



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

**ANÁLISIS ESPACIAL DE HIETOGRAMAS PARA
LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER BERRÍOS BERRÍOS

PROFESOR GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES MC-PHEE TORRES
ERNESTO BROWN FERNANDEZ

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2008

RESUMEN

La necesidad de tener conocimiento de la respuesta de una cuenca durante el paso de un evento meteorológico de gran magnitud está directamente relacionada con los proyectos de ingeniería hidráulica. La distribución, espacial y temporal, de la precipitación generada sobre la cuenca se refleja en la forma que adopta el hidrograma y la magnitud de los caudales máximos en las secciones de salida de ésta, lo que condiciona los diseños de obras hidráulicas.

El objetivo principal de este trabajo es el análisis de hietogramas, los períodos de retorno asociados a la magnitud de precipitación en distintos puntos, y la estimación de caudales de diseño para una cuenca pluvial usando como información básica la distribución espacial y temporal de la precipitación estimada a través de un modelo meteorológico y corregida a base de la información medida en estaciones pluviográficas.

Este proceso se realizó mediante la aplicación del software computacional de modelación de cuencas WMS y el modelo de generación de caudales HEC-1. Como información de entrada se utilizaron los resultados del modelo de predicción meteorológica MM5 para el año 2002 y los datos de estaciones meteorológicas consideradas representativas de la zona en estudio.

La cuenca seleccionada para realizar el estudio corresponde a la la definida por la estación Angostura en Valdivia de Paine, en la que se dispone de los antecedentes necesarios (distribución de precipitación con el modelo MM5, precipitación observada, caudales registrados y características fisiográficas) aunque no todos ellos con la resolución considerada como la más conveniente para los fines del estudio. Las precipitaciones entregadas por el modelo MM5, corregidas a base de información observada, permitieron establecer un patrón de distribución espacial que puede ser usado con fines de diseño para generar hidrogramas a través de modelos como HEC-1 en la cuenca en estudio. Sin embargo, no fue posible establecer con precisión la confiabilidad de la relación que establece el período de retorno del caudal obtenido, recomendándose que, en el futuro, se aborde el análisis de eventos de precipitación de período de retorno intermedio (5 a 50 años).

Los resultados obtenidos para las 8 tormentas disponibles, indicaron que la modelación agregada con distribución temporal de la precipitación variable en cada nodo es más precisa que aquella con duración y distribución temporal única para todos los nodos. Los caudales máximos se obtuvieron en el 87,5% de los casos (7/8), sin embargo los volúmenes generados sólo se alcanzaron en el 62,5% (5/8).

Como resultado del estudio se obtuvo una metodología para obtener la distribución espacial de hietogramas de diseño y su relación con el período de retorno del caudal máximo de salida, teniendo en cuenta que éste es solo el punto de partida para análisis más profundos y con nuevas herramientas.

AGRADECIMIENTOS

A mi viejita linda por su amor y apoyo incondicional durante todos estos largos años.

A mi Nenita, mi Tío Lucho y toda mi familia, soportes fundamentales en mi vida.

A mi niña preciosa que me ayudo a seguir adelante durante todo momento.

A mi profesora guía Ximena Vargas que me tuvo que soportar durante un largo tiempo, y que me aconsejó sabiamente.

A mis amigos de Curanipe con los cuales llevo compartiendo por más de 10 años y que espero hacerlo siempre.

A mis amigos de la U, ya sea compañeros de clases, del pool o de la terraza. Todos ellos hicieron que los años no fueran tan largos.

Ya todas las personas con las que compartí durante todos estos años y que hicieron de mi una mejor persona y un futuro profesional. A todos ellos....

MUCHISIMAS GRACIAS

TABLA DE CONTENIDOS

PÁGINA

1	<u>INTRODUCCION</u>	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	OBJETIVOS GENERALES	2
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3	ORGANIZACIÓN DEL INFORME	3
2	<u>ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO</u>	5
2.1	MODELACIÓN DE CUENCAS	5
2.1.1	DESCRIPCIÓN WMS	6
2.1.2	DATOS DE ENTRADA A HEC-1	7
2.1.2.1	Precipitación	7
2.1.2.2	Infiltración	7
2.1.2.3	Relación Precipitación Escorrentía	8
2.1.2.4	Tránsito de Hidrogramas	9
2.2	MODELOS DE MESOESCALA	10
2.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO MM5	12
2.2.2	IMPLEMENTACIÓN EN LA UNIVERSIDAD DE CHILE	13
2.2.3	DATOS DE UTILIZACIÓN DEL MODELO	15
2.3	MÉTODOS ESTADÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS EN HIDROLOGÍA	16
2.3.1	ANÁLISIS DE FRECUENCIA	16
2.4	ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN	18
2.4.1	DISTRIBUCIÓN DE VARAS	18
2.4.2	PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 1, 2 Y 3 DÍAS	20
3	<u>SELECCIÓN DE LA CUENCA A ESTUDIAR</u>	22
3.1	RESTRICCIONES DE SELECCIÓN DE CUENCAS	22
3.2	ALTERNATIVAS DE CUENCAS Y SU DESCRIPCIÓN GENERAL	23
3.2.1	ALHUÉ EN QUILAMUTA	24
3.2.2	PAINE EN VALDIVIA DE PAINE	26
3.2.3	PUANGUE EN BOQUERÓN	29
3.3	ELECCIÓN DEFINITIVA DE LA CUENCA	32
4	<u>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE</u>	35
4.1	REGISTROS LIMNIGRÁFICOS	35
4.2	REGISTROS PLUVIOGRÁFICOS PARA CADA TORMENTA	37
4.2.1	DATOS DGA	37
4.2.2	DATOS MM5	38

<u>5</u>	<u> DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN PARA LOS PUNTOS DE LA GRILLA Y CORRECCIÓN DE LOS DATOS DEL MM5</u>	40
5.1	INTRODUCCIÓN	40
5.2	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	41
5.2.1	DETERMINACIÓN DEL GRUPO DE DISTRIBUCIÓN DE VARAS	41
5.2.2	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CADA CURVA	42
5.2.3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
5.3	CORRECCIÓN DE LOS DATOS DEL MM5	44
5.3.1	FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA MAGNITUD	45
5.3.2	FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA DURACIÓN	46
5.3.3	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS	51
<u>6</u>	<u> PERÍODOS DE RETORNO DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN PARA CADA PUNTO DE LA GRILLA Y DE LOS CAUDALES DE LAS TORMENTAS</u>	61
6.1	DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE LA PRECIPITACIONES	61
6.1.1	DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA DE PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS	61
6.1.2	COEFICIENTE DE DURACIÓN PARA T HORAS	62
6.1.3	DETERMINACIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO DE LAS PRECIPITACIONES	63
6.2	DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE LOS CAUDALES EN CADA TORMENTA	63
6.2.1	ANÁLISIS DE FRECUENCIA	64
6.2.1.1	Aplicación de REGBAY	64
6.2.1.2	Registros Históricos de Caudales	65
6.2.1.3	Ajuste y Selección de la Distribución de Probabilidad	66
6.2.2	OBTENCIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO DE CAUDALES PARA CADA TORMENTA	67
6.2.2.1	Generalidades	67
6.2.2.2	Determinación de los Caudales Máximos de las Tormentas y Parámetros Generales	67
6.2.2.3	Determinación de los Períodos de Retorno de los Caudales	68
6.2.2.4	Resultados	69
<u>7</u>	<u> RELACIONES DE MAGNITUD Y PERÍODOS DE RETORNO, DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES</u>	74
7.1	RELACIÓN PERÍODOS DE RETORNO: PRECIPITACIONES – CAUDAL	74
7.1.1	RELACIONES ESTADÍSTICAS	75
7.1.2	METODOLOGÍA Y RESULTADOS	75
7.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIONES	77
7.2.1	METODOLOGÍA Y RESULTADOS	77
7.3	APLICACIONES	78
7.3.1	PARTICIÓN DE LA CUENCA Y SIMULACIÓN DE CAUDALES	79
7.3.2	DETERMINACIÓN DE HIDROGRAMAS DE CRECIDA PARA LAS TORMENTAS SELECCIONADAS	80
7.3.2.1	Análisis para las Tormentas Seleccionadas	81
7.3.3	DETERMINACIÓN DE HIDROGRAMAS DE CRECIDA PARA UNA TORMENTA ARBITRARIA	81

7.3.4.1	Resultados y Análisis Tormentas Seleccionadas	82
7.3.4.2	Resultados y Análisis Tormenta Arbitraria	88
8	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	92
8.1	DATOS UTILIZADOS	92
8.2	MODELOS UTILIZADOS	92
8.3	RESULTADOS	93
8.4	COMENTARIOS FINALES	95

1 INTRODUCCION

1.1 Generalidades

Hoy en día existen muchos factores que generan la necesidad de conocer especialmente antes de realizar un determinado proyecto, ya sea en el corto o mediano plazo, el comportamiento meteorológico de una determinada región. Debido a las diversas consecuencias que puede tener un evento meteorológico de gran magnitud, el irremplazable conocimiento del patrón de precipitaciones en una cuenca y sus posibles cambios para el diseño óptimo de obras hidráulicas, hacen que el análisis de las variables meteorológicas que constituyen las entradas a los sistemas hidrológicos sean de vital importancia en la actualidad.

Por ejemplo, para el desarrollo de un proyecto ingenieril en el que tenga que ver el caudal de un determinado cauce o río, es necesario saber con que frecuencia este caudal tiene un determinado valor, o mejor dicho desde el punto de vista matemático, a que probabilidad de excedencia cierto caudal está asociado. Es por esto que la generación de hidrogramas es una herramienta fundamental para el desarrollo de futuros proyectos hidráulicos, ya que de éstos se puede responder a un nivel de seguridad dados las posibles repercusiones del proyecto en la vida humana, así como en el ecosistema que circunda el lugar de realización de la obra en cuestión.

El parámetro de diseño principal (caudal) es una variable que está asociada directamente con la precipitación, pero si se analiza más en detalle se puede decir que es la distribución temporal y espacial de ésta lo que realmente determina el caudal que lleva un cauce o curso de agua. Por lo anterior, son estos últimos parámetros los que se enfatizan en este trabajo para el análisis mediante la ayuda de softwares computacionales, tales como: modelo de predicción meteorológica MM5, sistema de modelación de cuencas WMS, entre otros, de manera de poder determinar el correcto efecto que tienen sobre una cuenca y su caudal efluente.

1.2 Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es el análisis de la distribución espacial de hietogramas para la estimación de caudales de diseño en una cuenca pluvial en Chile.

1.2.1 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Seleccionar la distribución espacial de precipitación más conveniente para simular el caudal observado.
- Seleccionar la distribución temporal de precipitación más adecuada para cada punto comparando las distribuciones que el modelo MM5 entrega con las Distribuciones de Varas.
- Proponer una relación entre los períodos de retorno de la precipitación acumulada “registrada” en puntos característicos de la cuenca y el caudal de salida de ésta.
- Proponer una relación entre las magnitudes de la precipitación “registrada” en puntos característicos de la cuenca y la precipitación en la estación de medición característica de ésta.
- Aplicar las relaciones de períodos de retorno y de magnitud de precipitación para la generación de caudales de salida de la cuenca y compararlos con datos registrados por estaciones de medición.

1.3 Organización del Informe

Este informe cuenta con ocho capítulos. El segundo capítulo corresponde al análisis bibliográfico de diferentes documentos que cuentan con información sobre la modelación agregada y en particular el modelo WMS. Además se analizan otros documentos que tiene relación directa con el tema planteado.

El tercer capítulo presenta la elección de la cuenca analizada. Se debe tener en cuenta que la aplicación de este trabajo se limita a cuencas de régimen pluvial o que tengan la menor influencia de nieve posible. Se selecciona una cuenca entre las siguientes: Paine en Valdivia de Paine, Puangue en Boquerón y Alhué en Quilamuta, las cuales han sido estudiadas en trabajos anteriores.

El cuarto capítulo corresponde a la selección de tormentas analizadas. Mediante el programa MM5, operado por el Departamento de Meteorología de la Universidad de Chile, se obtienen los datos de precipitación para la zona de estudio comprendida entre la IV y VI Región con una grilla de 15 x 15 Km. De estos datos se escogen las tormentas de mayores magnitudes registradas en los años 2002 ya procesadas en estudios anteriores (Otondo, 2004).

El quinto capítulo corresponde a la determinación de las distribuciones de precipitación para cada nodo de la grilla MM5 mediante su comparación con las Distribuciones de Varas en cada una de las tormentas seleccionadas. Además se corrige la magnitud de precipitación y la duración de éstas. Estos análisis se realizan mediante la utilización de datos registrados en estaciones de medición características de la cuenca.

El sexto capítulo corresponde a la determinación de los períodos de retorno de la distribución de precipitación para cada punto de la grilla analizada en el capítulo anterior. Los períodos de retorno se calculan para cada punto de la grilla a base de la información extraída del mapa de isoyetas de período de retorno 10 años (DGA, 1987). Conjuntamente se determinan los períodos de retorno para los caudales máximos en la cuenca, para lo cual se realiza un análisis de frecuencia a nivel de caudales máximos instantáneos con la información histórica que entregan las estaciones fluviométricas representativas de la cuenca. De esta manera se obtuvo la curva de duración que permite asignar posteriormente el período de retorno de los caudales máximos registrados en las tormentas y los que se obtengan en la simulación.

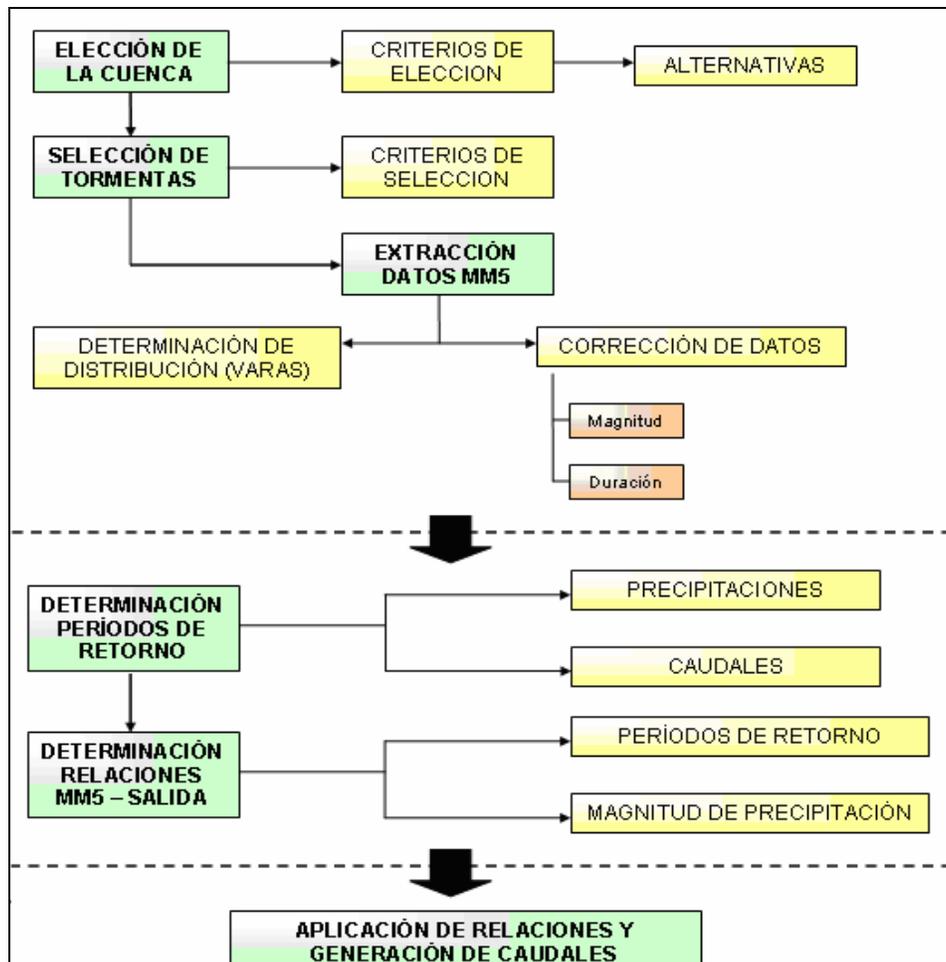
El séptimo capítulo corresponde a la determinación de relaciones entre los períodos de retorno de las precipitaciones en la cuenca y el caudal de salida, asimismo como de las magnitudes de precipitación en la cuenca y en la salida de ella. Una vez obtenidas estas relaciones, se realizan diferentes aplicaciones imponiendo una precipitación de magnitud y duración cualquiera en la salida de la cuenca, para poder comparar los valores que entregan las relaciones y los

generados mediante WMS. Además se realiza un análisis al WMS de sus parámetros más significativos.

El octavo capítulo incluye las conclusiones del estudio en cada etapa del análisis, así como las conclusiones finales generadas por todo el estudio.

Un esquema de los pasos a seguir en el estudio se aprecia en la figura 1.1

FIGURA 1.1: DIAGRAMA DE FLUJO DEL ESTUDIO



2 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

2.1 Modelación de Cuencas

Para el desarrollo sostenible de las actividades humanas en el territorio es necesario un mayor conocimiento de la naturaleza para hacer un aprovechamiento adecuado de los recursos naturales y para mitigar los riesgos asociados a amenazas naturales.

Cada día hay un mayor interés en disponer de herramientas para reducir los riesgos asociados a amenazas naturales como las crecidas de los ríos y para mejorar la gestión de los recursos hidráulicos en la cuenca. Uno de los retos que afronta la hidrología como ciencia es poder dar buena cuenta de los elementos determinantes de la fase terrestre del ciclo hidrológico en términos de su gran variabilidad en diferentes escalas espaciales.

Los avances recientes en tecnología permiten a la comunidad científica disponer de nuevos procedimientos de investigación para simular los procesos naturales y su variabilidad espacio temporal. Así, en hidrología, se han desarrollado herramientas para la estimación y simulación de los diferentes procesos hidrológicos.

Existen variados métodos para la simulación de caudales, como son la modelación concentrada, agregada y distribuida. La primera calcula el caudal de salida de la cuenca mediante datos en algún lugar representativo de ella, como ejemplo se tienen las fórmulas Racional, Verni – King e Hidrograma Unitario (Chow, 1994). La segunda divide la cuenca en sub – cuencas determinando un hidrograma en la salida de cada una de ellas y mediante algún método de tránsito de hidrogramas las conecta con la salida de la cuenca global. La última representa en aun más detalle la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados en los procesos hidrológicos, ya que utiliza una malla más extensa de información.

Los diferentes modelos permiten evaluar varias manifestaciones de la respuesta hidrológica en distintos sitios de la cuenca, ante distintas condiciones hidrometeorológicas, de uso del suelo y obras de ingeniería. Además permiten evaluar los impactos de posibles escenarios de uso del agua y del suelo así como los posibles cambios climáticos que ocurran en una determinada zona.

Aunque en ocasiones se requiere de información detallada de la zona de estudio, este tipo de información día a día se encuentra más a disposición del público gracias al desarrollo computacional que ha crecido en gran manera en los últimos años, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica, entre otros.

Una herramienta de gran ayuda para el análisis de respuestas hidrológicas en una determinada zona en lo que respecta a modelación es el software de *Watershed Modeling System* (WMS) que se analiza a continuación en pro de la modelación de cuencas mediante modelación agregada.

2.1.1 Descripción WMS

El laboratorio de investigación de modelación ambiental (EMRL) es parte del departamento de ingeniería civil y ambiental, en Brigham Young University.

El EMRL creó diferentes paquetes computacionales de modelación ambiental avanzada, desde sus inicios en 1985, especializándose en: agua subterránea, cuencas, y agua superficial, los cuales actualmente se están utilizando en muchos países del mundo. La misión del EMRL es promover una atmósfera para la investigación académica constante con metas en interfaces gráficas computacionales de modelación ambiental.

Uno de los modelos creados es el WMS, el cual posee una infinidad de características para la ayuda en la modelación de cuencas. Dentro de sus características están:

- Visualiza y delinea cuencas
- Computa los parámetros hidrológicos y geométricos más importantes de una cuenca
- Variabilidad de modelos hidrológicos, incluyendo HEC-1, el HMS, TR-20, TR-55, entre otros.
- Basa la mayoría de sus habilidades en modelos digitales de terreno (DEMs)

Para efectos de este estudio el modelo hidrológico utilizado es el HEC-1, en el cual las características geométricas, tales como áreas, longitudes, y pendientes, se calculan automáticamente en la cuenca generada digitalmente mediante DEMs. Los procesos tales como pérdidas, infiltración, método de calculo de hidrogramas, y métodos de rastreo o tránsito de hidrogramas se incorporan con una serie de diálogos interactivos, en los cuales cada proceso contiene una gran cantidad de fórmulas teóricas conocidas que ayudan a la simpleza de los cálculos, así como también cuenta con editor para la reformulación de estas ecuaciones y la utilización de los métodos más apropiados para el calculo de las diferentes variables.

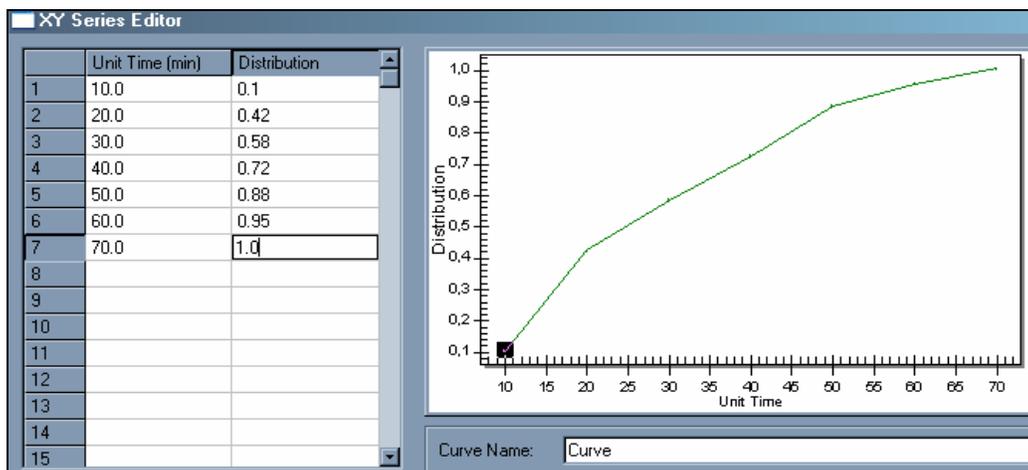
2.1.2 Datos de Entrada a HEC-1

Los principales procesos que se incluyen en el HEC-1 se presentan a continuación. En cada uno de ellos se comenta la aplicación utilizada para este estudio.

2.1.2.1 Precipitación

Es la variable principal de entrada en el modelo y se ingresa en cada punto deseado, la magnitud total de la precipitación. Luego, mediante una curva de distribución porcentual, se especifica la variabilidad temporal de ella como se puede observar en la figura 2.1.

FIGURA 2.1: DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACION



FUENTE: WMS 7.1

2.1.2.2 Infiltración

Para la modelación de la cantidad de agua que no escurre superficialmente y que es contenida en el suelo se empleó el método de la Curva Número (CN) desarrollado por *Soil Conservation Service*, (SCS, 1972), donde la infiltración (I) se obtiene como:

$$I = P - I_a - P_E \quad (2.1)$$

Donde:

P : Precipitación Total

P_E : Precipitación Efectiva

I_a : Abstracción Inicial.

Según resultados experimentales I_a , en pulgadas, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad ; \quad S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2.2)$$

Por lo que la P_E se puede expresar como:

$$P_E = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (2.3)$$

Donde CN se obtiene de la tabla propuesta por el SCS (1977) donde se relaciona el suelo, la cobertura y el manejo de la cuenca.

2.1.2.3 Relación Precipitación Escorrentía

Para efectos de este proceso se utilizó el método del hidrograma unitario adimensional desarrollado por la SCS, el cual es un hidrograma unitario sintético en el que se expresan los caudales en función del caudal peak (q_P) y los tiempos en función del tiempo al peak (T_P) (Figura 2.2a). Los valores de q_P y t_P se estiman basándose en el hidrograma unitario triangular del SCS (Figura 2.2b). Basándose en una gran cantidad de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse a 1,67 T_P . Como el área del hidrograma es igual a 1 cm., se demuestra que:

$$q_P = \frac{2,08A}{t_P} \quad (2.4)$$

Donde A es el área de drenaje de la cuenca, Km. ².

El tiempo peak (t_P), puede determinarse mediante una aproximación como:

$$t_P \approx 0,35 \cdot t_C \quad (2.5)$$

Para efectos de este estudio el tiempo de concentración (t_C) se calculó mediante:

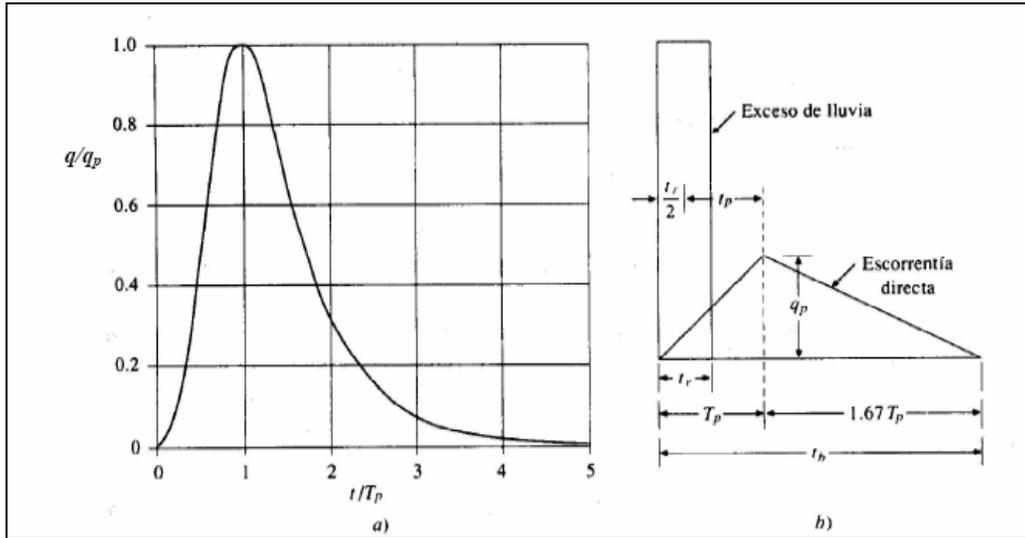
$$t_C = \frac{100 \cdot L^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{S}} \quad (2.6)$$

Donde:

L : Longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria del flujo) (pies)

S : Pendiente promedio de la cuenca (%)

FIGURA 2.2: A) HIDROGRAMA ADIMENSIONAL DEL SCS
B) HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR



FUENTE: CHOW 1994.

2.1.2.4 Tránsito de Hidrogramas

Los métodos de tránsitos de hidrogramas determinan la evolución de un hidrograma a medida que éste avanza a lo largo de un cauce.

Uno de los métodos para el tránsito de hidrogramas es el de Muskingum – Cunge, el cual es una variación del método de Muskingum (Chow, 1994), el cual tiene las siguientes relaciones:

$$Q_{i+1} = C_0 \cdot I_{i+1} + C_1 \cdot I_i + C_2 \cdot Q_i \quad (2.7)$$

$$C_0 = \frac{-KX + 0,5\Delta t}{K - KX + 0,5\Delta t} ; C_1 = \frac{KX + 0,5\Delta t}{K - KX + 0,5\Delta t} ; C_2 = \frac{K - KX - 0,5\Delta t}{K - KX + 0,5\Delta t}$$

Donde para cada intervalo de tiempo Δt :

Q_i : Caudal de Salida

I_i : Caudal de Entrada en el tramo i

K, X : Constantes para el tramo

Cunge combinó los métodos hidráulicos con la simplicidad del método de Muskingum, y propone el cálculo de las 2 constantes, K y X, mediante parámetros hidráulicos del cauce:

$$\boxed{K = \frac{\Delta x}{c} \quad ; \quad X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x} \right)} \quad (2.8)$$

Donde:

Δx : Longitud del Tramo del Cauce considerado

c : Velocidad de Propagación de la Onda

S_o : Pendiente Media del Cauce

B : Ancho del Cauce

La normal aplicación de este método requiere dividir el tramo en sub – tramos, de modo que el caudal de salida de cada uno de ellos será el caudal de entrada del siguiente (US Army Corps of Engineers, 1994).

2.2 Modelos de Mesoescala

Los modelos de mesoescala son aquellos que cuentan con resolución horizontal y vertical suficiente para pronosticar fenómenos meteorológicos de mesoescala. Estos fenómenos son a menudo forzados por la topografía, las líneas costeras ó están vinculados con la convección.

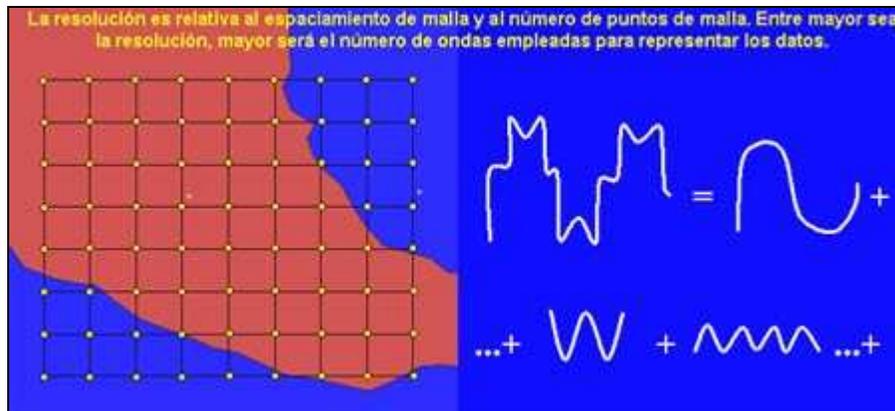
Algunos de los fenómenos más severos, como tornados y sistemas de convección, ocurren a mesoescala; mientras que la visibilidad , la turbulencia y el estado del mar entre otros, pueden variar enormemente en solo pocos kilómetros, y tener un tremendo impacto sobre las cálculos internos que realiza un modelo numérico.

En la práctica, muchas veces se depende de la guía que proporcionan los modelos de mesoescala, particularmente en situaciones tácticas, cuando las observaciones en tiempo real son muy espaciadas o simplemente no existen. Como consecuencia, un mejor entendimiento de cómo trabajan los modelos de mesoescala puede ayudar a optimizar su funcionamiento y obtener mejores predicciones.

La resolución horizontal en un modelo (figura 2.3) de mesoescala está directamente relacionada con el tamaño del fenómeno que se pretende simular. La distancia que existe entre los puntos de malla de un dominio, indica que tan alta o baja es la resolución. La resolución es relativa tanto al espacio que existe entre los

puntos de malla para los modelos de celdas, como al número de ondas empleadas para representar los datos en los modelos de espectro.

FIGURA 2.3: RESOLUCION HORIZONTAL DE LOS MODELOS DE MESOESCALA

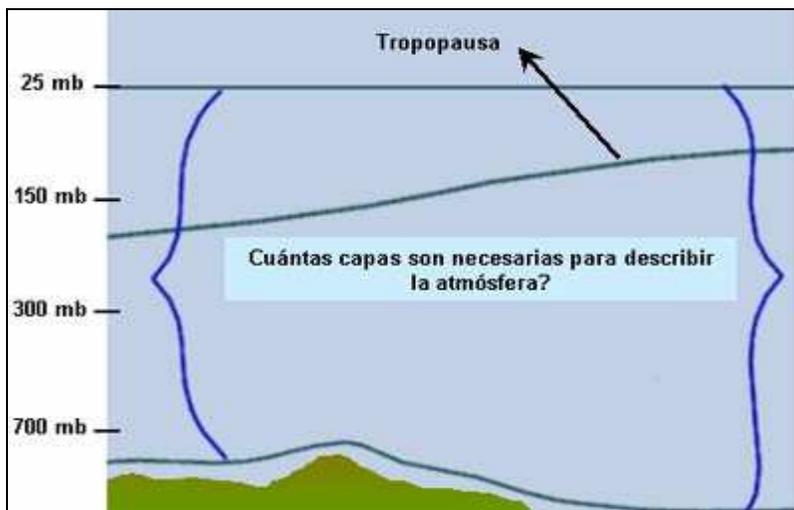


FUENTE: <http://www.sma.df.gob.mx/modelacion/09/01.htm>

El tamaño del dominio de simulación depende directamente del fenómeno que se quiere estudiar. Tomando en cuenta que existen fenómenos de escalas globales, regionales y locales, al incrementar la resolución, también se incrementa la cantidad de datos a manejar; y por consiguiente, la demanda de cómputo y el tiempo de procesamiento.

Como no solamente la resolución horizontal es necesaria para describir los fenómenos atmosféricos, los modelos deben estar diseñados con una adecuada resolución vertical para poder predecir de manera correcta la estructura vertical y la variación de los eventos meteorológicos. Tanto la resolución horizontal como vertical (figura 2.4) deben ser adecuadamente definidas para obtener buenos resultados.

FIGURA 2.4: RESOLUCION VERTICAL DE LOS MODELOS DE MESOESCALA



FUENTE: <http://www.sma.df.gob.mx/modelacion/09/01.htm>

Es necesario tener suficiente detalle en las capas cercanas a la superficie, pues es en éstas donde se desarrollan los procesos atmosféricos más importantes asociados con la calidad del aire, como son el mezclado y el transporte vertical de los contaminantes.

Una herramienta de gran ayuda para predecir y obtener en una gran variedad de puntos la información de la precipitación es el modelo de mesoescala de quinta generación MM5 el cual se analiza a continuación.

2.2.1 Descripción del Modelo MM5

Uno de los modelos de predicción a corto plazo más utilizado internacionalmente, en especial en Chile, es el modelo de mesoescala MM5, desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), siendo este último el que se encarga del soporte operativo del sistema. El MM5 es utilizado en varias universidades e instituciones de los EE.UU. y alrededor del mundo por su alta definición en la detección de sistemas atmosféricos de mesoescala, y cuenta con todas las características necesarias para su adaptación a las condiciones específicas de diversas regiones.

El código fuente del modelo está escrito en lenguaje Fortran y cuenta con una amplia gama de parametrizaciones de capa límite planetaria, convección y física de nubes, lo que produce una importante representatividad en las variables atmosféricas modeladas. Las variables generadas por el modelo son entregadas en archivos de formato binario, los que requieren de la utilización de softwares de lectura y visualización para ser representados a cabalidad.

La importancia del modelo radica en su capacidad predictiva de variables potencialmente no nulas en una determinada zona. Esto adopta mayor importancia, a modo de ejemplo, en casos en que estaciones de precipitación dejan de medir, dejando grandes territorios sin registros meteorológicos. Además, debido al distanciamiento que se tiene generalmente entre estaciones, existen zonas intermedias en las que no se tienen mediciones, y que por factores geográficos pueden tener patrones climáticos distintos a los presentes en las estaciones adyacentes.

