
20	370	351	467	229	355	331	471	234
50	442	426	569	250	403	390	563	263
Varas P=50%					Varas P=50%			
10	289	273	362	197	292	269	373	203
20	339	324	436	214	326	308	440	220
50	404	392	531	233	369	363	527	243
Varas P=90%					Varas P=90%			
10	294	273	364	198	298	279	374	202
20	346	324	439	216	335	315	442	220
50	414	394	535	236	382	361	531	243

La Tabla 5.24 muestra un rangos de caudales máximos instantáneos según todas las distribuciones de precipitaciones estudiadas, asociados a eventos precipitación diario de periodos de retorno de 10, 20 y 50 años, en este caso la distribución de precipitaciones influye en la magnitud del caudal de crecida, y así también la condición de humedad de suelo, por lo que se analizan 3 condiciones de humedad (AMC 1, AMC 2 y AMC 3).

Tabla 5.24 Caudales máximos asociados a precipitaciones con 3 periodos de retorno y 3 condiciones de humedad.

T	Rango superior de caudales máximos de crecida				Rango inferior de caudales mínimos de crecida			
	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9	Hist	Ens 2	Ens 3	Ens 9
[Años]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
AMC1								
10	146	167	247	119	81	92	135	66
20	181	207	314	146	100	114	177	81
50	230	259	401	179	126	142	228	98
AMC2								
10	233	257	345	201	130	143	193	113
20	273	303	418	233	151	167	236	130
50	327	359	508	271	182	201	291	150
AMC3								
10	273	297	384	241	160	176	231	140
20	313	342	455	273	186	204	277	160
50	366	397	543	310	220	240	335	184

## 6 Conclusiones

El trabajo de memoria abordó la determinación de la respuesta hidrológica de la cuenca Butamalal en Butamalal VIII región, para crecidas futuras. Esto implicó la generación de escenarios de cambio climático para precipitaciones diarias, escalamiento espacial y temporal de las series, selección de los escenarios de cambio climático, análisis de las precipitaciones históricas y futuras, selección de una metodología de distribución horaria de la precipitación diaria, modelar, calibrar y validar hidrogramas mediante el uso del software HEC-HMS. Además fue necesario implementar un programa para un análisis de crecidas de modo continuo, y finalmente un análisis de los caudales medios mensuales, horarios e instantáneos. Las principales conclusiones que se derivan del estudio se indican a continuación.

En relación con la selección de los escenarios de cambio climático es importante destacar que las precipitaciones generadas por el modelo de cambio climático MK3.6 para escenarios futuros, representan de forma muy aceptable el comportamiento estacional histórico de la zona de estudio. Esto se atribuye a 2 motivos principalmente, que son: la realización de un escalamiento espacial y temporal, y que el modelo MK3.6 se basa en procesos físicos para estimar las variables de interés.

Se realizó una detallada caracterización de la zona de interés, en particular el análisis geológico e hidrogeológico y la revisión de estudios de uso de suelo mostraron una nula importancia hidrogeológica, con permeabilidades muy bajas o ausentes y sin grandes cambios en la cobertura vegetal, lo que fue fundamental en la definición de la capacidad de infiltración en el modelo de simulación hidrológica, principalmente en la estimación inicial de la curva número y la abstracción inicial.

También, el estudio meteorológico de la cuenca, mostró un comportamiento principalmente pluvial a pesar de existir un estudio preliminar de Escobar y Vidal, respecto a la presencia de agua nieve en la cuenca. Este se descartó en base a la información registrada en la estación de Butamalal donde se observó una curva de variación estacional representativa de una cuenca pluvial, además se acotó el estudio realizado por Berkeley Earth que no mostro cambios importantes en las temperaturas en los últimos 60 años en la zona de estudio. De igual forma, en base al análisis

realizado por el IPCC la temperatura tendería a subir en cualquier escenario futuro, por lo que es aceptable el supuesto de no considerar aguas nieve en la cuenca.

Por otra parte, lo escaso de la información disponible de precipitaciones a escala horaria, fue suficiente para definir comportamientos y variaciones de interés para el desarrollo de este estudio. Es así como a base del análisis de 183 eventos de tormenta se define una distribución probabilística para la distribución de la lluvia según los grupos de Varas y se estiman los coeficientes de duración que permiten una correcta parametrización de la curva IDF. A base de lo anterior se estableció una metodología de trabajo, que permitió mediante un árbol de decisión y una función de probabilidad, estimar la duración de un evento de tormenta.

Para una calibración por eventos de tormenta, se implementó el modelo HEC-HMS usando el método del hidrograma unitario del servicio de conservación de suelos para transformar la precipitación en escorrentía, el método de la curva número, CN y el método de la curva de recesión para la modelación del flujo base. Los índices de ajuste usados,  $r^2$ , Nash-Sutcliffe y Nash-Sutcliffe Logarítmico, calculados en las etapas de calibración y validación son un buen apoyo en estos procesos. Sin embargo, hay que tener en cuenta un análisis gráfico también para cada evento, ya que pueden inducir a error, y no lograr un correcto ajuste. Luego, los coeficientes de  $r^2$ , Nash-Sutcliffe y Nash-Sutcliffe Logarítmico alcanzan en la calibración valores de 0.92, 0.91 y 0.87, respectivamente. Por otra parte, en cuanto a la validación los índices de ajuste fueron inferiores en un promedio del 5% a los de la calibración.

La implementación de un modelo de simulación continua de hidrogramas programado en la plataforma Matlab, logro satisfacer los objetivos planteados de hacer un estudio continuo de crecidas con proyecciones futuras. Esta implementación al ser comparados en el período histórico con los caudales modelados con el programa HEC-HMS, obtuvo una buena correlación con un  $r^2$  de 0.99.

Las series proyectadas de precipitaciones muestran un decaimiento en el futuro sin embargo hay meses donde hay mayor concentración de precipitaciones como junio, julio, septiembre y octubre, en comparación con otros meses que el descenso de las precipitaciones es notoriamente menor como enero, diciembre y marzo. Además se aprecian singularidades, como que a pesar de que la precipitación medio mensual del registro proyectado futuro para algunos meses es menor



que la del registro histórico, hay una mayor presencia de precipitaciones extremas; un ejemplo de esto es marzo del *ensemble* 9, diciembre del *ensemble* 2 y noviembre del *ensemble* 3.

En cuanto a cómo se distribuyen las precipitaciones, se concluye que tanto para las series de proyecciones futuras como para el registro histórico, se tiene un comportamiento similar, es decir, que tienen un comportamiento decreciente desde las precipitaciones con menor magnitud hacia las precipitaciones de mayor magnitud, sin embargo el *ensemble* 2 tiene una mayor concentración de precipitaciones de baja magnitud que los demás *ensembles*, con un comportamiento similar al registro histórico. Por otro lado, para precipitaciones con magnitudes medias se observó que los *ensembles* 3 y 9 concentran mayor cantidad de precipitaciones. Finalmente, para precipitaciones de alta magnitud, el análisis mostró una diferencia sustancial entre las series proyectadas futuras, en comparación con el registro de precipitación histórico.

Del análisis llevado a cabo en el capítulo 5, se debe primero tener en cuenta que se realizaron análisis para la distribución de precipitación por separado, mediante la metodología de bloques alternados y mediante la metodología de Varas (10%, 50% y 90%). Además para este análisis, en consideración a la poca información histórica de caudales disponible, se realizó una simulación del registro histórico en base a las precipitaciones observadas en la zona, de modo de tener una línea base de trabajo. De esta forma respecto a los caudales y los volúmenes medios mensuales, se concluye que el efecto del cambio climático se ve reflejado en una baja de estos valores respecto a la simulación histórica, en los meses de otoño invierno, mientras que en los meses de primavera verano se aprecia un alza en los volúmenes y caudales medios mensuales. Sin embargo, cuando se analizan valores límites se aprecia de manera excepcional que para el mes de junio, en el *ensemble* 3 el valor medio está por sobre la simulación histórica, en contraste con los *ensembles* 2 y 9. Por otra parte, es importante notar como la distribución de precipitaciones impacta estos registros. Esto provoca, que para una metodología de distribución de bloques alternados se alcancen tanto para volúmenes como para caudales medios mensuales, una mayor magnitud de estos valores respecto a la metodología de distribución de Varas.

En cuanto a los caudales máximos instantáneos proyectados del análisis de frecuencias realizado, se obtiene solo para uno de los *ensembles* valores superiores a los del registro histórico, sin embargo, se observa una gran incertidumbre en los resultados aunque los caudales máximos proyectados más frecuentes ( $T < 2$  años) serían mayores que los del registro histórico pero sólo

en uno de los *ensembles* se obtienen caudales superiores a los simulados en el período de registro histórico para períodos de retorno mayores a 10 años. Finalmente, se concluye que las crecidas están condicionadas principalmente por el factor de humedad del suelo, y la distribución de precipitaciones que tenga la tormenta. Es evidente que a mayor humedad del suelo se infiltrará menos agua y provocará mayor escorrentía superficial. Por el contrario, mientras menor sea el antecedente de humedad previo, mayor agua se infiltrará por lo tanto la crecida será menor. Por lo demás, estudiar la distribución de precipitaciones es interesante, debido a que según donde se concentre la precipitación la crecida será mayor o menor. Es así como del análisis de crecidas orientado a la distribución de precipitaciones, con tormentas asociadas a un periodo de retorno, destacan como generadores de caudales máximos instantáneos de mayor magnitud la distribución de bloques alternados y la distribución de Varas grupo 4 y 3, con 10% de probabilidad excedencia. Mientras que para distribuciones que producen un menor caudal máximo instantáneo, destaca la distribución de Varas grupo 1 con 50% y 90% de probabilidad de excedencia. Por lo tanto, en estudio mostro que para eventos de precipitación concentrados en los últimos dos cuartos tienden a generar caudales máximos instantáneos mayores que precipitaciones concentradas en los primeros dos cuartos bajo misma condición de humedad y mismo periodo de retorno.

Los efectos del cambio climático se ven reflejados en los caudales proyectados en la cuenca de estudio. Además, como se muestra en investigaciones anteriores, Raddatz (2011) presento disminución en los caudales máximos instantáneos en rangos del 56% y 8%. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo de memoria, mostró una dispersión interesante en los caudales máximos instantáneos. Donde, los *ensembles 2 y 9* mostraron descensos promedios en los caudales de 6% y 34% respectivamente, mientras que el *ensemble 3* mostró un aumento en los caudales máximos instantáneos en un promedio del 34%. Cabe mencionar, que a mayor periodo de retorno las variaciones en los caudales aumentan.

Es importante destacar que para crecidas asociadas a un período de retorno de precipitación máxima diaria de 10, 20 y 50 años de período de retorno, se obtienen caudales máximos instantáneos que varían significativamente entre ellos. En general es la misma proyección (el señalado como *ensemble 3*) con una de las distribuciones temporales de desagregación de la precipitación (Grupo IV de Varas) bajo condiciones iniciales húmedas el que genera las condiciones más desfavorables para los caudales. Se aprecia que en este caso son dos las proyecciones futuras (*ensemble 2 y ensemble 3*) que proyectan caudales superiores a los simulados

a base de los registros históricos de precipitación de igual período de retorno, aunque resultan más desfavorables los valores máximos simulados en forma continua y no como eventos aislados.

Como conclusión final, este trabajo de memoria satisface los objetivos planteados, en cuanto a la generación de hidrogramas de crecidas continuos para precipitaciones proyectadas futuras. Además agregar que los dos aspectos a tener en cuenta en este trabajo, sea por un lado la baja cantidad de datos horarios de precipitaciones para el análisis probabilístico de las duraciones, y por otro lado la estimación de las infiltraciones, ya que como se sabe el método de la curva número es solo una aproximación. Luego las variables que involucran el fenómeno de la infiltración son más complejas y sería preferible hacer un análisis integrado entre los fenómenos superficiales de la cuenca y los subterráneos. Sin embargo, un análisis a esa escala escapa a la duración del trabajo de memoria. Por otra parte, el efecto de cambio climático en las crecidas, para proyecciones del escenario RCP8.5 mostró una dispersión de resultados, ya que bajo diferentes proyecciones del mismo escenario, se observaron comportamientos de aumento de los caudales de crecidas y disminución de los mismos. Por lo tanto, a pesar de que las precipitaciones anuales disminuyen para todas las proyecciones, los resultados de caudales máximos instantáneos muestran que hay posibles proyecciones donde, ya sea porque eventos extremos pueden darse con mayor frecuencia o porque eventos consecutivos alterarían la humedad del suelo, generando crecidas de mayor magnitud a las que se tendría si no se considerase cambio climático.

# Bibliografía

Aron, G. and E. White, 1982. Fitting a Gamma Distribution Over a Synthetic Unit Hydrograph, Water Resources Bulletin, Vol. 18(1) 95-98, Feb. 1982.

Benítez, A. y Verni F. 1985. Distribución porcentual de las precipitaciones de duraciones entre 12 y 72 horas. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 7-9 Noviembre, Concepción.

Beschta R, M Pyles, A Skaugset, C Surfleet. 2000. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. Journal of Hydrology 233: 102-120.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Clima y Forestación, VIII Región, Chile, <<http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region8/clima.htm>>

Brown, E. y Soler R. 1979. Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica. Hidrología y Recursos Hídricos, Universidad Técnico Federico Santa María, 8-10 Noviembre, Concepción.

Chow, V.T.; D.R. Maidment y L.W. Mays 1993. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.

Clark, C.O. 1945. "Storage and the Unit Hydrograph." Transactions of the American Society of Civil Engineers 110, pp. 1419-1446.

CONAMA, 2007, Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI.

CONAF (Corporación Nacional Forestal), 2014, Uso de Suelos VIII región <<http://sit.conaf.cl/>>

Dirección General de Aguas, 1989. Catastro de estaciones hidrometeorológicas. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Santiago.

Dirección General de Aguas, 1986. Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Santiago.

Dirección General de Aguas, 1989. Balance Hidrogeológico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Santiago.

Dirección General de Aguas, 1992. Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Santiago.

Dirección General de Aguas, 1996. Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Santiago.

DMC (Dirección Meteorológica de Chile), 2006, Climas de Chile, Sexta región. <[http://www.meteochile.gob.cl/climas/climas\\_sexta\\_region.html](http://www.meteochile.gob.cl/climas/climas_sexta_region.html)>

Falvey, M, & Garreaud, RD. 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 114(D4).

Fuenzalida H. 1971. Climatología de Chile. In Corporación de Fomento de la Producción ed. *Geografía Económica de Chile*. Santiago, Chile. p. 99-152.

Gómez T. y X. Vargas, 2012. "Análisis de nuevos escenarios de cambio climático en la disponibilidad de agua en una cuenca andina de la VI Región" *Revista Sochid*, Volumen 27, N°1.

Gordon, H, O'Farrell, S, Collier, M, Dix, M, Rotstayn, L, Kowalczyk, E, Hirst, T, & Watterson, I. 2010. The CSIRO Mk3. 5 climate model. CAWCR.

Henríquez I. 2014 "Análisis de parametrizaciones espaciales en la calibración del modelo hidrológico TopNet, aplicado en la cuenca del Río Cautín, IX Región" Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile.

Huber A, Iroume A, Mohr C, & Frene C. 2012. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile.

Hydrologic Engineering Center, 1982. Hydrologic Analysis of Ungauged Watersheds Using HEC-1, Training Document No. 15, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.

Hydrologic Engineering Center, 1990. HEC-1 Flood Hydrograph Package, Program Users Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático), 2007, Cuarto informe de evaluación del Cambio Climático, <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)>.

Lagos, M, & Vargas, X. 2011. Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule. Sociedad Chilena de Hidráulica, XX Congreso Chileno de Hidráulica.

Moss, RH, Edmonds, JA, Hibbard, KA, Manning, MR, Rose, SK, van Vuuren, DP, Carter, TR, Emori, S, Kainuma, M, & Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*,

Raddatz D. 2011 “Efecto del cambio climático en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas. Análisis en cuencas pluviales de la zona central de Chile para el escenario A2” Riahi, K, Rao, S, Krey, V, Cho, C, Chirkov, V, Fischer, G, Kindermann, G, Nakicenovic, N, & Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*.

RODHOS, A&P Ltda. 2008, Levantamiento de Parámetros Para la Modelación de Cuencas Pluviales no Controladas en la VII y VIII región.

SCS, 1972 - (Soil Conservation Service). *National Engineering Handbook*, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Soil Conservation Service, United States., & Mockus, V. 1972. *National Engineering Handbook: Hydrology*.

Varas, E. 1985. Hietogramas de Tormentas de Diseño, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 7-9 Noviembre, Concepción.

Varas E, 1985. Influencia del Hietograma de una Tormenta en la Crecida Resultante.

Viessman, W. y G. L. Lewis 2003. *Introduction to Hydrology*. Pearson Education Inc., 5ª ed., 612 pp. Wilby, RL, Dawson, CW, & Barrow, EM. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*,

Weyant J, Azar C, Kainuma M, Kejun J, Nakicenovic N, P.R. Shukla, La Rovere E & Yohe G. 2009. FUTURE IPCC ACTIVITIES – NEW SCENARIOS, Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m<sup>2</sup> RCPP Evaluation Panel

Xu, CH, & Xu, Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model *ensemble*. Atmos Oceanic Sci Lett.

## **Anexos**



# Anexo A

## A.1 Escalamiento Temporal de Modelo de Cambio Climático

### A.1.1 Escalamiento Temporal Escenario 2

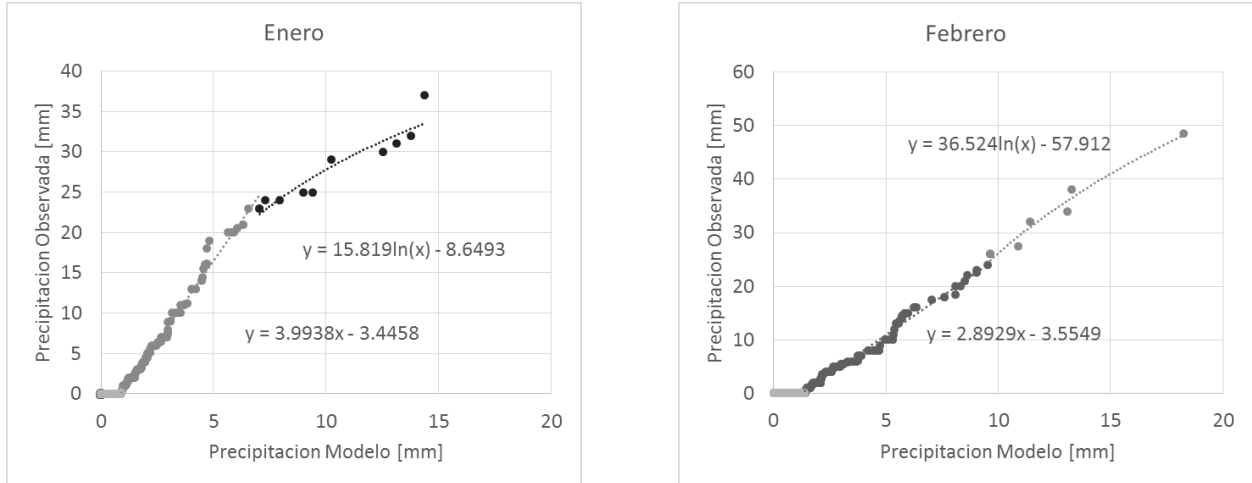


Figura A.1 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 2.

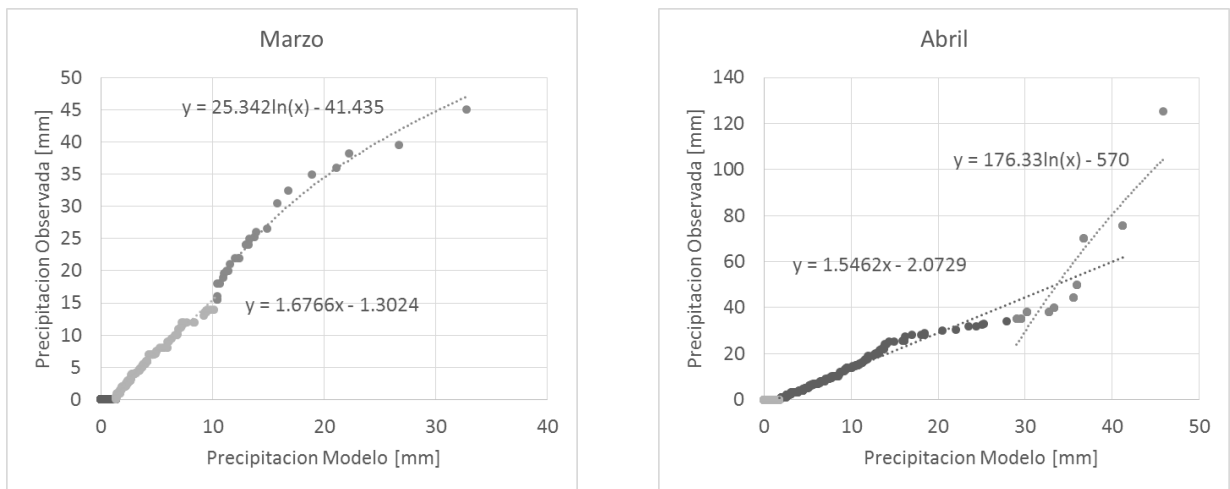


Figura A.2 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 2.

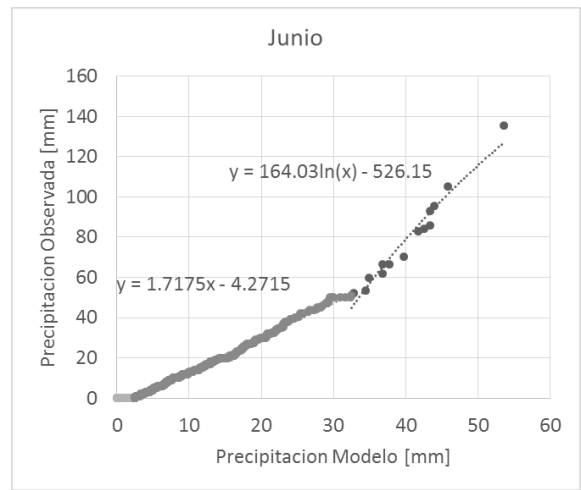
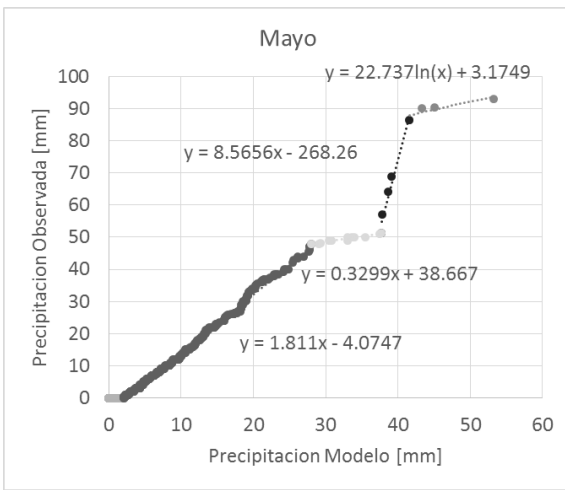


Figura A.3 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 2.

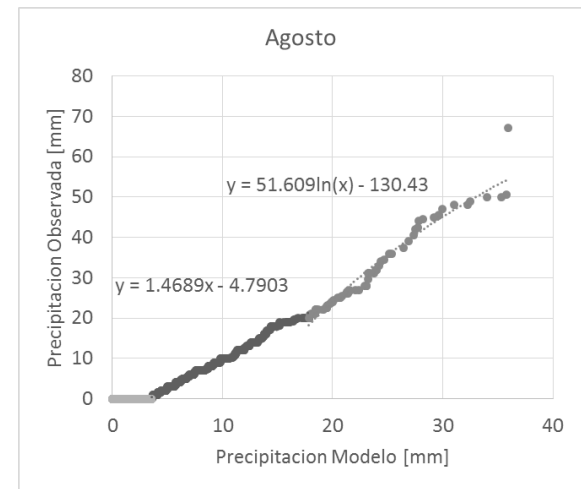
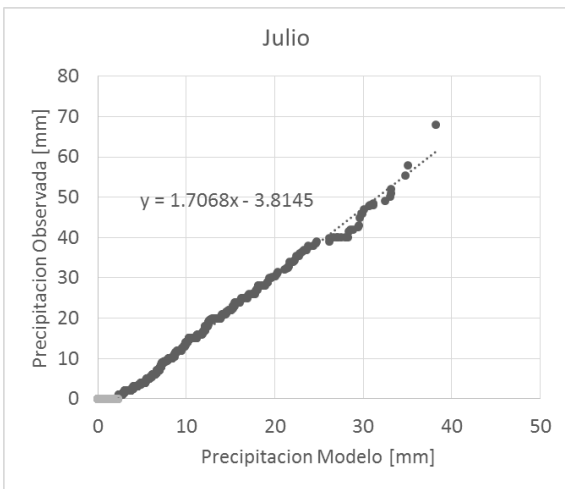


Figura A.4 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 2.

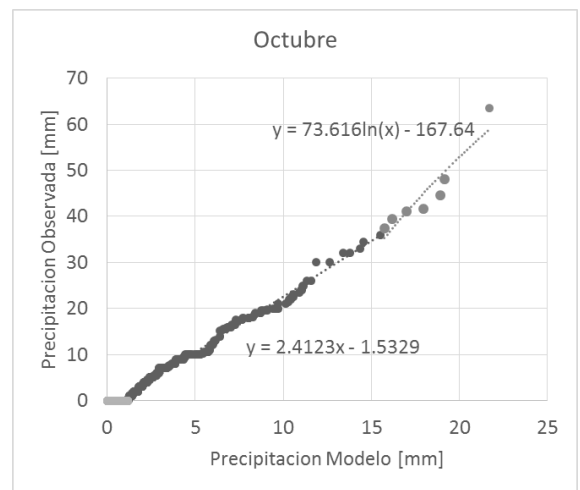
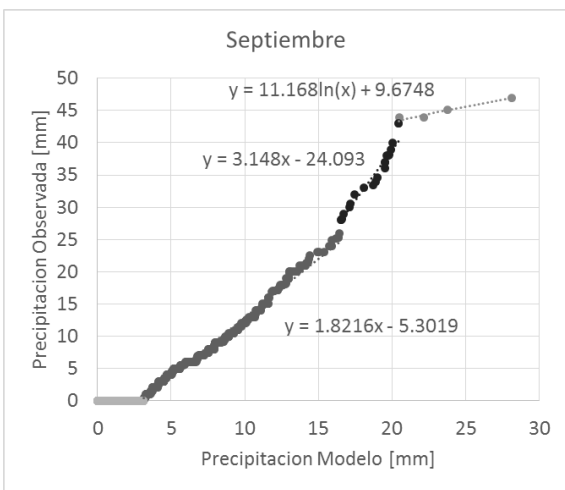


Figura A.5 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 2.

### A.1.2 Escalamiento Temporal Escenario 3

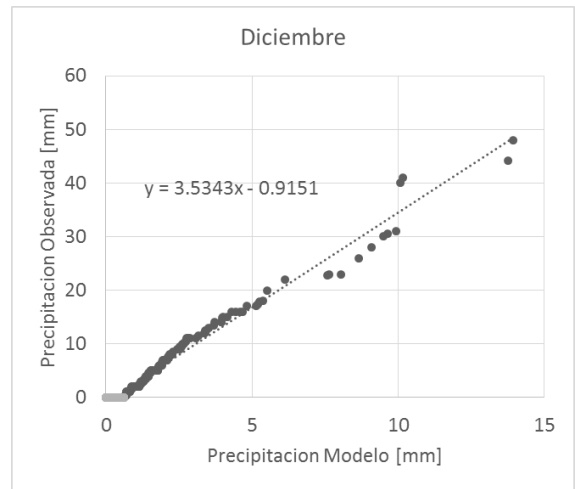
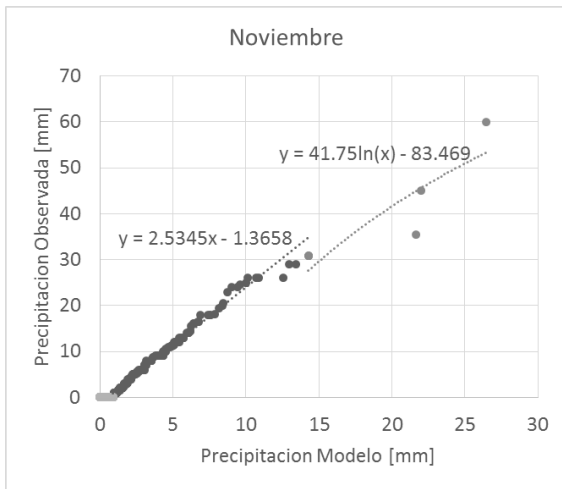


Figura A.6 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 3.

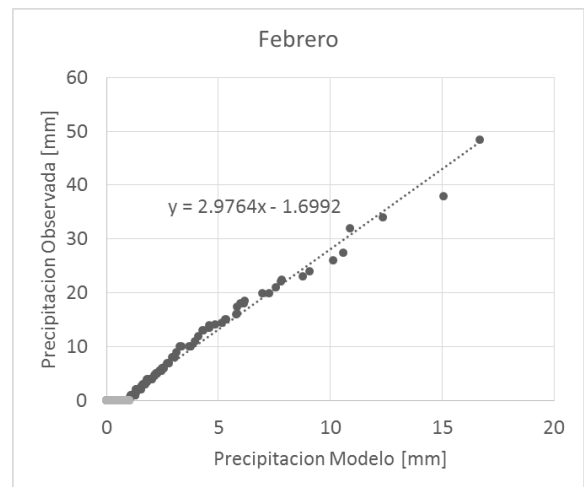
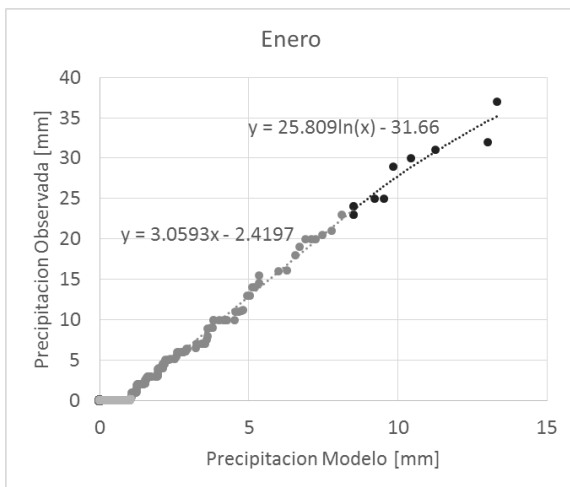


Figura A.7 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 3.

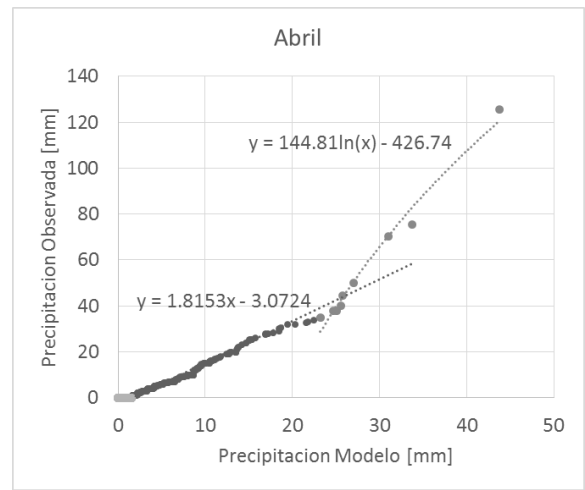
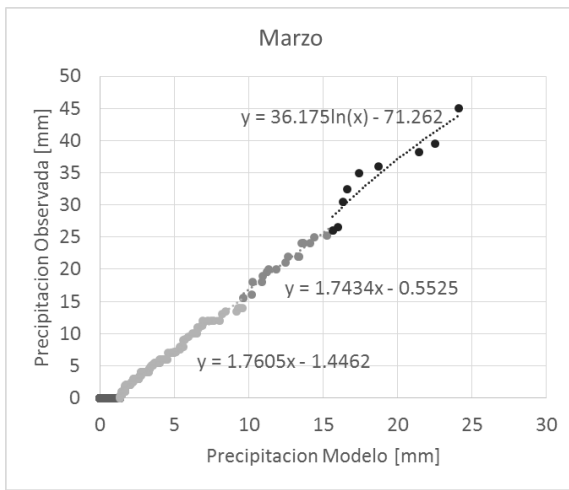


Figura A.8 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 3.

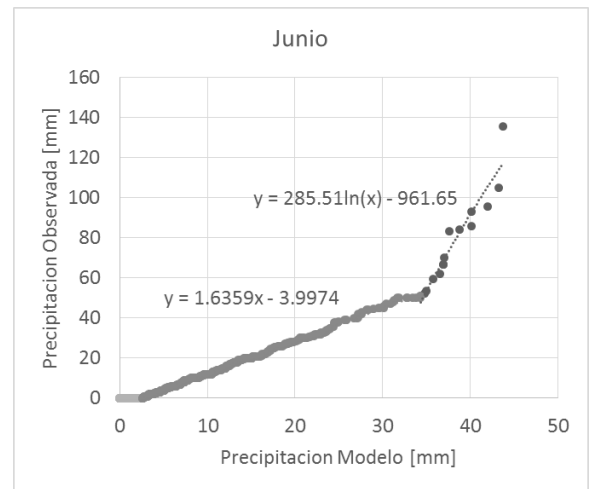
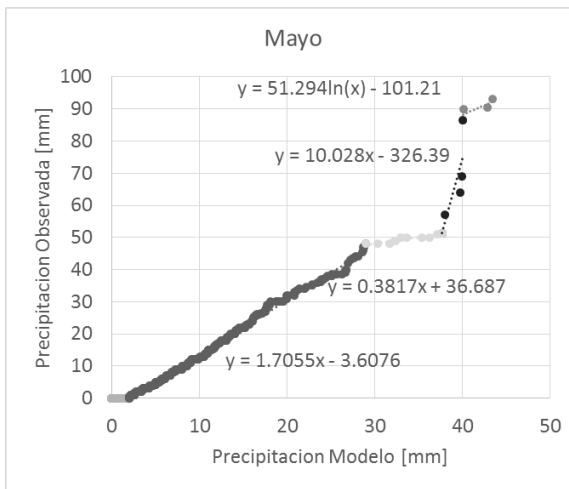


Figura A.9 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 3.

