UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

“PRONÓSTICO DE CRECIDAS Y NIVELES DE AGUA EN ESTERO MARGA-MARGA, SECTOR VIÑA DEL MAR”

DOMÉNICA SILVANA DÍAZ GÓMEZ

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Pedro Kamann Chacana

Enero de 2017

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

“PRONÓSTICO DE CRECIDAS Y NIVELES DE AGUA EN ESTERO MARGA-MARGA, SECTOR VIÑA DEL MAR”

Memoria de titulación presentada por

DOMÉNICA SILVANA DÍAZ GÓMEZ

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Pedro Kamann Chacana

Enero de 2017

Dedico esta memoria a mi familia, en especial a mi hijo Martín por ser el motor que me impulsa cada día.

Quiero además agradecer el apoyo a la consultora Enecic Ingeniería, al Sr. Ludwig Stowhas y a mi profesor guía Sr. Pedro Kamann por darme la oportunidad de realizar este trabajo de titulación.

RESUMEN

El conocimiento anticipado de los eventos meteorológicos que podrían ocasionar crecidas de importancia permite tomar las precauciones necesarias para minimizar eventuales daños. Desde esta perspectiva la predicción meteorológica constituye una herramienta de apoyo en la medida que permite conocer con cierta precisión los estados de la atmósfera que determinan el comportamiento de los sistemas hidrológicos.

En el presente estudio se propone una metodología para pronóstico de crecidas y estimación de niveles de agua asociados en el Estero Marga-Marga en el tramo final de su desembocadura al mar. Para ello se realiza una evaluación de algunos de los modelos meteorológicos existentes en cuanto a su habilidad para predecir acertadamente los eventos de precipitaciones observados, se seleccionan los modelos mejor evaluados y en base a sus pronósticos se realiza el pronóstico de caudales y niveles de agua en el estero mediante un modelo hidrológico y un modelo hidráulico, respectivamente.

El modelo hidrológico fue implementado en el Sistema de Modelación Hidrológica HEC HMS y permite simular el proceso Precipitación-Escorrentía en la cuenca del Marga-Marga en base a un modelo geométrico y un modelo meteorológico. Para la elaboración del modelo geométrico se dividió el área total de escurrimiento en 19 subcuencas aportantes al Estero Marga-Marga, para las que se calculó los hidrogramas unitarios y se definió las condiciones de infiltración. El modelo meteorológico varía para cada evento de precipitación y permite el cálculo de los hidrogramas de crecida de cada subcuenca, los que posteriormente son transitados a través de cauces y embalses hasta llegar a su punto de salida.

El modelo de Ejes Hidráulicos fue implementado en HEC RAS y permite realizar la modelación hidráulica del estero en el tramo comprendido entre el puente Casino y el puente Villanelo.

La validación y pre-calibración de los parámetros empleados para el desarrollo del modelo hidrológico fue realizada simulando crecidas con registros de precipitaciones de los años 2015-2016, ingresando los hidrogramas obtenidos como condición de borde al modelo de Ejes Hidráulicos y comparando los niveles de agua calculados con los observados en diversas secciones del estero para el evento de precipitación correspondiente.

Con el modelo hidrológico validado y pre-calibrado se obtuvieron los pronósticos de crecida para la tormenta ocurrida entre los días 05 y 06 de agosto de 2015 que constituye el evento más importante registrado el año 2015 y que presenta un periodo de retorno del orden de 5 años. Las crecidas fueron pronosticadas mediante las salidas numéricas de los modelos GFS, ECMWF y WRF con antelaciones de 5 días, 2 días y 1 día, y fueron comparadas con el hidrograma de crecidas y niveles de agua obtenidos a partir del registro de precipitaciones del evento lo que permitió verificar la aplicabilidad de la metodología propuesta.

Palabras Clave: Modelo hidrológico, Modelo hidráulico, Pronósticos

ABSTRACT

Anticipated knoledge of meteorological events that could cause major flooding allows us to foresee and minimize possible damages. From this perspective, weather prediction supports tools as it allows us to know with some precision the states of the atmosphere that determine the behavior of hydrological systems.

In this study, a methodology for flood forecasting and estimation of associated water levels in the Marga-Marga River in the final stretch of its outlet to the sea is proposed. For this purpose, some existing weather models are evaluated in relation to its ability to accurately predict rainfall events. The best rated models are selected and based on their forecasts for rainfall forecasting flows and water levels in the river is performed using a hydrological model and a hydraulic model, respectively.

The hydrological model was implemented in the Hydrologic Modeling System HEC HMS and can simulate the Precipitation-Runoff process in Marga-Marga basin based on a geometric model and a meteorological model. For the development of the geometric model the total area was split in 19 subbasins contributors to Marga-Marga River, for which the hydrograph unit was calculated and infiltration conditions defined. The meteorological model varies for each precipitation event and allows the calculation of flood hydrographs for each subbasin, which are then transited through channels and reservoirs to reach their outlet point.

Axles Hydraulic model was implemented in HEC RAS and allows hydraulic modeling of the river in the section between the Casino bridge and the Villanelo bridge.

Validation and pre-calibration of the parameters used for the development of hydrological model was conducted simulating flooding with rainfall records of the years 2015-2016, entering hydrographs obtained as a boundary condition to model hydraulic axes and comparing water levels calculated with those observed in various sections of the river for the corresponding precipitation event.

With the hydrological model (validated and pre-calibrated) flood forecasts were obtained for the storm occurred between August 5th and August 6th, which was the most important event registered in 2015 and has a return period of 5 years. The floods were predicted by numerical outputs of the GFS, ECMWF and WRF models at lead times of five days, two days and one day, and were compared with the hydrograph floods and water levels obtained from record rainfall event it which allowed to verify the applicability of the proposed methodology

Keywords: Hydrological model, Hydraulic model, Forecast

GLOSARIO

- **Cuenca exorreica:** Terreno que tiene aguas superficiales que llegan hasta el mar.

- **Escala sinóptica:** Escala de longitud horizontal del orden de los 1.000[km] o más. En meteorología, el término sinóptico se usa para referirse a los fenómenos que ocurren en el lapso de días y en escalas de longitud del orden de algunos kilómetros.

- **Calibración:** Es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para la cual la serie de datos simulada se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

- **Validación:** Es el proceso de comprobar que los resultados aportados por el modelo para las variables de salida y estado no son muy diferentes a los medidos en la realidad.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN I

ABSTRACT II

GLOSARIO III

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Antecedentes generales 1
1.2 Objetivos del estudio 1
1.3 Alcances del estudio 2
1.4 Estructura de la memoria 3

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA DEL ESTERO MARGA-MARGA .. 4

2.1 Introducción 4
2.2 Características generales 4
2.2.1 Ubicación geográfica 4
2.2.2 Clima 6
2.2.3 Aspectos geomorfológicos de la cuenca 7

3 PRONÓSTICO DE PRECIPITACIONES 8

3.1 Marco teórico 8
3.1.1 Introducción 8
3.1.2 Conceptos básicos del pronóstico del tiempo 8
3.1.3 Modelos de predicción meteorológica 9
3.1.4 Incerteza de modelos de predicción meteorológica 15
3.2 Pre-selección de modelos de predicción 16
3.2.1 Descripción de salidas de datos 16
3.3 Selección de estaciones meteorológicas 20
3.3.1 Estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) 20
3.3.2 Estaciones meteorológicas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) 21
3.3.3 Estación meteorológica Quilpué 21
3.4 Descripción de eventos de precipitación 22
3.4.1 Evento de precipitaciones del 12 de julio de 2015 22
3.4.2 Evento de precipitaciones del 30 de julio de 2015 23
3.4.3 Evento de Precipitaciones del 05 al 06 de agosto de 2015 24
3.4.4 Evento de precipitaciones del 07 al 09 de agosto de 2015 25
3.5 Evaluación de modelos de predicción para eventos de precipitación 26
3.5.1 Análisis evento de precipitaciones del 05 al 06 de agosto de 2015 26
3.5.2 Análisis evento de precipitaciones del 07 al 09 de agosto de 2015 33
3.5.3 Conclusiones 39
3.5.4 Selección de evento de precipitación para simulación de crecidas 40

4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDAS 41

4.1 Marco teórico 41
4.1.1 Introducción 41
4.1.2 Conceptos básicos 41
4.1.3 Método del hidrograma unitario 42

4.2 Modelos de precipitación-escorrentía 44
4.2.1 Determinación de la precipitación efectiva y su distribución en el tiempo 44
4.2.2 Obtención de hidrogramas unitarios sintéticos 45
4.2.3 Tránsito de caudales 50
4.3 Selección de modelo para pronóstico de caudales 54

5 SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA HEC-HMS 55

5.1 Introducción 55
5.2 Componentes de HEC-HMS 56
5.2.1 Componentes del modelo de cuenca ("Basin model") 57
5.2.2 Componentes del modelo meteorológico ("Meteorological model") 58
5.2.3 Componentes de las Especificaciones de control ("Control especifications") .. 59
5.2.4 Componentes de la Entrada de datos ("Time series data") 59
5.2.5 Interfaz de usuario 60

6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA ESTERO MARGA-MARGA 61

6.1 Introducción 61
6.2 Modelo ingresado a HEC-HMS 61
6.2.1 Modelo de cuenca 61
6.2.2 Modelo meteorológico 69
6.2.3 Especificaciones de control 71
6.2.4 Series temporales de datos para la cuenca del Estero Marga-Marga 71
6.2.5 Pares de datos 71
6.3 Presentación de resultados 72

7 VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO 74

7.1 Introducción 74
7.2 Validación del modelo 74
7.2.1 Obtención de niveles de agua en base a modelo de ejes hidráulicos 75
7.2.2 Validación del modelo de precipitación-escorrentía 81
7.2.3 Pre-Calibración y Validación del modelo para otros eventos de precipitación . 84
7.3 Conclusiones y Comentarios 86

8 PRONÓSTICO DE CRECIDAS Y NIVELES DE AGUA EN ESTERO MARGA-MARGA 87

8.1 Introducción 87
8.2 Pronóstico de precipitaciones 87
8.3 Pronóstico de crecidas 89
8.4 Pronóstico de niveles de agua en Estero Marga-Marga 91

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 92

9.1 Conclusiones 92
9.2 Recomendaciones 94

10 REFERENCIAS 95

11 ANEXOS 97

11.1 ANEXO A: Pluviogramas de Precipitación 97
11.1.1 Evento de Precipitaciones del 05-06 de agosto de 2015 97
11.2 ANEXO B: Antecedentes para Modelo de Cuenca 100
11.2.1 Hidrogramas Unitarios 100
11.2.2 Tránsito de Hidrogramas. 107
11.3 ANEXO C: Resultados Simulación Hidrológica del Evento de Precipitaciones ocurrido los días 05 y 06 de agosto de 2015 120
11.4 ANEXO D: Antecedentes para Calibración y Validación Modelo Hidrológico .. 121
11.4.1 Modelo de Ejes Hidráulicos para Obtención de Niveles de Agua en tramo de estero estudiado 121
11.4.2 Análisis de Crecidas del 17 de abril de 2016..... 124
11.5 ANEXO E: Antecedentes para Pronóstico de Caudales y Niveles de Agua 131
11.5.1 Pronóstico de Crecidas tormenta del 05-06 de agosto de 2015 131
11.6 ANEXO F: Manual de utilización del Modelo Hidrológico de la Cuenca del Estero Marga-Marga en HEC-HMS 141

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características climáticas del área en estudio 6
Tabla 3-1 Actualización modelo GFS del 05/08/2015 a las 6Z, para estación Las Salinas 17
Tabla 3-2 Actualización modelo ECMWF del 05/08/2015 a las 6Z, estación Las Salinas 18
Tabla 3-3 Actualización modelo WRF del 05/08/2015 a las 0Z, estación Las Salinas 19
Tabla 3-4 Coordenadas estación meteorológica Las Salinas 20
Tabla 3-5 Coordenadas estación meteorológica Rodelillo 20
Tabla 3-6 Coordenadas estación meteorológica Colliguay 20
Tabla 3-7 Coordenadas estación meteorológica Viña del Mar 21
Tabla 3-8 Coordenadas estación meteorológica Villa Alemana 21
Tabla 3-9 Coordenadas estación meteorológica Quilpué 21
Tabla 3-10 Montos de precipitación registrados en estaciones DGA 22
Tabla 3-11 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV 22
Tabla 3-12 Montos de precipitación registrados en estaciones DGA 23
Tabla 3-13 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV 23
Tabla 3-14 Montos de Precipitación registrados en estaciones DGA 24
Tabla 3-15 Montos de Precipitación registrados en estaciones PUCV 24
Tabla 3-16 Montos de Precipitación registrados en estación Quilpué 24
Tabla 3-17 Montos de Precipitación registrados en estaciones DGA 25
Tabla 3-18 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV 25
Tabla 3-19 Montos de Precipitación registrados en estación Quilpué 25
Tabla 3-20 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Las Salinas 27
Tabla 3-21 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Rodelillo 27
Tabla 3-22 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Quilpué 27
Tabla 3-23 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Las Salinas 33
Tabla 3-24 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Rodelillo 33
Tabla 3-25 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Quilpué 34
Tabla 3-26 Montos de precipitación registrados vs precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno 40
Tabla 4-1 Coeficientes de distribución para el hidrograma unitario sintético 47
Tabla 4-2 Hidrograma Unitario Adimensional SCS 49
Tabla 5-1 Elementos hidrológicos disponibles en HEC-HMS 57
Tabla 5-2 Elementos hidrológicos en Barra de herramientas de HEC-HMS 58
Tabla 5-3 Métodos disponibles en Modelo Meteorológico de HEC-HMS 58
Tabla 5-4 Tipos de datos de entrada para HEC-HMS 59
Tabla 6-1 Elementos Hidrológicos tipo Subcuenca ("Subbasin") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS 62
Tabla 6-2 Elementos Hidrológicos tipo Ríos ("Reach") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS 63
Tabla 6-3 Elementos Hidrológicos tipo Junta ("Junction") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS 63
Tabla 6-4 Elementos Hidrológicos tipo Embalses ("Reservoir") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS 63
Tabla 6-5 Métodos de Cálculo para Subcuencas ("Subbasin") 64
Tabla 6-6 Parámetros Método " SCS Curve Number" para Subcuencas 65

Tabla 6-7 Métodos empleados en subcuencas para transformación Precipitación-Escorrentía 67
Tabla 6-8 Variables y Parámetros para Hidrograma Unitario SCS 67
Tabla 6-9 Variables y Parámetros para Hidrograma Unitario de Arteaga y Benítez....68
Tabla 6-10 Variables y Parámetros empleados Método Muskingum Cunge en Esteros....68
Tabla 6-11 Variables y Parámetros empleados Método Muskingum Cunge en Colector Sausalito....69
Tabla 6-12 Estaciones meteorológicas a considerar en la simulación 69
Tabla 6-13 Porcentaje asignado por estación pluviométrica para cada subcuenca 70
Tabla 6-14 Caudal de Crecida para Subcuenca definida en el modelo 72
Tabla 6-15 Caudal de Crecida en embalses, esteros y juntas del modelo 73
Tabla 7-1 Coeficiente de Manning Estero sin mantención....77
Tabla 7-2 Niveles de agua máximos en Puentes del tramo. 80
Tabla 7-3 Caudal de Crecida tormenta 17/04/2016 con Modelo Original 85
Tabla 7-4 Caudal estimado en aforos el día 17/04/2016 85
Tabla 7-5 Caudal simulado con Modelo Original....85
Tabla 7-6 Caudal simulado con CN Original reducida en 10% 86
Tabla 8-1 Caudales de crecidas simulados con precipitaciones previstas y observadas....90
Tabla 8-2 Niveles de agua máximos pronosticados en secciones consideradas 91
Tabla 11-1 Pluviogramas de Precipitación registrados en Estaciones Meteorológicas 97
Tabla 11-2 Hidrograma Unitario Subcuenca S1....100
Tabla 11-3 Hidrograma Unitario Subcuenca S2....101
Tabla 11-4 Hidrograma Unitario Subcuenca S3....102
Tabla 11-5 Hidrograma Unitario Subcuenca S6....102
Tabla 11-6 Hidrograma Unitario Subcuenca S5....103
Tabla 11-7 Hidrograma Unitario Subcuenca S9....104
Tabla 11-8 Hidrograma Unitario Subcuenca S10....105
Tabla 11-9 Hidrograma Unitario Subcuenca S11....105
Tabla 11-10 Hidrograma Unitario Subcuenca S43....106
Tabla 11-11 Curva de Capacidad Estimada Embalse Carrizo....108
Tabla 11-12. Antecedentes Embalse Carrizo....109
Tabla 11-13 Curva de Capacidad Estimada Embalse El Recreo....112
Tabla 11-14. Antecedentes Embalse El Recreo....113
Tabla 11-15 Curva de Capacidad Estimada Embalse La Poza Azul 116
Tabla 11-16. Antecedentes Embalse La Poza Azul 117
Tabla 11-17 Hidrograma de Crecida para J-S48....121
Tabla 11-18 Variación de Nivel de Mareas del día 06/08/2015 122
Tabla 11-19 Nivel de aguas máximo y parámetros hidráulicos relacionados en Secciones de Estero el día 06/08/2015 123
Tabla 11-20 Pluviogramas de Precipitación registrados en Estaciones Meteorológicas....124
Tabla 11-21 Porcentaje asignado por Estación Pluviométrica para cada Subcuenca....127
Tabla 11-22 Parámetros Método " SCS Curve Number" para Subcuencas para tormenta del 17 de abril de 2016....128
Tabla 11-23 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 5 días de inicio del evento. 131
Tabla 11-24 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 5 días de inicio del evento. 131

Tabla 11-25 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 5 días de inicio del evento. 132
Tabla 11-26 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 5 días de inicio del evento. 132
Tabla 11-27 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 2 días de inicio del evento. 133
Tabla 11-28 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 2 días de inicio del evento. 133
Tabla 11-29 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 2 días de inicio del evento. 133
Tabla 11-30 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 2 días de inicio del evento. 134
Tabla 11-31 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 1 día de inicio del evento. 134
Tabla 11-32 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 1 día de inicio del evento. 134
Tabla 11-33 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 1 día de inicio del evento. 135
Tabla 11-34 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 1 día de inicio del evento. 135
Tabla 11-35 Resultados Simulación Hidráulica para Pronóstico de Crecidas con Modelo GFS a 2 días del evento 140
Tabla 11-36 Resultados Simulación Hidráulica para Pronóstico de Crecidas con Modelo GFS a 1 día del evento 140

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1.- Área en estudio y límites relevantes. Cuenca Estero Marga-Marga 5
Figura 3-1.- Proceso de pronóstico del tiempo....9
Figura 3-2.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Las Salinas....28
Figura 3-3.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Rodelillo 28
Figura 3-4.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Quilpué....28
Figura 3-5.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Las Salinas....29
Figura 3-6.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Rodelillo 29
Figura 3-7.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Quilpué....30
Figura 3-8.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Las Salinas....30
Figura 3-9.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Rodelillo 31
Figura 3-10.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Quilpué....31
Figura 3-11.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Las Salinas....32
Figura 3-12.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Rodelillo....32
Figura 3-13.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Quilpué....32
Figura 3-14.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Las Salinas....34
Figura 3-15.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Rodelillo....34
Figura 3-16.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Quilpué....35
Figura 3-17.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Las Salinas....35
Figura 3-18.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Rodelillo....36
Figura 3-19.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Quilpué....36
Figura 3-20.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Las Salinas....37
Figura 3-21.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Rodelillo....37
Figura 3-22.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Quilpué....38
Figura 3-23.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Las Salinas....38
Figura 3-24.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Rodelillo....39
Figura 3-25.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Quilpué....39
Figura 4-1.- La cuenca como sistema hidrológico....41
Figura 4-2.- Hidrograma unitario sintético estándar 46
Figura 4-3.- Hidrogramas Unitarios Sintéticos del SCS 48
Figura 4-4.- Esquema de aumento de caudal en un cauce o embalse....50
Figura 4-5.- Esquema de almacenamiento según Método Muskingum....52
Figura 5-1.- Esquema de Cálculo de Hidrograma de crecida para una cuenca utilizando HEC-HMS 56
Figura 5-2.- Interfaz de usuario de HEC-HMS 60
Figura 6-1.- Modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC-HMS....62
Figura 7-1.- Tramo de estero a modelar en HEC-RAS 76
Figura 7-2.- Esquema de modelo geométrico en HEC-RAS....77
Figura 7-3.- Condición de borde aguas arriba del tramo estudiado. 78
Figura 7-4.- Condición de borde aguas abajo del tramo estudiado 79
Figura 7-5.- Condición de borde sección 5 del tramo estudiado....79
Figura 7-6.- Perfil de superficie de agua a lo largo del tramo estudiado. 80

Figura 7-7.- Variación niveles de agua en Puente Ecuador el 06/08/2015 81
Figura 7-8.- Variación niveles de agua en sector norte Puente Ecuador - 06/08/2015 82
Figura 7-9.- Nivel de agua en Puente Ecuador a las 15:00 hrs del 06/08/2015 83
Figura 7-10.- Variación del desnivel DH en Puente Ecuador 83
Figura 8-1.- Precipitación observada versus prevista. Estación Las Salinas 88
Figura 8-2.- Precipitación observada versus prevista. Estación Rodelillo 88
Figura 8-3.- Precipitación observada versus prevista. Estación Quilpué 88
Figura 8-4.- Precipitación observada versus prevista. Estación Villa Alemana 89
Figura 8-5.- Hidrogramas de crecida pronosticados para Junta J-S49 90
Figura 11-1.- Imagen satelital Embalse Carrizo 107
Figura 11-2.- Curva de Almacenamiento Embalse Carrizo 108
Figura 11-3.- Imagen Satelital Embalse El Recreo 111
Figura 11-4.- Curva de Almacenamiento Embalse Recreo 112
Figura 11-5.- Imagen Satelital Embalse La Poza Azul 115
Figura 11-6.- Curva de Almacenamiento Embalse La Poza Azul 116
Figura 11-7.- Imagen Satelital Embalse Las Palmas 119
Figura 11-8.- Caudal Simulado en Junta S-48 (1 Norte con Los Castaños) 120
Figura 11-9.- Caudal Simulado en Junta S-49 (Desembocadura) 120
Figura 11-10.- Hidrograma de Crecida para J-S48 con Modelo Original 129
Figura 11-11.- Hidrograma de Crecida para J-S49 con Modelo Original 129
Figura 11-12.- Hidrograma de Crecida para J-S48 con CN Original reducida en 10% 130
Figura 11-13.- Hidrograma de Crecida para J-S49 con CN Original reducida en 10% 130
Figura 11-14.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 5 días del evento 136
Figura 11-15.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 5 días del evento 136
Figura 11-16.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 2 días del evento 137
Figura 11-17.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 2 días del evento 137
Figura 11-18.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo WRF a 2 días del evento 138
Figura 11-19.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 1 día del evento 138
Figura 11-20.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 1 día del evento 139
Figura 11-21.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo WRF a 1 día del evento 139
Figura 11-22.- Interfaz de Usuario Modelo de Cuenca "ANALISIS_FINAL_06082015.hms" 141
Figura 11-23.- Despliegue de resultados de simulación "ANALISIS_FINAL_06082015.hms" 142
Figura 11-24.- Despliegue de resultados de simulación "ANALISIS_FINAL_06082015.hms" para elemento Junta-S49 143

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

Los estudios de crecidas son una de las herramientas empleadas más frecuentemente en hidrología puesto que permiten estimar caudal que escurre por un cauce producto de un evento de precipitación o deshielo dado.

El conocimiento anticipado de los eventos meteorológicos que podrían ocasionar crecidas de importancia permiten a las autoridades y a la población en general tomar las precauciones necesarias para minimizar eventuales daños. Desde esta perspectiva la predicción meteorológica constituye una herramienta de apoyo a la mitigación de amenazas de la naturaleza en la medida que permite conocer con cierta precisión los estados de la atmósfera que determinan el comportamiento de los sistemas hidrológicos.

El trabajo que se presenta está enfocado al pronóstico de crecidas y estimación de niveles de agua en el Estero Marga-Marga, en el sector de Viña del Mar en el escenario de un evento de precipitación pronosticado y alude a la necesidad de generar alertas ante crecidas con la mayor antelación posible a fin de evitar daños.

1.2 Objetivos del estudio

Los objetivos en que se enmarca la presente memoria son los siguientes:

1.2.1 Objetivo general:

Desarrollar una metodología que permita realizar un pronóstico de crecidas y estimación de niveles de agua en el Estero Marga-Marga, sector Viña del Mar.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Revisión del estado del arte en el pronóstico del tiempo y en particular de las precipitaciones, explicando las características de los principales modelos utilizados.

- Selección de modelos de pronóstico meteorológico a utilizar para el pronóstico de precipitaciones, en base al ajuste con respecto a los valores medidos en las estaciones seleccionadas para el desarrollo del estudio.

- Análisis de los modelos precipitación-escorrentía existentes y selección de modelo a utilizar para pronóstico de caudales.

- Simulación hidrológica de diversos eventos de precipitación ocurridos entre los años 2015-2016.

- Análisis de caudales de crecida obtenidos mediante la simulación hidrológica de la tormenta ocurrida entre los días 05 y 06 de agosto de 2015 que constituye el evento de precipitaciones más importante registrado del año y que presenta un periodo de retorno del orden de 5 años.

- Obtención de niveles de agua en diversas secciones del Estero Marga-Marga para el evento analizado (05-06 de agosto de 2015) en base a modelo de Ejes Hidráulicos e ingresando los hidrogramas obtenidos como condición de borde.

- Validación y pre-calibración de parámetros mediante comparación de los niveles de agua calculados con los observados en diversas secciones del estero.

- Obtención de Pronósticos de Crecida y niveles de agua en estero para la tormenta del 05-06 de agosto de 2015 a partir de los pronósticos de precipitación de los modelos GFS, ECMWF y WRF con antelaciones de 5 días, 2 días y 1 día.

- Comparación de hidrogramas de crecidas "pronosticados" versus hidrogramas de crecidas obtenidos a partir del registro de precipitaciones del evento.

1.3 Alcances del estudio

Los alcances de la presente memoria se limitan a la aplicación de los resultados en el Estero Marga-Marga en el sector de Viña del Mar. Si bien es cierto que la metodología de pronóstico de caudales que se propone puede emplearse en otros casos, la calibración debe realizarse para las condiciones particulares de cada cuenca.

1.4 Estructura de la memoria

La presente memoria se ha estructurado en once capítulos, los cuales se reseñan brevemente a continuación:

En el primer capítulo, se realiza un resumen del estudio, definiendo objetivos, alcances, y estructura de la memoria.

En el Capítulo N° 2 se realiza una descripción de la cuenca del Estero Marga-Marga, objeto del presente estudio. En este capítulo se exponen los antecedentes necesarios para la realización de las etapas posteriores del estudio y que fueron obtenidos mediante revisión de antecedentes cartográficos, aerofotogramétricos, hidrológicos, hidráulicos, entre otros.

En el Capítulo N° 3 denominado "Pronóstico de Precipitaciones" se revisa el estado del arte en la predicción meteorológica y en particular de las precipitaciones seleccionando algunos modelos numéricos para evaluar su habilidad de pronóstico mediante análisis comparativo de la precipitación observada en las estaciones meteorológicas seleccionadas versus la precipitación prevista para éstas.

En el Capítulo N° 4 se realiza una descripción del modelo Precipitación-Escorrentía que permitirá la obtención de caudales a partir de las precipitaciones.

En el Capítulo N° 5, se describe el sistema de modelación HEC-HMS con el cual se realizará la simulación hidrológica. Se presentan los componentes del programa y el procesamiento que se le dará a la cuenca con el fin de desarrollar el modelo de cuenca del Estero Marga-Marga.

En el Capítulo N° 6, se desarrolla y describe el modelo hidrológico para la cuenca en estudio, implementado en HEC-HMS. El modelo se compone de un modelo de cuenca y un modelo meteorológico, con sus respectivos métodos de cálculo y parámetros.

En el Capítulo N° 7, se presentan los procesos validación y pre-calibración del modelo hidrológico, realizados con el fin de verificar los parámetros adoptados. Para ello se utiliza el modelo de Ejes Hidráulicos implementado en HEC-RAS que permite obtener los niveles de agua en el estero asociados a un hidrograma de crecidas.

En el Capítulo N° 8, se realiza el pronóstico de caudales y niveles de agua en el Estero Marga-Marga en base a los pronósticos de precipitación, al modelo hidrológico y al modelo de Ejes Hidráulicos.

En el Capítulo N° 9 se exponen las principales conclusiones del estudio y se realizan recomendaciones para la aplicación del método de pronóstico de crecidas propuesto.

Los Capítulos N° 10 y N° 11 contienen las Referencias y los Anexos del presente informe.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA DEL ESTERO MARGA-MARGA

2.1 Introducción

La cuenca del Estero Marga-Marga está clasificada como una cuenca exorreica perteneciente al grupo denominado Cuencas Costeras entre Aconcagua y Maipo, según el Inventario Público de Cuencas Hidrográficas de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Posee una hoya hidrográfica de superficie estimada en 424[km^2] y su estructura geográfica está constituida por el sistema de drenaje natural de las ciudades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana. Este sistema está conformado por el estero Marga-Marga, sus afluentes principales que son el Estero Quilpué, el Estero Las Palmas y toda la red de tributarios menores de estos últimos (Estero Moscoso, Estero El Fullero, Estero El Carrizo, Estero Los Colihues).

En el presente capítulo se realizará una descripción de la cuenca del Estero Marga-Marga, considerando sus principales características geográficas, topográficas, climatológicas, geológicas e hidrológicas.

2.2 Características generales

2.2.1 Ubicación geográfica

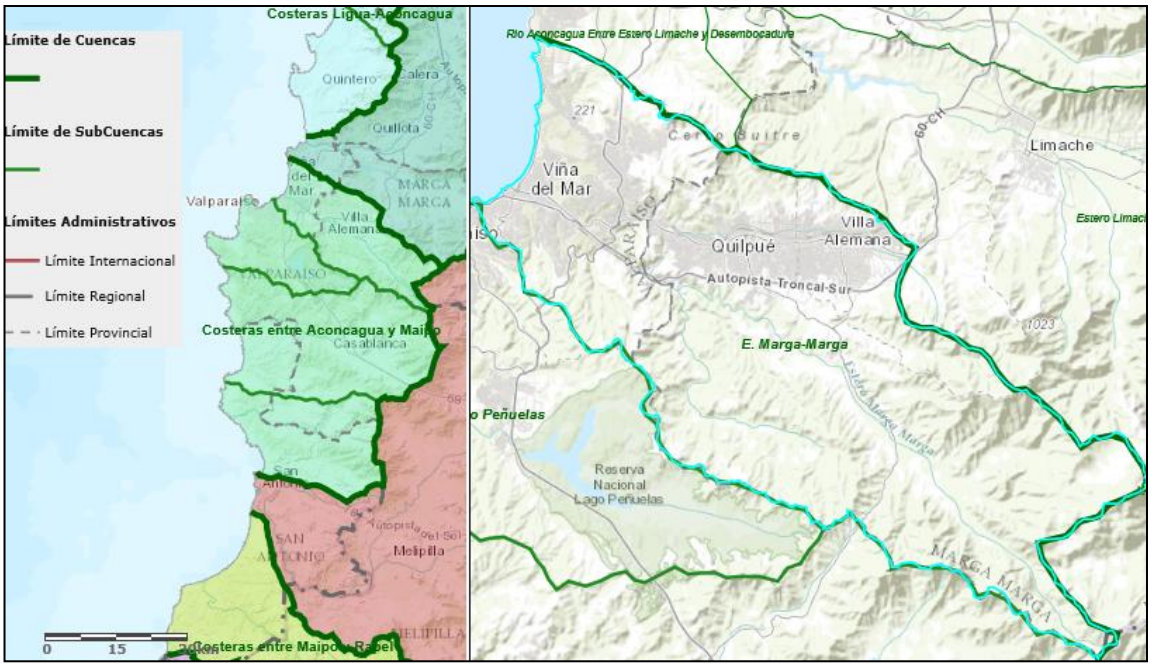
La cuenca del Estero Marga-Marga se ubica en la región de Valparaíso desarrollándose en las Provincias de Valparaíso y Marga-Marga entre los meridianos 71º12’ y 71º35’ longitud oeste y entre los paralelos 33º00’ y 33º14’ de latitud sur. La orientación principal de la cuenca es en sentido Este-Oeste mostrando una leve tendencia a desviarse hacia el Nor-Oeste. .

Las localidades y ciudades más importantes ubicadas en la cuenca son: Peñablanca, Villa Alemana, El Belloto, Quilpué y Viña del Mar.

La Figura 2-1 muestra la ubicación del área de estudio y sus límites relevantes.

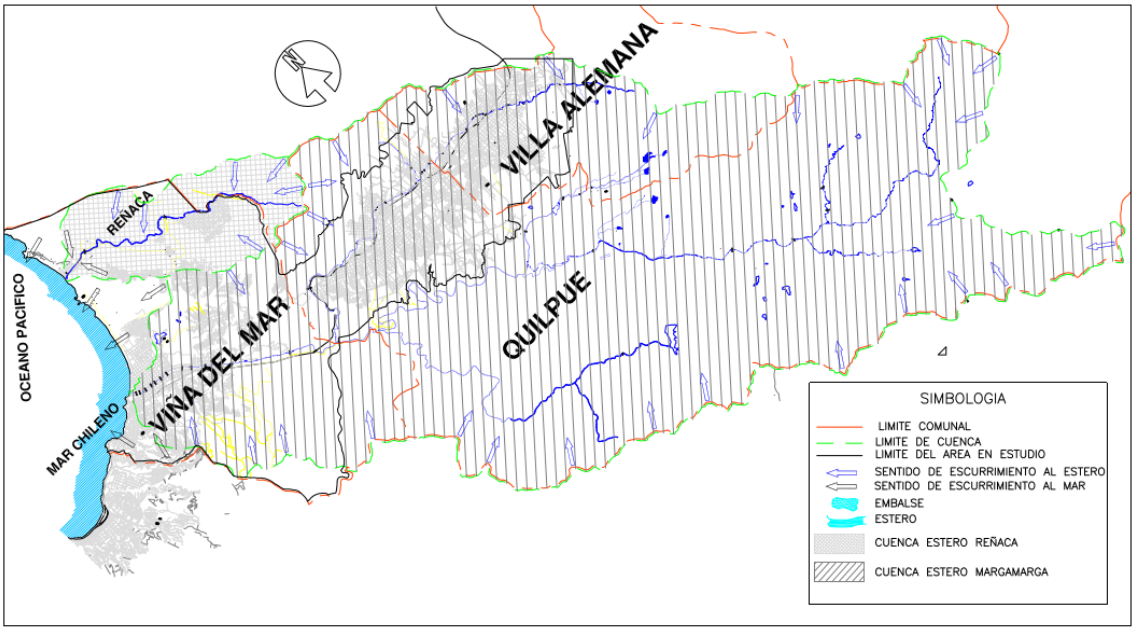
En la Figura 2-2 se muestra el sistema de drenaje natural de la cuenca, los principales cauces afluentes y embalses existentes en el área de estudio.

Figura 2-1.- Área en estudio y límites relevantes. Cuenca Estero Marga-Marga



Fuente: Inventario Público de Cuencas Hidrográficas, DGA Ministerio de Obras Públicas

Figura 2-2.- Patrón de drenaje de la cuenca, principales cauces y embalses.



Fuente: Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar [Ref.1]

2.2.2 Clima

La cuenca en estudio se encuentra ubicada según la clasificación de Koeppen, en una zona con clima templado-cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (7 a 8 meses) y gran nubosidad, extendiéndose este clima por el litoral desde Zapallar hasta una latitud de 35º S.

La nubosidad presenta una oscilación diaria característica del régimen anticiclónico, especialmente en los meses de verano cuando la cobertura de cielo de origen frontal es menos frecuente.

Debido a la proximidad al mar, la humedad es mayor y las oscilaciones diarias y estacionales de la temperatura son menores.

Los vientos dominantes son los de Sur-Oeste, con gran fuerza en la costa y moderados en el interior. En invierno dominan los vientos del Nor-Oeste, causantes de lluvias puesto que provienen de zonas más cálidas.

La Tabla 2-1 muestra las características climáticas más relevantes de la zona según mediciones y estadísticas correspondientes a la estación meteorológica Faro Punta de Ángeles de Valparaíso.

Tabla 2-1 Características climáticas del área en estudio

Temperatura media anual.	14.5 [ºC]
Dirección predominante del viento	Sur-Oeste
Días con Nubosidad > 8 (décimos de cielo)	94.3 [días/año]
Días con Nubosidad < 2 (décimos de cielo)	117.6 [días/año]
Amplitud anual de Temperatura	5.7 [ºC]
Amplitud diaria de Temperatura	8.3 [ºC]
Precipitación media	376.5 [mm/año]
Evaporación (de Tanque A)	1134 [mm/año]
Nº Promedio de días con Precipitaciones	32.3 días en Viña del Mar
	23.8 días en Quilpué y Villa Alemana

2.2.3 Aspectos geomorfológicos de la cuenca

La cuenca hidrológica del Estero Marga-Marga está emplazada mayoritariamente dentro de un dominio geomorfológico que corresponde a un relieve maduro y suave, caracterizado por niveles de terrazas de abrasión marina, cuya altura promedio varía entre los 100 y 500 [m.s.n.m.]. Estas unidades de suelos se encuentran localizadas casi en su totalidad sobre los cauces y valles más importantes que conforman la cuenca.

Alejándose de la costa en dirección al nacimiento del Estero Marga-Marga, el paisaje geomorfológico está caracterizado por un relieve abrupto y montañoso, que en este sector sobrepasa los 1.000 [m.s.n.m].

A lo largo de su recorrido, el Estero del Marga-Marga recibe las aguas del Estero Moscoso por su ribera Norte, el Estero Las Palmas por su ribera Sur y finalmente, el Estero de Quilpué por la ribera Norte, desde este punto hasta su desembocadura el estero pasa a llamarse Estero de Viña del Mar. La longitud total del cauce principal de la cuenca del Marga-Marga (Estero Viña del Mar, Estero Marga-Marga y Estero Carrizo) es de aproximadamente 46,9 [Km] con una pendiente media del 2,4%

La cuenca se desarrolla tanto en área no intervenida como en área urbana. Esta última, se encuentra emplazada sobre un territorio montañoso que presenta hacia el interior sectores con mesetas de pendientes suaves interrumpidas por quebradas de profundidades variables mientras que hacia la costa predominan pequeños llanos de sedimentación pluvial.