Este sistema de modelación tiene como variable de inicio de análisis las superficies de presión, es así como en la dirección vertical la discretización de esta variable es fundamental para los resultados posteriores, por lo que el relieve en la zona de estudio influye directamente. Comúnmente en las cercanías de la superficie se tiene una discretización más fina y solidaria al relieve, en cambio en las capas superiores su discretización es más espaciada y prácticamente plana.

Dentro del modelo el suelo tiene tres diferentes tipos de categorías, por lo que para cada sector se escoge el adecuado dependiendo de las propiedades superficiales como lo son el albedo y la emisividad de onda larga, entre otros.

Para la correcta ejecución del modelo se debe tener la información que se describe en la tabla 2.1.

TABLA 2.1: INFORMACION DE ENTRADA PARA EL MODELO MM5

TERRENO	Topografía
	Uso del Suelo
Modelos de Escala Global En 2 o 3 Dimensiones	Información Atmosférica: 1. Viento 2. Temperatura 3. Humedad Relativa 4. Altura Geopotencial en los siguientes niveles: Superficies: 1000 mb, 850 mb, 700 mb, 500 mb, 400 mb, 300 mb, 250 mb, 200 mb, 150 mb, 100 mb
	Observaciones
	Registros Atmosféricos y Superficiales (Opcional)

2.2.2 Implementación en la Universidad de Chile

La División de Meteorología del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile opera el modelo MM5 en forma diaria desde Abril 2002. El modelo provee un pronóstico de la circulación atmosférica sobre gran parte de Sud América determinando los parámetros como: precipitación acumulada (convectiva y no convectiva), agua precipitable, temperatura, temperatura de punto de rocío, temperatura potencial, humedad relativa y presión.

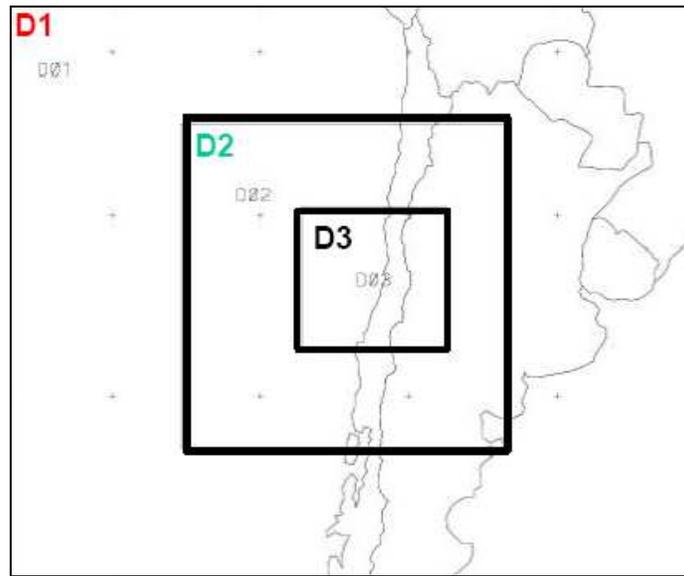
Estos parámetros son desarrollados en una serie de dominios, a través de Chile y Sud América, en diferentes resoluciones. Estas se aprecian en la tabla 2.2 y la figura 2.5.

TABLA 2.2 DOMINIOS MM5 - DGF

Dominio	Resolución	Celdas (Horizontal)	Capas (Vertical)	Latitud	Reg. Involucradas
D1	135 x 135 (km)	34 x 40	30	17° - 53° S	I - XI
D2	45 x 45 (km)	55 x 55	30	24° - 42° S	III - X
D3	15 x 15 (km)	73 x 73	30	29° - 38° S	IV - VIII

FUENTE: <http://infomet.dgf.uchile.cl/PRONOSTICOS/pronosticosnumericos.html>

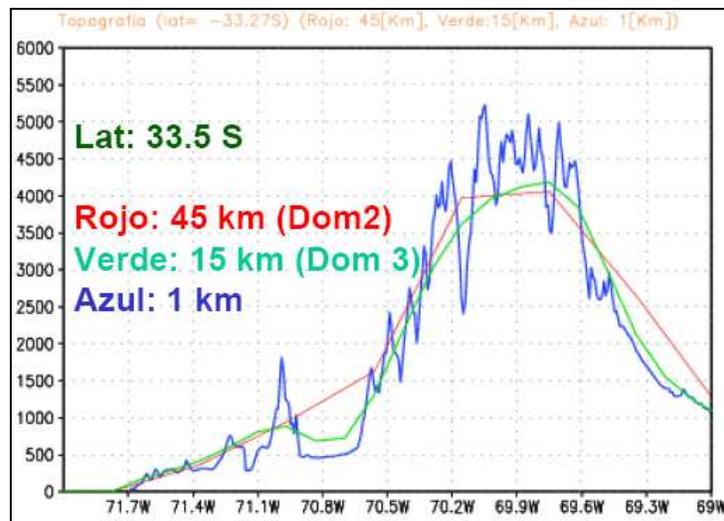
FIGURA 2.5: DOMINIOS MM5 - DGF



FUENTE: <http://infomet.dgf.uchile.cl/PRONOSTICOS/pronosticosnumericos.html>

La representación longitudinal de estos dominios se ve afectada al aumentar la resolución espacial, ya que ésta disminuye considerablemente como se puede ver en la figura 2.6.

FIGURA 2.6: RESOLUCIÓN DOMINIOS MM5 – DGF



FUENTE: <http://infomet.dgf.uchile.cl/PRONOSTICOS/pronosticosnumericos.html>

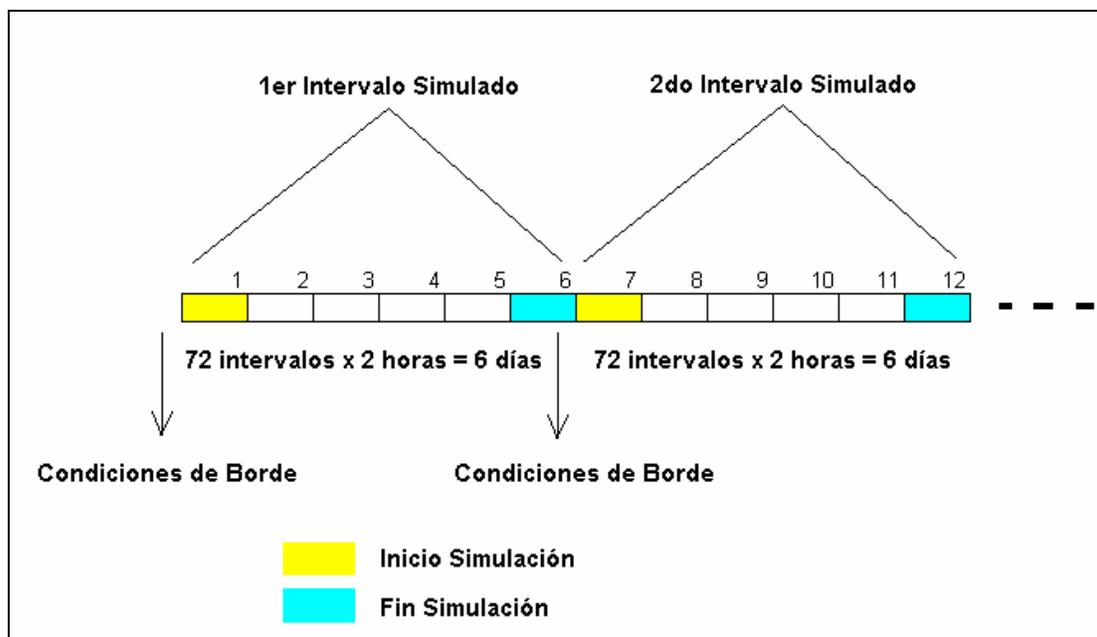
2.2.3 Datos de Utilización del Modelo

Para la simulación se utiliza un registro histórico de datos, los que son utilizados como condiciones de borde para la generación de resultados en las diferentes variables que trabaja el modelo, pero para efectos de este trabajo los datos que se utilizarán provienen de una simulación realizada por el DGF para todo el año 2002.

Los registros históricos son alimentados de diferentes estaciones de medición a nivel global y regional, los cuales después de una serie de interpolaciones producen las condiciones de borde que se utilizan para el pronóstico simulado. Esta simulación también se denomina Modo Diagnóstico, ya que permite realizar una comparación entre los resultados, producto de las condiciones de borde pronosticadas por el MM5 (Modo Pronóstico) y las observadas a nivel global y regional.

Para efectos de este trabajo los datos proporcionados pertenecen a la línea de tiempo desde el 1 de Enero al 30 de Noviembre del año 2002 y se encuentran en un formato de precipitación acumulada con resultados cada 2 horas. Cada intervalo de tiempo simulado está formado por 72 mediciones, lo que hace un total de 6 días, por lo que las condiciones de borde para cada intervalo se van reestructurando cada 6 días (figura 2.7).

FIGURA 2.7: LÍNEA DE TIEMPO MM5



2.3 Métodos Estadísticos y Probabilísticos en Hidrología

Una de las variables más importantes en los proyectos de obras hidráulicas, es la estimación de caudales de diseño correspondientes a períodos de retorno, los que generalmente están fuera del rango de dominio de los valores de las muestras históricas disponibles.

Tradicionalmente, el procedimiento utilizado para realizar esta estimación se desarrolla según las siguientes etapas:

- Analizar los registros históricos de la variable hidrológica de interés, para la zona en estudio.
- Seleccionar un modelo probabilístico que se supone representa la tendencia de la variable hidrológica.
- Estimar los parámetros de este modelo; generalmente esta estimación se hace a base de la muestra histórica.
- Realizar las inferencias para los períodos de retorno de interés.

Este procedimiento lleva involucrado una serie de incertezas, como son: la incertidumbre natural (propia de la variable analizada), la Incertidumbre de los estadígrafos (relativo a suponer que los estadígrafos calculados son representativos para períodos de retorno fuera del rango de la muestra) y la incertidumbre del modelo probabilístico (propio de la selección de un modelo para representar la muestra). Según lo recién expuesto, se puede señalar que el proceso de inferencia de valores extremos a partir de una muestra histórica está sujeto a una gran imprecisión, que dependerá de la longitud de la muestra histórica y su representabilidad del universo muestral.

2.3.1 Análisis de Frecuencia

El análisis de frecuencia en hidrología es una metodología que surge de la necesidad de estimar futuras probabilidades de eventos hidrológicos partiendo de series de datos históricos.

Estos datos constituyen a una muestra de la cual se pueden determinar diferentes rasgos o atributos según corresponda a la utilización de ellos. No obstante estas muestras deben cumplir con una serie de exigencias, como son:

- Sin sesgo: Las muestras deben ser elegidas al azar por algún procedimiento.
- Independientes: Los datos deben tener independencia espacial y temporal.
- Homogénea: Los datos deben venir de la misma población.

Dentro de los principales objetivos del análisis de frecuencia se encuentra la determinación del tiempo promedio dentro del cual una magnitud dada del evento es igualada o excedida. Este tiempo se conoce como *Período de Retorno* (T) y esta directamente relacionado con los diseños de obras hidráulicas.

Si un evento hidrológico igual o mayor que x ocurre una vez en T años, la probabilidad de excedencia será:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Para efectos del caudal la representación gráfica de las probabilidades de excedencia y su magnitud tiene el nombre de *Curva de Duración*, la cual se puede obtener mediante diferentes metodologías.

Como primer paso para un análisis de frecuencia se debe seleccionar una función distribución de probabilidades que se estime como representativa del universo muestral. Posteriormente, deberán calcularse los parámetros de dicha función densidad de frecuencias, para lo cual existen diversos métodos:

- Momentos
- Máxima verosimilitud
- Momentos ponderados
- Mínimos cuadrados.

Una vez determinados los parámetros de la función escogida, ésta debe someterse a una (o varias) pruebas de bondad de ajuste, mediante las cuales es posible cuantificar la desviación existente entre los puntos muestrales y la distribución de frecuencias teórica supuesta.

Algunas pruebas de bondad de ajuste son:

- Chi-cuadrado
- Kolmogorov – Smirnov
- Índices basados en gráficos de residuos de probabilidad

Estas pruebas conducen a la conclusión que el modelo no es adecuado, se debe adoptar otro modelo de distribución de frecuencia y repetir el procedimiento.

En caso de disponer de apoyo computacional, este método se hace muy atractivo, debido a que el procedimiento resulta notoriamente rápido y completo, ya que se puede tomar en un comienzo todas las distribuciones de frecuencias disponibles, calcular los parámetros de cada una de ellas, y someterlas a las pruebas de bondad de ajuste antes mencionadas. Finalmente, integrando aquella distribución

recomendada por las pruebas como la más adecuada, se puede obtener la curva de distribución acumulada.

Para realizar los análisis de frecuencia existen dos metodologías, la regresión clásica y la regresión bayesiana. El primero consiste en suponer una cierta distribución de probabilidad (fdp) que caracteriza la variable hidrológica en estudio, y en base a esta fdp escogida realizar las inferencias, donde los parámetros son considerados variables determinísticas. El segundo es similar al primero salvo que todos los parámetros se suponen variables aleatorias (Armas, 1988).

Para efectos de este trabajo se utilizó el software REGBAY, escogiendo el análisis de frecuencia clásico. En él, se trabaja con 6 de las distribuciones de probabilidad más utilizadas para este tipo de cálculos en hidrología y 2 diferentes criterios de elección. El análisis teórico de este software se encuentra en el Anexo A.

2.4 Estimaciones de Precipitación

En Chile existen algunas herramientas disponibles para la estimación de parámetros de la precipitación, como son su magnitud media sobre una cuenca o distribución temporal, que ayudan a su evaluación en zonas que carecen de registros o cuyos registros se encuentran incompletos.

En esta parte del capítulo se analiza dos herramientas. Una de ellas es la Distribución de Varas (1985) que analiza las diferentes distribuciones temporales de la precipitación en diferentes grupos y porcentajes de ocurrencia. La segunda es el estudio de Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días (DGA, 1987), el cual en un mapa de Chile relaciona la magnitud de precipitación con su período de retorno asociado.

2.4.1 Distribución de Varas

La distribución en el tiempo de la lluvia caída durante un temporal, es sin dudas, un factor primordial en la determinación del escurrimiento de respuesta de la cuenca y, en consecuencia, debe ser considerado en la definición de una tormenta de diseño. Sin embargo, aun cuando es conocida la influencia del hietograma en la forma y magnitud de la onda de crecida es usual que se proceda utilizando hipótesis de mayor simpleza.

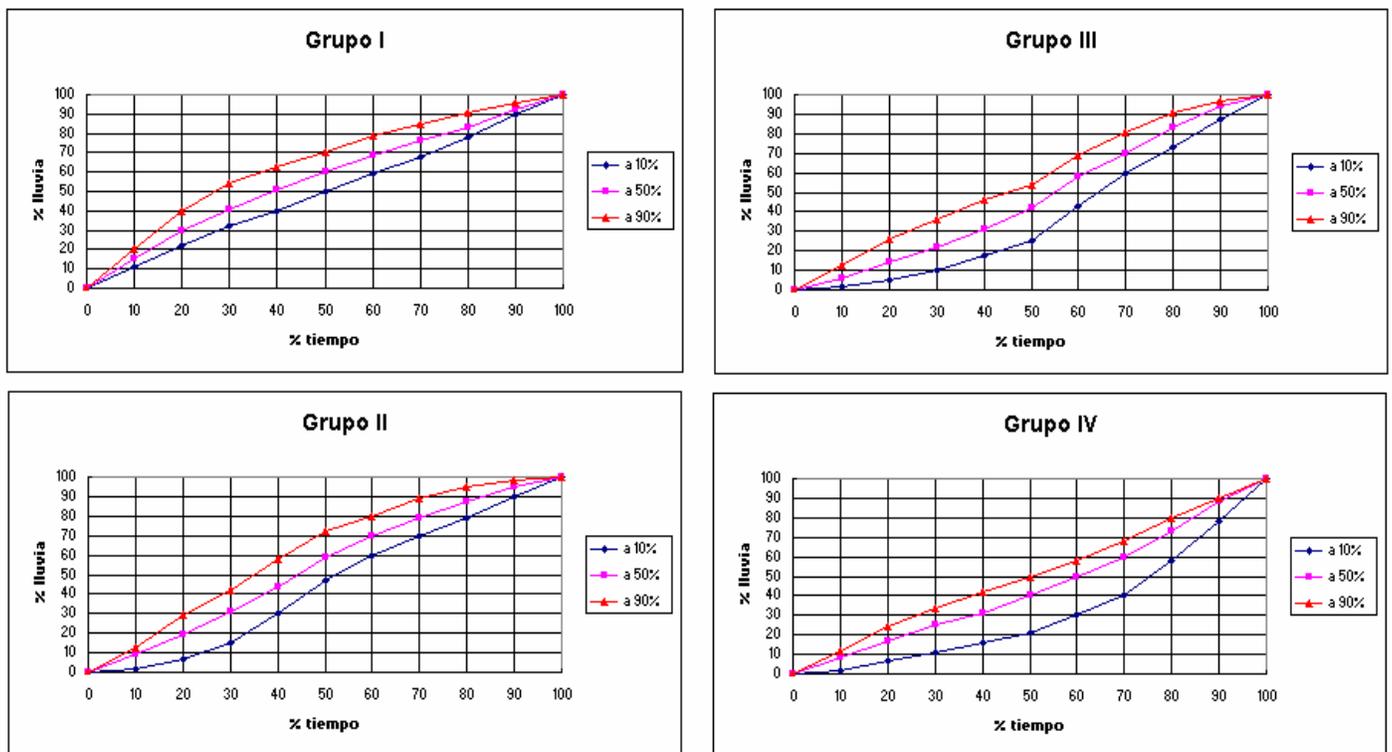
Varas (1985) estudió la distribución de 296 tormentas registradas en distintas estaciones pluviográficas en Chile. Para cada una de las tormentas se ubicaron los intervalos más lluviosos de 4, 6, 8 y 12 horas de duración, clasificando cada tormenta en cuatro grupos dependiendo si la mayor precipitación 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 resultados curvas de distribución promedio (figura 2.8), las cuales son aplicables en diferentes lugares de Chile, para el cálculo de hietogramas representativos que son de gran importancia para el diseño de obras de ingeniería en sitios que no cuentan con suficiente información pluviográfica.

FIGURA 2.8: DISTRIBUCIONES DE VARAS – GRUPOS



2.4.2 Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días

La estimación de las precipitaciones diarias de una probabilidad de excedencia definida constituye un problema de gran importancia ya que permite el cálculo de los caudales que deben evacuar durante las tormentas en un sinnúmero de obras hidráulicas. Para ello es necesario contar con mediciones pluviométricas que en algunas ocasiones no están disponibles por diferentes motivos como la no existencia de estaciones de medición o el mal manejo de ellas, con lo que el desarrollo de obras de ingeniería se ven perjudicados en sus diseños.

Dada esta necesidad la Dirección General de Aguas (DGA) puso a disposición de los usuarios una publicación que contribuye efectivamente a los diseños de las obras hidráulicas del país, sintetizando mediante un conjunto organizado de mapas y tablas un gran volumen de información, la cual de otro modo no sería aprovechada plenamente por la ingeniería nacional.

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. De esta manera se tiene que:

$$\boxed{CD_t = \frac{P_t^{10}}{P_{24}^{10}} \Rightarrow P_t^{10} = CD_t \cdot P_{24}^{10}} \quad (2.10)$$

Donde:

CD_t : Coeficiente de Duración del tiempo t.

P_t^{10} : Precipitación de Duración t y período de Retorno 10 años.

P_{24}^{10} : Precipitación de Duración 24 horas y período de Retorno 10 años.

CF 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:

$$\boxed{CF_t^T = \frac{P_t^T}{P_t^{10}} \Rightarrow P_t^T = CF_t^T \cdot P_t^{10}} \quad (2.11)$$

Donde:

CF_t^T : Coeficiente de Frecuencia de un período de retorno T y duración t.

P_t^T : Precipitación de Duración t y período de Retorno T.

P_t^{10} : Precipitación de Duración t y período de Retorno 10 años.

Por lo que como resultado del reemplazo P_t^{10} de (2.10) en (2.11) se obtiene:

$$P_t^T = CF_t^T \cdot CD_t \cdot P_{24}^{10} \quad (2.12)$$

Para la estimación de estos coeficientes se realizó una serie de análisis de frecuencia y pruebas de bondad de ajuste a los datos agrupando en macrozonas homogéneas a aquellas donde una distribución resultaba la de mejor ajuste en la mayoría de los casos.

Luego se dividió nuevamente en los sectores donde los valores de los CD y CF no tuvieran más de un 10% de diferencia con respecto al promedio, determinado zonas y subzonas de similares características.

3 SELECCIÓN DE LA CUENCA A ESTUDIAR

3.1 Restricciones de Selección de Cuencas

Para la selección de las cuencas posibles de analizar, se deben tener en cuenta ciertas características hidrológicas y geográficas que permitan el correcto desarrollo del trabajo, además de contar con registros de precipitación y caudal en el o los puntos característicos de la cuenca.

- **Restricción Geográfica**

La restricción geográfica fué impuesta por los márgenes de trabajo que tiene el modelo de predicción meteorológica MM5. Estos márgenes o dominios están diferenciados en dos variables conjuntas, como lo son la resolución y las regiones del país involucradas.

La mayor resolución es la que se encuentra en el dominio D3, ya que presenta una grilla de 15 x 15 Km, lo que entregará una mayor cantidad de datos de precipitación. Esta será la utilizada en este estudio, por lo que el área de trabajo quedará delimitada por la IV y la VIII Regiones.

- **Restricción Hidrológica**

El espacio de elección hidrológica de la cuenca será delimitado por una de sus características fundamentales que es su régimen. Dentro de los posibles regímenes que se tiene en la naturaleza se ha restringido este trabajo a cuencas de *régimen pluvial*. Esta restricción fue impuesta, ya que la posibilidad de elección de una cuenca de *régimen mixto o nival* queda fuera de los alcances del trabajo debido a la complejidad natural en lo que respecta a la modelación de esta variable y a la obtención de datos confiables de la distribución espacial y temporal de la nieve.

Se estimó que incluir cuencas que presenten una mínima influencia de nieve, no influiría de manera notoria en los resultados.

- **Registros de Estaciones Representativas de la Cuenca**

Las cuencas seleccionadas deberán contar con al menos:

- Una estación con registro histórico de caudales máximos instantáneos en la salida de la cuenca.

- Una estación con registro limnigráfico de caudales en la salida de la cuenca para las fechas de ocurrencia de los eventos (crecidas) que se tomen en consideración para el trabajo.
- Una estación con registro pluviográfico para posibles comparaciones y/o correcciones que puedan ser necesarias en el transcurso del estudio.

Naturalmente es posible que todas estas exigencias se satisfagan en una misma estación, la que tratará en su mayor medida de ser la más representativa de la cuenca a analizar.

- **Grilla MM5**

Un punto de igual importancia que los anteriores es la distribución de los datos (grilla) de precipitación entregados por el MM5.

La cantidad necesaria de puntos de medición tendrá una relación con el área que abarca la cuenca en estudio, ya que a mayor superficie de cuenca, mayor será la cantidad de datos sobre ella lo que posibilitaría un análisis de mayor exactitud al momento de analizar las distribuciones de precipitación en el transcurso del trabajo.

3.2 Alternativas de Cuencas y su Descripción General

Dadas las restricciones de trabajo que se presentaron en el punto anterior, se han escogido tres cuencas que cumplen con todos los requisitos, estas son:

- Angostura en Valdivia de Paine
- Puangue en Boquerón
- Alhué en Quilamuta

Para seleccionar una de ellas, a continuación se detallan sus ubicaciones, sus estaciones de medición más representativas y las características dimensionales de cada una.

Las dimensiones se analizan mediante la utilización del software de modelación de cuencas WMS. Para esto es necesaria la utilización de las coordenadas geográficas de la zona de estudio de manera de obtener las curvas de nivel (DEM) que permiten la modelación geométrica de la cuenca. Estas curvas se obtuvieron de la página <http://seamless.usgs.gov/>.

3.2.1 Alhué en Quilamuta

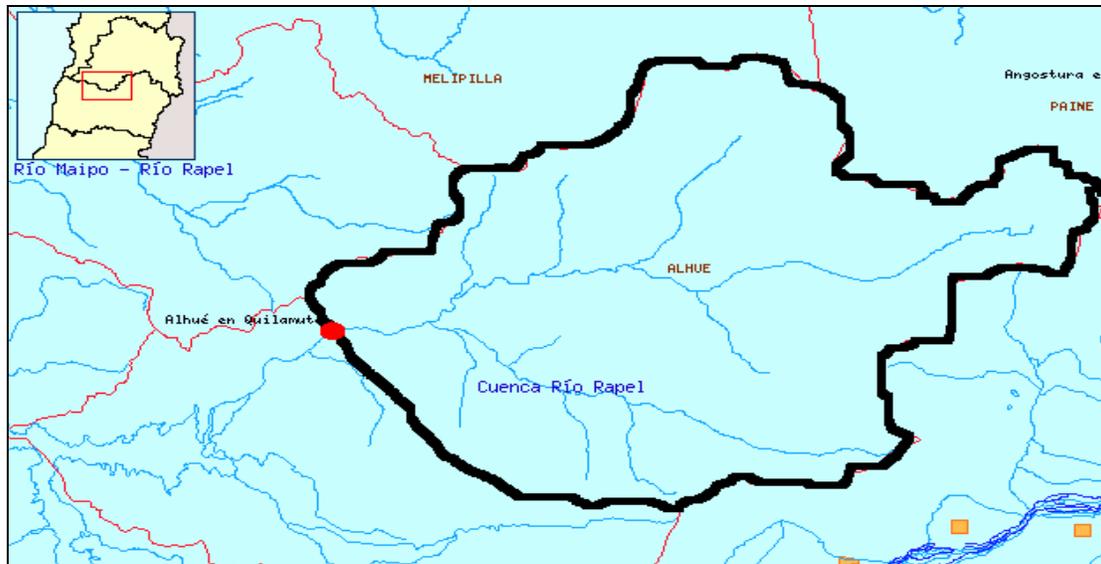
Esta cuenca se ubica en el sector sur poniente de Santiago abarcando partes de la Regiones Metropolitana y de la VI Región. Se sitúa entre los 33° 53' y 34° 10' de Latitud Sur y los 70° 46' y 71° 19' Longitud Oeste en el sector norte de la cuenca del Río Rapel y tiene como ramas más importantes a los esteros Alhué y Carén (figura 3.1). La sección de salida de la cuenca se encuentra unos kilómetros aguas abajo de una unión de las ramas antes mencionadas.

El clima predominante corresponde al Clima Templado Mediterráneo, el cual presenta variaciones por efecto de la topografía local. En el interior, debido a la sequedad, experimenta fuertes contrastes térmicos.

Dentro de las características del suelo se puede decir que es de características arcillosas, mientras que su uso se encuentra generalizado por praderas naturales, matorrales y cultivos de secano.

La estación de medición fluviométrica representativa es *Estero Alhué en Quilamuta*, la que se encuentra aguas abajo de la confluencia del estero Carén, a 130 m.s.n.m. La ubicación de la estación se detalla en la tabla 3.1.

FIGURA 3.1: CUENCA ALHUÉ EN QUILAMUTA



FUENTE: <http://esiir.cnr.cl/esiir/>

TABLA 3.1: UBICACIÓN GEOGRAFICA DE ESTACIÓN ALHUÉ EN QUILAMUTA

CUENCA	REGIÓN	ESTACIÓN REPRESENTATIVA	COORDENADAS UTM		ALTITUD [msnm]
			NORTE	ESTE	
Alhué en Quilamuta	VI	Estero Alhué en Quilamuta	289273	6228040	130

En años húmedos se presentan grandes caudales entre junio y agosto, mientras que desde noviembre a abril los caudales se mantienen muy bajos. En años secos los caudales se mantienen muy bajos durante todo el año, salvo leves aumentos entre julio y agosto.

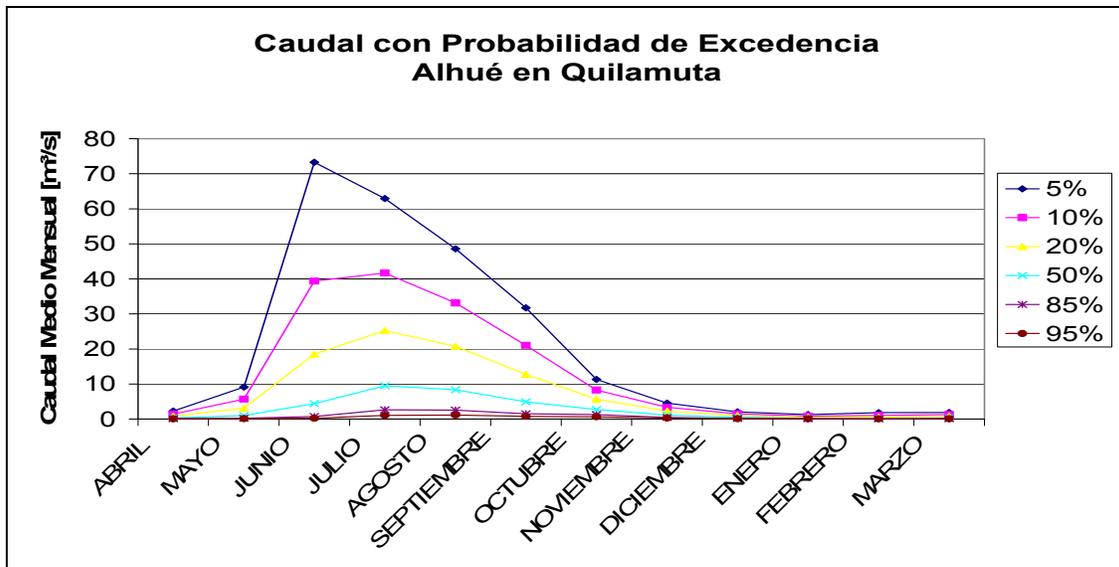
En la tabla 3.2 y la figura 3.2 se observa que esta estación tiene un régimen netamente pluvial, con sus mayores caudales en los meses de invierno, entre junio y septiembre, producto de precipitaciones en forma de lluvia.

TABLA 3.2: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – ALHUÉ EN QUILAMUTA

CAUDAL MEDIO MENSUAL	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA					
	5%	10%	20%	50%	85%	95%
ABRIL	2,27	1,44	0,84	0,31	0,11	0,07
MAYO	9,14	5,66	3,17	1,05	0,27	0,12
JUNIO	73,31	39,37	18,54	4,40	0,75	0,26
JULIO	62,92	41,67	25,22	9,50	2,63	1,09
AGOSTO	48,61	33,13	20,77	8,38	2,56	1,16
SEPTIEMBRE	31,74	21,04	12,78	4,93	1,53	0,77
OCTUBRE	11,29	8,26	5,66	2,75	1,29	0,67
NOVIEMBRE	4,57	3,35	2,31	1,13	0,47	0,28
DICIEMBRE	2,06	1,50	1,02	0,49	0,20	0,12
ENERO	1,29	0,83	0,49	0,19	0,07	0,05
FEBRERO	1,81	1,06	0,56	0,17	0,04	0,02
MARZO	1,84	1,27	0,82	0,35	0,12	0,07

FUENTE: CADEIDEPE (2004).

FIGURA 3.2: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – ALHUÉ EN QUILAMUTA



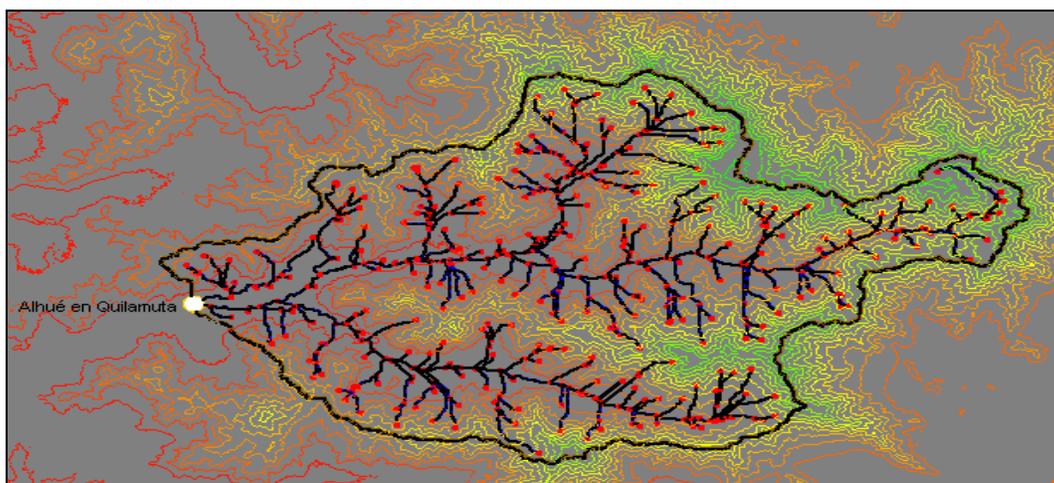
FUENTE: CADEIDEPE (2004).

Las características dimensionales de la cuenca determinadas a través de WMS (figura 3.3) se presentan en la tabla 3.3.

TABLA 3.3: CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LA CUENCA

ALHUÉ EN QUILAMUTA		
Parámetro	Valor	Unidad
Área (A)	845,64	km ²
Largo (L)	59,69	km
Largo al Centro Gravedad (L _G)	25,32	km
Altura Media (H)	777,74	m
Pendiente (S)	0,3348	m/m

FIGURA 3.3: CUENCA ALHUÉ EN QUILAMUTA (WMS)



3.2.2 Paine en Valdivia de Paine

Esta cuenca se ubica en el sector sur poniente de Santiago abarcando partes de la Regiones Metropolitana y VI Región. Se sitúa entre los 33° 45' y 34° 05' de Latitud Sur y los 70° 19' y 70° 59' Longitud Oeste en el sector sur de la cuenca del Río Maipo y tiene como rama más importante al río Angostura, el cual es la unión de otras dos ramas las que son el río Peuco y río San Francisco (figura 3.4). El río Angostura desemboca en el río Maipo unos 2 km al poniente de Valdivia de Paine.

El clima predominante corresponde al clima templado mediterráneo, el cual presenta variaciones por efecto de la topografía local. En el interior debido a la sequedad experimenta fuertes contrastes térmicos.

Dentro de las características del suelo se puede decir que es de tipo arcilloso y se encuentra cubierta por praderas naturales, matorrales y áreas agrícolas.

La estación de medición fluviométrica representativa es *Angostura en Valdivia de Paine*, que se encuentra a 350 m.s.n.m., presenta una red de drenaje de más de 1300 km². La ubicación de la estación se detalla en la tabla 3.4.