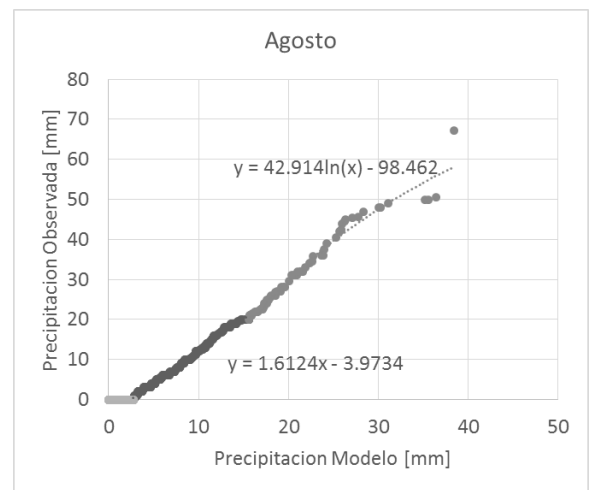
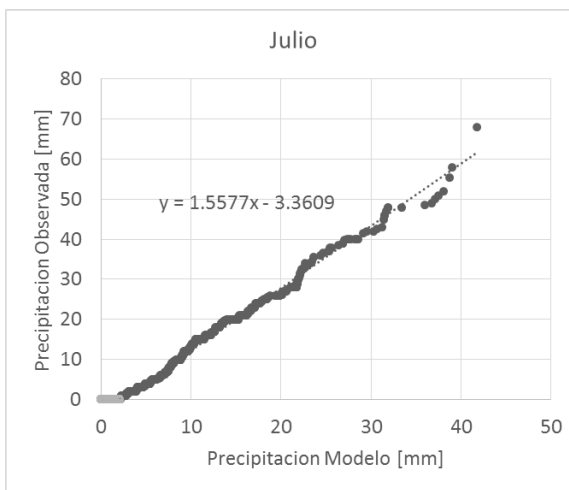


Figura A.10 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 3.

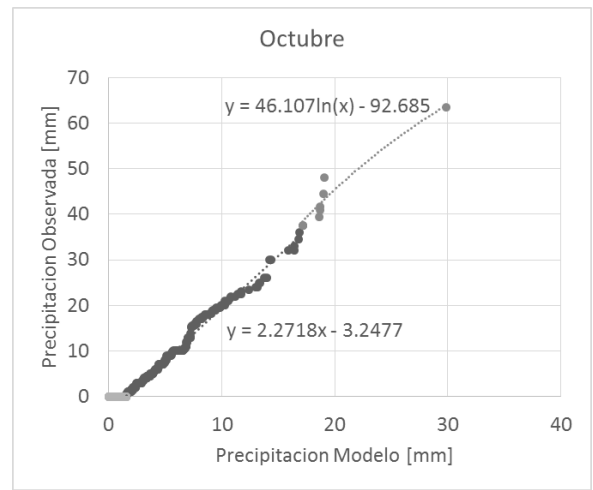
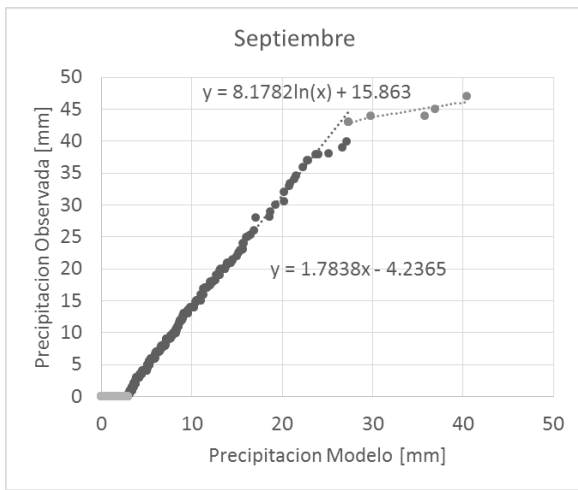


Figura A.11 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 3.

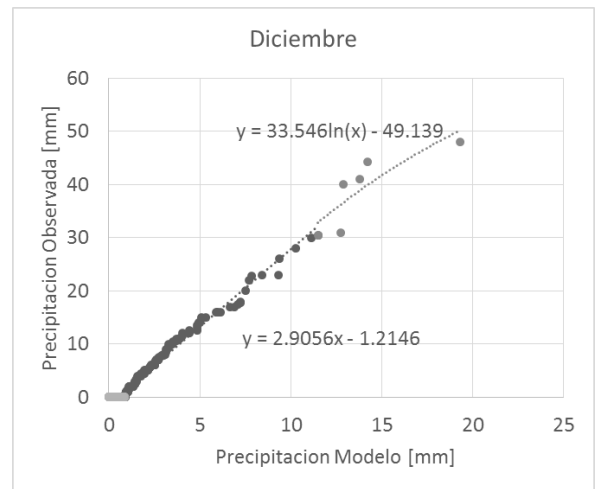
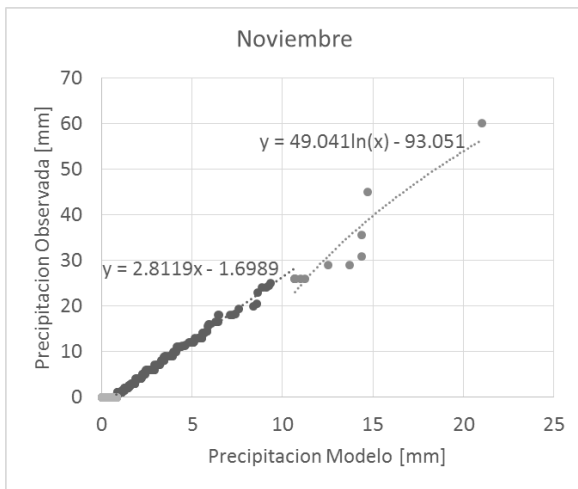


Figura A.12 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 3.

### A.1.3 Escalamiento Temporal Escenario 9

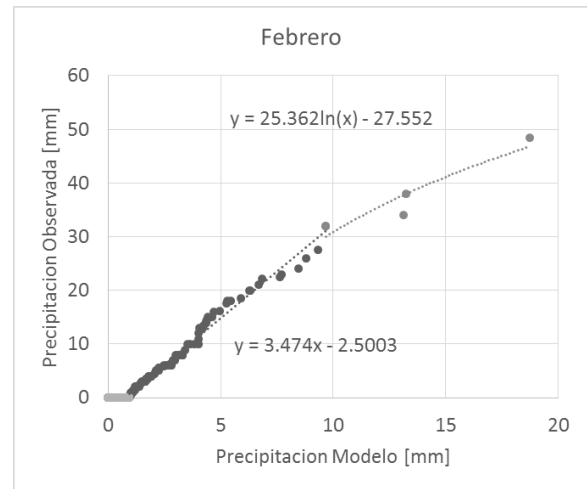
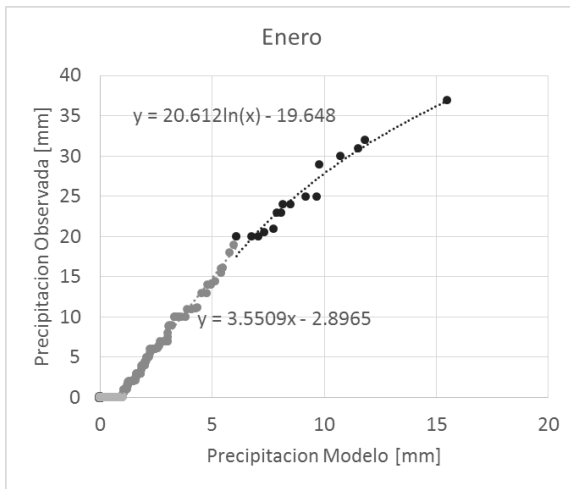


Figura A.13 Escalamiento temporal, meses enero y febrero escenario 9.

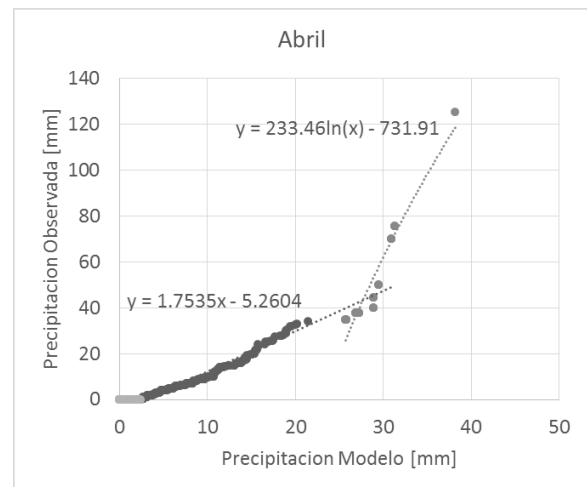
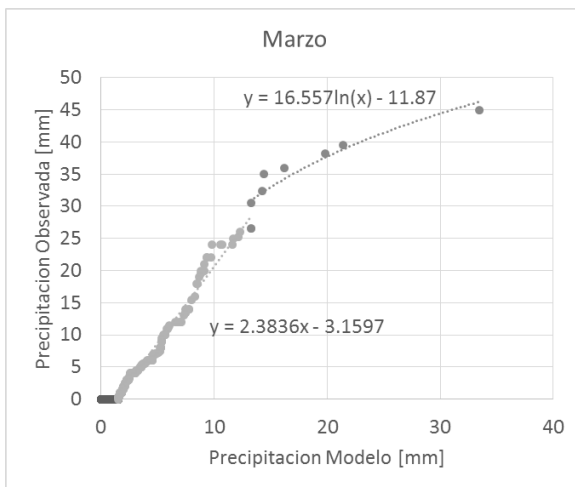


Figura A.14 Escalamiento temporal, meses marzo y abril escenario 9.

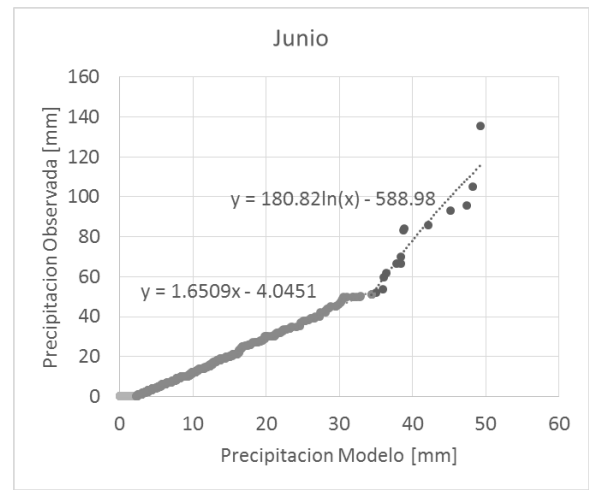
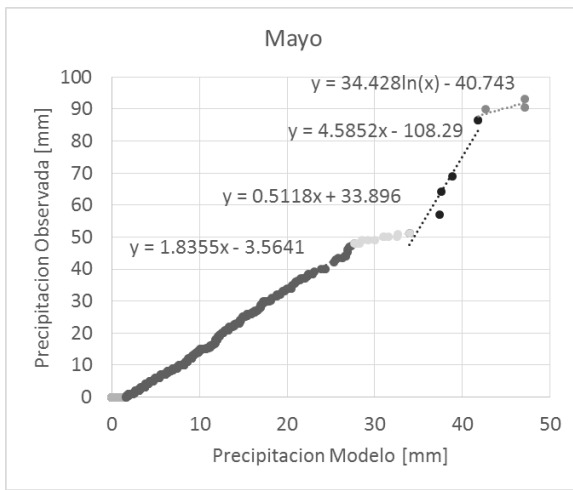


Figura A.15 Escalamiento temporal, meses mayo y junio escenario 9.

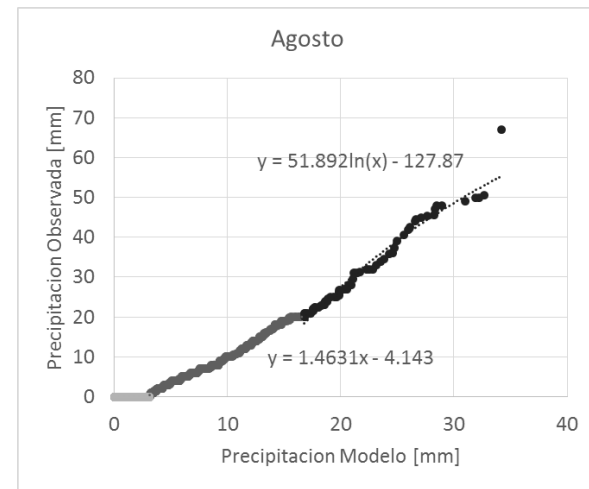
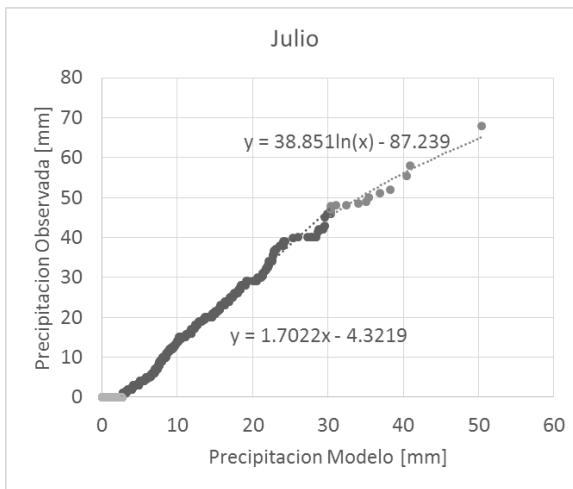


Figura A.16 Escalamiento temporal, meses julio y agosto escenario 9.

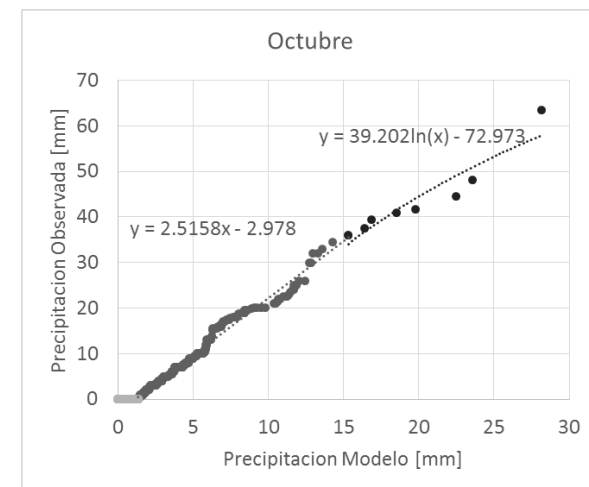
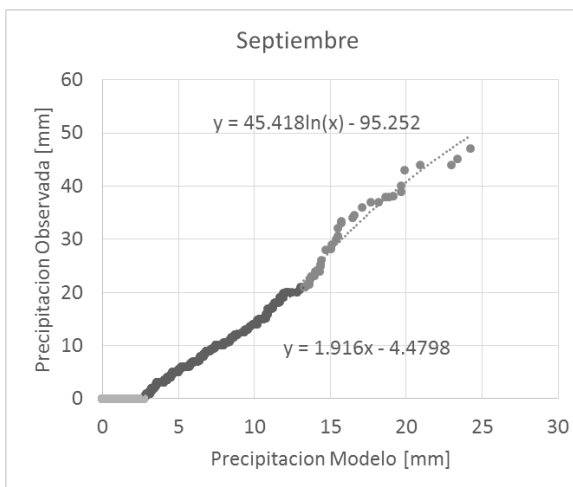


Figura A.17 Escalamiento temporal, meses septiembre y octubre escenario 9.

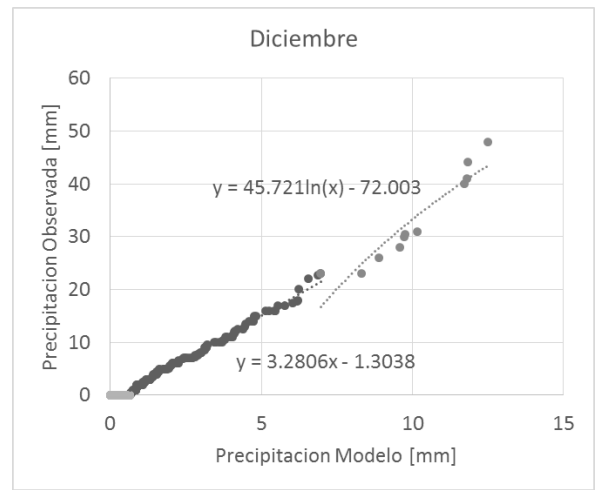
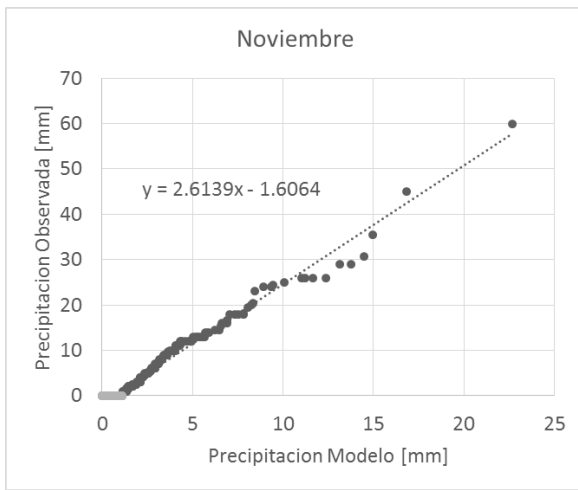


Figura A.18 Escalamiento temporal, meses noviembre y diciembre escenario 9.



## A.2 Precipitación Máxima Acumulada para estimación de coeficientes de duración

Tabla A.1 Precipitación máxima acumulada para 3 años, en dos diferentes estaciones, aplicado a 10 diferentes periodos de duración.

Pte. Camino a Contulmo Precipitación Máxima Acumulada [mm]										
Año	Horas									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
<b>2012</b>	24.5	42.2	65.1	68.9	72.5	73.4	74.8	81.3	94.4	102.3
<b>2013</b>	10.9	16.7	27.4	31.1	32.4	34.5	37.9	42.1	50.2	51.2
<b>2014</b>	16.9	25.2	34.3	40.5	47.9	50.9	54.8	59.1	61.2	64.2

Estero Nonguén Concepción Precipitación Máxima Acumulada [mm]										
Año	Horas									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
<b>2012</b>	11.7	18	23.3	32.9	40.7	43.1	44.9	46.1	49.7	57.3
<b>2013</b>	11.9	23.6	39.7	49.4	52.6	53.5	53.5	55.1	55.4	58.1
<b>2014</b>	16.1	23.4	31.1	44.5	54.7	63.3	64.6	70.8	84.2	103.5

## A.3 Regresiones de Curva IDF

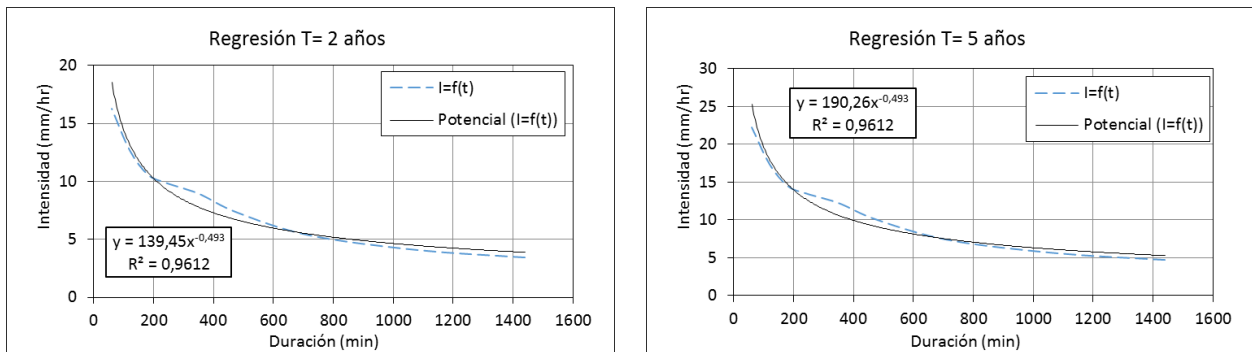


Figura A.19 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 2 y 5 años.

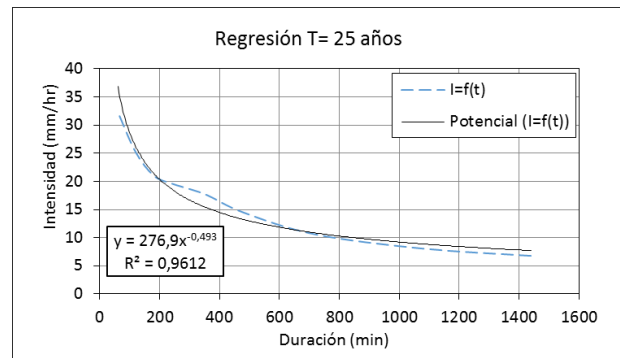
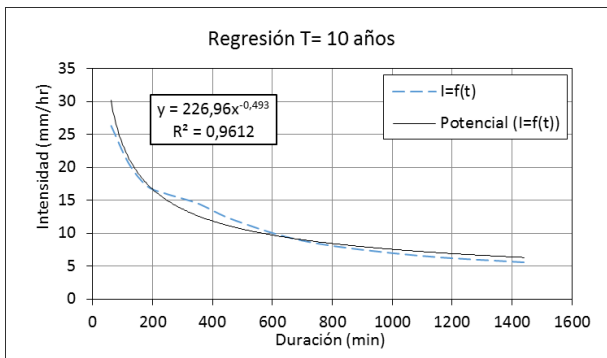


Figura A.20 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 10 y 25 años.

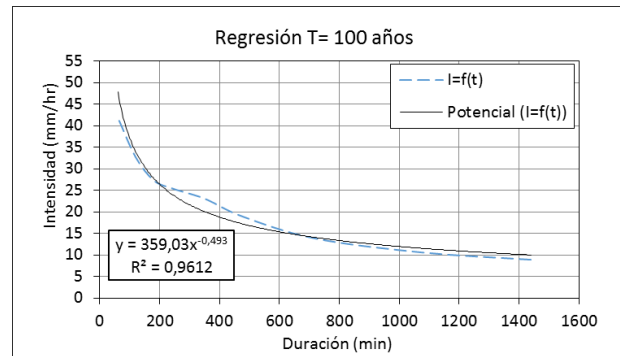
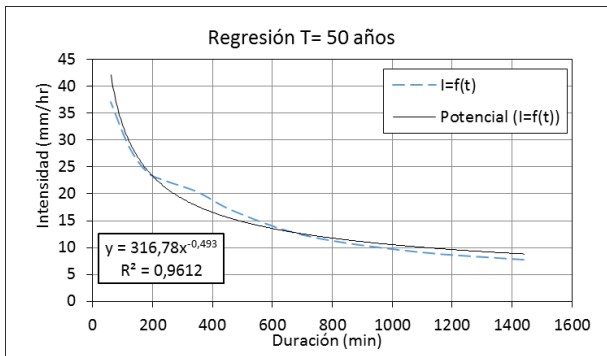


Figura A.21 Regresión intensidad duración, para periodos de retorno 50 y 100 años.

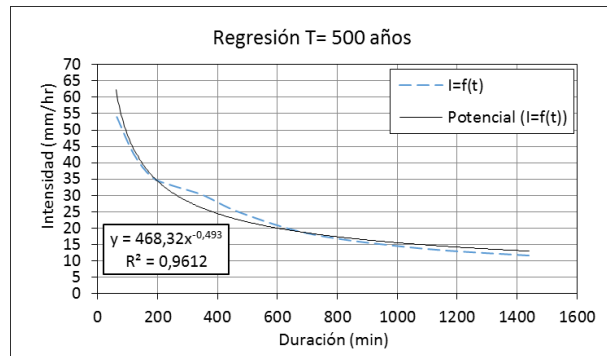


Figura A.22 Regresión intensidad duración, para periodo de retorno 500 años

## A.4 Curvas de Probabilidad Acumulada Para la Estimación de Duraciones Mediante Árbol de Decisión

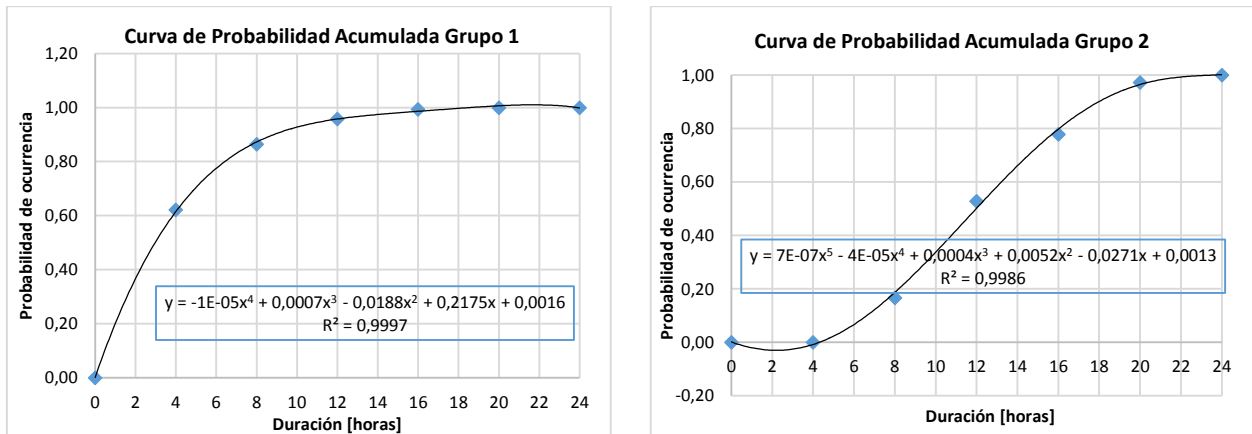


Figura A.23 Curva de probabilidad acumulada del grupo 1 y 2 del árbol de decisión.

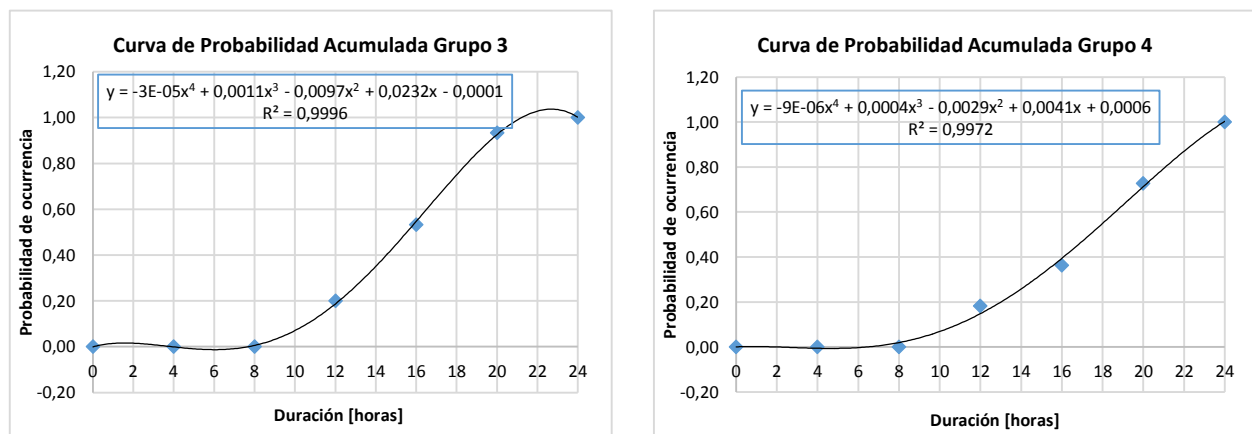


Figura A.24 Curva de probabilidad acumulada del grupo 3 y 4 del árbol de decisión.

# Anexo B

## B.1 Gráficos de Calibración

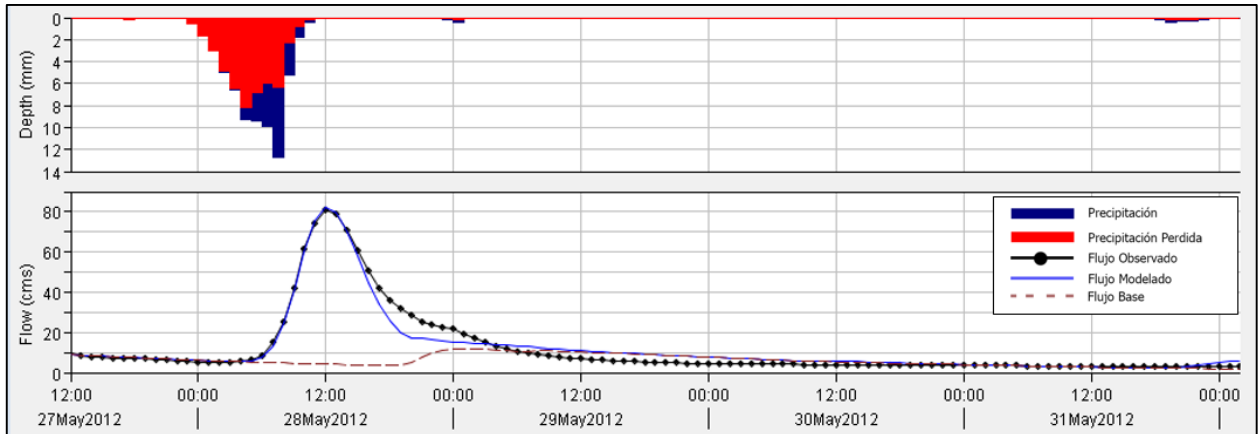


Figura B.1 Calibración 1 HEC-HMS.

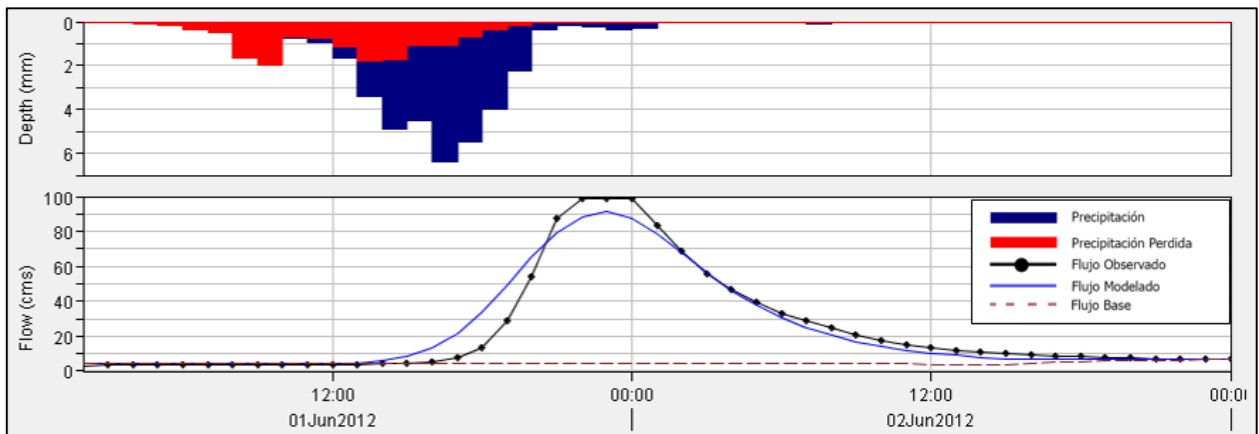


Figura B.2 Calibración 2 HEC-HMS.

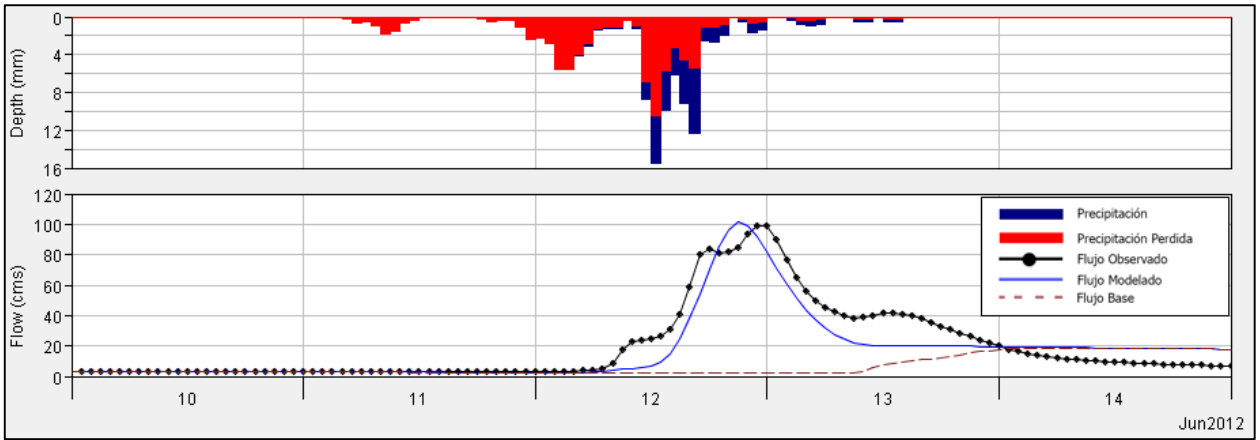


Figura B.3 Calibración 3 HEC-HMS.