El área urbanizada de la cuenca se ha desarrollado en torno a los centros urbanos de las comunas de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana. En la actualidad la superficie del área urbana del Gran Viña del Mar, asciende a más de 7.000 hectáreas, la cual de acuerdo a estimaciones realizadas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, alcanzará un tamaño cercano a las 9.000 al año 2023 [Ref. 2].

3 PRONÓSTICO DE PRECIPITACIONES

3.1 Marco teórico

3.1.1 Introducción

En este capítulo se revisa el estado del arte en el pronóstico del tiempo describiendo los principales modelos numéricos utilizados para la predicción meteorológica.

El objetivo de este capítulo es presentar una base teórica para el pronóstico del estado de la atmósfera y en particular de las precipitaciones como variable fundamental para el desarrollo de este estudio.

3.1.2 Conceptos básicos del pronóstico del tiempo

El pronóstico del tiempo es una descripción del estado futuro de la atmósfera en una región determinada obtenido a partir del conocimiento de los procesos atmosféricos y utilizando datos del estado actual de la atmósfera. La precisión del pronóstico producido radica fundamentalmente en una buena descripción del estado inicial de la atmósfera.

Los pronósticos pueden ser predicciones inmediatas, a corto, mediano o largo plazo e incluso estacionales, sin embargo, la complejidad de los fenómenos atmosféricos y la falta de comprensión de los patrones y procesos meteorológicos hace que estas predicciones sean menos confiables al incrementarse el rango temporal del pronóstico

El proceso de generación de un pronóstico del tiempo, consta de los siguientes subprocesos:

Recopilación de datos. Estos pueden provenir de estaciones meteorológicas, satélites meteorológicos, radares Doppler y/o globos meteorológicos.

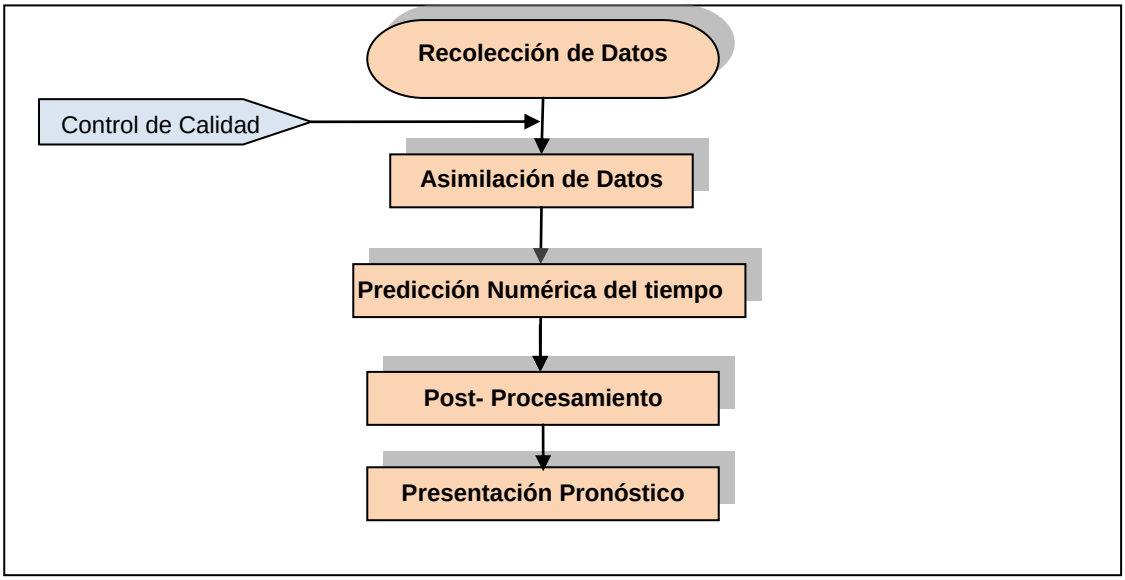
Asimilación de Datos. Es el proceso mediante el cual los datos observados son incorporados al modelo de predicción para generar el pronóstico. Se realiza para controlar errores y generar condiciones iniciales para las subsiguientes corridas del modelo.

Predicción Numérica del tiempo. Los modelos de predicción numérica del tiempo (NWP) usan modelos matemáticos de la atmósfera para predecir el tiempo basados en las condiciones actuales de éste. Existen diversos modelos numéricos de predicción que son utilizados para realizar pronósticos del tiempo, tal como se explica en 3.1.3.

Post-procesamiento de los modelos de salida: En general, la salida de los modelos numéricos no corresponde directamente a un pronóstico del tiempo, por lo que deben analizarse estadísticamente con el fin de generar modelos de predicción. Actualmente los pronósticos operacionales usan un amplio rango de modelos así como la combinación de modelos globales y locales

Presentación del pronóstico a los usuarios. Se realiza mediante la publicación en sitios de internet, emisiones radio/televisión/prensa, etc.

Figura 3-1.- Proceso de pronóstico del tiempo



Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Modelos de predicción meteorológica

3.1.3.1 Generalidades

Los modelos meteorológicos son programas informáticos que producen información meteorológica (tales como temperaturas, vientos, precipitaciones, humedad del suelo, entre otros) correspondiente a un estado futuro de la atmósfera mediante una estimación del presente de ésta.

Existen varios modelos de predicción que han sido desarrollados por diversas agencias y organismos alrededor del mundo. Estos modelos utilizan diversas metodologías para pronosticar la evolución de las variables meteorológicas y pueden clasificarse de acuerdo a las escalas espaciales en las que son aplicables. En efecto, de acuerdo a su resolución espacial los modelos de predicción meteorológica pueden clasificarse en globales y regionales o de mesoescala.

Los modelos globales realizan pronósticos numéricos del tiempo a escala mundial, los modelos de meso-escala permiten reproducir fenómenos meteorológicos a un nivel acotado a cierta parte del planeta y por lo tanto tienen mejor resolución espacial que los modelos globales.

3.1.3.2 Modelos de escala global

Dentro de los modelos de escala global se puede mencionar los siguientes:

***GFS** (Global Forecast System)*

GFS en un modelo de predicción desarrollado por NCEP (National Centers for Environmental Prediction) dependiente de la agencia de Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos, NOAA y es uno de los cuatro modelos más utilizados para la predicción meteorológica a medio plazo y a escala sinóptica [Ref. 3].

El GFS está compuesto por cuatro modelos acoplados, un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de tierra/suelo y un modelo de hielo marino. Estos modelos trabajan juntos para proveer mayor precisión en la representación de las condiciones climáticas.

El modelo GFS se ejecuta o actualiza cuatro veces al día (00, 06, 12 y 18 UTC) generando pronósticos de hasta 16 días (384 horas). La resolución del pronóstico hasta 10 días (240 horas) es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 28[Km] con 64 niveles verticales. En tiempos de pronóstico posteriores, el GFS tiene una resolución equivalente a cerca de 70[Km] de resolución y 64 niveles hasta el día 16 (384 horas). Los pronósticos tienen escala temporal de 3 horas en las primeras 240 horas, a partir de la hora 240 y hasta la hora 384 el intervalo de tiempo del pronóstico es de 12 horas

Este modelo también se utiliza para generar modelos de predicción estadísticos (MOS), tanto a corto plazo (cada 3 horas hasta las 72 primeras horas) como a medio plazo (cada 12 horas hasta los 8 primeros días).

Para inicializar los pronósticos el GFS utiliza información que proviene de GDAS (Global Data Assimilation System).

El modelo global GFS tiene sus datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet (a través de servidores NOMADS), por lo cual es ampliamente utilizado por empresas, agencias e institutos meteorológicos como por ejemplo, AccuWeather, The Weather Channel, MeteoGroup, entre otras, para generar sus propios productos de predicción derivados.

ECMWF-IFS *(Integrated Forecast System)*

El IFS es un sistema integral de modelos de pronósticos meteorológicos y asimilación de datos desarrollado y mantenido por el ECMWF*(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)* [Ref.4].

El IFS, también conocido como "ECMWF" o "modelo europeo", es un sistema acoplado compuesto por un modelo de circulación general atmosférica, un modelo de océano (ondas), un modelo de superficie tierra/suelo, un modelo de circulación general oceánica y modelos de perturbación para asimilación de datos.

IFS utiliza el concepto de pronóstico por conjuntos ("ensembles") para generar una solución representativa de posibles estados futuros de la atmósfera, los pronósticos pueden ser provenientes de diferentes modelos o provenir de diferentes formulaciones de un mismo modelo. Esta forma de pronóstico es utilizada en la actualidad por la mayoría de los centros operacionales de pronóstico con el objeto de abordar la naturaleza de la incertidumbre en las observaciones meteorológicas que se utilizan para inicializar los modelos de predicción. Esto bajo el punto de vista que pequeñas diferencias (imperceptibles entre la realidad y lo que se mide realmente) pueden con el tiempo dar lugar a diferencias notables entre lo que predice el modelo y la realidad.

Para los pronósticos de mediano alcance, el sistema cuenta con 52 miembros individuales que se actualizan dos veces al día. Uno de los miembros con mayor resolución espacial es el HRES (grilla de 16[Km] con 137 niveles verticales) que proporciona una descripción muy detallada del tiempo futuro y entrega en promedio el pronóstico más exacto para un período de 10 días. Sin embargo, no presenta la misma habilidad para cualquier pronóstico en particular. Otro miembro del conjunto corresponde al CNTL, posee características similares al HRES pero posee menor resolución espacial. Los 50 miembros restantes del conjunto son similares al CNTL pero sus condiciones iniciales y modelos físicos han sido perturbados para analizar la incertidumbre y confiabilidad en las observaciones y el modelo.

El modelo de "ensembles" (ENS) se actualiza dos veces al día (10:00 y 23:00 UTC) generando pronósticos de hasta 10 días (240 horas). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 32[Km] con 91 niveles verticales. Los pronósticos tienen escala temporal de 6 horas.

El IFS también permite realizar pronósticos de alcance extendido que entregan visión general de las condiciones futuras de 10 a 32 días. Para ello el sistema cuenta con 51 miembros individuales (ENS) que se actualizan dos veces por semana (lunes y jueves). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 64[Km] con 91 niveles verticales.

Los pronósticos de largo alcance proporcionan información acerca de las condiciones atmosféricas y oceánicas promediados en los próximos meses. A pesar de la naturaleza caótica de la atmósfera, las predicciones a largo plazo se basan en una serie de componentes que a su vez muestran variaciones en escalas largas de tiempo (estaciones y años) y, en cierta medida, son predecibles. El más importante de estos componentes es el ciclo ENSO (El Niño Southern Oscillation) y si bien se trata de un

fenómeno acoplado océano-atmósfera centrado sobre el Pacífico tropical, la influencia de sus fluctuaciones se extiende por todo el mundo.

Al igual que en los rangos medianos y cortos, los pronósticos de largo alcance son producidos por el IFS a través del modelo acoplado océano-atmósfera. El modelo se ejecuta hacia adelante en el tiempo para un rango de varios meses (de 0 a 7 meses para pronostico mensual y de 0 a 13 meses para pronostico anual); esto se repite muchas veces, con ligeras variaciones para representar incertidumbres en el proceso de pronóstico y así generar los pronósticos por conjuntos o "ensembles". En este caso se habla de pronóstico estacional del clima, siendo definido este como un resumen estadístico de los eventos del tiempo ocurridos en un tiempo determinado. La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 80[Km] con 91 niveles verticales.

NAVGEM *(Navy Global Environmental Model)*

NAVGEM es un modelo de predicción numérico del tiempo mantenido por el Centro de Meteorología y Oceanografía de la Armada de Estados Unidos. Es junto a GFS e IFS uno de los modelos más utilizados para la predicción meteorológica a mediano alcance y a escala sinóptica [Ref. 5].

El modelo NAVGEM entró en funcionamiento en febrero de 2013, en reemplazo de NOGAPS. Se actualiza dos veces por día y hasta 7.5 días (180 horas). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 37[Km] con 50 niveles en la vertical. Los pronósticos tienen escala temporal de 6 horas hasta 96 horas, a partir de la hora 96 y hasta la hora 180 el intervalo de tiempo del pronóstico es de 12 horas.

GEM *(Global Environmental Multiscale Model)*

GEM es un sistema integrado de pronósticos meteorológicos y asimilación de datos desarrollado por el RPN (Recherche en Prévision Numérique), MRB(Meteorological Research Branch) y CMC (Canadian Meteorological Centre) [Ref. 6].

El modelo GEM ha sido desarrollado para satisfacer las necesidades operacionales de predicción meteorológica de Canadá para los próximos años y está actualmente operacional para pronósticos de corto alcance a nivel regional y mediano alcance a nivel global. En el futuro se pretende incluir la predicción inmediata a meso-escala, y la previsión dinámica de autonomía extendida mensual a escalas de tiempo estacionales.

El modelo GEM se ejecuta dos veces al día (10:00 y 23:00 UTC) ofreciendo pronósticos de hasta 6 días (144 horas). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla global variable entre 29[Km] y 35[Km] con 28 niveles verticales. Los pronósticos tienen escala temporal de 3 horas.

***CFS** (Climate Forecast System)*

CFS es un modelo de predicción numérico del tiempo y modelo climático desarrollado y mantenido por NCEP (National Centers for Environmental Prediction), actualmente se encuentra operativa la versión 2 del modelo, denominada CFSv2 [Ref. 7].

El CFSv2 es un modelo acoplado compuesto por un modelo de circulación general atmosférica, un modelo de superficie tierra/suelo y un modelo oceánico. Sus pronósticos son derivados de un conjunto de 16 miembros. La versión actual de CFS es la versión 2, CFSv2, que está operativa desde 2011 y que cuenta con mejoras en la asimilación de datos y componentes del modelo de pronóstico.

El CFSv2 se actualiza cuatro veces por día (a las horas 00, 06, 12 y 18Z) en diversas escalas de tiempo. La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 56[Km]. Los modelos de pronósticos a mediano plazo se presentan en intervalos de una semana y hasta 4 semanas, mientras que los pronósticos a largo plazo se presentan en intervalos de 1 mes y hasta 9 meses. La escala de corto plazo es traslapada con los modelos GFS, NAVGEM y FIM, también simulados por el Gobierno de Estados Unidos.

***GSM-JMA** (Japan Meteorological Agency)*

GSM-JMA es el modelo de pronóstico meteorológico global de la Agencia Meteorológica de Japón y permite pronósticos de mediano y largo alcance [Ref. 8].

El modelo se actualiza cuatro veces al día (00, 06, 12 y 18 UTC) y hasta 264 horas (11 días). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 20[Km] con 100 niveles verticales. Los pronósticos tienen escala temporal de 6 horas para las primeras 84 horas, a partir de la hora 84 y hasta la hora 264 el intervalo de tiempo del pronóstico es de 12 horas.

***NAEFS** (North American Ensemble Forecast System)*

NAEFS es un sistema de pronósticos basado en el concepto de pronóstico por conjuntos (también conocido como CMC ENSEMBLES), desarrollado de manera conjunta por el MSC (Meteorological Service of Canada), NWS (United States National Weather Service) y NMS (National Meteorological Service of Mexico) [Ref. 9].

Fue lanzado oficialmente en noviembre de 2004 y su desarrollo refleja el estado del arte en los pronósticos de conjuntos desarrollados tanto por el Servicio Meteorológico de Canadá como por el Servicio Nacional del Clima de Estados Unidos. Como resultado, el sistema permite obtener pronósticos del tiempo de hasta 14 días con mayor precisión que si se considera los pronósticos de conjuntos de cada organismo por separado.

El modelo se actualiza dos veces al día (0:00 y 12:00 UTC) y hasta 14 días (336 horas). La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 37[Km]. Los pronósticos tienen escala temporal de 3 horas.

3.1.3.3 Modelos de mesoescala

Los modelos de meso-escala más conocidos son :

MM5 *(Mesoscale Model 5)*

El modelo meteorológico de meso-escala de quinta generación MM5 fue desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (Penn State University, PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos (NCAR) [Ref. 10].

El MM5 es ampliamente utilizado en universidades e instituciones por su alta definición en la detección de sistemas atmosféricos de meso-escala y por su capacidad de adaptación a las condiciones específicas de diversas regiones.

En Chile, el modelo MM5 es empleado por la Dirección Meteorológica de Chile desde marzo del 2001 donde se ejecuta o actualiza dos veces al día (00 y 12 UTC) hasta 72 horas (3 días). La resolución del pronóstico depende de los dominios definidos y es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 60[Km] en el dominio 2 (dominio madre) y 20[Km] en el dominio 3 (dominio anidado). En la actualidad la DMC no incluye las salidas de este modelo como parte de sus pronósticos.

WRF *(Weather Research and Forecasting)*

El WRF es un sistema de predicción numérico de meso-escala de última generación diseñado tanto para la investigación de la atmósfera como para la generación de pronósticos. Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que permite la paralelización de procesos.

El desarrollo de WRF comenzó a principio de los años 90 como el sucesor de MM5. Las principales entidades que colaboraron en este proyecto fueron NCAR (National Center for Atmospheric Research), NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration /National Centers for Environmental Prediction), FSL (Forecast Systems Laboratory), AFWA (Air Force Weather Agency), NLR (Naval Research Laboratory), FAA(Federal Aviation Administration) y la Universidad de Oklahoma.

WRF permite generar simulaciones considerando datos reales o en condiciones de atmósfera idealizada. También ofrece una eficiente y flexible plataforma para la generación de pronósticos, basada en la contribución de los últimos avances en física, modelado numérico y técnicas de asimilación de datos. Actualmente se encuentra operacional en el NCEP, AFWA y otros centros.

El sistema WRF ofrece dos diferentes módulos para la resolución de las ecuaciones que describen el comportamiento de la atmósfera, WRF-ARW (Advanced Reserch WRF) y WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). WRF-ARW es respaldado por la división de Meteorología de Mesosescala y Microescala del NCAR(National Center for Atmospheric Research) mientras que WRF-NMM es respaldado por el DTC (Developmental Testbed Center). El WRF es de dominio público y libremente disponible para el uso de la comunidad.

En Chile, el modelo WRF es empleado por la Dirección Meteorológica de Chile donde se ejecuta o actualiza dos veces al día (00 y 12 UTC) hasta 120 horas (5 días). La resolución del pronóstico depende de los dominios definidos y es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 60[Km] en el dominio 2 (dominio madre) y 20[Km] en el dominio 3 (dominio anidado). Los pronósticos tienen escala temporal de 3 horas.

En otras plataformas, tales como Windguru, el modelo WRF se ejecuta o actualiza cuatro veces al día (00, 06, 12 y 18 UTC) ofreciendo pronósticos para 78 horas en tramos de 1 hora. Los pronósticos incluyen velocidad, dirección y ráfagas de viento, temperatura nubosidad total y precipitaciones. La resolución del pronóstico es equivalente a una resolución de malla de aproximadamente 12[Km] con 28 niveles verticales para Chile y Uruguay. Las condiciones iniciales y de contorno provienen del modelo global GFS.

3.1.4 Incerteza de modelos de predicción meteorológica

La precipitación es una de las variables atmosféricas más difíciles de predecir con precisión porque en general es complicado para los modelos representar la dinámica de las nubes y los procesos microfísicos involucrados en la generación de la precipitación.

Los errores en la predicción cuantitativa de la precipitación pueden deberse principalmente a errores en las observaciones y a errores propios de cada modelo de predicción. El conocimiento detallado de la humedad en la atmósfera y los campos con movimientos verticales son factores críticos para la predicción de la localización e intensidad de la precipitación, sin embargo son muy difíciles de conocer con precisión.

La precisión del pronóstico producido por los modelos radica fundamentalmente en una buena descripción del estado inicial de la atmósfera. El proceso de interpretación de este estado inicial juega un rol fundamental puesto que la óptima combinación de datos observados con un pronóstico de corto plazo permite obtener una adecuada asimilación de datos y consecuentemente un buen pronóstico.

Aunque en la actualidad el desempeño de los modelos numéricos de predicción del tiempo ha evolucionado significativamente, todavía se pueden producir imprecisiones en los modelos debido fundamentalmente a los siguientes factores:

- Falta de potencia de cálculo. Mayor potencia de cálculo permitiría mejor resolución espacial, mayor área de cobertura y mayor longitud del pronóstico.

- Imprecisiones en datos de inicialización. En la actualidad, se toman los datos provenientes de globos sondas que son enviados al espacio y que permiten una visión tridimensional del estado actual de la atmósfera (datos de inicialización). Considerando que a partir de estos datos y mediante algoritmos numéricos es posible predecir el estado futuro de la atmósfera, se tiene que una mala inicialización puede generar un mal pronóstico.

- Imprecisiones en modelos propiamente tal. Esto se refiere a fallas ocasionales en sistemas numéricos y/o sesgos en relación con determinados sistemas meteorológicos o situaciones puntuales.

3.2 Pre-selección de modelos de predicción

En la presente memoria se empleará los modelos GFS, ECMWF y WRF para el pronóstico de las precipitaciones.

La selección de los modelos está basada en los siguientes criterios:

- Reputación de los modelos en cuanto a su habilidad de predecir acertadamente las diversas variables meteorológicas.

- Facilidad de acceso a los datos de salida numéricas de cada modelo lo que permite una interpretación más precisa de las condiciones atmosféricas. En efecto, existen plataformas que publican continuamente las actualizaciones de cada modelo, datos que pueden ser descargados con un tiempo de desfase de alrededor de tres horas.

3.2.1 Descripción de salidas de datos

Para el pronóstico de precipitaciones se utilizarán las salidas de datos provenientes de las actualizaciones de los modelos seleccionados que en general corresponden a tablas que contienen datos de precipitación esperados para un lugar geográfico definido por latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar.

El acceso a las actualizaciones de los modelos globales GFS y ECMWF se obtiene mediante la suscripción a la plataforma web Accuweather [1]. Las Tablas 3-1 y 3-2 muestran la actualización de los modelos GFS y ECMWF correspondientes al día 05 de agosto de 2015 a las 06 Z con un alcance de 8 días de predicciones para las coordenadas geográficas de la estación meteorológica Las Salinas (Dirección General de Aguas).

Para el modelo regional WRF, el acceso a los datos se obtiene mediante la suscripción a la plataforma web Windguru [2]. También es posible obtener los pronósticos de precipitaciones a partir de las publicaciones de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile, sin embargo el pronóstico publicado es general para la ciudad de Valparaíso no permitiendo obtener el pronóstico para las estaciones ubicadas en Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana. La Tabla 3-3 muestra la actualización del modelo WRF correspondiente al día 05 de agosto de 2015 a las 06 Z obtenida de la plataforma web Windguru para la estación meteorológica Las Salinas.

---

[1] http://proa.accuweather.com/

[2] http://www.windguru.cz/

Tabla 3-1 Actualización modelo GFS del 05/08/2015 a las 6Z, para estación Las Salinas

GFS 0.5 Degree FORECAST FOR: LAT = -33.00 LON = -71.55

	6 HR QPF (IN)	06Z 6 HR CVP (IN)	AUG05 6 HR NCP (IN)	SFC PCP TYPES	2 M TMP (C)
WED 06Z 05-AUG					14
WED 12Z 05-AUG	0	0	0		13.7
WED 18Z 05-AUG	0.01	0	0.01	RA	14.4
THU 00Z 06-AUG	0.28	0	0.28	RA	12.5
THU 06Z 06-AUG	0.37	0.01	0.36	RA	12.1
THU 12Z 06-AUG	1.13	0.04	1.09	RA	11.8
THU 18Z 06-AUG	1.36	0.04	1.33	RA	12.6
FRI 00Z 07-AUG	0.06	0.03	0.03	RA	12.1
FRI 06Z 07-AUG	0	0	0		10.5
FRI 12Z 07-AUG	0	0	0	RA	11.3
FRI 18Z 07-AUG	0	0	0	RA	15
SAT 00Z 08-AUG	0.07	0.07	0	RA	12
SAT 06Z 08-AUG	0.37	0.34	0.03	RA	13
SAT 12Z 08-AUG	0.85	0.42	0.42	RA	12.2
SAT 18Z 08-AUG	0.23	0.23	0	RA	11.4
SUN 00Z 09-AUG	0.03	0.02	0	RA	8.4
SUN 06Z 09-AUG	0	0	0		7.8
SUN 12Z 09-AUG	0	0	0		8.1
SUN 18Z 09-AUG	0	0	0		13.4
SUN 18Z 09-AUG	0	0	0		13.4
MON 00Z 10-AUG	0	0	0		8.4
MON 06Z 10-AUG	0	0	0		8.8
MON 12Z 10-AUG	0	0	0		9.3
MON 18Z 10-AUG	0	0	0		15.3
TUE 00Z 11-AUG	0	0	0		10.8

Fuente: http://pro.accuweather.com/

QPF: Precipitación total (CVP+NCP), [in]

CVP: Precipitación convectiva, [in]

NCP: Precipitación no convectiva, [in]

PCP Types: Tipo de Precipitación (RA: lluvia)

TMP: Temperatura media medida a 2[m] de la superficie, [°C]

Tabla 3-2 Actualización modelo ECMWF del 05/08/2015 a las 6Z, estación Las Salinas

ECMWF Deterministic FORECAST FOR: LAT = -33.00 LON = -71.55

06Z AUG05

	6 HR QPF (IN)	6 HR CVP (IN)	6 HR NCP (IN)	FROZN PCP (IN)	2 M TMP (C)
WED 00Z 05-AUG					14.4
WED 06Z 05-AUG	0	0	0	0	10.8
WED 12Z 05-AUG	0	0	0	0	12
WED 18Z 05-AUG	0	0	0	0	13.8
THU 00Z 06-AUG	0.15	0.07	0.09	0	11.4
THU 06Z 06-AUG	0.16	0.15	0.01	0	11.4
THU 12Z 06-AUG	0.31	0.13	0.19	0	11.6
THU 18Z 06-AUG	1.19	0.28	0.92	0	12
FRI 00Z 07-AUG	0.29	0.04	0.25	0	10.5
FRI 06Z 07-AUG	0.02	0	0.02	0	9.5
FRI 12Z 07-AUG	0.02	0.01	0.01	0	9.8
FRI 18Z 07-AUG	0.17	0.14	0.02	0	13.6
SAT 00Z 08-AUG	0.26	0.16	0.1	0	11.4
SAT 06Z 08-AUG	0.14	0.12	0.03	0	10.8
SAT 12Z 08-AUG	0.11	0.05	0.06	0	11.5
SAT 18Z 08-AUG	0.59	0.07	0.52	0	12.1
SUN 00Z 09-AUG	0.18	0.04	0.14	0	9.8
SUN 06Z 09-AUG	0.06	0.01	0.05	0	9.4
SUN 12Z 09-AUG	0	0	0	0	7.7
SUN 18Z 09-AUG	0.27	0.24	0.02	0	12.7
MON 00Z 10-AUG	0.16	0.14	0.02	0	9.5
MON 06Z 10-AUG	0	0	0	0	7.8
MON 12Z 10-AUG	0	0	0	0	8.6
MON 18Z 10-AUG	0	0	0	0	13.3
TUE 00Z 11-AUG	0.03	0	0.03	0	10.7

Fuente: http://pro.accuweather.com/

QPF: Precipitación total (CVP+NCP), [in]

CVP: Precipitación convectiva, [in]

NCP: Precipitación no convectiva, [in]

PCP FROZN: Precipitación sólida, [in]

TMP: Temperatura media medida a 2[m] de la superficie, [°C]

Tabla 3-3 Actualización modelo WRF del 05/08/2015 a las 0Z, estación Las Salinas

Chile - LAS SALINAS (pedrokamann) [Opciones]

Previsión | 2D | Mapa | Webcams | Informe de viento

WRF 12 km 05.08.2015 00 UTC	X 05. 04h	X 05. 05h	X 05. 06h	X 05. 07h	X 05. 08h	X 05. 09h	X 05. 10h	X 05. 11h	X 05. 12h	X 05. 13h	X 05. 14h	X 05. 15h	X 05. 16h	X 05. 17h	X 05. 18h	X 05. 19h	X 05. 20h	X 05. 21h	X 05. 22h	J 06. 04h	J 06. 05h	J 06. 06h	J 06. 07h	J 06. 08h	J 06. 09h	J 06. 10h	J 06. 11h	J 06. 12h	J 06. 13h	J 06. 14h
Velocidad viento (nudos)	3	4	6	6	4	1	2	3	8	6	5	8	9	8	7	6	7	11	12	13	17	20	21	20	22	22	26	27	30	31
Ráfagas (nudos)	4	4	7	7	4	2	3	4	12	16	19	19	20	18	16	14	18	28	32	34	38	41	41	40	42	44	47	51	52	52
Dirección viento	↙	↙	↙	←	↘	←	→	↘	↙	↙	↓	↘	↘	↘	↓	↓	↓	↙	↙	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
*Temperatura (°C)	13	13	14	14	14	13	13	12	13	14	15	16	15	15	15	15	13	13	12	12	13	13	13	13	12	12	12	13	13	13
Nubosidad (%) alta	100	100	99	100	86	97	99	100	100	97	99	100	100	100	100	100	100	100	100	96	48	84	92	96	100	99	95	91	100	100
Nubosidad (%) media	93	94	94	99	78	91	97	100	99	90	96	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nubosidad (%) baja																	26	59	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
*Precip. (mm/1h)																0.1	1.1	0.6	0.4	1.4	1.1	0.9	0.9	1.3	5.9	9.2	12.4	11.1	7.6	12.2
Valoración Windguru																			★	★	★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★

WRF 12 km 05.08.2015 00 UTC	J 06. 15h	J 06. 16h	J 06. 17h	J 06. 18h	J 06. 19h	J 06. 20h	J 06. 21h	J 06. 22h	V 07. 04h	V 07. 05h	V 07. 06h	V 07. 07h	V 07. 08h	V 07. 09h	V 07. 10h	V 07. 11h	V 07. 12h	V 07. 13h	V 07. 14h	V 07. 15h	V 07. 16h	V 07. 17h	V 07. 18h	V 07. 19h	V 07. 20h	V 07. 21h	V 07. 22h	S 08. 04h	S 08. 05h	S 08. 06h
Velocidad viento (nudos)	30	28	22	19	15	9	7	5	5	4	3	3	3	2	1	1	1	1	1	3	5	6	6	7	5	5	5	5	4	4
Ráfagas (nudos)	51	45	34	29	20	12	9	7	5	4	4	3	3	2	2	2	2	1	2	3	5	6	7	7	6	5	6	7	3	4
Dirección viento	↓	↘	↘	↘	→	→	→	↗	↗	↗	→	→	→	→	↘	↘	↘	→	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	→	↑	←	←
*Temperatura (°C)	13	14	14	14	14	14	14	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	13	12	12	10	10	10
Nubosidad (%) alta	99	100	56	15	40	72	92	92	82	45	57	67	65	55	48	44	45	32	28	18	14	39	89	95	7	94	23	96	100	100
Nubosidad (%) media	100	100	100	100	100	100	95	98	90	87	82	76	73	67	68	84	94	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	100
Nubosidad (%) baja	100	100	100	100	100	100	99	97	100	100	100	100	100	100	100	100	99	96	90	75	73	80	85	96	97	100	100	100	100	100
*Precip. (mm/1h)	9	6.9	10.5	7.1	3.4	1.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1		0.1	0.1	1	2.3	2.3	1.5
Valoración Windguru	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★	★																									

Lat: -33.0019, Lon: -71.5467, Alt: 29 m, Zona horaria: UTC (UTC+0) 11:36 - 22:08 [Detalle / Mapa] [Enlace]

http://www.windguru.cz/

3.3 Selección de estaciones meteorológicas

Con el objetivo de analizar la exactitud del pronóstico de precipitaciones se consideraron algunas estaciones meteorológicas existentes en la región. Adicionalmente, se instaló una estación meteorológica en Quilpué para registrar las precipitaciones a partir del mes de agosto del año 2015.

Todas las estaciones meteorológicas consideradas cuentan con pluviómetros y pluviógrafos que permiten registrar los eventos de precipitación.

3.3.1 Estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA)

Tabla 3-4 Coordenadas estación meteorológica Las Salinas

Nombre Estación	LAS SALINAS
Altitud	20 msnm
Latitud	33° 00' 07"
Longitud	71° 32' 48"
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	VIÑA DEL MAR

Tabla 3-5 Coordenadas estación meteorológica Rodelillo

Nombre Estación	RODELILLO
Altitud	110 msnm
Latitud	33° 03' 01"
Longitud	71° 34' 60"
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	VIÑA DEL MAR

Tabla 3-6 Coordenadas estación meteorológica Colliguay

Nombre Estación	COLLIGUAY
Altitud	490 msnm
Latitud	33° 10' 07"
Longitud	71° 08' 48"
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	QUILPUÉ

3.3.2 Estaciones meteorológicas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)

Tabla 3-7 Coordenadas estación meteorológica Viña del Mar

Nombre Estación	VIÑA DEL MAR
Altitud	30 msnm
Latitud	33º 01′ 26″
Longitud	71º 33′ 00″
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	VIÑA DEL MAR

Tabla 3-8 Coordenadas estación meteorológica Villa Alemana

Nombre Estación	VILLA ALEMANA
Altitud	200 msnm
Latitud	33º 03′ 40″
Longitud	71º 19′ 45″
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	VILLA ALEMANA

3.3.3 Estación meteorológica Quilpué

Tabla 3-9 Coordenadas estación meteorológica Quilpué

Nombre Estación	QUILPUÉ
Altitud	125 msnm
Latitud	33º 04′ 48″
Longitud	71º 24′ 08″
Región	DE VALPARAISO
Provincia	VALPARAISO
Comuna	QUILPUÉ

3.4 Descripción de eventos de precipitación

En el presente capítulo se describe los eventos de precipitación más importantes ocurridos durante el año 2015, informando los montos de agua caída registrados por las estaciones de monitoreo seleccionadas para el desarrollo de la presente memoria.

3.4.1 Evento de precipitaciones del 12 de julio de 2015

El sistema frontal afectó desde la región de Atacama a la Araucanía con precipitaciones moderadas en la Región de Valparaíso ocurridas aproximadamente entre las 3:00[hrs] y 15:30[hrs] del día 12 de julio de 2015.

Tabla 3-10 Montos de precipitación registrados en estaciones DGA

ESTACION /FECHA EVENTO	12 de Julio 2015
LAS SALINAS	13.9 [mm]
RODELILLO	28.4 [mm]
COLLIGUAY	91.5 [mm]

Fuente: DGA

Tabla 3-11 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV

ESTACION /FECHA EVENTO	12 de Julio 2015
VIÑA DEL MAR	22.8 [mm]
VILLA ALEMANA	45.2 [mm]

Fuente: Red de estaciones meteorológicas PUCV
http://geografiapucv.cl/meteorologia-2/

3.4.2 Evento de precipitaciones del 30 de julio de 2015

El sistema frontal afectó a la zona central del país con intenso temporal de viento y lluvias intermitentes en la zona costera y más intensas hacia el interior. El evento se extendió entre las17:00[hrs] y 22:00[hrs] del día 30 de julio de 2015

Tabla 3-12 Montos de precipitación registrados en estaciones DGA

ESTACION /FECHA EVENTO	30 de Julio 2015
LAS SALINAS	16.5 [mm]
RODELILLO	16.0 [mm]
COLLIGUAY	15.9 [mm]

Fuente: DGA

Tabla 3-13 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV

ESTACION /FECHA EVENTO	30 de Julio 2015
VIÑA DEL MAR	13.0 [mm]
VILLA ALEMANA	11.4 [mm]

Fuente: Red Estaciones Meteorológicas PUCV
http://geografiapucv.cl/meteorologia-2/

3.4.3 Evento de Precipitaciones del 05 al 06 de agosto de 2015

Este sistema frontal afectó con intensas precipitaciones y fuertes vientos a las regiones III. IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, y Metropolitana, entre el 05 y 06 de Agosto de 2015, generando anegamiento de viviendas y voladuras de techumbres, caminos cortados e inhabilitados y sectores con cortes de energía eléctrica. Se muestra a continuación, los importantes montos acumulados para las estaciones consideradas en este estudio incluyendo la estación Quilpué especialmente habilitada para registrar los eventos a partir del mes de agosto de 2015.

Tabla 3-14 Montos de Precipitación registrados en estaciones DGA

ESTACION /FECHA EVENTO	05-06 de Agosto	Hora inicio Hora término
LAS SALINAS	93.7 (mm)	05-08-2015 18:00 06-08-2015 16:30
RODELILLO	86.0 (mm)	05-08-2015 18:30 06-08-2015 19:45
COLLIGUAY	109.4 (mm)	05-08-2015 17:50 06-08-2015 19:00

Fuente: DGA

Tabla 3-15 Montos de Precipitación registrados en estaciones PUCV

ESTACION /FECHA EVENTO	05-06 de Agosto	Hora inicio Hora término
VIÑA DEL MAR	68.2 (mm)	05-08-2015 15:00 06-08-2015 16:10
VILLA ALEMANA	103.8 (mm)	05-08-2015 15:45 06-08-2015 17:45

Fuente: Red Estaciones Meteorológicas PUCV.
http://geografiapucv.cl/meteorologia-2/

Tabla 3-16 Montos de Precipitación registrados en estación Quilpué

ESTACION /FECHA EVENTO	05-06 de Agosto	Hora inicio Hora término
QUILPUE	109.4 (mm)	05-08-2015 14:45 06-08-2015 17:45

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.4 Evento de precipitaciones del 07 al 09 de agosto de 2015

Este sistema frontal afectó el litoral centro sur del país con fuertes vientos, marejadas, rompientes y precipitaciones moderadas, generando importantes daños en el borde costero. El evento se extendió aproximadamente desde el mediodía del 07 de agosto hasta el 09 de agosto de 2015.

Tabla 3-17 Montos de Precipitación registrados en estaciones DGA

ESTACION /FECHA EVENTO	07-09 de Agosto	Hora inicio Hora término
LAS SALINAS	54.7 [mm]	07-08-2015 12:14 09-08-2015 17:14
RODELILLO	83.0 [mm]	07-08-2015 11:15 09-08-2015 16:15
COLLIGUAY	28.4 [mm]	07-08-2015 04:50 09-08-2015 13:50

Fuente: DGA

Tabla 3-18 Montos de precipitación registrados en estaciones PUCV

ESTACION /FECHA EVENTO	07-09 de Agosto	Hora inicio Hora término
VIÑA DEL MAR	64.8 [mm]	07-08-2015 12:15 09-08-2015 17:15
VILLA ALEMANA	36.8 [mm]	07-08-2015 11:15 09-08-2015 17:15

Fuente: Red Estaciones Meteorológicas PUCV. http://geografiapucv.cl/meteorologia-2/

Tabla 3-19 Montos de Precipitación registrados en estación Quilpué

ESTACION /FECHA EVENTO	07-09 de Agosto	Hora inicio Hora término
QUILPUE	61.5 [mm]	07-08-2015 11:45 09-08-2015 17:45

Fuente: Elaboración Propia.