FIGURA 3.4: CUENCA ANGOSTURA DE PAINE



FUENTE: <http://esiir.cnr.cl/esiir/>

TABLA 3.4: UBICACIÓN GEOGRAFICA DE ESTACIÓN ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE

Cuenca	Región	Estación Representativa	Coordenadas UTM		Altitud [msnm]
			Norte	Este	
Paine en Valdivia de Paine	RM	Río Angostura en Valdivia de Paine	326250	6257600	350

Esta estación registra importantes caudales en los meses de invierno (junio a agosto), en los años húmedos. En años secos presenta un caudal relativamente bajo y constante, explicado principalmente por el gran número de canales de regadío que extraen las aguas de sus afluentes: estero Paine y río Peuco.

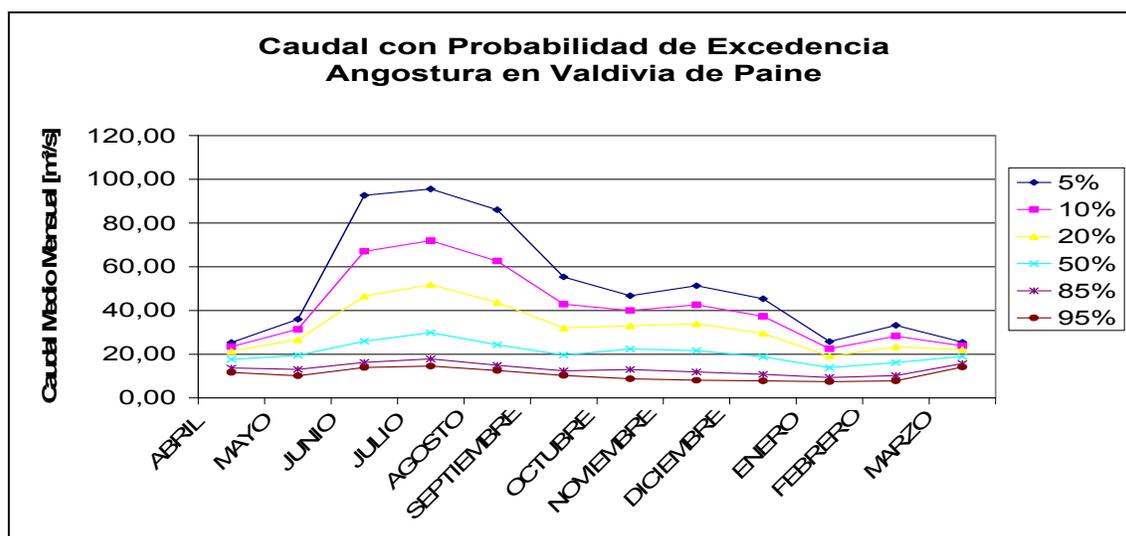
En la tabla 3.5 y la figura 3.5 se observa que esta estación tiene un régimen pluvial, con sus mayores caudales en los meses de invierno, entre junio y septiembre, producto de precipitaciones en forma de lluvia. Presenta una pequeña componente nival en los años más húmedos según se observa en la curva de variación estacional de la figura 3.5.

TABLA 3.5: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE

CAUDAL MEDIO MENSUAL	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA					
	5%	10%	20%	50%	85%	95%
ABRIL	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
MAYO	0,57	0,33	0,17	0,05	0,01	0,00
JUNIO	14,85	5,98	1,99	0,25	0,03	0,01
JULIO	17,40	9,11	4,15	0,93	0,15	0,05
AGOSTO	14,20	8,09	4,09	1,11	0,22	0,09
SEPTIEMBRE	4,21	2,84	1,76	0,70	0,21	0,10
OCTUBRE	1,67	1,17	0,75	0,33	0,12	0,06
NOVIEMBRE	0,74	0,53	0,36	0,17	0,07	0,02
DICIEMBRE	0,32	0,24	0,16	0,08	0,04	0,04
ENERO	0,24	0,16	0,09	0,04	0,02	0,01
FEBRERO	0,17	0,12	0,08	0,04	0,01	0,01
MARZO	0,08	0,06	0,05	0,03	0,01	0,01

FUENTE: CADEIDEPE (2004).

FIGURA 3.5: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE



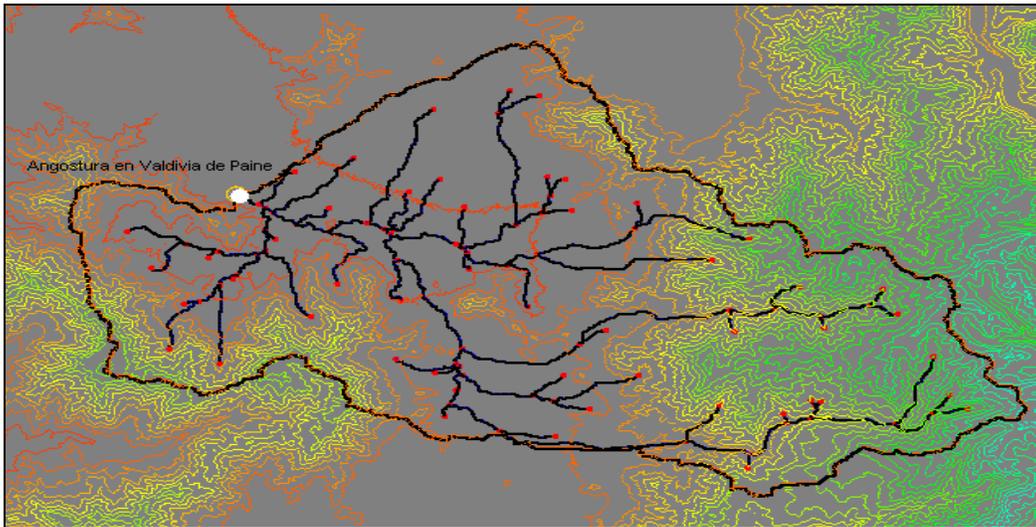
FUENTE: CADEIDEPE (2004).

Las características dimensionales de la cuenca determinadas a través de WMS (figura 3.6) se presentan en la tabla 3.6.

TABLA 3.6: CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LA CUENCA

ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE		
Parámetro	Valor	Unidad
Área (A)	1509	km ²
Largo (L)	81,81	Km
Largo al Centro Gravedad (L _G)	29,16	Km
Altura Media (H)	1091,72	M
Pendiente (S)	0,2593	m/m

FIGURA 3.6: CUENCA ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE (WMS)



3.2.3 Puangue en Boquerón

Esta cuenca se ubica en el sector nor poniente de la Región Metropolitana. Se sitúa entre los 33° 14' y 33° 05' de Latitud Sur y los 70° 59' y 71° 09' Longitud Oeste. Es una subcuenca de la cuenca del Río Maipo y tiene como rama más importante al estero Puangue (figura 3.7).

El clima predominante corresponde al clima templado mediterráneo con estación seca prolongada. En el invierno las temperaturas llegan a los cero grados.

El suelo se caracteriza por rocas graníticas dando origen a potentes coberturas de suelos residuales conocidos como maicillos.

La estación de medición fluviométrica representativa es *Angostura Puangue en Boquerón*, se encuentra a 488 m.s.n.m., con una red de drenaje de 144 km². La ubicación de la estación se detalla en la tabla 3.7.

FIGURA 3.7: CUENCA PUANGUE EN BOQUERÓN



TABLA 3.7: UBICACIÓN GEOGRAFICA DE ESTACIÓN PUANGUE EN BOQUERÓN

Cuenca	Región	Estación Representativa	Coordenadas UTM		Altitud [msnm]
			Norte	Este	
Puangue en Boquerón	RM	Estero Puangue en Boquerón	301300	6328150	488

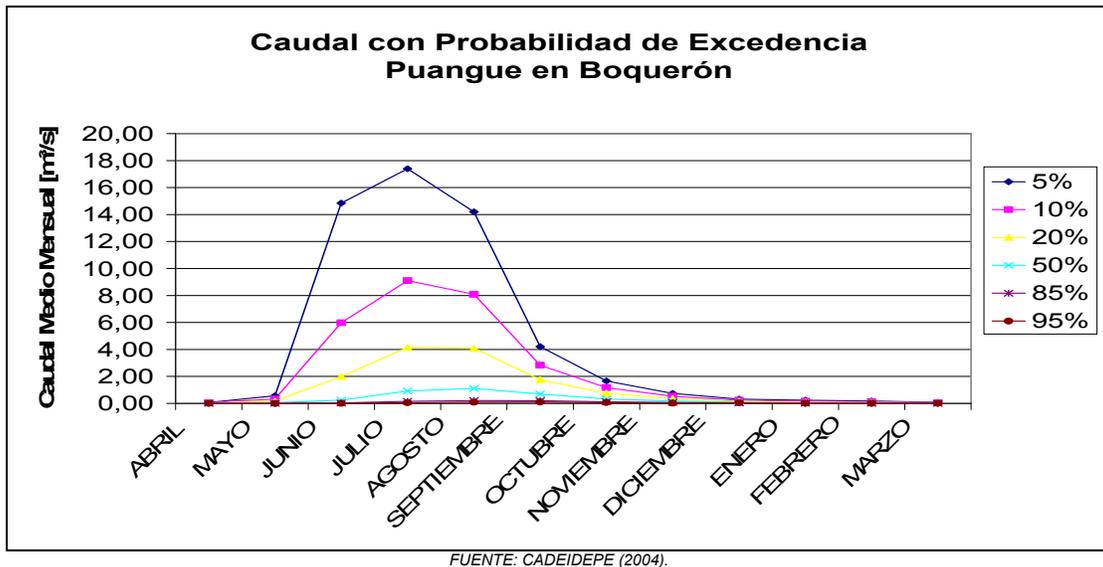
En la tabla 3.8 y la figura 3.8 se observa que esta estación tiene un régimen netamente pluvial, con sus mayores caudales en los meses de invierno, entre junio y septiembre, producto de precipitaciones en forma de lluvia.

TABLA 3.8: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – PUANGUE EN BOQUERÓN

CAUDAL MEDIO MENSUAL	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA					
	5%	10%	20%	50%	85%	95%
ABRIL	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
MAYO	0,57	0,33	0,17	0,05	0,01	0,00
JUNIO	14,85	5,98	1,99	0,25	0,03	0,01
JULIO	17,40	9,11	4,15	0,93	0,15	0,05
AGOSTO	14,20	8,09	4,09	1,11	0,22	0,09
SEPTIEMBRE	4,21	2,84	1,76	0,70	0,21	0,10
OCTUBRE	1,67	1,17	0,75	0,33	0,12	0,06
NOVIEMBRE	0,74	0,53	0,36	0,17	0,07	0,02
DICIEMBRE	0,32	0,24	0,16	0,08	0,04	0,04
ENERO	0,24	0,16	0,09	0,04	0,02	0,01
FEBRERO	0,17	0,12	0,08	0,04	0,01	0,01
MARZO	0,08	0,06	0,05	0,03	0,01	0,01

FUENTE: CADEIDEPE (2004).

FIGURA 3.8: CAUDALES MEDIOS MENSUALES – PUANGUE EN BOQUERÓN

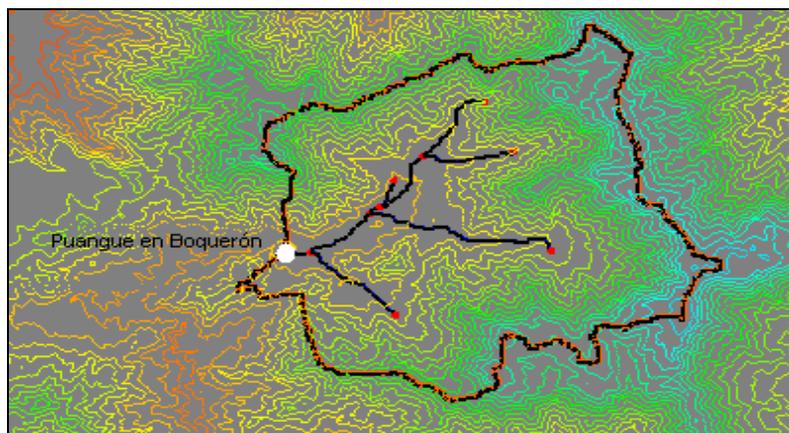


Las características dimensionales de la cuenca determinadas a través de WMS (figura 3.9) se presentan en la tabla 3.9.

TABLA 3.9: CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LA CUENCA

PUANGUE EN BOQUERÓN		
Parámetro	Valor	Unidad
Área (A)	143,61	km ²
Largo (L)	10,33	km
Largo al Centro Gravedad (L _G)	7,03	km
Altura Media (H)	1148,78	m
Pendiente (S)	0,3729	m/m

FIGURA 3.9: CUENCA PUANGUE EN BOQUERÓN (WMS)



3.3 Elección Definitiva de la Cuenca

Según las características principales de las cuencas posibles a estudiar se puede decir que cualquiera de estas tiene el potencial necesario para la aplicación de esta metodología de trabajo, por lo que el principal argumento de elección fue la cantidad de información que posee la cuenca.

La cuenca elegida fue *Angostura en Valdivia de Paine* ya que posee una superficie mucho mayor que las otras alternativas, por lo que al obtener la grilla de información que proporciona el MM5 se tiene una mayor cantidad de datos (11 nodos en el interior de la cuenca, figura 3.10), lo que permite obtener una discretización espacial de la precipitación más fidedigna en comparación con las otras alternativas. Puangue en Boquerón solo cuenta con 2 nodos en el interior de la cuenca (figura 3.11) y Alhué en Quilamuta 7 (figura 3.12).

FIGURA 3.10: GRILLA MM5 – CUENCA VALDIVIA DE PAINE

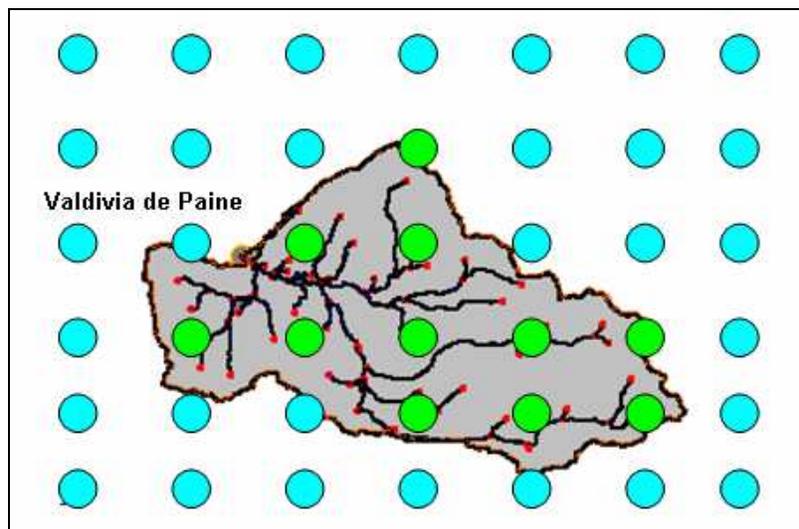


FIGURA 3.11: GRILLA MM5 – CUENCA PUANGUE EN BOQUERÓN

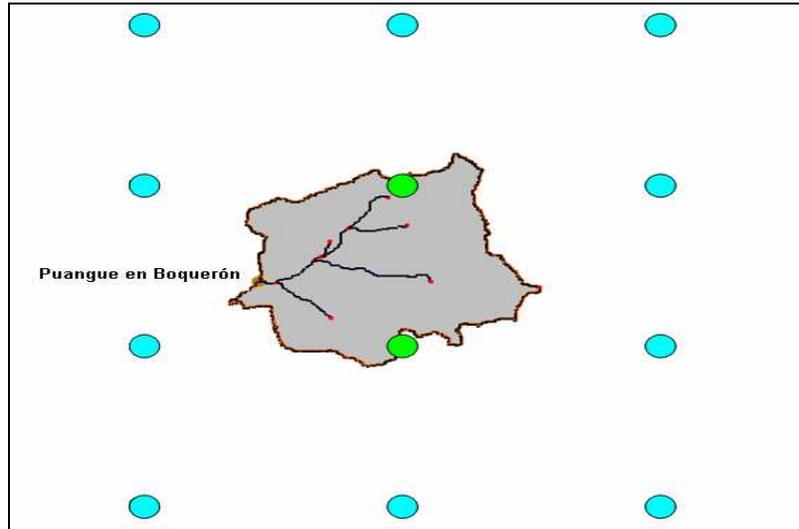
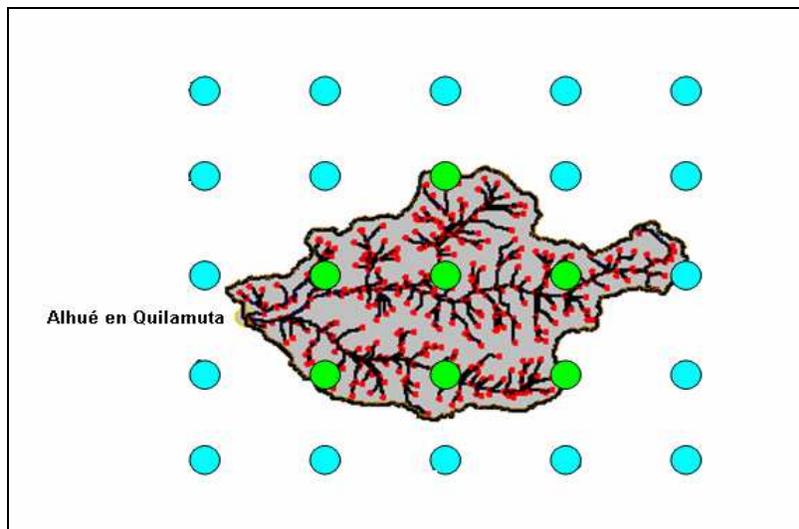


FIGURA 3.12: GRILLA MM5 – CUENCA ALHUÉ EN QUILAMUTA



Una característica de la cuenca seleccionada, que no se analizó en la descripción de cada alternativa, es la relacionada con la altura de las cumbres que delimitan el área aportante. Con respecto a esto se puede decir que la zona más baja está en la ubicación de la estación de medición (350 m.s.n.m), pero cuenta con elevaciones que van desde los 500 m.s.n.m. a prácticamente los 4.000 m.s.n.m (figura 3.13), lo que valida la consideración de componente nival indicada anteriormente.

El área nival (figura 3.14) se estima en un 15% del área total de la cuenca (área por sobre los 2000 m.s.n.m). Ésta se determinó mediante la utilización de la tabla de la línea de nieve promedio de Peña y Vidal (1993), y aunque no deja de ser influyente no se analizará en mayor detalle en este trabajo.

FIGURA 3.13: ALTURAS EN LA CUENCA (WMS)

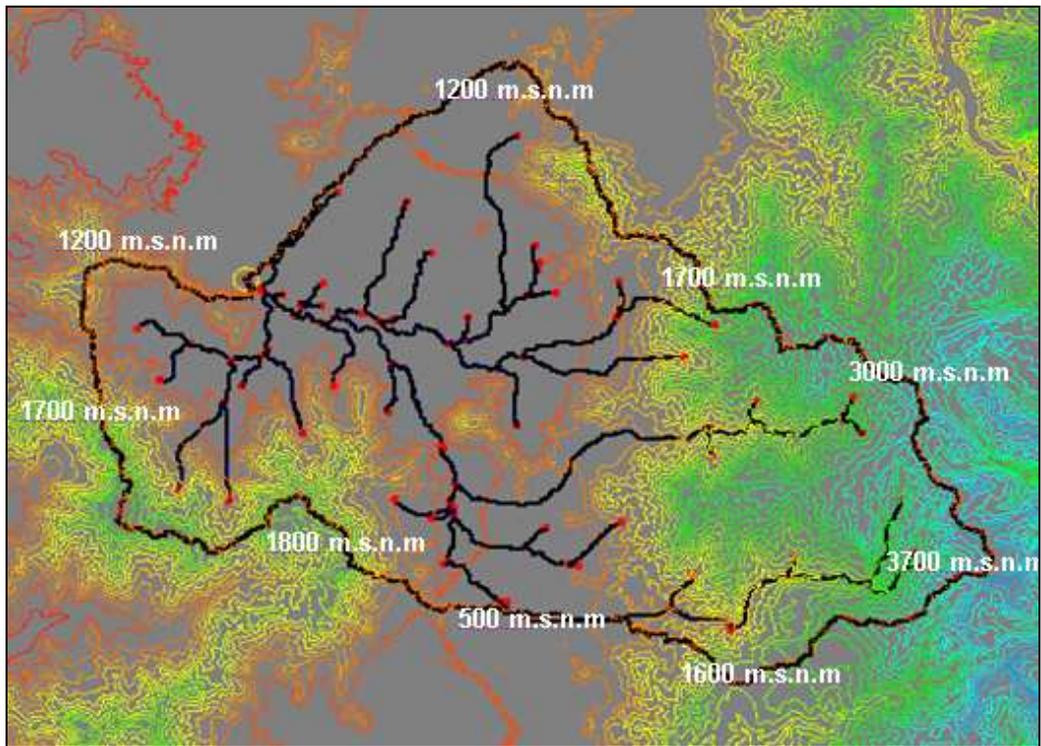
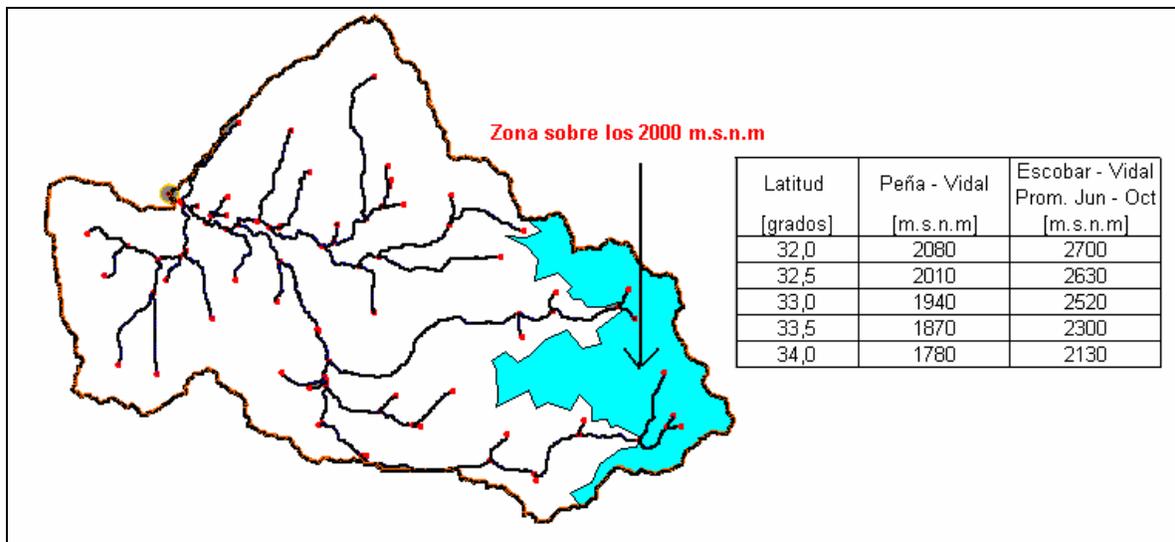


FIGURA 3.14: ÁREA NIVAL EN LA CUENCA



4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

El modelo de predicción meteorológica MM5 está operando, en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, desde el año 2000, por lo que el período de tiempo para el análisis se resume en tan solo unos pocos años (2000 a la fecha). Dentro de este período de tiempo el año en que ha sido simulado el modelo es el año 2002 (modo diagnóstico), por lo que las tormentas obtenidas en este año son las utilizadas en este estudio.

De los registros de precipitaciones diarias de la estación Angostura en Valdivia de Paine (López, 2007), se seleccionó las fechas en que las precipitaciones presentaban una mayor magnitud durante el año 2002 (ver Anexo B.1).

Las fechas seleccionadas y las magnitudes de la precipitación se presentan en la tabla 4.1.

TABLA 4.1: FECHAS DE LAS TORMENTAS SELECCIONADAS, AÑO 2002

Nº Tormenta	Fecha	Pp. Acumulada [mm]
1	25 - 26 Mayo	126,8
2	31 Mayo - 5 Junio	287,8
3	19 - 20 Julio	52,0
4	22 - 23 Julio	80,0
5	29 Julio	13,0
6	5 - 7 Agosto	64,2
7	17 - 18 Agosto	26,0
8	22 - 24 Agosto	45,0
9	27 - 28 Agosto	19,0

4.1 Registros Limnigráficos

Los registros limnigráficos de la estación Angostura en Valdivia de Paine fueron proporcionados por la DGA y se encuentran en mediciones horarias.

Los registros disponibles se muestran en las figuras 4.1 a 4.4.

FIGURA 4.1: CAUDAL HORARIO MES DE MAYO 2002

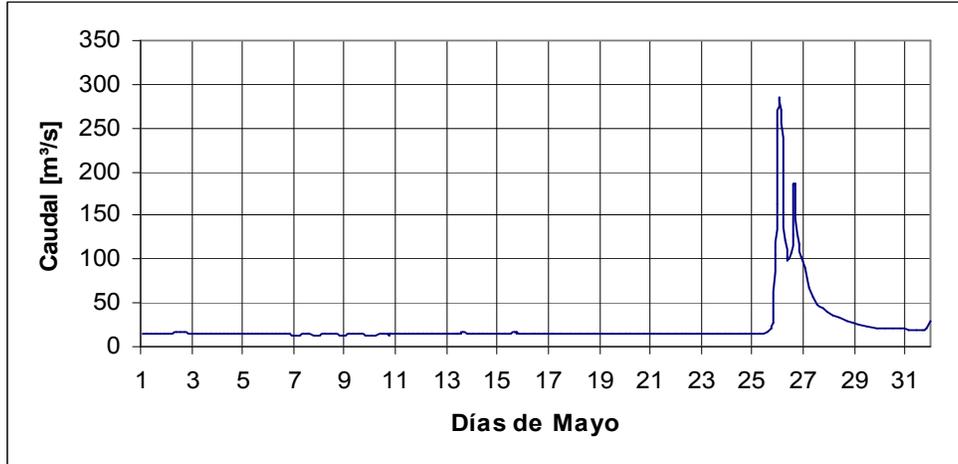


FIGURA 4.2: CAUDAL HORARIO MES DE JUNIO 2002



FIGURA 4.3: CAUDAL HORARIO MES DE JULIO 2002



FIGURA 4.4: CAUDAL HORARIO MES DE AGOSTO 2002



Se aprecia que las tormentas son de magnitudes variadas por lo que los antecedentes se consideran apropiados para los fines perseguidos en el estudio.

Los valores registrados para estos meses se encuentran en el Anexo B.2.

4.2 Registros Pluviográficos para cada Tormenta

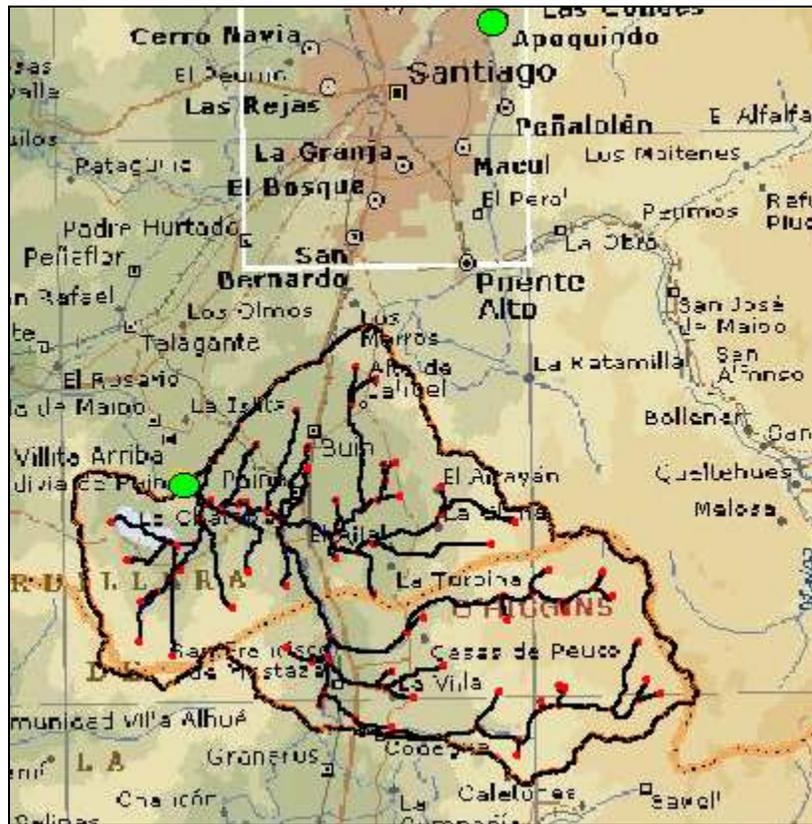
4.2.1 Datos DGA

Los datos provenientes de la Dirección General de Aguas para las fechas de las tormentas, están dadas por las estaciones de medición Angostura en Valdivia de Paine que contiene registros diarios de precipitación (tabla 4.1), y la estación Cerro Calán (ver Anexo B.3), que contiene datos horarios de precipitación. Esta última se ubica en la Región Metropolitana en las coordenadas que se indican en la tabla 4.2. Un esquema de ambas estaciones se puede ver en la figura 4.5 donde el punto marcado arriba es Cerro Calán (CC) y el marcado abajo es Angostura en Valdivia de Paine (AVP).

TABLA 4.2: UBICACIÓN ESTACIÓN CERRO CALÁN

REGIÓN	ESTACIÓN REPRESENTATIVA	COORDENADAS UTM		ALTITUD [msnm]
		NORTE	ESTE	
RM	Cerro Calán	357081	6303810	800

FIGURA 4.5: ESTACIONES DE MEDICIÓN



4.2.2 Datos MM5

Los valores que son entregadas por el modelo MM5 se encuentran en archivos de formato binario, por lo que se requiere de la utilización de softwares de lectura y visualización para ser representados a cabalidad. Para esto se recurrirá a la aplicación de los softwares *GrADS* y *MATLAB*.

Luego de obtener los datos desde el MM5 es necesario verificar si los valores que el modelo entrega son representativos de la realidad, para esto se deben obtener los registros pluviográficos para la estación *Angostura en Valdivia de Paine* para las fechas señaladas de las tormentas y analizarlas.

Para obtener los valores de la precipitación MM5 en el punto en que se encuentra la estación de medición es necesario realizar con anterioridad interpolaciones entre los puntos de la grilla MM5. Para esto se cuenta con 4 diferentes interpolaciones que realiza *MATLAB* (linear, nearest, cubic y spline).

Las rutinas, las interpolaciones y explicaciones de ambos softwares se encuentran en el Anexo C.

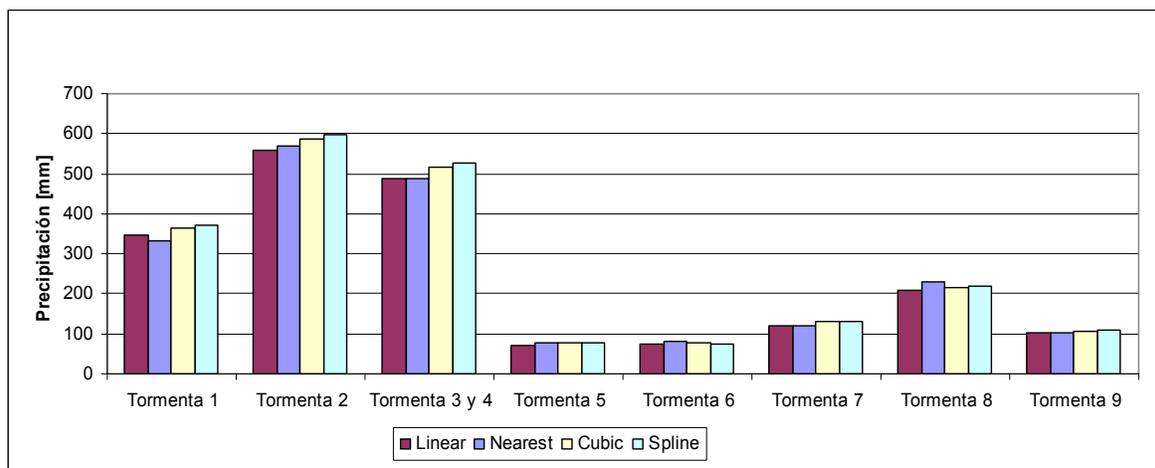
Las magnitudes de cada interpolación en las coordenadas de la estación de medición se presentan en la tabla 4.3 y la figura 4.6.

TABLA 4.3: PRECIPITACION MM5 EN LA ESTACIÓN AVP

Tormenta	Precipitación [mm] - Interpolación			
	Linear	Nearest	Cubic	Spline
1	346,2	330,8	363,4	371,8
2	559,8	568,3	586,2	598,0
3 y 4	489,4	486,2	514,8	528,5
5	71,7	78,9	76,8	76,1
6	75,1	81,6	76,4	76,0
7	118,7	121,4	129,1	130,5
8	207,5	229,9	217,1	218,4
9	100,9	103,4	106,9	108,2

Al determinar los inicios y fines de las tormentas se produjo un problema en lo que respecta a las tormentas 3 y 4. Las tormentas deberían estar separadas por el día 21 de Julio del 2002 (sin precipitaciones) según los registros de la tabla B.1 (anexo B), lo cual no ocurre según los datos simulados por el MM5, ya que presenta un registro de precipitaciones continuamente ascendente desde el día 19 al 24 de Julio. Dada esta situación, se adoptó ésta como una sola tormenta para todos los análisis posteriores.

FIGURA 4.6: PRECIPITACION MM5 EN LA ESTACIÓN AVP



Como se puede observar, las diferentes interpolaciones entregan resultados similares, destacando que no existe una diferencia mayor al 11% entre las interpolaciones. La interpolación Spline es la que entrega, en la mayoría de los casos, los valores más altos con un 62,5% (5 de 8 tormentas), mientras que la interpolación Linear tiene los valores más bajos con un 75% de los casos (6 de 8 tormentas).

5 DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN PARA LOS PUNTOS DE LA GRILLA Y CORRECCIÓN DE LOS DATOS DEL MM5

5.1 Introducción

La cuenca que es afectada por un evento de precipitaciones tiene en su normalidad una gran extensión, por lo que lleva a tener en cuenta que la precipitación que cae sobre ella tendrá diferencias significativas en lo que respecta a magnitud (cantidad de milímetros) y duración en los diferentes puntos de la cuenca. Por ejemplo, en los sectores de mayor altura la precipitación tiende a ser mayor que en más bajos. Por lo anterior se puede inferir que los períodos de retorno, de las variables mencionadas, en los diferentes puntos de una cuenca tenderán a ser diferentes también.