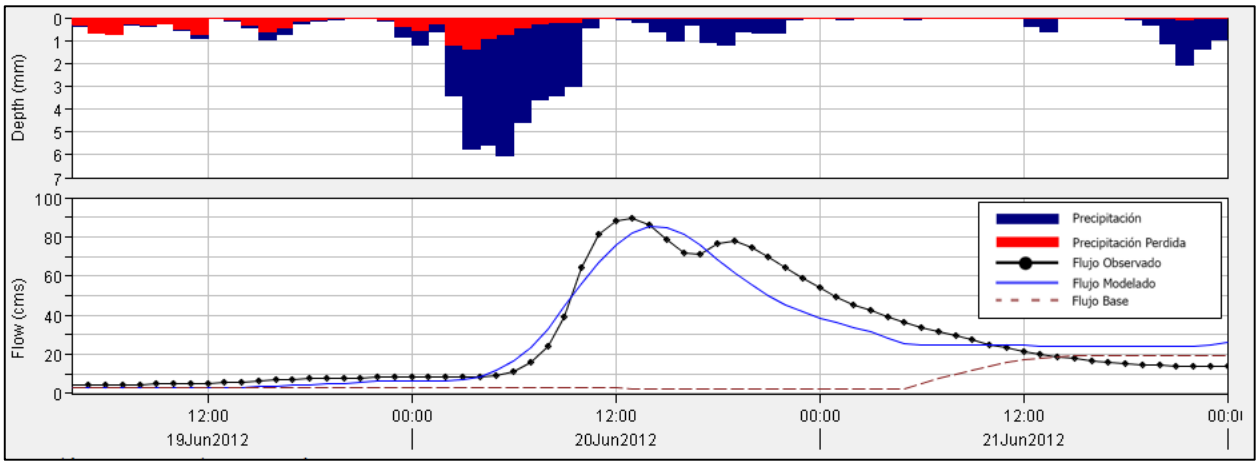


Figura B.4 Calibración 1 HEC-HMS.

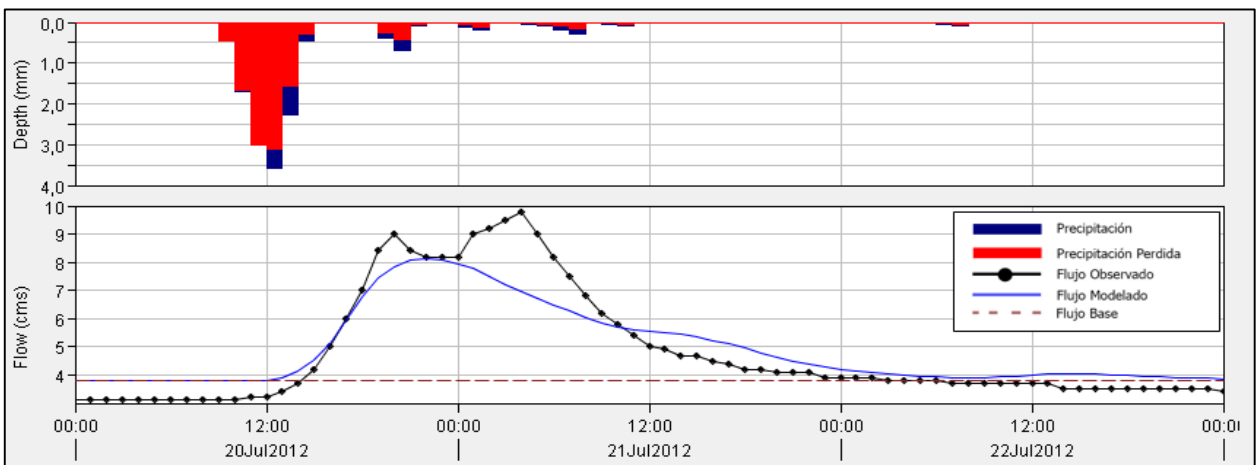


Figura B.5 Calibración 5 HEC-HMS.

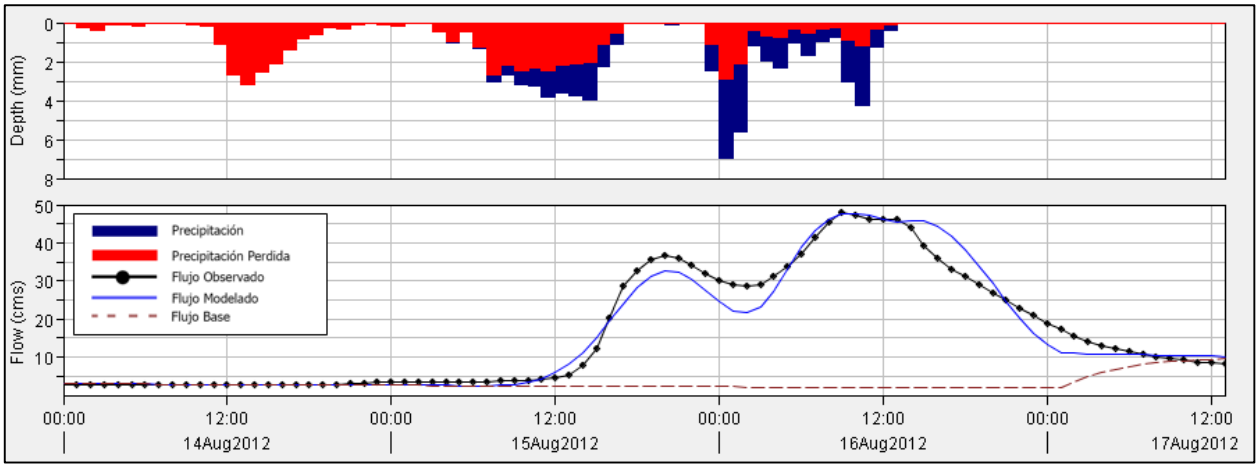


Figura B.6 Calibración 6 HEC-HMS.

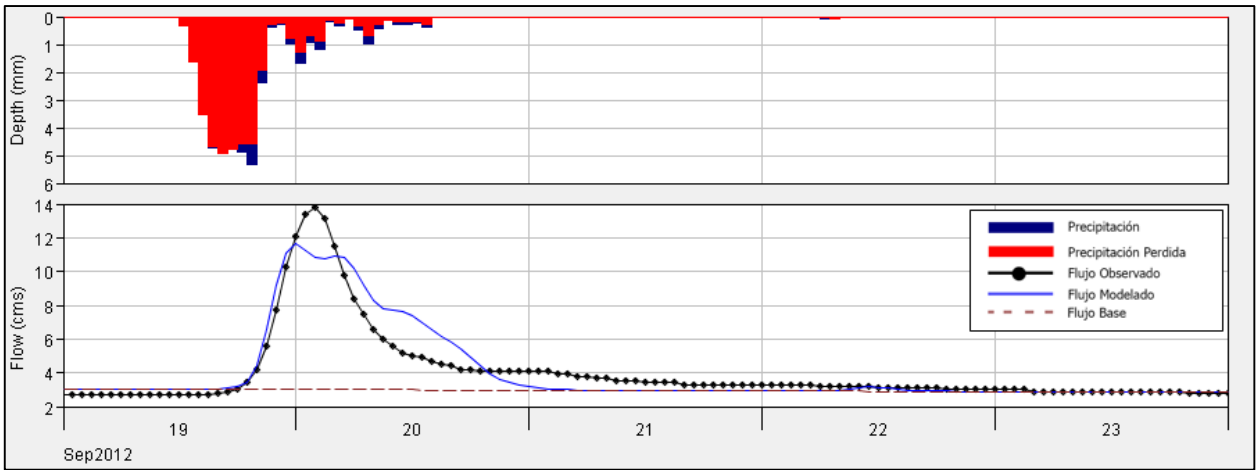


Figura B.7 Calibración 7 HEC-HMS.

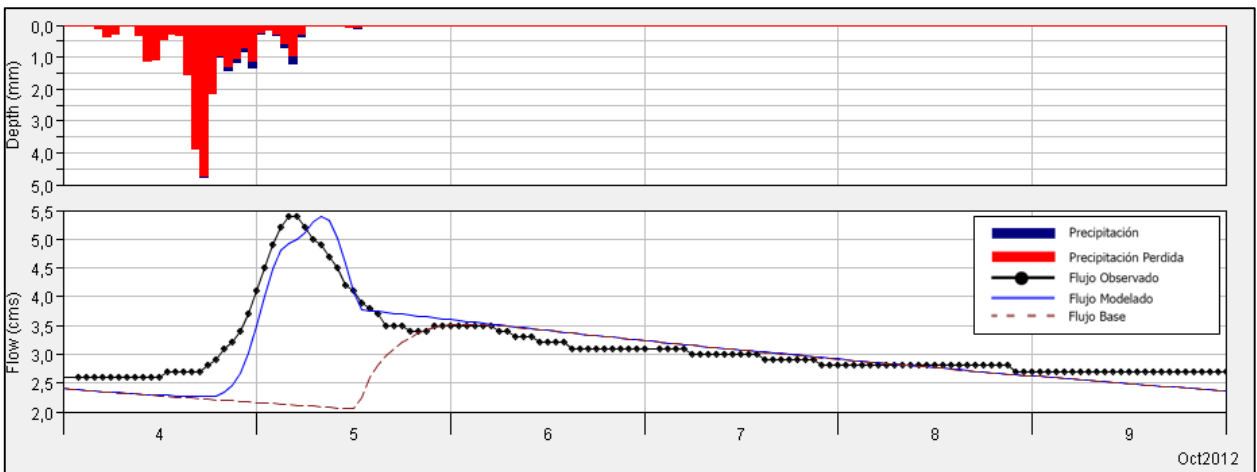


Figura B.8 Calibración 8 HEC-HMS.

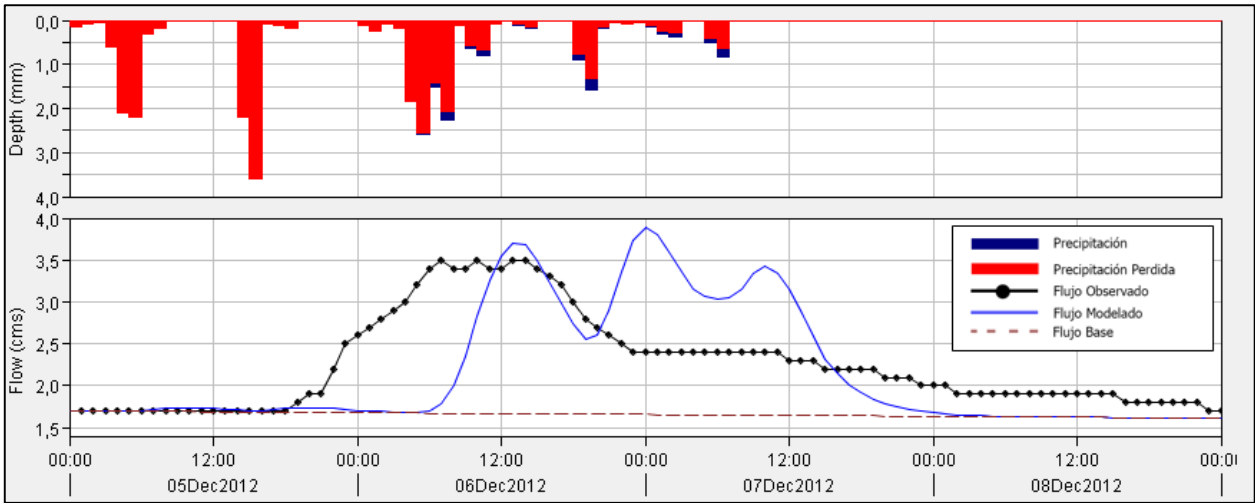


Figura B.9 Calibración 9 HEC-HMS.

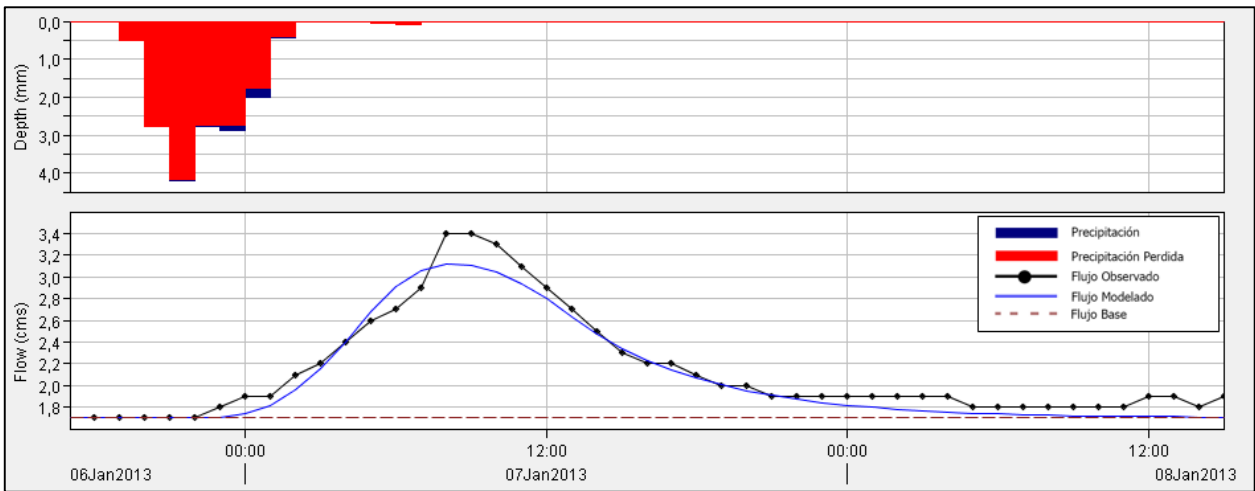


Figura B.10 Calibración 10 HEC-HMS.

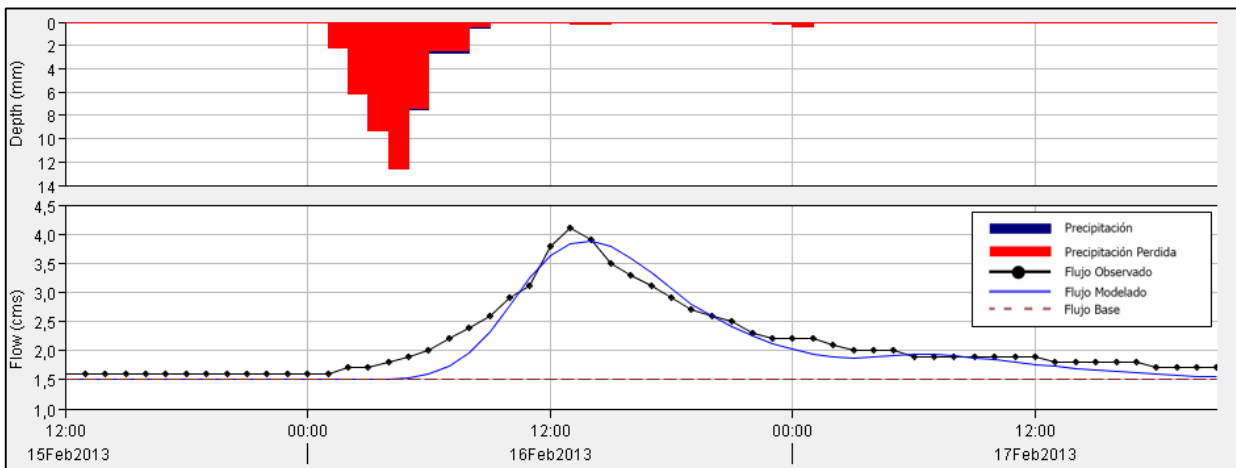


Figura B.11 Calibración 11 HEC-HMS.

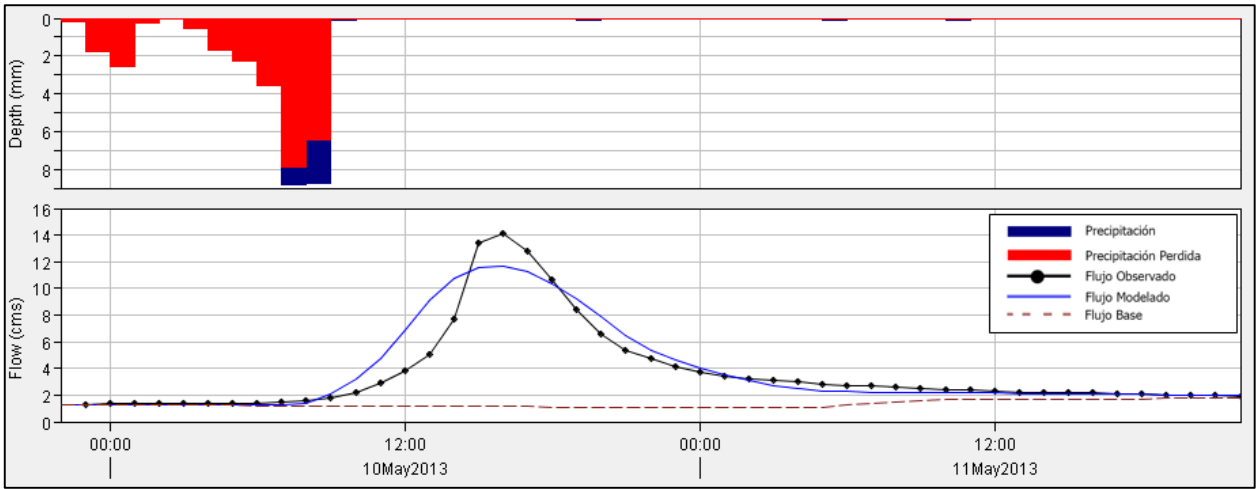


Figura B.12 Calibración 12 HEC-HMS.

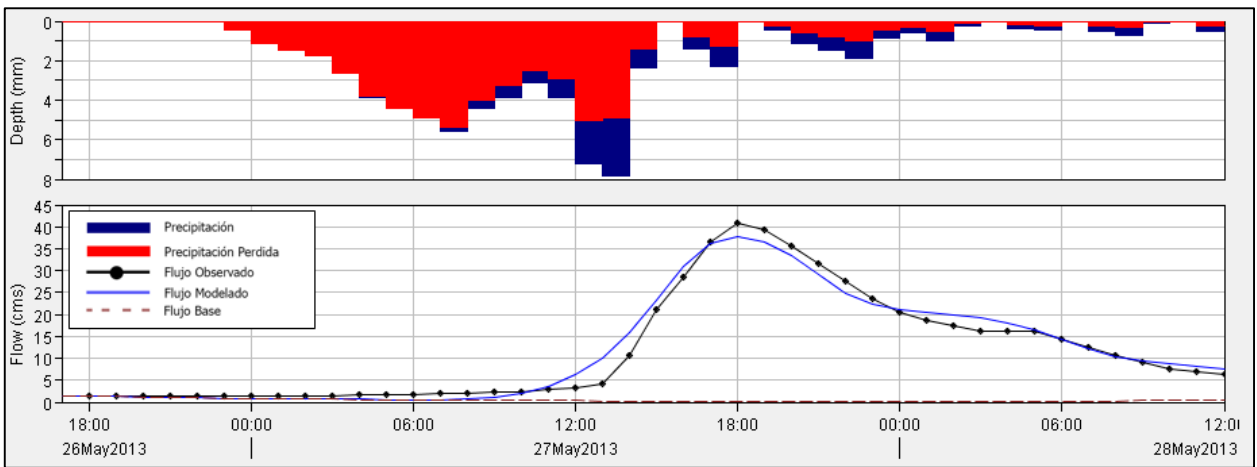


Figura B.13 Calibración 13 HEC-HMS.

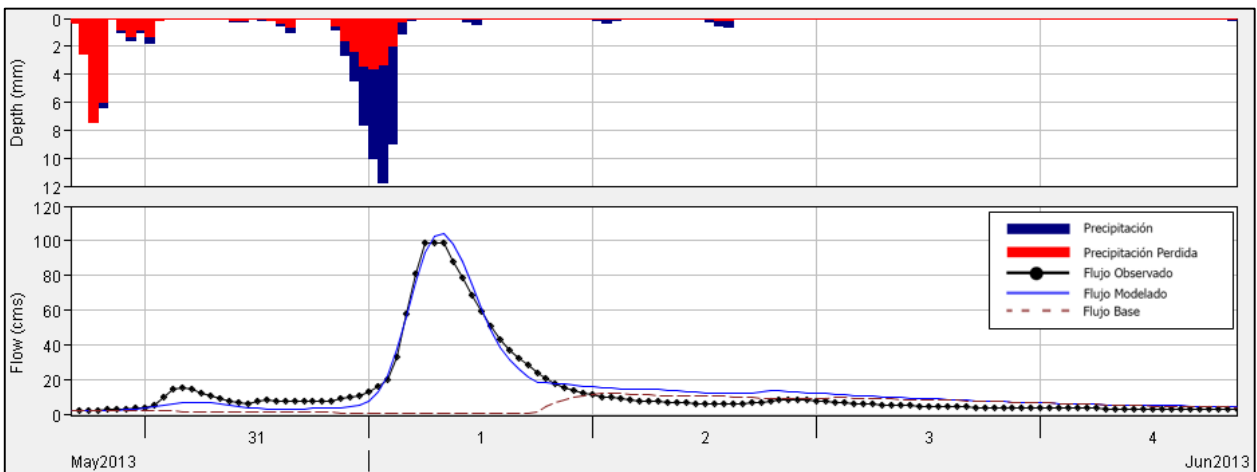


Figura B.14 Calibración 14 HEC-HMS.



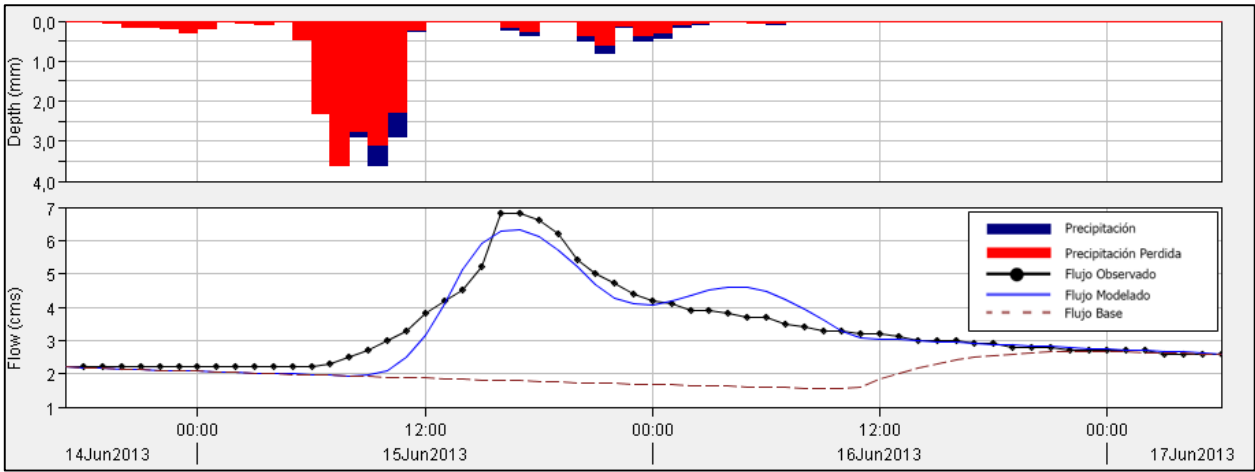


Figura B.15 Calibración 15 HEC-HMS.

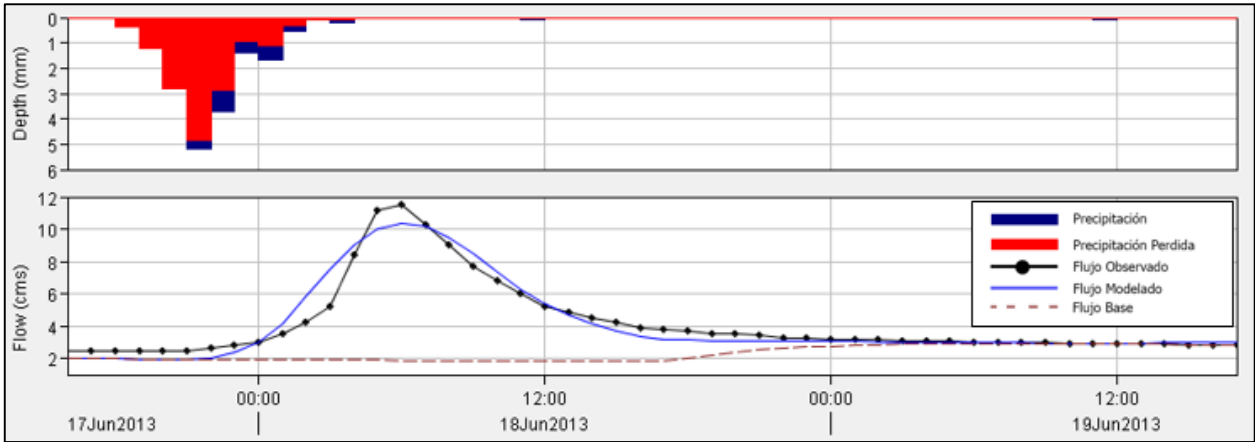


Figura B.16 Calibración 16 HEC-HMS.

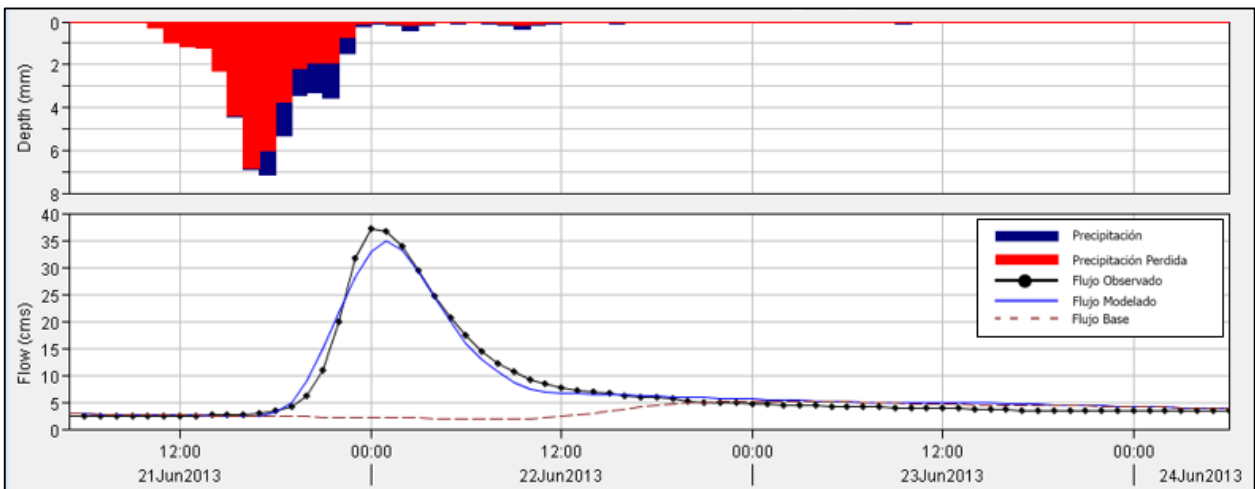


Figura B.17 Calibración 17 HEC-HMS.

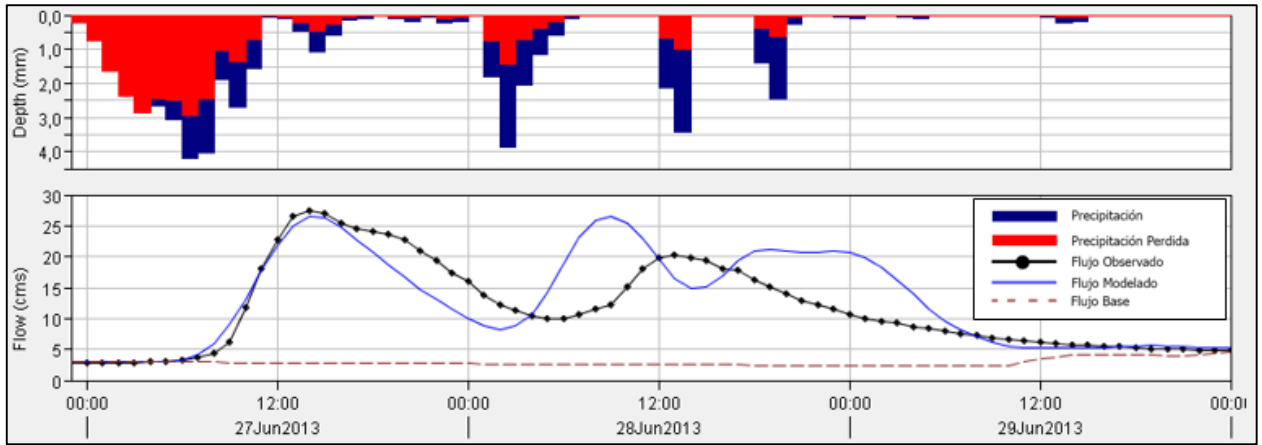


Figura B.18 Calibración 18 HEC-HMS.

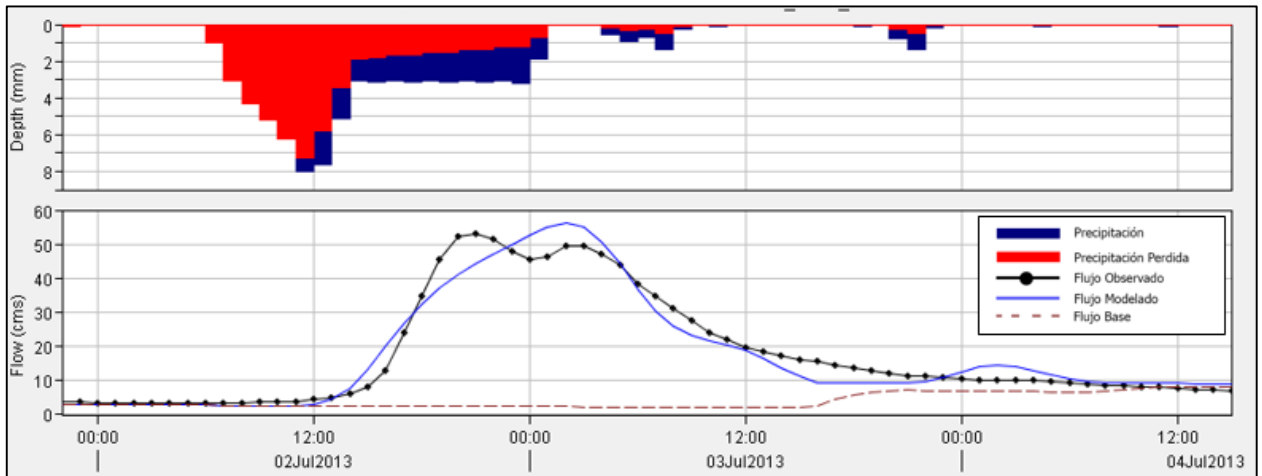


Figura B.19 Calibración 19 HEC-HMS.

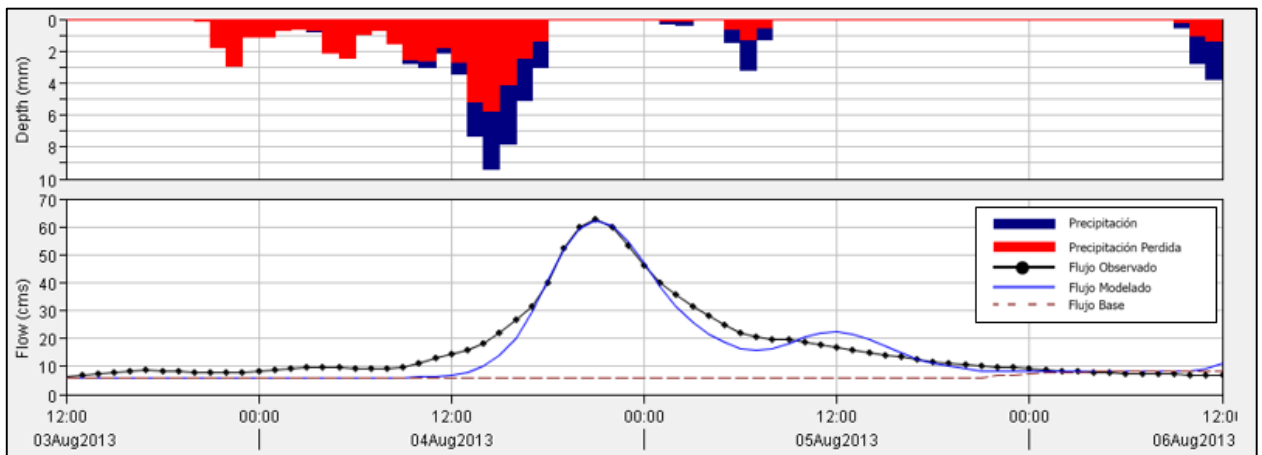


Figura B.20 Calibración 20 HEC-HMS.