3.5 Evaluación de modelos de predicción para eventos de precipitación

Con el objetivo de evaluar la habilidad de los modelos seleccionados para pronosticar acertadamente los eventos de precipitación, se realiza un análisis comparativo de la precipitación observada en las estaciones meteorológicas versus la precipitación prevista para éstas considerando las salidas de los modelos a 10 días, 5 días, 2 días y 1 día del inicio del evento.

Las estaciones meteorológicas consideradas en la comparación son aquellas que registraron adecuadamente los eventos de precipitaciones más significativos del invierno 2015, ocurridos entre los días 05 y 09 de agosto. Los datos registrados se incluyen en el Anexo A del Capítulo 11 y corresponden a valores medidos en las estaciones Las Salinas, Rodelillo y Quilpué.

Dependiendo de la antelación considerada, es posible contar con la salida de uno o más modelos de predicción. En efecto, para el pronóstico a 10 días se cuenta únicamente con la salida del modelo GFS con escala temporal de 12 horas, con 5 días de antelación se tienen las salidas de los modelos ECMWF y GFS con escala temporal de 6 horas. Finalmente, con 2 días de antelación y hasta la ocurrencia del evento se tiene los pronósticos generados por los tres modelos considerados en esta memoria, manteniendo la escala temporal de 6 horas para los modelos globales y de una hora para el modelo regional WRF.

Para cada evento de precipitaciones se analizará, en primera instancia, el registro de la precipitación acumulada y se comparará con las previsiones de los modelos. Posteriormente se analizará el desempeño de los modelos para predecir la distribución temporal de la precipitación mediante la comparación de los valores de precipitación registrados con los valores de precipitación pronosticados por los modelos cada 12 ó 6 horas (dependiendo de la antelación considerada en las actualizaciones de los modelos). Para efectos de comparación y análisis se definirá como *"peak"* al intervalo de tiempo en que se registra la mayor intensidad de precipitación del evento.

3.5.1 Análisis evento de precipitaciones del 05 al 06 de agosto de 2015

Para la estación las Salinas se observa que los modelos en general subestiman la cantidad de precipitación acumulada siendo la actualización del modelo GFS a 1 día del inicio del evento la que presenta menor error al subestimar en un 9% la cantidad de agua prevista. Para la Estación Rodelillo se observa que la actualización del modelo ECMWF a 2 días es la que presenta menor error en la cantidad de precipitación acumulada prevista (9%) mientras que para la Estación Quilpué se observa que la actualización del modelo GFS a 2 días es la que presenta menor error (-5%).

Tabla 3-20 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Las Salinas

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	31/7/2015	69.3	93.7	-26%
ECMWF (5 días)	31/7/2015	47.8	93.7	-49%
GFS (2 días)	**3/8/2015**	**104.4**	**93.7**	**11%**
ECMWF (2 días)	3/8/2015	69.3	93.7	-26%
WRF(2 días)	3/8/2015	46.3	93.7	-51%
GFS (1 día)	**4/8/2015**	**85.3**	**93.7**	**-9%**
ECMWF (1 día)	4/8/2015	39.6	93.7	-58%
WRF (1 día)	4/8/2015	41.1	93.7	-56%

Tabla 3-21 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Rodelillo

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	**31/7/2015**	**74.7**	**86.0**	**-13%**
ECMWF (5 días)	31/7/2015	47.5	86.0	-45%
GFS (2 días)	3/8/2015	130.8	86.0	52%
ECMWF (2 días)	**3/8/2015**	**93.5**	**86.0**	**9%**
WRF(2 días)	3/8/2015	53.6	86.0	-38%
GFS (1 día)	4/8/2015	102.6	86.0	19%
ECMWF (1 día)	4/8/2015	45.5	86.0	-47%
WRF (1 día)	4/8/2015	48.4	86.0	-44%

Tabla 3-22 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Quilpué

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	**31/7/2015**	**63.5**	**109.4**	**-42%**
ECMWF (5 días)	31/7/2015	47.0	109.4	-57%
GFS (2 días)	**3/8/2015**	**103.6**	**109.4**	**-5%**
ECMWF (2 días)	3/8/2015	68.8	109.4	-37%
WRF(2 días)	3/8/2015	54.1	109.4	-51%
GFS (1 día)	4/8/2015	89.2	109.4	-19%
ECMWF (1 día)	4/8/2015	42.4	109.4	-61%
WRF (1 día)	4/8/2015	43.1	109.4	-61%

3.5.1.1 Comparación de valores observados con valores previstos a 10 días del inicio del evento

El desempeño del pronóstico operativo con el modelo GFS a 10 días plazo muestra escasa habilidad para recrear el ciclo del evento de precipitación puesto que sólo es capaz de predecir un evento de precipitaciones, siendo que en realidad ocurrieron dos sistemas frontales consecutivos.

Figura 3-2.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Las Salinas

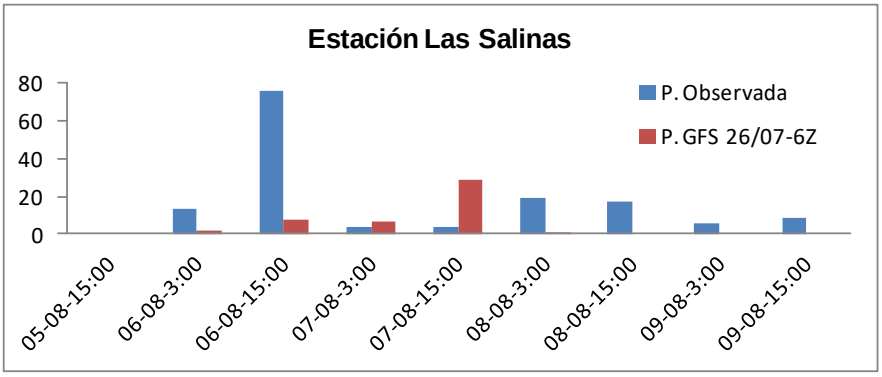


Figura 3-3.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Rodelillo

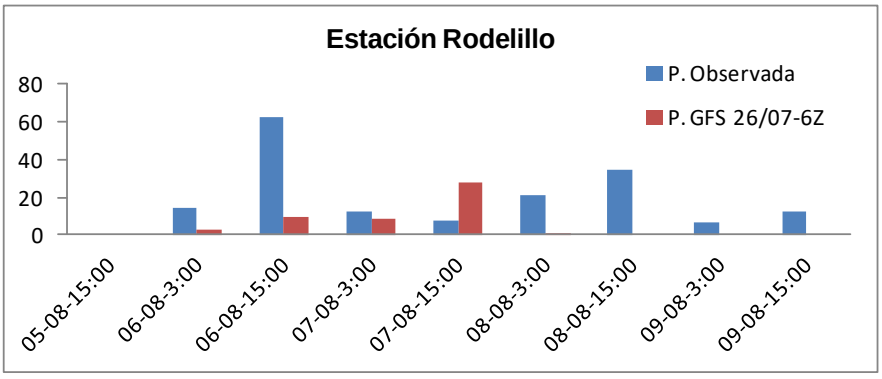
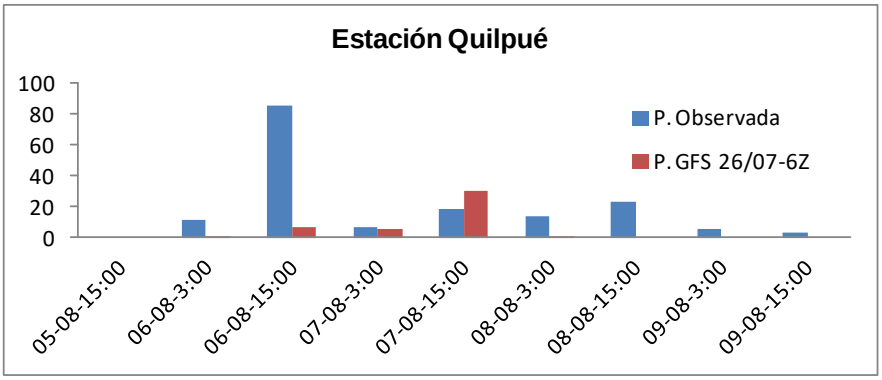


Figura 3-4.- Precipitación observada vs prevista 26/07. Estación Quilpué



3.5.1.2 Comparación de valores observados con valores previstos a 5 días del inicio del evento

Para el pronóstico a 5 días se observa que las salidas del modelo GFS muestran un buen ajuste para la Estación Rodelillo en cuanto a distribución temporal y cantidad de agua caída. Sin embargo, la predicción numérica es de menor calidad para las Estaciones Quilpué y Las Salinas al producirse un desfase temporal con respecto al *"peak"* para la estación Las Salinas y subestimación de magnitudes en el caso de estación Quilpué.

La salidas del modelo del ECMWF para un plazo de 5 días reproducen el ciclo del evento de precipitación con un desfase de 6 horas con respecto al *"peak"* para las Estaciones Rodelillo y Quilpué y sin desfase para la Estación Las Salinas.

Figura 3-5.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Las Salinas

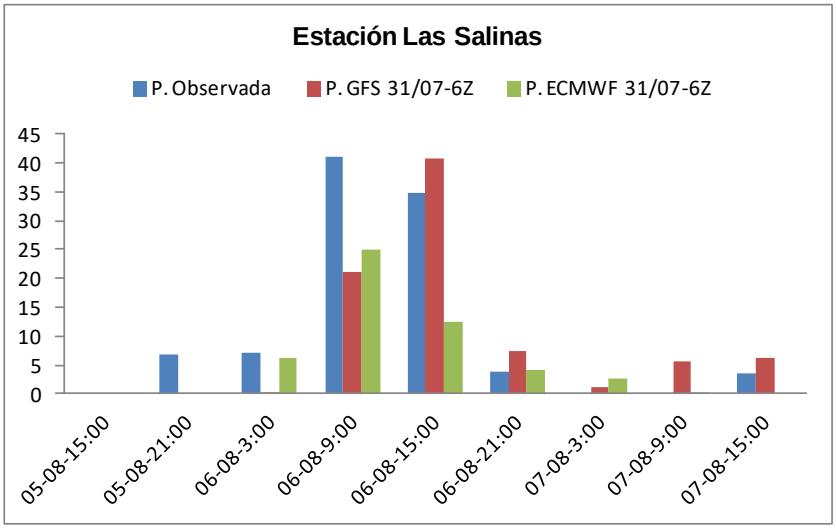


Figura 3-6.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Rodelillo

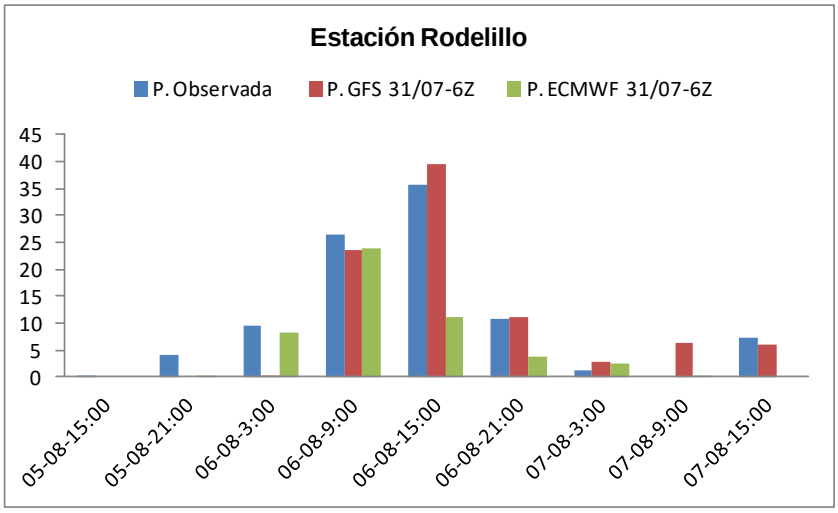
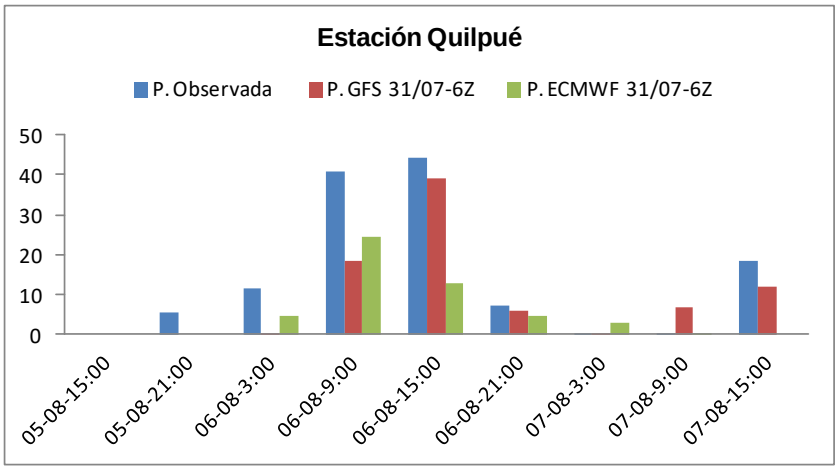


Figura 3-7.- Precipitación observada vs prevista 31/07. Estación Quilpué



3.5.1.3 Comparación de valores observados con valores previstos a 2 días del inicio del evento

Las figuras 3-8, 3-9 y 3-10 muestran que las actualizaciones de los modelos globales a 2 días del inicio del evento de precipitaciones no predicen adecuadamente la evolución meteorológica de éste. El único modelo que es capaz de reproducir la forma del pluviograma del evento ocurrido entre los días 05 y 06 de agosto de 2015 es el modelo de escala regional WRF aunque con un desfase de 12 horas con respecto al peak y con subestimaciones importantes en la magnitud de las precipitaciones.

Figura 3-8.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Las Salinas

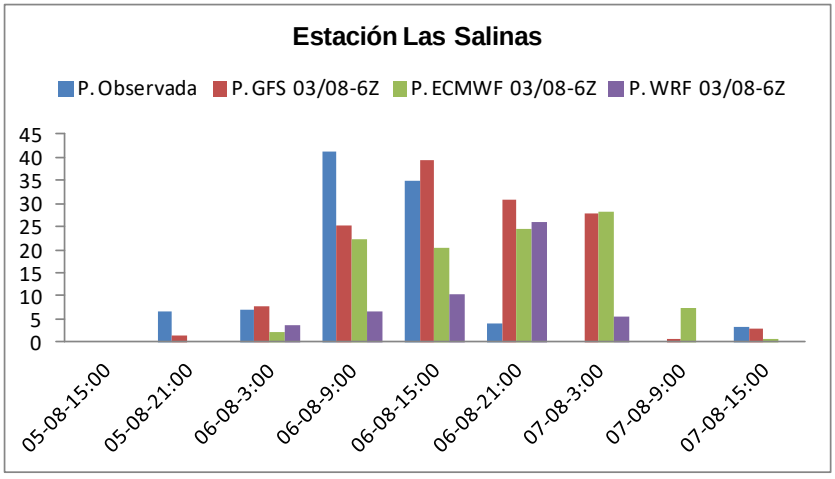


Figura 3-9.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Rodelillo

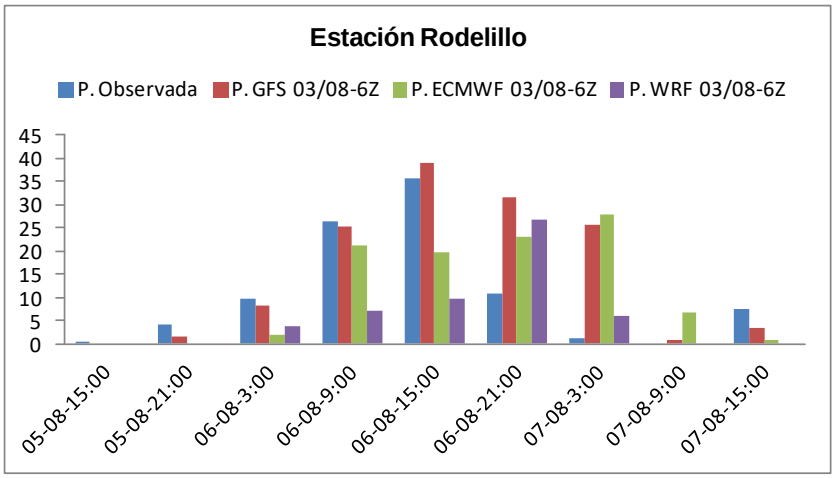
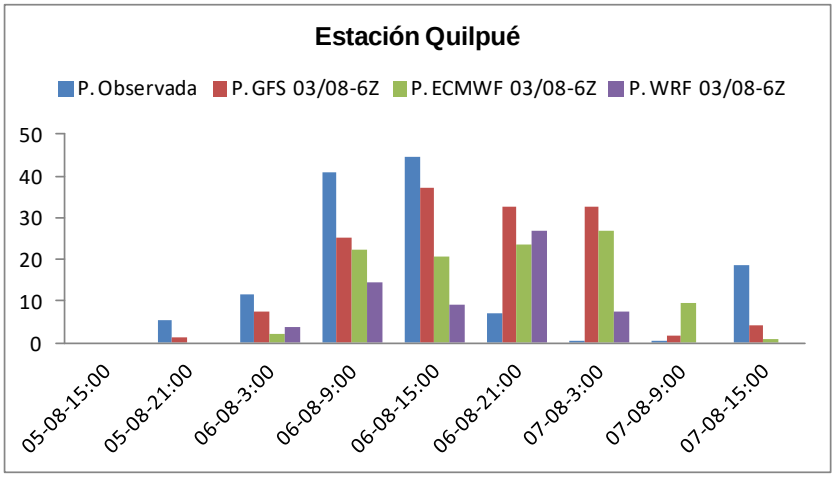


Figura 3-10.- Precipitación observada vs prevista 03/08. Estación Quilpué



3.5.1.4 Comparación de valores observados con valores previstos a 1 día del inicio del evento

Las figuras 3-11, 3-12 y 3-13 muestran que las actualizaciones de los modelos globales a 1 día del inicio del evento de precipitaciones no predicen adecuadamente la evolución meteorológica del éste. El modelo WRF es capaz de reproducir la forma del pluviograma del evento ocurrido entre los días 05 y 06 de agosto de 2015 aunque con un desfase de 6 a 12 horas y con subestimación del orden del 40% en la magnitud de las precipitaciones respecto al peak del evento.

Figura 3-11.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Las Salinas

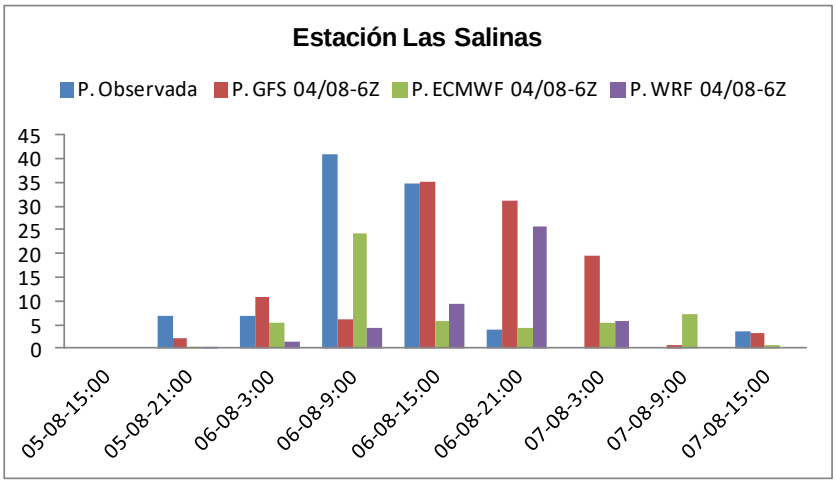


Figura 3-12.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Rodelillo

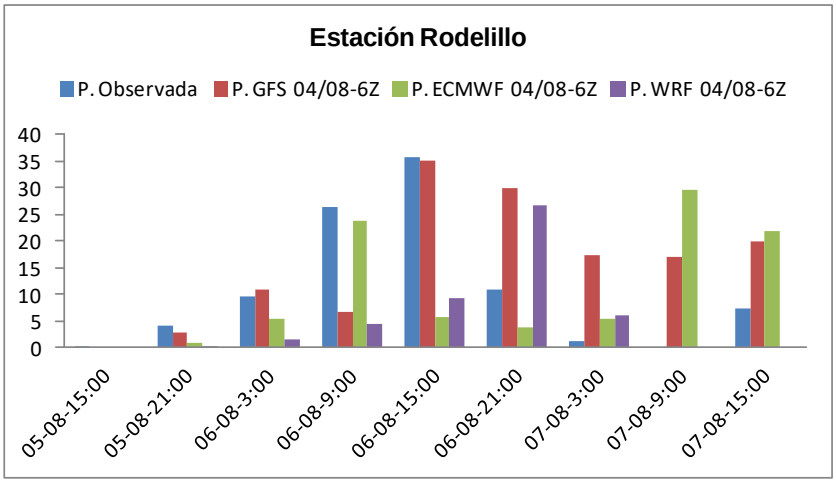
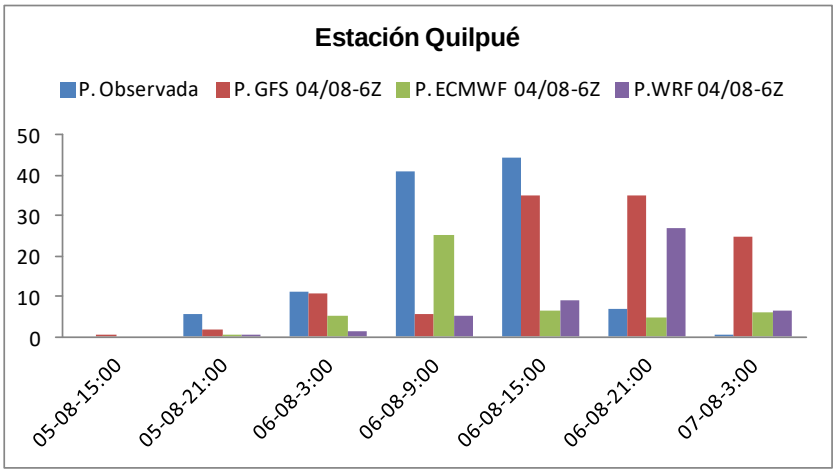


Figura 3-13.- Precipitación observada vs prevista 04/08. Estación Quilpué



3.5.2 Análisis evento de precipitaciones del 07 al 09 de agosto de 2015

Para la estación las Salinas se observa que la actualización del modelo WRF a 2 días es la que presenta menor error en la cantidad prevista de precipitación acumulada (2%). Para la estación Rodelillo la actualización del modelo ECMWF a 2 días es la que presenta menor error, subestimando en un 11% la cantidad de precipitación acumulada prevista, mientras que para la estación Quilpué la actualización del modelo ECMWF a 5 días es la que presenta menor error (-15%).

Tabla 3-23 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Las Salinas

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	2/8/2015	10.2	54.7	-81%
ECMWF (5 días)	2/8/2015	53.1	54.7	-3%
GFS (2 días)	5/8/2015	39.4	54.7	-28%
ECMWF (2 días)	5/8/2015	50.3	54.7	-8%
WRF(2 días)	**5/8/2015**	**56.0**	**54.7**	**2%**
GFS (1 día)	6/8/2015	51.3	54.7	-6%
ECMWF (1 día)	6/8/2015	41.7	54.7	-24%
WRF (1 día)	6/8/2015	56.2	54.7	3%

Tabla 3-24 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Rodelillo

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	2/8/2015	9.1	83.8	-89%
ECMWF (5 días)	2/8/2015	48.3	83.8	-42%
GFS (2 días)	5/8/2015	66.5	83.8	-21%
ECMWF (2 días)	**5/8/2015**	**74.9**	**83.8**	**-11%**
WRF(2 días)	5/8/2015	56.7	83.8	-32%
GFS (1 día)	6/8/2015	42.2	83.8	-50%
ECMWF (1 día)	6/8/2015	35.3	83.8	-58%
WRF (1 día)	6/8/2015	54.0	83.8	-36%

Tabla 3-25 Precipitación acumulada registrada y prevista. Estación Quilpué

MODELO	FECHA	Precipitación Acumulada		ERROR %
		Prevista [mm]	Observada [mm]	
GFS (5 días)	2/8/2015	16.0	65.3	-75%
ECMWF (5 días)	**2/8/2015**	**55.6**	**65.3**	**-15%**
GFS (2 días)	5/8/2015	80.8	65.3	24%
ECMWF (2 días)	5/8/2015	80.3	65.3	23%
WRF(2 días)	5/8/2015	54.5	65.3	-17%
GFS (1 día)	6/8/2015	50.8	65.3	-22%
ECMWF (1 día)	6/8/2015	42.9	65.3	-34%
WRF (1 día)	6/8/2015	49.7	65.3	-24%

3.5.2.1 Comparación de valores observados con valores previstos a 10 días del inicio del evento

El desempeño del pronóstico operativo con el modelo GFS a 10 días plazo no predice adecuadamente el ciclo ni la magnitud del evento de precipitación.

Figura 3-14.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Las Salinas

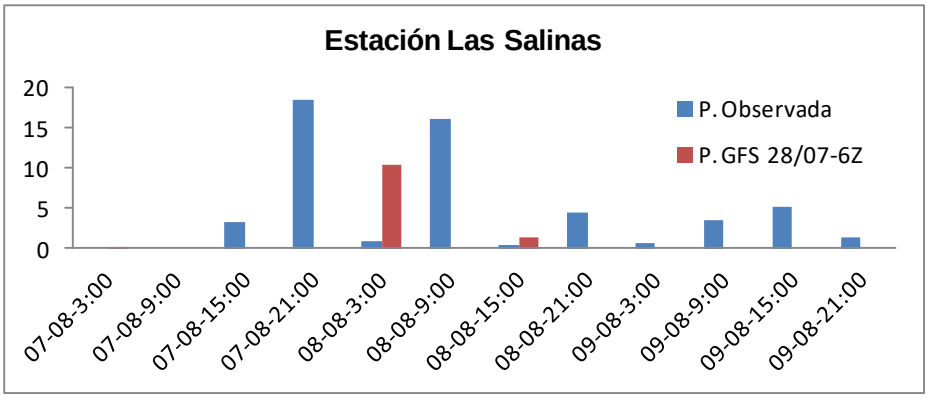


Figura 3-15.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Rodelillo

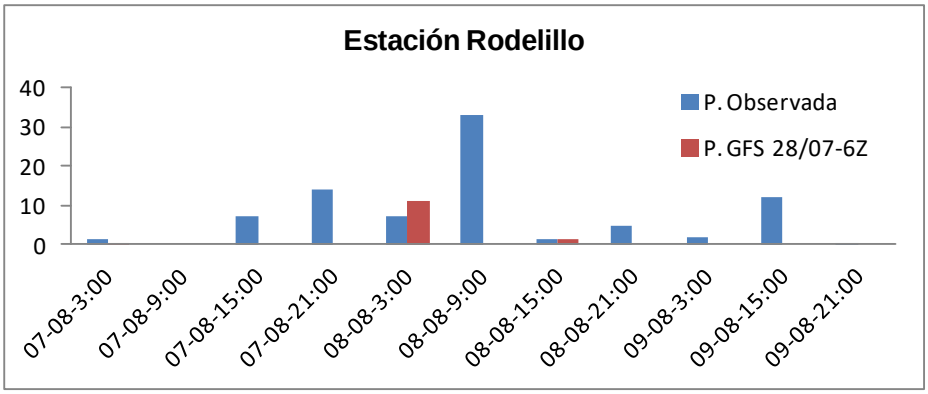
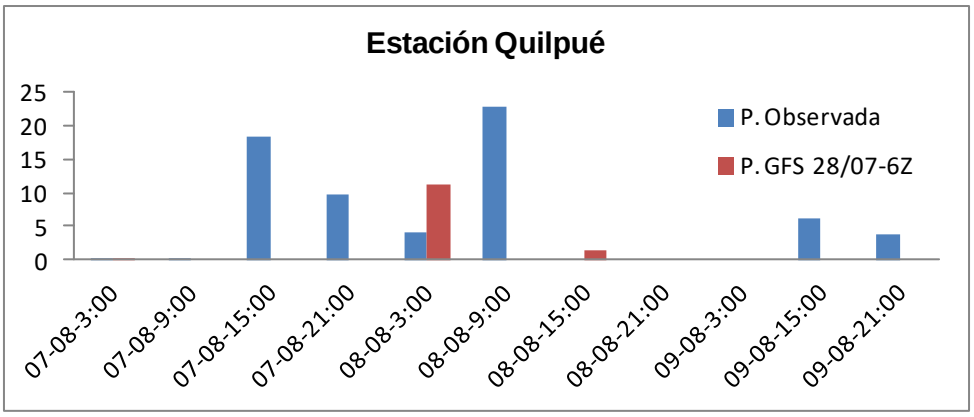


Figura 3-16.- Precipitación observada vs prevista 28/07. Estación Quilpué



3.5.2.2 Comparación de valores observados con valores previstos a 5 días del inicio del evento

Para el pronóstico a 5 días se observa que las salidas de los modelos globales GFS y ECMWF no son capaces de mostrar un buen ajuste en cuanto a distribución temporal y cantidad de agua caída para ninguna de las estaciones consideradas.

Figura 3-17.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Las Salinas

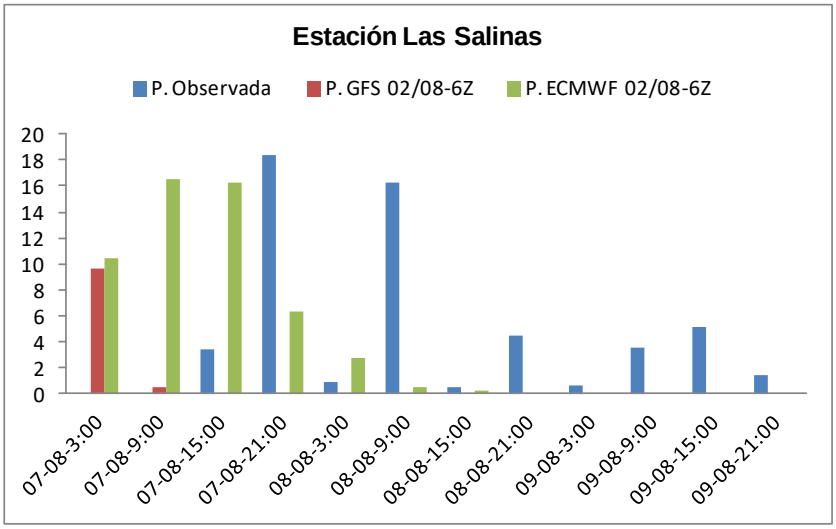


Figura 3-18.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Rodelillo

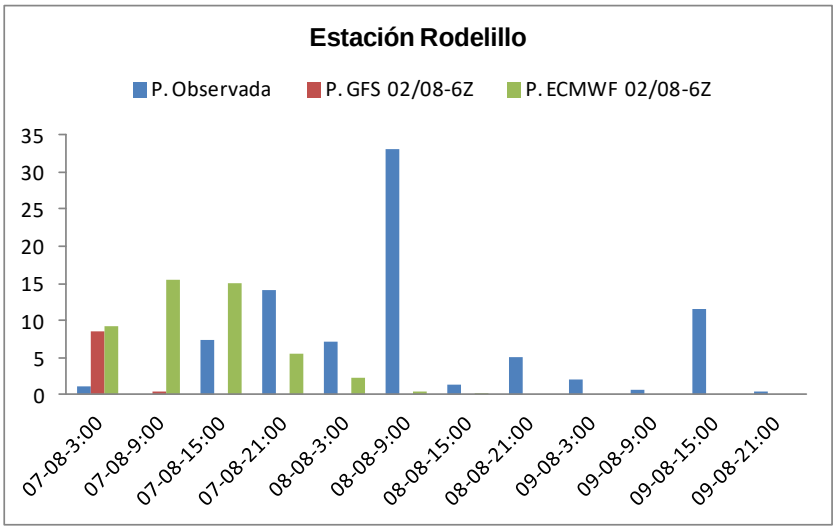
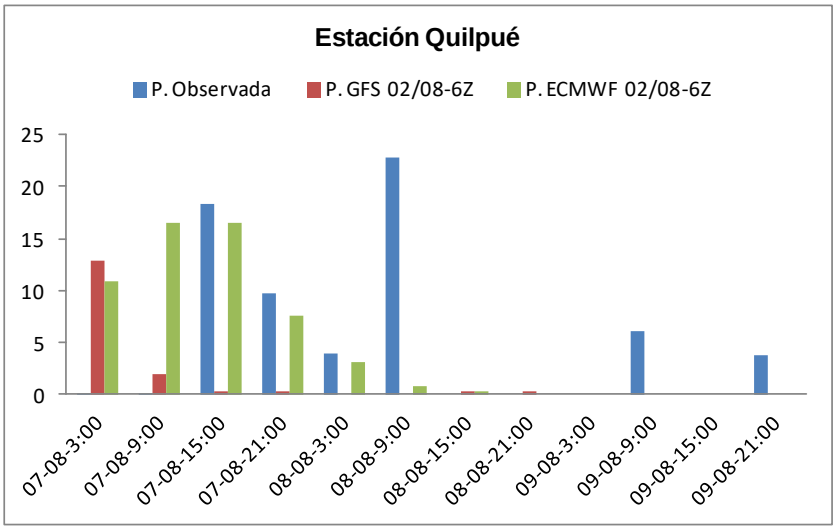


Figura 3-19.- Precipitación observada vs prevista 02/08. Estación Quilpué



3.5.2.3 Comparación de valores observados con valores previstos a 2 días del inicio del evento

Las figuras N° 3-20, 3-21 y 3-22 muestran la escasa habilidad de los modelos en la predicción del evento de precipitación. Para todas las estaciones consideradas, las actualizaciones no presentan una distribución temporal de la precipitación acorde a lo observado.

Figura 3-20.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Las Salinas

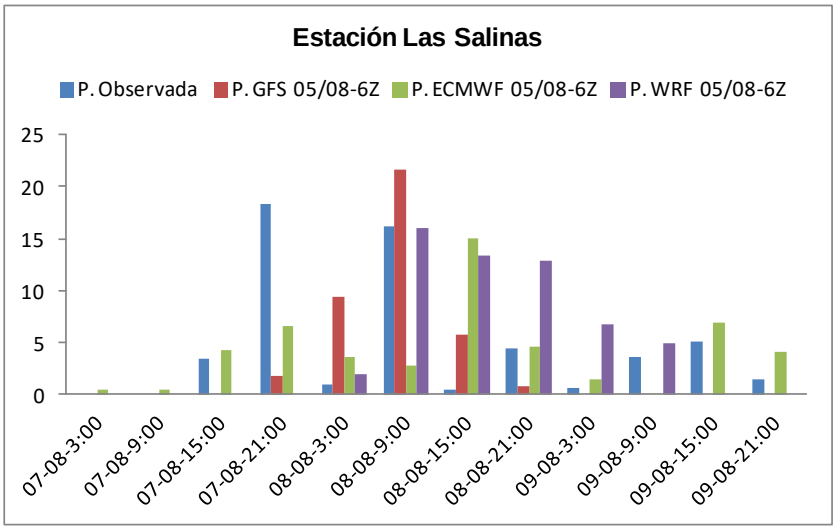


Figura 3-21.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Rodelillo

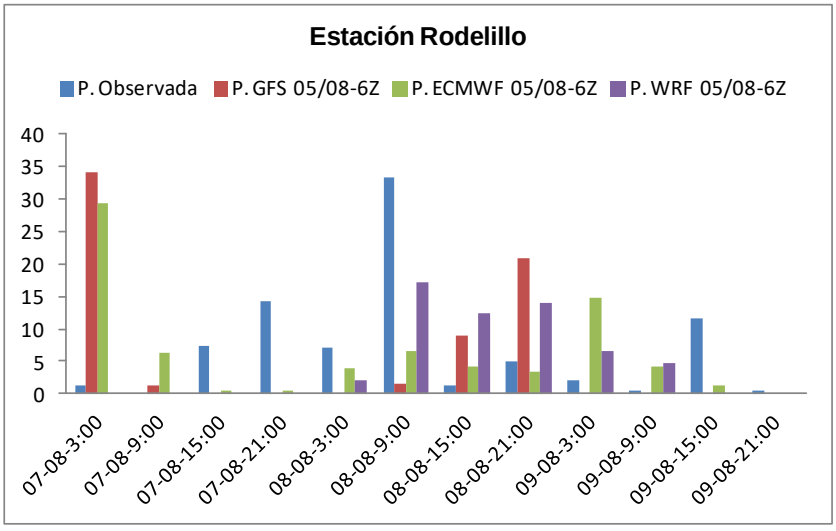
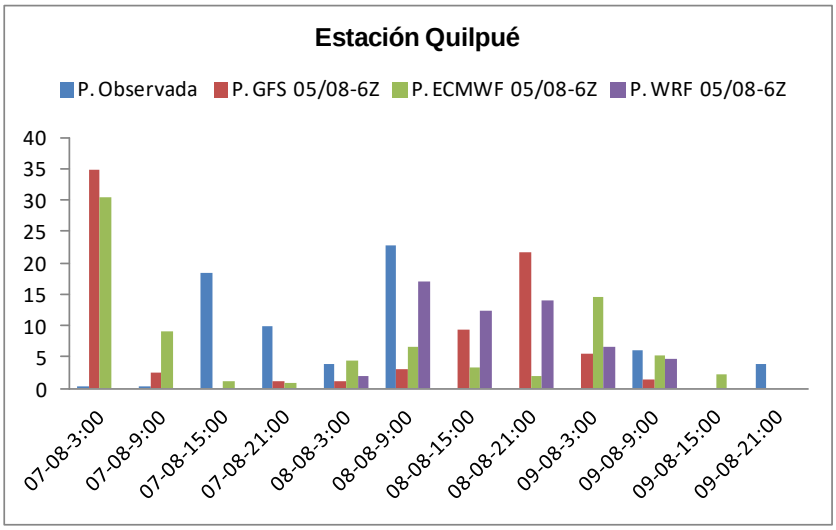


Figura 3-22.- Precipitación observada vs prevista 05/08. Estación Quilpué



3.5.2.4 Comparación de valores observados con valores previstos a 1 día del inicio del evento

Las actualizaciones de los modelos considerados en el análisis a 1 día del inicio del evento de precipitaciones permiten una mejor predicción de la evolución meteorológica de éste, sin embargo se aprecian subestimaciones en las cantidades de agua previstas para las primeras 12 horas y sobreestimaciones para la etapa final del evento.