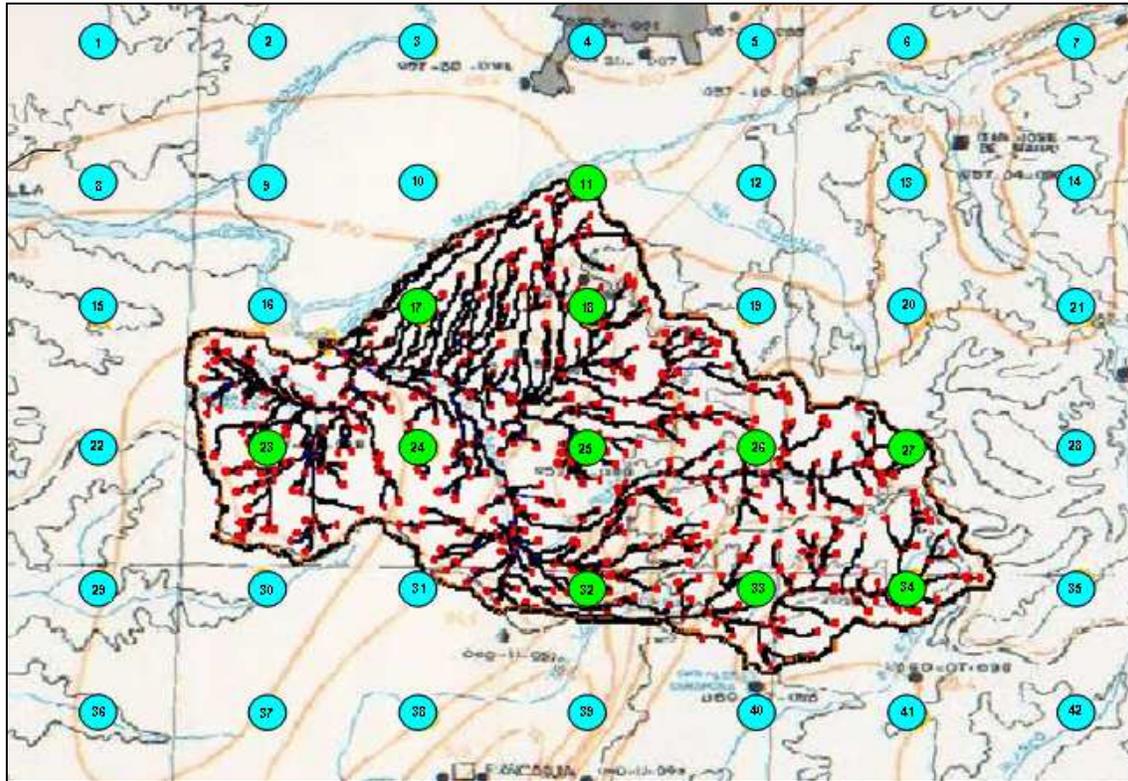
Con la ayuda del modelo de predicción meteorológica MM5 se pudo obtener una grilla con mediciones de precipitación en el tiempo, lo que representa de una manera “más real” lo que ocurre en el paso de cada evento meteorológico.

Los puntos de la grilla que serán analizados para la cuenca seleccionada son los que se muestran en la figura 5.1.

El modelo MM5 genera normalmente una sobre/sub-estimación de la precipitación (Otondo, 2004), por lo que tanto los valores de magnitud como de duración, en la generalidad de los casos, difiere de la realidad. Debido a esto el modelo MM5 será utilizado para la determinación de la distribución de la precipitación, la cual se compara con las Distribuciones de Varas (1985).

Como se puede ver (figura 5.1) la grilla cuenta con 42 nodos en total, de los cuales 11 están en el interior de la cuenca (puntos verdes). Aunque a todos los puntos se les determinó la distribución temporal de precipitación, solo los 11 ya mencionados se analizaron con mayor detalle pues son los que contienen información de precipitaciones que influye directamente en la cuenca.

FIGURA 5.1: GRILLA DE PUNTOS DEL MM5



5.2 Metodología de Análisis

En cada uno de los 11 puntos seleccionados se comparó la distribución temporal de la precipitación, que entrega el MM5, con las Distribuciones de Varas (1985) para determinar cual es la curva que representa en mejor medida a cada tormenta. Para ello se determinó primero a que grupo pertenecen y luego se analizó con cual porcentaje, dentro del grupo ya establecido, es el que tiene una mejor correlación.

El detalle de esta metodología se presenta a continuación.

5.2.1 Determinación del Grupo de Distribución de Varas

Para los puntos anteriormente mencionados se analiza la precipitación para cada tormenta, de manera de determinar a qué grupo corresponde a cada uno.

Para la determinación del grupo al cual corresponde cada evento de precipitación es necesario saber en que cuarto de tiempo cae la mayor cantidad de precipitación. El criterio indica que si la cantidad mayor cae en el primer, segundo, tercer o cuarto cuarto la precipitación corresponderá al grupo 1, 2, 3 o 4 respectivamente.

Las horas de inicio y fin de la tormenta se determinaron para cada uno de los puntos seleccionados, por lo que evidentemente se tienen diferentes duraciones

5.2.2 Determinación del Porcentaje de cada Curva

Una vez obtenido el grupo al que pertenece cada distribución de precipitación, se determina el porcentaje correspondiente para cada punto seleccionado de la grilla. Para esto se cuenta con los valores de la tabla 5.1, los cuales son los mismos que se presentaron en los gráficos de la figura 2.9.

El porcentaje al cual corresponde se determinó correlacionando los porcentajes de precipitaciones del estudio de Varas (tabla 5.1) y los reales para un mismo porcentaje de tiempo. El porcentaje que tuvo una correlación (R^2) más cercano a 1 fue el seleccionado.

TABLA 5.1: PORCENTAJES PARA CADA GRUPO

Grupo I		% Lluvia a		
% Tiempo	10%	50%	90%	
0	0	0	0	
10	11	15	20	
20	22	30	40	
30	32	41	54	
40	40	51	63	
50	50	60	70	
60	59	69	79	
70	68	76	85	
80	78	83	91	
90	90	92	96	
100	100	100	100	

Grupo II		% Lluvia a		
% Tiempo	10%	50%	90%	
0	0	0	0	
10	11	15	20	
20	22	30	40	
30	32	41	54	
40	40	51	63	
50	50	60	70	
60	59	69	79	
70	68	76	85	
80	78	83	91	
90	90	92	96	
100	100	100	100	

Grupo III		% Lluvia a		
% Tiempo	10%	50%	90%	
0	0	0	0	
10	11	15	20	
20	22	30	40	
30	32	41	54	
40	40	51	63	
50	50	60	70	
60	59	69	79	
70	68	76	85	
80	78	83	91	
90	90	92	96	
100	100	100	100	

Grupo IV		% Lluvia a		
% Tiempo	10%	50%	90%	
0	0	0	0	
10	2	8	12	
20	7	17	24	
30	11	25	34	
40	16	31	42	
50	21	40	50	
60	30	50	58	
70	40	60	68	
80	58	73	80	
90	78	88	90	
100	100	100	100	

5.2.3 Resultados y Análisis

Los resultados de los análisis para los puntos de interés se muestran en la tabla 5.2.

TABLA 5.2: GRUPO Y PORCENTAJE DE CADA NODO

NODOS		11	17	18	23	24	25	26	27	32	33	34
Tormenta 1	Grupo	III										
	%	10	50	30	90	30	30	50	30	10	30	40
Tormenta 2	Grupo	II	III	I	I	I	I	I	I	III	III	III
	%	40	70	30	20	30	30	30	30	90	70	60
Tormenta 3 y 4	Grupo	IV	II	III	II	II	II	III	I	II	III	I
	%	40	60	70	50	50	40	70	30	30	70	40
Tormenta 5	Grupo	III	III	III	II	III	III	II	III	III	III	II
	%	10	50	10	30	70	30	40	50	30	10	30
Tormenta 6	Grupo	III	III	IV	III							
	%	10	10	10	20	10	10	10	10	10	10	10
Tormenta 7	Grupo	I	III	III	II	III	III	III	II	II	III	II
	%	10	50	80	40	60	70	70	20	40	90	60
Tormenta 8	Grupo	III	I	III	II	I	I	III	I	I	I	I
	%	60	40	90	50	50	90	70	10	90	90	80
Tormenta 9	Grupo	I	II									
	%	90	90	90	80	90	90	90	90	70	90	90

Los valores de las duraciones de las tormentas, las magnitudes en cada cuarto de tiempo y los factores R^2 de cada porcentaje se encuentran en el Anexo D.1

El resumen de las distribuciones de precipitaciones, por grupo y porcentaje, se presenta en las figuras 5.2 y 5.3.

FIGURA 5.2: GRUPOS

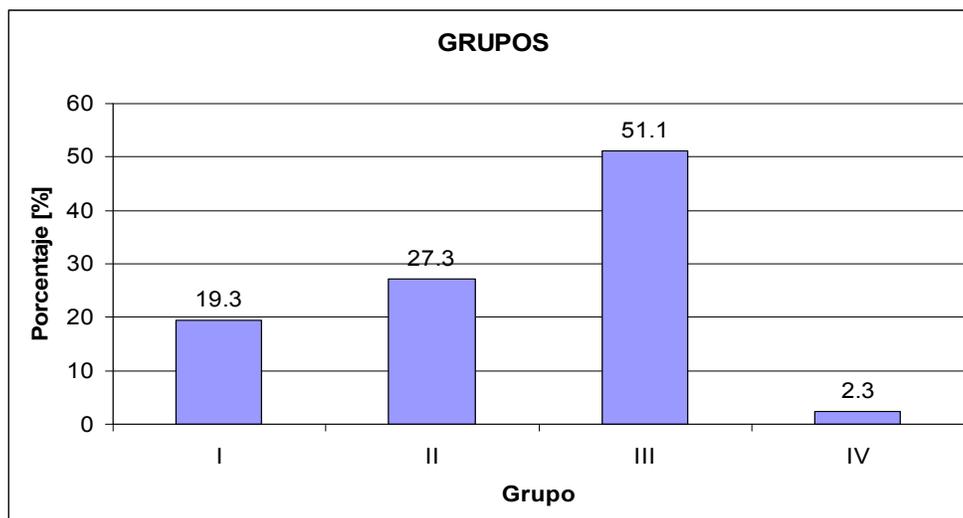
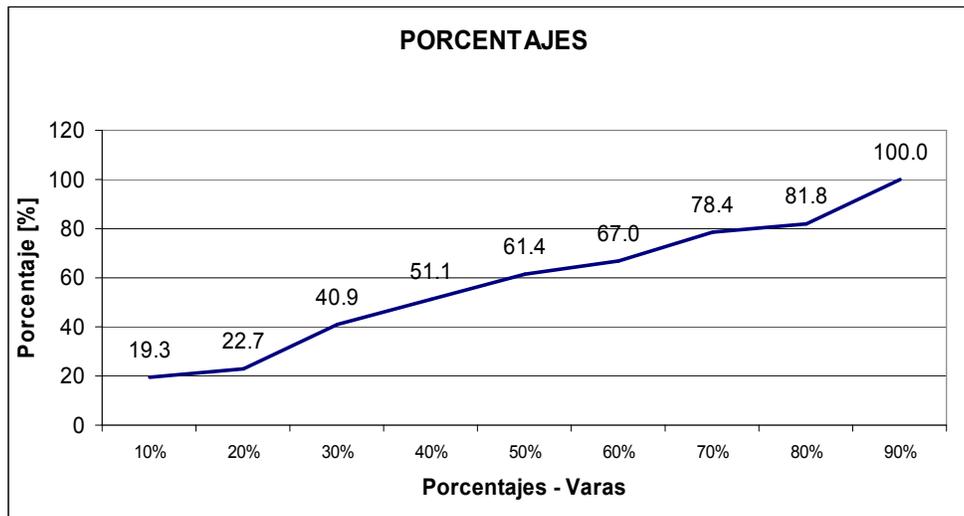


FIGURA 5.3: PORCENTAJES



De la figura 5.2 se puede decir que el grupo III tienen la mayor cantidad de repeticiones con un 51,1%.

De la figura 5.3 se puede decir que porcentaje 10% tienen la mayor cantidad de repeticiones con un 19,3% seguido del 30% y 90% con un 18,2% cada uno.

Dado estos resultados se eligieron como curva representativa de la cuenca la curva del Grupo III y Porcentaje 10%.

5.3 Corrección de los Datos del MM5

Como ya se mencionó los valores de precipitación entregados por el modelo MM5 están sobre/sub – estimados, por lo que la magnitud y la duración de la tormenta deben ser corregidas de modo de representar la “realidad” de la mejor manera posible, aceptando que los valores registrados en las estaciones son los reales.

Los dos parámetros que son necesarios de corregir se analizaron separadamente.

Para la magnitud se realizan correcciones dados los datos de precipitaciones diarias para las fechas de las tormentas provenientes de la estación de medición Angostura en Valdivia de Paine (AVP).

Para la duración se realizan correcciones dados los datos de precipitaciones diarias para las fechas de las tormentas provenientes de la estación de medición Cerro Calán (CC). Se utilizó una estación diferente a la anterior debido a que en

AVP no se contaba con la información de precipitación horaria que era necesaria para este análisis.

Ambas estaciones nombradas no se encuentran directamente en los nodos de la grilla MM5, por lo que será necesario interpolar los datos entregados por el modelo de manera de obtener una relación que permita su corrección.

La interpolación de los datos se realiza mediante la aplicación del software MATLAB. Para este trabajo se cuenta con 2 rutinas que permiten la lectura e interpolación de los datos.

- PrecipitacionMM52.m: Realiza las interpolaciones del archivo binario para el aumento de la resolución. Se tienen 4 métodos de interpolación a elegir: linear, nearest, cubic y spline.
- PuntoExtraccion.m: Entrega los valores para un punto previo ingreso de las coordenadas (longitud y latitud) de dicho punto.

A los archivos obtenidos de GrADS se le aplican ambas rutinas, 4 veces (una por cada interpolación) a cada tormenta. Una vez interpolada la grilla se procede a obtener los valores de la precipitación para las coordenadas en las que se encuentra la estación de medición. Estos valores se comparan con los de la tabla 4.1 para su corrección.

5.3.1 Factor de Corrección de la Magnitud

Para realizar un ajuste a los valores “reales” que se tienen de la estación de medición *Valdivia en Angostura de Paine* se determinó un factor de corrección (FC_{PP}) para cada tormenta dependiendo de la magnitud total de precipitación registrada y de la entregada por el MM5.

$$FC_{PP,i} = \frac{Pp_{i,OBS}}{Pp_{i,MM5}} \quad (5.1)$$

Donde:

- $Pp_{i,MM5}$: Precipitación Total Acumulada para la tormenta i entregada por el MM5 en la estación AVP
- $Pp_{i,OBS}$: Precipitación Total Acumulada para la tormenta i observada en la estación AVP

Determinados los FC_{PP} de cada tormenta para cada interpolación se corrigen los valores de precipitación horaria ($Pp_{i,HOR,MM5}$) que fueron determinados por el MM5 mediante la fórmula (5.2).

$$Pp_{i,HOR,Corr} = FC_{PP,i} \cdot Pp_{i,HOR,MM5} \quad (5.2)$$

Los FC_{PP} determinados según la fórmula (5.1) para cada tormenta en cada interpolación se muestran en la tabla 5.3.

TABLA 5.3: FACTORES DE CORRECCIÓN PARA LA MAGNITUD EN CADA TORMENTA E INTERPOLACIÓN

Tormenta	LINEAR			NEAREST		CUBIC		SPLINE	
	Pp Acum. Real [mm]	Pp Acum. MM5 [mm]	FC						
1	126,8	346,2	0,37	330,8	0,38	363,4	0,35	371,8	0,34
2	287,8	559,8	0,51	568,3	0,51	586,2	0,49	598,0	0,48
3 y 4	132,0	489,4	0,27	486,2	0,27	514,8	0,26	528,5	0,25
5	13,0	71,7	0,18	78,9	0,16	76,8	0,17	76,1	0,17
6	64,2	75,1	0,85	81,6	0,79	76,4	0,84	76,0	0,84
7	26,0	118,7	0,22	121,4	0,21	129,1	0,20	130,5	0,20
8	45,0	207,5	0,22	229,9	0,20	217,1	0,21	218,4	0,21
9	19,0	100,9	0,19	103,4	0,18	106,9	0,18	108,2	0,18

Todos los valores obtenidos de los FC_{PP} indican sobre – estimaciones del modelo MM5 que llegan hasta 5 veces la cantidad real ($FC_{PP} \approx 0,2$), como en las tormentas 6, 7, 8 y 9. En otras, como la 6, se encuentran muy bien correlacionados ($FC_{PP} \approx 0,85$), lo que señala claramente que las condiciones de borde que utiliza el MM5 pueden entregar resultados bastante diferentes y que las correcciones son necesarias para la continuación del trabajo.

Los valores de estos FC_{PP} son similares para todas las interpolaciones, por lo que los análisis que se deriven utilizando una u otra interpolación no tendrían consecuencias relevantes. Dentro de esto se puede observar que los FC_{PP} de la interpolación **Lineal** son mayores, por lo que se encuentran levemente más cercanos a los observados, por lo que con los valores determinados con esta interpolación se utilizaron de aquí en adelante.

5.3.2 Factor de Corrección de la Duración

Para realizar un ajuste a los valores “reales” que se tienen de la estación de medición *Cerro Calán* se determina un factor de corrección (FC_D) para cada tormenta dependiendo de la duración total de precipitación registrada y de la entregada por el MM5.

$$FC_{D,i} = \frac{Duración_{i,OBS}}{Duración_{i,MM5}} \quad (5.3)$$

Donde:

- $D_{i, MM5}$: Duración de la Precipitación para la tormenta i entregada por el MM5 en la estación CC.
 $D_{i, REAL}$: Duración de la Precipitación para la tormenta i registrada en la estación CC.

Determinados los FC_D de cada tormenta se corrigen los valores de las duraciones ($D_{i,j,corr}$) en los nodos seleccionados (j) de la grilla MM5 para cada tormenta (i)

$$D_{i,j,Corr} = FC_{PP} \cdot D_{i,j,MM5} \quad (5.4)$$

Donde:

- $D_{i,j, MM5}$: Duración de la Precipitación para la tormenta i en el punto j entregada por el MM5

En primer lugar se determinó de la duración de la tormenta en base a los datos de la estación CC para las fechas de las tormentas seleccionadas.

Los valores de los inicios y términos de las tormentas se observan en la tabla 5.4.

TABLA 5.4: DURACIONES DE LAS TORMENTAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN CERRO CALÁN (DGA)

Tormenta	Inicio		Término		Duración [hrs]
	Día	Hora	Día	Hora	
1	25 de Mayo de 2002	11:00	27 de Mayo de 2002	23:00	60
2	31 de Mayo de 2002	21:00	5 de Junio de 2002	18:00	117
3	20 de Julio de 2002	2:00	21 de Julio de 2002	8:00	30
4	22 de Julio de 2002	14:00	23 de Julio de 2002	21:00	31
5	30 de Julio de 2002	7:00	30 de Julio de 2002	14:00	7
6	5 de Agosto de 2002	13:00	8 de Agosto de 2002	2:00	61
7	18 de Agosto de 2002	6:00	19 de Agosto de 2002	23:00	41
8	22 de Agosto de 2002	10:00	25 de Agosto de 2002	2:00	64
9	27 de Agosto de 2002	7:00	28 de Agosto de 2002	22:00	39

Una vez obtenidas las duraciones reales se determinó las duraciones entregadas por el MM5 para la ubicación de la estación Cerro Calán, utilizando la interpolación Lineal anteriormente seleccionada.

Los valores de los inicios y términos de las tormentas se observan en la tabla 5.5.

TABLA 5.5: DURACIONES DE LAS TORMENTAS SEGÚN MM5 EN ESTACIÓN CERRO CALÁN

Tormenta	Inicio		Término		Duración [hrs]
	Día	Hora	Día	Hora	
1	24 de Mayo de 2002	14:00	27 de Mayo de 2002	16:00	74
2	31 de Mayo de 2002	8:00	6 de Junio de 2002	22:00	158
3 y 4	19 de Julio de 2002	18:00	23 de Julio de 2002	18:00	96
5	30 de Julio de 2002	6:00	30 de Julio de 2002	22:00	16
6	5 de Agosto de 2002	12:00	8 de Agosto de 2002	8:00	68
7	18 de Agosto de 2002	6:00	19 de Agosto de 2002	20:00	38
8	22 de Agosto de 2002	12:00	25 de Agosto de 2002	8:00	68
9	27 de Agosto de 2002	4:00	29 de Agosto de 2002	18:00	60

Como los valores de las tormentas 3 y 4 se encuentran en conjunto, la duración utilizada fue de 91 horas.

Los FC_D determinados según la fórmula (5.3) para cada tormenta se presentan en la tabla 5.6.

TABLA 5.6: FACTORES DE CORRECCIÓN PARA LA DURACIÓN EN CADA TORMENTA

Tormenta	Duración Real [hrs]	Duración MM5 [hrs]	FC
1	60	74	0,81
2	117	158	0,74
3 y 4	91	96	0,95
5	7	16	0,44
6	61	68	0,90
7	41	38	1,08
8	64	68	0,94
9	42	60	0,70

Dadas ambas correcciones los valores de las magnitudes (PP) y de las duraciones (t) de las tormentas en los nodos de interés son las que se presentan en las tablas 5.7 a 5.14, y se obtuvieron mediante la utilización de las fórmulas 5.2 y 5.4 respectivamente.

TABLA 5.7: CORRECCIONES TORMENTA 1

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	104,6	38,3	72	58,4
17	296,1	108,5	76	61,6
18	137,1	50,2	74	60,0
23	311,4	114,1	100	81,1
24	254,2	93,1	80	64,9
25	145,0	53,1	78	63,2
26	122,1	44,7	80	64,9
27	103,7	38,0	76	61,6
32	125,0	45,8	80	64,9
33	105,2	38,5	82	66,5
34	86,1	31,5	82	66,5

TABLA 5.8: CORRECCIONES TORMENTA 2

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	204,8	105,3	135	100,0
17	442,4	227,5	140	103,7
18	230,3	118,4	136	100,7
23	534,1	274,6	141	104,4
24	417,9	214,9	138	102,2
25	188,8	97,1	134	99,2
26	151,1	77,7	132	97,7
27	154,1	79,2	135	100,0
32	138,3	71,1	130	96,3
33	112,5	57,9	130	96,3
34	88,4	45,5	130	96,3

TABLA 5.9: CORRECCIONES TORMENTA 3 - 4

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	207,5	56,0	90	85,3
17	447,1	120,6	107	101,4
18	250,1	67,5	100	94,8
23	473,3	127,7	114	108,1
24	425,3	114,7	104	98,6
25	228,2	61,6	102	96,7
26	163,7	44,2	104	98,6
27	152,5	41,2	104	98,6
32	161,6	43,6	103	97,6
33	125,5	33,9	102	96,7
34	95,5	25,8	103	97,6

TABLA 5.10: CORRECCIONES TORMENTA 5

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	1,8	0,3	10	4,4
17	41,2	7,5	44	19,3
18	8,6	1,6	28	12,3
23	73,3	13,3	48	21,0
24	40,7	7,4	38	16,6
25	22,6	4,1	32	14,0
26	13,0	2,4	24	10,5
27	11,7	2,1	16	7,0
32	22,2	4,0	32	14,0
33	14,7	2,7	32	14,0
34	14,3	2,6	16	7,0

TABLA 5.11: CORRECCIONES TORMENTA 6

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	7,5	6,5	56	50,2
17	35,0	29,9	66	59,2
18	8,7	7,5	54	48,4
23	79,6	68,0	70	62,8
24	30,8	26,3	66	59,2
25	10,6	9,1	62	55,6
26	7,8	6,7	64	57,4
27	5,8	5,0	62	55,6
32	15,4	13,2	68	61,0
33	11,4	9,8	64	57,4
34	5,8	4,9	62	55,6

TABLA 5.12: CORRECCIONES TORMENTA 7

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	7,6	1,7	32	34,5
17	85,5	18,8	58	62,6
18	18,7	4,1	36	38,8
23	114,9	25,2	58	62,6
24	92,7	20,3	54	58,3
25	45,2	9,9	40	43,2
26	26,2	5,7	38	41,0
27	18,1	4,0	30	32,4
32	59,0	13,0	44	47,5
33	44,2	9,7	38	41,0
34	27,2	6,0	36	38,8

TABLA 5.13: CORRECCIONES TORMENTA 8

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	61,1	13,3	66	62,1
17	157,6	34,2	72	67,8
18	56,9	12,3	70	65,9
23	215,8	46,9	72	67,8
24	102,5	22,3	70	65,9
25	33,3	7,3	66	62,1
26	23,2	5,2	50	47,1
27	29,7	6,5	48	45,2
32	14,7	3,3	44	41,4
33	10,6	2,3	44	41,4
34	14,9	3,2	40	37,6

TABLA 5.14: CORRECCIONES TORMENTA 9

Nodo	PP [mm]	PP corr [mm]	t [hrs]	t corr [hrs]
11	56,3	10,6	46	32,2
17	93,5	17,6	52	36,4
18	63,9	12,1	40	28,0
23	95,0	17,9	50	35,0
24	87,8	16,5	50	35,0
25	76,0	14,3	44	30,8
26	77,0	14,5	44	30,8
27	61,8	11,7	44	30,8
32	78,1	14,7	46	32,2
33	88,3	16,6	46	32,2
34	63,1	11,9	46	32,2

Como se puede observar de las tablas 5.7 a 5.14 las duraciones en cada nodo son distintas, por lo que se puede inferir que los inicios y/o los fines de las tormentas en cada nodo ocurren en momentos diferentes. En la tabla 5.15 se pueden apreciar los inicios, duraciones y fines de cada tormenta en los diferentes nodos. Los inicios se determinaron como la cantidad de tiempo transcurrido entre el primer registro de precipitación en la cuenca (valores en rojo) y el tiempo que demoró la primera precipitación en cada nodo.

TABLA 5.15: DURACIONES (HRS) EN NODOS SELECCIONADOS

Nodo	Tormenta 1			Tormenta 2			Tormenta 3 y 4			Tormenta 5		
	Inicio	Duración	Fin	Inicio	Duración	Fin	Inicio	Duración	Fin	Inicio	Duración	Fin
11	1,6	58,4	60,0	1,5	100,0	101,4	5,7	85,3	91,0	9,6	4,4	14,0
17	1,6	61,6	63,2	0,0	103,7	103,7	1,9	101,4	103,3	0,9	19,3	20,1
18	1,6	60,0	61,6	1,5	100,7	102,2	5,7	94,8	100,5	3,5	12,3	15,8
23	3,2	81,1	84,3	0,0	104,4	104,4	0,0	108,1	108,1	0,0	21,0	21,0
24	1,6	64,9	66,5	1,5	102,2	103,7	3,8	98,6	102,4	2,6	16,6	19,3
25	1,6	63,2	64,9	3,0	99,2	102,2	5,7	96,7	102,4	2,6	14,0	16,6
26	1,6	64,9	66,5	4,4	97,7	102,2	5,7	98,6	104,3	7,0	10,5	17,5
27	0,0	61,6	61,6	3,0	100,0	102,9	5,7	98,6	104,3	12,3	7,0	19,3
32	1,6	64,9	66,5	5,9	96,3	102,2	5,7	97,6	103,3	2,6	14,0	16,6
33	1,6	66,5	68,1	5,9	96,3	102,2	5,7	96,7	102,4	3,5	14,0	17,5
34	0,0	66,5	66,5	5,9	96,3	102,2	5,7	97,6	103,3	12,3	7,0	19,3

Nodo	Tormenta 6			Tormenta 7			Tormenta 8			Tormenta 9		
	Inicio	Duración	Fin									
11	1,8	50,2	52,0	25,9	34,5	60,4	0,0	62,1	62,1	2,8	32,2	35,0
17	0,0	59,2	59,2	2,2	62,6	64,7	0,0	67,8	67,8	0,0	36,4	36,4
18	1,8	48,4	50,2	21,6	38,8	60,4	0,0	65,9	65,9	2,8	28,0	30,8
23	0,0	62,8	62,8	0,0	62,6	62,6	0,0	67,8	67,8	0,0	35,0	35,0
24	0,0	59,2	59,2	6,5	58,3	64,7	0,0	65,9	65,9	0,0	35,0	35,0
25	1,8	55,6	57,4	17,3	43,2	60,4	1,9	62,1	64,0	1,4	30,8	32,2
26	1,8	57,4	59,2	21,6	41,0	62,6	0,0	47,1	47,1	2,8	30,8	33,6
27	0,0	55,6	55,6	23,7	32,4	56,1	0,0	45,2	45,2	4,2	30,8	35,0
32	1,8	61,0	62,8	15,1	47,5	62,6	1,9	41,4	43,3	1,4	32,2	33,6
33	1,8	57,4	59,2	21,6	41,0	62,6	1,9	41,4	43,3	2,8	32,2	35,0
34	0,0	55,6	55,6	23,7	38,8	62,6	0,0	37,6	37,6	2,8	32,2	35,0

Según los resultados de la tabla 5.15 se puede decir que en prácticamente todas las tormentas (7 de 8) el inicio ocurre en el nodo 23, seguidos de los nodos 17 y 24. Según la figura 5.1 estos 3 nodos se encuentran en sector poniente de la cuenca, por lo que en esta zona es por donde el frente ingresa.

5.3.3 Visualización de Resultados

Como ya se comentó en capítulos anteriores (tablas 5.7 a 5.14), no todo el tiempo se tienen las mismas precipitaciones en los diferentes sectores de una cuenca, es por esto que se analizó el paso de las tormentas mediante la aplicación de curvas isoporcentuales de precipitación, porcentaje de precipitación caída en relación a la magnitud total en cada nodo, para diferentes porcentajes de tiempo, 10%, 25%, 50% y 75% de la duración total de la tormenta.

Como trata de varios gráficos, solo se muestran los de las tormentas de mayor y menor magnitud, es decir, la tormenta 2 (figuras 5.4 a 5.7) y tormenta 5 (figuras 5.8 a 5.11). El resto de las tormentas se encuentra en el Anexo D.2.

Además en las figuras 5.12 a 5.19 se aprecian las magnitudes de precipitación total de cada tormenta.