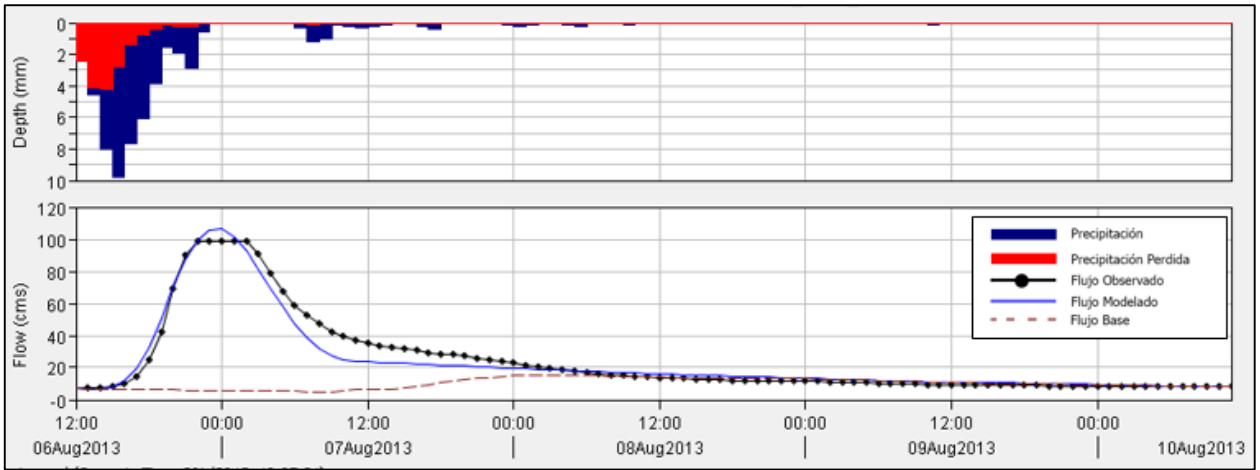


Figura B.21 Calibración 21 HEC-HMS.

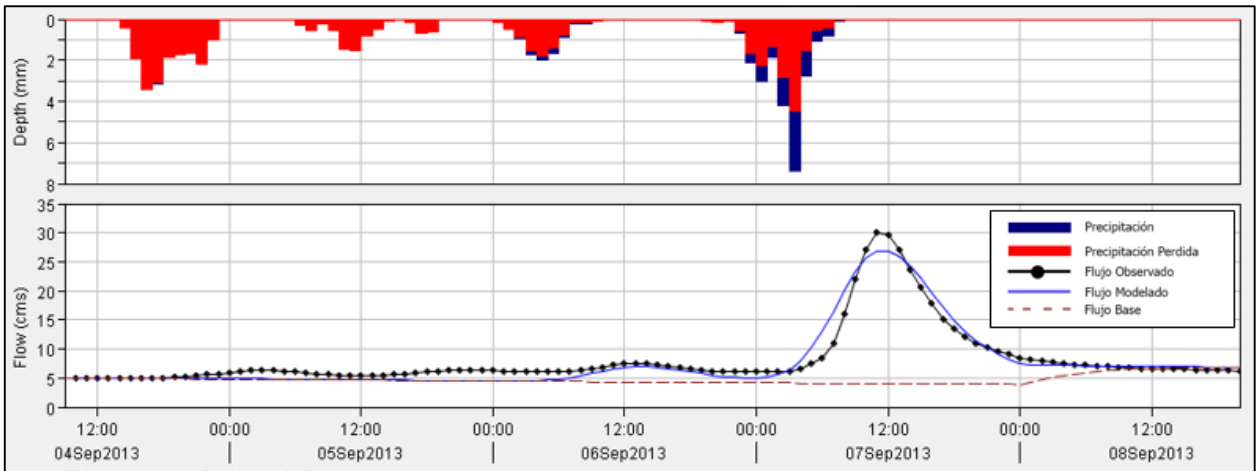


Figura B.22 Calibración 22 HEC-HMS.

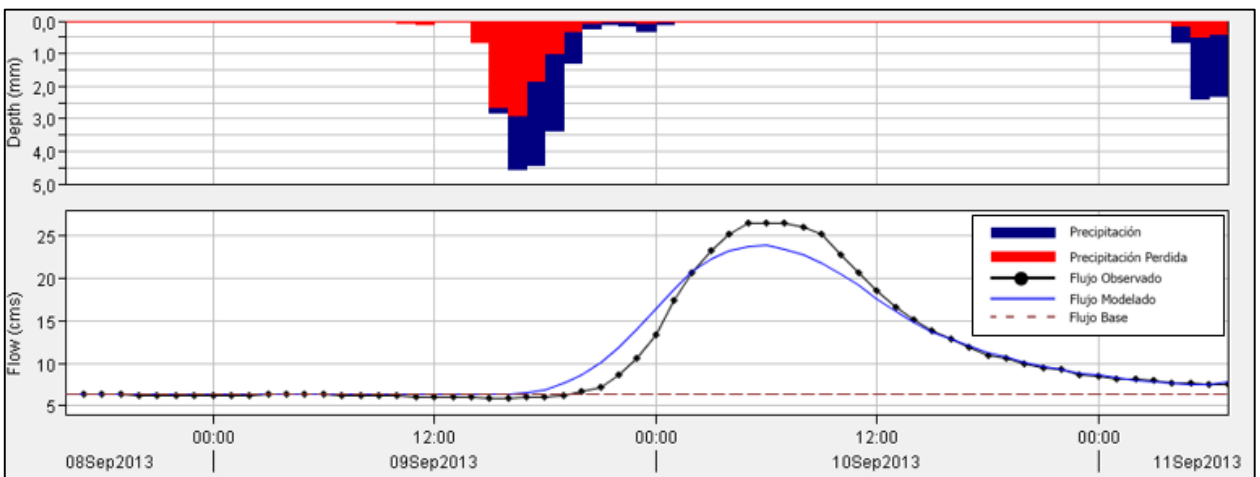


Figura B.23 Calibración 23 HEC-HMS.

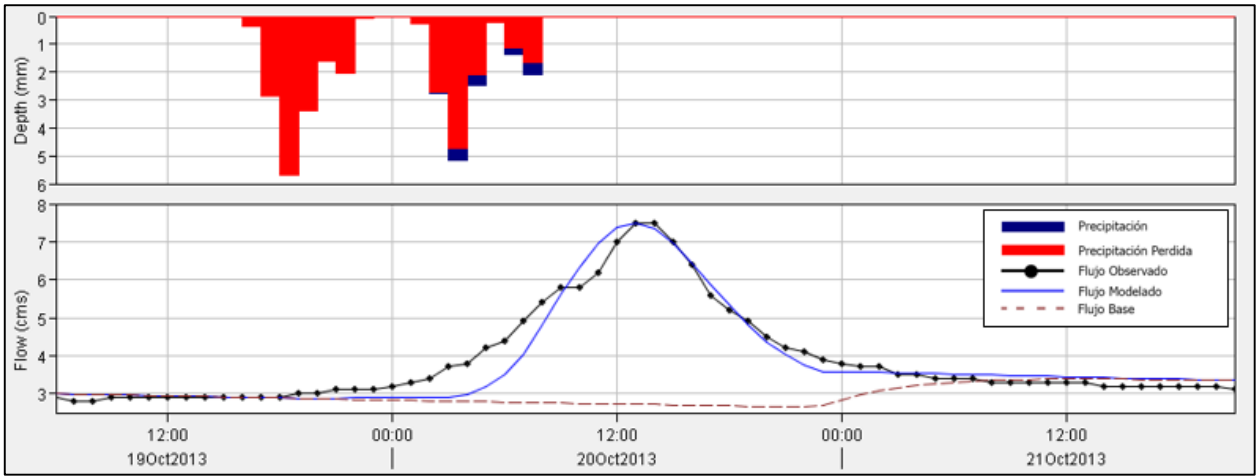


Figura B.24 Calibración 24 HEC-HMS.

## B.2 Gráficos de Validación

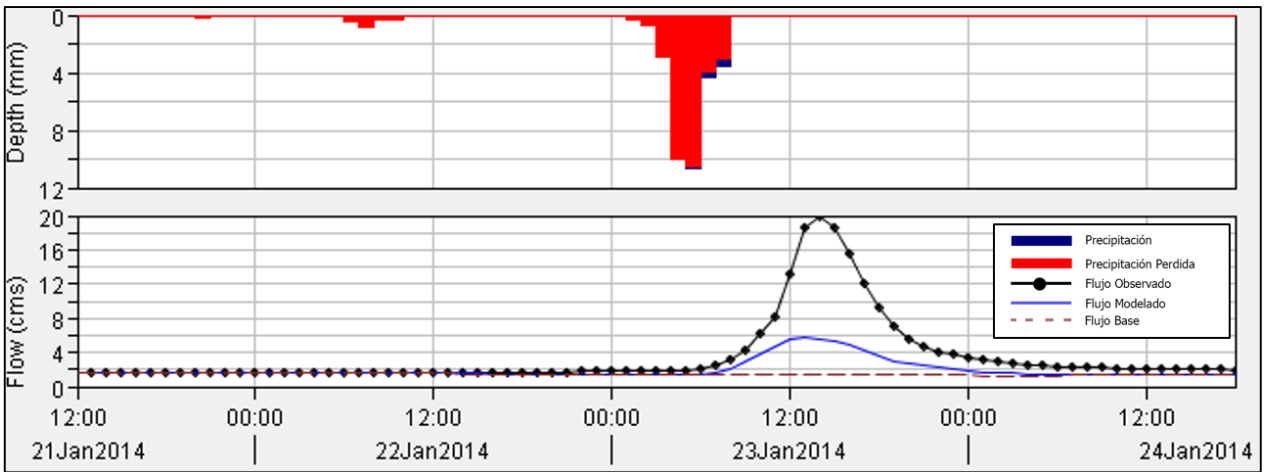


Figura B.25 Validación 1 HEC-HMS.

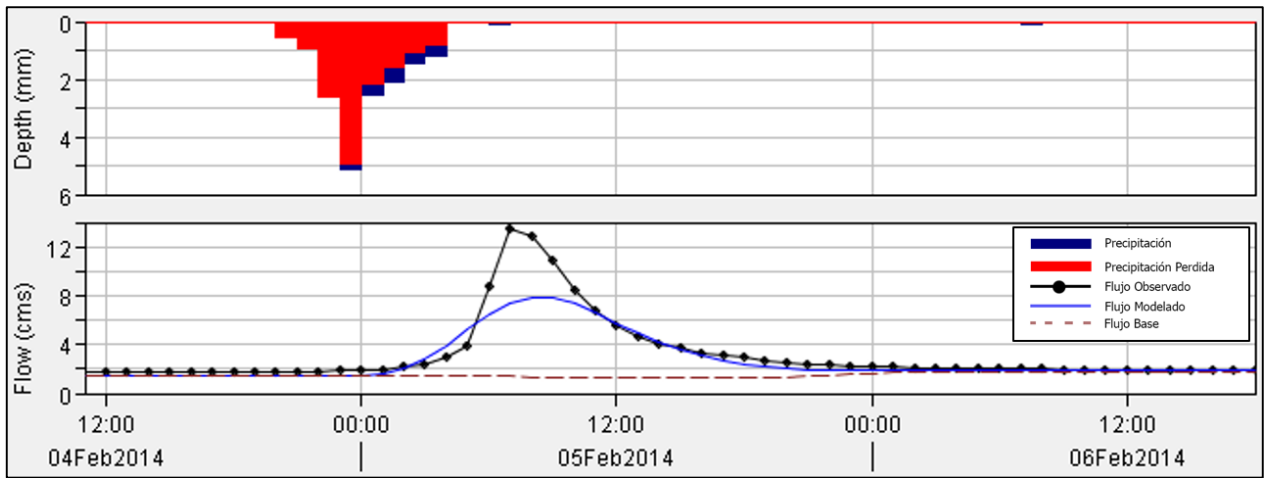


Figura B.26 Validación 2 HEC-HMS.

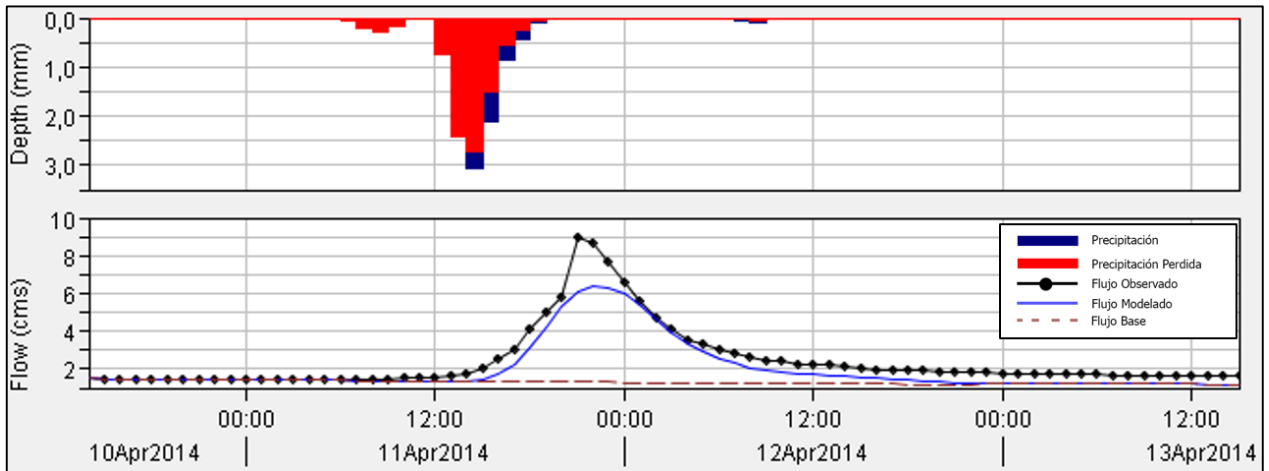


Figura B.27 Validación 3 HEC-HMS.

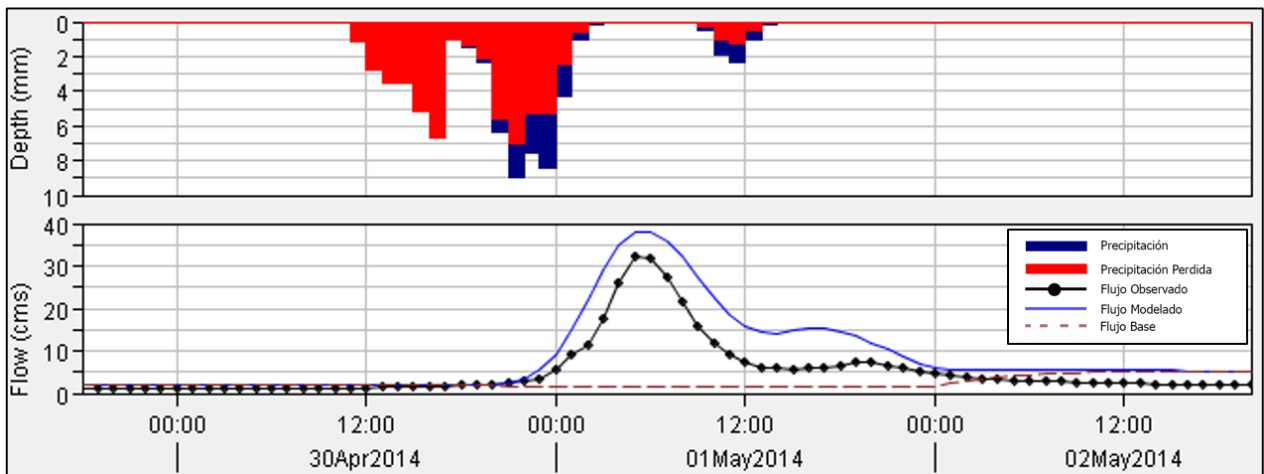


Figura B.28 Validación 4 HEC-HMS.

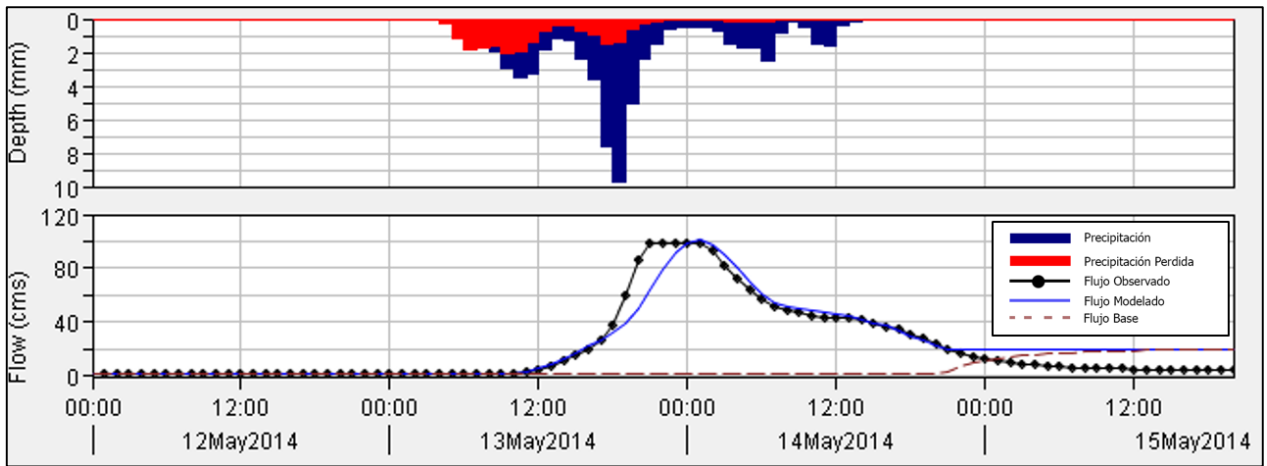


Figura B.29 Validación 5 HEC-HMS.

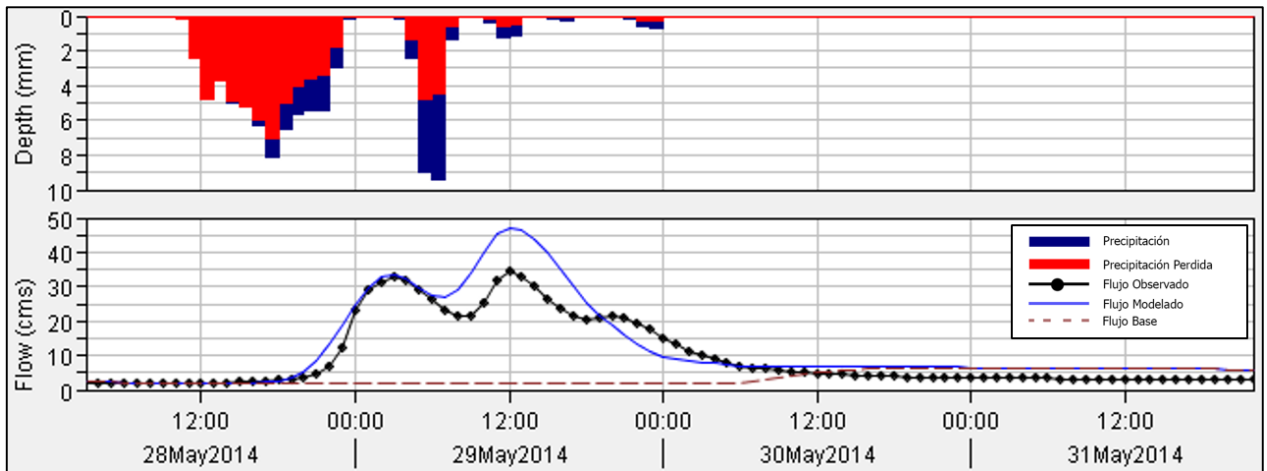


Figura B.30 Validación 6 HEC-HMS.

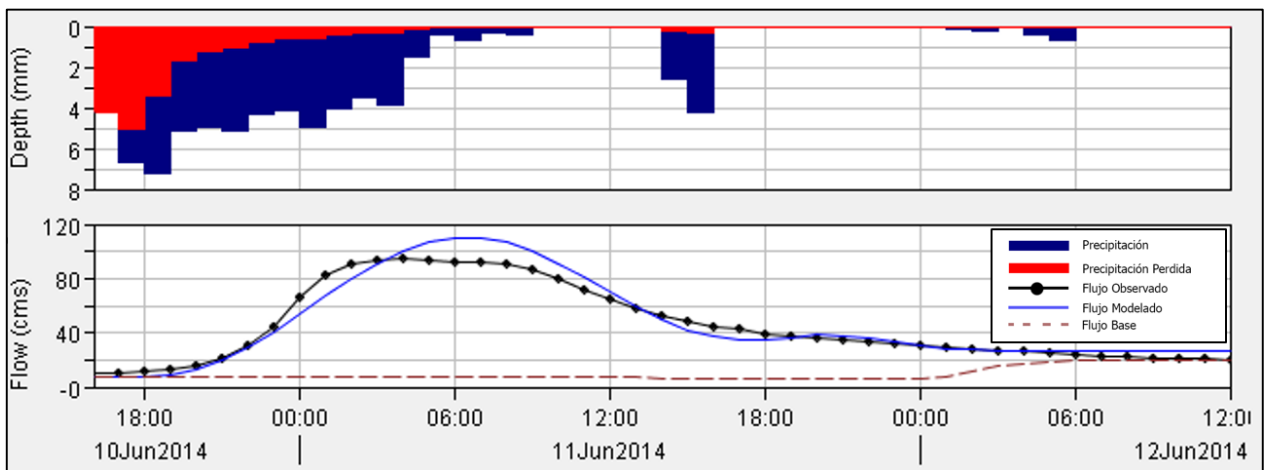


Figura B.31 Validación 7 HEC-HMS.

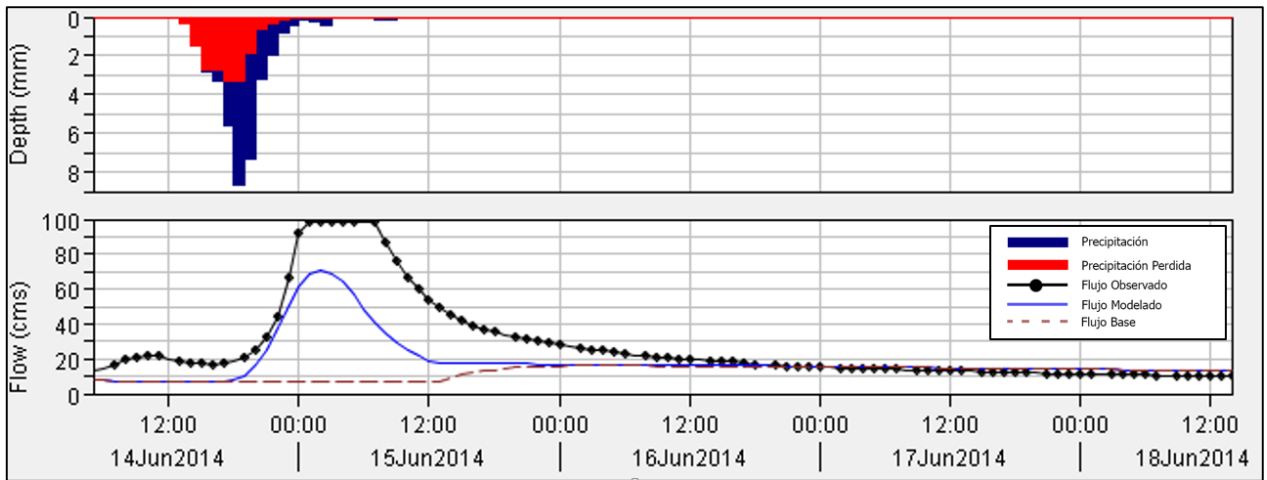


Figura B.32 Validación 8 HEC-HMS.

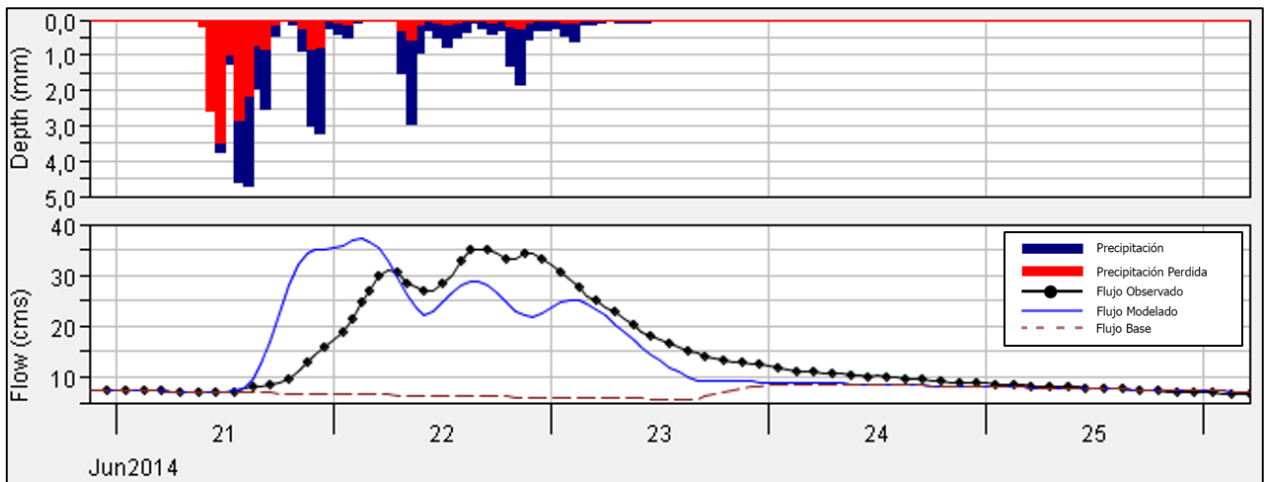


Figura B.33 Validación 9 HEC-HMS.

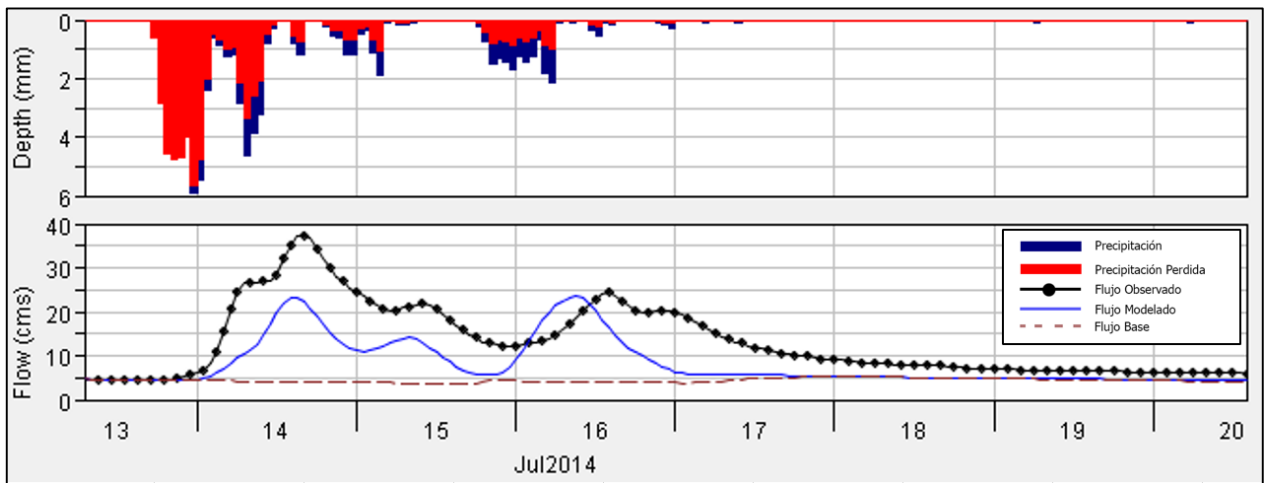


Figura B.34 Validación 10 HEC-HMS.

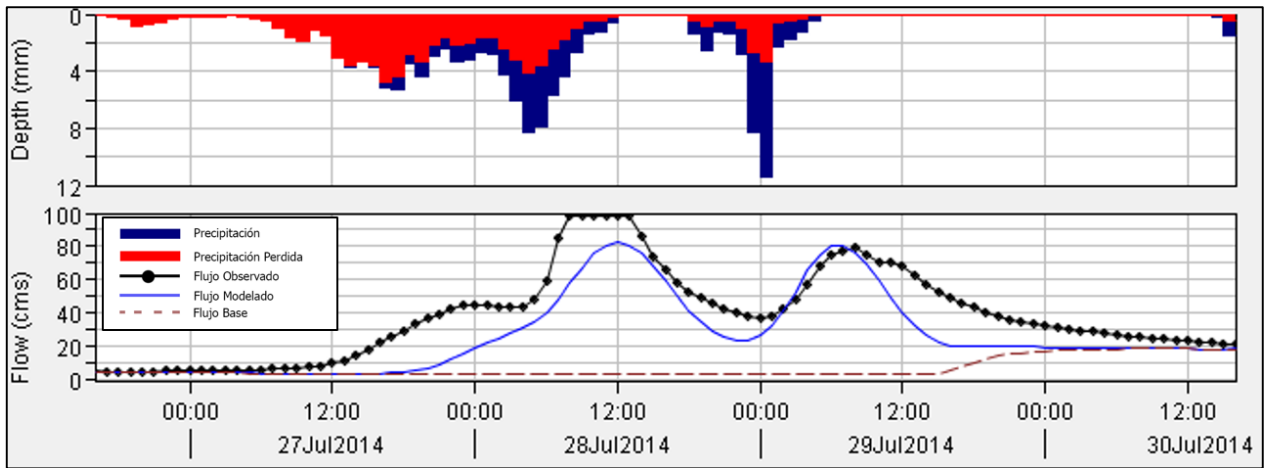


Figura B.35 Validación 11 HEC-HMS.

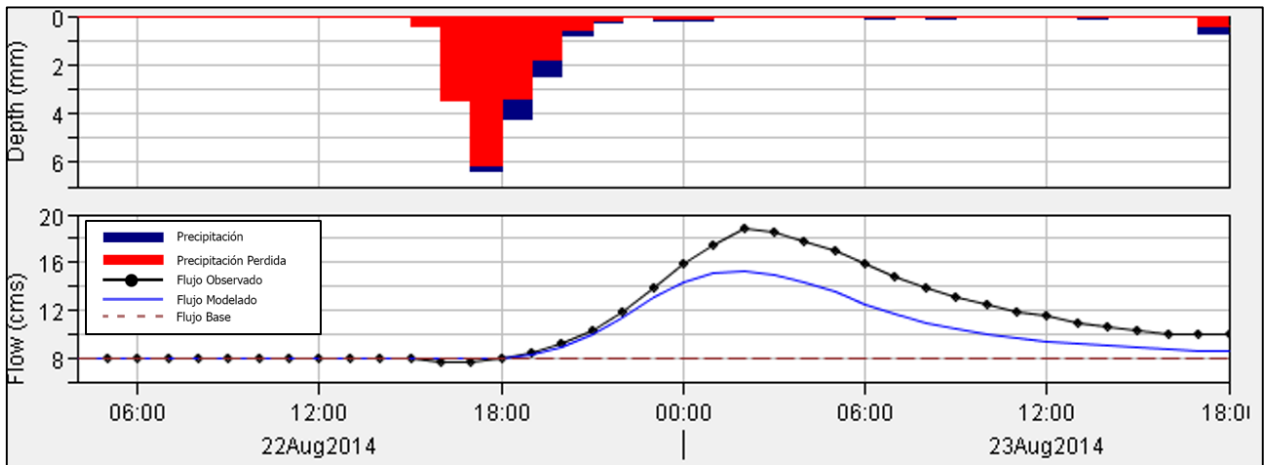


Figura B.36 Validación 12 HEC-HMS.

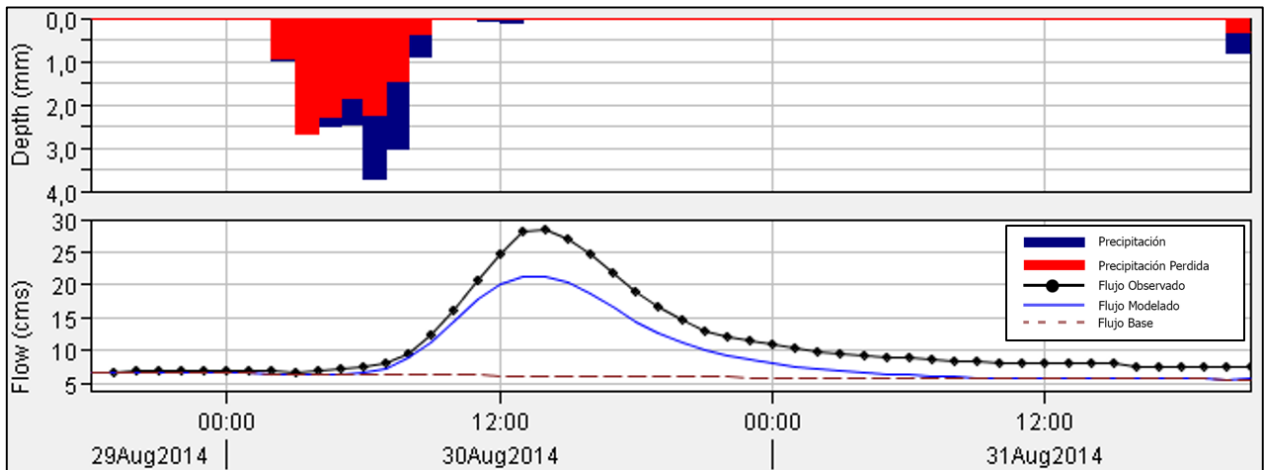


Figura B.37 Validación 13 HEC-HMS.