Figura 3-23.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Las Salinas

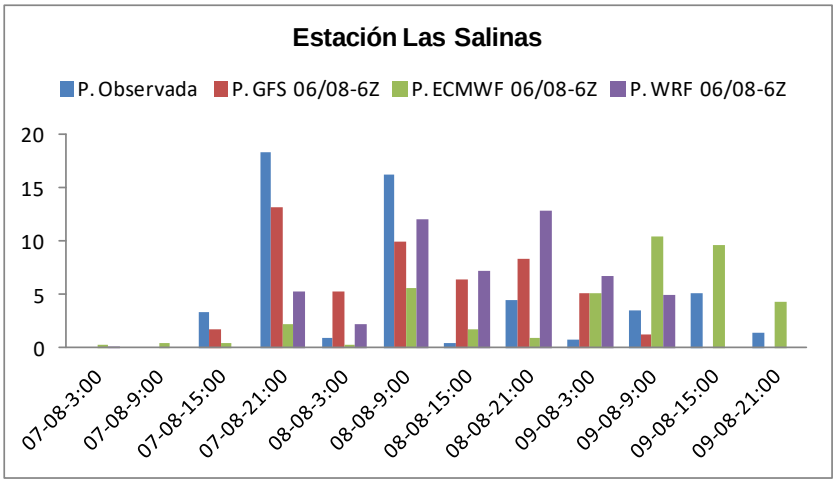


Figura 3-24.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Rodelillo

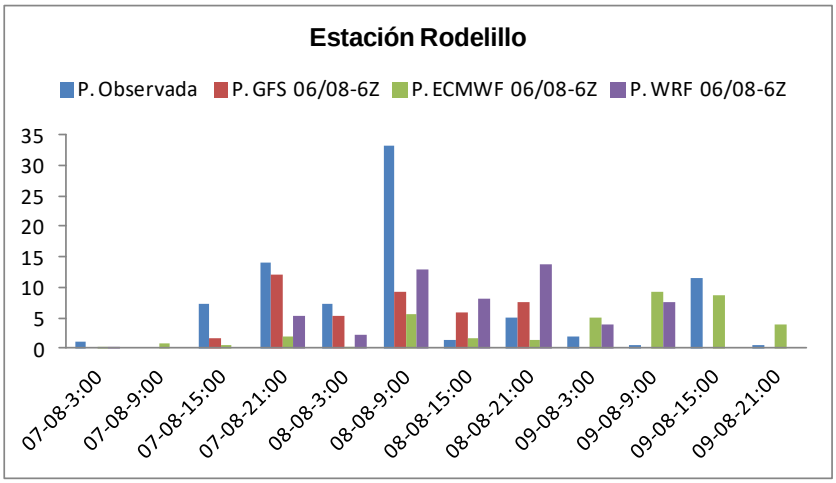
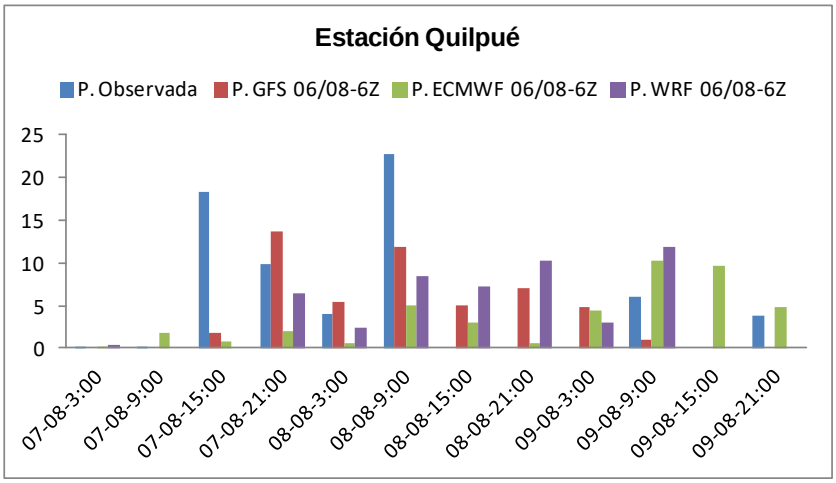


Figura 3-25.- Precipitación observada vs prevista 06/08. Estación Quilpué



3.5.3 Conclusiones

Se observa que el desempeño de los modelos de predicción analizados varía dependiendo de la antelación al evento de precipitaciones.

Para el caso del evento de precipitaciones ocurrido entre el 05 y 06 de agosto de 2015 las actualizaciones con antelación igual o menor a 5 días representaron de forma aceptable la evolución temporal de la precipitación. Sin embargo, para el evento ocurrido entre el 07 y 09 de agosto de 2015, el desempeño de los modelos no fue suficiente en la descripción del mismo.

3.5.4 Selección de evento de precipitación para simulación de crecidas

Uno de los objetivos principales de esta memoria es realizar un pronóstico de crecidas en el Estero Marga-Marga. Como parte de este proceso, se estimará el caudal máximo de crecidas utilizando los registros de precipitaciones del evento más significativo ocurrido durante el año 2015 y se comparará con el caudal obtenido a partir de las precipitaciones previstas por los modelos.

El evento más importante ocurrido durante el año 2015 corresponde a las precipitaciones ocurridas entre los días 05 y 06 de agosto que tal como se señala en el subcapítulo anterior pudo ser registrado convenientemente en las estaciones meteorológicas consideradas para la presente memoria. De acuerdo a los registros existentes y al estudio de precipitaciones realizado para el Plan Maestro de Viña del Mar, la precipitación en 24 horas tiene un periodo de retorno del orden de 5 años para las estaciones consideradas tal como puede observarse en la Tabla 3-26. Los valores de precipitación registrados y previstos por los diferentes modelos para cada estación se incluyen en el Anexo A.

Tabla 3-26 Montos de precipitación registrados vs precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno

ESTACIÓN	Precipitación 24 horas [mm]	Precipitación máxima 24 hrs según periodo de retorno [mm]		
	05-06 AGO 2015	T=2 años	T=5 años	T=10 años
LAS SALINAS	93.5	57.4	86.6	108.7
RODELILLO	86	78.4	124.8	155.4
COLLIGUAY	104.9	92.6	125.5	147.1
VILLA ALEMANA	103.8	66.7	91.2	105.8
QUILPUÉ	109.4	68.2	101.5	123.5

Fuente: Registros de precipitaciones año 2015, Plan Maestro Viña del Mar

4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDAS

4.1 Marco teórico

4.1.1 Introducción

En el presente capítulo se describe conceptualmente los modelos precipitación escorrentía que permiten la obtención de caudales a partir de datos de precipitación.

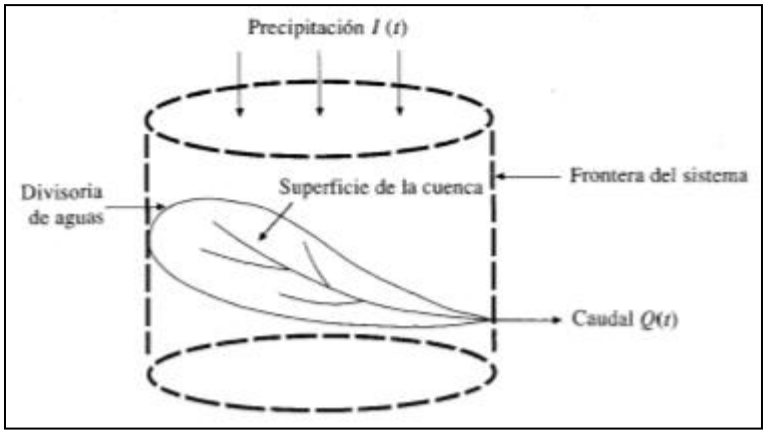
El objetivo de este capítulo es presentar la base teórica para el resto del estudio, abordando desde conceptos básicos del ciclo hidrológico hasta los modelos más complejos que permiten representar los procesos físicos de ciclo hidrológico y sus relaciones.

4.1.2 Conceptos básicos

El ciclo hidrológico y procesos asociados son fenómenos extremadamente complejos que pueden representarse de manera simplificada mediante el concepto de sistema, entendido éste como un conjunto de partes conectadas entre sí que forman parte de un todo (Ven Te Chow, 1994 [Ref. 11]. Bajo este punto de vista, el ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes principales son los procesos de precipitación, evaporación y escorrentía, los que a su vez pueden agruparse en subsistemas.

Un sistema hidrológico puede definirse como una "estructura o volumen en el espacio, rodeado por una frontera que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas" (Ven Te Chow, 1994 [Ref. 11]).

Figura 4-1.- La cuenca como sistema hidrológico



Fuente: Ven Te Chow [Ref. 11]

Los procesos meteorológicos más importantes para el análisis del sistema hidrológico corresponden a la precipitación y evaporación puesto que tienen directa relación con el agua superficial. La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos como granizo y neblina.

El exceso de precipitación, o precipitación efectiva, es aquella precipitación que no infiltra en el suelo ni se retiene en la superficie terrestre, fluye a través de la superficie de la cuenca y se convierte en escorrentía directa a la salida de ésta. La variación del exceso de precipitación en función del tiempo (hietograma de exceso de precipitación) es un componente fundamental para el estudio del proceso precipitación -escorrentía y para obtenerlo se debe conocer el hietograma de lluvia total y las abstracciones o pérdidas (agua que se infiltra, que es interceptada o almacenada superficialmente).

La relación entre precipitación y escorrentía para una cuenca en particular puede representarse mediante hidrogramas. Se tiene dos tipos principales de hidrogramas, el hidrograma anual y el hidrograma que permite representar el comportamiento del caudal para un determinado evento de precipitación.

El presente estudio se enfocará en el evento de precipitaciones señalado en el Capítulo 3, por lo que se describirá en detalle la metodología para obtener los hidrogramas de caudal asociados a un evento de precipitación específico.

4.1.3 Método del hidrograma unitario

4.1.3.1 Modelo de sistema hidrológico general

En este subcapítulo se analiza el fenómeno precipitación-escorrentía en una cuenca considerándola como un sistema agregado lineal, es decir, como un sistema en el que la cantidad de agua almacenada S, puede relacionarse con las tasa de flujo de entrada (I) y de salida (Q) mediante la ecuación de continuidad:

$$\frac{\mathrm{dS}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{I} - \mathrm{Q} \qquad \text{(Ec. 4-1)}$$

Si se supone que el agua se almacena en un sistema hidrológico como en un embalse (Ver Figura 4-1) en el cual la cantidad de agua varia con el tiempo en respuesta los flujos de entrada y salida y a sus variaciones con respecto al tiempo, la función de almacenamiento puede expresarse según lo indica la ecuación 4-2:

$$S=f\left(I,\frac{dI}{dt},\frac{d^2I}{dt^2},\ldots,Q,\frac{dQ}{dt},\frac{d^2Q}{dt^2},\ldots\right) \qquad \text{(Ec. 4-2)}$$

La función de almacenamiento está determinada por la naturaleza del sistema hidrológico y debe ser resuelta simultáneamente con la ecuación de continuidad para obtener la función de transferencia del sistema, que describe la respuesta de la salida en función de la entrada.

4.1.3.2 El hidrograma unitario

El hidrograma unitario es la función respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal y se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de volumen unitario generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de la duración efectiva.

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede ser empleado para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Este método es aplicable a cuencas pluviales y realiza los siguientes supuestos:

- El exceso de precipitación tiene intensidad constante dentro de la duración efectiva y está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje.

- El tiempo base del hidrograma de escorrentía directa (HED) resultante de una lluvia de una duración dada es constante.

- Las ordenadas de todos HED de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.

- Para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características invariantes de la cuenca.

4.1.3.3 Hidrograma unitario sintético

El hidrograma unitario puede ser deducido a partir de la información de precipitación y caudal y es aplicable a la cuenca en el punto en que se midieron los caudales. Para desarrollar hidrogramas aplicables en otros puntos de la corriente de la misma cuenca e incluso para cuencas adyacentes de carácter similar se utilizan los denominados hidrogramas unitarios sintéticos.

Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos:

- Los que relacionan las características del hidrograma con las características de la cuenca tales como el de Snyder (1938) y Gray (1961).

- Los que se basan en hidrogramas unitarios adimensionales (Soil Conservation Service, 1972).

- Los fundamentados en modelo de almacenamiento de la cuenca (Clark, 1943).

4.2 Modelos de precipitación-escorrentía

La aplicación del hidrograma unitario sintético permite modelar el fenómeno precipitación-escorrentía en una cuenca. Para ello debe seleccionarse un hietograma de precipitación, a partir de éste obtener el hietograma de exceso de lluvia y aplicar la ecuación de convolución.

Las etapas del proceso son las siguientes:

a) Separación de la precipitación efectiva. En esta etapa se calcula la parte de agua caída que genera escorrentía superficial. Si bien existen diversos métodos, para el desarrollo de la presente memoria se adoptará el denominado método de la Curva Número propuesto por el SCS (Soil Conservation Service).

b) Cálculo de la escorrentía producida por la precipitación efectiva. Para esta fase se emplea el concepto de hidrograma unitario desarrollado en el subcapítulo anterior. Se utilizará el método del hidrograma unitario sintético (HUS) empleando las relaciones del SCS (Soil Conservation Service, 1972) para cuencas urbanas y de área menor a 10[km^2] y el HUS desarrollado por Arteaga y Benítez para cuencas con áreas mayores a 10[km^2].

c) Tránsito de hidrogramas. Corresponde al cálculo de la variación del hidrograma calculado en el paso anterior a medida que avanza a lo largo del cauce y a través de embalses.

4.2.1 Determinación de la precipitación efectiva y su distribución en el tiempo

Con el propósito de establecer un criterio para definir las condiciones de infiltración de la cuenca, se adoptó el procedimientos propuesto por el SCS (Soil Conservation Service de los EE.UU) denominado método de la Curva Número.

De acuerdo a este método, la relación entre precipitación efectiva y precipitación total puede representarse por la expresión:

$$P_{ef} = \frac{(P_T - 0.2 \cdot S)^2}{(P_T + 0.8 \cdot S)} \qquad \text{(Ec. 4-3)}$$

Donde :

P_{ef} = Precipitación efectiva

P_T = Precipitación total

S = Retención máxima potencial de la cuenca

El método supone que la abstracción inicial corresponde al 20% de la retención máxima de la cuenca (**Ia** = 0.2*S), variable que se relaciona con la Curva Número a través de la siguiente ecuación:

$$CN=\frac{1000}{10+S} \qquad \text{(Ec. 4-4)}$$

Para determinar la precipitación efectiva en cada intervalo de tiempo del hidrograma unitario a considerar, se utiliza el método de la curva número en forma incremental, según las siguientes expresiones.

$$P_{ef(i,i+1)}=P_{ef(i+1)}-P_{ef(i)} \qquad \text{(Ec. 4-5)}$$

Donde:

$P_{ef(i,i+1)}$ = Precipitación efectiva entre el tiempo i+1 e i

$P_{ef(i+1)}$ = Precipitación efectiva acumulada al tiempo i+1

$P_{ef(i)}$ = Precipitación efectiva acumulada al tiempo i

$$P_{ef(i)}=\frac{(P_{T(i)}-0.2\cdot S)^2}{(P_{T(i)}+0.8\cdot S)} \qquad \text{(Ec. 4-6)}$$

$PT_{(i)}$ = Precipitación total acumulada al tiempo i.

4.2.2 Obtención de hidrogramas unitarios sintéticos

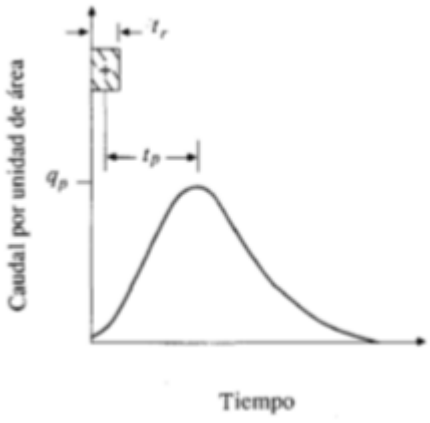
En la presente memoria se utilizarán dos tipos de hidrogramas unitarios sintéticos, el desarrollado por Arteaga y Benítez para cuencas con áreas mayor a 10[km^2] y el HUS del SCS (Soil Conservation Service, 1972) para cuencas urbanas y de área menor a 10[km^2].

4.2.2.1 Hidrograma unitario sintético de Arteaga y Benítez

Este método fue desarrollado en 1985, basándose en el método de Linsley para cuencas ubicadas entre las hoyas del Aconcagua y el Chamiza y permitió establecer las relaciones básicas para estimar los parámetros que determinan un hidrograma unitario sintético: tiempo al *peak* $\boldsymbol{t_p}$, caudal *peak* $\boldsymbol{q_p}$ y tiempo base t_b del hidrograma unitario estándar de la cuenca (Ver Figura 4-2).

La metodología planteada es válida para cuencas pluviales o pluvio-nivales sin control fluviométrico, ubicadas en la zona Aconcagua-Maule y con áreas comprendidas entre 10[km^2] y 4.500[km^2].

Figura 4-2.- Hidrograma unitario sintético estándar



Las relaciones encontradas por Arteaga y Benítez son los que a continuación se detallan:

- Tiempo al *peak* (t_p)

$$t_p = 0.386 \cdot \left(\frac{L_{cp} \cdot L_{cg}}{\sqrt{S}}\right)^{0.397} \text{ [hrs]} \qquad \text{(Ec. 4-7)}$$

Donde:

L_{cp}: Longitud de cauce principal [km].

L_{cg}: Distancia del centro de gravedad de la cuenca a la sección de salida [km].

S : Pendiente media de la cuenca

Este hidrograma calculado es válido para la precipitación de duración aproximada de t_p/5.5 horas para cada caso. Con el fin de aproximar este valor a uno que facilite la convolución (media hora o una hora dependiendo de t_p) se aplicó la siguiente expresión de corrección:

$$t_p' = t_p + 0.25 \cdot (t_u' - t_u) \qquad \text{(Ec. 4-8)}$$

Donde

t_p' = Tiempo al *peak* corregido [hrs].

t_p = Tiempo al *peak* sin corregir [hrs].

t_u' = Duración de la lluvia adoptada [hrs].

t_u = Duración de la lluvia sin corregir (t_p/5.5) [hrs].

- Tiempo base (t_b)

$$t_b = 2.7 \cdot (t_p')^{1.1} \text{ [hrs]} \qquad \text{(Ec. 4-9)}$$

- Caudal *peak* (q_p)

$$q_p = \frac{355}{(t_p')^{1.1}} \quad [\text{lt/seg/km}^2] \qquad \text{(Ec. 4-10)}$$

Para generar las ordenadas del hidrograma unitario a partir de los parámetros calculados, se han utilizado los coeficientes de distribución de Linsley, sugeridos en el Manual de Crecidas de la DGA (Agosto 1995), que son los indicados en la Tabla 4-1. En dicha tabla se indican los valores del caudal en función del tiempo, referidos al caudal *peak* y al tiempo al *peak*, respectivamente.

El hidrograma así determinado debe verificarse que corresponda a un hidrograma de volumen unitario. Para lo cual se debe integrar y calcular el volumen bajo la curva, corrigiendo las ordenadas "q" en forma proporcional a la diferencia de volumen que resulta con respecto al volumen unitario. De esta manera se obtiene el hidrograma unitario sintético corregido.

Tabla 4-1 Coeficientes de distribución para el hidrograma unitario sintético

t/t_p	q/q_p
0	0
0.3	0.2
0.5	0.4
0.6	0.6
0.75	0.8
1	1
1.3	0.8
1.5	0.6
1.8	0.4
2.3	0.2
2.7	0.1

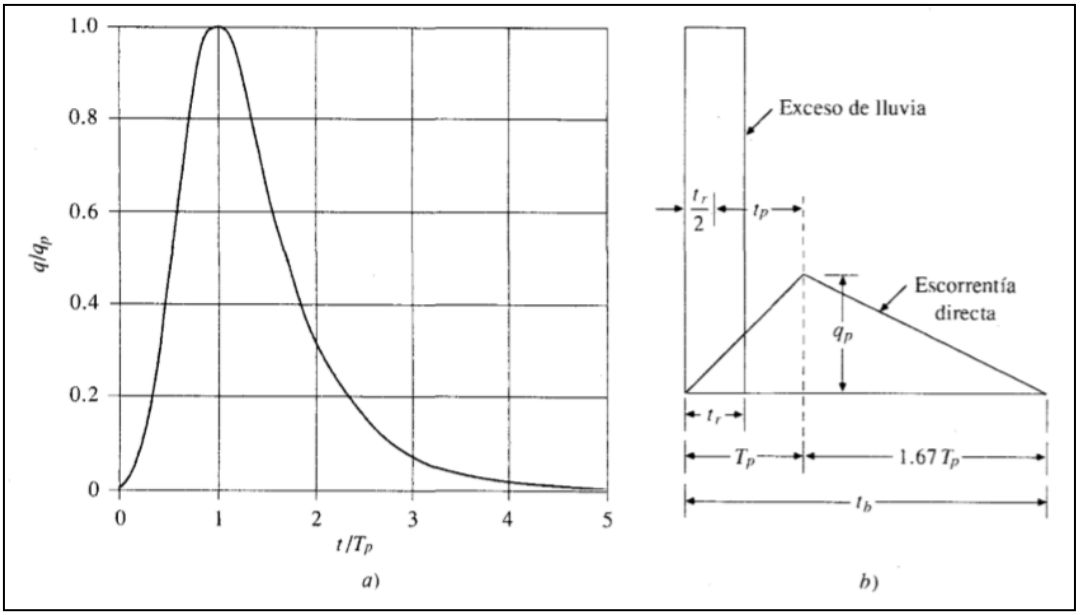
Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica [Ref.12]

4.2.2.2 Hidrograma Unitario Sintético del SCS

El hidrograma adimensional del SCS expresa los valores de caudal y tiempo con respecto a los valores "peak". Dados el caudal máximo ("peak") y el tiempo de retardo para la duración del exceso de precipitación, el hidrograma unitario sintético del SCS puede estimarse en función del hidrograma triangular de la cuenca en estudio y del hidrograma adimensional.

La figura 4-3 muestra la forma del hidrograma unitario adimensional y el hidrograma triangular del SCS, en ellos el tiempo está dado en horas y el caudal en (m3/s).

Figura 4-3.- Hidrogramas Unitarios Sintéticos del SCS



Fuente: Soil Conservation Service, 1972

A partir del hidrograma triangular se obtienen los parámetros fundamentales del Hidrograma Unitario:

- Caudal peak (q_p)

$$q_p = 0.208 \cdot \frac{A}{T_p} \quad [m^3/s] \qquad \text{(Ec. 4-11)}$$

- Tiempo peak (T_p)

$$T_p = t_r/2 + t_p \quad [hrs] \qquad \text{(Ec. 4-12)}$$

Donde

A = Área de drenaje [km^2].

T_p = Tiempo al peak [hrs].

t_r = Duración de la lluvia efectiva [hrs].

t_p = Tiempo de retardo [hrs].

El tiempo de retardo t_p puede estimarse como un 60% del tiempo de concentración de la cuenca.

Para generar las ordenadas del hidrograma unitario a partir de los parámetros calculados, se utiliza el hidrograma adimensional del SCS. En la Tabla 4-2 se indican los valores del caudal en función del tiempo, referidos al caudal peak y al tiempo al peak, respectivamente.

Tabla 4-2 Hidrograma Unitario Adimensional SCS

t / t_p	q / q_p	t / t_p	q / q_p
0	0	1.4	0.75
0.1	0.015	1.5	0.65
0.2	0.075	1.6	0.57
0.3	0.16	1.8	0.43
0.4	0.28	2.0	0.32
0.5	0.43	2.2	0.24
0.6	0.60	2.4	0.18
0.7	0.77	2.6	0.13
0.8	0.89	2.8	0.098
0.9	0.97	3.0	0.075
1.0	1.00	3.5	0.036
1.1	0.98	4.0	0.018
1.2	0.92	4.5	0.009
1.3	0.84	5.0	0.004

4.2.3 Tránsito de caudales

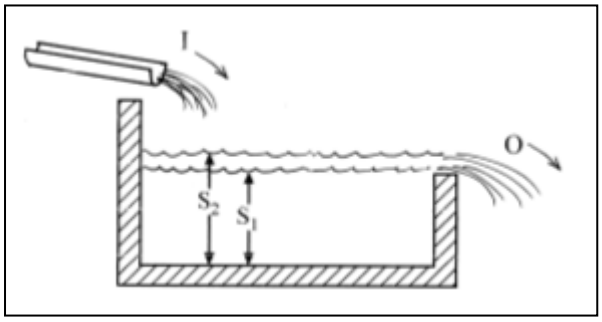
El tránsito de caudales es un procedimiento para determinar el tiempo y la magnitud del caudal (hidrograma de caudal) en un punto del curso de agua utilizando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos aguas arriba. Si el flujo es creciente, se habla de tránsito de crecientes

Existen diversos procedimientos para efectuar estos cálculos, que se agrupan en dos categorías: métodos hidrológicos y métodos hidráulicos.

Los métodos hidrológicos se basan en la ecuación de la continuidad, que para un tramo de un cauce (o para un embalse) establece que en un intervalo de tiempo considerado la variación del volumen almacenado es igual al volumen de entrada menos el volumen de salida. Lo que expresado en términos de caudales corresponde a la ecuación 4-13:

$$Q_{entrada} - Q_{salida} = \frac{\Delta Almacenamiento}{\Delta t} \qquad \text{(Ec. 4-13)}$$

Figura 4-4.- Esquema de aumento de caudal en un cauce o embalse



Si se considera la figura 4-4, se tiene la relación entre el almacenamiento y los caudales de entrada y salida:

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{(S_2 - S_1)}{\Delta t} \qquad \text{(Ec. 4-14)}$$

Siendo:

I = Caudal de entrada medio (durante el tiempo Δt)

O = Caudal de salida medio (durante el tiempo Δt)

$\Delta S = S_2 - S_1$ = Incremento del almacenamiento en el tiempo Δt.

Para calcular con exactitud los caudales medios de cada Δt se debería disponer de un hidrograma continuo, pero si solamente se conoce un dato de caudal para cada Δt, los caudales medios pueden evaluarse haciendo la media de los caudales de dos intervalos Δt consecutivos, resultando la expresión:

$$\frac{I_1+I_2}{2}-\frac{O_1+O_2}{2}=\frac{S_2-S_1}{\Delta t} \qquad \text{(Ec. 4-15)}$$

Los métodos hidráulicos además de la ecuación de la continuidad, utilizan las ecuaciones del movimiento del fluido, de modo que para cauces o canales en régimen no permanente se utilizan ecuaciones diferenciales para determinar el tránsito de caudales.

En la presente memoria se utilizará sólo métodos hidrológicos: el Método de Piscina Nivelada para analizar el tránsito de crecientes en embalses y el Método Muskingum-Cunge para el tránsito crecientes en cauces.

4.2.3.1 Método de Piscina Nivelada

El procedimiento propuesto en este método permite calcular el hidrograma de flujo de salida desde un embalse con una superficie de agua horizontal, dado su hidrograma de entrada y su relación almacenamiento-caudal de salida.

El procedimiento general consiste en dividir el horizonte de tiempo en intervalos iguales Δt y resolver recursivamente la ecuación de continuidad simplificada:

$$I_{avg}-O_{avg}=\frac{\Delta S}{\Delta t} \qquad \text{(Ec. 4-16)}$$

Donde:

I_{avg}: Flujo de entrada promedio durante el intervalo Δt

O_{avg}: Flujo de salida promedio durante el intervalo Δt

ΔS: Variación en el almacenamiento durante el intervalo Δt

Si la variación de almacenamiento en el intervalo es aproximadamente lineal, la ecuación 4-16 puede escribirse como:

$$\frac{I_t+I_{t+1}}{2}-\frac{O_t+O_{t+1}}{2}=\frac{S_{t+1}-S_t}{\Delta t} \qquad \text{(Ec. 4-17)}$$

Donde:

t = Corresponde al índice del intervalo de tiempo

I_t, I_{t+1}: Flujo de entrada al inicio y al final del intervalo t , respectivamente

O_t, O_{t+1}: Flujo de salida al inicio y al final del intervalo t, respectivamente

S_t, S_{t+1}: Valores de almacenamiento al inicio y al final del intervalo t, respectivamente

La ecuación 4-17 puede reordenarse de la forma indicada en la Ecuación 4-18:

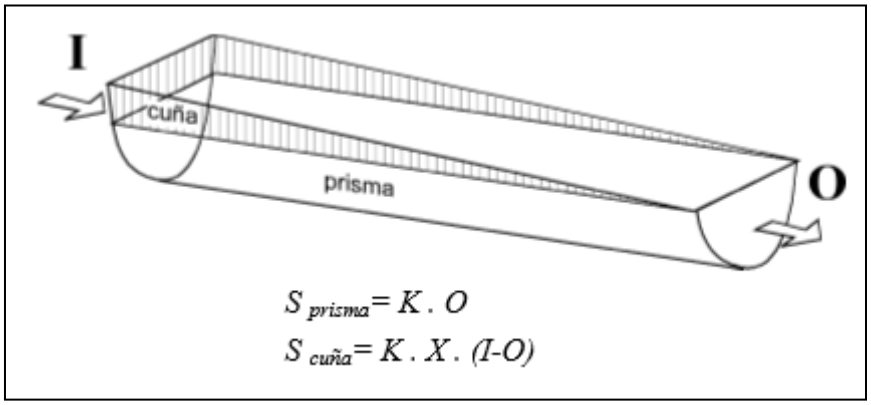
$$\frac{2S_{t+1}}{\Delta t} + O_{t+1} = (I_t + I_{t+1}) + \left(\frac{2S_t}{\Delta t} - O_t\right) \qquad \text{(Ec. 4-18)}$$

Todos los términos del lado derecho de la ecuación son conocidos. Los valores de I_t, I_{t+1} corresponden a las ordenadas del hidrograma de flujo de entrada pre-especificados. Los valores de O_t y S_t son conocidos al intervalo de tiempo t a partir del cálculo del intervalo previo. Con el fin de calcular el caudal de salida O_{t+1} es necesario una función almacenamiento-caudal de salida que relacione los valores correspondientes de O_{t+1} y S_{t+1}. Repitiendo el cálculo para intervalos sucesivos se obtiene el hidrograma de salida.

4.2.3.2 Método Muskingum

Este método señala que el almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O) y almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida (I-O), ya que cuanto mayor sea esa diferencia, más pronunciada será la cuña (Ver Figura 4-5).

Figura 4-5.- Esquema de almacenamiento según Método Muskingum



El almacenamiento según el método corresponde al expresado en la ecuación 4-19.

$$S = K\cdot[X\cdot I+(1-X)\cdot O] \qquad \text{(Ec. 4-19)}$$

Donde:

S = Almacenamiento en el tramo considerado de un cauce

I = Caudal de entrada en ese tramo

O = Caudal de salida de ese tramo

K, X = Constantes para ese tramo de cauce

Si se considera dos incrementos de tiempo consecutivos 1 y 2, y se reemplaza S1 y S2 en la ecuación 4-15, se obtiene un expresión para determinar el caudal de salida al final del intervalo 2:

$$O_2 = C_0\cdot I_2+C_1\cdot I_1+C_2\cdot O_1 \qquad \text{(Ec. 4-20)}$$

Donde:

I_1 , I_2 = Caudales de entrada en dos incrementos de tiempo sucesivos

O_1 , O_2 = Caudales de salida en los mismos incrementos de tiempo

$$C_0 =(-K\cdot X+0.5\cdot\Delta t)/(K-K\cdot X+0.5\cdot\Delta t) \qquad \text{(Ec. 4-21)}$$

$$C_1 =(K\cdot X+0.5\cdot\Delta t)/(K-K\cdot X+0.5\cdot\Delta t) \qquad \text{(Ec. 4-22)}$$

$$C_2 =\left(K- K\cdot X-0.5\cdot\Delta t\right)/\left(K-K\cdot X+0.5\cdot\Delta t\right) \qquad \text{(Ec. 4-23)}$$

K,X = constantes que dependen de cada tramo de cauce.

K puede asimilarse al tiempo de recorrido de la onda de un extremo a otro del tramo estudiado, se debe utilizar las mismas unidades que para Δt (horas o días), debiendo estar este entre K y 2KX (Wanielista, Sing) o entre K y K/3 (Viessman). Dentro de estos márgenes, cuanto menor sea el Δt, mayor es la precisión del método.

X es una constante que en teoría puede estar entre 0 y 0.5, pero normalmente toma un valor 0.2 ó 0.3. En primera aproximación suele tomarse 0.2. De las constantes K y X depende la mayor o menor amortiguación del hidrograma a lo largo del tramo del cauce. Si K= Δt y X = 0.5, el hidrograma de salida es idéntico al de entrada pero desplazado a la derecha un tiempo igual a K.

Si se conocen las constantes, K y X es posible calcular los caudales de salida a partir de los caudales de entrada. Inversamente, si se dispone de los caudales de entrada y salida para el mismo hidrograma, se pueden calcular las constantes K y X para ese tramo de cauce.

4.2.3.3 Método Muskingum-Cunge

Este método calcula las dos constantes utilizadas en el método de Muskingum, K y X, mediante parámetros hidráulicos del cauce.

$$K = \Delta x / c \qquad \text{(Ec. 4-24)}$$

$$X = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q}{B \cdot S_0 \cdot c \cdot \Delta x}\right) \qquad \text{(Ec. 4-25)}$$

Donde:

Δx =Longitud del tramo del cauce considerado

c = Celeridad correspondiente a Q y B

Q= Caudal

B = Ancho del cauce

S_0 = Pendiente media del cauce (adimensional)

La correcta aplicación de este método requiere elegir correctamente el Δt y el Δx. Para ello se dividirá el tramo estudiado en subtramos, de modo que el caudal de salida de uno de ellos será el caudal de entrada del siguiente (US Army Corps of Engineers, 1994).

4.3 Selección de modelo para pronóstico de caudales

El cálculo de caudales de crecidas para una cuenca real con datos reales puede ser realizado manualmente mediante la implementación de planillas para realizar todas las fases de cálculo del proceso precipitación-escorrentía, dependiendo de las características de la cuenca y de la cantidad de información a procesar. Sin embargo en la actualidad existen diferentes programas diseñados para la simulación hidrológica, tales como HEC HMS que permite calcular el hidrograma de una cuenca en base a sus características físicas y datos de precipitación.

El modelo empleado por el programa HEC HMS permite desarrollar todas las fases de cálculo mencionadas en el subcapítulo anterior con flexibilidad en la elección del método y en el ingreso de datos, razón por la que se utilizará para el pronóstico de caudales de crecida en la cuenca del Estero Marga-Marga.

5 SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA HEC-HMS

5.1 Introducción

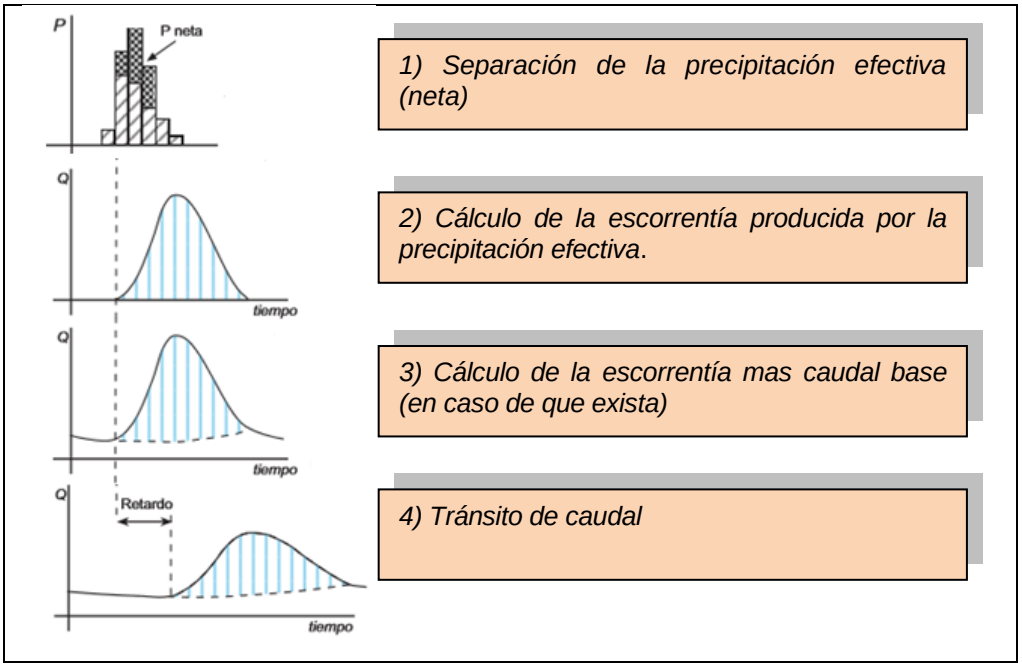
En el capítulo anterior se presentó el fundamento teórico sobre el cual es posible determinar el caudal de crecida en una cuenca. En el presente capítulo se presenta y describe el sistema de modelación empleado para el cálculo el caudal y que corresponde al sistema de modelación HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System).

El Sistema de Modelación Hidrológica, HEC-HMS [Ref. 13], es un software de uso libre creado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos que permite simular el proceso Precipitación-Escorrentía en cuencas. El programa está diseñado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas pudiendo ser utilizado tanto en pequeñas cuencas urbanas como en grandes cuencas sin intervención. La información generada puede ser utilizada individualmente o en conjunto con otros programas disponibles, para diversos estudios hidrológicos (drenaje urbano, pronósticos de caudal, análisis de crecidas, entre otros).

HEC-HMS permite calcular el hidrograma de una o varias cuencas simultáneamente para lo cual se deben construir los modelos considerando las características físicas de éstas, sus regímenes de precipitación y separando el ciclo hidrológico en áreas manejables con las correspondientes condiciones de borde dentro de la cuenca o subcuenca de interés.

El proceso puede dividirse en cuatro etapas o fases tal como lo esquematiza la Figura 5-1. Para cada subcuenca del modelo se calcula la precipitación efectiva, luego la escorrentía directa producida por esta precipitación y posteriormente se le suma la escorrentía base (de existir). El caudal resultante se transita a lo largo de los cauces y embalses correspondientes hasta llegar a la salida de la cuenca.

Figura 5-1.- Esquema de Cálculo de Hidrograma de crecida para una cuenca utilizando HEC-HMS



5.2 Componentes de HEC-HMS

EL programa se despliega un ambiente completamente integrado incluyendo una base de datos, utilidades en ingreso de datos, manejo de los cálculos y herramientas de entrega de resultados.

HEC-HMS utiliza los siguientes componentes para simular la respuesta hidrológica de una cuenca:

- " Basin model " o Modelo de cuencas. Corresponde al modelo de cuencas a través del cual se le indica al programa la configuración de las diferentes subcuencas y sus características físicas. Un proyecto puede contar con una o con varias subcuencas, embalses, uniones, bifurcaciones, etc.