FIGURA 5.4: TORMENTA 2 – % PRECIPITACION EN EL 10% DE LA DURACIÓN TOTAL

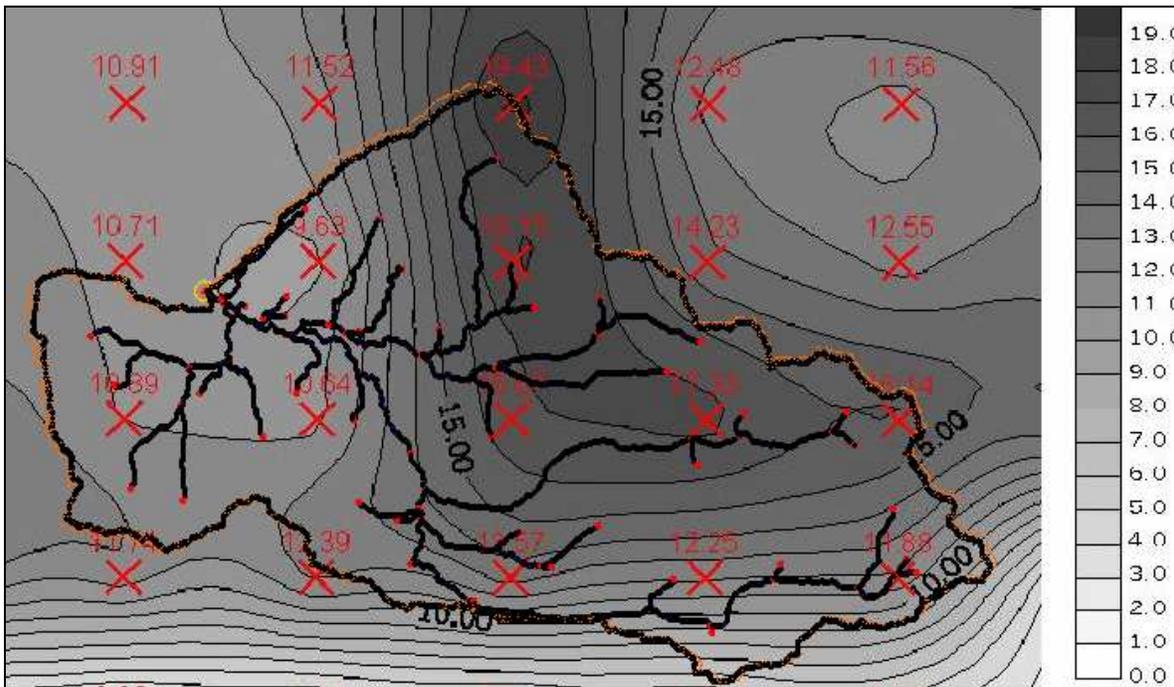


FIGURA 5.5: TORMENTA 2 – % PRECIPITACION EN EL 25% DE LA DURACIÓN TOTAL

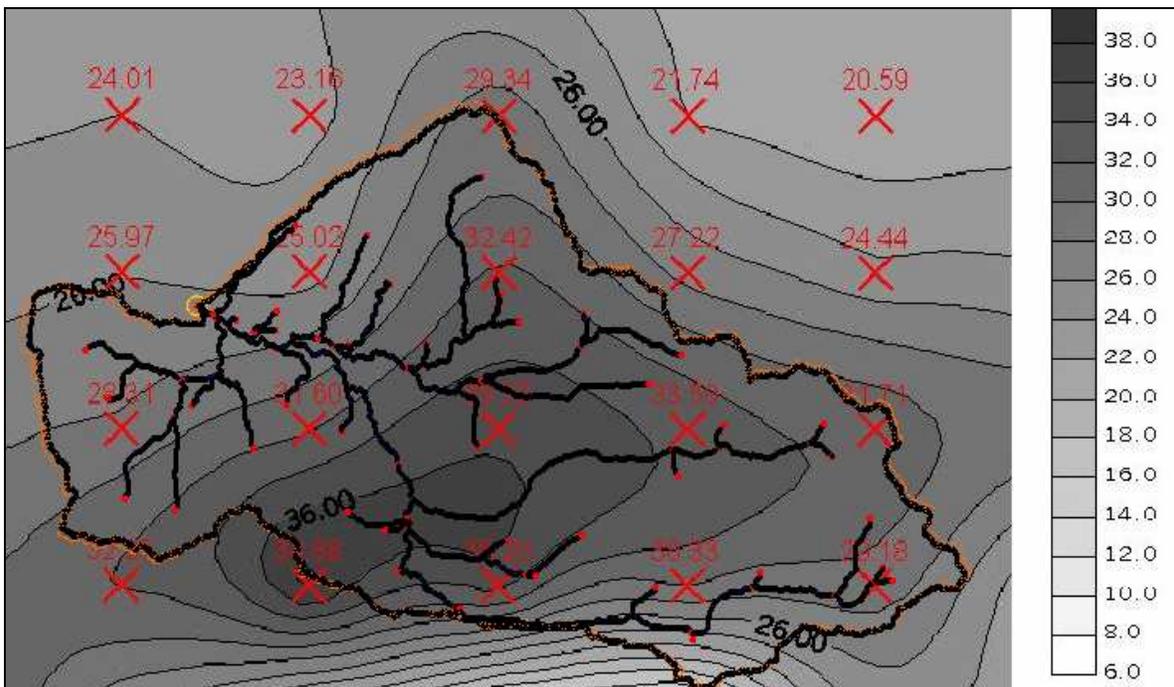


FIGURA 5.6: TORMENTA 2 – % PRECIPITACION EN EL 50% DE LA DURACIÓN TOTAL

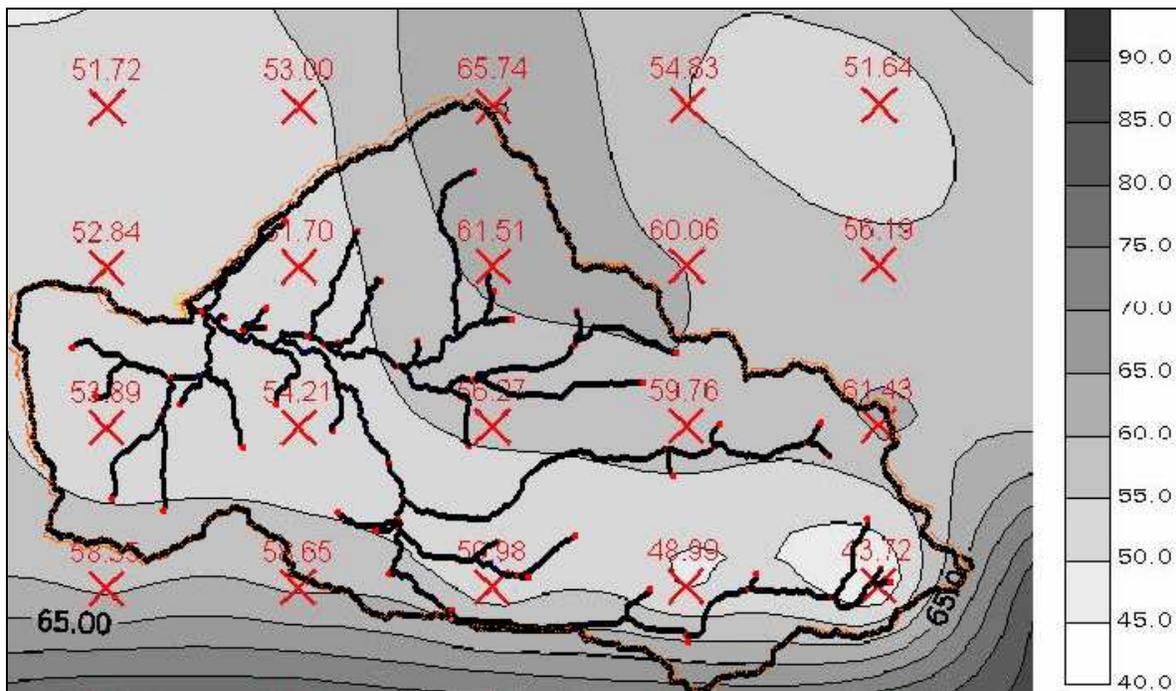


FIGURA 5.7: TORMENTA 2 – % PRECIPITACION EN EL 75% DE LA DURACIÓN TOTAL

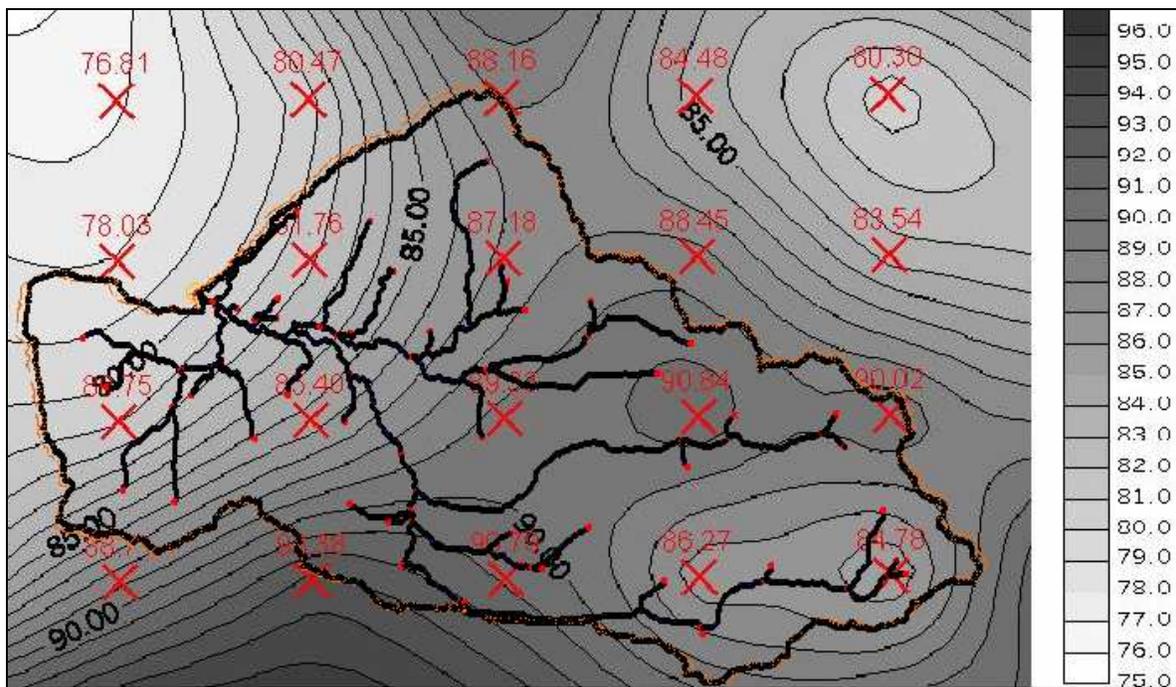


FIGURA 5.10: TORMENTA 5 – % PRECIPITACION EN EL 50% DE LA DURACIÓN TOTAL

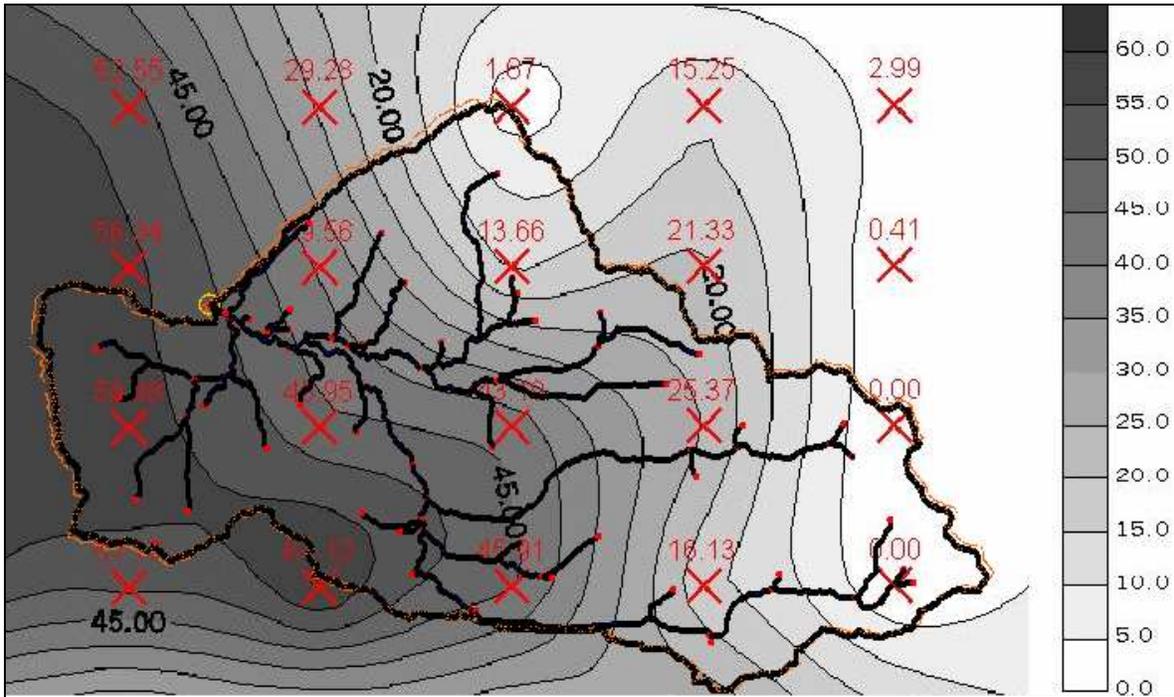
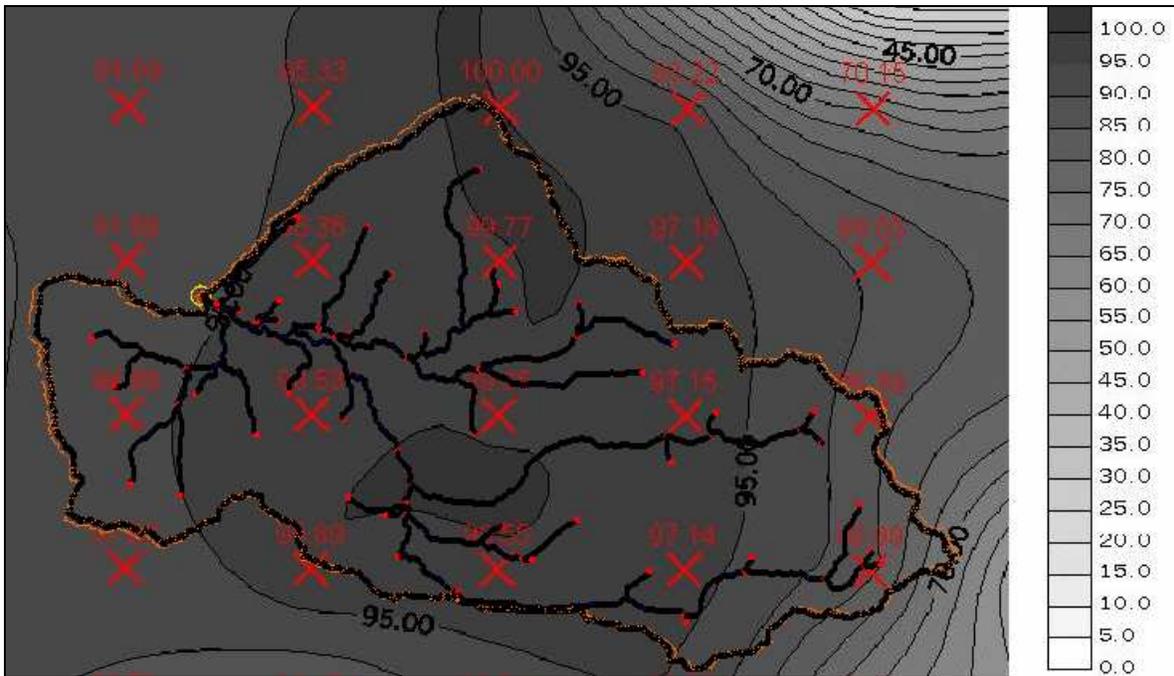


FIGURA 5.11: TORMENTA 5 – % PRECIPITACION EN EL 75% DE LA DURACIÓN TOTAL



Claramente los porcentajes de la precipitación van tomando diferentes posiciones en el paso de un evento meteorológico. En la tormenta 2 se puede ver que los sectores que presentan un mayor porcentaje de precipitación (sector más oscuro) en cada figura se mueven a partir del centro – norte de la cuenca (figura 5.4), luego se desplaza al sur (figura 5.5 y 5.6) hasta expandirse a lo largo de toda la cuenca (figura 5.4). En cambio para la tormenta 5 inicialmente solo existe precipitación en las cumbres nor – orientales, y con el paso del tiempo va ingresando poco a poco al sector occidental hasta que se dispersa por toda la cuenca. En la figura 5.10 y 5.11 se puede observar que en ese intervalo de tiempo fue la mayor cantidad de precipitación caída, en porcentaje.

FIGURA 5.12: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 1

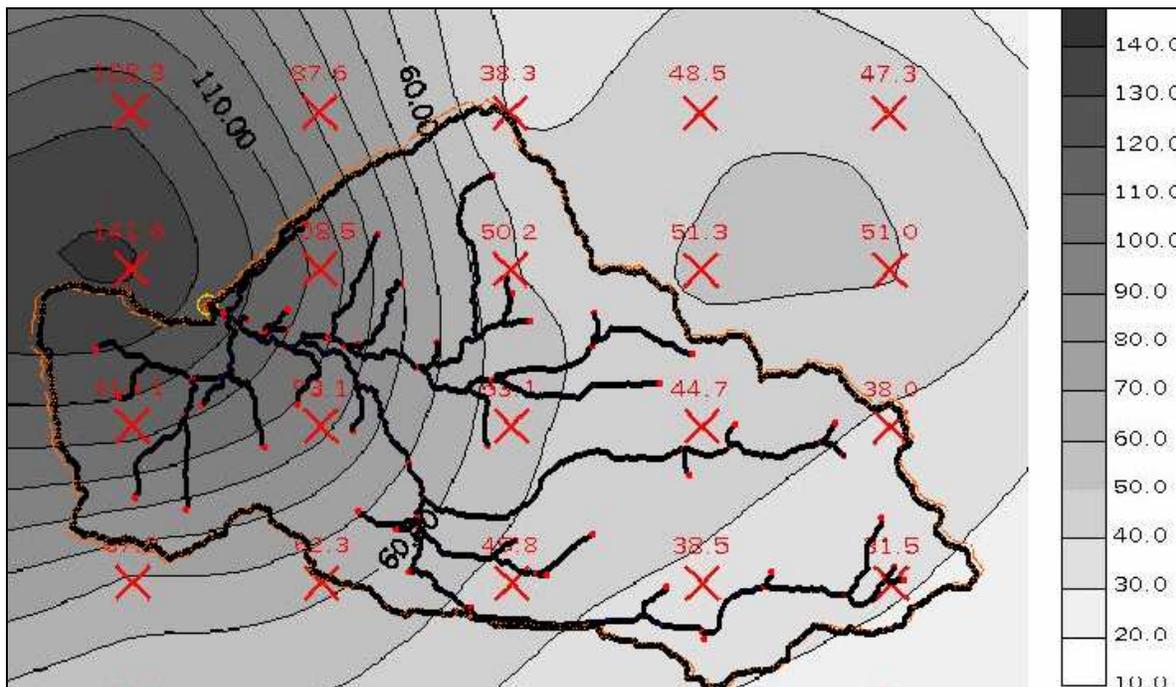


FIGURA 5.13: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 2

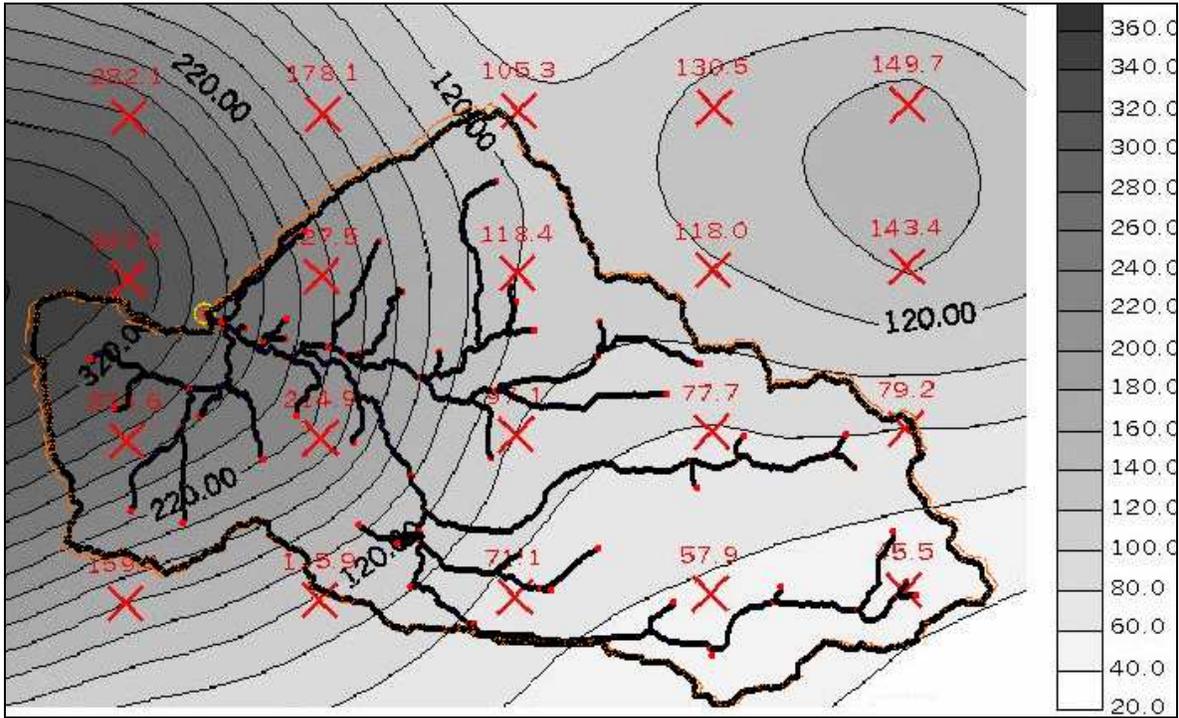


FIGURA 5.14: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 3 Y 4

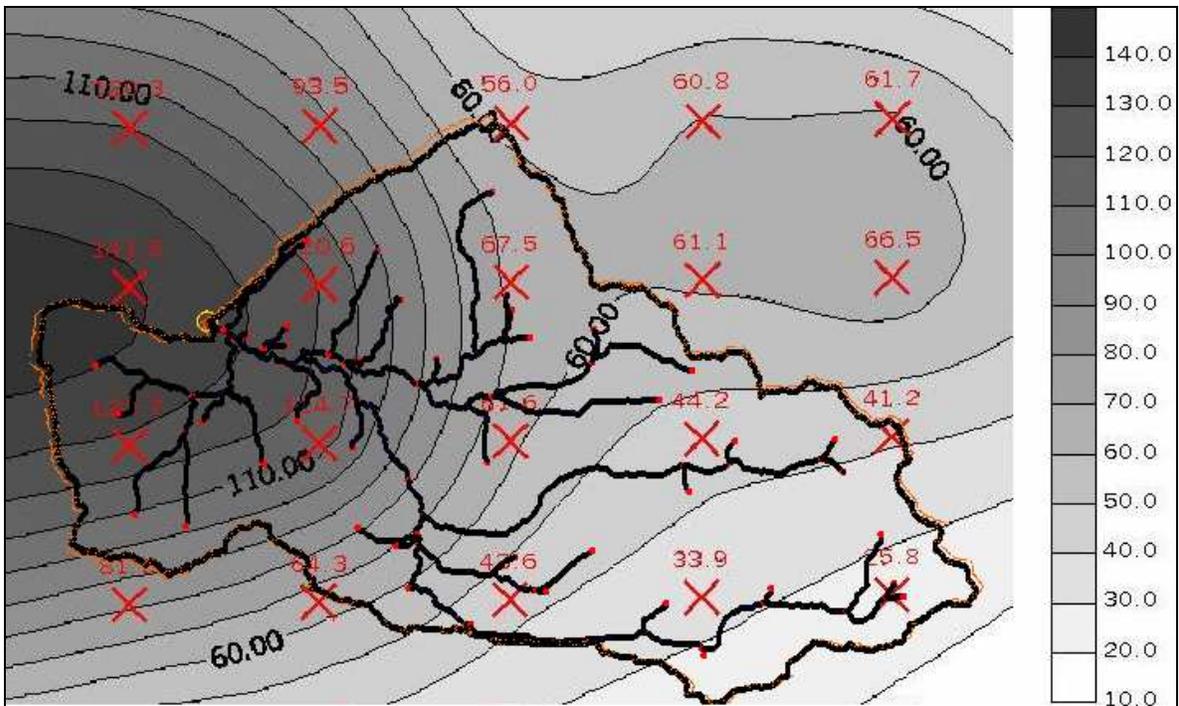


FIGURA 5.15: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 5

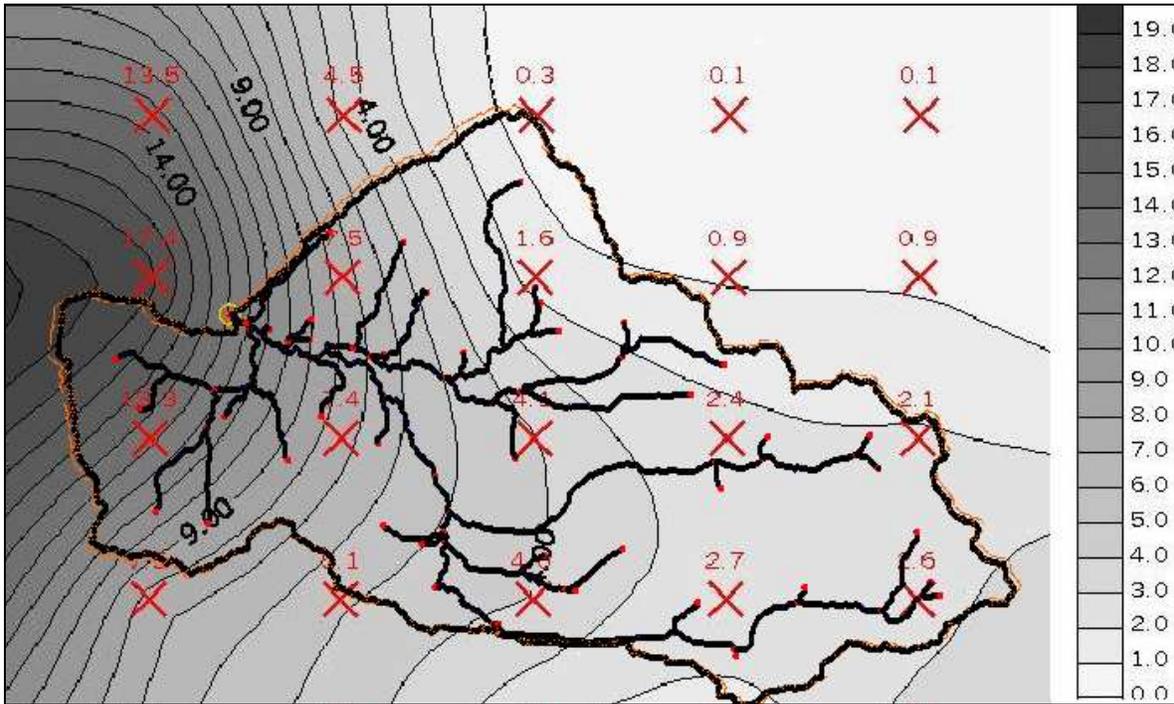


FIGURA 5.16: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 6

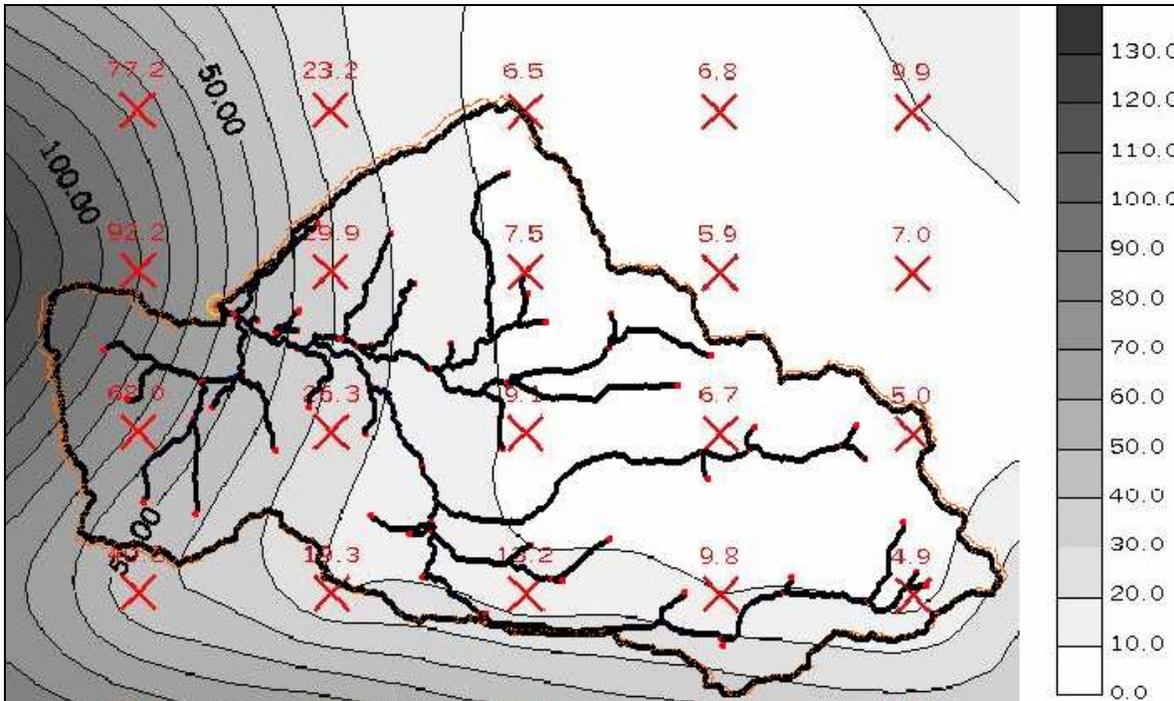


FIGURA 5.17: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 7

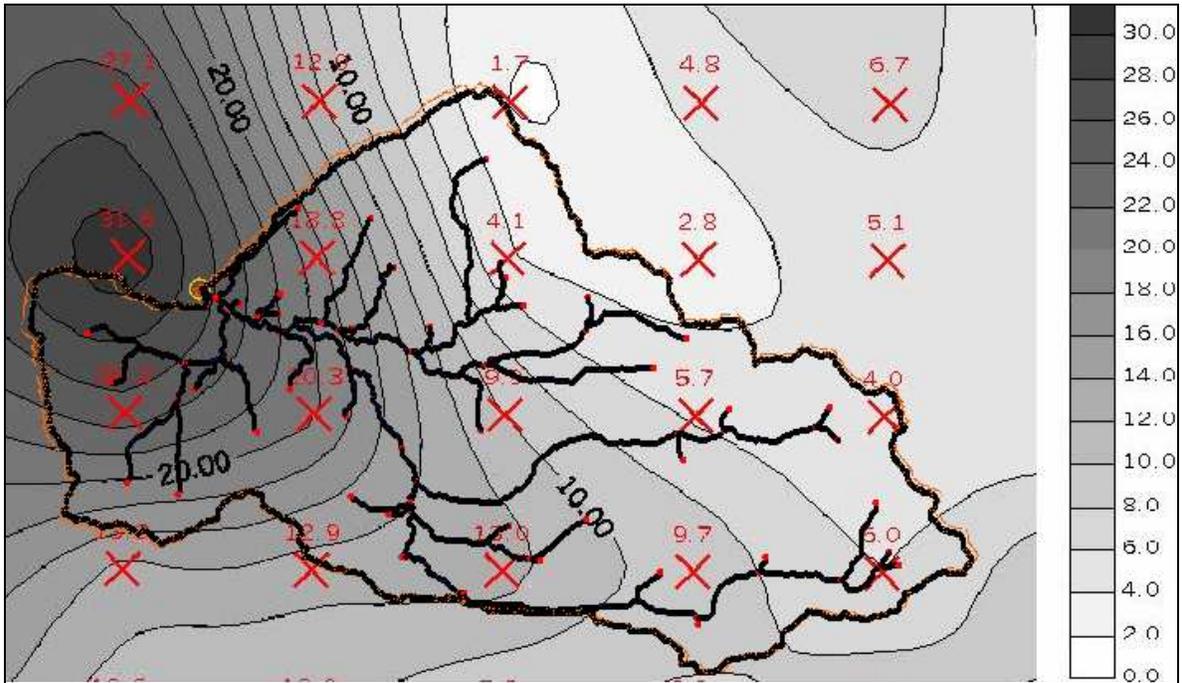


FIGURA 5.18: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 8

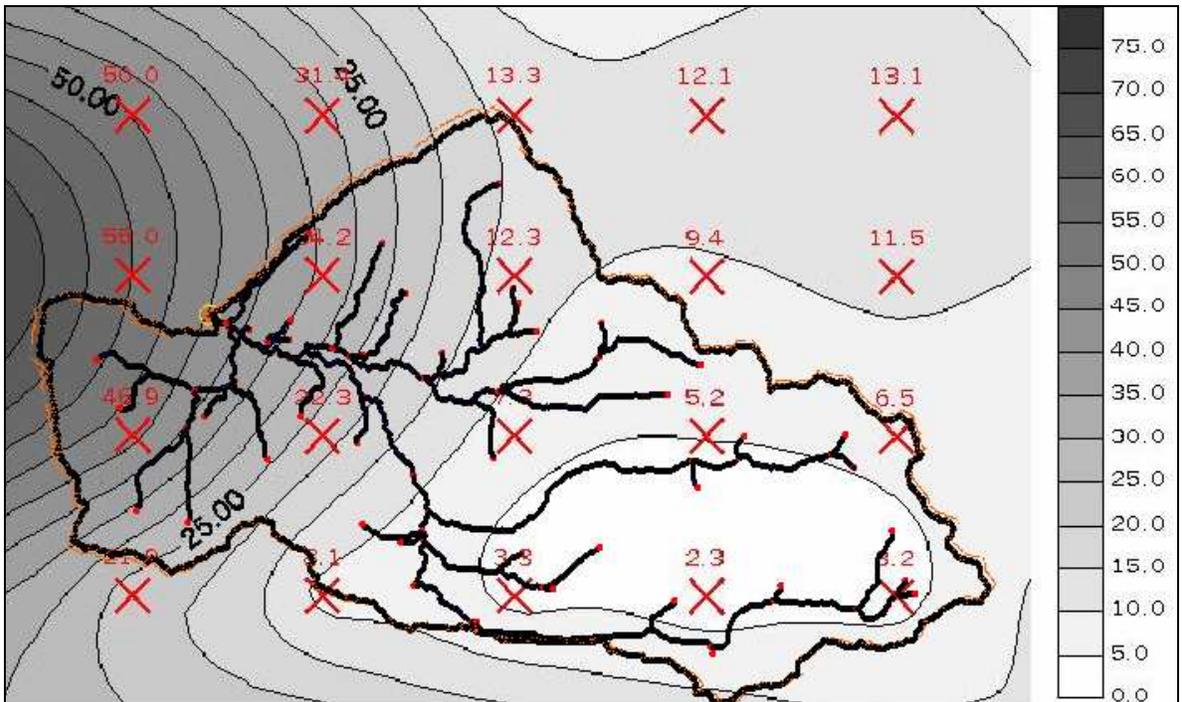
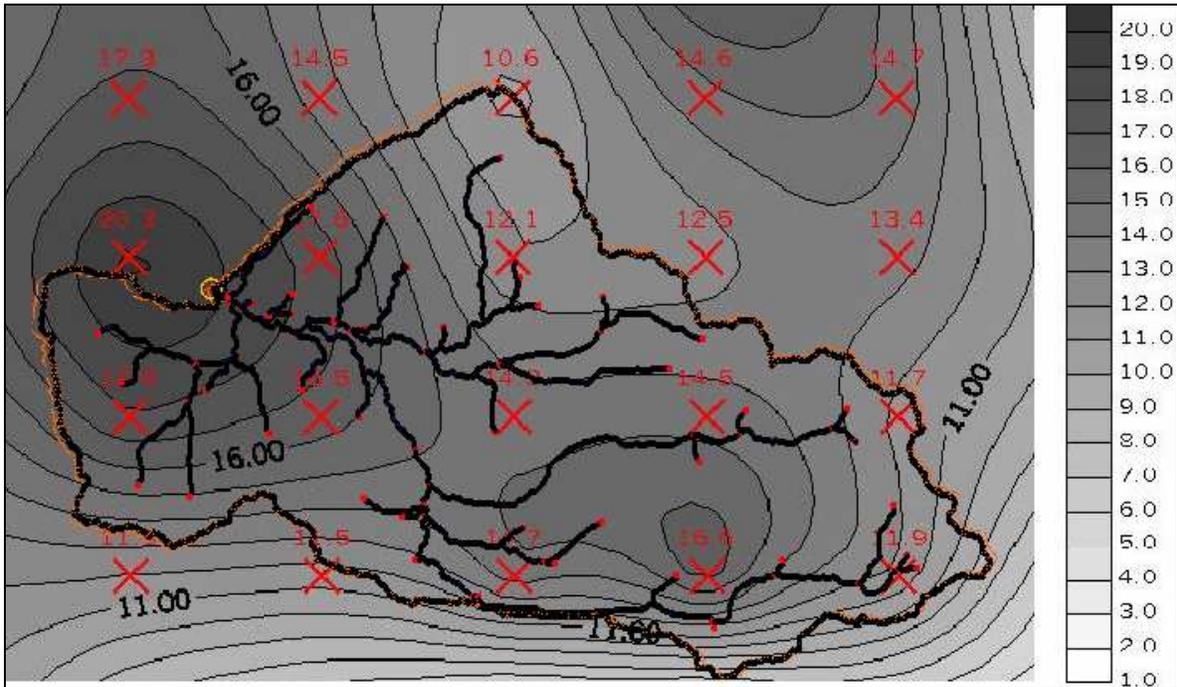


FIGURA 5.19: MAGNITUD DE PRECIPITACION - TORMENTA 9



Los valores máximos de las magnitudes de las precipitaciones en las diferentes tormentas se encuentran en lugares donde las cumbres son medianamente bajas (figura 3.13), las cuales son las que se encuentran en el sector poniente, en las proximidades de la Cordillera de la Costa, donde se encuentra la estación AVP.

Los menores valores se encuentran en la zona oriente de la cuenca, en las faldas de la Cordillera de los Andes, donde las cumbres son las más altas. Es probable que en esas alturas se tenga una temperatura bastante baja, por lo que las precipitaciones disminuirían y tendería a aparecer algún aporte nival.

6 PERÍODOS DE RETORNO DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN PARA CADA PUNTO DE LA GRILLA Y DE LOS CAUDALES DE LAS TORMENTAS

6.1 Determinación del Período de Retorno de la Precipitaciones

Para determinar el período de retorno de las precipitaciones (T_{PP}) de cada punto de la grilla del MM5, en cada tormenta del estudio, primero se reordenó la fórmula (2.12) de manera de dejar como incógnita el coeficiente de frecuencia (CF), ya que es el parámetro que está directamente asociado al T. Despejando se obtiene:

$$CF_t^T = \frac{P_t^T}{CD_t \cdot P_{24}^{10}} \quad (6.1)$$

Cada una de estas variables fue determinada paso a paso según las características que se presente en cada uno de los puntos de cálculo de la precipitación del MM5.