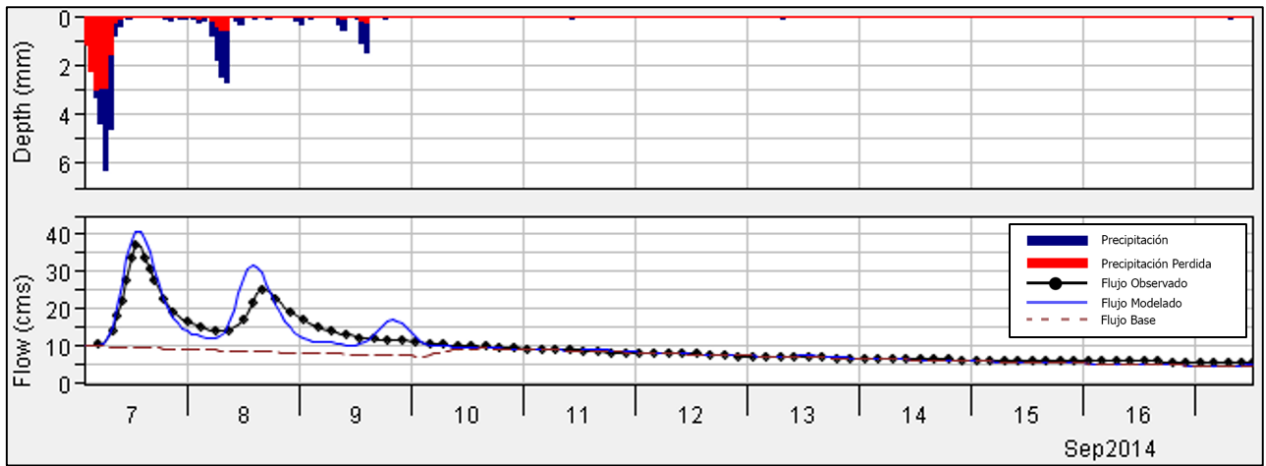


Figura B.38 Validación 14 HEC-HMS.

# Anexo C

## C.1 Análisis de Frecuencia de Proyecciones de Precipitaciones

Tabla C.1 Resultados del análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 24 horas estación Butamalal, para diferentes métodos de segregación de precipitaciones, para periodos de retorno de 10, 20 y 50 años

<b>Precipitaciones mediante segregación de bloques alternados</b>					
<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel</b>
<b>10</b>	10	132.9	143.3	182.6	118.9
<b>20</b>	5	151.1	163.0	214.0	132.4
<b>50</b>	2	174.5	188.4	254.8	149.8
<b>Precipitaciones mediante segregación de Varas probabilidad de excedencia 10%</b>					
<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel</b>
<b>10</b>	10	132.9	144.1	183.6	119.4
<b>20</b>	5	151.1	163.6	215.2	132.8
<b>50</b>	2	174.5	188.8	256.1	150.1
<b>Precipitaciones mediante segregación de Varas probabilidad de excedencia 50%</b>					
<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel</b>
<b>10</b>	10	132.9	144.1	183.3	119.2
<b>20</b>	5	151.1	163.7	214.8	132.6
<b>50</b>	2	174.5	189.0	255.6	149.9
<b>Precipitaciones mediante segregación de Varas probabilidad de excedencia 90%</b>					
<b>T</b>	<b>P_exc</b>	<b>Hist</b>	<b>Ens 2</b>	<b>Ens 3</b>	<b>Ens 9</b>
<b>[Años]</b>	<b>[%]</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel</b>
<b>10</b>	10	132.9	144.5	183.2	119.6
<b>20</b>	5	151.1	164.1	214.6	133.0
<b>50</b>	2	174.5	189.3	255.2	150.3

## C.2 Resultados Curvas de Variación Estacional

Tabla C.2 Valores de curva de variación estacional para proyecciones de escenarios futuros mediante segregación de precipitaciones de bloques alternados.

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>20</b>	6.5	15.7	24.7	18.5	12.8	7.6	5.4	3.6	3.0	1.9	2.0	2.6
<b>4</b>	12.1	25.5	38.5	26.8	19.7	12.2	9.5	6.7	5.8	3.6	3.8	5.1
<b>1</b>	16.8	33.5	49.9	33.7	25.5	15.9	12.8	9.2	8.2	5.0	5.3	7.1

Tabla C.3 Valores de curva de variación estacional para registro histórico mediante segregación de precipitaciones de bloques alternados.

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>20</b>	7.8	22.0	27.5	20.6	14.3	10.1	6.5	3.4	2.0	1.6	1.3	1.7
<b>4</b>	14.5	37.2	45.3	31.7	21.7	16.4	11.3	6.0	3.5	2.8	2.5	3.1
<b>1</b>	20.1	49.8	60.0	40.9	27.9	21.5	15.2	8.1	4.7	3.8	3.4	4.1

Tabla C.4 Valores de curva de variación estacional para proyecciones de escenarios futuros mediante el promedio de la segregación de precipitaciones de Varas (10, 50 y 90%).

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>20</b>	6.1	14.9	23.2	17.2	12.0	7.2	5.2	3.4	2.9	1.9	1.9	2.6
<b>4</b>	11.5	24.1	36.0	24.8	18.4	11.5	9.0	6.3	5.5	3.4	3.7	5.0
<b>1</b>	15.8	31.7	46.5	31.1	23.8	15.0	12.2	8.6	7.7	4.7	5.2	7.0

Tabla C.5 Valores de curva de variación estacional para registro histórico mediante el promedio de la segregación de precipitaciones de Varas (10, 50 y 90%).

<b>Pex [%]</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>
<b>20</b>	7.4	20.7	25.6	19.5	13.7	9.6	6.2	3.0	1.9	1.5	1.3	1.7
<b>4</b>	13.8	35.0	41.8	30.0	20.8	15.5	10.7	5.2	3.2	2.6	2.3	3.1
<b>1</b>	19.0	46.8	55.2	38.7	26.7	20.3	14.4	7.0	4.3	3.5	3.2	4.1

## C.3 Caudales Máximos

### C.3.1 Series de Caudales Máximos Por Año

Tabla C.6 Caudales máximos para una distribución de precipitación de bloques alternados

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
19-7-08 18:00	113	7-5-08 19:00	93	24-5-08 19:00	82	11-7-37 18:00	113	5-7-37 18:00	152	12-8-37 18:00	128
4-7-09 19:00	125	8-6-09 18:00	140	18-6-09 18:00	154	3-7-38 18:00	104	21-5-38 18:00	190	27-5-38 18:00	162
20-5-10 18:00	139	27-4-10 18:00	113	20-5-10 18:00	172	11-6-39 19:00	231	2-7-39 18:00	118	13-6-39 18:00	136
22-6-11 18:00	414	7-6-11 17:00	609	19-5-11 18:00	106	6-5-40 18:00	151	17-5-40 18:00	130	21-9-40 18:00	193
18-6-12 18:00	386	11-6-12 18:00	409	20-6-12 19:00	148	16-4-41 19:00	269	17-6-41 18:00	673	4-7-41 18:00	143
8-6-13 18:00	63	29-6-13 19:00	129	21-6-13 18:00	311	23-7-42 18:00	122	7-7-42 18:00	142	9-5-42 18:00	136
19-5-14 18:00	227	19-7-14 18:00	208	16-8-14 18:00	107	9-6-43 18:00	110	21-5-43 18:00	267	23-5-43 18:00	134
15-6-15 18:00	279	12-6-15 18:00	145	31-5-15 18:00	132	27-6-44 18:00	413	7-7-44 18:00	164	7-5-44 18:00	198
26-7-16 18:00	203	23-7-16 18:00	143	20-6-16 18:00	143	19-5-45 18:00	239	23-6-45 17:00	404	11-9-45 19:00	114
10-6-17 18:00	240	12-6-17 19:00	195	1-5-17 18:00	186	20-6-46 18:00	230	18-6-46 18:00	89	24-6-46 18:00	172
15-7-18 18:00	192	20-8-18 18:00	182	26-2-18 18:00	181	5-7-47 18:00	271	15-5-47 18:00	138	9-5-47 19:00	124
4-9-19 18:00	131	5-6-19 18:00	429	23-7-19 19:00	100	5-6-48 18:00	254	11-8-48 18:00	154	13-9-48 19:00	61
17-5-20 18:00	204	27-6-20 18:00	432	7-7-20 18:00	58	4-6-49 19:00	132	19-6-49 18:00	585	28-5-49 19:00	167
14-9-21 18:00	144	16-6-21 19:00	141	30-6-21 18:00	116	20-6-50 19:00	61	25-8-50 19:00	115	21-5-50 18:00	207
24-6-22 18:00	325	30-6-22 18:00	281	17-6-22 18:00	199	14-6-51 18:00	167	2-8-51 18:00	122	7-6-51 18:00	260
6-7-23 18:00	160	18-5-23 18:00	121	28-5-23 18:00	164	21-5-52 18:00	187	28-5-52 18:00	134	18-8-52 18:00	177
4-7-24 18:00	180	19-5-24 18:00	173	24-7-24 18:00	129	18-7-53 19:00	138	22-5-53 20:00	75	8-6-53 19:00	117
29-5-25 19:00	88	13-6-25 18:00	503	7-9-25 18:00	123	17-6-54 18:00	280	4-6-54 18:00	123	20-8-54 18:00	159
27-4-26 18:00	205	25-6-26 18:00	347	21-7-26 18:00	129	31-10-55 19:00	114	7-8-55 19:00	122	8-6-55 19:00	103
7-6-27 18:00	325	13-7-27 18:00	139	3-6-27 18:00	283	24-7-56 18:00	99	28-6-56 18:00	328	9-6-56 19:00	133
8-6-28 18:00	300	16-7-28 18:00	201	16-9-28 19:00	121	17-5-57 18:00	290	31-5-57 18:00	151	7-7-57 19:00	128
1-9-29 19:00	94	5-6-29 18:00	293	9-5-29 19:00	236	8-7-58 18:00	271	17-4-58 18:00	167	12-8-58 18:00	253
4-7-30 18:00	127	30-7-30 18:00	223	19-8-30 18:00	212	10-7-59 18:00	111	12-7-59 18:00	150	26-6-59 18:00	127
10-7-31 18:00	125	12-6-31 18:00	131	16-6-31 18:00	189	24-5-60 18:00	160	29-6-60 19:00	187	3-6-60 18:00	167
23-4-32 18:00	332	14-7-32 18:00	124	6-8-32 18:00	198	29-6-61 18:00	330	6-8-61 18:00	142	13-6-61 18:00	209
2-5-33 19:00	150	13-7-33 18:00	180	12-6-33 18:00	174	29-5-62 18:00	99	21-8-62 19:00	116	8-8-62 19:00	81
31-7-34 19:00	100	30-4-34 18:00	260	4-8-34 18:00	186	31-5-63 18:00	82	22-7-63 18:00	196	8-5-63 18:00	205
5-6-35 18:00	100	31-5-35 19:00	103	7-9-35 18:00	128	10-7-64 19:00	75	17-5-64 18:00	134	17-7-64 19:00	148
5-5-36 18:00	286	20-6-36 18:00	426	21-6-36 18:00	148	20-7-65 19:00	118	27-6-65 18:00	137	20-4-65 19:00	194

Tabla C.7 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=10%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
20-7-08 0:00	114	7-5-08 20:00	96	26-5-08 23:00	82	11-7-37 22:00	115	5-7-37 20:00	123	12-8-37 21:00	138
4-7-09 21:00	133	8-6-09 22:00	116	18-6-09 21:00	131	3-7-38 22:00	90	21-5-38 19:00	174	27-5-38 20:00	157
20-5-10 19:00	142	27-4-10 20:00	117	20-5-10 19:00	177	11-6-39 20:00	228	2-7-39 20:00	123	13-6-39 21:00	120
22-6-11 21:00	339	7-6-11 18:00	515	19-5-11 20:00	98	6-5-40 19:00	143	17-5-40 21:00	117	22-9-40 0:00	184
18-6-12 20:00	392	11-6-12 23:00	437	20-6-12 22:00	154	16-4-41 21:00	282	17-6-41 21:00	535	4-7-41 22:00	118
8-6-13 18:00	64	30-6-13 1:00	108	14-5-13 23:00	284	24-7-42 1:00	138	7-7-42 22:00	143	9-5-42 20:00	122
19-5-14 22:00	226	19-7-14 20:00	189	16-8-14 20:00	113	9-6-43 20:00	106	21-5-43 23:00	205	24-5-43 22:00	140
15-6-15 19:00	233	12-6-15 23:00	142	31-5-15 20:00	137	27-6-44 22:00	317	7-7-44 21:00	140	7-7-44 21:00	198
27-7-16 0:00	223	23-7-16 20:00	127	20-6-16 21:00	126	19-5-45 22:00	238	23-6-45 23:00	380	2-7-45 21:00	116
20-6-17 23:00	221	12-6-17 21:00	189	1-5-17 19:00	153	20-6-46 20:00	209	18-6-46 22:00	93	24-6-46 21:00	157
16-7-18 0:00	183	20-8-18 20:00	165	26-2-18 20:00	187	5-7-47 20:00	232	8-5-47 21:00	116	9-5-47 20:00	121
4-9-19 21:00	117	5-6-19 19:00	419	23-7-19 22:00	90	5-6-48 23:00	251	11-8-48 22:00	124	2-6-48 21:00	61
17-5-20 19:00	201	27-6-20 19:00	392	7-7-20 19:00	57	4-6-49 22:00	122	19-6-49 20:00	598	28-5-49 21:00	171
14-9-21 19:00	140	16-6-21 21:00	147	30-6-21 20:00	120	20-6-50 21:00	66	25-8-50 22:00	120	22-5-50 0:00	205
24-6-22 20:00	340	30-6-22 22:00	286	17-6-22 23:00	192	14-6-51 19:00	153	2-8-51 19:00	112	7-6-51 23:00	200
6-7-23 22:00	163	19-5-23 0:00	119	28-5-23 20:00	146	21-5-52 19:00	191	28-5-52 22:00	113	18-8-52 19:00	181
4-7-24 19:00	147	19-5-24 21:00	182	24-7-24 23:00	128	18-7-53 21:00	126	22-5-53 22:00	76	8-6-53 20:00	108
29-5-25 23:00	93	13-6-25 21:00	505	7-9-25 21:00	110	17-6-54 23:00	305	5-6-54 0:00	122	20-8-54 19:00	153
27-4-26 22:00	167	25-6-26 19:00	284	21-7-26 20:00	134	31-10-55 22:00	100	9-6-55 23:00	119	8-6-55 23:00	115
7-6-27 21:00	339	14-7-27 0:00	134	3-6-27 19:00	235	24-7-56 22:00	103	28-6-56 19:00	293	9-6-56 22:00	115
8-6-28 22:00	234	16-7-28 20:00	174	22-6-28 22:00	122	17-5-57 22:00	291	31-5-57 20:00	142	7-7-57 22:00	134
1-9-29 21:00	92	5-6-29 20:00	302	9-5-29 22:00	249	8-7-58 21:00	219	7-8-58 21:00	159	12-8-58 20:00	223
11-5-30 19:00	112	30-7-30 21:00	237	19-8-30 20:00	184	10-7-59 23:00	114	12-7-59 21:00	129	26-6-59 20:00	113
10-7-31 21:00	109	12-6-31 23:00	146	16-6-31 19:00	180	24-5-60 19:00	165	29-6-60 21:00	181	3-6-60 20:00	173
23-4-32 21:00	337	14-7-32 19:00	116	6-8-32 19:00	183	30-6-61 0:00	243	6-8-61 20:00	134	13-6-61 20:00	195
2-5-33 21:00	147	14-6-33 19:00	167	22-6-33 23:00	174	29-5-62 23:00	100	21-8-62 21:00	121	8-8-62 23:00	75
31-7-34 22:00	88	30-4-34 20:00	218	4-8-34 21:00	153	14-7-63 21:00	81	23-7-63 0:00	187	8-5-63 19:00	198
5-6-35 20:00	104	31-5-35 22:00	90	7-9-35 21:00	111	26-7-64 1:00	72	17-5-64 22:00	136	17-7-64 21:00	156
5-5-36 20:00	299	20-6-36 21:00	427	21-6-36 20:00	153	20-7-65 20:00	110	28-6-65 0:00	154	20-4-65 20:00	205

Tabla C.8 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=50%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
19/07/2008 22:00	105	07/05/2008 19:00	95	26/05/2008 21:00	77	11/07/1937 21:00	107	05/07/1937 18:00	122	12/08/1937 20:00	122
04/07/2009 20:00	126	08/06/2009 21:00	100	18/06/2009 20:00	117	03/07/1938 19:00	86	21/05/1938 19:00	165	27/05/1938 19:00	151
20/05/2010 19:00	136	27/04/2010 20:00	110	20/05/2010 18:00	169	11/06/1939 19:00	217	02/07/1939 19:00	118	13/06/1939 18:00	116
22/06/2011 18:00	334	07/06/2011 17:00	501	19/05/2011 19:00	93	06/05/1940 18:00	138	17/05/1940 18:00	113	21/09/1940 22:00	168
18/06/2012 19:00	367	11/06/2012 22:00	357	20/06/2012 21:00	143	16/04/1941 20:00	268	17/06/1941 16:00	496	04/07/1941 18:00	116
08/06/2013 18:00	63	30/06/2013 0:00	89	21/06/2013 18:00	250	24/07/1942 0:00	113	07/07/1942 20:00	133	09/05/1942 18:00	117
19/05/2014 21:00	207	19/07/2014 18:00	182	16/08/2014 19:00	108	09/06/1943 18:00	101	21/05/1943 16:00	181	23/05/1943 22:00	126
15/06/2015 17:00	228	12/06/2015 21:00	130	31/05/2015 19:00	131	27/06/1944 15:00	289	07/07/1944 18:00	136	07/05/1944 21:00	183
26/07/2016 23:00	179	23/07/2016 18:00	123	20/06/2016 19:00	122	19/05/1945 21:00	218	23/06/1945 21:00	347	02/07/1945 20:00	111
20/06/2017 21:00	203	12/06/2017 20:00	179	01/05/2017 18:00	150	20/06/1946 18:00	201	18/06/1946 21:00	86	24/06/1946 19:00	151
15/07/2018 22:00	167	20/08/2018 19:00	153	26/02/2018 19:00	176	05/07/1947 17:00	226	08/05/1947 19:00	111	09/05/1947 19:00	117
04/09/2019 18:00	113	05/06/2019 18:00	405	23/07/2019 19:00	87	05/06/1948 21:00	230	11/08/1948 20:00	107	02/06/1948 20:00	59
17/05/2020 18:00	194	27/06/2020 18:00	377	07/07/2020 18:00	54	04/06/1949 20:00	116	19/06/1949 19:00	561	28/05/1949 20:00	161
14/09/2021 18:00	135	16/06/2021 20:00	138	30/06/2021 19:00	115	20/06/1950 20:00	63	25/08/1950 21:00	112	21/05/1950 22:00	190
24/06/2022 19:00	304	30/06/2022 20:00	265	17/06/2022 21:00	175	14/06/1951 18:00	143	02/08/1951 18:00	105	07/06/1951 16:00	177
06/07/2023 20:00	152	18/05/2023 22:00	110	28/05/2023 18:00	141	21/05/1952 18:00	187	28/05/1952 21:00	98	18/08/1952 19:00	176
04/07/2024 17:00	145	19/05/2024 20:00	161	24/07/2024 21:00	118	18/07/1953 19:00	119	22/05/1953 21:00	71	08/06/1953 19:00	101
29/05/2025 21:00	87	13/06/2025 20:00	467	07/09/2025 18:00	106	17/06/1954 22:00	256	04/06/1954 22:00	113	20/08/1954 18:00	148
27/04/2026 20:00	145	25/06/2026 17:00	280	21/07/2026 19:00	126	19/08/1955 21:00	91	07/08/1955 19:00	111	08/06/1955 22:00	99
07/06/2027 20:00	322	13/07/2027 22:00	124	03/06/2027 17:00	230	24/07/1956 21:00	96	28/06/1956 18:00	277	09/06/1956 20:00	102
08/06/2028 16:00	209	16/07/2028 18:00	169	22/06/2028 21:00	113	17/05/1957 21:00	268	31/05/1957 18:00	134	07/07/1957 21:00	125
01/09/2029 20:00	88	05/06/2029 19:00	288	09/05/2029 21:00	232	08/07/1958 19:00	197	07/08/1958 20:00	149	12/08/1958 19:00	208
11/05/1930 18:00	109	30/07/1930 20:00	211	19/08/1930 18:00	169	10/07/1959 22:00	104	12/07/1959 18:00	125	26/06/1959 19:00	103
10/07/1931 18:00	105	12/06/1931 22:00	125	16/06/1931 18:00	172	24/05/1960 19:00	156	29/06/1960 20:00	171	03/06/1960 19:00	165
23/04/1932 20:00	312	14/07/1932 19:00	110	06/08/1932 18:00	176	29/06/1961 15:00	220	06/08/1961 18:00	130	13/06/1961 19:00	187
02/05/1933 20:00	136	14/06/1933 19:00	162	22/06/1933 22:00	147	31/07/1962 22:00	92	21/08/1962 20:00	115	09/05/1962 20:00	69
26/06/1934 19:00	81	30/04/1934 18:00	214	04/08/1934 18:00	150	14/07/1963 20:00	77	22/07/1963 22:00	171	08/05/1963 18:00	191
05/06/1935 19:00	100	31/08/1935 21:00	82	07/09/1935 18:00	107	25/07/1964 23:00	67	17/05/1964 21:00	126	17/07/1964 20:00	146
05/05/1936 19:00	286	20/06/1936 20:00	392	21/06/1936 19:00	144	20/07/1965 19:00	101	27/06/1965 23:00	128	20/04/1965 19:00	197

Tabla C.9 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=90%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
19/07/2008 20:00	97	07/05/2008 19:00	92	24/05/2008 17:00	74	11/07/1937 19:00	101	05/07/1937 16:00	131	12/08/1937 20:00	113
04/07/2009 19:00	119	08/06/2009 14:00	107	18/06/2009 15:00	122	03/07/1938 17:00	91	21/05/1938 17:00	169	27/05/1938 17:00	155
20/05/2010 18:00	131	27/04/2010 18:00	105	20/05/2010 18:00	164	11/06/1939 17:00	219	02/07/1939 18:00	113	13/06/1939 16:00	121
22/06/2011 15:00	358	07/06/2011 15:00	540	19/05/2011 17:00	97	06/05/1940 17:00	141	17/05/1940 16:00	119	21/09/1940 20:00	155
18/06/2012 18:00	348	11/06/2012 22:00	316	16/06/2012 17:00	140	16/04/1941 19:00	254	17/06/1941 14:00	560	04/07/1941 16:00	124
08/06/2013 17:00	63	29/06/2013 13:00	91	21/06/2013 15:00	259	23/07/1942 23:00	101	07/07/1942 19:00	125	09/05/1942 16:00	124
19/05/2014 19:00	193	19/07/2014 17:00	191	16/08/2014 18:00	104	09/06/1943 17:00	103	21/05/1943 13:00	209	23/05/1943 20:00	118
15/06/2015 15:00	243	12/06/2015 20:00	122	31/05/2015 18:00	125	27/06/1944 13:00	331	07/07/1944 16:00	145	07/05/1944 19:00	170
26/07/2016 23:00	156	23/07/2016 16:00	129	20/06/2016 17:00	129	19/05/1945 19:00	203	23/06/1945 20:00	322	11/09/1945 18:00	109
10/06/2017 14:00	190	12/06/2017 18:00	182	01/05/2017 16:00	159	20/06/1946 17:00	211	18/06/1946 19:00	82	24/06/1946 17:00	158
15/07/2018 20:00	155	20/08/2018 17:00	155	26/02/2018 18:00	167	05/07/1947 15:00	241	08/05/1947 17:00	115	09/05/1947 17:00	119
04/09/2019 16:00	119	05/06/2019 17:00	413	23/07/2019 17:00	91	05/06/1948 20:00	214	11/08/1948 13:00	118	08/09/1948 18:00	56
17/05/2020 17:00	197	27/06/2020 16:00	398	07/07/2020 17:00	53	04/06/1949 17:00	121	19/06/1949 18:00	532	28/05/1949 19:00	154
14/09/2021 17:00	137	16/06/2021 19:00	131	30/06/2021 18:00	110	20/06/1950 19:00	61	25/08/1950 19:00	105	21/05/1950 20:00	178
24/06/2022 19:00	285	30/06/2022 19:00	248	17/06/2022 20:00	163	14/06/1951 16:00	145	02/08/1951 17:00	106	07/06/1951 13:00	204
07/07/2023 16:00	143	18/05/2023 21:00	102	28/05/2023 16:00	149	21/05/1952 17:00	181	28/05/1952 15:00	104	18/08/1952 18:00	172
04/07/2024 15:00	154	19/05/2024 20:00	151	26/05/2024 16:00	112	18/07/1953 17:00	125	22/05/1953 18:00	71	08/06/1953 17:00	101
29/05/2025 20:00	81	13/06/2025 19:00	436	07/09/2025 16:00	111	17/06/1954 21:00	229	04/06/1954 20:00	105	20/08/1954 17:00	150
27/04/2026 14:00	161	25/06/2026 15:00	301	15/07/2026 20:00	89	31/10/1955 16:00	89	07/08/1955 17:00	115	08/06/1955 22:00	90
07/06/2027 19:00	306	13/07/2027 21:00	115	03/06/2027 15:00	246	24/07/1956 19:00	90	28/06/1956 16:00	285	09/06/1956 16:00	105
08/06/2028 13:00	238	16/07/2028 16:00	178	16/09/2028 18:00	114	17/05/1957 19:00	248	31/05/1957 16:00	137	07/07/1957 19:00	117
01/09/2029 18:00	90	05/06/2029 18:00	275	09/05/2029 19:00	217	08/07/1958 14:00	217	17/04/1958 16:00	146	12/08/1958 16:00	215
31/05/1930 16:00	101	30/07/1930 20:00	196	19/08/1930 16:00	175	10/07/1959 20:00	97	12/07/1959 16:00	133	26/06/1959 16:00	105
10/07/1931 16:00	111	12/06/1931 21:00	112	16/06/1931 17:00	170	24/05/1960 18:00	151	29/06/1960 18:00	173	03/06/1960 18:00	158
23/04/1932 18:00	292	14/07/1932 17:00	111	06/08/1932 17:00	177	29/06/1961 12:00	260	06/08/1961 17:00	133	13/06/1961 17:00	195
02/05/1933 18:00	130	14/06/1933 18:00	159	12/06/1933 15:00	151	31/07/1962 20:00	87	21/08/1962 19:00	110	09/08/1962 18:00	66
26/06/1934 17:00	81	30/04/1934 16:00	229	04/08/1934 15:00	160	14/07/1963 19:00	73	22/07/1963 20:00	158	08/05/1963 17:00	194
05/06/1935 18:00	95	31/05/1935 16:00	81	07/09/1935 16:00	114	10/07/1964 17:00	65	17/05/1964 19:00	117	17/07/1964 19:00	138
05/05/1936 18:00	274.27	20/06/1936 19:00	363	21/06/1936 18:00	136	20/07/1965 17:00	101	27/06/1965 22:00	114	20/04/1965 19:00	190

Tabla C.10 Caudales máximos históricos para todas las distribuciones de precipitaciones

Bloques alternados		Varas P=10%		Varas P=50%		Varas P=90%	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
6-5-77 18:00	277	7-5-77 1:00	304	7-5-77 0:00	238	6-5-77 23:00	205
23-7-78 18:00	153	23-7-78 19:00	155	23-7-78 19:00	149	23-7-78 18:00	145
28-8-79 18:00	150	28-8-79 21:00	156	28-8-79 20:00	145	28-8-79 19:00	136
10-5-80 18:00	182	10-5-80 19:00	180	10-5-80 18:00	169	10-5-80 17:00	169
9-5-81 18:00	132	1-5-81 21:00	126	1-5-81 20:00	120	9-5-81 16:00	118
12-7-82 18:00	155	12-7-82 19:00	147	12-7-82 18:00	142	12-7-82 17:00	145
16-6-83 19:00	121	16-6-83 20:00	118	16-6-83 19:00	113	16-6-83 17:00	114
13-7-84 18:00	259	13-7-84 21:00	271	13-7-84 20:00	239	13-7-84 20:00	223
20-5-85 18:00	167	20-5-85 22:00	171	20-5-85 20:00	159	20-5-85 19:00	148
9-6-86 18:00	312	9-6-86 21:00	329	9-6-86 20:00	290	9-6-86 20:00	269
23-3-87 19:00	65	23-3-87 21:00	64	23-3-87 20:00	60	23-3-87 18:00	61
24-7-88 19:00	40	24-7-88 20:00	37	24-7-88 20:00	34	24-7-88 18:00	33
23-6-89 18:00	93	23-6-89 20:00	89	23-6-89 18:00	85	23-6-89 17:00	88
4-5-90 19:00	70	11-4-90 0:00	70	10-4-90 22:00	64	4-5-90 17:00	65
3-7-91 18:00	113	3-7-91 22:00	117	3-7-91 20:00	109	3-7-91 19:00	102
31-5-92 18:00	187	31-5-92 19:00	150	31-5-92 17:00	148	31-5-92 15:00	159
11-5-93 18:00	220	11-5-93 20:00	185	11-5-93 18:00	178	11-5-93 16:00	192
18-7-94 18:00	162	18-7-94 20:00	168	18-7-94 19:00	158	18-7-94 18:00	149
23-4-95 18:00	184	23-4-95 22:00	207	23-4-95 21:00	180	23-4-95 21:00	163
17-8-96 18:00	181	17-8-96 19:00	146	17-8-96 17:00	144	17-8-96 15:00	155
16-4-97 18:00	391	16-4-97 19:00	331	16-4-97 17:00	324	16-4-97 15:00	348
30-6-98 18:00	67	30-6-98 19:00	66	30-6-98 19:00	63	30-6-98 18:00	63
20-5-99 19:00	234	20-5-99 21:00	246	20-5-99 20:00	231	20-5-99 19:00	218
26-5-00 18:00	425	26-5-00 23:00	319	26-5-00 15:00	292	26-5-00 13:00	340
24-7-01 18:00	203	24-7-01 19:00	201	24-7-01 18:00	196	24-7-01 17:00	197
16-8-02 19:00	138	16-8-02 22:00	151	16-8-02 21:00	132	16-8-02 21:00	121
12-6-03 18:00	283	12-6-03 20:00	240	12-6-03 17:00	232	12-6-03 15:00	247
17-10-04 18:00	127	17-10-04 22:00	106	3-7-04 19:00	98	3-7-04 17:00	100
19-5-05 18:00	352	19-5-05 19:00	312	19-5-05 18:00	295	29-5-05 16:00	310
16-5-06 18:00	316	16-5-06 22:00	317	16-5-06 21:00	291	29-5-06 16:00	280
13-6-07 19:00	199	13-6-07 21:00	186	13-6-07 19:00	178	13-6-07 17:00	185

### C.3.2 Serie de Excedencia Anual

Tabla C.11 Caudales máximos para una distribución de precipitación de bloques alternados

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
22-6-11 18:00	414	17-6-41 18:00	673	21-6-13 18:00	311	17-7-54 18:00	197	1-4-36 18:00	182	28-5-49 19:00	167
27-6-44 18:00	413	7-6-11 17:00	609	3-6-27 18:00	283	29-5-11 18:00	196	20-8-18 18:00	182	3-6-60 18:00	167
18-6-12 18:00	386	19-6-49 18:00	585	14-5-13 18:00	273	6-12-57 18:00	196	13-7-33 18:00	180	19-8-49 18:00	165
23-4-32 18:00	332	13-6-25 18:00	503	7-6-51 18:00	260	15-7-18 18:00	192	27-6-45 18:00	178	25-7-50 18:00	165
29-6-61 18:00	330	27-6-20 18:00	432	12-8-58 18:00	253	13-7-45 18:00	189	2-8-22 18:00	175	28-5-23 18:00	164
24-6-22 18:00	325	5-6-19 18:00	429	9-5-29 19:00	236	21-5-52 18:00	187	19-5-24 18:00	173	27-5-38 18:00	162
7-6-27 18:00	325	20-6-36 18:00	426	19-8-30 18:00	212	17-6-28 18:00	187	24-6-11 18:00	170	22-6-13 18:00	161
8-6-28 18:00	300	11-6-12 18:00	409	13-6-61 18:00	209	8-5-39 18:00	184	17-4-58 18:00	167	31-5-10 18:00	160
17-5-57 18:00	290	23-6-45 17:00	404	21-5-50 18:00	207	4-7-24 18:00	180	14-6-33 18:00	165	22-10-29 18:00	159
5-5-36 18:00	286	25-6-26 18:00	347	28-5-61 18:00	207	25-6-15 18:00	178	7-7-44 18:00	164	20-8-54 18:00	159
17-6-54 18:00	280	28-6-56 18:00	328	8-5-63 18:00	205	20-8-16 18:00	173	12-7-33 18:00	162	22-6-33 18:00	158
15-6-15 18:00	279	26-5-12 18:00	326	17-6-22 18:00	199	30-6-61 18:00	172	14-6-12 19:00	161	4-6-40 18:00	157
8-7-58 18:00	271	11-6-26 18:00	322	7-5-44 18:00	198	31-7-16 18:00	171	24-6-25 18:00	160	25-6-10 18:00	156
5-7-47 18:00	271	8-6-11 18:00	310	6-8-32 18:00	198	14-6-51 18:00	167	22-5-38 18:00	157	24-9-40 18:00	154
16-4-41 19:00	269	5-6-29 18:00	293	20-4-65 19:00	194	11-10-46 18:00	164	3-8-63 18:00	155	23-5-61 19:00	154
18-6-27 18:00	259	30-6-22 18:00	281	28-5-22 18:00	194	27-5-58 18:00	162	21-6-49 19:00	154	18-6-09 18:00	154
5-6-48 18:00	254	21-5-43 18:00	267	21-9-40 18:00	193	6-7-23 18:00	160	11-8-48 18:00	154	28-7-29 18:00	149
10-6-17 18:00	240	4-6-29 18:00	260	16-6-31 18:00	189	24-5-60 18:00	160	5-7-37 18:00	152	20-6-12 19:00	148
19-5-45 18:00	239	30-4-34 18:00	260	1-5-17 18:00	186	7-7-23 18:00	158	7-8-58 18:00	152	19-6-13 18:00	148
11-6-39 19:00	231	10-6-12 18:00	229	4-8-34 18:00	186	17-6-23 18:00	157	31-5-57 18:00	151	30-6-46 19:00	148
20-6-46 18:00	230	30-7-30 18:00	223	26-2-18 18:00	181	1-7-44 18:00	153	12-7-59 18:00	150	17-7-64 19:00	148
19-5-14 18:00	227	3-4-36 18:00	213	18-8-52 18:00	177	25-6-22 18:00	153	2-8-33 18:00	149	16-6-12 18:00	148
20-6-17 18:00	225	19-7-14 18:00	208	15-7-27 18:00	176	6-5-40 18:00	151	31-5-29 19:00	147	21-6-36 18:00	148
26-6-12 18:00	222	16-7-28 18:00	201	10-5-29 19:00	175	28-7-24 18:00	150	3-6-30 18:00	146	27-5-49 18:00	147
7-7-58 18:00	217	22-7-63 18:00	196	8-6-27 18:00	174	2-5-33 19:00	150	12-6-15 18:00	145	27-7-64 18:00	146
27-4-26 18:00	205	12-6-17 19:00	195	12-6-33 18:00	174	20-5-15 18:00	149	27-5-43 18:00	145	15-6-33 18:00	146
17-5-20 18:00	204	21-5-38 18:00	190	20-5-10 18:00	172	22-5-60 19:00	149	11-7-20 18:00	144	24-10-49 18:00	144
26-7-16 18:00	203	29-6-60 19:00	187	24-6-46 18:00	172	24-5-16 18:00	148	17-5-11 19:00	143	16-7-52 18:00	143
27-6-12 18:00	201	15-4-11 18:00	182	29-5-22 18:00	168	30-6-22 19:00	146	23-7-16 18:00	143	20-6-16 18:00	143