- " Meteorological model " . El Modelo Meteorológico utiliza datos de precipitaciones y las asigna a cada subcuenca. Se pueden utilizar precipitaciones reales o teóricas.

- " Control especifications ". Las especificaciones de control fijan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación. La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación.

- " Time series data ". El programa requiere generalmente condiciones de borde para lo cual debe ingresarse series de tiempo, series de pares, datos de grillas relativas a modelos meteorológicos y modelos de cuencas.

5.2.1 Componentes del modelo de cuenca ("Basin model")

Mediante esta componente se representa físicamente la cuenca a través de un modelo que incluye y conecta sus elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos, a su vez, utilizan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. En la Tabla 5-1 se indican los elementos hidrológicos que se pueden utilizar como componentes del modelo de la cuenca en HEC HMS.

Tabla 5-1 Elementos hidrológicos disponibles en HEC-HMS

Elemento Hidrológico	Descripción
Subcuenca (Subbasin)	Elemento utilizado para representar la parte física de la cuenca. Dada la precipitación, el caudal de salida de la subcuenca es calculado restando las pérdidas de precipitación, y transformando el exceso de precipitación en caudal de salida. A este valor se le suma el gasto base, en caso de existir.
Ríos (Reach)	Elemento utilizado para trasladar el flujo aguas abajo en el modelo de cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos aguas arriba. El flujo salida es calculado en base al tránsito y la atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Una unión se utiliza para unir el caudal proveniente de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida es calculado sumando todas las entradas y asumiendo que no existe almacenamiento en la unión.
Fuente (Source)	Este elemento se utiliza para introducir caudal en la cuenca, no tiene entradas. El gasto de salida es definido por el usuario.
Salida (Sink)	Elemento utilizado para representar la salida de la cuenca. El gasto de entrada puede provenir de uno o más elementos. No hay gasto de salida en este elemento
Reservorio (Reservoir)	Se utiliza para modelar la detención y atenuación de un hidrograma causada por un reservorio, estanque de detención o embalse. El caudal de entrada puede venir de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida puede ser calculado de tres formas, se puede definir tablas de almacenamiento-descarga, elevación-almacenamiento-descarga ó elevación-área-descarga. Se puede introducir también una relación elevación-almacenamiento o elevación-área y definir una o más estructuras de salida, o especificar una serie de tiempo de caudal de salida.
Desviación (Diversion)	En este elemento se modela el caudal que se desvía del canal principal. La entrada puede venir de uno o más elementos. La salida consiste en un caudal desviado y un caudal no desviado, cada una de estas salidas puede ser conectada a elementos hidrológicos aguas abajo.

Fuente: “Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual” [34].

La Tabla 5-2 muestra la Barra de herramientas que dispone HEC HMS para la representación de la cuenca.

Tabla 5-2 Elementos hidrológicos en Barra de herramientas de HEC-HMS

Herramienta	Acción
	Agrega elemento Subcuenca al modelo de cuenca
	Agrega elemento Río al modelo de cuenca
	Agrega elemento Embalse al modelo de cuenca
	Agrega elemento Unión al modelo de cuenca
	Agrega elemento Desvío al modelo de cuenca
	Agrega elemento Fuente al modelo de cuenca
	Agrega elemento Vertedero al modelo de cuenca

5.2.2 Componentes del modelo meteorológico ("Meteorological model")

El modelo meteorológico calcula la precipitación en cada subcuenca, la que puede ser puntual o por celdas. Este modelo es capaz de modelar la precipitación sólida y líquida, junto con la evapotranspiración.

En la Tabla N° 5-3 se incluye una descripción de los métodos disponibles para calcular la precipitación media en la cuenca.

Tabla 5-3 Métodos disponibles en Modelo Meteorológico de HEC-HMS

Métodos de Precipitación	Descripción
Tormenta asociada a Frecuencia ("Frecuency Storm")	Se utiliza para desarrollar un evento de precipitación en el cual el valor de la precipitación para diferentes duraciones tiene una probabilidad de excedencia consistente
Pluviómetros con pesos ("Gage Weights")	Este método permite asignar pesos a las estaciones metereológicas definidas pos el usuario.
Precipitación por grilla ("Gridded Precipitation")	Este método permite el uso de precipitación por grilla.
Inverso de la Distancia ("Inverse distance")	Este método calcula el promedio de la precipitación en la subcuenca mediante la ecuación del inverso de la distancia al cuadrado para las estaciones definidas por el usuario
Tormenta del SCS ("SCS Storm")	Este método aplica la distribución temporal del SCS a una tormenta con una duración total de 24 horas
Hietograma espeficado ("Specified Hyetograph")	Este método permite introducir un hietograma para cada subcuenca
Tormenta estándar de proyecto ("Standard Project Storm")	Este método aplica una distribución temporal a un valor de precipitación dado (volumen índice de precipitación)

5.2.3 Componentes de las Especificaciones de control ("Control especifications")

Las especificaciones de control determinan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación. Se debe indicar una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación.

5.2.4 Componentes de la Entrada de datos ("Time series data")

Se requieren datos como condiciones de borde o parámetros en los modelos de la cuenca y modelos meteorológicos. Los datos pueden clasificarse en series temporales, pares de datos y datos por celdas (Ver Tabla 5-4) y pueden ser ingresados al programa manualmente o bien referenciados a un registro de fichero.

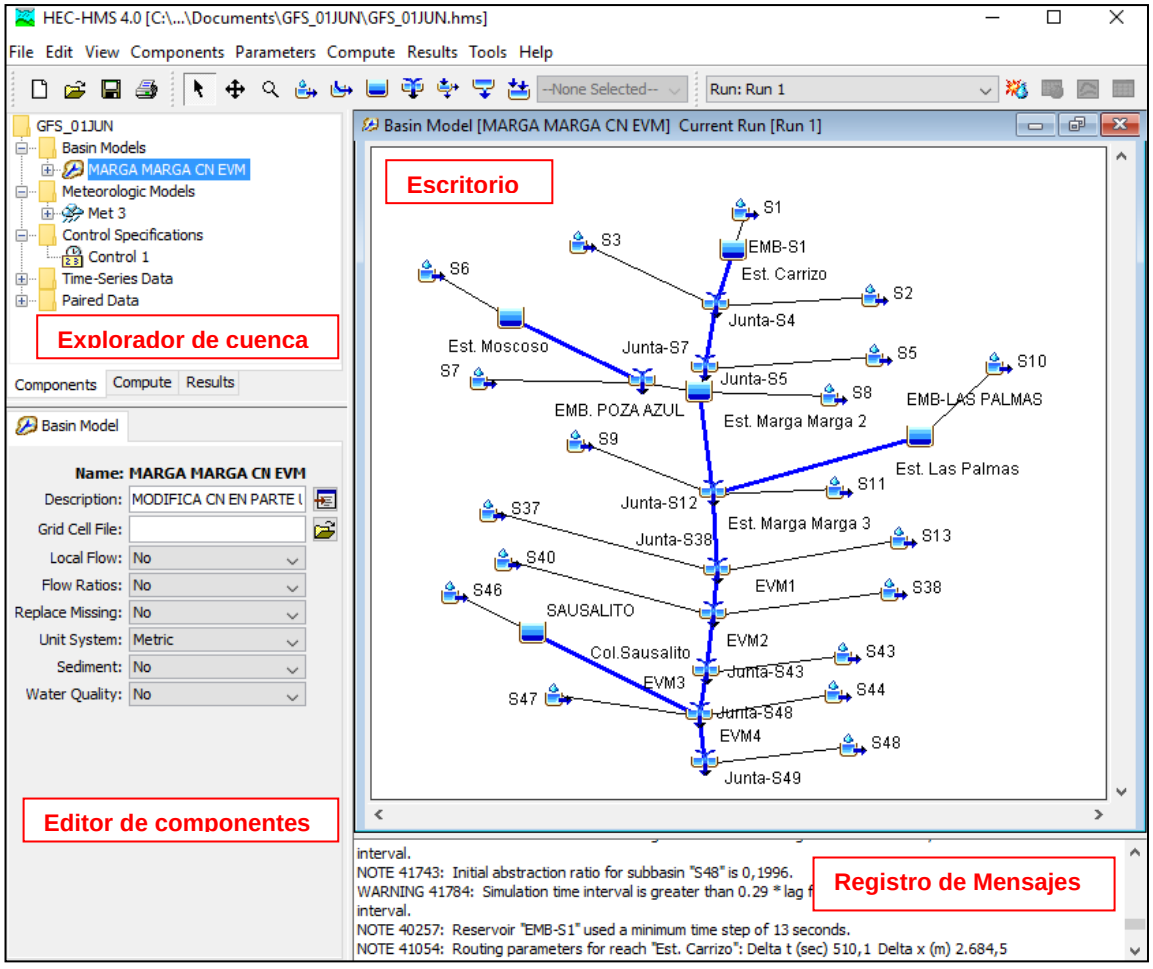
Tabla 5-4 Tipos de datos de entrada para HEC-HMS

Series Temporales de Datos	Pares de Datos	Datos por Celdas
Precipitaciones	Relaciones de Almacenamiento-Caudal de Descarga	Precipitación
Caudal de Descarga	Relaciones de Altura-Almacenamiento	Temperatura
Limnímetros	Relaciones de Altura-Área	Radiación Solar
Temperatura	Relaciones de Altura-Caudal de Descarga	Coeficiente de Cultivo
Radiación Solar	Relaciones de Caudal de Entrada-Derivación	Capacidad de Almacenamiento
Coeficientes de Cultivo	Secciones Transversales	Tasa de Percolación
	Hidrograma Unitario	Coeficientes de Almacenamiento
	Curvas de Porcentaje	Déficit de Humedad
	Funciones de Tasa de Derretimiento	Área Impermeable
	Funciones de Tasa de Contenido de Frío	Curva Número SCS
	Patrones de Derretimiento del Suelo	Alturas
	Patrones de Evaporación	Contenido de Frío
	Patrones de Tasa de Derretimiento	Contenido de Frío ATI
		Tasa de Derretimiento ATI
		Contenido de Agua Líquida
		Equivalente de Agua de Nieve

5.2.5 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario consiste en una barra de menú, barra de herramientas y cuatro paneles principales: Explorador de Cuenca, Escritorio, Editor de Componentes y Registro de Mensajes como se muestra en la Figura 5-2.

Figura 5-2.- Interfaz de usuario de HEC-HMS



6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA ESTERO MARGA-MARGA

6.1 Introducción

En el presente capítulo, se realiza la modelación y simulación hidrológica de la cuenca del Estero Marga-Marga. El objetivo fundamental de esta simulación es determinar la transformación de precipitación en escorrentía en base a un modelo implementado en HEC-HMS.

La simulación hidrológica de la cuenca mediante el programa HEC-HMS utilizará un Modelo de Cuenca; un Modelo Meteorológico; Especificaciones de Control; Series de Datos de Precipitación, Hidrogramas Unitarios de las subcuencas y Pares de Datos representativos de curvas de almacenamiento de los embalses existentes en la cuenca.

6.2 Modelo ingresado a HEC-HMS

En este subcapítulo, se describe el modelo de la Cuenca del Estero Marga-Marga implementado en HEC-HMS, el cual se construye considerando las condiciones físicas y meteorológicas de la cuenca en estudio.

La representación física del área de estudio se consigue a través de un Modelo de Cuenca. Los elementos hidrológicos son utilizados para separar la cuenca hidrográfica en subcuencas, las cuales se conectan a través de elementos que representan la red de drenaje.

6.2.1 Modelo de cuenca

6.2.1.1 Recopilación y procesamiento de datos necesarios para HEC-HMS

Se consideró la información contenida en el Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar [Ref. 1], cuya versión vigente a la fecha de elaboración de este estudio contiene la mayoría de los antecedentes necesarios para elaborar un modelo representativo de la cuenca en estudio. En efecto, se tomó como referencia el plano "Cuencas Aportantes en secciones de Esteros" (1:50.000) para definir las subcuencas y demás elementos hidrológicos, los que fueron ingresados como parte del modelo empleando un mapa de fondo elaborado en base al mismo plano. La Figura 6-1 muestra el modelo de cuenca generado para el análisis hidrológico, los elementos que lo componen son los que se indican en las Tablas 6-1 a 6-4.

Figura 6-1.- Modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC-HMS

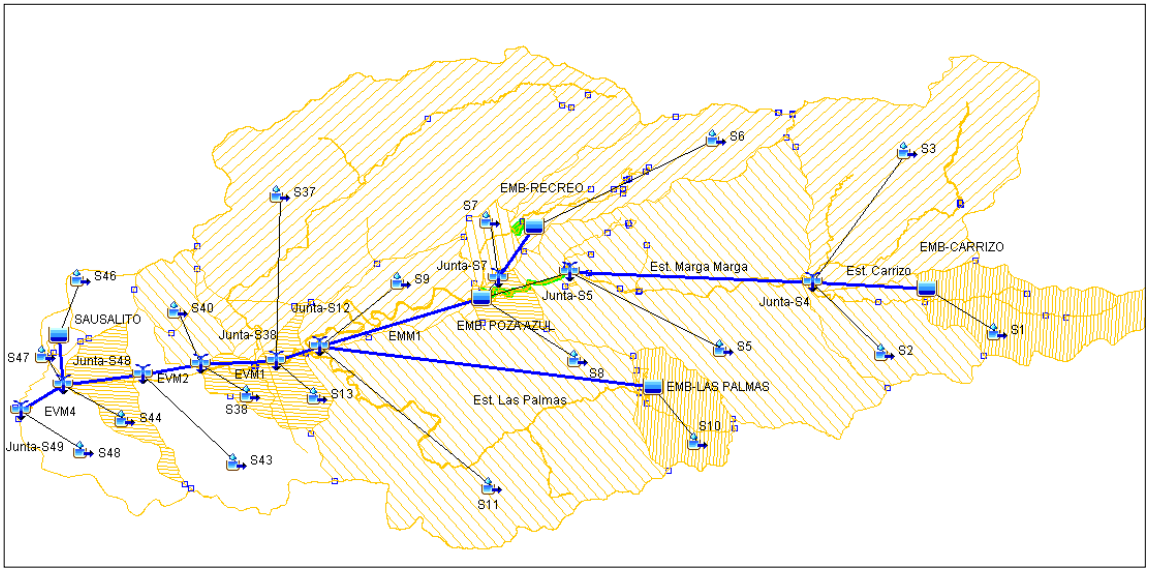


Tabla 6-1 Elementos Hidrológicos tipo Subcuenca ("Subbasin") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS

Nombre	Tipo Elemento	Punto de Descarga
S1	Subbasin	Estero Carrizo en Embalse Las Piedras
S2	Subbasin	Estero Carrizo en Junta Estero El Fullero
S3	Subbasin	Estero El Fullero en Junta Estero Carrizo
S5	Subbasin	Estero Marga-Marga en Cabecera Embalse Poza Azul
S6	Subbasin	Estero Moscoso en Embalse Recreo
S7	Subbasin	Estero Moscoso en desembocadura Embalse Poza Azul
S8	Subbasin	Estero Marga-Marga aguas abajo Embalse Poza Azul
S9	Subbasin	Estero Marga-Marga antes Junta Estero Las Palmas
S10	Subbasin	Estero Las Palmas en Embalse Las Palmas
S11	Subbasin	Estero Las Palmas en desembocadura Estero Marga-Marga
S13	Subbasin	Estero Marga-Marga en junta Estero Quilpué
S37	Subbasin	Estero Quilpué en Confluencia Marga-Marga
S38	Subbasin	Estero Viña del Mar Aguas Abajo Junta Esteros Quilpué y Marga-Marga
S40	Subbasin	Quebrada El Olivar en Desembocadura
S43	Subbasin	Estero Viña del Mar en Puente Limonares
S44	Subbasin	Estero Viña del Mar antes Junta Canal Los Castaños
S46	Subbasin	Laguna Sausalito en descarga a Estero Viña del Mar
S47	Subbasin	Cauce Canal Los Castaños en Desembocadura a Estero Viña del Mar
S48	Subbasin	Estero Viña del Mar bajo junta Canal Los Castaños

Tabla 6-2 Elementos Hidrológicos tipo Ríos ("Reach") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS

Nombre	Tipo Elemento	Observación
Est. Carrizo	Reach	Estero El Carrizo
Est. Marga-Marga	Reach	Estero Marga-Marga Bajo Junta-S4 y antes de Junta-S5
Est. Moscoso	Reach	Estero Moscoso
Est. Marga-Marga 2	Reach	Est.Marga-Marga aguas abajo Embalse Poza Azul y antes de Junta-S12
Est. Las Palmas	Reach	Estero Las Palmas
Est. Marga-Marga 3	Reach	Estero Marga-Marga Bajo Junta-S12 y antes de Junta-S38
EVM1	Reach	Estero Viña del Mar Aguas Abajo Junta-S38 y antes de Junta-S39
EVM2	Reach	Estero Viña del Mar Aguas Abajo Junta-S39 y antes de Junta-S43
EVM3	Reach	Estero Viña del Mar Aguas Abajo Junta-S43 y antes de Junta-S48
Col.Sausalito	Reach	Colector Descarga Laguna Sausalito

Tabla 6-3 Elementos Hidrológicos tipo Junta ("Junction") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS

Nombre	Tipo Elemento	Observación
Junta-S4	Junction	Junta Esteros El Fullero y Carrizo
Junta-S5	Junction	Estero Marga-Marga en Cabecera Embalse Poza Azul
Junta-S7	Junction	Estero Moscoso en desembocadura Embalse Poza Azul
Junta-S12	Junction	Estero Marga-Marga bajo Junta Estero Las Palmas
Junta-S38	Junction	Est. Viña del Mar Aguas Abajo Junta Esteros Quilpué y Marga-Marga
Junta-S39	Junction	Estero Viña del Mar en Puente El Olivar
Junta-S43	Junction	Estero Viña del Mar en Puente Limonares
Junta-S48	Junction	Estero Viña del Mar bajo Junta Canal Los Castaños
Junta-S49	Junction	Estero Viña del Mar en Desembocadura al mar

Tabla 6-4 Elementos Hidrológicos tipo Embalses ("Reservoir") del modelo de cuenca del Estero Marga-Marga, HEC HMS

Nombre	Tipo Elemento	Observación
EMB-CARRIZO	Reservoir	
EMB-RECREO	Reservoir	
EMB. POZA AZUL	Reservoir	
EMB-LAS PALMAS	Reservoir	
SAUSALITO	Reservoir	

6.2.1.2 Metodología y Parámetros utilizados para la modelación hidrológica

Una vez ubicados y conectados los elementos hidrológicos de acuerdo a las direcciones de flujo se procedió a ingresar la información básica de cada subcuenca tales como área, punto de descarga, flujo base, método de estimación de pérdidas, entre otros. Además se ingresó los parámetros para estimación de tránsito en ríos y esteros (longitud, pendiente, rugosidad de Manning, geometría de la sección transversal, etc.), curvas se descarga de embalses y en general toda la información necesaria para representar el fenómeno precipitación escorrentía de acuerdo a lo señalado en el Capítulo 4.

6.2.1.2.1 Subcuencas ("Subbasins")

Para cada elemento tipo subcuenca o "subbasin" se requiere la definición de tres métodos de cálculo: un método de cálculo para la precipitación efectiva ("Loss Method"), otro método para la transformación de precipitación en escorrentía ("Transform Method") y un tercer método para la estimación del flujo base ("Baseflow Method").

En la Tabla 6-5, se señala el método de cálculo considerado para cada uno de los Elementos Hidrológicos definidos como Subcuenca. Los parámetros correspondientes a cada método se han estimado en base a la información recopilada para el presente estudio.

Tabla 6-5 Métodos de Cálculo para Subcuencas ("Subbasin")

Subbasin	Loss Method	Transform Method	Baseflow Method
S1	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S2	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S3	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S5	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S6	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S7	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S8	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S9	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S10	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S11	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S13	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S37	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S38	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S40	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S43	SCS Curve Number	Specified Unit Hidrograph	None
S44	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S46	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S47	SCS Curve Number	SCS Transform	None
S48	SCS Curve Number	SCS Transform	None

a) Método de Pérdida o Infiltración ("Loss Method")

Para definir las condiciones de infiltración y calcular la precipitación efectiva se adoptó el denominado Método de la Curva Número (SCS Curve Number) propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de Los Estados Unidos, descrito en el Capítulo 4.

El hietograma de precipitación adoptado corresponde al evento de precipitaciones del 06 de agosto del 2015 (Ver Capítulo 3), para el que se calculó el hietograma de precipitación efectiva utilizando el método de la Curva Número en forma incremental.

Los valores de curva número fueron obtenidos del Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar [Ref. 1]. En dicho estudio, se estimó los valores de Curva Número Actuales y Futuros para toda la cuenca mediante un método de muestreo basado en antecedentes geológicos y utilizando una grilla de coordenadas cada 500 metros se determinó el valor de la curva número para cada uno de los vértices de la grilla. El valor de curva número para una subcuenca en particular se calculó como el promedio de los valores obtenidos en los vértices ubicados dentro de la cuenca seleccionada.

Los parámetros ingresados al modelo son los que se indican en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6 Parámetros Método " SCS Curve Number" para Subcuencas

Subbasin	Initial Abstration (mm)	Curve Number	Impervious (%)
S1	20.7	71	0
S2	23.9	68	0
S3	26.2	66	0
S5	26.2	66	0
S6	29.8	63	0
S7	28.6	64	0
S8	27.4	65	0
S9	26.2	66	0
S10	21.8	70	0
S11	21.8	70	0
S13	25.0	67	0
S37	18.8	73	0
S38	22.8	69	0
S40	22.8	69	0
S43	16.9	75	0
S44	16.9	75	0
S46	16.9	75	0
S47	16.9	75	0
S48	16.9	75	0

Fuente: Plan Maestro del Gran Viña del Mar [Ref. 1]

b) Método de transformación Precipitación-Escorrentía

Para la transformación de precipitación en escorrentía se utilizó el método del Hidrograma Unitario Sintético para subcuencas de área mayor a 10 km2 y el Hidrograma Unitario del SCS para cuencas de área menor a dicho valor. Ambos métodos se describen en el Capítulo 4 y son designados en el modelo HEC HMS como "Specified Unit Hidrograph" y "SCS Transform", respectivamente.

La obtención de los parámetros del hidrograma unitario sintético se hizo utilizando las relaciones entregadas por Arteaga y Benítez para la zona Aconcagua-Maule, determinando para cada subcuenca de área mayor a 10 km^2, los siguientes parámetros:

- Longitud de las curvas de nivel (Σ Li) (km).
- Área de la cuenca (km^2).
- Longitud cauce principal (Lcp) (km).
- Distancia del centro de gravedad de la cuenca a la sección de salida (Lcg) (km).
- Pendiente media de la cuenca (S).

De las 19 subcuencas definidas, 11 cumplen la condición de área mayor a 10 km2 sin embargo solo se ha calculado el Hidrograma Unitario Sintético de Arteaga y Benítez a 9 de ellas por existir dos subcuencas altamente urbanizadas (S37 y S48) en las que este método de transformación no es aplicable.

Para las cuencas de área menor a 10 km2 y las cuencas urbanas se empleará el Método del Hidrograma Unitario del SCS (SCS Unit Hidrograph), descrito en el Capítulo 4. En la Tabla 6-7 se indica el método de transformación utilizado para cada subcuenca, mientras que en la Tabla 6-8 se indican los parámetros estimados e ingresados al modelo para la aplicación del método del SCS. Las variables y parámetros empleados para la obtención de los Hidrogramas unitarios de Arteaga y Benítez se presentan en la Tabla 6-9. Los Hidrogramas Unitarios obtenidos para cada subcuenca se incluyen en el Capítulo 11, Anexo B.

Tabla 6-7 Métodos empleados en subcuencas para transformación Precipitación-Escorrentía

Subbasin	Área (Km2)	Transform Method
S1	18.7	Specified Unit Hidrograph
S2	14.65	Specified Unit Hidrograph
S3	48.14	Specified Unit Hidrograph
S5	68.08	Specified Unit Hidrograph
S6	20.67	Specified Unit Hidrograph
S7	4.16	SCS Transform
S8	3.58	SCS Transform
S9	14.12	Specified Unit Hidrograph
S10	10.54	Specified Unit Hidrograph
S11	71.22	Specified Unit Hidrograph
S13	6.03	SCS Transform
S37	86.48	SCS Transform
S38	3.3	SCS Transform
S40	8.2	SCS Transform
S43	21.53	Specified Unit Hidrograph
S44	7.54	SCS Transform
S46	6.27	SCS Transform
S47	0.49	SCS Transform
S48	13.53	SCS Transform

Tabla 6-8 Variables y Parámetros para Hidrograma Unitario SCS

Subcuenca	Parámetro Lag Time (min)
S7	29.6
S8	22.8
S37	137.4
S13	37.3
S40	15.3
S38	32.9
S44	49.4
S46	13.3
S47	10.1
S48	25.4

Tabla 6-9 Variables y Parámetros para Hidrograma Unitario de Arteaga y Benítez

Subcuenca	Área km2	S	Lcp km	Lcg km	tp hrs.	tr hrs.	tu' hrs.	tu hrs.	tp' hrs.	tb hrs.	qp l/s/km2
S1	18.70	0.40	7.7	3.1	1.63	0.30	0.25	0.30	1.62	4.59	197.21
S2	14.65	0.01	6.2	3	2.8	0.52	0.25	0.52	2.77	8.29	102.31
S3	48.14	0.30	13.7	5.5	2.7	0.49	0.50	0.49	2.72	8.11	104.78
S5	68.08	0.05	9.40	5.50	3.31	0.60	0.50	0.60	3.29	9.99	83.15
S6	20.67	0.62	11.28	5.12	2.12	0.39	0.50	0.39	2.15	6.27	139.33
S9	14.12	0.10	12.45	9.00	3.97	0.72	0.50	0.72	3.91	12.10	67.25
S10	10.54	0.30	3.56	2.00	1.07	0.19	0.50	0.19	1.15	3.13	300.94
S11	71.22	0.24	18.40	6.70	3.47	0.63	1.00	0.63	3.56	10.92	75.34
S43	21.53	0.02	2.43	3.45	1.94	0.35	0.50	0.35	1.98	5.71	154.56

6.2.1.2.2 Ríos ("Reach")

Un río o curso de agua es definido en el modelo como un elemento con una o varias entradas, y sólo una salida. En el caso de existir más de una entrada, se suman todos los ingresos antes de calcular el flujo de salida. En la cuenca en estudio los cursos de aguas corresponden mayoritariamente a esteros en los que el caudal de salida se calcula seleccionando los métodos disponibles.

Para los diez elementos hidrológicos definidos como ríos (Ver tabla 6-2), se empleó el Método Muskingum-Cunge para calcular el tránsito de crecidas. Los parámetros ingresados al modelo son señalados en la Tabla 6-10 para los cauces naturales y en la Tabla 6-11 para el Colector Sausalito.

Tabla 6-10 Variables y Parámetros empleados Método Muskingum Cunge en Esteros

Reach	Largo (m)	Pendiente (m/m)	Coef. de Manning's	Forma sección Transversal	Ancho (m)	Talud (xH:1V)
Est. Carrizo	5369	0.0186	0.04	Trapezoidal	6	1.5
Est. Moscoso	2800	0.087	0.04	Trapezoidal	10	1.5
Est. Marga-Marga	9386	0.0053	0.04	Trapezoidal	13	1.5
Est. Marga-Marga 2	12450	0.01	0.04	Trapezoidal	10	1
Est. Marga-Marga 3	2280	0.0329	0.04	Trapezoidal	70	1.5
Est. Las Palmas	18500	0.005	0.04	Trapezoidal	10	1.5
EVM1	2300	0.005	0.04	Trapezoidal	20	1
EVM2	2400	0.005	0.04	Trapezoidal	25	0.25
EVM3	2500	0.005	0.04	Trapezoidal	20	0.25
EVM4	1900	0.005	0.04	Trapezoidal	60	0.1

Tabla 6-11 Variables y Parámetros empleados Método Muskingum Cunge en Colector Sausalito

Reach	Largo (m)	Pendiente (m/m)	Coef. de Manning's	Forma sección Transversal	Reach
Col.Sausalito	1110	0.027	0.013	Circular	1

6.2.1.2.3 Uniones ("Junction")

En el modelo de cuenca, se consideró nueve elementos hidrológicos tipo junta o unión (Ver Tabla 6-3), correspondiente a las confluencias de esteros o puntos de control definidos para la modelación.

6.2.1.2.4 Embalses ("Reservoir")

Finalmente, para el modelo de cuenca se consideraron los embalses más importantes existentes en el área en estudio y que son los siguientes: Embalse El Carrizo, Embalse Recreo, Embalse Poza Azul, Embalse Las Palmas y Laguna Sausalito. Para cada uno de ellos se ingresó al modelo las curvas de descarga estimadas y que se detallan en el Anexo C.

6.2.2 Modelo meteorológico

El modelo meteorológico, el cual se visualiza en HEC-HMS como “Met 1”, es uno de los principales componentes de un proyecto de simulación hidrológica. Tiene como finalidad simular las condiciones meteorológicas de cada subcuenca. Considera en conjunto, para cada una de las subcuencas definidas, los procesos de precipitación, evapotranspiración y derretimiento de nieve.

La cuenca del Estero Marga-Marga tiene un régimen pluvial por lo que no se considerará el proceso de derretimiento de nieve en la modelación

6.2.2.1 Precipitación

6.2.2.1.1 Definición de estaciones pluviométricas a utilizar

Las estaciones consideradas en el modelo de simulación hidrológica son las que se indican en la Tabla 6-12. Para todas las estaciones se recopiló los datos pluviométricos y pluviográficos de la tormenta del 05-06 de agosto del 2015, los que fueron procesados e ingresados al modelo como series de tiempo ("Time-Series data").

Tabla 6-12 Estaciones meteorológicas a considerar en la simulación

Nombre Estación	Institución a cargo	Ubicación
Las Salinas	DGA	Viña del Mar
Rodelillo	DGA	Valparaíso
Colliguay	DGA	Colliguay
Villa Alemana	PUCV (Colegio Altomonte)	Villa Alemana
Quilpué	P.Kamann	Quilpué

En el desarrollo del modelo de cuenca se consideró 19 subcuencas, por lo que los datos de precipitaciones ingresados debieron ser distribuidos según la influencia de cada estación pluviométrica dentro del área de cada subcuenca.

En efecto, se debe considerar la posibilidad de que una subcuenca sea influenciada por una o más estaciones distintas y asignarle al modelo el porcentaje de intervención de cada una éstas en cada subcuenca. Esta forma de asignación es denominada en HEC HMS como método de "Pluviómetros por pesos", y asigna pesos a los pluviómetros definidos por el usuario y estimados mediante algún método que en este caso corresponde a los Polígonos de Thiessen. En la Tabla 6-13 se presenta la asignación de pesos de cada estación en cada subcuenca.

Tabla 6-13 Porcentaje asignado por estación pluviométrica para cada subcuenca

Subcuenca	Estación				
	Colliguay	Villa Alemana	Quilpué	Las Salinas	Rodelillo
S1	1	0	0	0	0
S2	1	0	0	0	0
S3	1	0	0	0	0
S5	0	0.4	0.6	0	0
S6	0	0.85	0.15	0	0
S7	0	0	1	0	0
S8	0	0	1	0	0
S9	0	0	1	0	0
S10	0	0	1	0	0
S11	0	0	1	0	0
S13	0	0.15	0.85	0	0
S37	0	0.28	0.65	0.07	0
S38	0	0	0	1	0
S40	0	0	0	1	0
S43	0	0	0	0.7	0.3
S44	0	0	0	1	0
S46	0	0	0	1	0
S47	0	0	0	1	0
S48	0	0	0	1	0

6.2.3 Especificaciones de control

Para realizar la modelación de la cuenca del Estero Marga-Marga se consideró el evento de precipitación del 05-06 de Agosto de 2015, estableciendo las siguientes especificaciones de control:

Fecha de inicio: 05 de agosto de 2015 a las 13:00 hrs

Fecha de término: 07 de agosto de 2015 a las 3:00 hrs

Intervalo de tiempo: 15 minutos

6.2.4 Series temporales de datos para la cuenca del Estero Marga-Marga

El componente de HEC-HMS, “Time Series Data Manager”, permite asignar al modelo de cuenca, datos temporales de precipitación, caudales de salida y temperaturas. Estos datos pueden ser ingresados manualmente o a través de una base de datos en HEC-DSS [Ref.14].

Las series temporales de datos, fueron ingresados manualmente y consideraron los datos medidos en las estaciones pluviométricas durante el evento de precipitación del 05-06 de Agosto de 2015. Los series de precipitación consideradas se incluyen en el Anexo A del Capítulo 11.

6.2.5 Pares de datos

El componente de HEC-HMS denominado *"Paired Data"* permite ingresar los Hidrogramas Unitarios de Arteaga y Benítez y las curvas de descargas de los embalses relevantes de la cuenca. Los pares de datos considerados para la modelación se incluyen en el Anexo B del Capítulo 11.

6.3 Presentación de resultados

En el presente subcapítulo, se muestran los resultados obtenidos en la Modelación Hidrológica de la Cuenca del Estero Marga-Marga, utilizando HEC-HMS. En las Tablas 6-14 y 6-15 se resumen los caudales máximos instantáneos obtenidos para cada elemento hidrológico definido en el modelo bajo las condiciones particulares señaladas en la presente memoria. Los resultados se pueden visualizar en detalle en el Anexo C del Capítulo 11.

Tabla 6-14 Caudal de Crecida para Subcuenca definida en el modelo

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km2)	Precipitación Efectiva (mm)	Caudal Máximo Descarga	
			Q (m3/s)	Fecha, Hora
S1	18.7	37.78	35.49	06ago2015, 11:30
S2	14.65	32.73	20.68	06ago2015, 12:30
S3	48.14	29.58	63.08	06ago2015, 12:15
S5	68.08	30.95	66.07	06ago2015, 17:15
S6	20.67	25.07	20.43	06ago2015, 16:45
S7	4.16	29.19	5.08	06ago2015, 15:00
S8	3.58	30.74	4.68	06ago2015, 15:00
S9	14.12	32.34	13.34	06ago2015, 17:00
S10	10.54	39.04	14.17	06ago2015, 15:45
S11	71.22	39.06	80.12	06ago2015, 16:15
S13	6.03	32.50	7.43	06ago2015, 15:45
S37	86.48	42.51	108.10	06ago2015, 16:45
S38	3.3	27.17	4.84	06ago2015, 09:45
S40	8.2	27.17	17.20	06ago2015, 09:30
S43	21.53	34.98	23.72	06ago2015, 15:15
S44	7.54	36.53	12.28	06ago2015, 10:00
S46	6.27	36.53	17.81	06ago2015, 09:30
S47	0.49	36.53	1.83	06ago2015, 09:15
S48	13.53	36.53	30.63	06ago2015, 09:30

Tabla 6-15 Caudal de Crecida en embalses, esteros y juntas del modelo

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km2)	Caudal Máximo Instantáneo (m3/s)	Fecha y Hora Caudal Máximo
EMB-LAS PALMAS	10.5	4.8	06ago2015, 17:30
EMB-RECREO	20.7	17.1	06ago2015, 17:45
EMB-CARRIZO	18.7	25.4	06ago2015, 12:30
EMB. POZA AZUL	178	163	06ago2015, 13:45
SAUSALITO	6.3	1.3	06ago2015, 16:30
Col.Sausalito	6.3	1.3	06ago2015, 16:30
Est. Carrizo	18.7	25.3	06ago2015, 13:00
Est. Las Palmas	10.5	4.6	06ago2015, 21:15
Est. Moscoso	20.7	17.1	06ago2015, 17:45
Est. Marga-Marga	81.5	105.5	06ago2015, 13:30
Est. Marga-Marga 2	178	162.3	06ago2015, 14:15
Est. Marga-Marga 3	273.9	249.1	06ago2015, 14:30
EVM1	366.4	354.8	06ago2015, 14:30
EVM2	377.9	363.9	06ago2015, 14:45
EVM3	399.4	387.0	06ago2015, 14:45
EVM4	413.7	394.8	06ago2015, 14:45
Junta-S4	81.5	106.7	06ago2015, 12:45
Junta-S5	149.6	158.0	06ago2015, 13:30
Junta-S7	24.8	17.6	06ago2015, 17:30
Junta-S12	273.9	249.3	06ago2015, 14:15
Junta-S38	366.4	355.1	06ago2015, 14:30
Junta-S39	377.9	364.3	06ago2015, 14:30
Junta-S43	399.4	387.2	06ago2015, 14:45
Junta-S48	413.7	395.8	06ago2015, 14:45
Junta-S49	**427.2**	**408.3**	**06ago2015, 14:45**

7 VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

7.1 Introducción

En esta etapa del estudio se analizará la calidad del modelo hidrológico desarrollado en el Capítulo 6. Se revisará las consideraciones realizadas y parámetros adoptados mediante la validación de los resultados obtenidos en el cálculo de la escorrentía.

7.2 Validación del modelo

Con el fin de evaluar la certeza y confiabilidad de la simulación, se realiza la validación del modelo de precipitación-escorrentía en base a alturas observadas el día 06 de agosto de 2015 en los puentes del Estero Marga-Marga próximos a la sección de salida de la cuenca hacia el mar.

No es posible una calibración cuantitativa del modelo hidrológico toda vez que no se tienen registros de caudal en la cuenca. En el escenario ideal, hubiese resultado muy útil en la calibración la existencia de alguna Estación Fluviométrica en la cuenca que permitiese la comparación de los hidrogramas de caudal observados con los simulados. Sin embargo, dada la inexistencia de este tipo de estaciones en la cuenca, se empleará la topografía del Estero Marga-Marga en Viña del Mar para elaborar un modelo de ejes hidráulicos que permita obtener una medida del caudal que genera las alturas de agua observadas y compararlo con el caudal obtenido mediante la simulación hidrológica de la cuenca.

Para el presente estudio se cuenta con información topográfica correspondiente a perfiles transversales ubicados a lo largo del Estero, cubriendo desde su desembocadura (aguas abajo) hasta la rotonda que da acceso a El Olivar (aguas arriba) [Ref.: 15]. En estos perfiles se incluye en forma específica un perfil transversal en el cruce de los puentes existentes: Puente Casino, Puente Ecuador, Puente Villanelo, Pasarela Quinta, Puente Libertad, Puente Quillota, Puente Mercado, Puente Cancha, el Puente Lusitania, Puente acceso Troncal Sur y, finalmente, Puente Salida Troncal Sur.