6.1.1 Determinación de la Precipitación Diaria Máxima de Período de Retorno de 10 años

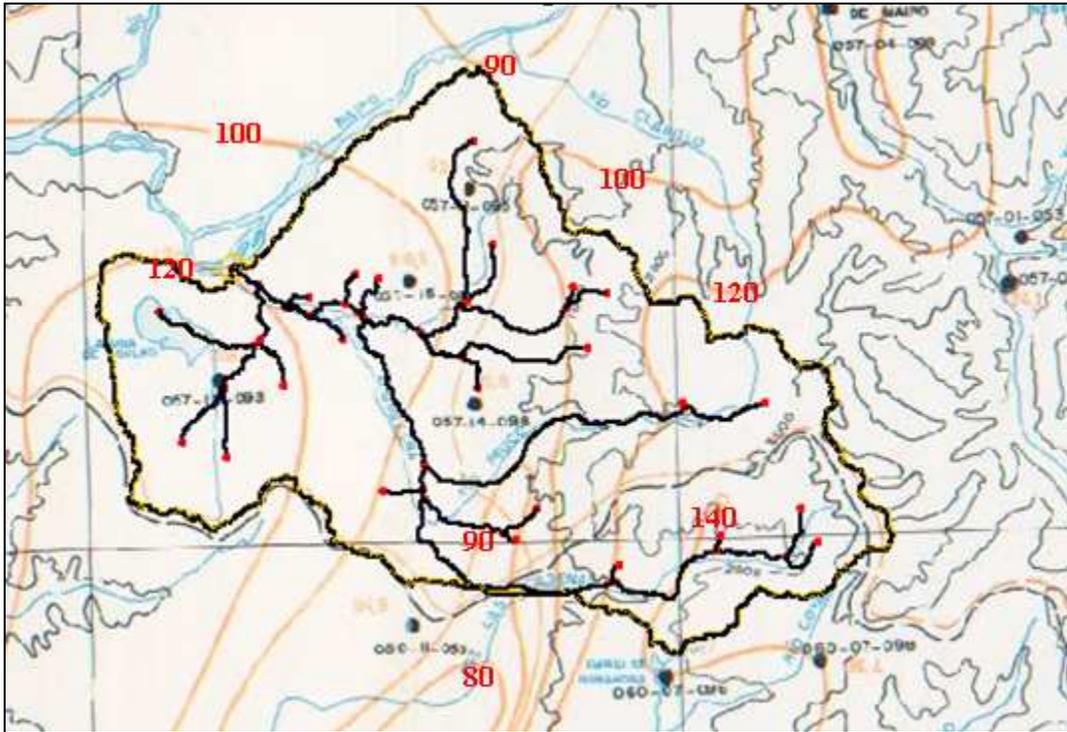
Para esta variable se utilizó el mapa de isoyetas (DGA, 1987), para la zona de estudio que se presenta a continuación en la figura 6.1.

Los valores que tienen las isoyetas (isolíneas de igual precipitación) se interpolaron de forma lineal para poder determinar así la P_{24}^{10} en cada punto de la grilla.

Este valor sólo tiene variación de punto en punto de la grilla y se mantiene constante para el análisis de todas las tormenta. Más adelante, en la tabla 6.3 se resumen los valores obtenidos para cada punto de la grilla.

La magnitud de esta variable (P_t^T) y la duración (t) quedaron determinadas por la en el capítulo anterior (valores corregidos) y se presentaron en las tablas 5.7 a 5.14.

FIGURA 6.1: MAPA DE PRECIPITACIONES MAXIMAS EN 1, 2 Y 3 DIAS



6.1.2 Coeficiente de Duración para t horas

Los Coeficientes de Duración (CD_t) disponibles para Santiago, considerados representativos en la zona de estudio, para las duraciones entre 1 y 72 horas se presentan en la tabla 6.1.

TABLA 6.1: COEFICIENTES DE DURACION

t [horas]	1	2	4	6	8	10
Santiago	0,16	0,26	0,42	0,55	0,64	0,71
t [horas]	12	14	18	24	48	72
Santiago	0,77	0,84	0,94	1,00	1,37	1,55

FUENTE: MINVU (1996) y DGA (1987)

Una vez conocida la duración de la tormenta (t) en cada punto, los CD_t para cada punto de la grilla se obtienen interpolando los de la tabla 6.1. Para valores mayores a 72 horas se extrapola el último intervalo de valores (entre 48 y 72 horas).

6.1.3 Determinación de los Períodos de Retorno de las Precipitaciones

Los Coeficientes de Frecuencia (CF^T) disponibles en Santiago, para períodos de retorno entre 2 y 200 años se presentan en la tabla 6.2.

TABLA 6.2: COEFICIENTES DE FRECUENCIA

T [años]	2	5	10	20	50	100	200
Santiago	0,55	0,82	1,00	1,18	1,43	1,63	1,83

FUENTE: MINVU (1996)

Una vez conocida el CF^T de cada punto en la tormenta, determinado con la ecuación 6.1, los valores de T_{PP} se obtienen interpolando los de la tabla 6.2.

Los valores de los P_{24}^{10} utilizados y los resultados de los T_{PP} para cada tormenta y para cada punto de la grilla se presentan en la tabla 6.3.

TABLA 6.3: PERIODOS DE RETORNO DE PRECIPITACIONES

Nodo	P_{24}^{10} [mm]	Período de Retorno de Precipitaciones [años]							
		Tormenta1	Tormenta2	Tormenta3y4	Tormenta5	Tormenta6	Tormenta7	Tormenta8	Tormenta9
11	90	1.1	3.3	1.4	0.0	0.2	0.1	0.3	0.4
17	108	3.5	19.9	2.9	0.3	0.7	0.4	0.8	0.5
18	94	1.3	3.8	1.5	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4
23	138	1.9	16.1	1.8	0.4	1.2	0.4	0.8	0.4
24	118	1.9	11.4	2.1	0.3	0.6	0.4	0.5	0.4
25	94	1.4	2.4	1.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.5
26	121	0.9	1.3	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
27	124	0.8	1.3	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
32	88	1.3	1.7	1.0	0.2	0.4	0.4	0.1	0.5
33	132	0.7	0.9	0.5	0.1	0.2	0.2	0.0	0.4
34	128	0.6	0.7	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3

Como se puede observar en la tabla 6.3, las tormentas de menor magnitud (5, 6, 7, 8 y 9) presentan resultados de T_{PP} bastante bajos debido a los valores de las P_{24}^{10} para esta zona (del orden de 100 mm.). En cambio para la tormenta 2, que es la de mayor magnitud, se obtienen los mayores T_{PP} , siendo los superiores los nodos 17 y 23.

Los valores intermedios para el cálculo los valores de la tabla 6.3 se encuentran en el Anexo E.

6.2 Determinación del Período de Retorno de los Caudales en cada Tormenta

Al igual que para la variable de precipitación, el caudal también tiene un período de retorno asociado, el cual para efectos de los diseños de obras de ingeniería hidráulica llevará su representación dado el máximo en algún intervalo de tiempo que sea deseado, como por ejemplo, a nivel instantáneo.

La determinación de los períodos de retorno para los caudales máximos en la cuenca se realiza mediante una herramienta conocida como análisis de frecuencia, la cual utiliza los registros históricos de estaciones representativas de la zona.

Para efectos de esta tesis los valores necesarios para el análisis tratan del punto de salida de la cuenca, lugar donde se encuentra la estación de medición *Angostura en Valdivia de Paine*, por lo que los datos serán los de esta estación.

6.2.1 Análisis de Frecuencia

6.2.1.1 Aplicación de REGBAY

Existe una gran cantidad de paquetes computacionales que realizan un análisis de frecuencia comparando las distribuciones de probabilidad más conocidas y aplicadas en este tipo de análisis. Una de estas herramientas es REGBAY la cual analiza las distribuciones más utilizadas en el campo hidrológico determinando sus parámetros de importancia. Además realiza las pruebas de bondad de ajuste para determinar cual de las distribuciones es la más representativa de los datos de la variable hidrológica.

Las distribuciones que incluye este software son:

- Distribución Normal
- Distribución LogNormal
- Distribución Gumbel
- Distribución Pearson tipo III
- Distribución LogPearson tipo III
- Distribución de Valor Extremo Generalizada

Una vez analizadas las diferentes distribuciones de probabilidad, este software entrega dos criterios de selección de distribución:

- Criterio de Probabilidad Posterior
- Coeficiente de Determinación R^2

Ambos serán analizados para la determinación de cual o cuales son las distribuciones que se ajustan a la información entregada.

6.2.1.2 Registros Históricos de Caudales

Para realizar el análisis de frecuencia se necesita una fuente de información lo más extensa posible, para ello se cuenta con los registros históricos de caudal instantáneo que se obtuvieron de la estación de medición *Angostura en Valdivia de Paine* que pertenece a la DGA, la cual presenta un registro completo desde Junio de 1981 hasta Septiembre del 2006.

Los datos se trabajaron en función del año hidrológico abril – marzo como es costumbre, para la zona central de Chile, en la realización de trabajos que tienen como variables la precipitación o el caudal. Los valores se presentan en la tabla 6.4.

TABLA 6.4: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTANEOS – ESTACIÓN ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Max. Inst.
1981 / 1982	---	---	62,8	33,0	19,4	21,8	27,5	23,8	16,8	14,7	15,9	15,9	62,8
1982 / 1983	15,0	101,0	722,2	535,7	130,8	95,0	63,2	52,2	64,5	51,3	36,9	31,4	722,2
1983 / 1984	26,2	26,1	99,8	136,0	32,9	31,6	33,8	35,0	28,0	25,0	21,4	23,3	136,0
1984 / 1985	20,2	29,0	18,5	515,4	67,9	53,8	60,3	50,1	43,4	30,9	29,3	34,4	515,4
1985 / 1986	34,8	20,6	20,0	23,5	15,5	19,1	21,4	17,4	19,2	15,5	18,4	18,3	34,8
1986 / 1987	28,2	268,6	610,6	34,1	282,6	42,1	38,2	53,8	40,3	25,1	27,0	27,8	610,6
1987 / 1988	27,8	43,0	70,5	622,1	634,7	73,1	85,5	73,7	67,0	48,1	32,1	33,2	634,7
1988 / 1989	30,4	24,0	22,2	23,2	59,8	17,2	14,3	20,8	20,8	18,9	19,9	18,1	59,8
1989 / 1990	20,2	19,2	18,1	96,0	331,6	32,9	36,0	32,7	29,2	24,8	23,8	26,2	331,6
1990 / 1991	17,9	15,1	14,8	22,8	22,0	18,4	15,2	22,4	23,0	18,7	14,8	16,7	23,0
1991 / 1992	21,1	189,6	299,8	285,1	29,0	73,7	29,8	39,9	71,3	38,9	41,1	38,2	299,8
1992 / 1993	30,0	271,8	242,4	63,6	88,8	62,2	41,3	45,3	29,4	25,9	25,8	26,4	271,8
1993 / 1994	98,5	588,5	420,4	283,5	39,9	31,0	38,2	34,8	31,5	26,0	25,4	28,3	588,5
1994 / 1995	30,1	66,5	32,2	226,5	34,0	36,2	32,5	37,8	31,9	24,0	26,3	23,8	226,5
1995 / 1996	25,2	23,2	44,2	81,4	104,9	30,6	23,3	31,3	25,8	24,5	18,2	19,9	104,9
1996 / 1997	24,5	15,3	26,4	21,1	19,6	13,8	3,7	3,7	3,8	4,1	4,4	6,0	26,4
1997 / 1998	8,0	127,3	408,0	171,0	445,7	444,5	73,2	53,9	53,9	36,8	27,4	26,7	445,7
1998 / 1999	29,4	22,1	25,9	18,1	15,6	16,4	10,9	10,1	7,0	6,9	10,6	13,9	29,4
1999 / 2000	13,2	24,1	32,1	20,7	49,6	73,7	27,9	29,2	17,5	16,4	17,8	13,1	73,7
2000 / 2001	14,2	13,2	65,0	137,3	30,9	206,2	47,4	45,5	42,3	25,0	20,3	21,4	206,2
2001 / 2002	20,8	21,3	17,8	905,7	178,5	34,0	35,6	38,1	33,1	22,6	21,3	19,8	905,7
2002 / 2003	18,6	286,0	206,4	527,9	691,1	78,9	52,9	61,6	41,3	43,5	29,9	30,3	691,1
2003 / 2004	26,5	94,5	115,8	114,2	18,9	23,6	25,5	40,8	24,4	23,1	20,0	19,3	115,8
2004 / 2005	41,1	16,1	24,9	96,1	109,1	44,2	20,8	102,5	20,8	29,5	17,8	15,3	109,1
2005 / 2006	12,4	22,5	917,0	258,4	900,8	65,9	43,5	49,4	37,8	31,8	27,6	26,8	917,0
2006 / 2007	24,0	27,6	98,6	310,0	75,0	40,8	---	---	---	---	---	---	310,0

Los datos para el análisis de frecuencia se realizaron para los máximos instantáneos anuales (columna de la derecha de la tabla 6.4), desde el período 1982/1983 hasta el 2005/2006 debido a que los otros no presentan información completa en lo que respecta al año hidrológico.

6.2.1.3 Ajuste y Selección de la Distribución de Probabilidad

De estos resultados los criterios de selección arrojaron los resultados que se aprecian en la tabla 6.5.

TABLA 6.5: CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MODELOS

Criterio	Normal	LogNormal	Gumbel	LogPearson III	Pearson III	GVE
R ²	0,908377	0,406495	0,953128	0,746847	0,947172	0,844992
P [y/Mi]	8,05678 E-47	2,03226 E-44	1,61845 E-43	1,61061 E-42	4,57986 E-44	1,88681 E-49

La distribución seleccionada será Gumbel y quedará determinada por los parámetros de la media (μ) y la desviación estándar (σ) (tabla 6.6).

TABLA 6.6: PARAMETROS – GUMBEL

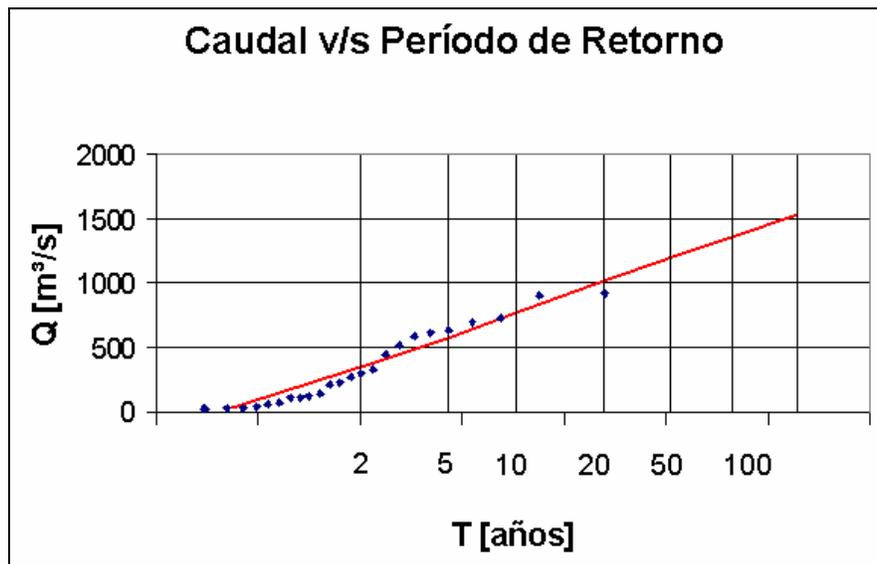
Parámetros	Gumbel
μ_x [m ³ /s]	336,6
σ_x [m ³ /s]	285,3

Así la ecuación que determina el caudal asociado al período de retorno según la distribución Gumbel es:

$$Q_T = \mu + K_T \cdot \sigma \rightarrow Q_T = 336,6 + 285,3 \cdot K_T \quad (6.2)$$

A continuación, en la figura 6.2 se presenta el ajuste de la distribución Gumbel a los datos disponibles.

FIGURA 6.2: ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS



6.2.2 Obtención de los Períodos de Retorno de Caudales para cada Tormenta

6.2.2.1 Generalidades

De la estación *Angostura en Valdivia de Paine* perteneciente a la DGA se obtuvo los hidrogramas de salida para cada una de las tormentas seleccionadas, por lo que fue posible determinar el período de retorno asociado al caudal máximo instantáneo registrado. Para esto se utilizó la mencionada información, además de los resultados obtenidos en el punto anterior.

6.2.2.2 Determinación de los Caudales Máximos de las Tormentas y Parámetros Generales

Algunas de las tormentas se encuentran juntas temporalmente, por lo que los hidrogramas que se generan se superponen. Esto no deja alcanzar el flujo base entre 2 tormentas. Dado esta situación no se puede determinar directamente de los hidrogramas los valores máximos de los caudales (Q_{MAX}), ya que estos se ven influenciados por la tormenta anterior.

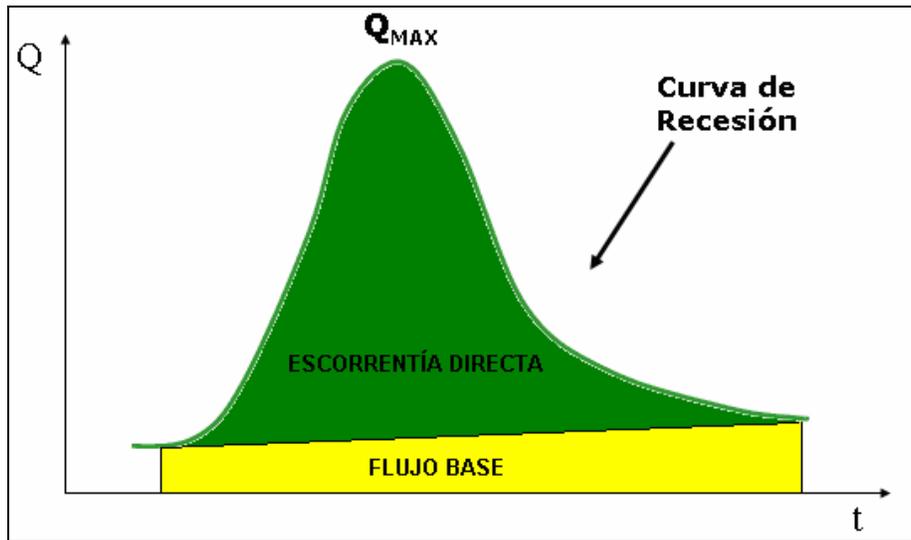
Para los hidrogramas que no alcanzan la curva de recesión en forma completa se extrapolaron los datos mediante la Curva Maestra de Recesión de Horton (1933), donde concluye que la que la recesión de los caudales comienza cuando forma un decaimiento exponencial (Chow, 1994).

Para la correcta determinación de los Q_{MAX} es necesario también determinar el flujo base, el cual se calculó mediante la utilización de la Línea Recta Inclinada (Chow, 1994) como se muestra en la figura 6.3.

Así se tienen los hidrogramas en forma independiente para su mejor manejo y una correcta utilización en la determinación de los T_Q .

Además se determinaron los hidrogramas de escorrentía directa para cada tormenta, el volumen total de agua generado por la tormenta y el tiempo en que se produjo el Q_{MAX} (t_{PEAK}), lo que ayuda al análisis de datos en los capítulos posteriores.

FIGURA 6.3: CURVA DE RECESIÓN Y FLUJO BASE



6.2.2.3 Determinación de los Períodos de Retorno de los Caudales

El factor de frecuencia de Gumbel tiene una expresión teórica que no hay que ajustar, y depende del número de datos usados (n) en el ajuste.

$$K_T = \frac{y_T - \bar{y}_n}{\sigma_n} \quad ; \quad y_T = -Ln\left(Ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \quad (6.3)$$

TABLA 6.7: PARÁMETROS PARA MUESTRAS PEQUEÑAS DE LA DISTRIBUCIÓN GUMBEL (CHOW, 1994)

n	y_n	σ_n	n	y_n	σ_n
10	0,4952	0,9496	60	0,5521	1,1747
15	0,5128	1,0206	65	0,5535	1,1803
20	0,5236	1,0628	70	0,5548	1,1854
25	0,5309	1,0914	75	0,5559	1,1898
30	0,5362	1,1124	80	0,5569	1,1938
35	0,5403	1,1285	85	0,5578	1,1974
40	0,5436	1,1413	90	0,5586	1,2007
45	0,5463	1,1518	95	0,5593	1,2037
50	0,5485	1,1607	100	0,5600	1,2065
55	0,5504	1,1682			

Como el número de datos utilizados fue de 24, los valores de los parámetros y_n y σ_n se interpolaron de la tabla 6.7, determinando así los valores de la tabla 6.8.

TABLA 6.8: PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN GUMBEL PARA 24 DATOS

n	y_n	σ_n
24	0,5294	1,0857

Con esto el T_Q para cada tormenta quedó determinado por la combinación de las ecuaciones 6.2 y 6.3.

$$T_Q = \frac{C}{C-1} \quad ; \quad C = \exp(\exp-(K_T \cdot \sigma_n + y_n)) \quad ; \quad K_T = \frac{Q_T - 336,6}{285,3} \quad (6.4)$$

6.2.2.4 Resultados

Los pares de tormentas que tuvieron el problema de superposición fueron los de las tormentas 3 y 4 con 5, y tormentas 8 con 9.

La tormenta 3 y 4 influye sobre la tormenta 5 y viceversa, por lo que en este caso se independizaron los hidrogramas. Primero se analizó el flujo base de la tormenta 3 y 4 determinando que había empezado con un flujo de 23,52 m³/s, este caudal fue el mismo que se le impuso al inicio de la tormenta 5 para luego aumentar según las proporciones que los datos entregan.

En el segundo par (8 y 9), también se independizaron los hidrogramas. El flujo base de la tormenta 8 empezó con un flujo de 45,14 m³/s, este caudal fue el mismo que se le impuso al inicio de la tormenta 9 para luego aumentar según las proporciones que los datos entregan.

Los hidrogramas de escorrentía total y escorrentía directa independizados se muestran en los gráficos 6.4 a 6.11.

FIGURA 6.4: HIDROGRAMA – TORMENTA 1

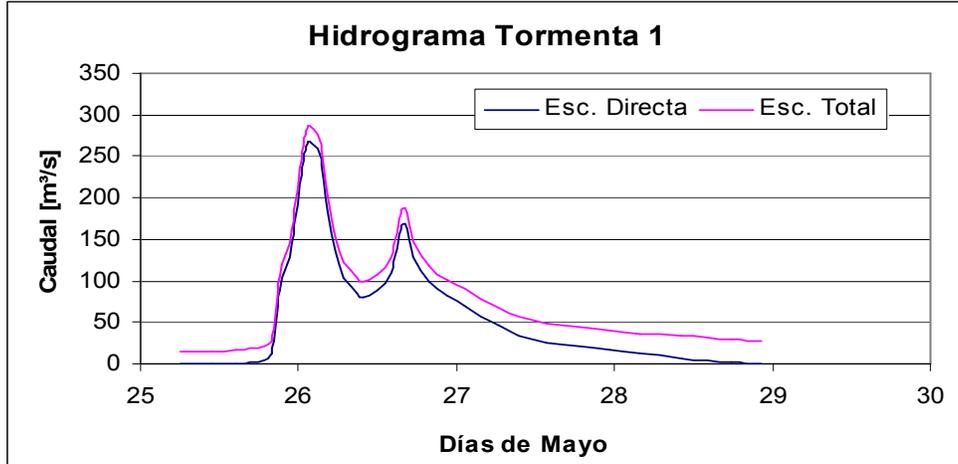


FIGURA 6.5: HIDROGRAMA – TORMENTA 2

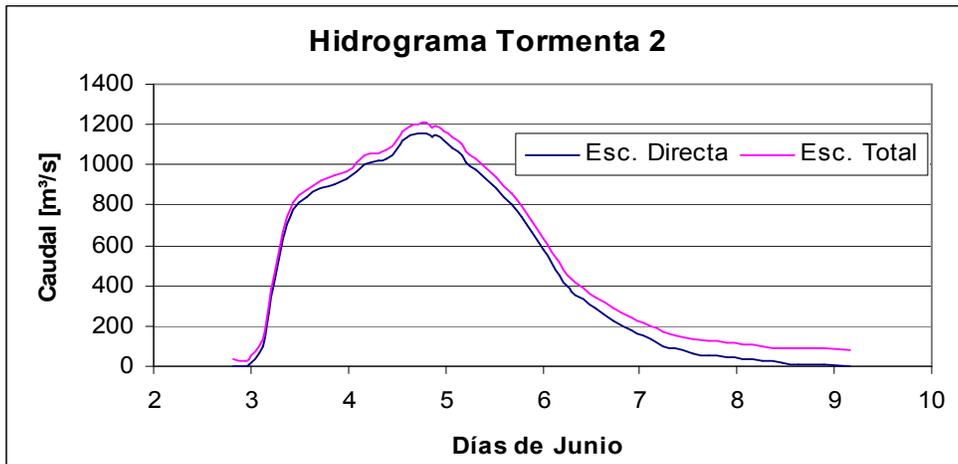


FIGURA 6.6: HIDROGRAMA – TORMENTA 3 Y 4

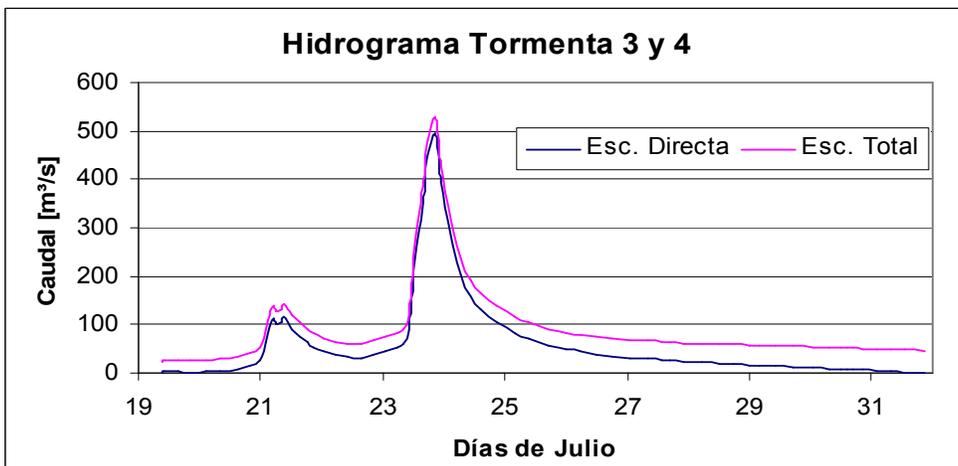


FIGURA 6.7: HIDROGRAMA – TORMENTA 5

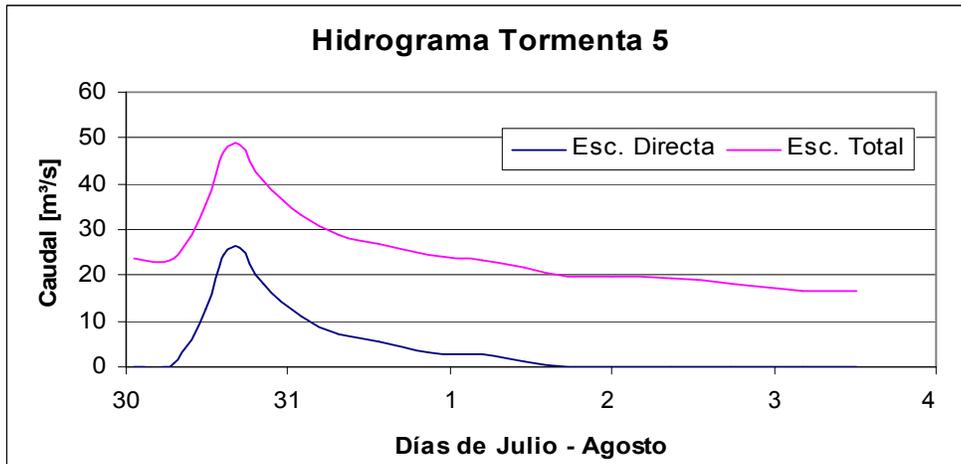


FIGURA 6.8: HIDROGRAMA – TORMENTA 6

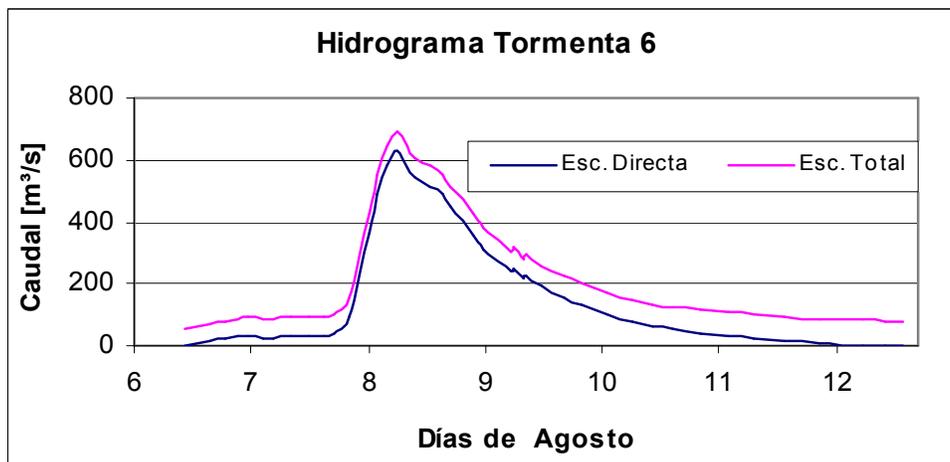


FIGURA 6.9: HIDROGRAMA – TORMENTA 7

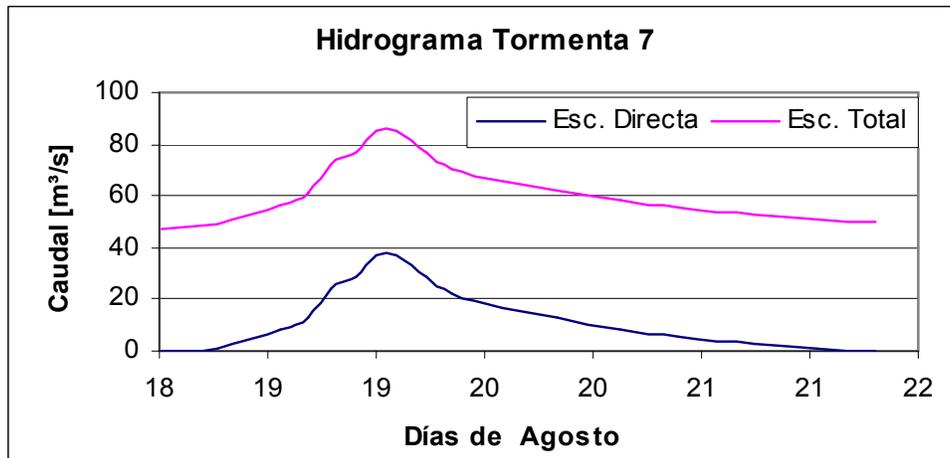


FIGURA 6.10: HIDROGRAMA – TORMENTA 8

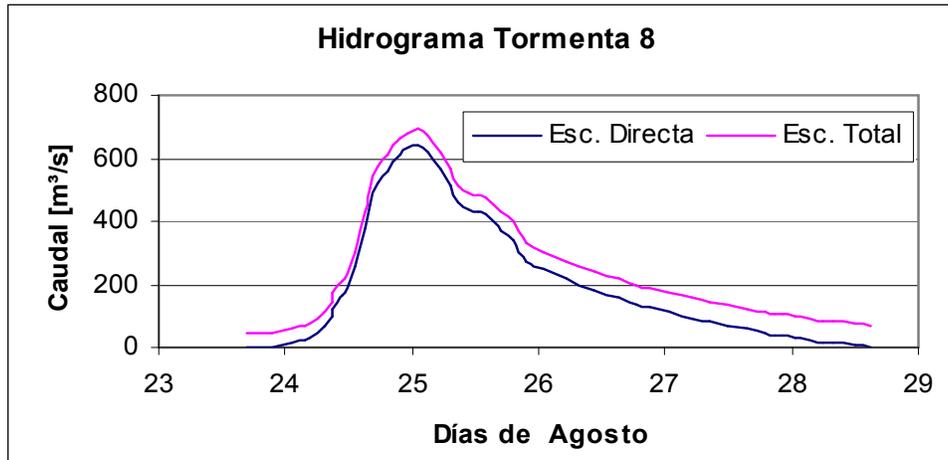
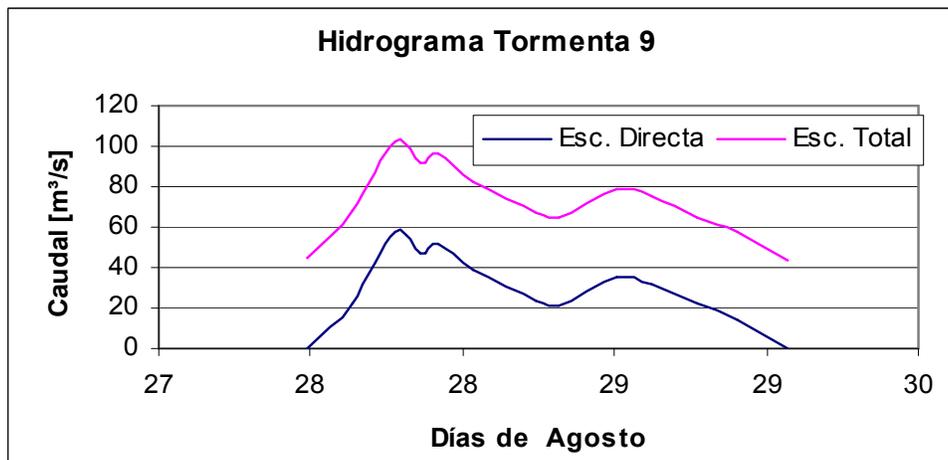


FIGURA 6.11: HIDROGRAMA – TORMENTA 9



El resumen de los parámetros se detalla en la tabla 6.9.

TABLA 6.9: RESUMEN PARÁMETROS HIDROGRAMAS

Parámetro	Tormenta 1		Tormenta 2		Tormenta 3 y 4		Tormenta 5	
	Esc. Total	Esc. Directa	Esc. Total	Esc. Directa	Esc. Total	Esc. Directa	Esc. Total	Esc. Directa
Q_{PEAK} [m^3/s]	286	268,6	1206,4	1158,8	527,9	496,2	48,6	26,0
t_{TOTAL} [hrs]	88,32	88,32	151,92	151,92	299,07	299,07	107,28	107,28
t_{PEAK} [hrs]	19,73	19,73	47,28	47,28	106,90	106,90	15,62	15,62
Vol. Acumulado [MMm^3]	23,5	16,8	292,4	261,1	98,2	60,6	9,5	1,7

Parámetro	Tormenta 6		Tormenta 7		Tormenta 8		Tormenta 9	
	Esc. Total	Esc. Directa						
Q_{PEAK} [m^3/s]	688,7	625,4	85,4	37,1	691,1	639,5	102,2	57,4
t_{TOTAL} [hrs]	147,3	147,3	79,07	79,07	118,1	118,1	37,88	37,88
t_{PEAK} [hrs]	43,43	43,43	23,77	23,77	32,18	32,18	7,00	7,00
Vol. Acumulado [MMm^3]	434,4	289,6	17,2	3,2	99,3	81,5	9,9	3,8

Con los hidrogramas independientes los valores de los períodos de retorno se aprecian en la tabla 6.10.