Tabla C.12 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=10%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
18-6-12 20:00	392	19-6-49 20:00	598	14-5-13 23:00	284	8-5-39 19:00	188	3-4-36 20:00	178	19-6-13 23:00	164
24-6-22 20:00	340	17-6-41 21:00	535	21-6-13 20:00	271	16-7-18 0:00	183	21-5-38 19:00	174	23-5-61 21:00	158
7-6-27 21:00	339	7-6-11 18:00	515	9-5-29 22:00	249	25-6-15 21:00	181	16-7-28 20:00	174	25-6-10 19:00	158
22-6-11 21:00	339	13-6-25 21:00	505	3-6-27 19:00	235	7-7-58 20:00	177	23-5-38 1:00	170	24-6-46 21:00	157
23-4-32 21:00	337	11-6-12 23:00	437	12-8-58 20:00	223	6-12-57 20:00	169	24-6-11 20:00	170	27-5-38 20:00	157
27-6-44 22:00	317	20-6-36 21:00	427	22-5-50 0:00	205	27-4-26 22:00	167	14-6-33 19:00	167	18-8-29 1:00	157
17-6-54 23:00	305	5-6-19 19:00	419	20-4-65 20:00	205	24-5-60 19:00	165	3-8-33 1:00	166	17-7-64 21:00	156
5-5-36 20:00	299	27-6-20 19:00	392	7-6-51 23:00	200	6-7-23 22:00	163	20-8-18 20:00	165	20-6-12 22:00	154
17-5-57 22:00	291	23-6-45 23:00	380	7-5-44 22:00	198	22-5-60 22:00	163	24-6-25 22:00	164	20-8-54 19:00	153
16-4-41 21:00	282	26-5-12 21:00	336	8-5-63 19:00	198	20-6-36 0:00	162	14-6-12 20:00	160	21-6-36 20:00	153
5-6-48 23:00	251	5-6-29 20:00	302	13-6-61 20:00	195	27-5-58 19:00	160	21-6-49 21:00	160	28-7-29 19:00	153
18-6-27 19:00	245	28-6-56 19:00	293	28-5-61 20:00	192	13-7-45 21:00	160	7-8-58 21:00	159	1-5-17 19:00	153
30-6-61 0:00	243	30-6-22 22:00	286	17-6-22 23:00	192	29-5-11 19:00	159	13-7-33 21:00	156	4-8-34 21:00	153
19-5-45 22:00	238	25-6-26 19:00	284	28-5-22 23:00	189	17-6-23 21:00	159	31-5-29 21:00	155	29-5-22 20:00	153
8-6-28 22:00	234	4-6-29 21:00	270	26-2-18 20:00	187	5-6-39 0:00	156	28-6-65 0:00	154	19-8-49 19:00	153
15-6-15 19:00	233	8-6-11 21:00	265	22-9-40 0:00	184	17-6-28 21:00	156	2-8-22 20:00	154	30-6-46 22:00	152
5-7-47 20:00	232	11-6-26 19:00	257	10-5-29 21:00	184	20-5-15 21:00	154	30-5-29 23:00	153	22-6-13 19:00	151
11-6-39 20:00	228	30-7-30 21:00	237	19-8-30 20:00	184	17-6-14 22:00	153	16-6-21 21:00	147	27-7-64 23:00	148
19-5-14 22:00	226	10-6-12 22:00	233	6-8-32 19:00	183	30-6-22 22:00	153	27-5-11 23:00	146	28-4-17 23:00	147
27-7-16 0:00	223	30-4-34 20:00	218	18-8-52 19:00	181	31-7-16 21:00	153	12-6-31 23:00	146	24-10-49 22:00	147
26-6-12 19:00	221	21-5-43 23:00	205	15-7-27 20:00	180	14-6-51 19:00	153	11-7-20 21:00	145	28-5-23 20:00	146
20-6-17 23:00	221	12-6-17 21:00	189	16-6-31 19:00	180	8-6-36 2:00	152	8-8-58 23:00	144	15-6-33 21:00	146
8-7-58 21:00	219	19-7-14 20:00	189	20-5-10 19:00	177	25-6-22 20:00	150	7-7-42 22:00	143	14-5-64 22:00	144
27-6-12 21:00	213	23-7-63 0:00	187	22-6-33 23:00	174	19-6-17 22:00	149	25-5-12 19:00	142	16-6-12 20:00	143
20-6-46 20:00	209	2-4-36 0:00	182	3-6-60 20:00	173	11-10-46 20:00	147	12-6-15 23:00	142	12-6-33 21:00	143
17-7-54 19:00	203	19-5-24 21:00	182	28-5-49 21:00	171	2-5-33 21:00	147	31-5-57 20:00	142	24-5-43 22:00	140
17-5-20 19:00	201	15-4-11 23:00	182	8-6-27 23:00	169	4-7-24 19:00	147	24-5-24 22:00	140	19-5-18 21:00	140
10-6-17 21:00	195	29-6-60 21:00	181	25-7-50 22:00	169	20-8-16 21:00	146	7-7-44 21:00	140	18-7-64 22:00	139
21-5-52 19:00	191	27-6-45 20:00	178	22-10-29 22:00	165	24-5-16 19:00	146	11-7-11 21:00	139	12-8-37 21:00	138

Tabla C.13 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=50%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
18-6-12 19:00	367	19-6-49 19:00	561	21-6-13 18:00	250	7-7-58 18:00	174	27-6-45 19:00	166	24-6-46 19:00	151
22-6-11 18:00	334	7-6-11 17:00	501	14-5-13 23:00	238	10-6-17 19:00	173	21-5-38 19:00	165	27-5-38 19:00	151
7-6-27 20:00	322	17-6-41 16:00	496	9-5-29 21:00	232	25-6-15 20:00	171	14-6-33 19:00	162	1-5-17 18:00	150
23-4-32 20:00	312	13-6-25 20:00	467	3-6-27 17:00	230	15-7-18 22:00	167	19-5-24 20:00	161	4-8-34 18:00	150
24-6-22 19:00	304	5-6-19 18:00	405	12-8-58 19:00	208	6-12-57 18:00	164	24-6-11 19:00	161	20-8-54 18:00	148
27-6-44 15:00	289	20-6-36 20:00	392	20-4-65 19:00	197	29-5-11 18:00	156	20-8-18 19:00	153	19-8-49 18:00	148
5-5-36 19:00	286	27-6-20 18:00	377	8-5-63 18:00	191	24-5-60 19:00	156	24-6-25 21:00	152	23-5-61 20:00	148
16-4-41 20:00	268	11-6-12 22:00	357	21-5-50 22:00	190	27-5-58 18:00	154	21-6-49 20:00	150	28-7-29 19:00	147
17-5-57 21:00	268	23-6-45 21:00	347	13-6-61 19:00	187	6-7-23 20:00	152	7-8-58 20:00	149	22-6-33 22:00	147
17-6-54 22:00	256	26-5-12 20:00	313	28-5-61 18:00	184	17-6-23 20:00	149	13-7-33 19:00	148	17-7-64 20:00	146
18-6-27 18:00	236	5-6-29 19:00	288	7-5-44 21:00	183	27-4-26 20:00	145	14-6-12 19:00	145	29-5-22 18:00	146
5-6-48 21:00	230	25-6-26 17:00	280	7-6-51 16:00	177	27-4-26 18:00	145	31-5-29 20:00	143	21-6-36 19:00	144
15-6-15 17:00	228	28-6-56 18:00	277	6-8-32 18:00	176	4-7-24 17:00	145	23-5-38 0:00	143	22-6-13 18:00	144
5-7-47 17:00	226	30-6-22 20:00	265	18-8-52 19:00	176	20-5-15 20:00	144	2-8-22 19:00	141	20-6-12 21:00	143
29-6-61 15:00	220	11-6-26 17:00	252	26-2-18 19:00	176	31-7-16 18:00	143	25-5-12 19:00	139	30-6-46 21:00	142
19-5-45 21:00	218	4-6-29 20:00	251	17-6-22 21:00	175	17-6-14 21:00	143	16-6-21 20:00	138	28-5-23 18:00	141
11-6-39 19:00	217	8-6-11 19:00	247	28-5-22 22:00	173	14-6-51 18:00	143	11-7-20 20:00	137	12-6-33 18:00	141
26-6-12 18:00	215	10-6-12 21:00	214	10-5-29 20:00	172	20-8-16 18:00	143	17-4-58 18:00	136	19-6-13 22:00	140
8-6-28 16:00	209	30-4-34 18:00	214	15-7-27 19:00	172	22-5-60 21:00	143	7-7-44 18:00	136	15-6-33 20:00	137
19-5-14 21:00	207	30-7-30 20:00	211	16-6-31 18:00	172	13-7-45 20:00	142	31-5-57 18:00	134	16-6-12 19:00	137
20-6-17 21:00	203	19-7-14 18:00	182	20-5-10 18:00	169	11-10-46 18:00	142	8-8-58 21:00	133	27-7-64 22:00	136
20-6-46 18:00	201	21-5-43 16:00	181	19-8-30 18:00	169	24-5-16 18:00	141	7-7-42 20:00	133	24-10-49 21:00	136
8-7-58 19:00	197	12-6-17 20:00	179	21-9-40 22:00	168	30-6-22 21:00	141	3-8-33 0:00	131	14-5-65 20:00	134
17-7-54 19:00	196	3-4-36 18:00	174	3-6-60 19:00	165	17-6-28 19:00	141	17-5-11 19:00	131	28-4-17 22:00	134
17-5-20 18:00	194	29-6-60 20:00	171	28-5-49 20:00	161	25-6-22 19:00	139	11-7-11 20:00	130	4-6-40 18:00	133
27-6-12 20:00	192	22-7-63 22:00	170	8-6-27 21:00	157	7-7-23 18:00	139	12-6-15 21:00	130	31-5-10 18:00	133
21-5-52 18:00	187	16-7-28 18:00	169	25-7-50 21:00	156	19-6-17 21:00	138	30-5-29 22:00	130	19-5-18 20:00	131
8-5-39 19:00	182	1-4-36 22:00	168	22-10-29 21:00	153	6-5-40 18:00	138	6-8-61 18:00	130	31-5-15 19:00	131
26-7-16 23:00	179	15-4-11 21:00	167	25-6-10 18:00	152	19-6-36 23:00	137	24-5-24 21:00	129	26-7-17 20:00	130

Tabla C.14 Caudales máximos para una distribución de precipitación de Varas P=90%

Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 9	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
22-6-11 15:00	358	17-6-41 14:00	560	21-6-13 15:00	259	8-5-39 18:00	178	22-7-63 20:00	158	8-6-27 20:00	151
18-6-12 18:00	348	7-6-11 15:00	540	3-6-27 15:00	246	6-12-57 16:00	174	1-4-36 20:00	157	12-6-33 15:00	151
27-6-44 13:00	331	19-6-49 18:00	532	9-5-29 19:00	217	29-5-11 16:00	166	27-6-45 18:00	157	20-8-54 17:00	150
7-6-27 19:00	306	13-6-25 19:00	436	12-8-58 16:00	215	25-6-15 19:00	163	24-6-11 18:00	155	29-5-22 16:00	150
23-4-32 18:00	292	5-6-19 17:00	413	14-5-13 23:00	208	27-4-26 14:00	161	20-8-18 17:00	155	28-5-23 16:00	149
24-6-22 19:00	285	27-6-20 16:00	398	7-6-51 13:00	204	27-5-58 17:00	157	15-4-11 20:00	155	19-8-49 17:00	148
5-5-36 18:00	274	20-6-36 19:00	363	13-6-61 17:00	195	26-7-16 23:00	156	19-5-24 20:00	151	25-6-10 18:00	148
29-6-61 12:00	260	23-6-45 20:00	322	8-5-63 17:00	194	15-7-18 20:00	155	17-4-58 16:00	146	22-6-13 17:00	147
16-4-41 19:00	254	11-6-12 22:00	316	28-5-61 16:00	190	4-7-24 15:00	154	7-7-44 16:00	145	25-7-50 20:00	145
17-5-57 19:00	248	25-6-26 15:00	301	20-4-65 19:00	190	20-8-16 16:00	153	2-8-22 16:00	144	22-10-29 19:00	143
15-6-15 15:00	243	26-5-12 19:00	294	21-5-50 20:00	178	24-5-60 18:00	151	21-6-49 19:00	142	28-7-29 18:00	142
18-6-27 16:00	242	28-6-56 16:00	285	6-8-32 17:00	177	13-7-45 15:00	151	14-6-12 17:00	142	23-5-61 19:00	141
5-7-47 15:00	241	5-6-29 18:00	275	19-8-30 16:00	175	11-10-46 16:00	149	24-6-25 20:00	142	31-5-10 16:00	141
8-6-28 13:00	238	11-6-26 15:00	272	18-8-52 18:00	172	30-6-61 16:00	149	7-8-58 19:00	140	16-6-12 17:00	140
17-6-54 21:00	229	8-6-11 16:00	262	7-5-44 19:00	170	17-6-28 15:00	149	31-5-57 16:00	137	4-6-40 16:00	140
11-6-39 17:00	219	30-6-22 19:00	248	16-6-31 17:00	170	31-7-16 16:00	149	3-8-63 16:00	135	17-7-64 19:00	138
8-7-58 14:00	217	4-6-29 19:00	235	26-2-18 18:00	167	14-6-51 16:00	145	25-5-12 18:00	135	21-6-36 18:00	136
26-6-12 17:00	214	30-4-34 16:00	229	20-5-10 18:00	164	24-5-16 17:00	143	17-5-11 17:00	134	20-6-12 19:00	136
5-6-48 20:00	214	21-5-43 13:00	209	15-7-27 18:00	164	7-7-23 16:00	143	31-5-29 19:00	134	30-6-46 19:00	135
20-6-46 17:00	211	10-6-12 19:00	199	17-6-22 20:00	163	6-7-23 19:00	142	12-7-59 16:00	133	27-5-49 17:00	134
19-5-45 19:00	203	30-7-30 20:00	196	10-5-29 19:00	161	6-5-40 17:00	141	6-8-61 17:00	133	16-7-52 17:00	132
17-5-20 17:00	197	19-7-14 17:00	191	28-5-22 20:00	161	17-6-23 19:00	141	11-7-20 19:00	132	24-9-40 16:00	132
19-5-14 19:00	193	3-4-36 16:00	184	4-8-34 15:00	160	28-7-24 16:00	138	16-6-21 19:00	131	15-6-33 19:00	131
10-6-17 14:00	190	12-6-17 18:00	182	1-5-17 16:00	159	14-9-21 17:00	137	5-7-37 16:00	131	22-6-33 21:00	131
17-7-54 18:00	189	16-7-28 16:00	178	24-6-46 17:00	158	25-6-22 17:00	136	22-5-38 23:00	130	20-6-16 17:00	129
20-6-17 19:00	189	29-6-60 18:00	173	3-6-60 18:00	158	20-5-15 19:00	135	23-7-16 16:00	129	27-7-64 20:00	127
7-7-58 16:00	188	21-5-38 17:00	169	21-9-40 20:00	155	17-6-14 20:00	134	21-6-19 17:00	128	24-10-49 20:00	127
27-6-12 20:00	182	14-6-33 18:00	159	27-5-38 17:00	155	18-6-36 17:00	132	30-5-44 16:00	125	19-6-13 21:00	125
21-5-52 17:00	181	13-7-33 16:00	158	28-5-49 19:00	154	19-6-17 19:00	132	7-7-42 19:00	125	14-5-65 19:00	125

Tabla C.15 Caudales máximos históricos para todas las distribuciones de precipitaciones

Bloques alternados		Varas P=10%		Varas P=50%		Varas P=90%	
Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]	Fecha	Q [m³/s]
26-5-00 18:00	425	16-4-97 19:00	331	16-4-97 17:00	324	16-4-97 15:00	348
16-4-97 18:00	391	9-6-86 21:00	329	19-5-05 18:00	295	26-5-00 13:00	340
19-5-05 18:00	352	26-5-00 23:00	319	29-5-05 18:00	293	29-5-05 16:00	310
29-5-05 18:00	340	16-5-06 22:00	317	26-5-00 15:00	292	19-5-05 16:00	305
16-5-06 18:00	316	19-5-05 19:00	312	16-5-06 21:00	291	29-5-06 16:00	280
9-6-86 18:00	312	29-5-05 20:00	305	9-6-86 20:00	290	16-5-06 19:00	270
29-5-06 18:00	312	7-5-77 1:00	304	29-5-06 18:00	267	9-6-86 20:00	269
12-6-03 18:00	283	29-5-06 20:00	277	13-6-97 20:00	252	12-6-03 15:00	247
6-5-77 18:00	277	13-6-97 21:00	272	13-7-84 20:00	239	13-6-97 19:00	235
13-6-97 18:00	272	13-7-84 21:00	271	7-5-77 0:00	238	13-7-84 20:00	223
13-7-84 18:00	259	20-5-99 21:00	246	12-6-03 17:00	232	20-5-99 19:00	218
20-5-99 19:00	234	3-5-77 1:00	243	20-5-99 20:00	231	2-7-06 16:00	208
2-7-06 18:00	230	12-6-03 20:00	240	6-6-03 20:00	208	6-5-77 23:00	205
27-5-00 18:00	229	22-6-00 22:00	226	18-6-05 22:00	202	24-7-01 17:00	197
18-6-05 18:00	222	6-6-03 22:00	225	3-5-77 0:00	199	6-6-03 19:00	195
11-5-93 18:00	220	19-6-05 0:00	219	24-7-01 18:00	196	11-5-93 16:00	192
6-6-03 18:00	219	4-6-00 23:00	208	2-7-06 18:00	196	18-6-05 20:00	190
2-5-77 19:00	210	23-4-95 22:00	207	4-6-00 22:00	195	4-6-00 20:00	189
22-6-00 18:00	209	2-7-06 21:00	202	22-6-00 21:00	194	13-6-07 17:00	185
27-5-97 18:00	205	24-7-01 19:00	201	10-4-06 20:00	183	27-5-00 13:00	176
24-7-01 18:00	203	10-4-06 21:00	194	23-4-95 21:00	180	12-7-84 16:00	176
4-6-00 20:00	200	13-6-07 21:00	186	11-5-93 18:00	178	2-5-77 23:00	175
13-6-07 19:00	199	11-5-93 20:00	185	13-6-07 19:00	178	22-6-00 20:00	174
12-7-84 18:00	194	10-5-80 19:00	180	10-5-80 18:00	169	10-4-06 19:00	173
31-5-92 18:00	187	12-7-84 20:00	177	12-7-84 18:00	169	10-5-80 17:00	169
23-4-95 18:00	184	17-5-84 21:00	176	7-6-03 18:00	168	7-6-03 17:00	168
10-5-80 18:00	182	7-6-03 19:00	176	17-5-84 20:00	167	23-4-95 21:00	163
10-4-06 19:00	182	28-5-00 0:00	174	20-5-85 20:00	159	27-5-97 14:00	161
17-8-96 18:00	181	20-5-85 22:00	171	18-7-94 19:00	158	31-5-92 15:00	159
14-6-99 18:00	180	18-7-94 20:00	168	27-5-00 16:00	152	17-5-84 19:00	158
7-6-03 18:00	179	27-5-97 22:00	166	23-7-78 19:00	149	35294.625	154.794715



### C.3.3 Análisis de frecuencia Caudales Máximos y Máximos Instantáneos

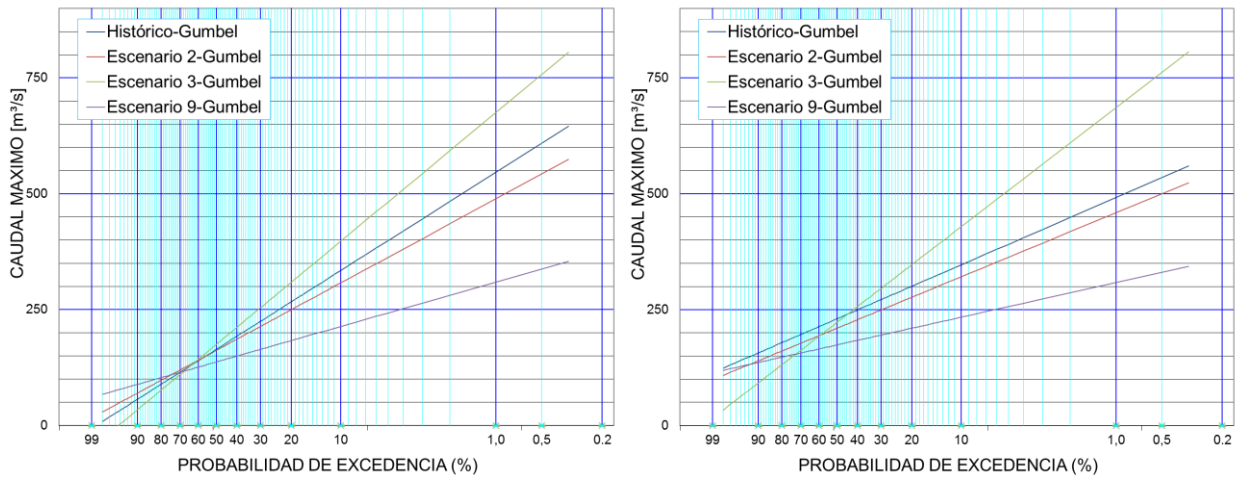


Figura C.1(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Distribución de precipitaciones mediante bloques alternados.

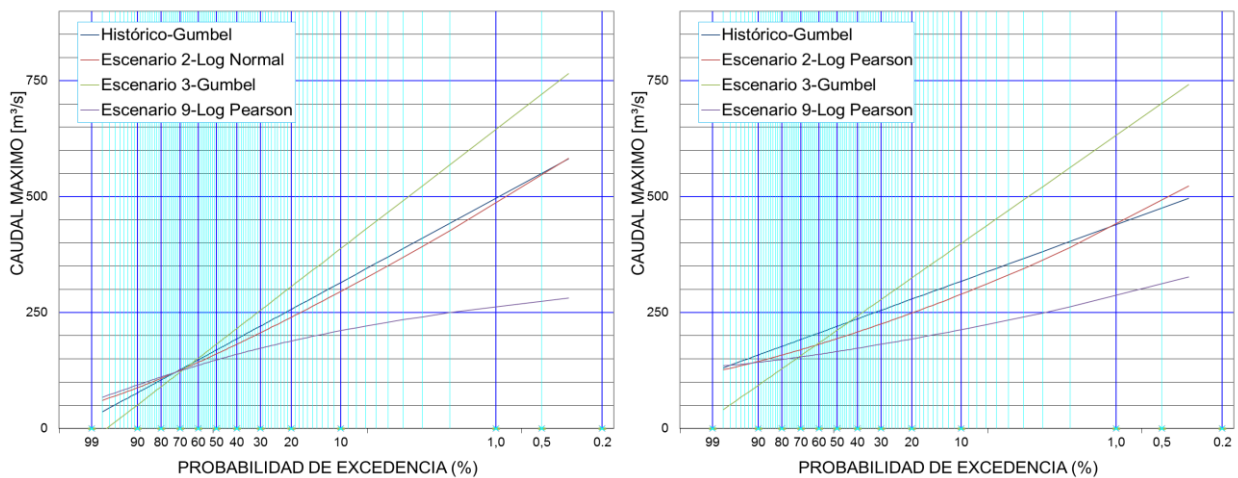


Figura C.2(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=10%.

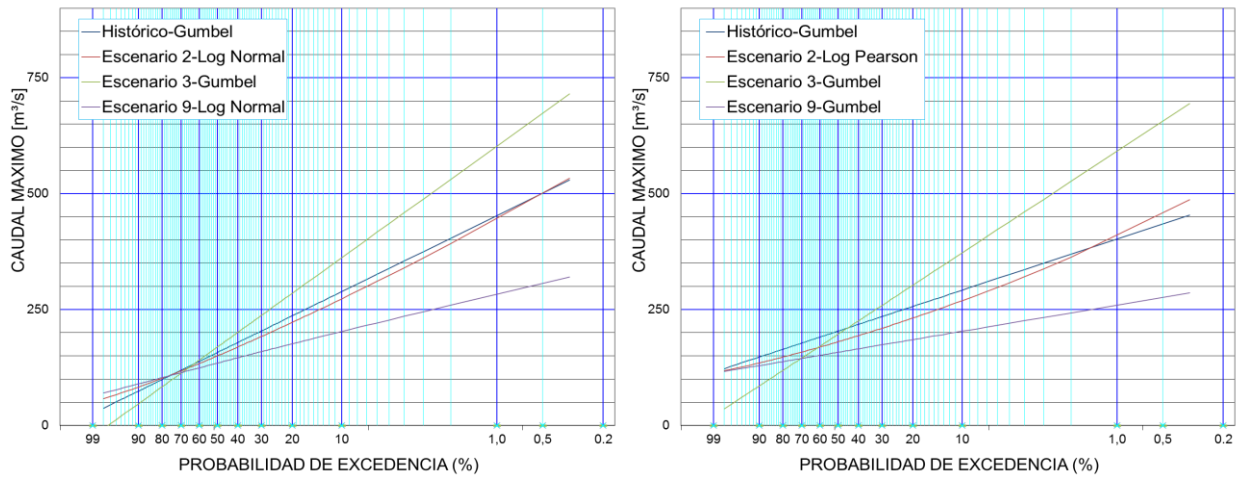


Figura C.3(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=50%.

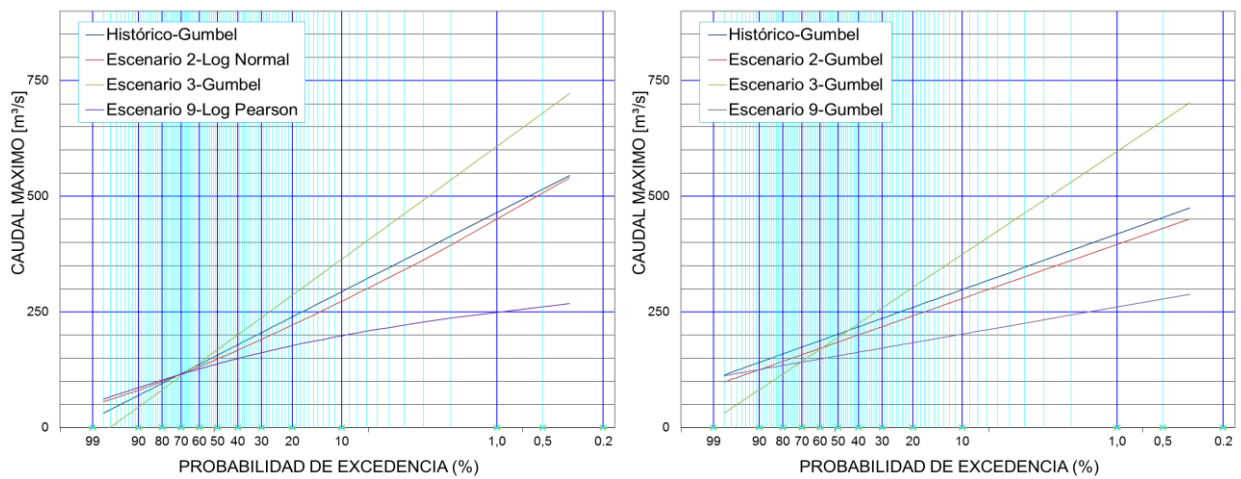


Figura C.4(a) Análisis de frecuencia para el registro anual de caudal máximo. (b) Análisis de frecuencia para serie de excedencias anuales. Aplicadas para una distribución de precipitaciones mediante Varas con P=90%.