7.2.1 Obtención de niveles de agua en base a modelo de ejes hidráulicos

En este proceso se utilizará el software HEC-RAS, programa que permite realizar la modelación hidráulica de canales naturales y artificiales bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto, permitiendo así determinar ejes hidráulicos, transporte de sedimentos, calidad de agua y zonas inundables.

Para régimen impermanente el programa resuelve las ecuaciones de Saint Venant a través de un modelo de diferencias finitas en una dimensión. Luego, al realizar el cálculo de un eje hidráulico, se obtendrán valores de velocidad y altura de agua, promediados sobre cada sección transversal del cauce.

En términos generales, el programa trabaja en base a secciones transversales de un cauce para las cuales calcula iterativamente los niveles de la superficie del agua mediante la aplicación del principio de conservación de la energía.

El procedimiento computacional es el siguiente:

1. Se asume una elevación de superficie de agua aguas arriba de la sección transversal (o aguas abajo de la sección transversal, si se desea calcular un perfil supercrítico).
2. Luego, basado en esta elevación asumida, se determina la capacidad de transporte total y la velocidad principal.
3. Con los valores obtenidos en el paso 2, se calcula la pendiente de fricción y se calculan las pérdidas por fricción y pérdidas por contracción/expansión.
4. Con los valores obtenidos en el paso 2 y 3, se resuelve la ecuación de conservación de la energía para obtener una nueva elevación de superficie.
5. Para cada sección transversal, se compara el valor calculado en 4 con los valores asumidos en el paso 1. Se repiten los pasos del 1 al 5, hasta que la diferencia entre ellos sea de 0.003 m. Esta tolerancia puede ser definida por el usuario.

En el caso de puentes o singularidades, HEC-RAS utiliza cuatro secciones reales de cálculo próximas al puente, dos secciones aguas arriba y dos secciones aguas abajo del puente. Las secciones intermedias son utilizadas por el programa para incorporar la geometría del puente; las secciones de los extremos son de control de aproximación del flujo que se suponen lo suficientemente alejadas del puente como para no estar afectadas por los fenómenos de contracción y expansión de las líneas de corriente del flujo.

7.2.1.1 Modelo geométrico

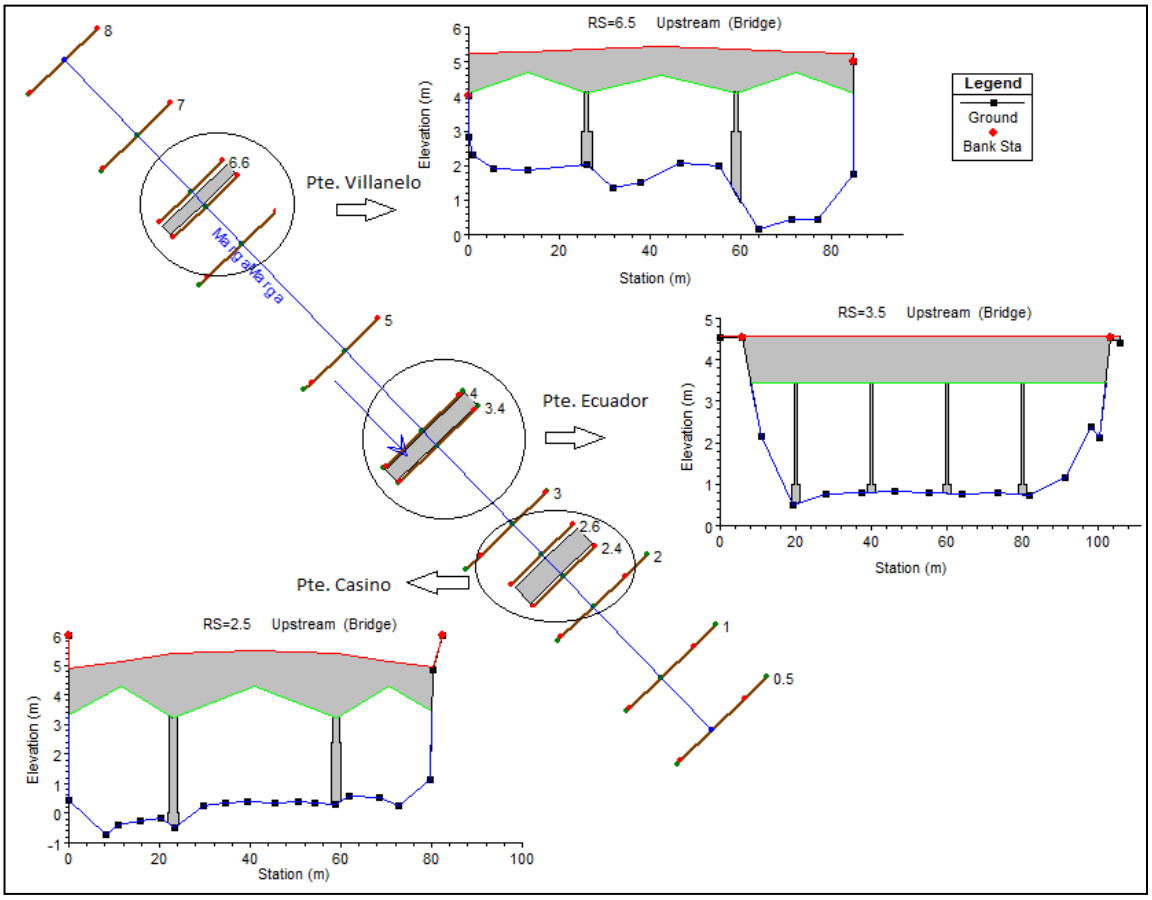
Para el presente estudio se ha modelado el Estero Marga-Marga en el tramo próximo a su desembocadura al mar (ó Estero Viña del Mar) correspondiente al elemento EVM4 del modelo de cuenca en HEC-HMS. Este elemento tipo río ("reach") está comprendido entre las juntas S-48 y junta S-49 y corresponde físicamente al Estero Viña del Mar entre la Junta Canal Los Castaños y su desembocadura al mar (Ver Tabla 6-3).

Se ha creado un modelo geométrico del tramo en estudio en base a la información topográfica disponible [Ref.:15] y considerando tres singularidades principales correspondientes a los puentes Villanelo, Casino y Ecuador. Para cada puente (singularidad) se ingresó el perfil transversal de la sección.

Figura 7-1.- Tramo de estero a modelar en HEC-RAS

Fuente: Google Earth.

Figura 7-2.- Esquema de modelo geométrico en HEC-RAS



7.2.1.2 Estimación del coeficiente de Manning y coeficientes de expansión/contracción

El coeficiente de Manning fue determinado mediante el Método de Cowan y por medio de los valores propuestos por Ven Te Chow en el libro "Hidráulica de Canales Abiertos" McGRAW - HILL (1994), aplicables a la condición del Estero el día del evento de precipitación considerado en este estudio (Estero con mantención). De esta forma, se utilizó en la modelación los coeficientes señalados en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Coeficiente de Manning Estero sin mantención

Sección Transversal	n
Cauce	0.035
Rivera	0.045

Fuente: Elaboración propia.

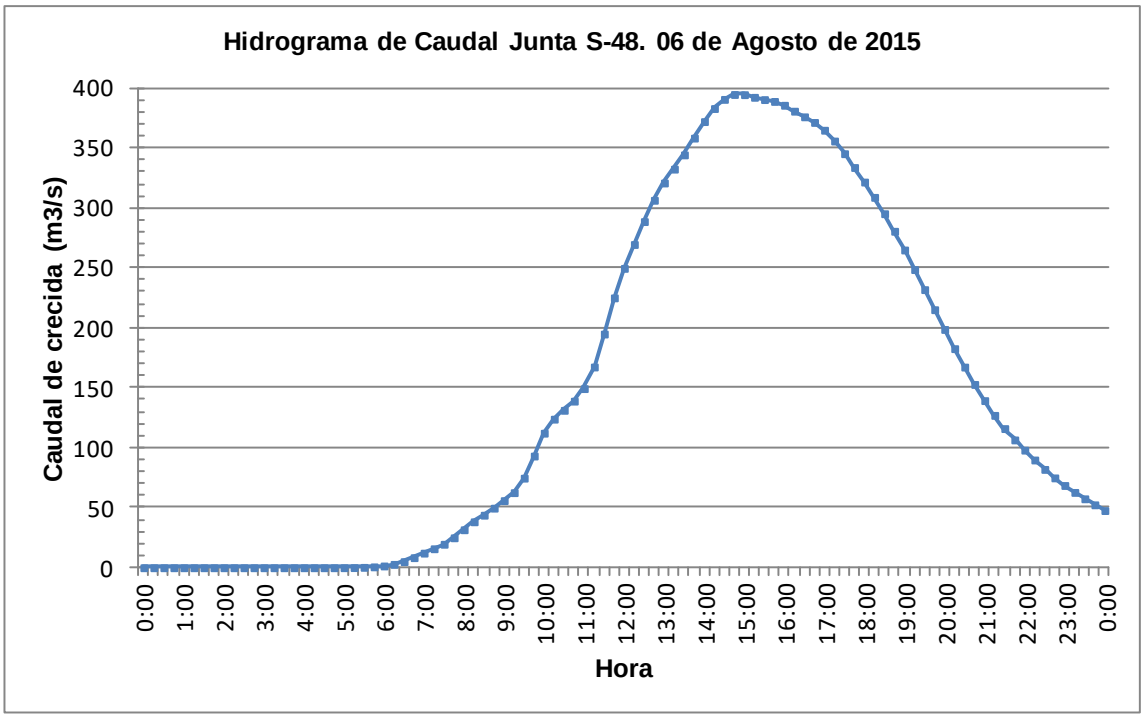
Los coeficientes de expansión/contracción son empleados por el programa para determinar las pérdidas de energía entre dos secciones contiguas, para la modelación se ha adoptado un ángulo aproximado de contracción de 45º (CR=1) y un ángulo de expansión de 30 º (ER=1.5).

7.2.1.3 Condiciones iniciales y de borde para simulación en régimen no permanente

Se impusieron condiciones de borde tanto aguas arriba como aguas abajo, de forma de realizar una simulación mixta (que entregase alturas subcríticas y supercríticas) unidimensional en régimen no permanente. Se supuso flujo nulo como condición inicial.

Aguas arriba de la sección 8 del tramo de Estero modelado se ingresó el Hidrograma de Caudal ("Flow Hydrograph") obtenido para la Junta J-S48, representado gráficamente en la Figura 7-3.

Figura 7-3.- Condición de borde aguas arriba del tramo estudiado.

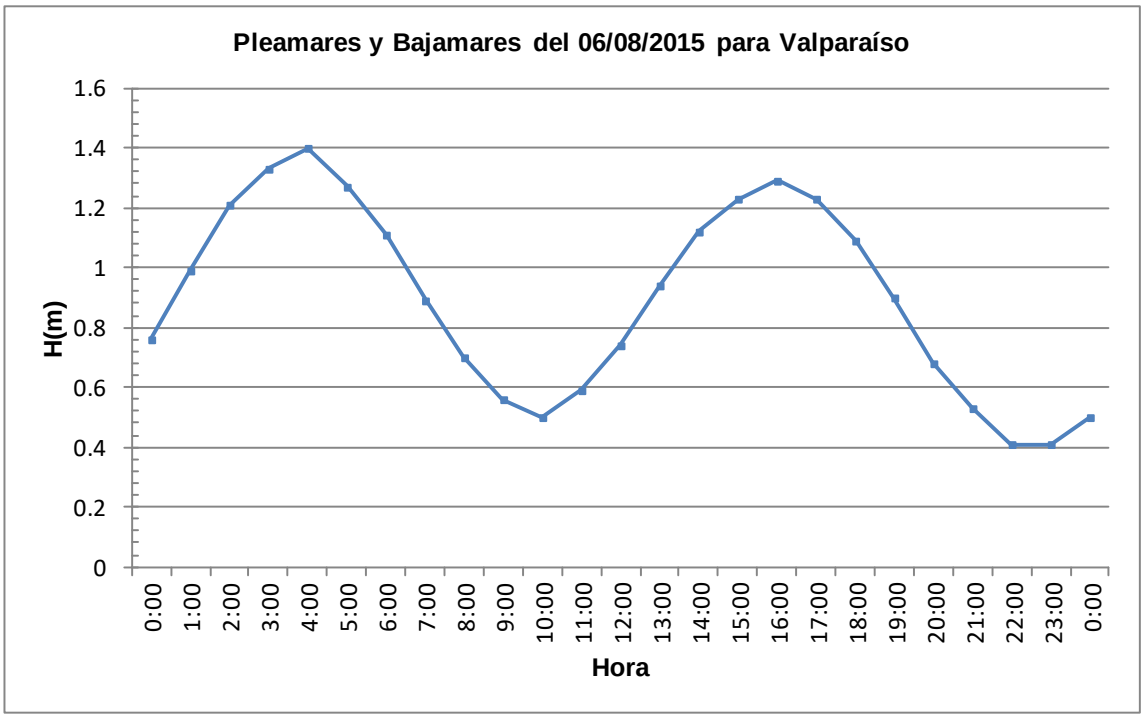


Fuente: Elaboración propia, Modelación Hidrológica cuenca Estero Marga-Marga HEC-RAS

Como condición de borde aguas abajo se consideró la variación de mareas del día 06 de agosto de 2015 (Ver Figura 7-4), imponiendo de esta forma el nivel de agua en la última sección del tramo modelado. No se consideró el efecto de la barra de arena del Estero puesto que fue abierta antes de que se produjera el aumento significativo de caudal.

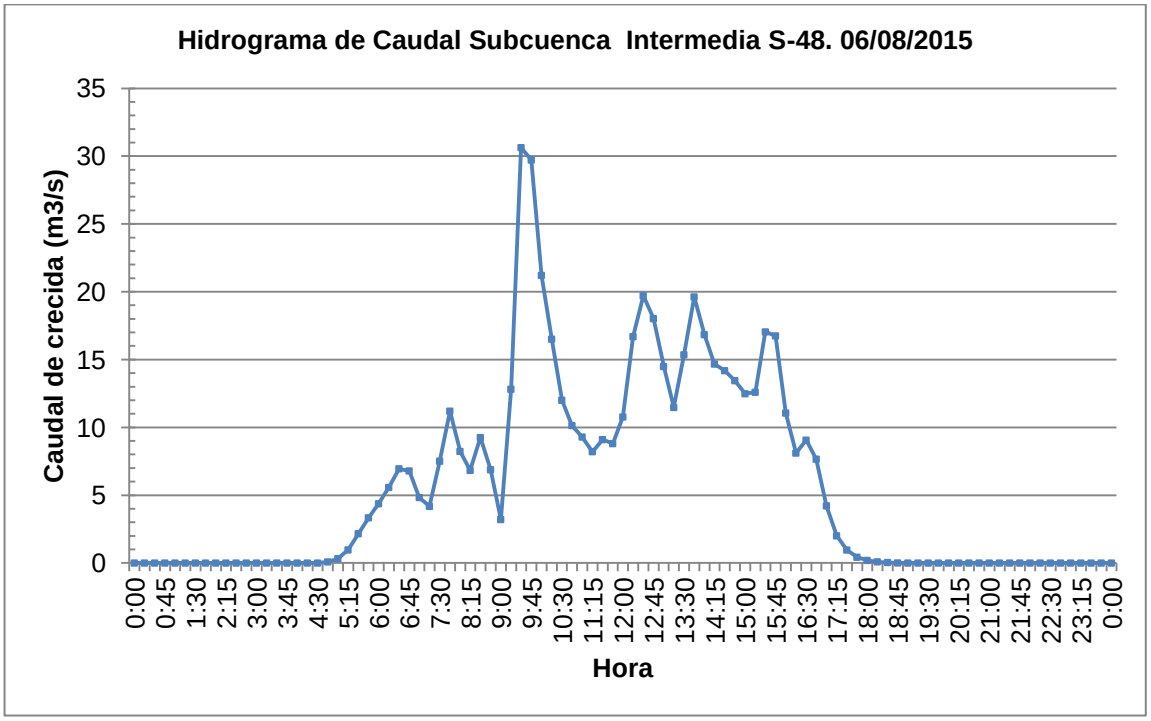
Adicionalmente se ingresó un Hidrograma de Caudal como condición de borde en la sección 5 ("Lateral Inflow Hydrograph") para considerar el aporte de la subcuenca más cercana a la descarga (S48). Los valores numéricos de las condiciones de borde se incluyen en el Anexo D.

Figura 7-4.- Condición de borde aguas abajo del tramo estudiado



Fuente: http://www.tablademareas.com/cl/valparaiso/valparaiso

Figura 7-5.- Condición de borde sección 5 del tramo estudiado



7.2.1.4 Estimación del eje hidráulico

En base al modelo geométrico, coeficientes y condiciones iniciales y de borde señaladas anteriormente se estimó el eje hidráulico obteniendo distintos niveles de agua para cada perfil. En la Figura 7-6 se muestra el perfil longitudinal con los niveles máximos de agua a lo largo del eje del Estero en el tramo en análisis, los valores de estos niveles en los puentes del tramo se indican la Tabla 7-2.

Figura 7-6.- Perfil de superficie de agua a lo largo del tramo estudiado.

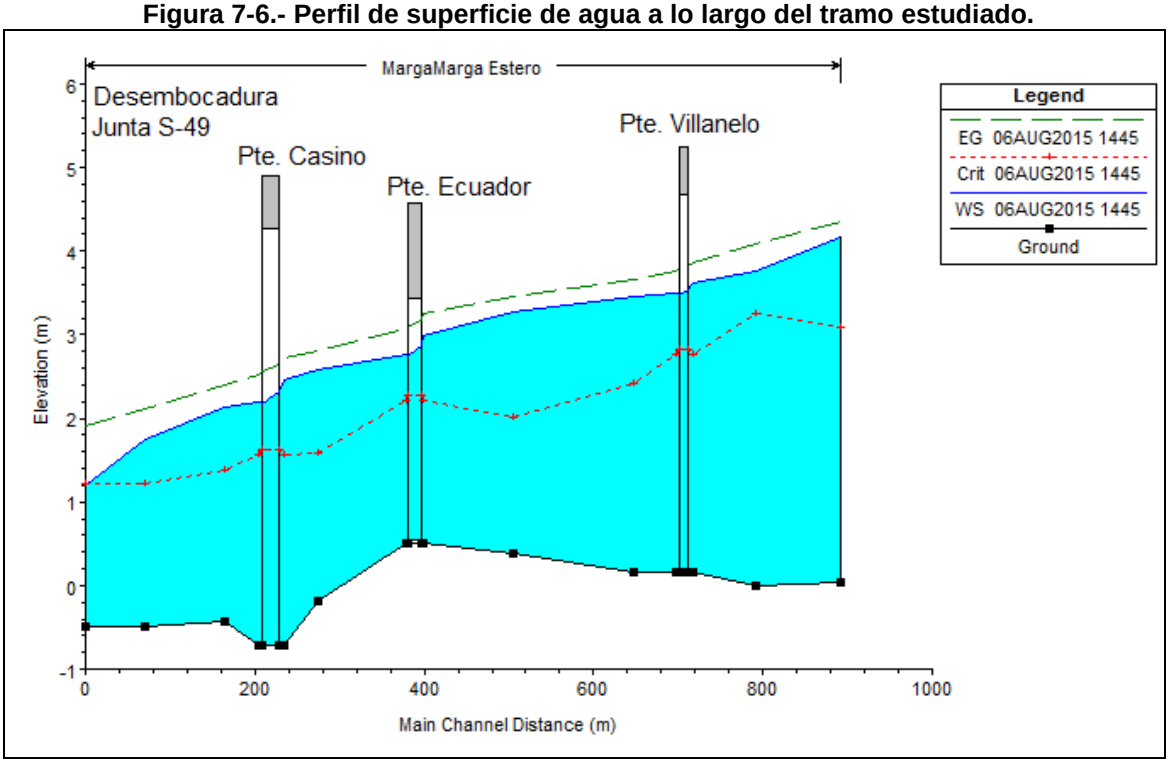


Tabla 7-2 Niveles de agua máximos en Puentes del tramo.

Elemento	N° Sección HEC RAS	Cota de Agua Máxima (m)
Puente Villanelo	6.5	--
Aguas Arriba	6.5 BR U	3.54
Aguas Abajo	6.5 BR D	3.49
Puente Ecuador	3.5	--
Aguas Arriba	3.5 BR U	2.87
Aguas Abajo	3.5 BR D	2.75
Puente Casino	2.5	--
Aguas Arriba	2.5 BR U	2.33
Aguas Abajo	2.5 BR D	2.21

En el Anexo D se presentan los resultados obtenidos para las diversas secciones del tramo en estudio.

7.2.2 Validación del modelo de precipitación-escorrentía

7.2.2.1 Niveles de agua observados en secciones del Estero Marga-Marga

Con el objeto de validar el modelo de precipitación- escorrentía correspondiente a la crecida estudiada se inspeccionó visualmente el Estero Marga-Marga, en particular el tramo comprendido entre el puente Ecuador y la desembocadura del Estero en el mar.

Las inspecciones se realizaron el día 06 de agosto a las 12:00 hrs, 15:00 hrs y 17:00 hrs observándose lo siguiente:

a) El nivel máximo de agua en el Puente Ecuador se produjo entre las 12:00 hrs y 15:00 hrs. Esta situación es concordante con la condición de borde aguas arriba que impone un caudal máximo a las 14:45 hrs. De las fotografías de la Figura 7-7 puede apreciarse que a las 12:00 hrs los sectores con vegetación aún no habían sido cubiertos por el agua y que a las 15:00 hrs el nivel de agua había aumentado hasta cubrir la vegetación de los apoyos del puente.

Figura 7-7.- Variación niveles de agua en Puente Ecuador el 06/08/2015

06/08/2015, a las 12:00 hrs	06/08/2015, a las 15:00 hrs

b) A las 17:00 hrs el nivel de agua en el estero había disminuido con respecto a las 15:00 hrs, tal como puede observarse en las imágenes de la Figura 7-8.

Figura 7-8.- Variación niveles de agua en sector norte Puente Ecuador - 06/08/2015

06/08/2015, a las 12:00 hrs

06/08/2015, a las 15:00 hrs

06/08/2015, a las 17:00 hrs

7.2.2.2 Comparación de niveles de agua máximos

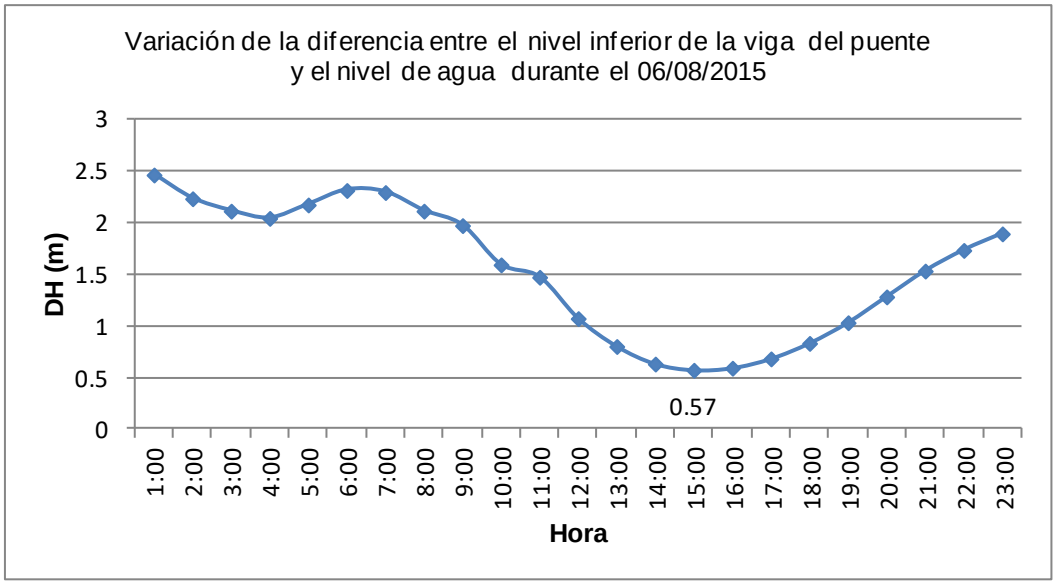
A las 15:00 hrs del día 06 de agosto, el nivel de agua en el estero en la sección del puente Ecuador llegaba justo al vértice de la ménsula (Ver Figura 7-9). La diferencia entre el nivel inferior de la viga y el vértice de las ménsulas del puente corresponde a DH=0.6 (m)

Figura 7-9.- Nivel de agua en Puente Ecuador a las 15:00 hrs del 06/08/2015

De acuerdo a los resultados de las simulación hidráulica la diferencia entre el nivel inferior de la viga del puente y el nivel de agua se produjo a las 15:00 hrs corresponde a DH=0.57(m), según puede apreciarse en el gráfico de la Figura 7-10.

La comparación del desnivel DH observado con el obtenido teóricamente mediante simulación permite validar el modelo hidrológico puesto que existe una diferencia del 5% entre ambos valores.

Figura 7-10.- Variación del desnivel DH en Puente Ecuador



7.2.3 Pre-Calibración y Validación del modelo para otros eventos de precipitación

De acuerdo a lo observado y en base a los resultados obtenidos es posible concluir que las consideraciones realizadas y parámetros adoptados para la modelación hidrológica son válidas para el evento ocurrido entre el 05 y 06 de agosto de 2015 toda vez que el modelo permite reproducir adecuadamente el fenómeno en escala temporal y con niveles de precisión aceptables para el estudio de crecidas.

Sin embargo, para el pronóstico de crecidas y niveles de agua es necesario calibrar y validar los parámetros adoptados de manera que el modelo sea aplicable para otros eventos. Con este objetivo, se analizará la crecida del día 17 de abril de 2016.

7.2.3.1 Análisis de crecidas para tormenta del 17 de abril de 2016

Se realizó la simulación hidrológica en base al Modelo de Cuenca en HEC-HMS ya elaborado modificando el Modelo Meteorológico, Especificaciones de Control; Series de Datos de Precipitación y condiciones particulares.

7.2.3.1.1 Precipitación

Se consideró los pluviogramas de tormenta registrados en las Estaciones Las Salinas, Rodelillo y Villa Alemana, los que fueron procesados e ingresados como series de tiempo ("Time-Series data").

7.2.3.1.2 Especificaciones de Control

Para realizar la modelación de la Cuenca del Estero Marga-Marga para el evento de precipitación del 17 de Abril de 2016 se establecieron las siguientes especificaciones de control:

Fecha de inicio: 16 de abril de 2016 a las 13:00 hrs

Fecha de término: 18 de abril de 2016 a las 0:00 hrs

Intervalo de tiempo: 15 minutos

7.2.3.1.3 Series Temporales de Datos para la Cuenca del Estero Marga-Marga

Las Series de Precipitación consideradas se incluyen en Anexo D.

7.2.3.1.4 Pares de Datos

Los pares de datos considerados para la modelación (Hidrogramas Unitarios y Curvas de descargas de embalses) no dependen del evento de precipitación. La única salvedad es que la condición inicial de los estanques debe ser modificada a fecha del evento.

7.2.3.1.5 Resultados

Se realizó la simulación hidrológica obteniendo los resultados que se incluyen en anexos. En la tabla 7-3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos

Tabla 7-3 Caudal de Crecida tormenta 17/04/2016 con Modelo Original

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km2)	Caudal Máximo Instantáneo (m3/s)	Fecha y Hora Caudal Máximo
Junta-S48	413.7	38.8	17abr2016, 14:15
Junta-S49	**427.2**	**43.1**	**17abr2016, 14:45**

Para la validación de los resultados obtenidos se realizó aforos en el tramo de estero estudiado durante el día 17 de abril de 2016 entre 16:00 hrs y 17:00hrs. En la Tabla 7-4 se indican los caudales estimados en los aforos realizados.

Tabla 7-4 Caudal estimado en aforos el día 17/04/2016

Aforo	Área de Sección (m2)	Velocidad (m/s)	Caudal Estimado	
			Q (m3/s)	Fecha, Hora
Pte. Libertad	8	2	16	17abr2016, 16:00
Desembocadura	6.6	2.5	16.5	17abr2016, 17:00

La Tabla 7-5 presenta los caudales simulados en las secciones próximas a los aforos en el horario en que estos fueron se realizados.

Tabla 7-5 Caudal simulado con Modelo Original

Sección	Caudal Simulado	
	Q (m3/s)	Fecha, Hora
Junta S-48 / Pte. Libertad	36.4	17abr2016, 16:00
Junta S-49 / Desembocadura	37.4	17abr2016, 17:00

Como se observa a partir de las Tablas 7-4 y 7-5 existe una gran diferencia entre el caudal de crecida simulado con respecto al medido. Con el fin de reducir la diferencia se calibró la infiltración considerando el efecto de las condiciones precedentes de humedad. Para esto se varió en diferentes porcentajes los valores de Curva Número adoptados en el modelo original obteniendo como conclusión que con una reducción del 10% del valor de ésta se obtiene una diferencia de caudal estimado versus medido menor al 5%.

La Tabla 7-6 resume los caudales obtenidos para esta condición.

Tabla 7-6 Caudal simulado con CN Original reducida en 10%

Sección	Caudal Simulado	
	Q (m3/s)	Fecha, Hora
Junta S-48 / Pte. Libertad	15.5	17abr2016, 16:00
Junta S-49 / Desembocadura	15.8	17abr2016, 17:00

7.3 Conclusiones y Comentarios

En base a los resultados obtenidos es posible concluir que el Modelo de la Cuenca del Marga-Marga implementado en HEC HMS permite estimar el caudal de crecida del Estero Marga-Marga en el sector Viña del Mar modificando los parámetros del modelo de infiltración cuando corresponda.

Se estima que para eventos de precipitación ocurridos durante los meses del junio a septiembre el modelo original es capaz de predecir el caudal simplemente modificando las condiciones del Modelo Meteorológico y Especificaciones de Control en función de los registros de precipitación. Para eventos de precipitación ocurridos en otros meses se debe modificar valor de la Curva Número considerando las condiciones de humedad precedentes.

Con los antecedentes que se tienen para la elaboración de esta memoria no es posible recomendar parámetros para otras condiciones de humedad pues no se tienen suficientes registros de eventos de precipitación ni tampoco registros continuos de los niveles de agua en el estero para dichos eventos.

Pese a las limitaciones que se tienen para la calibración cuantitativa del modelo, la calibración "cualitativa" realizada constituye una herramienta de gran utilidad en la estimación de crecidas y posibles desbordes invernales. En efecto, mediante el modelo calibrado y validado es posible estimar los caudales de crecidas y niveles de agua en el Estero Marga-Marga ingresando los pluviogramas pronosticados por los modelos numéricos descritos en el Capítulo 3.

8 PRONÓSTICO DE CRECIDAS Y NIVELES DE AGUA EN ESTERO MARGA-MARGA

8.1 Introducción

En el presente capítulo se estimará caudales de crecidas del Estero Marga-Marga en el sector Viña del Mar en base al modelo hidrológico implementado en HEC HMS y considerando los pronósticos generados por los modelos meteorológicos GFS, ECMWF y WRF. Los caudales obtenidos permitirán estimar la variación de los niveles de agua en el Estero mediante el modelo de Ejes Hidráulicos implementado en HEC RAS.

Se considerará como caso de análisis, el evento de precipitación del 05-06 de agosto de 2015 por tratarse del evento que produjo mayor crecida y niveles de agua en el Estero durante ese año.

Los resultados obtenidos mediante el uso de los pronósticos de precipitaciones serán comparados con los valores observados durante el evento

8.2 Pronóstico de precipitaciones

Para el pronóstico de crecidas se empleará como dato de entrada las precipitaciones previstas por los modelos meteorológicos para los lugares en que se ubican las estaciones meteorológicas consideradas para este estudio.

Las Figuras 8-1, 8-2, 8-3 y 8-4 muestran las precipitaciones observadas en cada estación entre los días 05-06 de agosto de 2015 así como también los pronósticos de precipitación para diferentes antelaciones al inicio de dicho evento. De estos gráficos puede apreciarse que algunos modelos tienden a representar de manera aceptable las precipitaciones observadas aunque con desfases temporales, siendo GFS el modelo de mejor comportamiento.

Figura 8-1.- Precipitación observada versus prevista. Estación Las Salinas

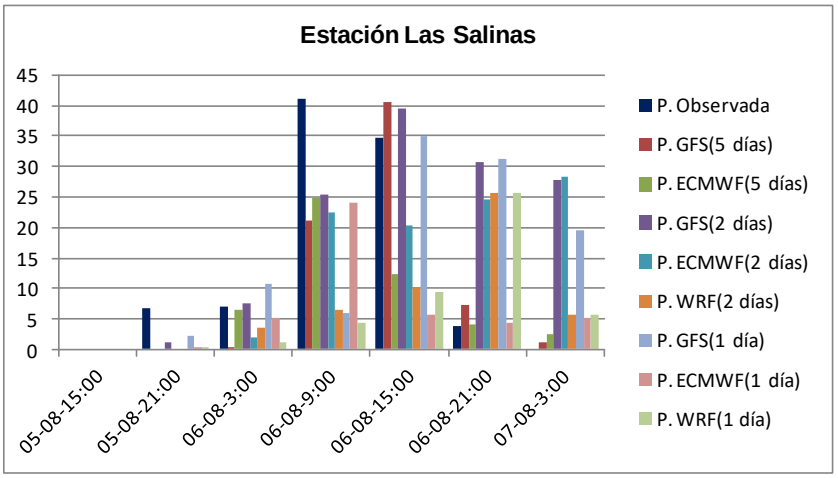


Figura 8-2.- Precipitación observada versus prevista. Estación Rodelillo

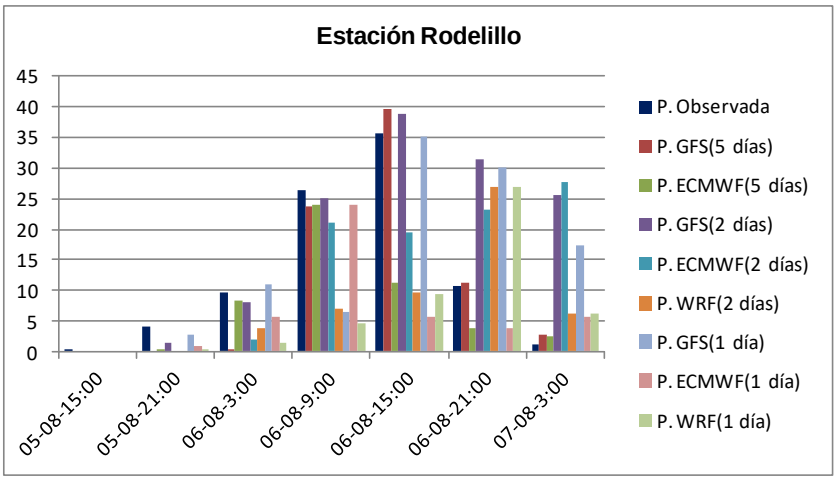


Figura 8-3.- Precipitación observada versus prevista. Estación Quilpué

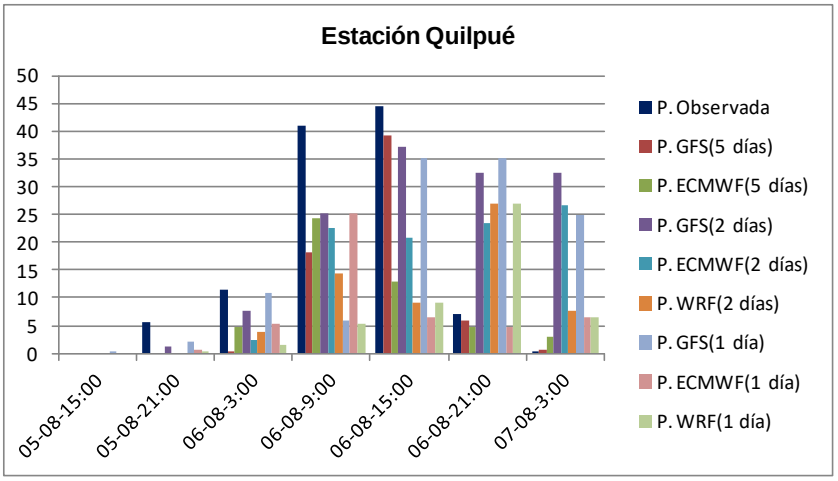
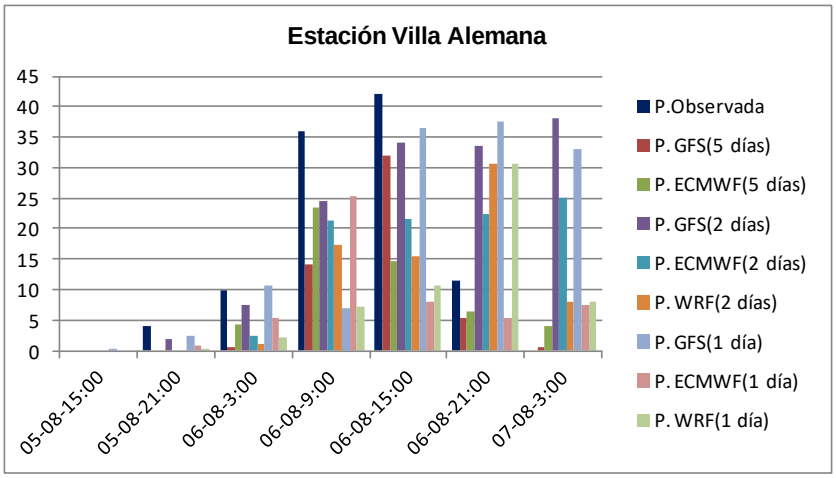


Figura 8-4.- Precipitación observada versus prevista. Estación Villa Alemana



8.3 Pronóstico de crecidas

Para obtener el pronóstico de crecidas se realizó la simulación hidrológica de la cuenca utilizando el modelo implementado en HEC-HMS e ingresando los pronósticos de precipitación como series temporales de datos.