TABLA 6.10: PERÍODO DE RETORNO DE CADA TORMENTA

Tormentas	Qmax [m ³ /s]	K _T	T _Q [años]
1	286,0	-0,18	2,0
2	1206,4	3,05	47,0
3 y 4	527,9	0,67	4,0
5	48,6	-1,01	1,2
6	688,7	1,23	7,0
7	85,4	-0,88	1,3
8	691,1	1,24	7,1
9	102,2	-0,82	1,3

De la tabla 6.10, en conjunto con la tabla 6.3, se puede confirmar la importancia que tiene la duración de la tormenta y las condiciones iniciales de la cuenca sobre la magnitud de las precipitaciones. Esto se refleja en que siendo las menores magnitudes de precipitación aquellas de las tormentas 5 a la 9, los menores caudales máximos se encuentran en las tormentas 1, 5, 7 y 9, dejando en nivel medio a las tormentas 6 y 8, que incluso sobrepasan la 3 y 4.

La tormenta 1 es la primera que se produjo el año 2002, en el mes de mayo, por lo que las condiciones iniciales del terreno eran mucho más secas que en el resto de las tormentas.

La tormenta 3 y 4 tiene 132 mm. caídos en unas 98 horas en promedio, en cambio las tormentas 6 y 8, de 64,2 mm. y 45 mm. respectivamente, lo hacen entre 50 y 60 horas, por lo que el Q_{MAX} es mayor.

7 RELACIONES DE MAGNITUD Y PERÍODOS DE RETORNO, DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES

7.1 Relación Períodos de Retorno: Precipitaciones – Caudal

Tal como se puede apreciar en la tabla 7.1 los valores de los períodos de retorno de las precipitaciones y los caudales son muy diferentes. Esto se debe a que la distribución espacial y la magnitud de la lluvia no son las únicas variables que inciden pues las condiciones iniciales y la duración de las tormentas son variables que también se deben considerar.

TABLA 7.1: PERÍODO DE RETORNO DE LAS PRECIPITACIONES PARA CADA PUNTO DE LA GRILLA MM5 Y PARA CADA TORMENTA

Nodo	Tormenta 1		Tormenta 2		Tormenta 3		Tormenta 5	
	Dur. [hrs]	T _{PP} [años]	Dur. [hrs]	T _{PP} [años]	Dur. [hrs]	T _{PP} [años]	Dur. [hrs]	T _{PP} [años]
11	58,4	1,1	100,0	3,3	85,3	1,4	4,4	0,0
17	61,6	3,5	103,7	19,9	101,4	2,9	19,3	0,3
18	60,0	1,3	100,7	3,8	94,8	1,5	12,3	0,1
23	81,1	1,9	104,4	16,1	108,1	1,8	21,0	0,4
24	64,9	1,9	102,2	11,4	98,6	2,1	16,6	0,3
25	63,2	1,4	99,2	2,4	96,7	1,4	14,0	0,2
26	64,9	0,9	97,7	1,3	98,6	0,8	10,5	0,1
27	61,6	0,8	100,0	1,3	98,6	0,7	7,0	0,1
32	64,9	1,3	96,3	1,7	97,6	1,0	14,0	0,2
33	66,5	0,7	96,3	0,9	96,7	0,5	14,0	0,1
34	66,5	0,6	96,3	0,7	97,6	0,4	7,0	0,1
T_Q [años]	2,0		47,0		4,0		1,2	

Nodo	Tormenta 6		Tormenta 7		Tormenta 8		Tormenta 9	
	Dur. [hrs]	T _{PP} [años]						
11	50,2	0,2	34,5	0,1	73,4	0,3	32,2	0,4
17	59,2	0,7	62,6	0,4	67,8	0,8	36,4	0,5
18	48,4	0,2	38,8	0,1	65,9	0,3	28,0	0,4
23	62,8	1,2	62,6	0,4	67,8	0,8	35,0	0,4
24	59,2	0,6	58,3	0,4	65,9	0,5	35,0	0,4
25	55,6	0,2	43,2	0,3	62,1	0,2	30,8	0,5
26	57,4	0,1	41,0	0,1	47,1	0,1	30,8	0,4
27	55,6	0,1	32,4	0,1	45,2	0,1	30,8	0,3
32	61,0	0,4	47,5	0,4	41,4	0,1	32,2	0,5
33	57,4	0,2	41,0	0,2	41,4	0,0	32,2	0,4
34	55,6	0,1	38,8	0,1	37,6	0,1	32,2	0,3
T_Q [años]	7,0		1,3		7,1		1,3	

Los valores de los T_{PP} de cada nodo corresponden a la duración total de la tormenta en cada uno de ellos, ya que fueron los mejores resultados obtenidos. Es conveniente destacar que se analizó también los períodos de retorno para las máximas precipitaciones registradas en espacios de tiempo de 2, 12 y 24 horas.

7.1.1 Relaciones Estadísticas

Se utilizaron diferentes funciones matemáticas y estadísticas para determinar la mejor de las relaciones entre los períodos de retorno de los caudales y las precipitaciones para cada tormenta. Las relaciones consideradas fueron las siguientes:

- Mínimo
- Máximo
- Media Aritmética (Promedio)
- Media Armónica
- Media Geométrica
- Mediana
- Moda

7.1.2 Metodología y Resultados

Para los valores de los períodos de retorno de las precipitaciones de cada tormenta se determinaron los parámetros antes señalados, y se analizó si existía alguna relación con el valor del período de retorno del caudal, ya sea directa o mediante algún factor de corrección o línea de tendencia calculada mediante Excel, por lo que se tiene la ecuación:

$$T_{Q,i} = a \cdot T_{Pp,j,i} + b \quad (7.1)$$

Donde:

- $T_{Q,i}$: Período de Retorno del Caudal Máximo en la Tormenta i
- $T_{Pp,j,i}$: Período de Retorno de las Precipitaciones calculado mediante la función j, en la Tormenta i
- a,b : Factores lineales

Los resultados del análisis se observan en la tabla 7.2.

TABLA 7.2: CORRELACIONES DE PERIODOS DE RETORNO

Función Matemática	T _{PP} [años] – Tormenta									R ²
	1	2	3	5	6	7	8	9		
Máximo	3,5	19,9	2,9	0,4	1,2	0,4	0,8	0,5	0,948	
Mínimo	0,6	0,7	0,4	0,0	0,1	0,1	0,0	0,3	0,402	
Media Aritmética	1,4	5,7	1,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,906	
Media Armónica	1,1	1,9	1,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4	0,613	
Media Geométrica	1,2	3,1	1,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,782	
Moda	----	----	----	----	----	----	----	----	----	
Mediana	1,3	2,4	1,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,607	
T_Q [años]	2	47	4	2	7	2	8	2		

Dentro de los resultados de la tabla 7.2 se puede observar que la correlación de la función Máximo es la más cercana a 1, por lo que la ecuación que gobierna la relación de los T_Q y T_{PP} es:

$$T_Q = 2,287 \cdot MÁXIMO_{T_{PP}} + 0,386 \quad (7.2)$$

Alternativamente se analizó la posibilidad de tener como ecuación de relación de períodos de retorno la utilización del promedio. Esta segunda opción de cálculo de T_Q tiene la siguiente forma:

$$T_Q = 7,935 \cdot PROMEDIO_{T_{PP}} - 0,987 \quad (7.3)$$

Los gráficos de las funciones seleccionadas se aprecian en las figuras 7.1 y 7.2.

FIGURA 7.1: T_{PP} MÁXIMOS

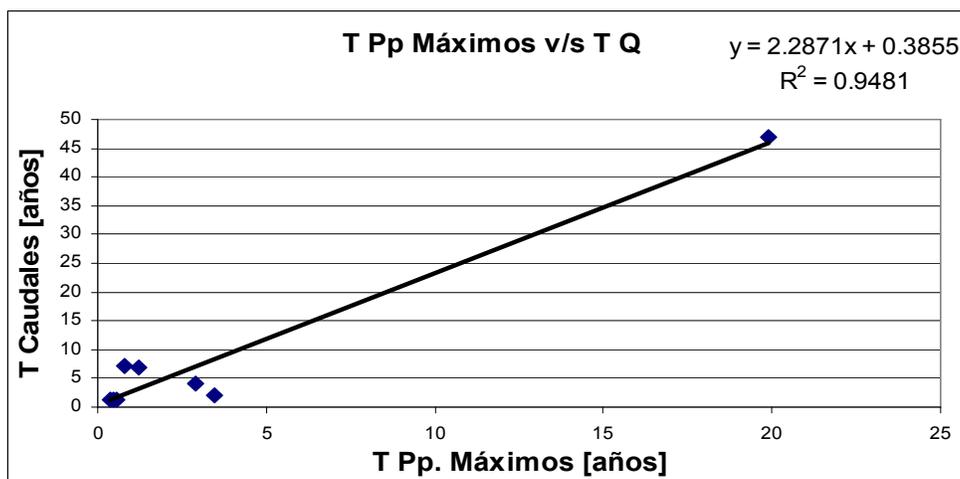
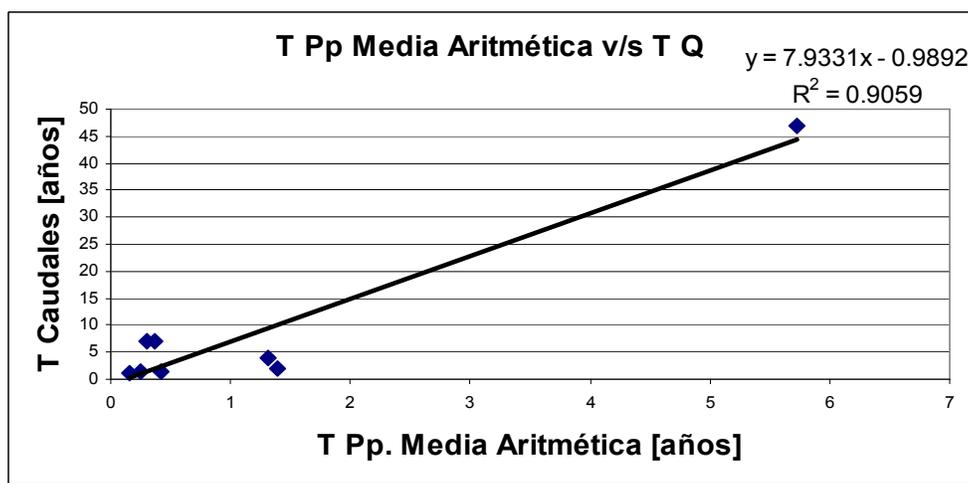


FIGURA 7.2: T_{PP} MEDIA ARITMÉTICA



Los gráficos de las funciones no consideradas se aprecian en el Anexo F.1.

7.2 Distribución Espacial de Precipitaciones

Se pretende establecer distintas relaciones entre la magnitud de la precipitación registrada en la estación existente en la salida de la cuenca y los valores correspondientes en los puntos de la grilla seleccionada del MM5. De esta manera sería factible simular la distribución espacial de una tormenta conociendo sólo el valor registrado en la estación de medición.

Los valores de magnitud, precipitación acumulada durante la tormenta, para los puntos de la grilla MM5 y los de la salida de la cuenca se presentan en la tabla 7.3.

TABLA 7.3: PRECIPITACION PARA CADA TORMENTA

Nodo	Precipitación Acumulada (mm) - Tormentas							
	1	2	3 y 4	5	6	7	8	9
11	38,3	105,3	56,0	0,3	6,4	1,7	13,2	10,6
17	108,5	227,4	120,6	7,5	29,9	18,7	34,2	17,6
18	50,2	118,4	67,4	1,6	7,5	4,1	12,3	12,0
23	114,1	274,6	127,6	13,3	68,0	25,2	46,8	17,9
24	93,1	214,8	114,7	7,4	26,3	20,3	22,2	16,5
25	53,1	97,0	61,5	4,1	9,1	9,9	7,2	14,3
26	44,7	77,7	44,1	2,4	6,6	5,7	5,0	14,5
27	38,0	79,2	41,1	2,1	5,0	4,0	6,4	11,6
32	45,8	71,1	43,6	4,0	13,2	12,9	3,2	14,7
33	38,5	57,8	33,8	2,7	9,7	9,7	2,3	16,6
34	31,5	45,5	25,8	2,6	4,9	6,0	3,2	11,9
Estación	126,8	287,8	132,0	13,0	64,2	26,0	45,0	19,0

Las diferencias de las magnitudes de las precipitaciones se aprecian claramente en la tabla 7.3. En las primeras 3 tormentas se nota una diferencia importante entre los distintos nodos, en cambio en la 9 se tiene una variación mucho menor, lo que sigue recalcando las diferencias que existe en los pasos de las distintas tormentas.

7.2.1 Metodología y resultados

Los valores de las magnitudes de precipitación se analizaron gráficamente determinando si existe alguna correlación lineal entre ellas, para ello se analizó los puntos seleccionados de la grilla MM5 con los valores en la salida de la cuenca. Los resultados tendrán la forma:

$$Pp_{i,j} = a \cdot Pp_{estación,i} + b \quad (7.4)$$

Donde:

- $Pp_{i,j}$: Precipitación acumulada para la tormenta i en el punto j de la grilla
- $Pp_{est,i}$: Precipitación acumulada para la tormenta i en la estación de medición.

a y b : Coeficiente Lineales

Las ecuaciones que se obtuvieron de las correlaciones de las magnitudes de las precipitaciones de los nodos (P_i) versus la magnitud de la precipitación de la estación de medición (P_E) se muestran en la tabla 7.4.

TABLA 7.4: ECUACIONES – RELACIÓN DE MAGNITUD DE PRECIPITACION

<i>Nodo 11:</i>	$P_{11} = 0,385 \cdot P_E - 5,4$	$R^2 = 0,958$
<i>Nodo 17:</i>	$P_{17} = 0,819 \cdot P_E - 2,5$	$R^2 = 0,982$
<i>Nodo 18:</i>	$P_{18} = 0,439 \cdot P_E - 5,0$	$R^2 = 0,954$
<i>Nodo 23:</i>	$P_{23} = 0,944 \cdot P_E - 1,7$	$R^2 = 0,998$
<i>Nodo 24:</i>	$P_{24} = 0,774 \cdot P_E - 4,6$	$R^2 = 0,979$
<i>Nodo 25:</i>	$P_{25} = 0,357 \cdot P_E - 0,2$	$R^2 = 0,924$
<i>Nodo 26:</i>	$P_{26} = 0,284 \cdot P_E - 0,2$	$R^2 = 0,921$
<i>Nodo 27:</i>	$P_{27} = 0,288 \cdot P_E - 2,3$	$R^2 = 0,950$
<i>Nodo 32:</i>	$P_{32} = 0,251 \cdot P_E - 3,6$	$R^2 = 0,902$
<i>Nodo 33:</i>	$P_{33} = 0,201 \cdot P_E - 3,5$	$R^2 = 0,868$
<i>Nodo 34:</i>	$P_{11} = 0,161 \cdot P_E - 2,1$	$R^2 = 0,867$

Los valores de las correlaciones (R^2), se encuentran en rangos bastante altos puesto que no bajan de 0,867 (Nodo 34) y existen varias por sobre los 0,95. Este tipo de resultados, en hidrología, es muy bueno ya que las correlaciones de las variables de difícil modelación matemática normalmente se encuentran un poco por debajo de estos valores.

Los gráficos los diferentes análisis se encuentran en el Anexo F.2.

7.3 Aplicaciones

En esta sección se analizó la creación de hidrogramas de crecida mediante los resultados obtenidos directamente desde el MM5, así como con aplicación de las relaciones obtenidas en el presente capítulo. Además se desarrolló un caso hipotético de precipitaciones, en el cual se analizaron las influencias de las diferentes sub – cuencas en los hidrogramas de salida mediante la utilización del software WMS.

La primera aplicación se realizó para la comparación de los hidrogramas observados y los generados mediante la utilización de los datos del MM5.

Conjuntamente se analizó la aplicación de una curva de Varas representativa de la distribución de precipitación en la cuenca.

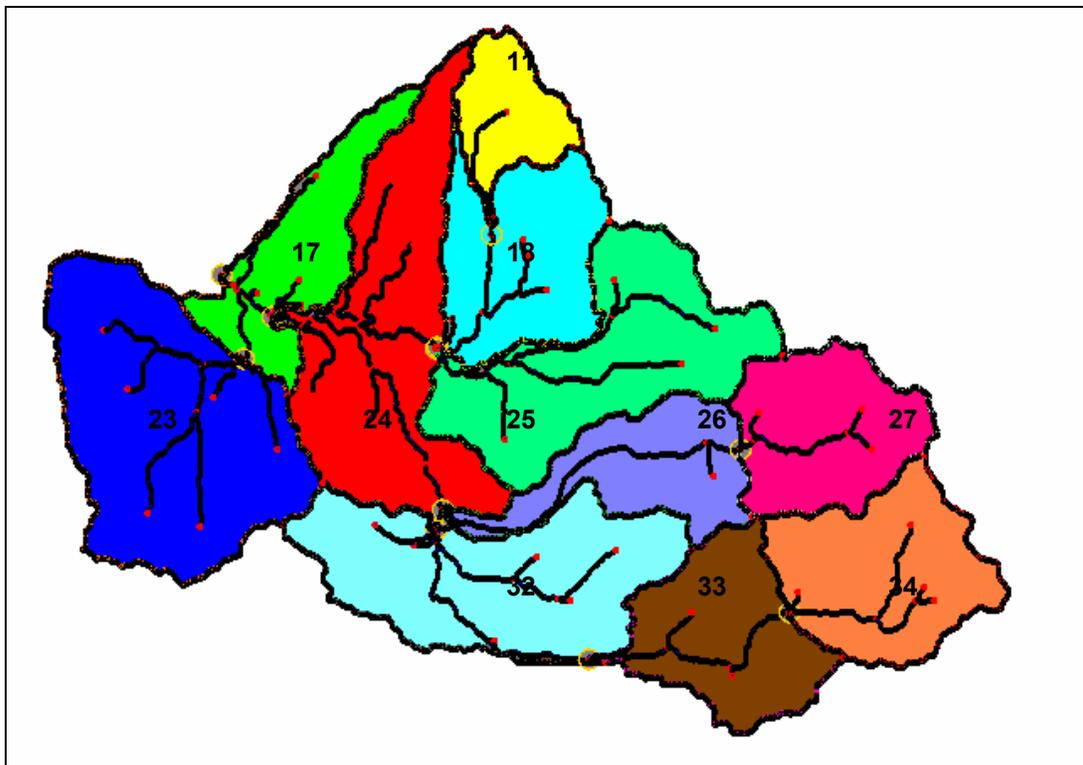
La segunda aplicación se efectuó para la verificación de los resultados que entregan las relaciones determinadas en tormentas de magnitud y duración arbitraria.

La metodología de estos análisis se explica continuación

7.3.1 Partición de la Cuenca y Simulación de Caudales

Antes de comenzar con la simulación de los caudales, se dividió la cuenca en 11 sub – cuencas como se puede ver en la figura 7.3. A cada una de ellas se le asignó una estación ficticia de manera de representar los puntos de los nodos seleccionados e ingresar los datos necesarios para la simulación.

FIGURA 7.3: SUB CUENCAS Y NODOS



Las sub – cuencas se escogieron de manera que cada una de ellas tuviera un área aportante dependiendo de la ubicación del nodo y de las características fisiográficas de la cuenca.

Las áreas que quedaron delimitadas en cada sub – cuenca se muestran en la tabla 7.5.

TABLA 7.5: ÁREAS DE LAS SUB CUENCAS

Nodo	Área [km ²]
11	53,6
17	92,9
18	117,1
23	236,1
24	206,7
25	175,0
26	92,2
27	108,9
32	188,3
33	110,0
34	128,4

La simulación se realizó mediante WMS y su modelo de simulación hidrológica HEC-1. Para esto se utilizaron los métodos explicados en el capítulo 2.1.2.

7.3.2 Determinación de Hidrogramas de Crecida para las Tormentas Seleccionadas

Se simularon los caudales mediante la aplicación de los resultados ya corregidos del MM5 en cada uno de los puntos seleccionados, en intervalos de una hora.

Los valores de la CN fueron parametrizados en función de obtener los hidrogramas de escorrentía directa en la salida de la cuenca ya obtenidos en los gráficos 6.3 a 6.10. Estos valores se encontraron cercanos a la impermeabilización de la cuenca (CN \approx 99), ya que el software es muy sensible a este parámetro (Arriagada, 2005 y Pérez, 2007).

Los hidrogramas fueron generados por el método del Hidrograma Unitario del SCS explicado en el capítulo 2.

En las mismas condiciones anteriores se simularon caudales mediante la utilización de la distribución de Varas determinada en el capítulo 5.2, para las mismas magnitudes del análisis anterior. En este caso el tiempo de duración de la tormenta fue el que se obtuvo de la información de precipitación diaria en AVP. Esto se realizó debido a que si se desea simular cualquier tormenta en la cuenca, la información que se tendría sería la magnitud diaria y su duración en días.

7.3.2.1 Análisis para las Tormentas Seleccionadas

Se analizaron los resultados obtenidos para las tormentas seleccionadas:

- Comparación del hidrograma generado (MM5) en relación del hidrograma observado.
- Comparación de éstos con los hidrogramas según resultados Distribuciones de Varas.

Los criterios de comparación están sujetos a los siguientes parámetros de importancia entre los valores registrados y los simulados.

- Caudal Peak (Q_{PEAK})
- Volumen Total Acumulado de agua en el paso de la tormenta (V_T).

7.3.3 Determinación de Hidrogramas de Crecida para una Tormenta Arbitraria

Se escogió magnitudes de precipitación de 100 mm. y 200 mm. en la estación de medición AVP. Con las relaciones obtenidas en la tabla 7.4 se determinaron los valores de las precipitaciones en cada nodo, y con las fórmulas 6.4, 7.2 y 7.3 se obtuvieron los caudales máximos de salida de la cuenca con sus respectivos períodos de retorno.

Este análisis se realizó para duraciones características (24, 48 y 72 horas) y para diferentes CN.

Conjuntamente se realizó un análisis de sensibilidad al parámetro CN modificando este valor en toda la cuenca.

7.3.3.1 Análisis de Resultados para la Tormenta Arbitraria

Primero se analizaron las variaciones que produce un cambio en la duración para cada precipitación, determinando en cada caso:

- Caudal Peak (Q_{PEAK})
- Volumen Total Acumulado de agua en el paso de la tormenta.

Para las diferentes duraciones se varió CN de manera de notar la influencia que tiene este parámetro en la generación de caudales.

7.3.4 Resultados y Análisis

7.3.4.1 Resultados y Análisis Tormentas Seleccionadas

Los hidrogramas de escorrentía directa (ED) generados con el software WMS (HEC-1) para cada tormenta se presentan en los figuras 7.4 a 7.14. En estos se incluye los resultados de tomar como distribuciones temporales representativas de la cuenca a la Grupo III - 10% (Varas, 1985) considerando la precipitación total dada por el MM5 corregida tanto en magnitud como duración.

FIGURA 7.4: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 1

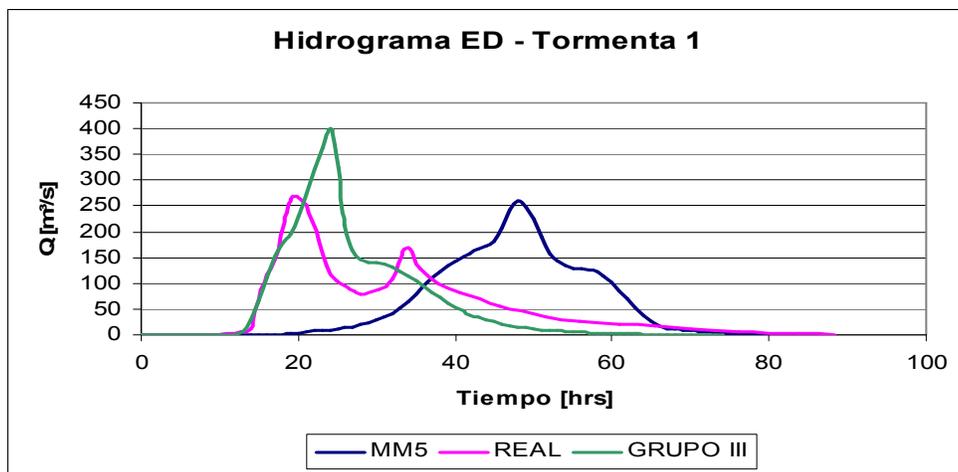


FIGURA 7.5: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 2

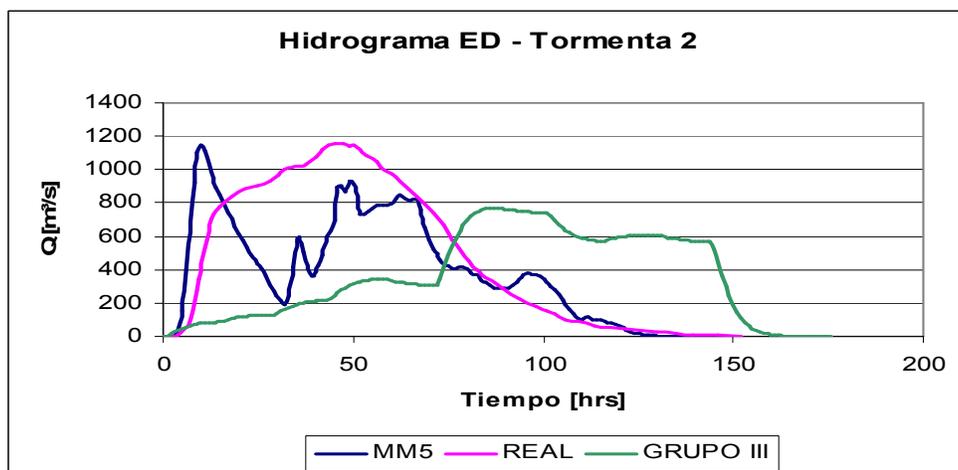


FIGURA 7.6: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 3 Y 4

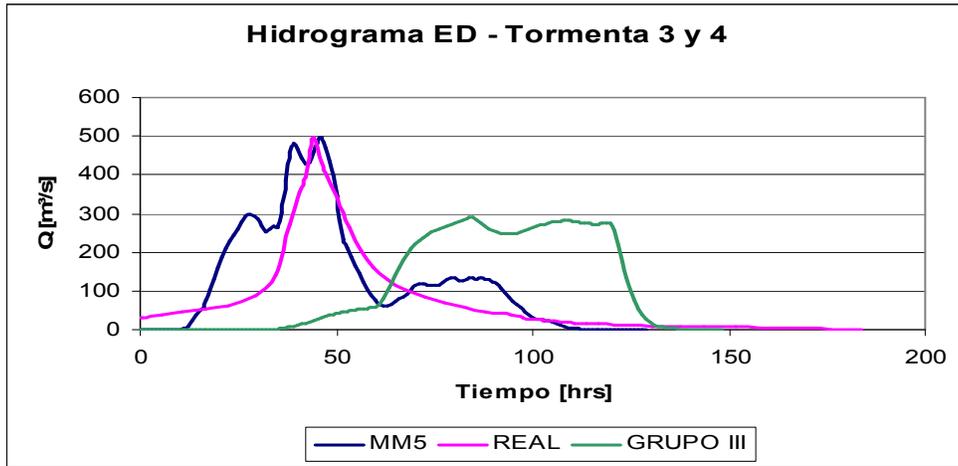


FIGURA 7.7: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 5

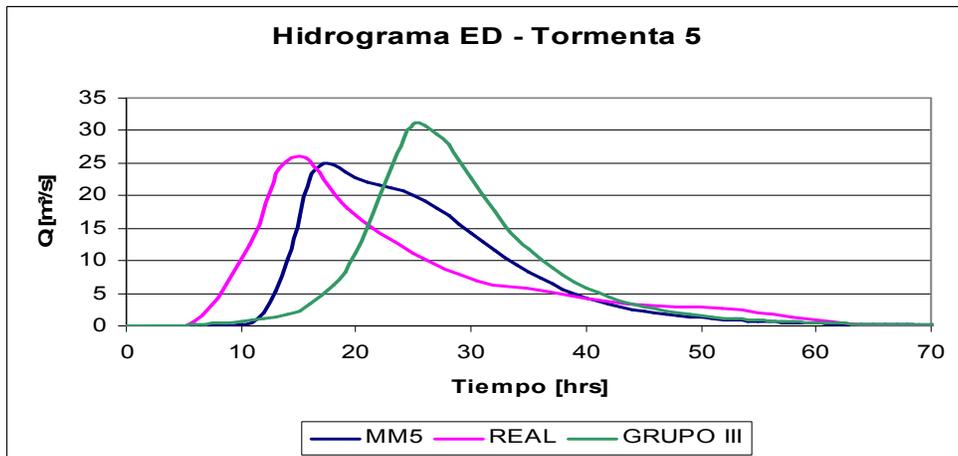


FIGURA 7.8: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 6

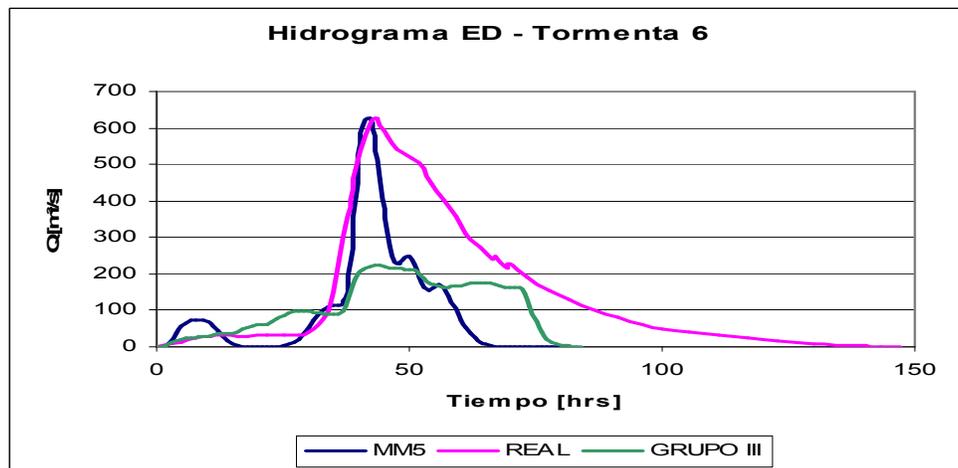


FIGURA 7.9: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 7

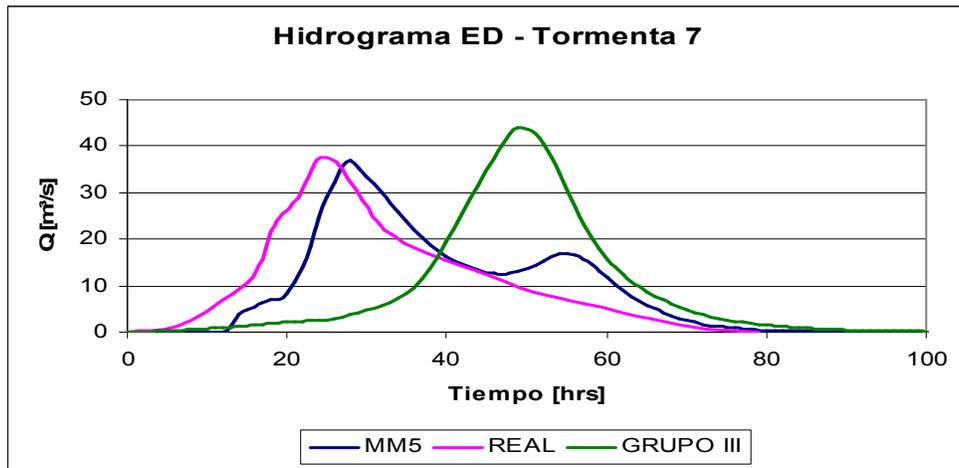


FIGURA 7.10: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 8

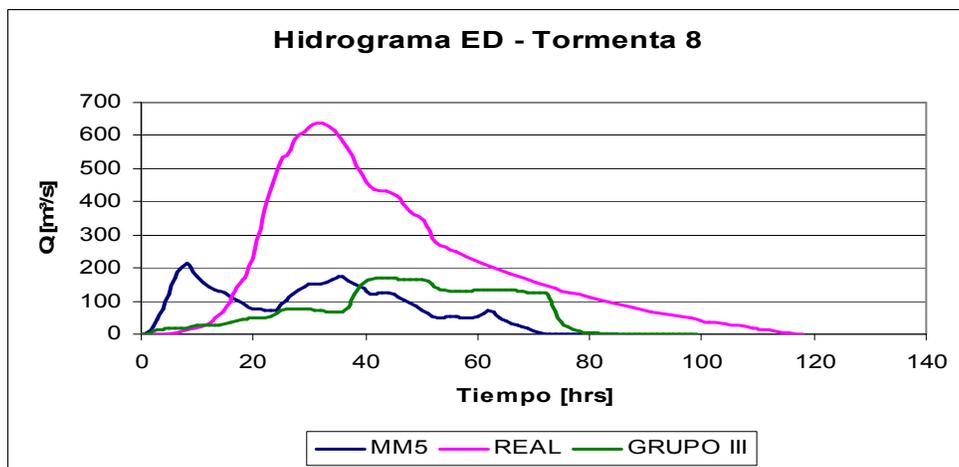
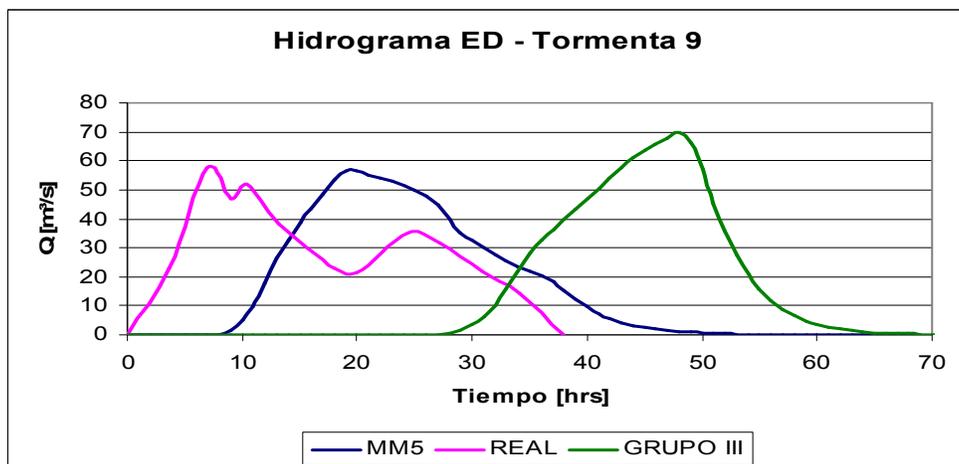


FIGURA 7.11: ESCORRENTÍA DIRECTA TORMENTA 9



Al tratar de generar los hidrogramas reales (observados) mediante los datos del MM5 se puede decir que el cálculo de la infiltración fue el más complicado de calibrar ya que el modelo es bastante susceptible a este parámetro. Igualmente los valores de CN están entre 85 y 100, ya que las condiciones de lluvia permanente dentro de estos meses producen bastante humedad en la zona. La única excepción a este comentario es la tormenta 1, ya que las condiciones de humedad existentes eran bastante bajas gracias a la poca precipitación precedente, por lo que se utilizó valores de CN cercanos a 65.