## C.4 Hidrogramas de Crecidas Para Precipitación Máxima

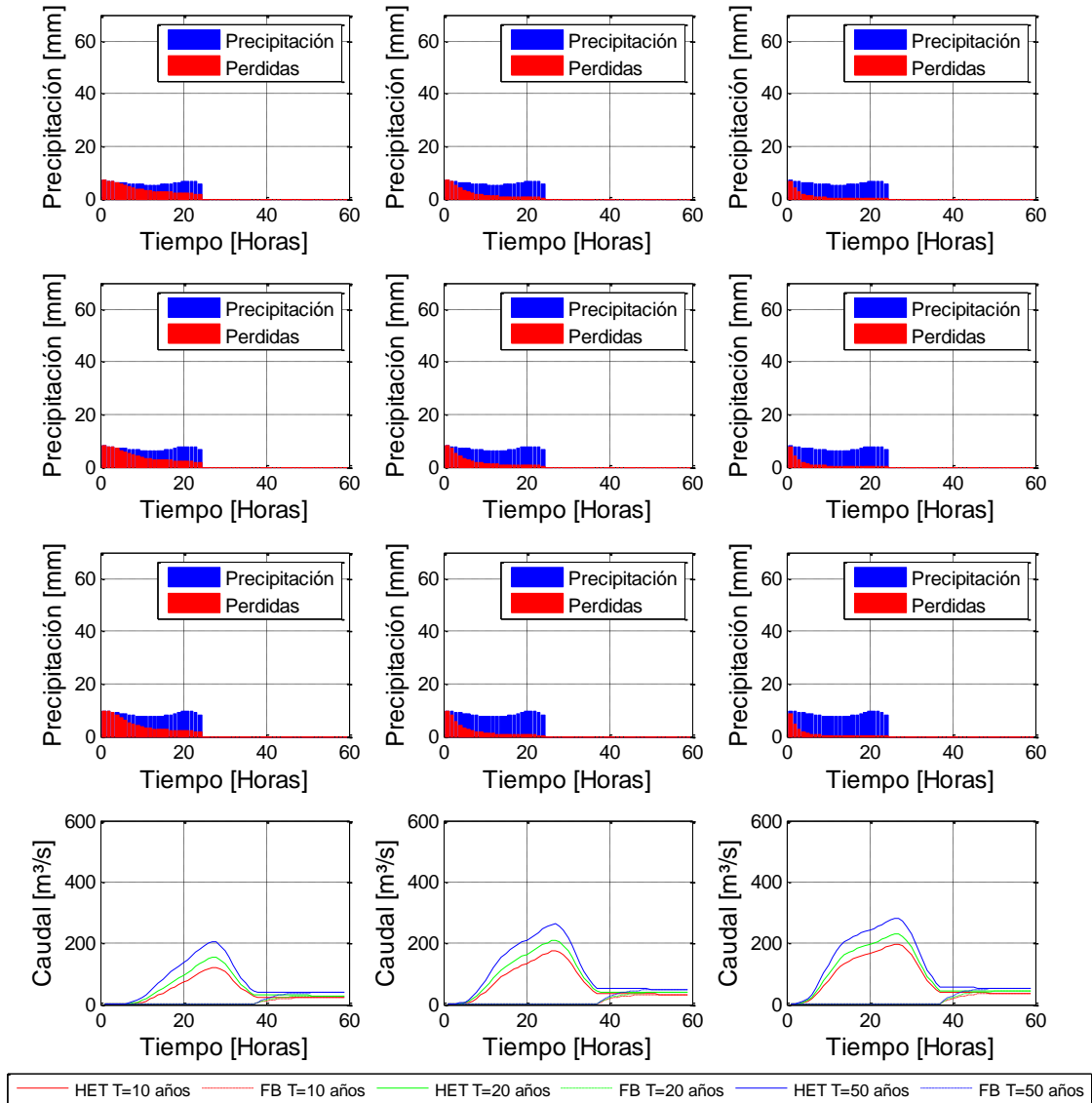


Figura C.5 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha)

Tabla C.16 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T [años]	Precipitación [mm]	Qmax AMC 1 Grupo 1 [m³/s]	Qmax AMC 2 Grupo 1 [m³/s]	Qmax AMC 3 Grupo 1 [m³/s]
10	144.38	121.43	175.54	196.04
20	167.54	153.37	209.29	229.12
50	203.95	204.94	262.18	281.13

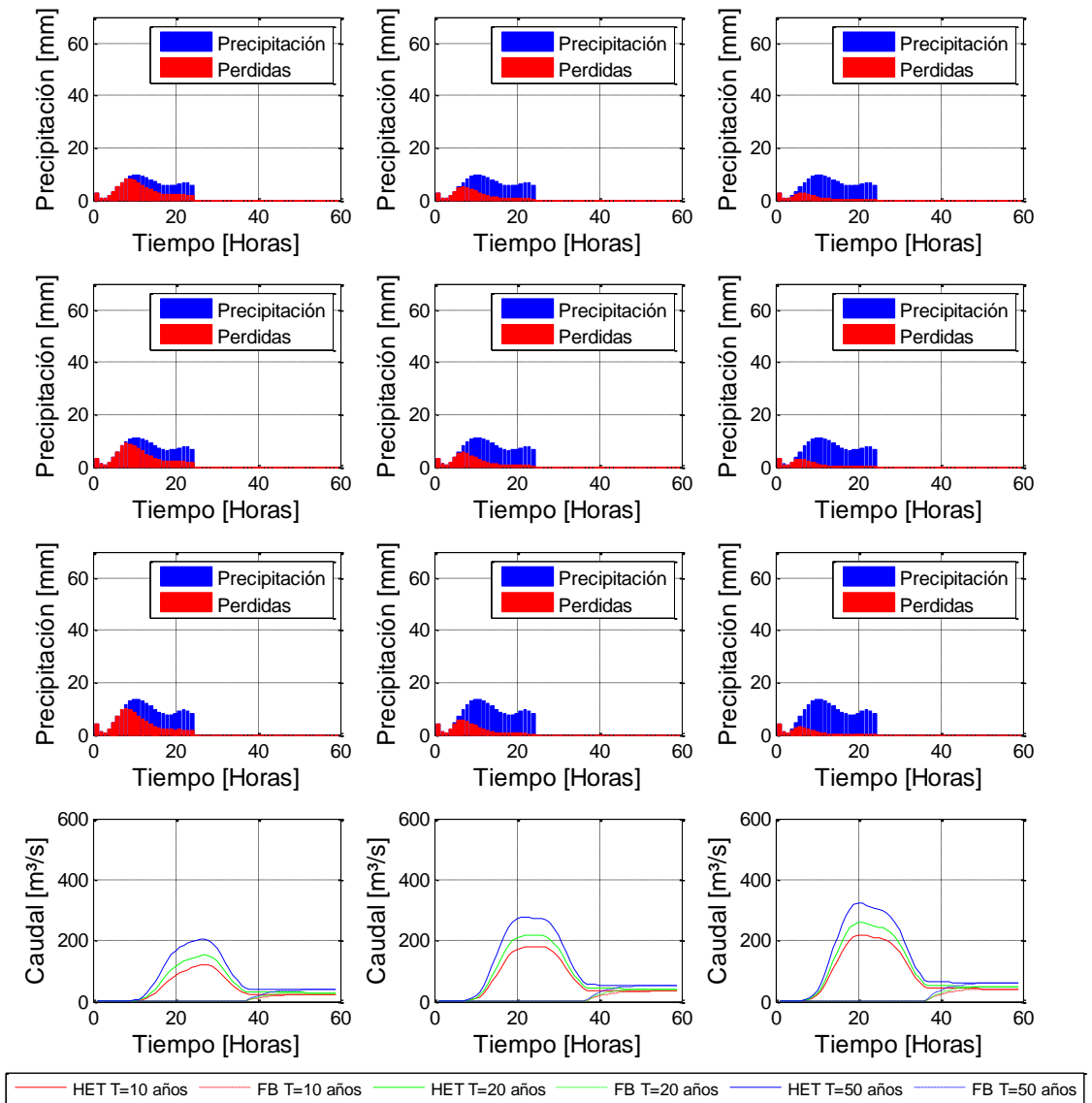


Figura C.6 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.17 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 2	Qmax AMC 2 Grupo 2	Qmax AMC 3 Grupo 2
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	121.09	180.05	218.63
<b>20</b>	167.54	153.44	216.00	258.59
<b>50</b>	203.95	205.90	276.93	322.18

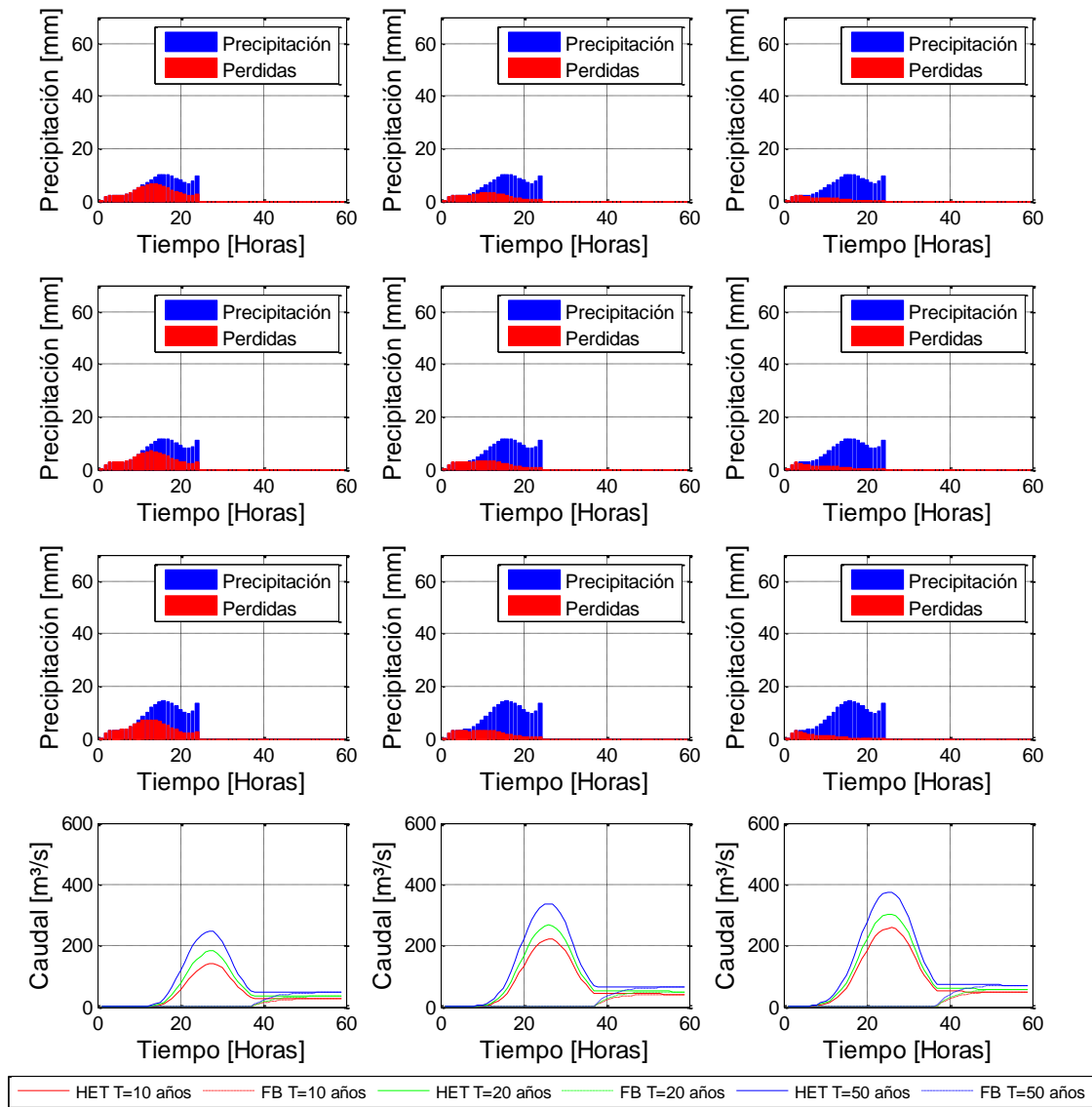


Figura C.7 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.18 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 3	Qmax AMC 2 Grupo 3	Qmax AMC 3 Grupo 3
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
10	144.38	142.99	221.01	258.21
20	167.54	182.58	266.37	303.30
50	203.95	248.13	337.87	374.50

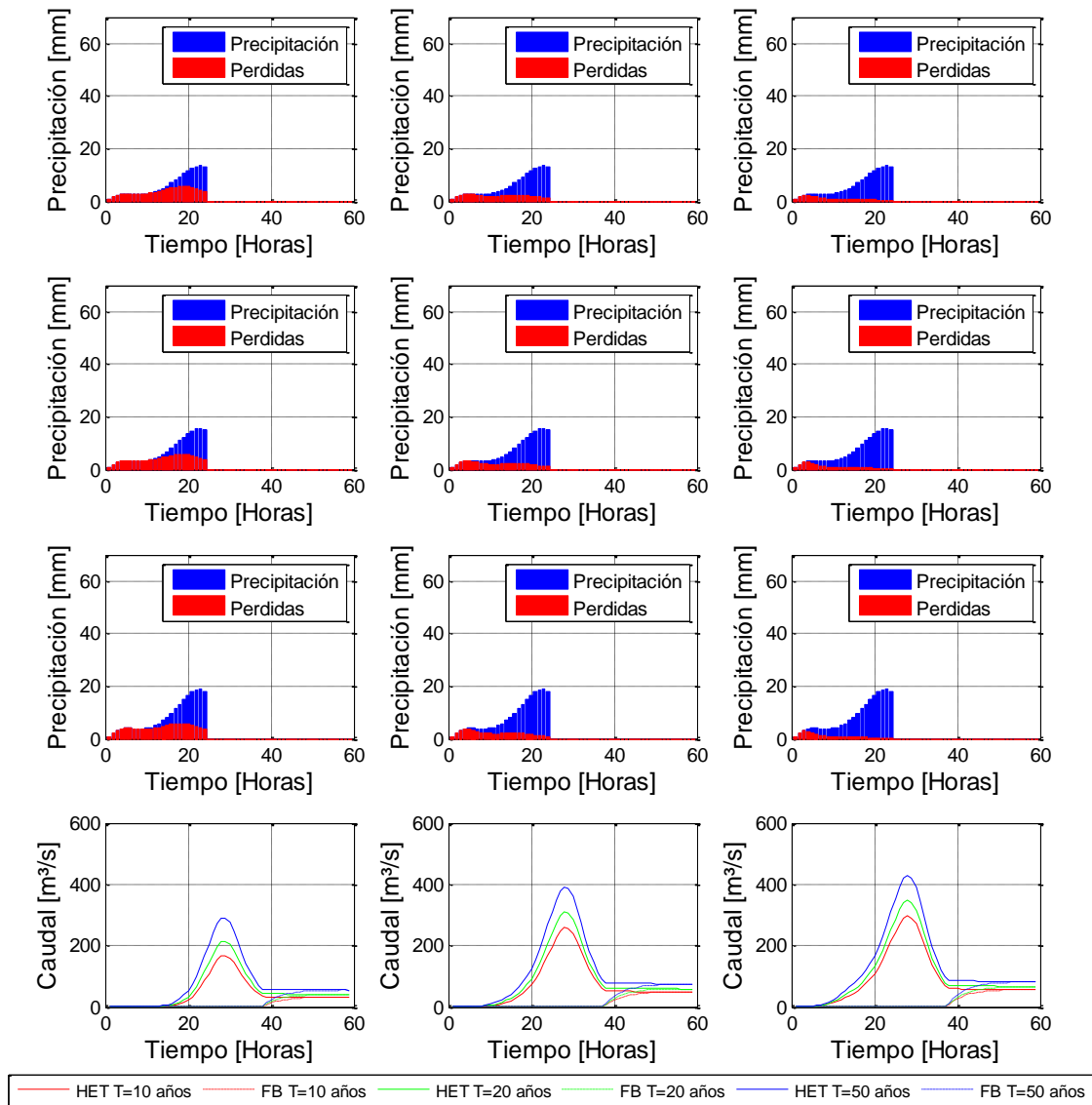


Figura C.8 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.19 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 4	Qmax AMC 2 Grupo 4	Qmax AMC 3 Grupo 4
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	167.94	258.33	297.92
<b>20</b>	167.54	214.59	310.55	349.48
<b>50</b>	203.95	290.54	392.70	430.21

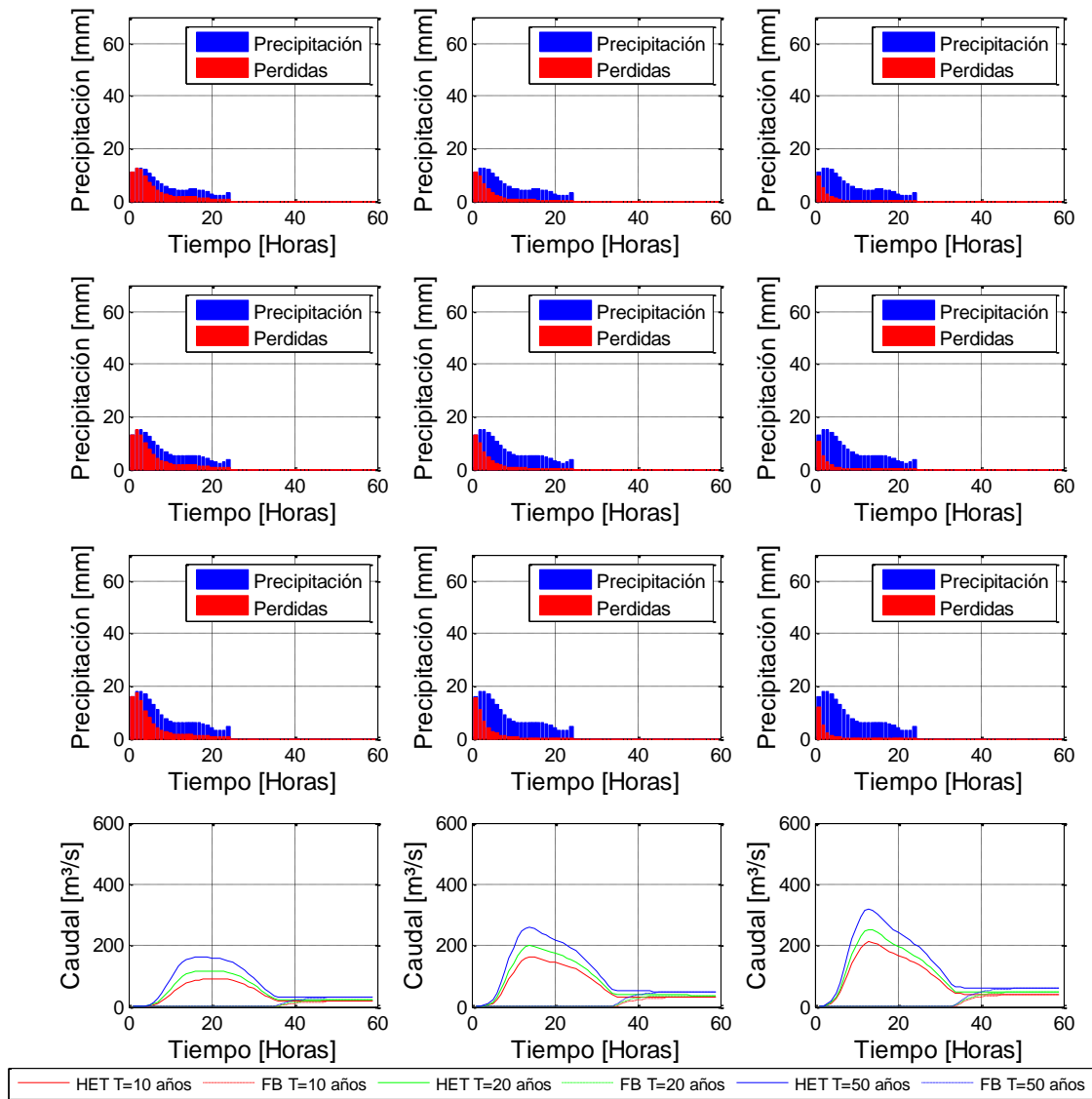


Figura C.9 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.20 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 1	Qmax AMC 2 Grupo 1	Qmax AMC 3 Grupo 1
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	92.50	161.58	212.23
<b>20</b>	167.54	117.84	199.42	253.39
<b>50</b>	203.95	161.79	260.14	318.36

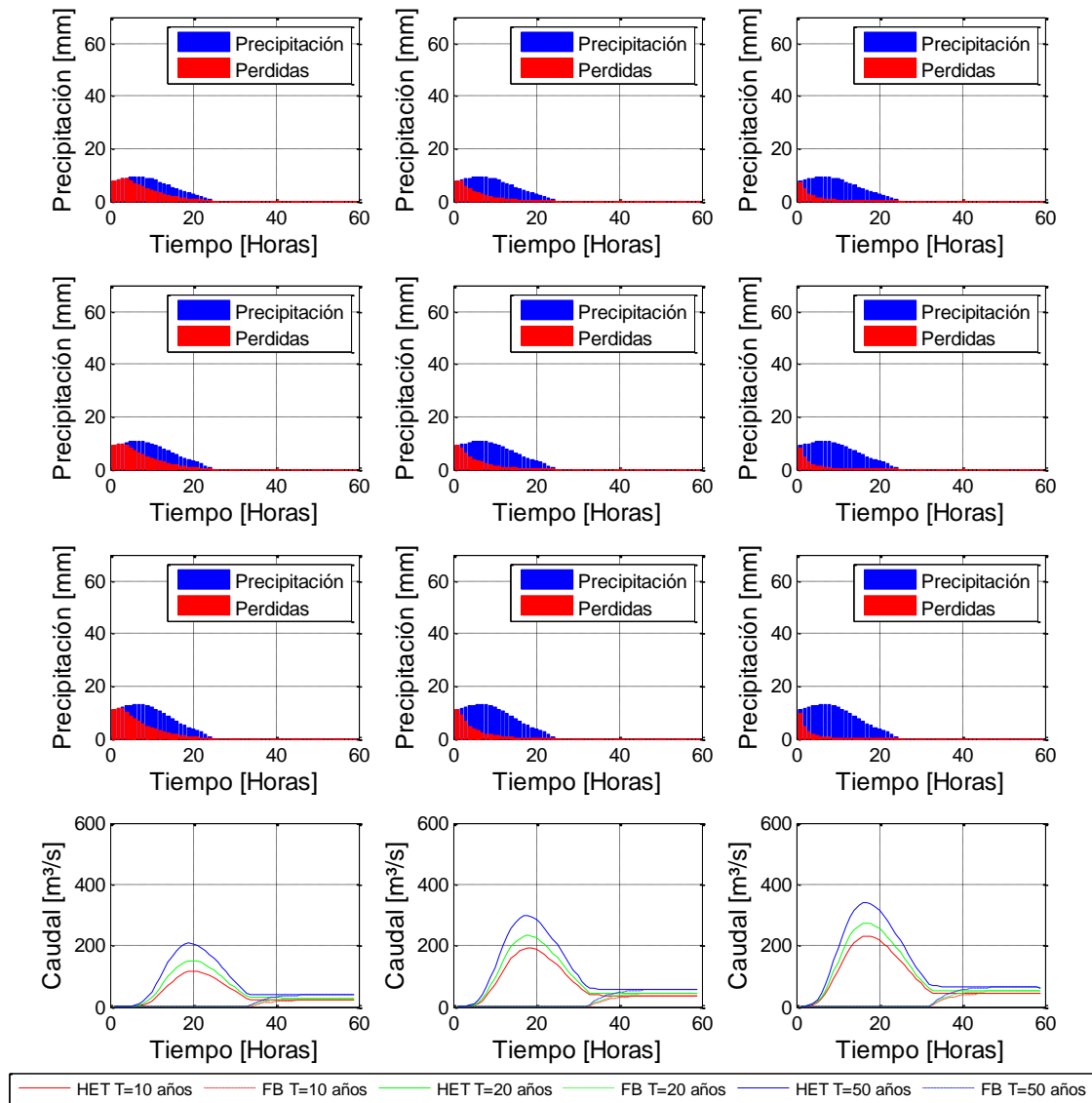


Figura C.10 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.21 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 2	Qmax AMC 2 Grupo 2	Qmax AMC 3 Grupo 2
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	117.14	191.66	232.23
<b>20</b>	167.54	150.89	232.44	274.31
<b>50</b>	203.95	207.20	297.04	340.38



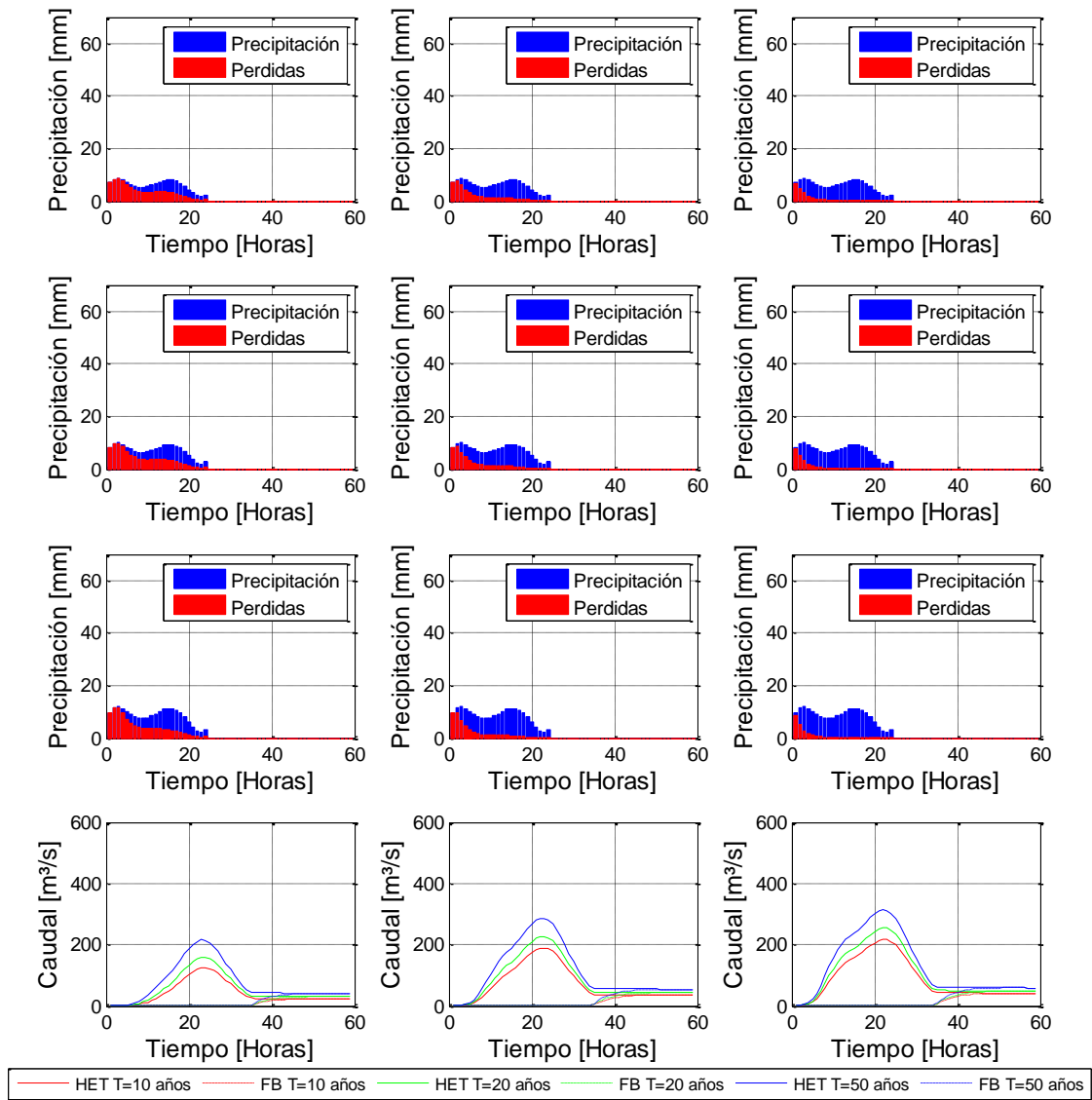


Figura C.11 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.22 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 3	Qmax AMC 2 Grupo 3	Qmax AMC 3 Grupo 3
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	125.27	189.84	217.65
<b>20</b>	167.54	159.34	227.50	255.26
<b>50</b>	203.95	215.61	286.69	314.19

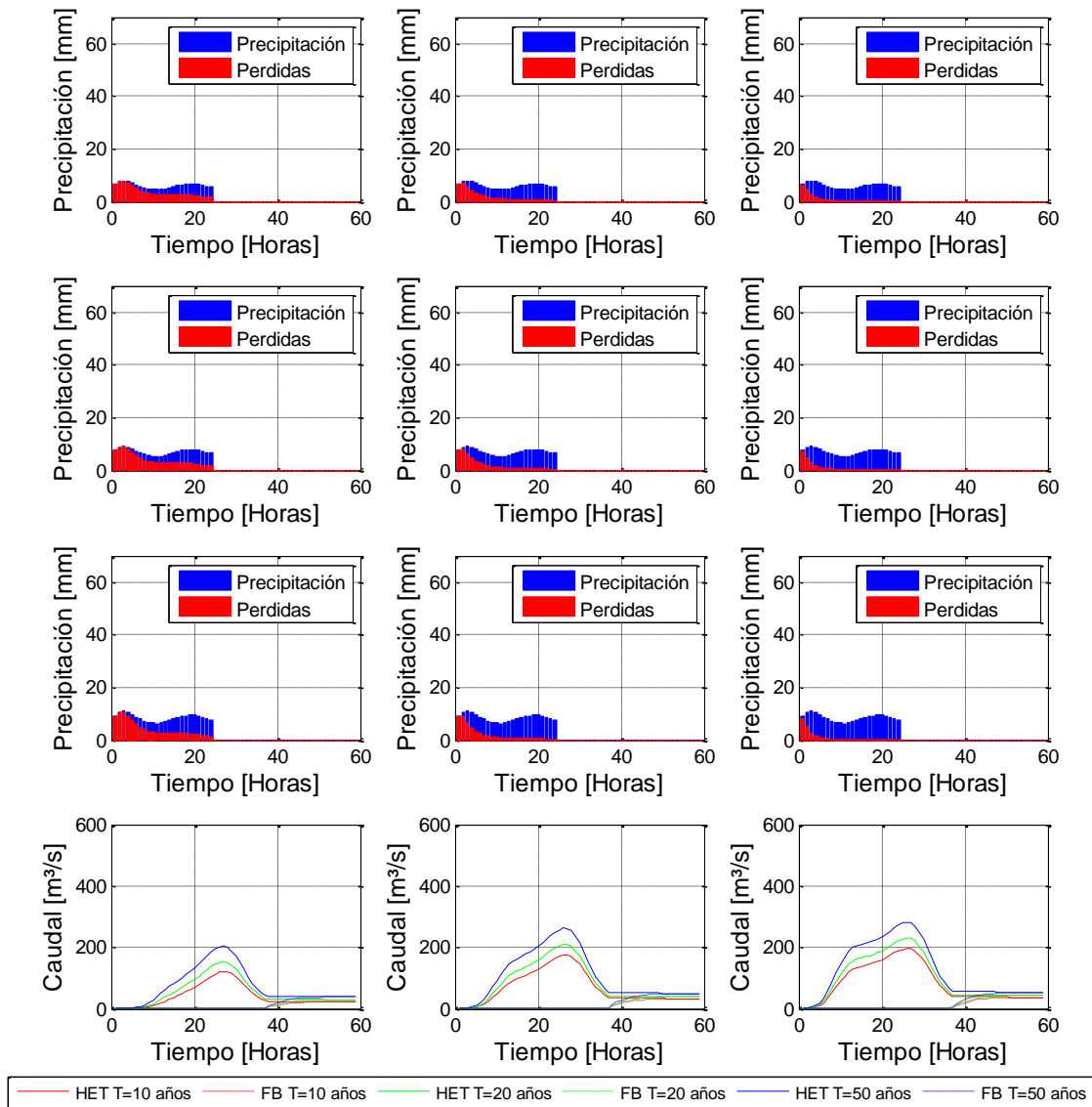


Figura C.12 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.23 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Precipitación	Qmax AMC 1 Grupo 4	Qmax AMC 2 Grupo 4	Qmax AMC 3 Grupo 4
[años]	[mm]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
<b>10</b>	144.38	121.64	175.40	197.01
<b>20</b>	167.54	153.56	209.23	230.37
<b>50</b>	203.95	205.07	262.59	282.60

## C.5 Hidrogramas de Crecidas Para Caudal Máximo

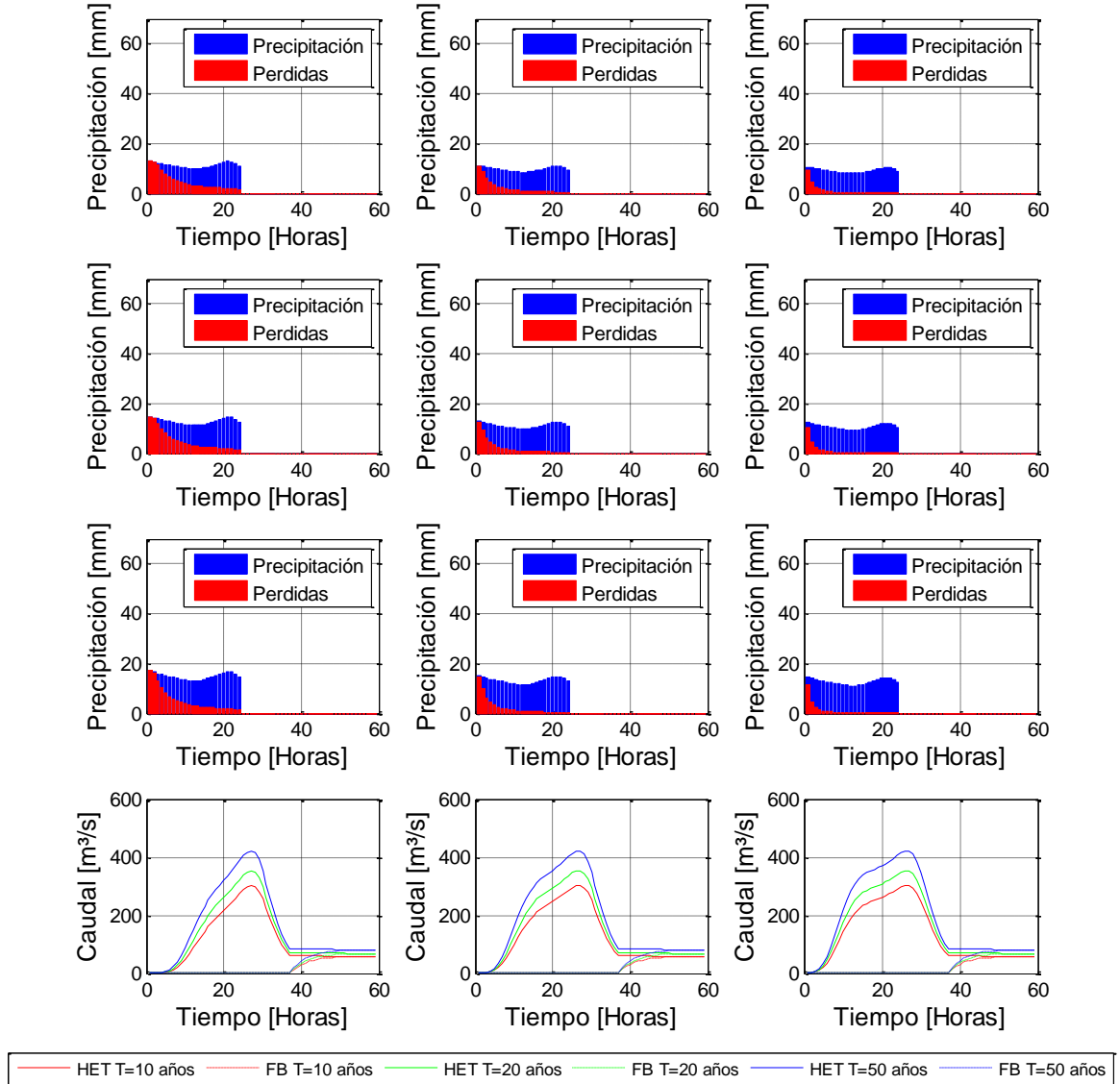


Figura C.13 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.24 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 1	PP AMC 2 Grupo 1	PP AMC 3 Grupo 1
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	302	271	231	219
20	354	307	268	255
50	422	353	315	303