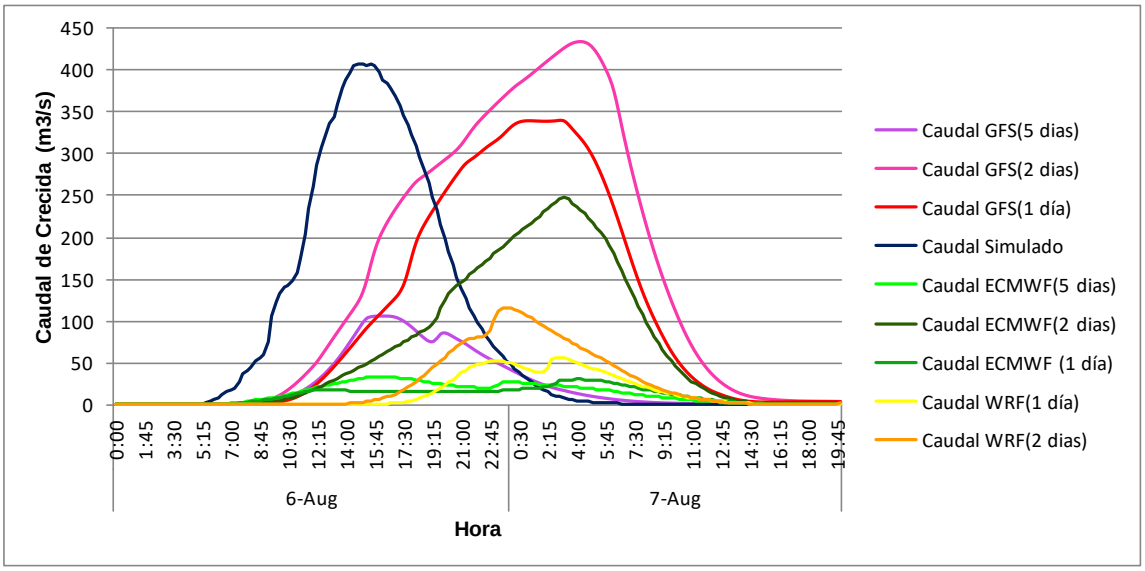
La Tabla 8-1 presenta un resumen de los caudales de crecida en la desembocadura del Estero Marga-Marga, simulados en base a los pronósticos de precipitaciones (Ver detalle en Anexo E). En dicha tabla se puede apreciar la gran dispersión de los valores de caudal máximo pronosticados con respecto al valor simulado en base a las precipitaciones registradas. La mejor aproximación corresponde al caudal máximo obtenido mediante el pronóstico de precipitaciones del modelo GFS con dos días de antelación, valor que presenta un error del 7% con respecto al caudal máximo simulado.

En particular, como puede apreciarse en la Figura 8-5 para el evento de precipitaciones analizado se tiene que los Hidrogramas de crecidas obtenidos mediante los pronósticos del modelo GFS con 2 días y 1 día de antelación son los que mejor se ajustan a lo observado. En efecto, la magnitud del máximo caudal de crecida presenta un error porcentual muy inferior al obtenido mediante los otros modelos y si bien existe un desfase temporal de aproximadamente 12 horas, constituyen una buena predicción de la crecida puesto que permiten conocer de antemano la forma del hidrograma de crecida y magnitud de caudal máximo.

Tabla 8-1 Caudales de crecidas simulados con precipitaciones previstas y observadas

MODELO	FECHA	SIMULACION HIDROLÓGICA				ERROR %
		Con precipitación prevista		Con precipitación observada		
		Q (m3/s)	Fecha-Hora	Qs (m3/s)	Fecha-Hora	
GFS (5 días)	31/7/2015	106.3	06/08/2015-16:00	408.3	06/08/2015-14:45	74%
ECMWF (5 días)	31/7/2015	32.5	06/08/2015-16:15	408.3	06/08/2015-14:45	92%
GFS (2 días)	**3/8/2015**	**434.9**	07/08/2015-4:15	**408.3**	**06/08/2015-14:45**	**7%**
ECMWF (2 días)	3/8/2015	248.2	07/08/2015-3:15	408.3	06/08/2015-14:45	39%
WRF(2 días)	3/8/2015	116.06	06/08/2015-23:45	408.3	06/08/2015-14:45	72%
GFS (1 día)	**4/8/2015**	339.3	07/08/2015-3:00	**408.3**	**06/08/2015-14:45**	**17%**
ECMWF (1 día)	4/8/2015	30.2	07/08/2015-4:00	408.3	06/08/2015-14:45	93%
WRF (1 día)	4/8/2015	56.6	07/08/2015-2:45	408.3	06/08/2015-14:45	86%

Figura 8-5.- Hidrogramas de crecida pronosticados para Junta J-S49



8.4 Pronóstico de niveles de agua en Estero Marga-Marga

En base al modelo de ejes hidráulicos en HEC RAS descrito y puesto en marcha según se indica en el Capítulo 7, se estimarán los niveles de agua para las crecidas pronosticadas. Para ello se variará la condición de borde aguas arriba y condición de flujo lateral utilizando los hidrogramas de crecida obtenidos mediante los pronósticos de precipitaciones del modelo GFS.

Se empleará en el pronóstico de niveles de agua el pronóstico de crecidas obtenido a partir de las actualizaciones del modelo GFS con un día y dos días de antelación a la tormenta en análisis por ser las que permiten pronosticar de mejor forma el caudal máximo.

Los resultados se muestran en la Tabla 8-2, de ésta puede observarse que el error porcentual entre los niveles de agua máximos obtenidos mediante pronósticos de precipitación y los valores simulados con precipitaciones observadas varía entre 9% y 11% .

Tabla 8-2 Niveles de agua máximos pronosticados en secciones consideradas

		SIMULACIÓN CON P. OBSERVADA	SIMULACIÓN CON P. GFS (2 días)		SIMULACIÓN CON P. GFS (1 día)	
Elemento	**N° Sección HEC RAS**	**Hmáx. (m)**	**Hmáx. (m)**	**Error Porcentual**	**Hmáx. (m)**	**Error Porcentual**
Puente Villanelo	6.5	--	--	--	--	--
Aguas Arriba	6.5 BR U	3.54	3.63	3%	3.31	9%
Aguas Abajo	6.5 BR D	3.49	3.57	2%	3.26	9%
Puente Ecuador	3.5	--	--	--	--	--
Aguas Arriba	3.5 BR U	2.87	2.96	3%	2.67	10%
Aguas Abajo	3.5 BR D	2.75	2.84	3%	2.54	11%
Puente Casino	2.5	--	--	--	--	--
Aguas Arriba	2.5 BR U	2.33	2.43	4%	2.17	11%
Aguas Abajo	2.5 BR D	2.21	2.30	4%	2.06	10%

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

En el presente estudio se desarrolló una metodología para pronóstico de crecidas y estimación de niveles de agua en el tramo final del Estero Marga-Marga en base a pronósticos de precipitaciones. Para ello se evaluaron algunos de los modelos meteorológicos existentes, se seleccionaron los modelos mejor evaluados y en base a sus predicciones se realizó el pronóstico de caudales y niveles de agua en el Estero implementando para ello un Modelo Hidrológico y un Modelo Hidráulico, respectivamente.

Para la evaluación de los modelos meteorológicos se analizó el desempeño de los modelos de pronóstico WRF, GFS y ECMWF durante los principales eventos de precipitación del invierno 2015 ocurridos en el dominio de la Cuenca del Marga-Marga. En particular, se comparó los pronósticos de precipitación actualizados con diferentes antelaciones a los eventos con los datos registrados en las Estaciones Meteorológicas existiendo casos bien representados en que los modelos fueron capaces de predecir la evolución meteorológica de los eventos y otros en que el desempeño de los modelos no fue suficiente en la descripción de los mismos.

Del análisis realizado se puede concluir que el desempeño de los modelos de predicción analizados varía dependiendo de la antelación al evento de precipitaciones y de las condiciones iniciales consideradas en la simulación. Se observa que para los casos bien representados la predicción va mejorando en la medida que se acerca el evento de precipitaciones y hasta 2 días antes de éste en el caso de los modelos globales y 1 día para el modelo regional.

En el caso del evento de precipitaciones ocurrido entre el 05 y 06 de agosto de 2015 las actualizaciones con antelación menor a 5 días representaron de forma aceptable la magnitud y evolución del fenómeno meteorológico destacándose el desempeño del modelo GFS. Sin embargo, para el evento ocurrido entre el 07 y 09 de agosto de 2015, las actualizaciones de los modelos no fueron capaces de predecir el fenómeno temporalmente aunque algunas actualizaciones tuvieron errores aceptables en la cantidad de agua prevista.

Considerando que algunos de los modelos de predicción meteorológica fueron capaces de predecir de buena manera el evento de precipitaciones más significativo del invierno, se seleccionó los pluviogramas de precipitación previstos para la tormenta ocurrida entre el 05 y 06 de agosto como dato de entrada para el pronóstico de caudales. Para ello se implementó un modelo hidrológico en HEC HMS capaz de simular el proceso precipitación-escorrentía considerando las características físicas, hidrológicas y meteorológicas de la cuenca del Marga-Marga.

El modelo hidrológico fue calibrado para las condiciones de humedad normales y validado mediante el caudal correspondiente a los niveles de agua observadas el día 06 de agosto de 2015 en el Puente Ecuador utilizando un Modelo de Ejes Hidráulicos implementado en HEC RAS y que permitió realizar la modelación hidráulica del estero en el tramo comprendido entre el puente Casino y el puente Villanelo. Para ello se simuló la crecida con los registros de precipitaciones del evento, se ingresó los hidrogramas obtenidos como condición de borde al Modelo de Ejes Hidráulicos y se comparó los niveles de agua calculados con los observados en diversas secciones del estero. Adicionalmente se simuló la tormenta ocurrida el 17 de abril de 2016 calibrando los parámetros de infiltración.

En base a los resultados obtenidos es posible concluir que el Modelo de la Cuenca del Marga-Marga implementado en HEC HMS permite estimar el caudal de crecida del Estero Marga-Marga en el sector Viña del Mar modificando los parámetros del modelo de infiltración para reflejar las condiciones de humedad precedentes a la tormenta que se analiza (en caso de ser diferentes a las del modelo original).

En efecto, se estima que para eventos de precipitación ocurridos durante los meses del junio a septiembre el modelo original es capaz de predecir el caudal simplemente modificando las condiciones del Modelo Meteorológico y Especificaciones de Control en función de los registros de precipitación. Para eventos de precipitación ocurridos en meses en que las condiciones de humedad precedentes pueden clasificarse como secas se debe modificar valor de la Curva Número reducido en un 10% con respecto al valor original.

Con los antecedentes que se tienen para la elaboración de esta memoria no es posible recomendar parámetros para condiciones húmedas pues no se tienen suficientes registros de eventos de precipitación ni tampoco registros continuos de los niveles de agua en el estero para dichos eventos.

Con el modelo hidrológico validado y calibrado se obtuvieron los pronósticos de crecida para la tormenta ocurrida entre los días 05 y 06 de agosto de 2015. Las crecidas fueron pronosticadas mediante las salidas numéricas de los modelos GFS, ECMWF y WRF con antelaciones de 5 días, 2 días y 1 día obteniendo como resultado que los hidrogramas de crecidas obtenidos mediante los pronósticos del modelo GFS con 2 días y 1 día de antelación eran los que mejor se ajustaban a lo observado. En efecto, la magnitud del máximo caudal de crecida presenta un error porcentual del orden del 10% muy inferior al obtenido mediante los otros modelos y si bien existe un desfase temporal de aproximadamente 12 horas, constituyen una buena predicción de la crecida puesto que permiten conocer de antemano la forma del hidrograma y magnitud de caudal máximo.

9.2 Recomendaciones

A pesar de que en general resulta muy difícil predecir con certeza absoluta el estado de la atmósfera y que en Chile aún no se cuenta con la tecnología suficiente que permita una mejor predicción, los modelos de predicción meteorológica constituyen la mejor herramienta disponible para adelantarse a crecidas de importancia. Desde esta perspectiva, las salidas numéricas de los modelos si bien no constituyen un pronóstico propiamente tal, permiten visualizar el orden de magnitud de los eventos por lo que se recomienda utilizar los pluviogramas pronosticados mediante sus actualizaciones como dato de entrada en la metodología propuesta.

El modelo hidrológico desarrollado en esta memoria entregó buenos resultados y constituye una herramienta de utilidad en la estimación de crecidas y posibles desbordes invernales. Sin embargo se recomienda verificar el modelo en función del hidrograma de salida de la cuenca para mayor número de eventos de precipitaciones y condiciones de humedad antecedentes calibrando, de ser necesario, los parámetros más influyentes del modelo.

.

10 REFERENCIAS

1. GSI Ingenieros Consultores Ltda., 2000. “Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Viña del Mar". Elaborado para la Dirección de Obras Hidráulicas (D.O.H.) del Ministerio de Obras Públicas.

2. SEREMI MINVU, 1994. Estudio “Actualización del Plan Regional de Desarrollo Urbano V Región – Valparaíso”.

3. *Environmental Modeling Center* - NOAA. Tema de interés: "The GFS Atmospheric Model, (status as of August 28, 2003)". [En línea]. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>[Consulta: Junio 2015].

4. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF. Tema de interés: "IFS Documentation". [En línea]. <http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>[Consulta: Junio 2015].

5. *Marine Meteorology Division, Naval Research Laboratory, Monterey, CA, USA*. Tema de interés: " *The Navy Global Environmental Model: NAVGEM* ". [En línea]. <www.nrlmry.navy.mil/metoc/nogaps/navgem.html >[Consulta: Junio 2015].

6. *Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch, and A. Staniforth, 1998. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model* [En línea].<http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gef_html_public/>[Consulta : Junio 2015].

7. *Saha, Suranjana and Coauthors, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2 Journal of Climate J. Climate, 27, 2185–2208.* [En línea]. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>[Consulta: Junio 2015].

8. *Japan Meteorological Agency - JMA. Tema de interés: " Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency, march 2013".* [En línea]. <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>[Consulta: Junio 2015].

9. *Meteorological Service of Canada - MSC, North American Ensemble Forecast System (NAEFS)* [En línea]. <https://weather.gc.ca/ensemble/naefs>[Consulta: Junio 2015].

10. *University Corporation for Atmospheric Research - NCAR & UCAR , MM5 Modeling System Overview* [En línea]. < http://www2.mmm.ucar.edu/mm5>[Consulta: Junio 2015].

11. Ven Te Chow, Maidment y Mays; “Hidrología Aplicada”. Bogotá, Colombia, Editorial McGraw-Hill, 1994.

12. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Santiago, Chile, 1995.

13. *U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. "Hydrologic Modeling System HECHMS User's Manual"*. 2005. Versión 3.3.

14. *U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. "HEC-DSS, HEC-DSS Vue, Data Storage System" User's Manual" 2009.* Versión 2.0.

15. Claudia Carrasco D. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil: ""Cambio Climático: Riesgo de Inundación en el Estero Marga – Marga, Viña del Mar Chile". Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Valparaíso.

11 ANEXOS

11.1 ANEXO A: Pluviogramas de Precipitación

11.1.1 Evento de Precipitaciones del 05-06 de agosto de 2015

Tabla 11-1 Pluviogramas de Precipitación registrados en Estaciones Meteorológicas

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	QUILPUE	V. ALEMANA
05ago2015, 18:15	0.3	0	0.2	0.2
05ago2015, 18:30	0	0	0	0.2
05ago2015, 18:45	0.1	0	0	0
05ago2015, 19:00	0.8	1.4	0.8	0.6
05ago2015, 19:15	0	0	0.4	0.2
05ago2015, 19:30	1.2	0.4	0.2	0.2
05ago2015, 19:45	0.4	1.0	0.6	0.4
05ago2015, 20:00	1.3	0	1	0.6
05ago2015, 20:15	0.8	0	0.4	0.6
05ago2015, 20:30	0	0	1	0.6
05ago2015, 20:45	0.8	1	0.6	0.4
05ago2015, 21:00	0.3	0	0.4	0
05ago2015, 21:15	0.9	0	0.6	0.4
05ago2015, 21:30	0.4	0	0.6	0.4
05ago2015, 21:45	0.3	0	0	0.2
05ago2015, 22:00	0.1	0	0.2	0
05ago2015, 22:15	0.2	0	0	0
05ago2015, 22:30	0.1	0	0.2	0.2
05ago2015, 22:45	0.1	0	0.2	0.2
05ago2015, 23:00	0.1	0	0	0.2
05ago2015, 23:15	0.1	0	0.2	0
05ago2015, 23:30	0.2	0	0.2	0.4
05ago2015, 23:45	0.4	3.6	0.4	0.6

Fuente: -Registros de precipitaciones Año 2015 en Estaciones DGA, PUCV, mediciones Ingeniero Civil Sr. Pedro Kamann.

Tabla 11 -1 Pluviogramas de Precipitación registrados en Est. Meteorológicas (Cont.)

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	QUILPUE	V. ALEMANA
06ago2015, 00:00	0.4	0	0.4	0.4
06ago2015, 00:15	0.5	1.0	0.4	0.4
06ago2015, 00:30	0.5	0	1.0	1
06ago2015, 00:45	0.8	0	0.6	0.6
06ago2015, 01:00	0.4	1.2	0.6	0.4
06ago2015, 01:15	0.4	0.4	0.6	0.4
06ago2015, 01:30	0.4	3.2	1.4	1.2
06ago2015, 01:45	0.5	0.2	1.6	1
06ago2015, 02:00	0.5	0	0.6	1.2
06ago2015, 02:15	0.5	0	0.2	0.2
06ago2015, 02:30	0	0	0.6	0.4
06ago2015, 02:45	0.1	0	0.4	0.2
06ago2015, 03:00	0	0	0.4	0
06ago2015, 03:15	0	0.8	0.2	0
06ago2015, 03:30	0	0	0.2	0
06ago2015, 03:45	0	0.2	0.2	0.2
06ago2015, 04:00	0.4	0.2	0.0	0.2
06ago2015, 04:15	0.4	0.4	0.2	0
06ago2015, 04:30	2	2	2.0	0
06ago2015, 04:45	2.1	0	1.6	0
06ago2015, 05:00	1	0	1.6	0.4
06ago2015, 05:15	2.7	0	3.2	1.4
06ago2015, 05:30	2	0	3.0	1
06ago2015, 05:45	2	7.6	3.2	2
06ago2015, 06:00	2	0	2.2	2.6
06ago2015, 06:15	2.3	0	0.4	3.2
06ago2015, 06:30	2.2	0	1.2	2.6
06ago2015, 06:45	0	0	1.8	0.6
06ago2015, 07:00	0.9	0	1.2	1.8
06ago2015, 07:15	1.2	0	2.4	2
06ago2015, 07:30	4.8	0	2.0	1.6
06ago2015, 07:45	0	0	1.8	3
06ago2015, 08:00	0	0	1.8	1.4
06ago2015, 08:15	3.6	10.2	2.4	1.8
06ago2015, 08:30	0	5	1.8	1.8
06ago2015, 08:45	0	0	3.4	2.6

Tabla 11-1 Pluviogramas de Precipitación registrados en Est. Meteorológicas (Cont.)

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	QUILPUE	V. ALEMANA
06ago2015, 09:00	0	0	3.0	2.8
06ago2015, 09:15	11.5	4.4	2.6	3
06ago2015, 09:30	1.8	0	2.0	3.4
06ago2015, 09:45	1.6	4.2	2.2	2
06ago2015, 10:00	1.8	0	1.6	2.2
06ago2015, 10:15	0.6	0	1.0	1.8
06ago2015, 10:30	0.9	3.6	1.2	1.4
06ago2015, 10:45	1.5	4.4	2.6	0.8
06ago2015, 11:00	0	0.8	3.6	2
06ago2015, 11:15	1.9	0.8	2.4	2.6
06ago2015, 11:30	0.5	1.6	1.8	2.2
06ago2015, 11:45	1.1	2.8	1.6	1.6
06ago2015, 12:00	2.7	0	2.4	1.2
06ago2015, 12:15	2.8	0	2.4	1.6
06ago2015, 12:30	1.3	0	1.2	2
06ago2015, 12:45	1.7	4.6	1.6	1.8
06ago2015, 13:00	0	2.8	1.4	1.6
06ago2015, 13:15	2	0	1.2	1.2
06ago2015, 13:30	3.3	2	0.8	1
06ago2015, 13:45	0.7	3.6	0.8	0.8
06ago2015, 14:00	1.3	0	1.6	0.6
06ago2015, 14:15	1.6	0	2.0	1
06ago2015, 14:30	0.8	0	2.4	2
06ago2015, 14:45	1.8	0	2.2	2.4
06ago2015, 15:00	0	10.4	1.8	3.6
06ago2015, 15:15	3.1	0	1.6	1.4
06ago2015, 15:30	1.4	0	2.4	1.8
06ago2015, 15:45	0.5	0.2	1.0	5.6
06ago2015, 16:00	0	0	0.6	0.6
06ago2015, 16:15	1.5	0	0.2	0.2
06ago2015, 16:30	0.5	0	0.4	0
06ago2015, 16:45	0	0	0.6	1.2
06ago2015, 17:00	0	0	0.2	1
06ago2015, 17:15	0	0	0	0.4
06ago2015, 17:30	0	0	0	0.4
06ago2015, 17:45	0	0	0.2	0.2
06ago2015, 18:00	0	0	0	0.2
TOTAL (mm)	**93.7**	**86**	**109.4**	**103.8**

11.2 ANEXO B: Antecedentes para Modelo de Cuenca

11.2.1 Hidrogramas Unitarios

Tabla 11-2 Hidrograma Unitario Subcuenca S1

T hrs	Q m3/seg/mm
0.00	0.00
0.25	0.27
0.50	0.54
0.75	0.94
1.00	1.61
1.25	2.12
1.50	2.43
1.75	2.45
2.00	2.18
2.25	1.84
2.50	1.44
2.75	1.21
3.00	0.98
3.25	0.82
3.50	0.66
3.75	0.51
4.00	0.41
4.25	0.31
4.50	0.10
4.59	0.00

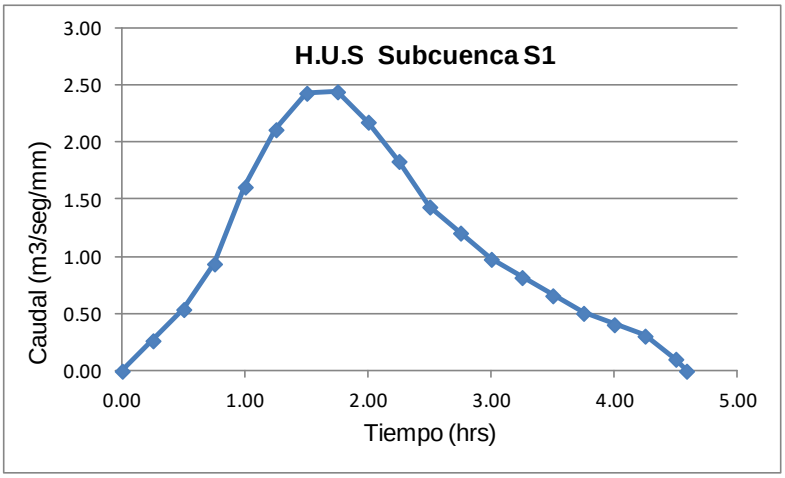


Tabla 11-3 Hidrograma Unitario Subcuenca S2

T hrs	Q m3/seg/mm
0.00	0.00
0.25	0.07
0.50	0.14
0.75	0.21
1.00	0.31
1.25	0.41
1.50	0.56
1.75	0.75
2.00	0.89
2.25	0.99
2.50	1.08
2.75	1.16
3.00	1.11
3.25	1.04
3.50	0.97
3.75	0.87
4.00	0.77
4.25	0.68
4.50	0.61
4.75	0.54
5.00	0.47
5.25	0.42
5.50	0.38
5.75	0.34
6.00	0.30
6.25	0.26
6.50	0.22
6.75	0.19
7.00	0.17
7.25	0.14
7.50	0.11
7.75	0.08
8.00	0.04
8.25	0.01
8.29	0.00

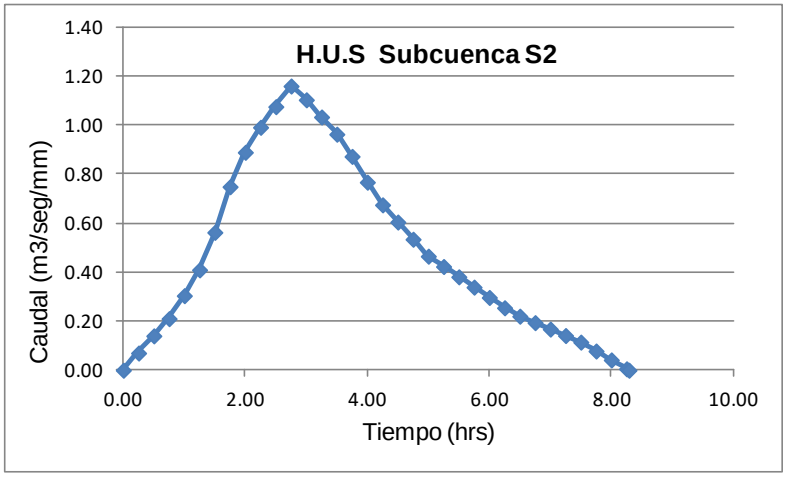


Tabla 11-4 Hidrograma Unitario Subcuenca S3

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.48
1.0	1.05
1.5	1.98
2.0	3.07
2.5	3.67
3.0	3.66
3.5	3.19
4.0	2.47
4.5	1.95
5.0	1.51
5.5	1.22
6.0	0.93
6.5	0.70
7.0	0.52
7.5	0.31
8.0	0.06
8.1	0.00

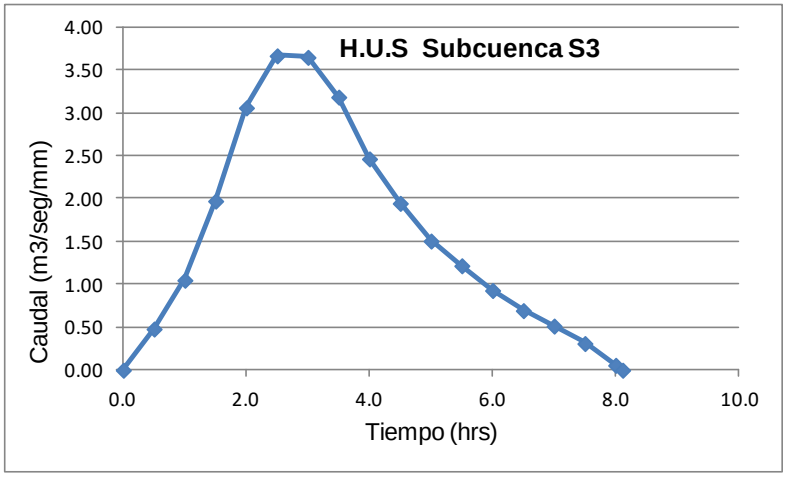


Tabla 11-5 Hidrograma Unitario Subcuenca S6

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.33
1.0	0.78
1.5	1.57
2.0	2.03
2.5	1.92
3.0	1.52
3.5	1.11
4.0	0.81
4.5	0.61
5.0	0.42
5.5	0.29
6.0	0.13
6.3	0.00

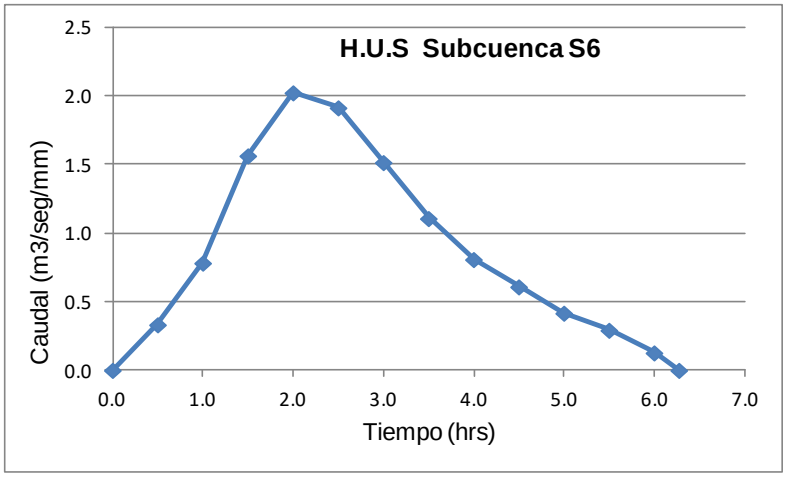


Tabla 11-6 Hidrograma Unitario Subcuenca S5

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.47
1.0	0.94
1.5	1.63
2.0	2.80
2.5	3.71
3.0	4.27
3.5	4.39
4.0	3.92
4.5	3.35
5.0	2.69
5.5	2.22
6.0	1.79
6.5	1.51
7.0	1.23
7.5	0.95
8.0	0.76
8.5	0.59
9.0	0.41
9.5	0.20
10.0	0.00

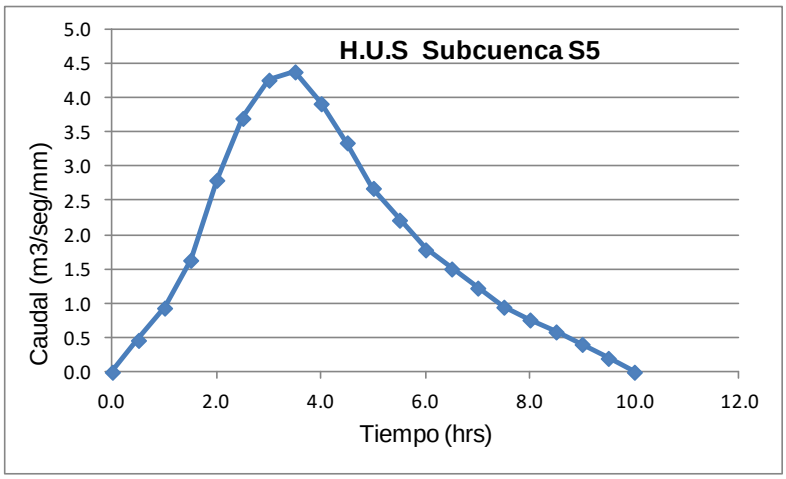


Tabla 11-7 Hidrograma Unitario Subcuenca S9

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.07
1.0	0.14
1.5	0.23
2.0	0.34
2.5	0.52
3.0	0.65
3.5	0.73
4.0	0.79
4.5	0.72
5.0	0.65
5.5	0.55
6.0	0.46
6.5	0.39
7.0	0.32
7.5	0.28
8.0	0.24
8.5	0.20
9.0	0.16
9.5	0.13
10.0	0.11
10.5	0.08
11.0	0.06
11.5	0.03
12.0	0.01
12.1	0.00

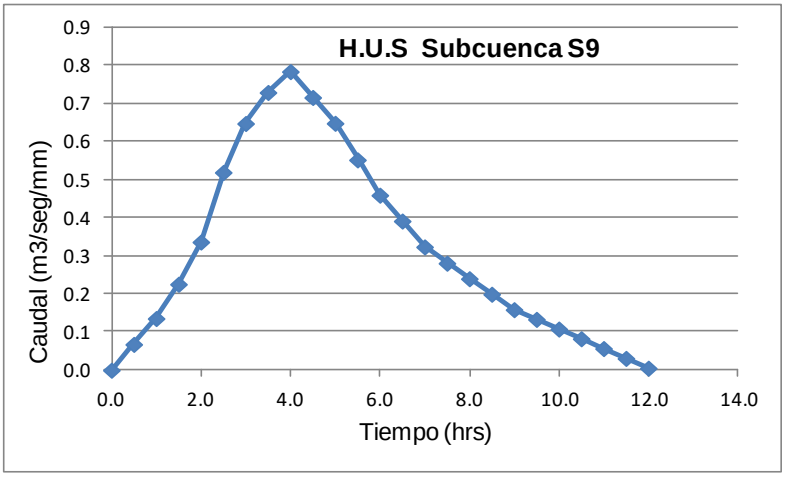


Tabla 11-8 Hidrograma Unitario Subcuenca S10

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.70
1.0	1.86
1.5	1.64
2.0	0.90
2.5	0.51
3.0	0.25
3.5	0.00

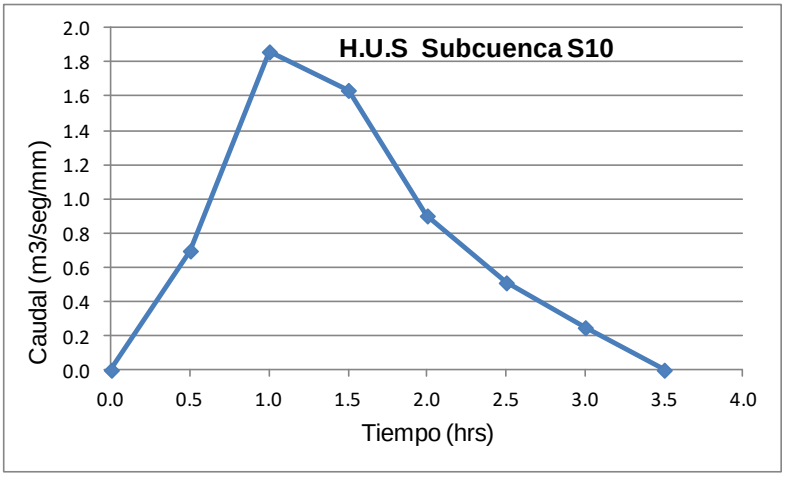


Tabla 11-9 Hidrograma Unitario Subcuenca S11

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
1.0	0.83
2.0	2.33
3.0	3.89
4.0	4.09
5.0	3.10
6.0	2.12
7.0	1.49
8.0	0.99
9.0	0.64
10.0	0.32
11.0	0.00

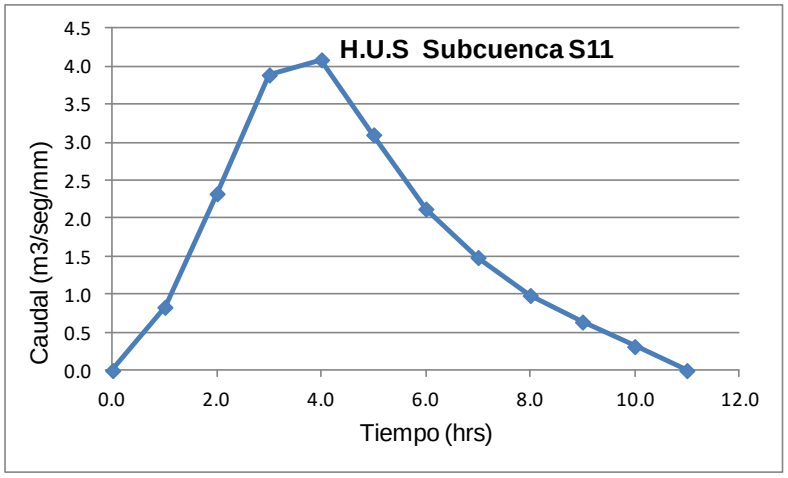
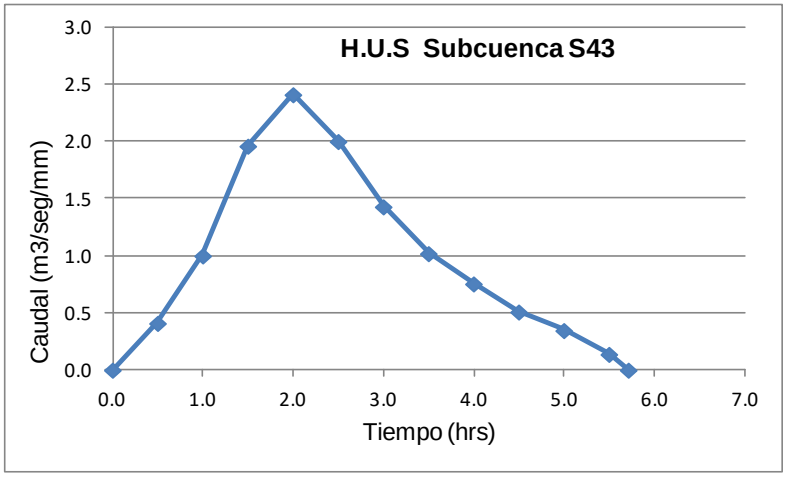


Tabla 11-10 Hidrograma Unitario Subcuenca S43

T hrs	Q m3/seg/mm
0.0	0.00
0.5	0.41
1.0	1.00
1.5	1.96
2.0	2.41
2.5	2.00
3.0	1.43
3.5	1.02
4.0	0.76
4.5	0.51
5.0	0.35
5.5	0.14
5.7	0.00



11.2.2 Tránsito de Hidrogramas.

11.2.2.1.1 Curvas de Tránsito de hidrogramas a través de embalses

Para la obtención de las curvas de descarga se han considerado los embalses como "no regulados" y con salidas producidas a través de sus vertederos. El volumen almacenado en un momento dado será el comprendido entre la cota mínima y el nivel del agua en ese momento, para lo cual se cuenta en alguno casos con la topografía detallada del embalse y en otros se ha estimado en base a información catastral disponible.

Embalse El Carrizo

Ubicación: El embalse Carrizo está ubicado a 20 kms de la localidad de Villa Alemana, de la V Región de Valparaíso, específicamente en las coordenadas UTM Norte: 6.325.479 y UTM Este: 287.001 (Datum: Huso 19, WGS84). El acceso al embalse es a través del camino Villa Alemana a Colliguay (Ruta F-750) por la Retuca.

Figura 11-1.- Imagen satelital Embalse Carrizo

Características:

- Embalse destinado para uso agrícola
- Muro de tierra transversal a estero Carrizo.
- Ancho de coronamiento: 3 m aprox.; 5 metros al centro del muro.
- Talud interior: 23° aproximadamente.
- Talud exterior: 30° aproximadamente.
- Altura del muro con respecto al nivel del agua estimada entre 6 y 7 metros el día del evento de precipitación.

- Altura del coronamiento respecto al pie del talud de aguas abajo estimada en 15 m.
- Longitud de coronamiento: 180 metros aproximadamente.
- Estimación de Capacidad al inicio del evento de precipitación: 50%.