Al comparar los resultados de los hidrogramas reales y los generados con los datos del MM5 se puede decir que los valores de los caudales máximos, Q_P se alcanzan en prácticamente todos los casos, salvo en la tormenta 8, en la cual solo se pudo generar un caudal cercano al 35% del observado (tabla 7.6).

Aunque los valores de los Q_P sean semejantes, existen casos como la tormenta 2 y 6 en la que los V_T están por debajo de los valores reales con solo un 80% y un 10% respectivamente (tabla 7.7). En el caso de ambas tormentas los valores del V_T se obtuvieron mediante la utilización de una cuenca completamente impermeable (CN = 100), por lo que la cantidad de precipitación que simuló el MM5 fue insuficiente. Este comentario también se aplica en la tormenta 8 donde con CN = 100 igualmente no se pudo generar el volumen de agua real alcanzando solo un 20% de éste.

Al generar hidrogramas para el Grupo III – 10%, en las mismas condiciones en que se formaron los hidrogramas MM5, se pudo observar que los valores de Q_P varían tanto sobre como bajo el caudal generado por el MM5. Las tormentas 1, 5, 7 y 9 están un 28% en promedio por sobre el caudal MM5, mientras que el resto está un 41% por debajo.

TABLA 7.6: COMPARACIÓN CAUDALES PEAK

Tormenta	Q_P [m ³ /s]		
	Real	MM5	Grupo III
1	268,6	258,8	399,4
2	1158,8	1147,8	712,5
3 y 4	496,2	495,4	291,4
5	26,0	24,8	30,9
6	625,4	625,3	222,4
7	37,1	40,0	43,8
8	639,5	214,6	171,4
9	57,4	56,8	69,8

TABLA 7.7: COMPARACIÓN VOLUMEN GENERADO

Tormenta	V _T [Millón m ³]	
	Real	MM5
1	16,8	17,1
2	261,1	208,2
3 y 4	60,6	60,5
5	1,7	1,6
6	289,6	28,7
7	3,2	3,3
8	81,5	25,1
9	3,8	3,9

Al analizar las tormentas anteriores, sin la aplicación del factor de corrección de las precipitaciones (FC_{PP}) y en las mismas condiciones en que se generaron los hidrogramas (gráficos 7.3 a 7.10), se tienen los resultados en las tablas 7.8 y 7.9 y gráficos 7.11 y 7.12.

TABLA 7.8: CAUDAL MÁXIMO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN

Q _{MAX} [m ³ /s]	Precipitación Sin Corregir	Precipitación Corregida	Variación Porcentual [%]
Tormenta 1	1866.07	258.77	621.1
Tormenta 2	2232.77	1147.80	94.5
Tormenta 3 y 4	2650.94	495.39	435.1
Tormenta 5	774.79	24.84	3019.1
Tormenta 6	739.96	625.28	18.3
Tormenta 7	602.17	39.98	1406.2
Tormenta 8	960.74	214.59	347.7
Tormenta 9	1352.36	56.80	2280.9

TABLA 7.9: VOLUMEN GENERADO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN

Volumen [MMm ³]	Precipitación Sin Corregir	Precipitación Corregida	Variación Porcentual [%]
Tormenta 1	127.40	17.10	645.1
Tormenta 2	405.06	208.21	94.5
Tormenta 3 y 4	340.92	60.51	463.4
Tormenta 5	29.23	1.64	1678.2
Tormenta 6	34.14	28.68	19.0
Tormenta 7	51.97	3.26	1495.2
Tormenta 8	113.81	25.07	353.9
Tormenta 9	82.02	3.92	1989.9

Un análisis paralelo que se realizó para las tormentas anteriores, fue la determinación de los volúmenes y caudales máximos sin la aplicación del factor de corrección de las precipitaciones (FC_{PP}) en las mismas condiciones en que se generaron los hidrogramas (gráficos 7.4 a 7.11). Los resultados en las tablas 7.8 y 7.9 y figuras 7.12 y 7.13.

TABLA 7.8: CAUDAL MÁXIMO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN

Q_{MAX} [m ³ /s]	Precipitación Sin Corregir	Precipitación Corregida	Variación Porcentual [%]
Tormenta 1	1866.07	258.77	621.1
Tormenta 2	2232.77	1147.80	94.5
Tormenta 3 y 4	2650.94	495.39	435.1
Tormenta 5	774.79	24.84	3019.1
Tormenta 6	739.96	625.28	18.3
Tormenta 7	602.17	39.98	1406.2
Tormenta 8	960.74	214.59	347.7
Tormenta 9	1352.36	56.80	2280.9

TABLA 7.9: VOLUMEN GENERADO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN

Volumen [MMm ³]	Precipitación Sin Corregir	Precipitación Corregida	Variación Porcentual [%]
Tormenta 1	127.40	17.10	645.1
Tormenta 2	405.06	208.21	94.5
Tormenta 3 y 4	340.92	60.51	463.4
Tormenta 5	29.23	1.64	1678.2
Tormenta 6	34.14	28.68	19.0
Tormenta 7	51.97	3.26	1495.2
Tormenta 8	113.81	25.07	353.9
Tormenta 9	82.02	3.92	1989.9

FIGURA 7.12: CAUDAL MÁXIMO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN

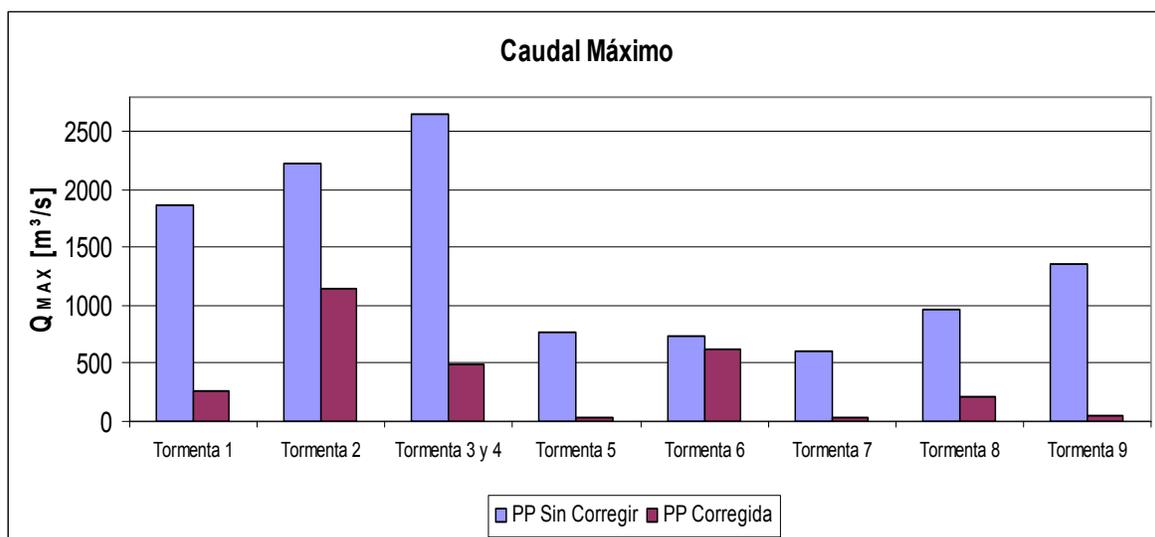
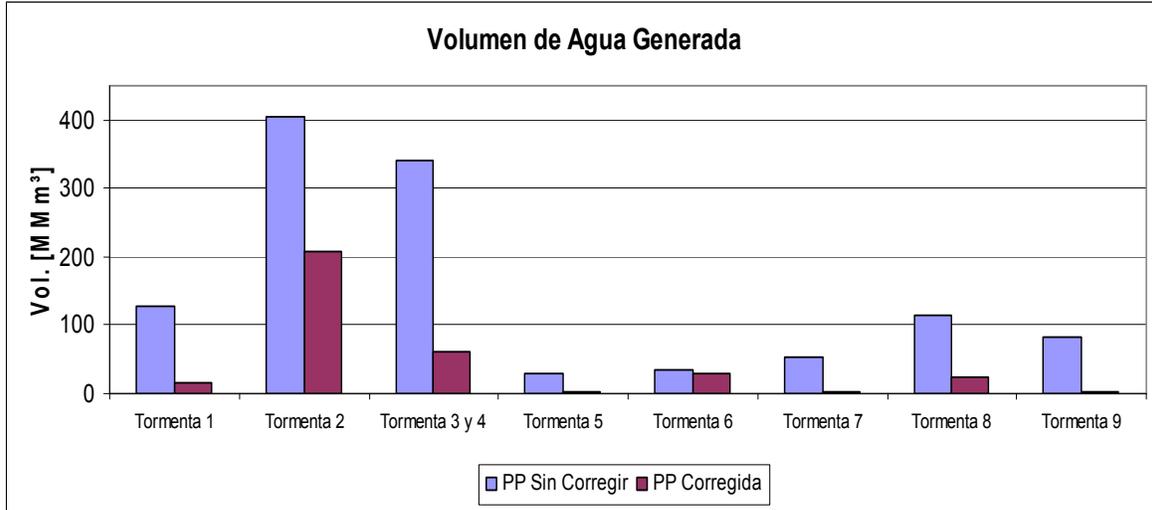


FIGURA 7.13: VOLUMEN GENERADO – PRECIPITACION CON Y SIN CORRECCIÓN



Como se puede apreciar en los gráficos 7.12 y 7.13 los valores sin y con corrección varían en prácticamente todos los casos, excepto en la tormenta 6, debido a los FC_{PP} aplicados.

En el caso de los caudales máximos, solo el de la tormenta 8 no se había podido alcanzar. Si no se hubiera corregido la precipitación el caudal máximo generado sería un 50% mayor, por lo que en este caso se pasaría de una sub – estimación a una sobre – estimación.

Para los volúmenes generados, las tormentas 2, 6 y 8 se encontraban por debajo de lo observado. Si no se hubiera corregido la precipitación el volumen generado en las tormentas 2 y 8 sería un 55% y un 40% mayor respectivamente, y en el caso de la tormenta 6 seguiría por debajo del valor observado generándose solamente un 12% de éste.

7.3.4.2 Resultados y Análisis Tormenta Arbitraria

Inicialmente se analizó los posibles resultados que deberían entregar las aplicaciones de una precipitación de 100 mm. y de 200 mm. en el punto donde se encuentra la estación de medición AVP para las diferentes duraciones antes mencionadas.

Los resultados para la precipitación caída en cada nodo a base de las relaciones de la tabla 7.4 se muestran en la tabla 7.10; a base de estos valores. se obtienen los resultados que se muestran en las tablas 7.11 a 7.14 cuando se utilizan las relaciones establecidas para los períodos de retorno. Los cálculos intermedios se pueden apreciar en el Anexo G.1.

TABLA 7.10: PRECIPITACION CAÍDA EN LOS NODOS

Evento	Nodos										
	11	17	18	23	24	25	26	27	32	33	34
100mm	33,1	208,3	38,9	92,7	72,8	35,5	28,2	26,5	21,5	16,6	14,0
200mm	71,6	416,5	82,8	187,1	150,2	71,2	56,6	55,3	46,6	36,7	30,1

TABLA 7.11: MÁXIMO – Pp. 100 mm

T [hrs]	T _{PP} [años]	T _Q [años]	K _T	Q [m ³ /s]
24	249,2	570,4	5,36	1864,9
48	44,2	101,6	3,76	1410,4
72	25,0	57,5	3,24	1260,0

TABLA 7.12: PROMEDIO – Pp. 100 mm

t [hrs]	T _{PP} [años]	T _Q [años]	K _T	Q [m ³ /s]
24	23,9	188,8	4,34	1573,9
48	4,9	37,5	2,84	1146,4
72	3,0	22,8	2,37	1013,8

TABLA 7.13: MÁXIMO – Pp. 200 mm

T [hrs]	T _{PP} [años]	T _Q [años]	K _T	Q [m ³ /s]
24	1213,4	2775,5	6,81	2280,9
48	667,0	1525,9	6,26	2123,6
72	506,5	1158,8	6,01	2051,3

TABLA 7.14 PROMEDIO – Pp. 200 mm

t [hrs]	T _{PP} [años]	T _Q [años]	K _T	Q [m ³ /s]
24	119,0	272,5	4,68	1670,6
48	63,4	145,5	4,10	1505,2
72	48,1	110,3	3,84	1432,3

Los resultados obtenidos para la generación de caudales en ambos eventos hipotéticos de precipitación para una CN = 100 se observan en las figura 7.14 y 7.15.

FIGURA 7.14: ESCORRENTÍA DIRECTA EVENTO DE 100 mm.

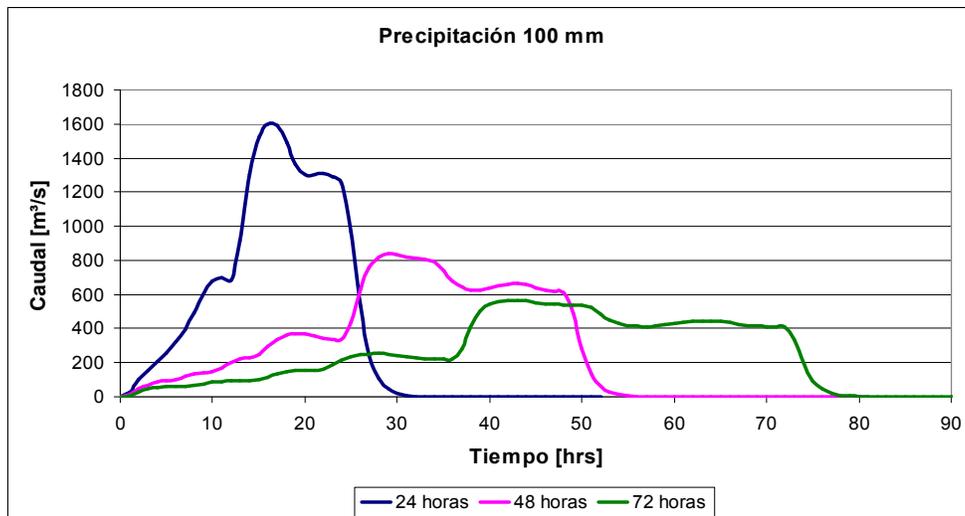
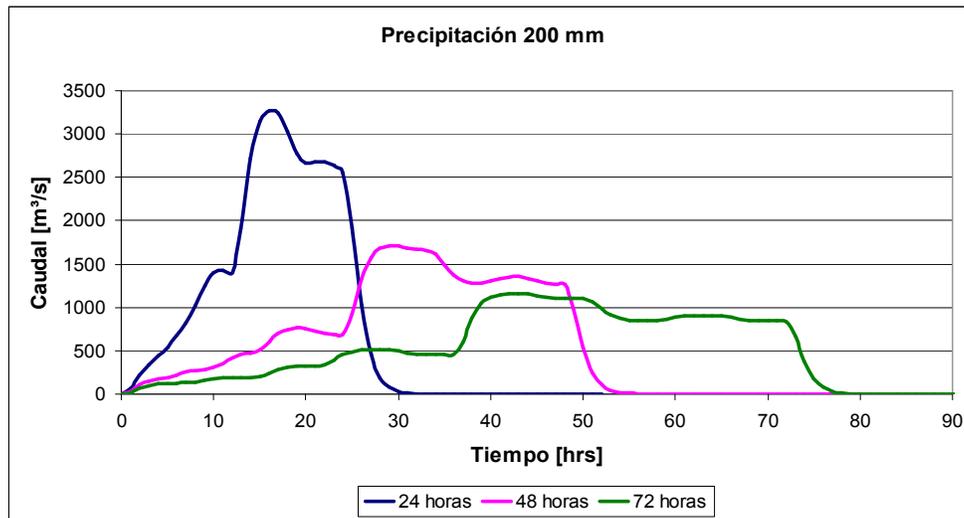


FIGURA 7.15: ESCORRENTÍA DIRECTA EVENTO DE 200 mm.



Los resultados generados en el WMS son la escorrentía directa, y según los resultados del capítulo 7.3.4 la aplicación de una curva única en la cuenca (Grupo III), tiene 2 rangos de variación, ya sea se encuentra un 41% por debajo del valor observado (bajo) o un 28% por encima de éste (alto). Además a estos valores hay que agregarle el flujo base, el cual fue determinado como de 30 m³/s a partir de los valores de los hidrogramas reales de las tormentas.

Los valores de los caudales totales máximos generados ($Q_{T\ MAX}$) en cada evento y su duración, para diferentes CN, se aprecian en la tabla 7.15 y 7.16

TABLA 7.15 CAUDALES PEAK – Pp. 100 mm.

CN	$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 24 hrs			$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 48 hrs			$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 72 hrs		
	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo
100	1625.9	2072.7	971.6	867.0	1101.3	523.8	597.4	756.3	364.8
95	1393.9	1775.8	834.7	735.1	932.6	446.0	504.4	637.3	309.9
90	1127.0	1434.2	677.2	608.6	770.5	371.3	423.7	533.9	262.3
85	964.4	1226.0	581.3	504.9	637.9	310.2	352.3	442.6	220.2
80	836.5	1062.3	505.8	439.9	554.6	271.8	306.0	383.3	192.8

TABLA 7.16 CAUDALES PEAK – Pp. 200 mm.

CN	$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 24 hrs			$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 48 hrs			$Q_{T\ MAX}$ [m ³ /s] - 72 hrs		
	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo
100	3301.6	4217.6	1960.2	1744.3	2224.4	1041.5	1191.6	1516.8	715.3
95	3102.5	3962.9	1842.8	1619.1	2064.0	967.6	1105.2	1406.2	664.4
90	2810.1	3588.5	1670.2	1467.4	1869.9	878.1	996.9	1267.6	600.4
85	2496.5	3187.1	1485.2	1318.2	1678.9	790.1	903.3	1147.8	545.2
80	2192.0	2797.3	1305.6	1169.9	1489.1	702.6	807.5	1025.1	488.7
75	1994.7	2544.9	1189.2	1034.6	1315.9	622.7	714.4	906.1	433.8
70	1417.9	1806.6	848.9	---	---	---	---	---	---
65	1144.2	1456.2	687.4	---	---	---	---	---	---

Al comparar los valores simulados con los de los caudales de la tabla 7.11 se aprecia que solo se puede alcanzar el valor de la precipitación en 24 horas con el $Q_{T\ MAX}$ alto y una cuenca prácticamente impermeable. Algo similar ocurre con los resultados de la tabla 7.12, ya que se alcanza el de 24 horas $Q_{T\ MAX}$ normal y alto.

Los $Q_{T\ MAX}$ bajo no alcanzan a representar casi ningún valor, ya que en la mayoría de los casos se encuentran por debajo de los valores teóricos.

Los valores de CN para la formación de los caudales teóricos de las tablas 7.11 a 7.14 se aprecian en las tablas 7.17 y 7.18.

TABLA 7.17: CURVA NÚMERO – Pp. 100 mm.

Hrs	CN - T_{pp} Máximo			CN - T_{pp} Promedio		
	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo
24	---	97	---	99	92	---
48	95	89	---	90	83	---
72	92	86	---	87	80	---

TABLA 7.18: CURVA NÚMERO – Pp. 200 mm.

Hrs	CN - T_{pp} Máximo			CN - T_{pp} Promedio		
	Normal	Alto	Bajo	Normal	Alto	Bajo
24	81	72	---	70	63	90
48	78	70	---	67	61	86
72	76	69	---	65	60	84

Para el evento de 100 mm. se tienen resultados de CN muy cercanos a una cuenca impermeable en la duración de 24 horas, la cual va disminuyendo al aumentar la duración.

Para el evento de 200 mm. se tienen resultados de CN menores que en el caso del evento de 100 mm. Estos disminuyen paulatinamente entre 2 y 3 unidades de CN al aumentar en 24 horas la duración.

El análisis de WMS con respecto la influencia de cada sub – cuenca y la CN Anexo G.2 y G.3 respectivamente.

8 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

8.1 Datos Utilizados

En la elaboración de este estudio se tuvo que utilizar diversa información obtenida desde estaciones de medición. En el caso de la precipitación diaria y los caudales horarios e instantáneos se obtuvieron de la estación AVP, la cual fue elegida como la representativa de la cuenca dada su condición de estar en la salida de ésta y los resultados obtenidos son de gran confianza. Sin embargo no se cuenta con los datos de precipitación horaria de esta misma estación por lo que se tuvo que recurrir a la estación más próxima con esta información, la cual fue Cerro Calán. Aunque se tuvo los datos para todas las tormentas, la lejanía respecto de la cuenca pudo afectar de manera negativa a los resultados de las correcciones que se realizaron según estos datos, y por ende a las precipitaciones que sirvieron de base para la generación de los hidrogramas.

8.2 Modelos Utilizados

Se utilizaron los resultados del modelo meteorológico MM5, usado en modo diagnóstico, para obtener la magnitud y duración de la precipitación y en cada tormenta ocurrida en el año 2002, único año con este tipo de información a la fecha de realización del estudio. De este año solo se contó con 8 tormentas posibles de analizar, por lo que es necesario tener en claro que esta cantidad de información está por debajo de lo necesario para poder realizar un estudio demasiado preciso respecto de este tema.

Al comparar estos antecedentes con los disponibles en estaciones de medición (Angostura en Valdivia de Paine y Cerro Calán) y al igual que lo señalado por Otondo (2004) se detectaron diferencias en algunos casos significativas entre los valores registrados y simulados, por lo que fue necesario aplicar factores de corrección para ambas variables, magnitud y duración de la precipitación. Aunque para el desarrollo del tema se logró corregir toda la información necesaria, es muy posible que utilizar una única estación para la caracterización de la precipitación en la cuenca sea muy limitante, por lo que pudo haber sido importante la inclusión de información de otras estaciones cercanas a la zona de estudio. Sin embargo, no fue factible obtener estos antecedentes para el período analizado.

Independiente de lo anteriormente comentado, se considera que la metodología utilizada y la información incluida en el estudio es de gran utilidad para la modelación de las cuencas y otros estudios pues permite visualizar las posibles

distribuciones espaciales y temporales de las variables meteorológicas susceptibles de ocurrir en una zona determinada .

Por otra parte, el software WMS y su modelo de simulación HEC-1 puede considerarse de fácil manejo, debido a la simpleza de la información a ingresar para la obtención de hidrogramas. Sin embargo, se debe tener cuidado en la selección del valor del parámetro de infiltración, CN, debido a la influencia que éste tiene sobre los resultados. Además, es conveniente resaltar que las correcciones a realizar a las DEMs y a las ramas del río para evitar la acumulación de agua en lugares donde las curvas de nivel no estén tan bien definidas, tiene una importancia no menor, ya que aunque en este caso se trate de diferencias bajas en el V_T (0,05%), en cuencas de mayor extensión puede significar errores de volumen importantes en la modelación de hidrogramas.

8.3 Resultados

Determinar una única curva de distribución temporal de precipitación representativa de una cuenca no siempre será adecuado. En este estudio se pudo ver que ninguna de las curvas de Varas representaba más de 50% del total de situaciones analizadas en los nodos seleccionados, por lo que ésta es una posible explicación sobre la diferencia de los caudales derivados en la estación de medición (AVP).

La relación de la magnitud total de precipitación registrada en la estación AVP y la simulada en los nodos seleccionados, que permite obtener la distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca, puede ser considerada excelente, lo que es validado por los valores de R^2 cercanos a unidad obtenidos en prácticamente todos los casos (R^2 entre 0,867 y 0,998).

Por otra parte, la relación entre los períodos de retorno de precipitación y caudal no puede considerarse totalmente satisfactoria. Aunque el valor de los R^2 de las funciones utilizadas se encontraba por sobre los 0,90, al analizar los gráficos resultantes es claro observar que existe un vacío importante (figuras 7.1 y 7.2) de datos en la parte intermedia, lo que limita la aplicabilidad de las relaciones. Esto se debe principalmente a la poca información disponible, es decir las 8 tormentas del año 2002, de las cuales solo la tormenta 2 es de gran magnitud, y deja a todo el resto acumulado en la zona de períodos de retorno bajos con valores demasiado similares.

Al generar los hidrogramas de las tormentas seleccionadas mediante el modelo de simulación HEC-1 (WMS) con los datos del MM5, los caudales máximos se alcanzan en prácticamente todos los casos, salvo la tormenta 8. No obstante, los valores de los volúmenes generados en algunos casos fueron inferiores a lo

esperado, esto ocurrió con las tormentas 2, 6 y 8, donde se alcanzó solo el 80%, 10% y 20% del volumen observado, respectivamente.

En los resultados de las generación de caudales de manera puntual usando cierta distribución de precipitación (curva de Varas Grupo III – 10%), se producen variaciones de los caudales máximos tanto por exceso, 28% por sobre el valor observado, como por defecto, 41% por debajo de éste. Además los hidrogramas simulados que resultaron más cercanos de la realidad son aquellos en que se registraron los menores caudales máximos (tormentas 5, 7 y 9). En consecuencia, se puede concluir que la modelación agregada es una herramienta que detalla mucho mejor la cuenca y los resultados entregados son de mejor ajuste.

Al generar los hidrogramas mediante la distribución de precipitación escogida como representativa de la cuenca, se tomó la duración que entregan los datos diarios de la estación AVP, es decir, se tienen días enteros de precipitación, lo que claramente no representa a cabalidad la realidad. Esta decisión se adoptó para obtener los resultados utilizando la única información que se puede conseguir de la estación AVP con respecto a las precipitaciones. Así se obtuvo los resultados antes mencionados con sus respectivas repercusiones.

Al comparar los hidrogramas observados con los simulados usando la información del MM5 es posible concluir que las distribuciones de precipitación que entrega el modelo de predicción meteorológica no representa fielmente la “real”. Algunos de los hidrogramas generados tienden a asimilarse con los observados (tormentas 1, 3 y 4, 5, 7 y 9), pero existen algunas como la tormenta 2 en la que la distribución temporal de la precipitación lleva a resultados bastante diferentes, e incluso en algunas tormentas, como la 6 y la 8, la cantidad de agua no se asemeja en lo absoluto a lo registrado.

Las correcciones que se realizaron a las magnitudes de las tormentas fueron absolutamente necesarias. Los valores obtenidos al utilizar directamente los valores de precipitación del MM5 para las diferentes tormentas amplificaban los volúmenes y los caudales a valores extremadamente altos obtenido sobreestimaciones que llegaron a un 2000% mayor en volúmenes y un 3000% mayor en caudales máximos.

En el caso de las aplicaciones para las tormentas de 100 y 200 mm con distintas duraciones, se observó que para poder obtener los resultados teóricos basados en los períodos de retorno, era necesario calibrar adecuadamente el parámetro de la CN. Los resultados mostraron CN diferentes en ambos eventos, obteniendo valores entre 90 y 100 para el evento de 100 mm. y entre 65 y 80 para el evento de 200 mm. Aunque se tienen diferentes resultados en ambos eventos es importante resaltar que siendo la función máximo la que tiene mejor correlación de datos, la función promedio es la que al menos puede representar una mayor cantidad de casos en los diferentes escenarios (normal, alto y bajo).

8.4 Comentarios Finales

Inicialmente se analizan los objetivos específicos planteados en la tesis.

La distribución espacial de la precipitación que se obtuvo mediante el MM5 abarcó prácticamente toda la cuenca obteniéndose 11 nodos en el interior de ésta, por lo que se tuvo información suficiente para el desarrollo del tema.

La distribución temporal escogida representativa de la cuenca quedó determinada por los resultados de mayor frecuencia entre los datos obtenidos, lo que en el caso de los porcentajes de Varas no obtuvo una mayoría importante. Esto lleva a una baja representación de la distribución temporal de las precipitaciones en la cuenca.

Las relaciones que se determinaron entre cada nodo de la cuenca y la estación de medición AVP obtuvieron correlaciones bastante altas. Así se pueden obtener los valores bastante aceptables de la precipitación acumulada en cualquiera de los nodos en un evento arbitrario, si es que se cuenta con la precipitación de la estación de medición.

La relación entre los períodos de retorno de las precipitaciones de los nodos y el caudal de salida quedó determinada por 2 funciones matemáticas. En ambos casos, aunque las correlaciones no eran bajas, existe una gran cantidad de T_{PP} cercanos a 1 año, lo que deja vacíos importantes para definir como confiable a cualquiera de estas relaciones. Por lo que se recomienda este análisis en períodos de retorno intermedios (5 a 50 años).

La primera aplicación muestra que no se puede identificar una cuenca de respetable superficie con una sola distribución temporal de precipitación, debido a que los valores de los caudales máximos generados no se asimilan en gran manera con los observados. Esto se traduce en que hay que discretizar lo más posible cada sector para así representar la “realidad” en una mejor medida.

En la segunda aplicación los resultados se ven afectados en su mayoría cuando se utiliza la relación de los períodos de retorno. Esta relación es posible repararla con la obtención de una mayor cantidad de información de tormentas. Para esto es necesario contar con un número mayor de simulaciones del MM5 para los años en que se tiene información, con lo que se pueden elegir las tormentas más adecuadas para el análisis (en el caso del diseño de obras, las mayores) en vez de tener que enfrentar el problema con las que hay.

La aplicación de toda esta metodología para la estimación de caudales de diseño, no entrega los resultados esperados, pues solo los caudales bajos son

caracterizados adecuadamente, por lo que la idea principal de la estimación de caudales de diseño no se ven representados.

Un punto a favor dentro de esta metodología fue la separación de la zona en sub – cuencas, lo que ayudó a la conocer los focos que producen un mayor volumen de agua y el tipo de hidrograma que estos tienen, ya sean espigados con caudales máximos altos o chatos con una distribución más uniforme en el paso del tiempo. Este tipo de información puede determinar, por ejemplo:

- Tipos de obras necesarias para contener crecidas.
- Lugares aptos para el crecimiento urbano, así como lugares que por ningún motivo deberían poblarse.
- Construcción de Embalses, etc.

Sin embargo todo esto es solo el punto de partida para el análisis temporal y espacial de una cuenca fluvial, ya que es posible refinar algunos puntos y herramientas de manera de modelar la “realidad”. Por ejemplo, las informaciones recopiladas pueden extenderse por sobre toda el área cercana a la zona que se requiere estudiar de manera de contar con una malla de puntos con información medida que puede ayudar a corregir los valores entregados por MM5 y contar con una base de datos más confiable.

Adjuntamente con las correcciones a las variables de la magnitud de precipitación y de la duración, es necesario considerar otros parámetros, como lo son las condiciones iniciales y los períodos de retorno de las duraciones de las tormentas en los puntos de interés. Aunque la primera de estas se ve representada en cierta forma con la elección de la CN es necesario tener claro como se encuentra la cuenca antes del comienzo de una tormenta, por ejemplo, el caudal del río o la humedad de las diferentes zonas cuenca.

El detalle que entrega la distribución agregada puede ser suficiente para efectos de pequeños proyectos, pero existen otras herramientas, como la modelación distribuida, que completa la distribución de la información en todos los puntos de la cuenca entregando datos específicos para la generación de hidrogramas o para otro uso que se requiera. Este tipo análisis simula la realidad en resoluciones mucho mayores y puede ser de gran ayuda para los proyectos futuros de ingeniería hidráulica.

Asimismo existen nuevas tendencias para el análisis de las cuencas y los parámetros de precipitación y caudal, como lo es el Análisis de Componentes Principales, el cual es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables (por ejemplo: valores de precipitación en diferentes puntos), el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

La unión de estas nuevas herramientas podría determinar de manera más precisa las características de la cuenca y tener una modelación que minimiza los errores entregando una mayor confianza para la realización de proyectos y estudio.

ANEXOS

Los anexos de este trabajo se encuentran disponibles en formato digital en un CD adjunto.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Armas, J.P. (1988). "Regresiones Bayesianas en el Análisis de Frecuencia". Memoria para optar al Título de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Arriagada, M. (2005). "Uso del modelo GSHHA para la modelación de caudales en una cuenca pluvial" Memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- CAIDEPE (2004). "Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua segun objetivos de Calidad. Cuenca del Río Rapel".
- CAIDEPE (2004). "Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua segun objetivos de Calidad. Cuenca del Río Maipo".
- Chow, V.T. (1994). "Hidrología Aplicada".
- Dirección General de Aguas (1987), "Precipitaciones Máximas de 1, 2 y 3 días".
- Espildora, B. (1975). "Elementos de Hidrología".
- López, D. (2007). "Análisis y Aplicación del Modelo GR4J para Estimación de Caudales Medios Diarios en Cuencas Pluviales de Chile". Memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (1996). "Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, Guía de Diseño"
- Otondo, I. (2004) "Validación de campos de precipitación y su desagregación mediante análisis multiescalar" Tesis para optar al grado de magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico y memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Pérez, O. "Determinación de Hidrogramas Unitarios Utilizando del Modelo de simulación Distribuido GSHHA". Memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Peña y Vidal (1993). "Estimación estadística de la línea de nieves durante los eventos de precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados sur". En Actas XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Varas, E. (1985), "Influencia de Hietogramas de una Tormenta en la Crecida Resultante", Revista Anales de la Universidad de Chile.

- Varas, E. (1985), "Hietogramas de Tormentas de Diseño", VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepción, Chile.
- Varas, E. (1986), "Comparación entre Perfiles de Tormentas", XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIRH, Sao Paulo, Brasil.
- Manual de Usuario, "Sistema de Modelación de Cuencas WMS".
- Apuntes Curso de Hidrología CI41C, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

INTERNET

Comisión Nacional de Riego

<http://esiir.cnr.cl/esiir/>

Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

<http://infomet.dgf.uchile.cl/PRONOSTICOS/pronosticosnumericos.html>

Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, México.

<http://www.sma.df.gob.mx/modelacion/09/01.htm>

Comunidad del Modelo MM5

<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>

Servicio Geológico de los Estados Unidos

<http://seamless.usgs.gov/>.

Departamento de Matemática de la Universidad de California, EE.UU.

<http://math.fullerton.edu/mathews/n2003/HermitePolyMod.html>

Departamento de Física de la Universidad de UTA, EE.UU.

http://www.physics.utah.edu/~detar/phys6720/handouts/cubic_spline/cubic_spline/node1.html

US Army Corps of Engineers (1994)

<http://www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1417/toc.html>