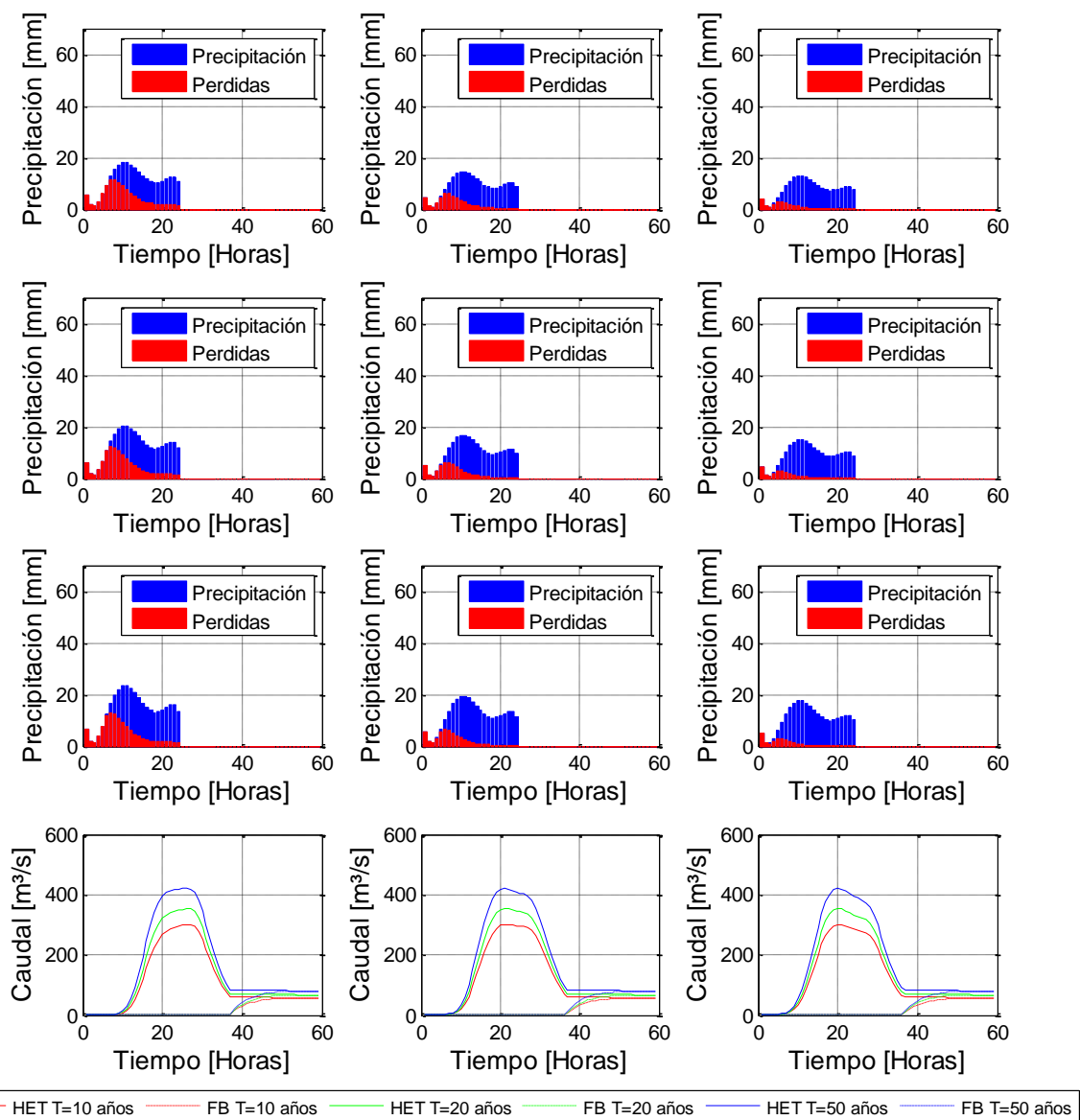


Figura C.14 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.25 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 2	PP AMC 2 Grupo 2	PP AMC 3 Grupo 2
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	302	269	219	192
20	354	303	249	222
50	422	347	288	261

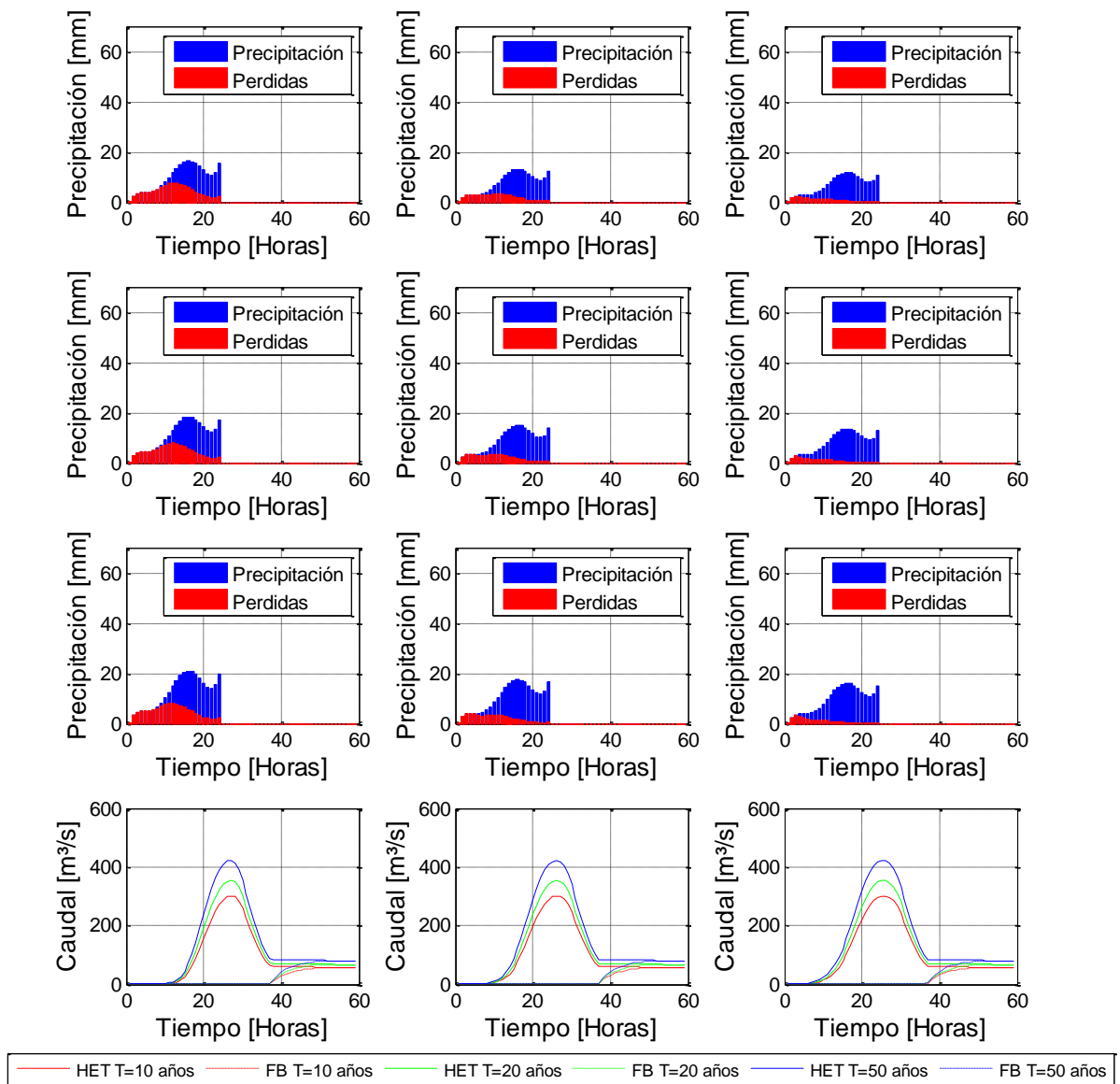


Figura C.15 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.26 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 3	PP AMC 2 Grupo 3	PP AMC 3 Grupo 3
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	302	233	186	167
20	354	261	212	193
50	422	297	247	228

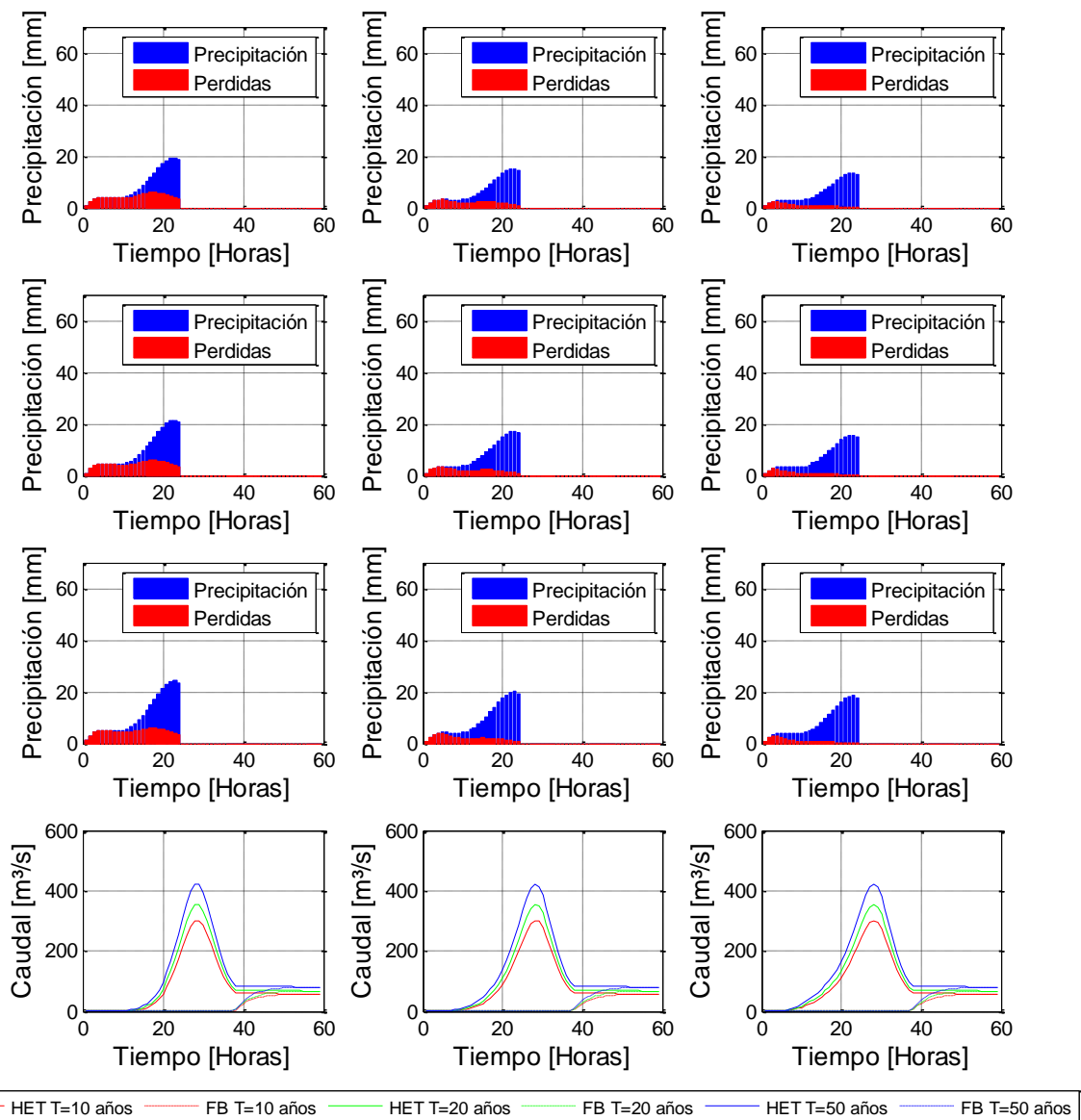


Figura C.16 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 10%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.27 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 10%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 4	PP AMC 2 Grupo 4	PP AMC 3 Grupo 4
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	302	209	164	146
20	354	234	187	170
50	422	264	217	200

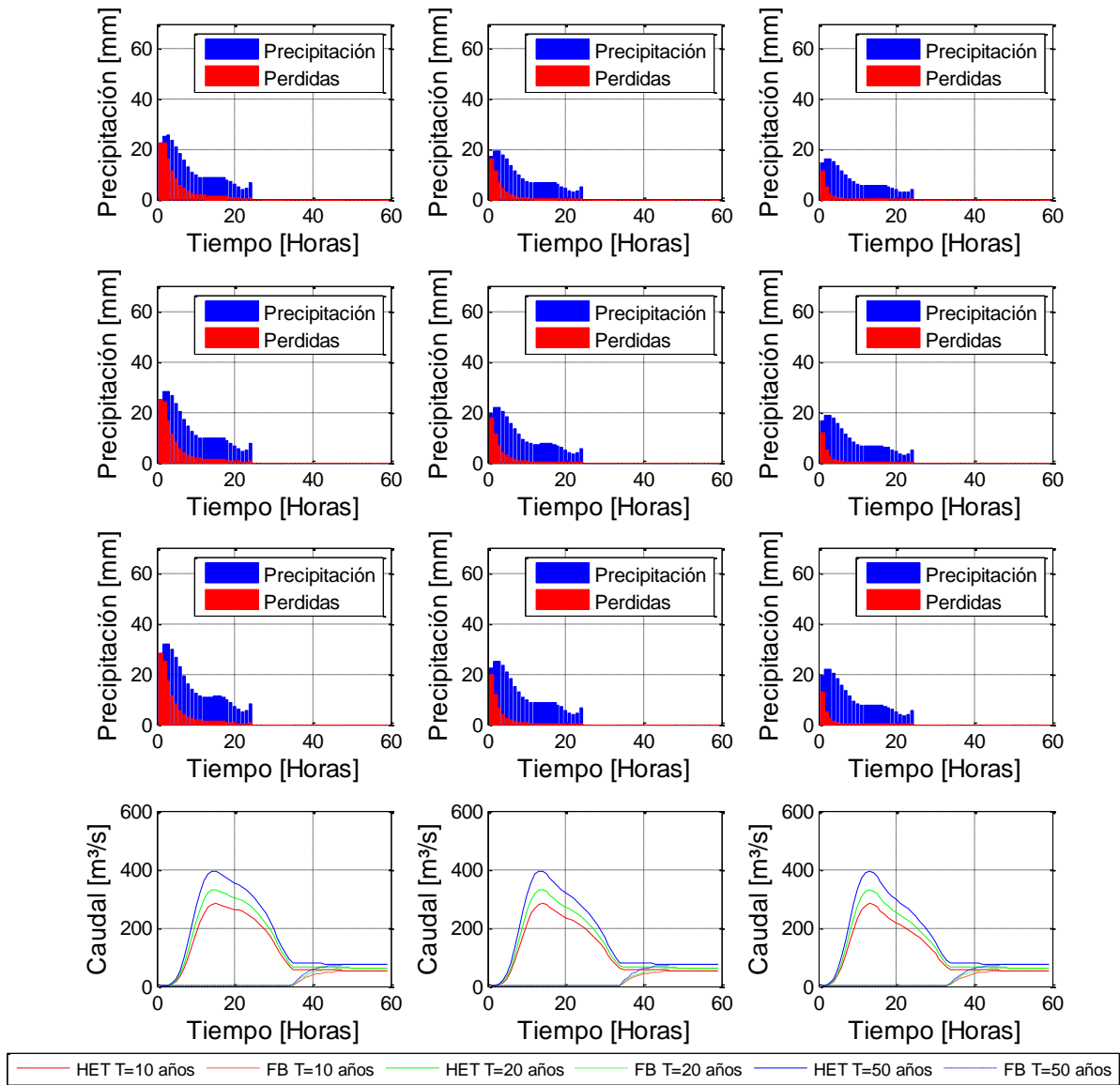


Figura C.17 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 1, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.28 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 1, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 1	PP AMC 2 Grupo 1	PP AMC 3 Grupo 1
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	282	288	217	184
20	331	320	246	211
50	395	361	283	247

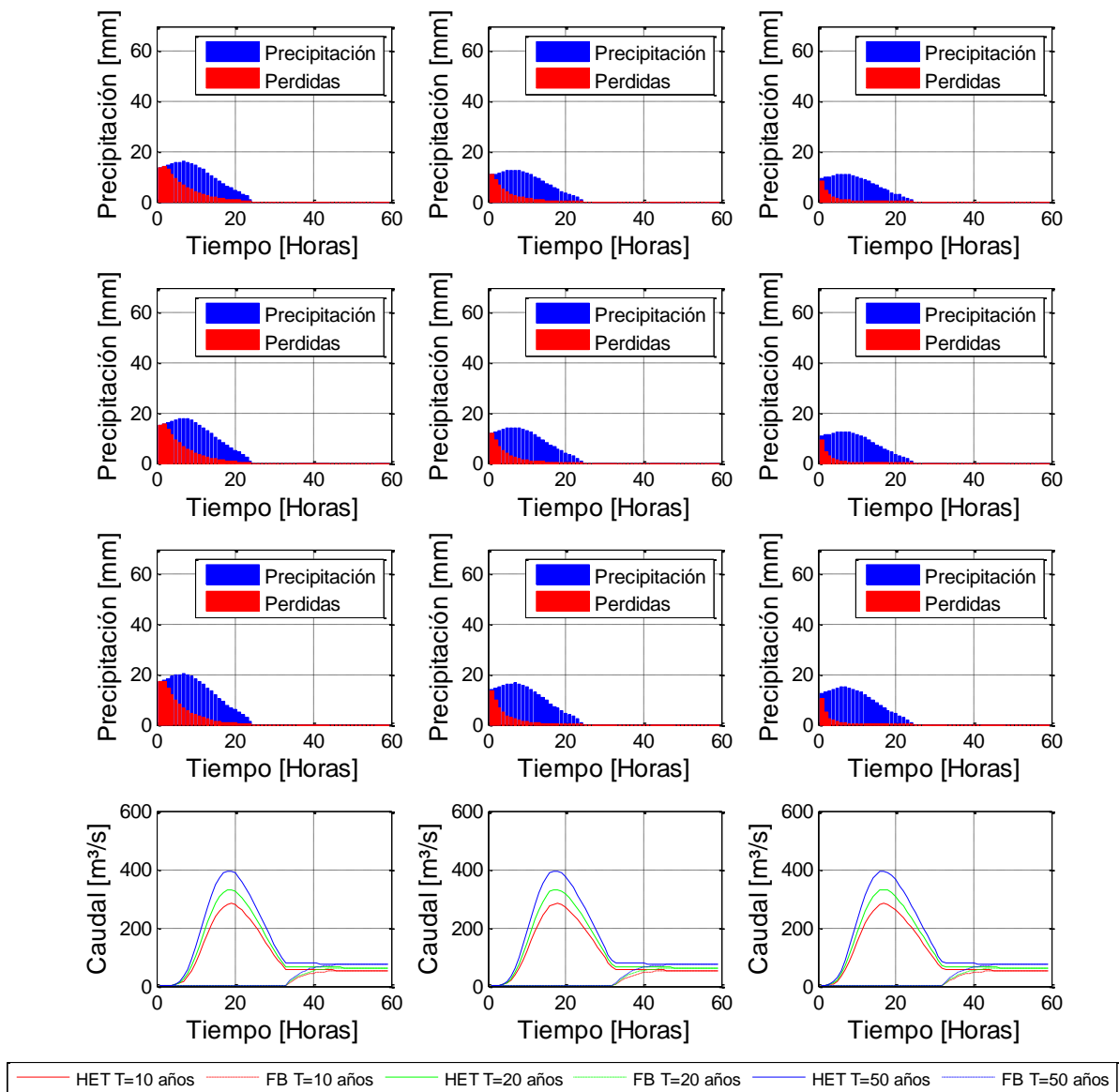


Figura C.18 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 2, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.29 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 2, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

T	Q max	PP AMC 1 Grupo 2	PP AMC 2 Grupo 2	PP AMC 3 Grupo 2
[años]	[m³/s]	[mm]	[mm]	[mm]
10	282	250	195	172
20	331	279	223	199
50	395	317	259	234



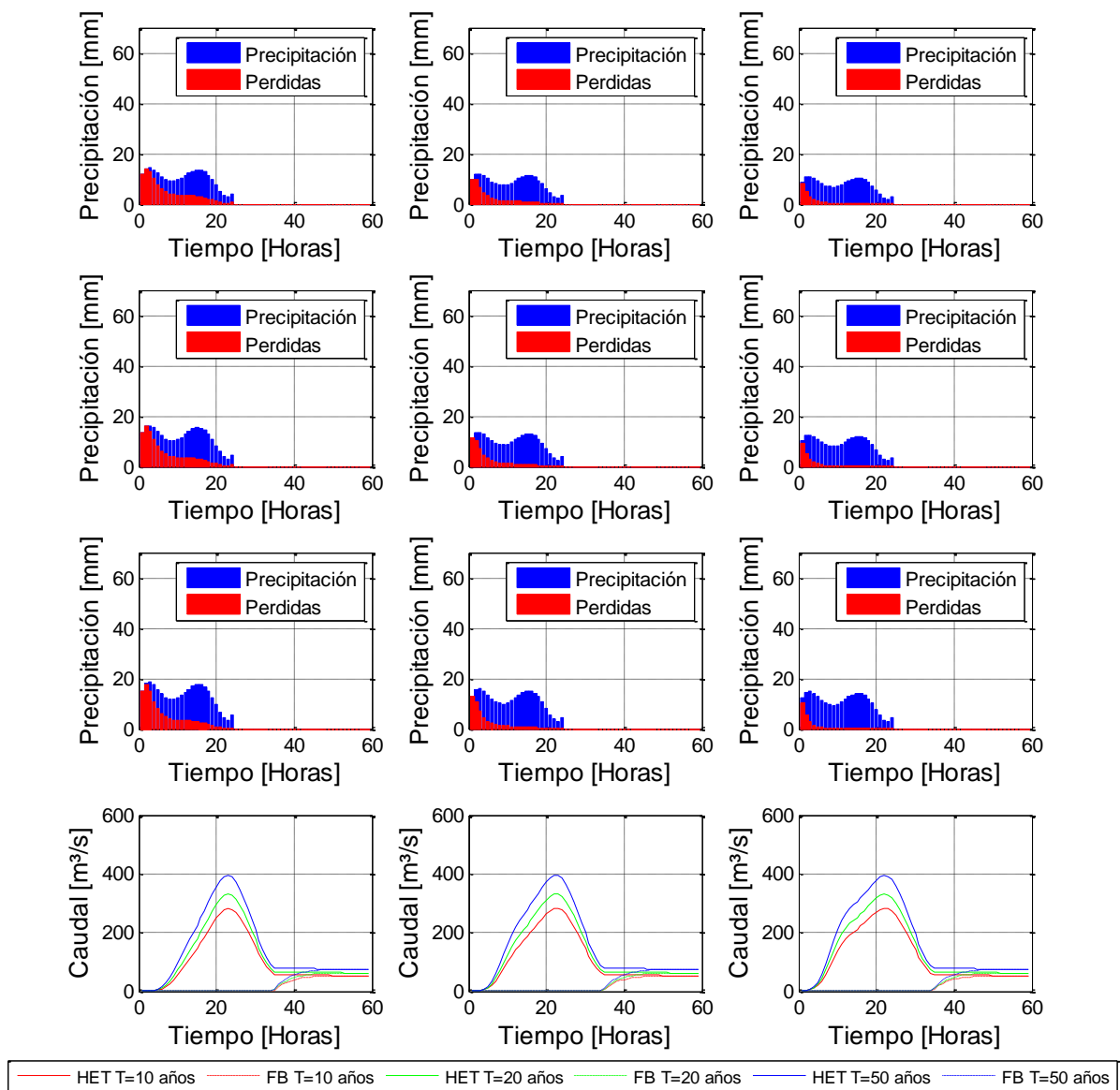


Figura C.19 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 3, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.30 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 3, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad.

<b>T</b>	<b>Q max</b>	<b>PP AMC 1 Grupo 3</b>	<b>PP AMC 2 Grupo 3</b>	<b>PP AMC 3 Grupo 3</b>
<b>[años]</b>	<b>[m³/s]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>10</b>	282	246	201	184
<b>20</b>	331	276	231	214
<b>50</b>	395	316	270	254

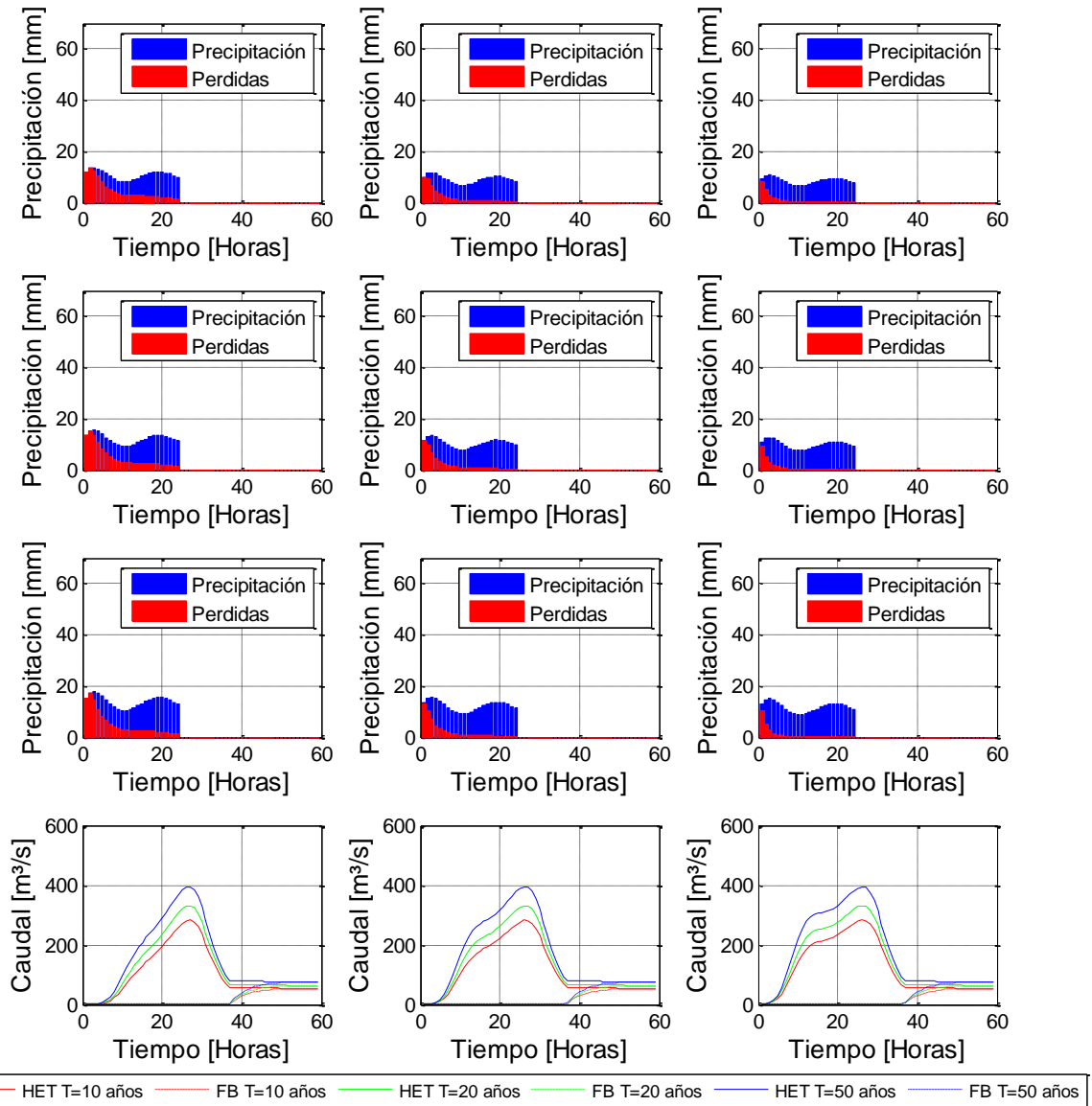


Figura C.20 Hidrogramas de crecidas asociados a precipitaciones de periodos de retorno, 10, 20 y 50 años. Distribución de precipitaciones de Varas grupo 4, con probabilidad de excedencia del 90%. Condiciones de humedad AMC 1 (izquierda), AMC 2 (centro) y AMC3 (derecha).

Tabla C.31 Resumen de crecidas distribución de precipitaciones Varas grupo 4, probabilidad de excedencia del 90%, 3 periodos de retorno, 10, 20 y 50 años y 3 condiciones de humedad

<b>T</b>	<b>Q max</b>	<b>PP AMC 1 Grupo 4</b>	<b>PP AMC 2 Grupo 4</b>	<b>PP AMC 3 Grupo 4</b>
<b>[años]</b>	<b>[m³/s]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>10</b>	282	257	217	204
<b>20</b>	331	291	251	238
<b>50</b>	395	335	295	283

## C.6 Caudales Máximos Asociados a Precipitaciones de Periodo de Retorno 10, 20 y 50 años

Tabla C.32 Límite superior de caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de Varas, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3

Humedad		AMC 1			AMC 2			AMC 3		
		Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo I	Grupo II	Grupo III
T (años)										
10	Hist.	106-10%	130-10%	164-10%	159-10%	185-10%	220-10%	192-90%	224-90%	267-90%
	E2	121-10%	148-10%	184-10%	175-10%	204-10%	240-10%	212-90%	247-90%	292-90%
	E3	175-10%	221-10%	279-10%	232-10%	279-90%	347-90%	281-90%	338-90%	410-90%
20	Hist.	106-10%	130-10%	164-10%	172-90%	203-90%	246-90%	212-60%	244-60%	288-60%
	E2	121-10%	148-10%	184-10%	191-90%	226-90%	270-90%	232-90%	268-90%	313-90%
	E3	176-10%	225-90%	290-90%	260-90%	317-90%	388-90%	302-90%	360-90%	433-90%
50	Hist.	106-10%	130-10%	164-10%	172-90%	203-90%	246-90%	212-60%	244-60%	288-60%
	E2	121-10%	148-10%	184-10%	191-90%	226-90%	270-90%	232-90%	268-90%	313-90%
	E3	176-10%	225-90%	290-90%	260-90%	317-90%	388-90%	302-90%	360-90%	433-90%
10	Hist.	124-10%	154-10%	196-10%	199-10%	234-10%	281-10%	236-10%	271-10%	318-10%
	E2	142-10%	176-10%	221-10%	220-10%	259-10%	308-10%	257-10%	296-10%	345-10%
	E3	210-10%	268-10%	343-10%	297-10%	360-10%	438-10%	333-10%	396-10%	474-10%
20	Hist.	124-10%	154-10%	196-10%	199-10%	234-10%	281-10%	236-10%	271-10%	318-10%
	E2	142-10%	176-10%	221-10%	220-10%	259-10%	308-10%	257-10%	296-10%	345-10%
	E3	210-10%	268-10%	343-10%	297-10%	360-10%	438-10%	333-10%	396-10%	474-10%
50	Hist.	124-10%	154-10%	196-10%	199-10%	234-10%	281-10%	236-10%	271-10%	318-10%
	E2	142-10%	176-10%	221-10%	220-10%	259-10%	308-10%	257-10%	296-10%	345-10%
	E3	210-10%	268-10%	343-10%	297-10%	360-10%	438-10%	333-10%	396-10%	474-10%
10	Hist.	146-10%	181-10%	230-10%	233-10%	273-10%	327-10%	273-10%	313-10%	366-10%
	E2	167-10%	207-10%	259-10%	257-10%	303-10%	359-10%	297-10%	342-10%	397-10%
	E3	247-10%	314-10%	401-10%	345-10%	418-10%	508-10%	384-10%	455-10%	543-10%
20	Hist.	146-10%	181-10%	230-10%	233-10%	273-10%	327-10%	273-10%	313-10%	366-10%
	E2	167-10%	207-10%	259-10%	257-10%	303-10%	359-10%	297-10%	342-10%	397-10%
	E3	247-10%	314-10%	401-10%	345-10%	418-10%	508-10%	384-10%	455-10%	543-10%
50	Hist.	146-10%	181-10%	230-10%	233-10%	273-10%	327-10%	273-10%	313-10%	366-10%
	E2	167-10%	207-10%	259-10%	257-10%	303-10%	359-10%	297-10%	342-10%	397-10%
	E3	247-10%	314-10%	401-10%	345-10%	418-10%	508-10%	384-10%	455-10%	543-10%

Nota: 10%=Valor asociado a probabilidad 10%; 50%= Valor asociado a probabilidad 50%; 90%=valor asociado a probabilidad 90%

Nota: 10%=Valor asociado a probabilidad 10%; 50%= Valor asociado a probabilidad 50%; 90%=valor asociado a probabilidad 90%

Tabla C.33 Límite inferior de caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de Varas, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3

AMC 1		AMC 2		AMC 3	
Humedad		Humedad		Humedad	
Grupo I	Grupo II	Grupo I	Grupo II	Grupo I	Grupo II
T (años)	T (años)	T (años)	T (años)	T (años)	T (años)
Hist.	Hist.	Hist.	Hist.	Hist.	Hist.
10	10	10	10	10	10
20	20	20	20	20	20
50	50	50	50	50	50
81-90%	96-50%	130-50%	159-50%	160-50%	196-50%
92-90%	110-50%	143-50%	177-50%	176-50%	215-50%
100-90%	137-50%	167-50%	210-50%	204-50%	248-50%
126-90%	171-50%	201-50%	251-50%	240-50%	290-50%
135-90%	269-50%	291-50%	360-50%	231-50%	400-50%
177-90%	183-90%	236-50%	294-50%	277-50%	334-50%
228-50%	297-90%	291-50%	370-90%	335-50%	400-50%
66-90%	90-90%	113-50%	149-90%	140-50%	176-90%
81-90%	125-90%	130-50%	189-90%	160-50%	217-90%
98-90%	154-90%	150-50%	222-90%	184-50%	250-90%
118-50%	192-90%	150-50%	262-90%	205-90%	290-90%
79-50%	279-90%	150-50%	370-90%	227-90%	396-90%
96-50%	188-90%	150-50%	240-90%	160-90%	267-90%
119-50%	233-90%	150-50%	240-90%	181-90%	267-90%
152-50%	109-90%	150-50%	240-90%	207-90%	267-90%
110-50%	125-90%	150-50%	240-90%	196-90%	290-90%
137-50%	183-90%	150-50%	240-90%	196-90%	290-90%
171-50%	233-90%	150-50%	240-90%	225-90%	290-90%
106-90%	175-90%	150-50%	240-90%	253-90%	290-90%
131-90%	221-90%	150-50%	240-90%	298-90%	290-90%
164-90%	279-90%	150-50%	240-90%	356-90%	290-90%

Nota: 10%=Valor asociado a probabilidad 10%; 50%= Valor asociado a probabilidad 50%; 90%=valor asociado a probabilidad 90%

Tabla C.34 Caudales máximos de registro histórico y proyecciones futuras para distribución de bloques alternados, considerando condición de humedad AMC1, AMC2 y AMC3

Humedad	AMC 1				AMC 2				AMC 3			
	Bloques Alternados				Bloques Alternados				Bloques Alternados			
T (años)	Hist.	E2	E3	E9	Hist.	E2	E3	E9	Hist.	E2	E3	E9
<b>10</b>	110	128	196	88	200	223	306	171	251	274	358	220
<b>20</b>	139	162	256	110	238	266	375	200	289	317	426	251
<b>50</b>	182	207	334	138	289	319	461	236	341	371	512	287