Tabla 11-11 Curva de Capacidad Estimada Embalse Carrizo

COTA	A (m2)	H(m)	VOL(1000m3)
283	--	0	0
288	4400	5	22
293	28000	10	280
300	39000	17.2	680

Figura 11-2.- Curva de Almacenamiento Embalse Carrizo

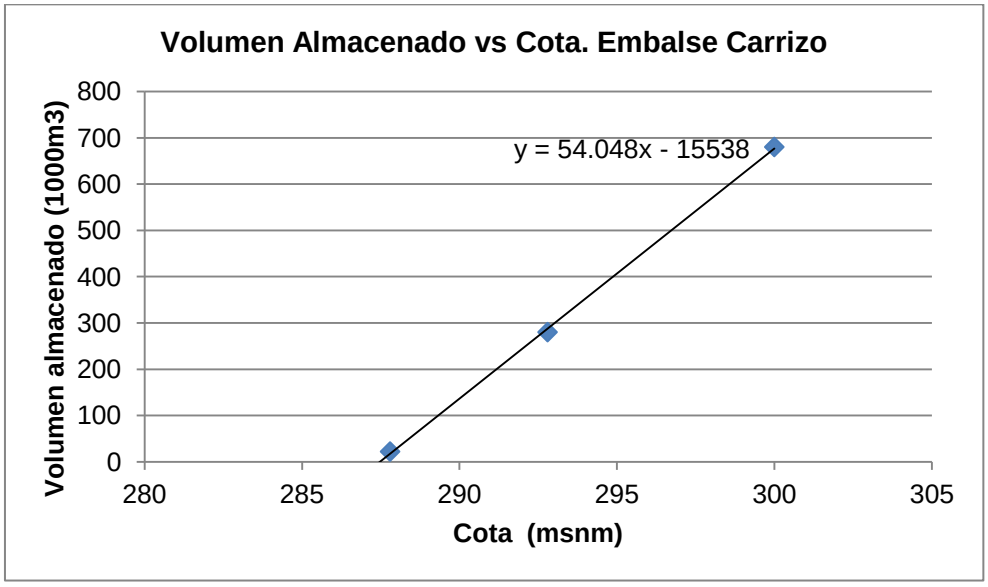


Tabla 11-12. Antecedentes Embalse Carrizo

1.- ANTECEDENTES GENERALES

CARRIZO (NOMBRE DEL EMBALSE)	Nº EXPEDIENTE
COSTERAS ACONCAGUA-MAIPO (CUENCA)	055
	Nº REGISTRO 278
ESTERO VIÑA DEL MAR (SUB-CUENCA)	02
ESTERO CARRIZO (FUENTE)	030200
	CODIGO 1
IDILIO SOTO ARAVENA (NOMBRE O RAZON SOCIAL DEL PROPIETARIO O RESPONSABLE LEGAL)	FECHA INFORMACI 05 05 93 (DIA MES AÑO)

2.- UBICACION DEL EMBALSE

REGION : QUINTA	05	COORDENADAS N	632580
PROVINCIA : VALPARAISO	05	UTM E	287200
COMUNA : QUILPUE	05	DATUM	19562
		ALTITUD m.s.n.m	280

DESCRIPCION DE UBICACION
A 20 KMS.AL SE DE VILLA ALEMANA.
ACCESO DESDE CAMINO DE VILLA
ALEMANA A COLLIGUAY (F-750) POR
LA RETUCA.

USO O DESTINO DEL EMBALSE

BEBIDA USO DOMESTICO SANEAM.POBLACION		1
RIEGO	X	2
ENERGIA HIDROELECTRICA		3
INDUSTRIAL		4
MINERIA		5
RELAVES		6
OTROS USOS		7
		8

CAPACIDAD MAXIMA (MILLONES m3)	08
ALTURA DEL MURO (m)	170
ANCHO CORONAMIENTO (m)	30
LARGO CORONAMIENTO (m)	190
BORDE LIBRE (m)	30

TALUD MURO	INTERNO	1 . 7 / 1	AÑO CONSTRUCCION
	EXTERNO	1 . 5 / 1	

TIPO DE PRESA

DE TIERRA	X	1
DE ROCA		2
DE RELAVES		3
HORMIGON TIPO CONTRA-FUERTE		4
HORMIGON TIPO GRAVEDAD		5
HORMIGON TIPO ARCO		6
TIPO ROCK FILL		7
OTRO TIPO		8

ESTADO B
AÑO REPARACION 1987

OBRAS DE ENTREGA

			CAPACIDAD (m3)
CON SALIDA AL RIO		1	
CON SALIDA AL CANAL		2	
TUBERIA FORZADA	X	3	200
SIFON		4	
OTRO SISTEMA		5	

ESTADO B
AÑO REPARACION 1987

AREA REGADA (Ha) 5000

ESTADO

BUENO	B
REGULAR	R
MALO	M

EVACUADORES DE CRECIDAS

		CAPACIDAD (m3/seg)
VERT. CAIDA LIBRE	X	140
VERT. POZO O BOCINA		2
VERT. DE ALCANTARIL		3
VERT. DE SIFON		4
OTR :		5

ESTADO B
AÑO REPARACION

EVACUADOR DE FOND

	X	1
		2
CAPACIDAD m3/seg.		200
ESTADO	B	
AÑO REPARACION	1987	

POTENCIA GENERADA

KW*10^n	1
HP	2

OBSERVACIONES : ANTECEDENTES DE AÑO DE CONSTRUCCION Y REPARACIONES ERAN DESCONOCIDAS POR EL INFORMANTE.

Tabla 11-12. Antecedentes Embalse Carrizo (Continuación)

6. ESTIMACIÓN CAPACIDAD MÁXIMA DEL EMBALSE	
Altura máxima del muro (definida por relaciones trigonométricas en caso de no poder medir directamente)	15 m aprox.
Profundidad máxima de agua en sector del muro	
Área estimada o calculada de la poza	2.8 Ha
Ancho máximo de la poza	185
Largo de la poza	200
Volumen declarado o proyectado (m3)	

7. CARACTERÍSTICAS DEL MURO	
Inspección visual	✓
Toma de muestra del suelo (preferentemente en el centro del muro)	
Identificación del punto de toma de muestra	
Toma de coordenadas y fotografías del punto muestreado	
Clasificación del material de construcción (clasificación según	

ESTADO DEL MURO Y CALIDAD DE CONSTRUCCIÓN	*Describir*
Regularidad de la geometría actual	ANCHO DE CORONAMIENTO VARIABLE, TALUDES UNIFORMES
Compacidad del material estructural	CON GRIETAS EN PARTE SUPERIOR
Uniformidad de los taludes	SI
Depresiones visibles y cuantificables a lo largo del coronamiento	NO
Grietas visibles y su ubicación	SI, CORONAMIENTO, TALUD INTERIOR Y EXTERIOR
Indicios de deslizamientos y ubicación	SI, TALUD EXTERIOR CERCA DE CORONAMIENTO
Sectores que se presentan saturados y altura de saturación en relación al coronamiento	
Filtraciones visibles en talud de aguas abajo en el pie	VEGETACIÓN IMPIDE VERFICAR EVENTUALES FILTRACIONES
Tipo de revestimiento del muro	ENROCADO SOLO EN PERALTE

8. CARACTERÍSTICAS OBRAS EVACUADOR DE CRECIDAS

Por su localización en relación a la estructura principal:	("x")
Vertederos frontales	X
Vertederos laterales	
Vertederos de campana	

Desde el punto de vista de los instrumentos para el control del caudal vertido:	("x")
Vertederos libres, sin control	X
Vertederos controlados por compuertas	

Desde el punto de vista de la pared donde se produce el vertimiento:	
Vertedero de pared delgada	X
Vertedero de pared gruesa	
Vertedero con perfil hidráulico	

Desde el punto de vista de la sección por la cual se da el vertimiento:	
Rectangulares	
Trapezoidales	
Triangulares	
Circulares	X

Los datos a consignar son:	
Tipo de vertedero	
Material constructivo	HORMIGÓN
Estado de conservación y operatividad	REGULAR
Dimensiones relevantes (ancho, altura y carga máxima de operación)	

Fuente: " S.I.T. Nº 236 .Inspección de Embalses ubicados entre las Regiones de Valparaíso y La Araucanía", CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.

Embalse El Recreo

Ubicación: El embalse El Recreo está ubicado en las cercanías de la localidad de Villa Alemana (provincia de Marga-Marga y comuna de Villa Alemana), de la V Región de Valparaíso, específicamente en las coordenadas UTM Norte: 6.336.879 y UTM Este: 277.801 (Datum: Huso 19, WGS84)

La Figura 11-3 muestra la ubicación del Embalse El Recreo.

Figura 11-3.- Imagen Satelital Embalse El Recreo

Características:

- Embalse destinado para uso agrícola. Capacidad 1.860.000 m3
- Muro de tierra.
- Ancho de coronamiento: 6 m aprox.
- Talud interior: Entre 15° y 18° aproximadamente.
- Talud exterior: 30°-35° aproximadamente.
- La altura del muro con respecto al nivel del agua se estima entre 4 y 5 metros el día del evento de precipitación.
- La altura del coronamiento respecto al pie del talud de aguas abajo se estima en 10 m.
- Longitud de coronamiento: 250 metros aproximadamente.
- Estimación de Capacidad al inicio del evento de precipitación: 50%.

Tabla 11-13 Curva de Capacidad Estimada Embalse El Recreo

COTA	A (m2)	H(m)	VOL(1000m3)
184	--	0	0
186	46800	2	94
189	56000	5	280
194	60200	10	600

Figura 11-4.- Curva de Almacenamiento Embalse Recreo

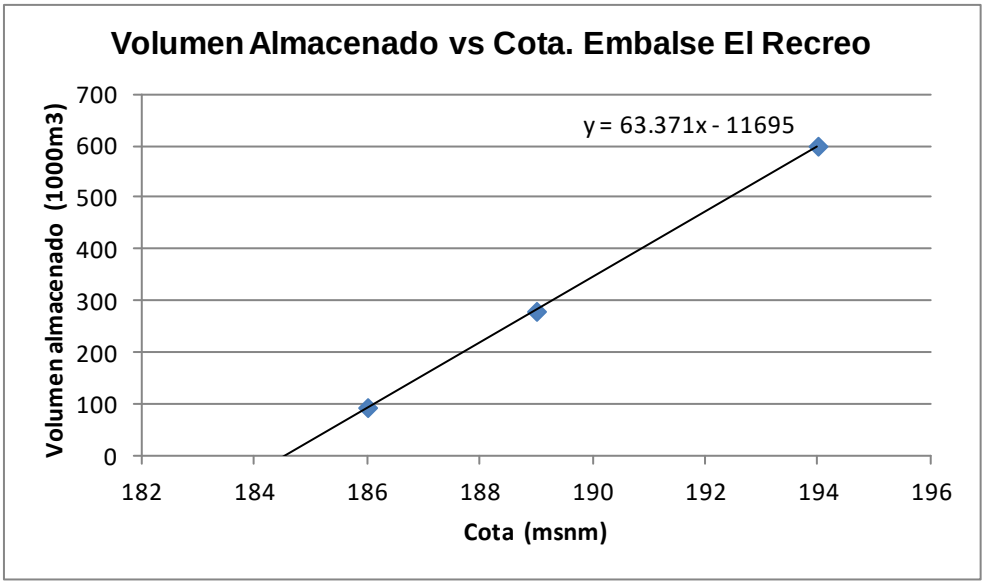


Tabla 11-14. Antecedentes Embalse El Recreo

FICHA DE CATASTRO DE EMBALSES

1. ANTECEDENTES GENERALES

Nombre de la presa	El Recreo	Nº de ficha	3
Propietario	Hernán Cueto Molina, Agrícola El Recreo	Fecha (dd/mm/año)	29/8/2014; 17:00 hrs.
	Camino Marga Marga S/N Fundo El Recreo,		
	comuna de Quilpué, casilla 307, Quilpué		
Año de construcción	Aprox. 100 años de antigüedad	Cumplimiento Art., 294 del Código de Aguas	✓
Cuenca / Código DGA	Cost. Entre Aconcagua y Maipo/055	Capacidad > 50.000 m3	si
Subcuenca / Código DGA	Estero Marga Marga/0550	Altura del muro > 5 m	si
Fuente del recurso	Cuenca aportante Estero Moscoso		

2. UBICACIÓN DE PRESA

Región	V Región de Valparaíso	
Provincia	Marga Marga	
Comuna	Villa Alemana	
Coordenadas UTM Estribo Derecho		
Coordenadas UTM Centro	N = 6.336.749	E = 277.811
Coordenadas UTM Estribo Izquierdo		
Datum	WGS-84, Huso 19	
Altitud m.s.n.m	184 msnm	

3. USO O DESTINO DEL EMBALSE

	("x")
Riego	X
Generación de energía	
Abastecimiento de agua	
Relaves	
Sedimentación	
Control de crecidas	
Recreación	
Otros usos	

4. TIPO DE EMBALSE

	("x")
Presa de tierra homogénea	X
Presa de material granular graduado	
Presa de enrocados (CFRD)	
Presa de hormigón (gravedad, contrafuerte, arco)	
Presa de RCC	
Otros tipos	

5. GEOMETRÍA DE LA PRESA

Longitud del coronamiento	250 m
Ancho del coronamiento	3 m
Desarrollo del talud aguas abajo	20 m
Revancha mínima en relación a la cota máxima de aguas conocida (m)	No apreciable
Paramentos verticales	NO
Ángulo talud de aguas abajo	28 °
Ángulo talud de aguas arriba	23 °

4. TIPO DE EMBALSE

	("x")
Presa de tierra homogénea	X
Presa de material granular graduado	
Presa de enrocados (CFRD)	
Presa de hormigón (gravedad, contrafuerte, arco)	
Presa de RCC	
Otros tipos	

5. GEOMETRÍA DE LA PRESA

Longitud del coronamiento	250 m
Ancho del coronamiento	3 m
Desarrollo del talud aguas abajo	20 m
Revancha mínima en relación a la cota máxima de aguas conocida (m)	No apreciable
Paramentos verticales	NO
Ángulo talud de aguas abajo	28 °
Ángulo talud de aguas arriba	23 °

6. ESTIMACIÓN CAPACIDAD MÁXIMA DEL EMBALSE

Altura máxima del muro (definida por relaciones trigonométricas en caso de no poder medir directamente) (m)	41.920
Profundidad máxima de agua en sector del muro	No medible
Área estimada o calculada de la poza (m2)	56.000
Ancho máximo de la poza (m)	280
Largo de la poza (m)	430
Volumen declarado o proyectado (m3)	1.860.000

7-A. CARACTERÍSTICAS DEL MURO

Inspección visual	✓
Toma de muestra del suelo (preferentemente en el centro del muro)	
Identificación del punto de toma de muestra	
Toma de coordenadas y fotografías del punto muestreado	
Clasificación del material de construcción (clasificación según tabla)	
Ensayo con Penetrómetro Móvil	X

7-B. ESTADO DEL MURO Y CALIDAD DE CONSTRUCCIÓN	***Describir***
Regularidad de la geometría actual	Muro de tierra con ancho de coronamiento variable
Compacidad del material estructural	Alta
Uniformidad de los taludes	Taludes irregulares
Depresiones visibles y cuantificables a lo largo del coronamiento	sí, de no más de 0,2 m
Grietas visibles y su ubicación	No
Indicios de deslizamientos y ubicación	Podría haber algo, se observa cambio de ángulo de talud)
Sectores que se presentan saturados y altura de saturación	No
Filtraciones visibles en talud de aguas abajo en el pie	No se apreciaron
Tipo de revestimiento del muro	No tiene

Tabla 11-14 Antecedentes Embalse El Recreo (Continuación)

8. CARACTERÍSTICAS OBRAS EVACUADOR DE CRECIDAS

Por su localización en relación a la estructura principal:	("x")	***Desde el punto de vista de los instrumentos para el control del caudal vertido:***	("x")
Vertederos frontales		Vertederos libres, sin control	X
Vertederos laterales	X	Vertederos controlados por compuertas	
Vertederos de campana			

"x" indica localización y estructura del vertedero

Desde el punto de vista de la pared donde se produce el vertimiento:		***Desde el punto de vista de la sección por la cual se da el vertimiento:***	
Vertedero de pared delgada		Rectangulares	X
Vertedero de pared gruesa		Trapezoidales	
Vertedero con perfil hidráulico		Triangulares	
		Circulares	

Los datos a consignar son:	
Tipo de vertedero	Lateral, canal irregular
Material constructivo	Tierra
Estado de conservación y operatividad	Regular
Dimensiones relevantes (ancho, altura y carga máxima de operación)	L = 7 m ; H = 3 m

9. CARACTERÍSTICAS OBRAS DE ENTREGA Y DESAGÜE DE FONDO

Tipo de estructura	No dispone
Mediciones estructurales	
Funcionamiento actual	

10. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCE Y USO DEL SUELO

Tipo de cauce natural o artificial aguas abajo del embalse, tipo de terreno, pendiente	Estero natural semiboscoso, i= 0,01, ancho medio 15 m
Distancia hacia centros poblados medidos por el cauce	1,3 km
Distancia desde centros poblados perpendicular al cauce	0,4 km
Densidad de población en las cercanías del tranque	Media
Distancia hacia zonas agrícolas	1,7 km
Distancia hacia sectores con infraestructura vial u otra de importancia	100 m desde cauce hasta Ruta F-50
Área de riego servida por el tranque analizado	1,7 km

Embalse La Poza Azul

Ubicación: El embalse La Poza Azul está ubicado en las cercanías de la localidad de Quilpué (provincia de Marga-Marga y comuna de Quilpué), de la V Región de Valparaíso, específicamente en las coordenadas UTM Norte: 6.335.876 y UTM Este: 275.246 (Datum: Huso 19, WGS84)

La Figura 11-5 muestra la ubicación del Embalse La Poza Azul.

Figura 11-5.- Imagen Satelital Embalse La Poza Azul

Características:

- Embalse de propiedad de Esval destinado para agua potable. Capacidad 2.000.000 m3
- Muro gravitacional de hormigón
- Ancho de coronamiento: 2.2 m aprox.
- Talud interior: Entre 15° y 18° aproximadamente.
- Talud exterior: 30°-35° aproximadamente.
- La altura del muro con respecto al nivel del agua se estima entre 2 y 3 metros el día del evento de precipitación.
- Altura del coronamiento respecto al pie del talud de aguas abajo estimada en 17 m.
- Longitud de coronamiento: 90 metros aproximadamente.

Tabla 11-15 Curva de Capacidad Estimada Embalse La Poza Azul

COTA	A (m2)	H(m)	VOL(1000m3)
184	--	0	0
186	46800	2	94
189	56000	5	280
194	60200	10	600

Figura 11-6.- Curva de Almacenamiento Embalse La Poza Azul

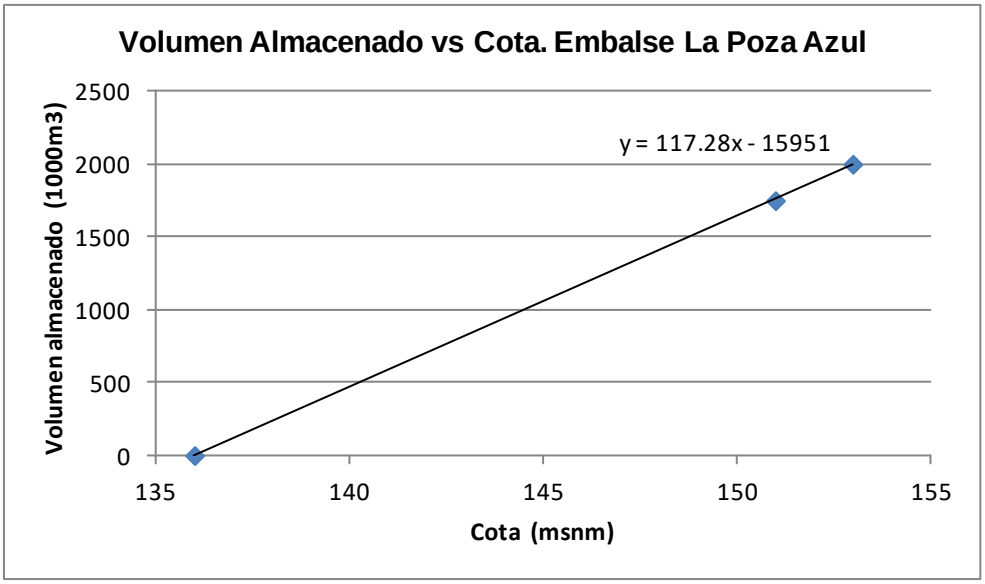


Tabla 11-16. Antecedentes Embalse La Poza Azul

1. ANTECEDENTES GENERALES

Nombre de la presa	Poza Azul (laguna de Quilpué)	
Propietario	ESVAL S.A., Cochrane 751, Valparaíso	
RUT Propietario	89.900.400-0	
Año de construcción	1940	
Reparación (SI) (NO)		
Año de reparación		
Cuenca / Código DGA	Costeras entre Aconcagua y Maipo	55
Subcuenca / Código DGA	Estero Marga Marga	550
Fuente del recurso	Aguas Pluviales	

Nº de ficha	17
Fecha (dd/mm/año)	03/08/2011
Cumplimiento Art, 294 del Código de Aguas	✓
Capacidad > 50.000 m3	
Altura del muro > 5 m	

2. UBICACIÓN DE PRESA

Región	V Región deValparaíso
Provincia	Valparaíso
Comuna	Quilpué
Coordenadas UTM Der	Sin Acceso
Coordenadas UTM Centro	N= 6.335.876 E= 275.246
Coordenadas UTM Izq	Sin Acceso
Datum/ huso	WGS84 / 19S
Altitud m.s.n.m.	ED= s/i C= 136 EI=s/i

N= Norte
E= Este
ED= Estribo Derecho
C= Centro
EI= Estribo Izquierdo

3. USO O DESTINO DEL EMBALSE

Riego	
Generación de energía	
Abastecimiento de agua potable / saneamiento	X
Relaves	
Sedimentación	
Control de crecidas	
Recreación	
Otros usos	

4. TIPO DE EMBALSE

Presa de tierra homogénea	
Presa de material granular graduado	
Presa de enrocados (CFRD)	
Presa de hormigón (gravedad, contrafuerte, arco)	X
Presa de RCC	
Otros tipos:	

5. GEOMETRÍA DE LA PRESA

Con Huincha	
Longitud del coronamiento (m)	90
Ancho del coronamiento (m)	ED=2,2 C=2,2 EI=2,2
Desarrollo del talud aguas abajo(m)	28
Revancha mínima en relación a la cota máxima de aguas conocida (m)	2
Paramentos verticales	No
Con eclímetro	
Ángulo talud de aguas abajo	ED= -- C= -- E I= --
Ángulo talud de aguas arriba	ED= -- C= -- EI= --

ED= Estribo Derecho
C= Centro
EI= Estribo Izquierdo

=-- MURO DE HORMIGÓN

8. CARACTERÍSTICAS OBRAS EVACUADOR DE CRECIDAS

Por su localización en relación a la estructura principal:	
Vertederos frontales	X
Vertederos laterales	
Vertederos de campana	

Desde el punto de vista de los instrumentos para el control del caudal vertido:	
Vertederos libres, sin control	X
Vertederos controlados por compuertas	

Desde el punto de vista de la pared donde se produce el vertimiento:	
Vertedero de pared delgada	
Vertedero de pared gruesa	
Vertedero con perfil hidráulico	X

Desde el punto de vista de la sección por la cual se da el vertimiento:	
Rectangulares	X
Trapezoidales	
Triangulares	
Circulares	

Los datos a consignar son:	
Tipo de vertedero	Creager
Material constructivo	Hormigón Armado
Estado de conservación y operatividad	Bueno
Dimensiones relevantes (ancho, altura y carga máxima de operación)	Ancho= 80 m; Altura=17 m; Carga máx.= 2 m

9. CARACTERÍSTICAS OBRAS DE ENTREGA Y DESAGÜE DE FONDO

Tipo de estructura	Estructura de Hormigón Armado , Diámetro 2 m
Mediciones estructurales	Diámetro= 2 m
Funcionamiento actual	Nulo, fuera de servicio desde 1985

10. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCE Y USO DEL SUELO AGUAS

Tipo de cauce natural o artificial aguas abajo del embalse, tipo de terreno, pendiente media y ancho medio del cauce	Cauce natural, pendiente aprox. 2 %
Distancia hacia centros poblados medidos por el cauce (m)	Existen casas aisladas a 1500 m agaus abajo del muro. No existen centros poblados cercanos al embalse.
Distancia desde centros poblados perpendicular al cauce (m)	50 m. El centro Poblado más cercano se encuenta a 2,5 km y se trata de la localidad de Quilpué
Densidad de población en las cercanías del tranque	Baja
Distancia hacia zonas agrícolas (m)	No existen Zonas Agrícolas aledañas al embalse.

Tabla 11-16. Antecedentes Embalse La Poza Azul (Continuación)

1.- ANTECEDENTES GENERALES

POZA AZUL O LAGUNA QUILPUE		Nº EXPEDIENTE
NOMBRE DEL EMBALSE		
COSTERAS ACONCAGUA-MAIPO	055	Nº REGISTRO 298
CUENCA		
ESTERO VIÑA DEL MAR	02	
SUB-CUENCA		
ESTERO MARGA MARGA	030000	CODIGO 18
FUENTE		
ESVAL S. A.		FECHA INFORMACI 120893
NOMBRE O RAZON SOCIAL DEL PROPIETARIO O RESPONSABLE LEGAL		DIA MES AÑO

2.- UBICACION DEL EMBALSE

REGION : QUINTA	05	COORDENADAS N	633600
		UTM E	275500
PROVINCIA : VALPARAISO	05	DATUM	19561
			2
COMUNA : QUILPUE	05	ALTITUD m.s.n.m	150

DESCRIPCION DE UBICACION

A 6,5 KMS., AL SE DE QUILPUE. ACCESO DESDE QUILPUE POR CAMINO A LO OROZCO (F-50). AVANZAR POR 4 KMS.HASTA EMPALMAR CON CAMINO AL EMBALSE POR RIBERA DERECHA DEL ESTERO MOSOCOSO. AVANZAR POR 2 KMS.HASTA ACCESO A PREDIO ESVAL DONDE SE UBICA EL EMBALSE.

3.- ANTECEDENTES TECNICOS

USO O DESTINO DEL EMBALSE

BEBIDA USO DOMESTICO SANEAM.POBLACION	X	1
RIEGO		2
ENERGIA HIDROELECTRICA		3
INDUSTRIAL		4
MINERIA		5
RELAVES		6
OTROS USOS		7
		8

CAPACIDAD MAXIMA (MILLONES m3)	200
ALTURA DEL MURO (m)	2500
ANCHO CORONAMIENTO (m)	050
LARGO CORONAMIENTO (m)	8000
BORDE LIBRE (m)	180

TALUD MURO	INTERNO	. /
	EXTERNO	. /

AÑO CONSTRUCCION 1946

TIPO DE PRESA

DE TIERRA		1
DE ROCA		2
DE RELAVES		3
HORMIGON TIPO CONTRA-FUERTE	X	4
HORMIGON TIPO GRAVEDAD		5
HORMIGON TIPO ARCO		6
TIPO ROCK FILL		7
OTRO TIPO		8

ESTADO B
AÑO REPARACION

OBRAS DE ENTREGA

			CAPACIDAD (m3)
CON SALIDA AL RIO		1	
CON SALIDA AL CANAL		2	
TUBERIA FORZADA	X	3	200
SIFON		4	
OTRO SISTEMA		5	

ESTADO B
AÑO REPARACION

AREA REGADA (Ha)

ESTADO

BUENO	B
REGULAR	R
MALO	M

EVACUADORES DE CRECIDAS

		CAPACIDAD (m3/seg)
VERT. CAIDA LIBRE	X	1 370100
VERT. POZO O BOCINA		2
VERT. DE ALCANTARIL		3
VERT. DE SIFON		4
OTR :		5

ESTADO B
AÑO REPARACION

EVACUADOR DE FONDO

S	X	1
N		2

CAPACIDAD m3/seg.
ESTADO B
AÑO REPARACION

POTENCIA GENERADA

KW*10^n	1
HP	2

OBSERVACIONES : LA PRESA ES DE HORMIGON ARMADO.

Embalse Las Palmas

Ubicación: El embalse Las Palmas está ubicado en la comuna de Quilpué, Provincia de Valparaíso, específicamente en las coordenadas UTM Norte: 6.330.275 y UTM Este: 277.702 (Datum: Huso 19, WGS84).

La Figura 11-5 muestra la ubicación del Embalse Las Palmas

Figura 11-7.- Imagen Satelital Embalse Las Palmas

11.3 ANEXO C: Resultados Simulación Hidrológica del Evento de Precipitaciones ocurrido los días 05 y 06 de agosto de 2015

Figura 11-8.- Caudal Simulado en Junta S-48 (1 Norte con Los Castaños)

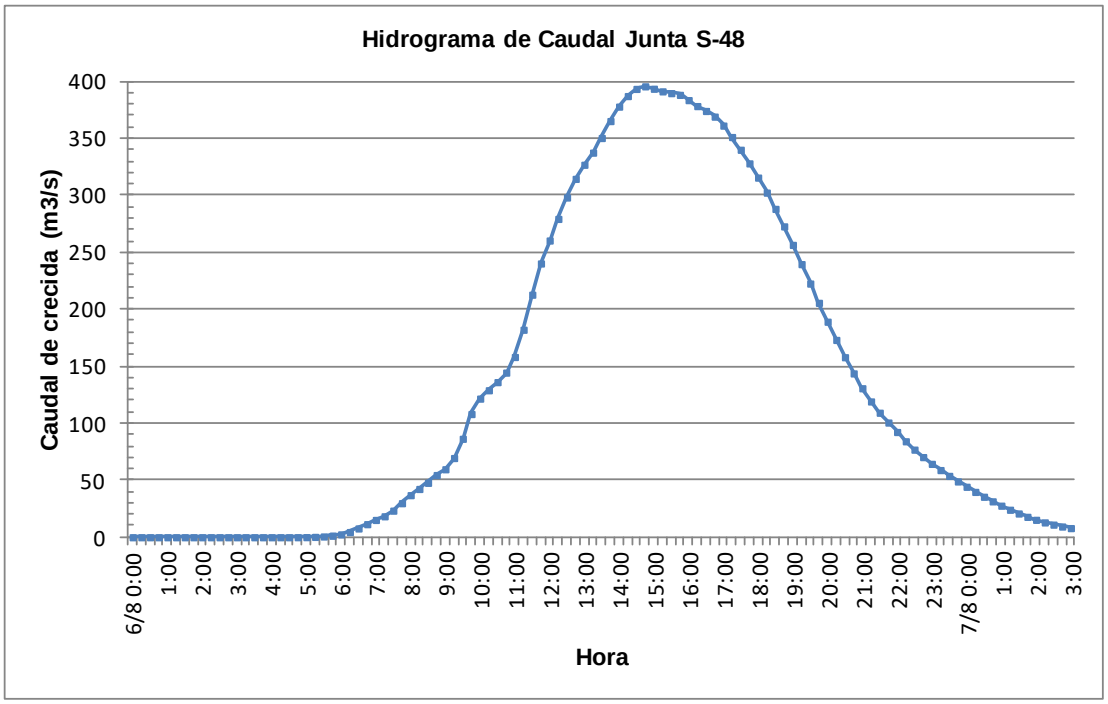
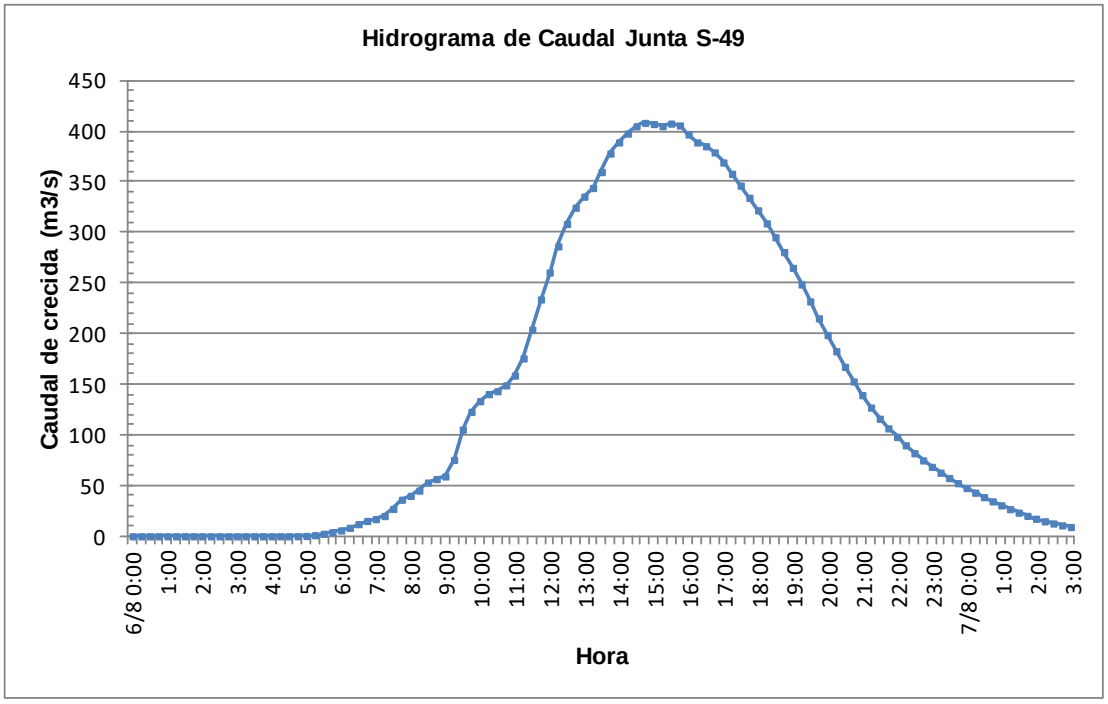


Figura 11-9.- Caudal Simulado en Junta S-49 (Desembocadura)



11.4 ANEXO D: Antecedentes para Calibración y Validación Modelo Hidrológico

11.4.1 Modelo de Ejes Hidráulicos para Obtención de Niveles de Agua en tramo de estero estudiado

11.4.1.1 Condición de borde aguas arriba tramo de estero estudiado

Tabla 11-17 Hidrograma de Crecida para J-S48

Día	Hora	Caudal (m3/s)	Día	Hora	Caudal (m3/s)	Día	Hora	Caudal (m3/s)
6/8/2015	4:15	0	*6/8/2015*	11:45	225.16	*6/8/2015*	19:15	248.75
6/8/2015	4:30	0	*6/8/2015*	12:00	249.76	*6/8/2015*	19:30	232.02
6/8/2015	4:45	0.01	*6/8/2015*	12:15	269.66	*6/8/2015*	19:45	215.28
6/8/2015	5:00	0.03	*6/8/2015*	12:30	288.80	*6/8/2015*	20:00	198.81
6/8/2015	5:15	0.11	*6/8/2015*	12:45	306.55	*6/8/2015*	20:15	182.78
6/8/2015	5:30	0.33	*6/8/2015*	13:00	320.99	*6/8/2015*	20:30	167.42
6/8/2015	5:45	0.73	*6/8/2015*	13:15	332.56	*6/8/2015*	20:45	152.92
6/8/2015	6:00	1.47	*6/8/2015*	13:30	344.43	*6/8/2015*	21:00	139.44
6/8/2015	6:15	2.82	*6/8/2015*	13:45	358.44	*6/8/2015*	21:15	127.12
6/8/2015	6:30	5.09	*6/8/2015*	14:00	372.22	*6/8/2015*	21:30	116.11
6/8/2015	6:45	8.40	*6/8/2015*	14:15	383.10	*6/8/2015*	21:45	106.64
6/8/2015	7:00	12.19	*6/8/2015*	14:30	390.75	*6/8/2015*	22:00	98.11
6/8/2015	7:15	15.83	*6/8/2015*	14:45	394.83	*6/8/2015*	22:15	89.89
6/8/2015	7:30	19.59	*6/8/2015*	15:00	394.68	*6/8/2015*	22:30	82.05
6/8/2015	7:45	24.98	*6/8/2015*	15:15	392.48	*6/8/2015*	22:45	74.96
6/8/2015	8:00	31.69	*6/8/2015*	15:30	390.58	*6/8/2015*	23:00	68.62
6/8/2015	8:15	38.33	*6/8/2015*	15:45	389.04	*6/8/2015*	23:15	62.85
6/8/2015	8:30	43.84	*6/8/2015*	16:00	385.85	*6/8/2015*	23:30	57.51
6/8/2015	8:45	49.71	*6/8/2015*	16:15	380.91	*6/8/2015*	23:45	52.49
6/8/2015	9:00	55.99	*6/8/2015*	16:30	376.19	*6/8/2015*	0:00	47.70
6/8/2015	9:15	62.65	*6/8/2015*	16:45	371.52	*7/8/2015*	0:15	43.09
6/8/2015	9:30	74.75	*6/8/2015*	17:00	365.01	*7/8/2015*	0:30	38.68
6/8/2015	9:45	93.20	*6/8/2015*	17:15	356.01	*7/8/2015*	0:45	34.50
6/8/2015	10:00	112.26	*6/8/2015*	17:30	345.43	*7/8/2015*	1:00	30.56
6/8/2015	10:15	123.95	*6/8/2015*	17:45	333.92	*7/8/2015*	1:15	26.84
6/8/2015	10:30	131.34	*6/8/2015*	18:00	321.77	*7/8/2015*	1:30	23.37
6/8/2015	10:45	139.00	*6/8/2015*	18:15	309.01	*7/8/2015*	1:45	20.20
6/8/2015	11:00	149.45	*6/8/2015*	18:30	295.37	*7/8/2015*	2:00	17.35
6/8/2015	11:15	167.48	*6/8/2015*	18:45	280.71	*7/8/2015*	2:15	14.84
6/8/2015	11:30	194.99	*6/8/2015*	19:00	265.10	*7/8/2015*	2:30	12.65

11.4.1.2 Condición de borde aguas abajo tramo de estero estudiado

Tabla 11-18 Variación de Nivel de Mareas del día 06/08/2015

Fecha	Hora	Altura (m)
6-Aug-15	0:00	0.76
6-Aug-15	1:00	0.99
6-Aug-15	2:00	1.21
6-Aug-15	3:00	1.33
6-Aug-15	4:00	1.4
6-Aug-15	5:00	1.27
6-Aug-15	6:00	1.11
6-Aug-15	7:00	0.89
6-Aug-15	8:00	0.7
6-Aug-15	9:00	0.56
6-Aug-15	10:00	0.5
6-Aug-15	11:00	0.59
6-Aug-15	12:00	0.74
6-Aug-15	13:00	0.94
6-Aug-15	14:00	1.12
6-Aug-15	15:00	1.23
6-Aug-15	16:00	1.29
6-Aug-15	17:00	1.23
6-Aug-15	18:00	1.09
6-Aug-15	19:00	0.9
6-Aug-15	20:00	0.68
6-Aug-15	21:00	0.53
6-Aug-15	22:00	0.41
6-Aug-15	23:00	0.41
7-Aug-15	0:00	0.5

11.4.1.3 Resultados

Tabla 11-19 Nivel de aguas máximo y parámetros hidráulicos relacionados en Secciones de Estero el día 06/08/2015

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Estero	8	Max WS	394.68	4.17	3.08	4.35	0.001527	1.91	207.04	89.48	0.4
Estero	7	Max WS	394.7	3.77	3.25	4.09	0.00384	2.51	157.27	90.03	0.61
Estero	6.6	Max WS	394.6	3.63	2.77	3.87	0.002156	2.16	182.84	84.94	0.47
Estero	6.5		Bridge								
Estero	6.4	Max WS	394.6	3.49	2.77	3.76	0.002663	2.3	171.4	84.94	0.52
Estero	6	Max WS	394.54	3.46	2.42	3.65	0.00165	1.98	199.59	88.45	0.42
Estero	5	Max WS	390.4	3.28	2	3.45	0.001195	1.81	216.27	86	0.36
Estero	4	Max WS	407.68	2.99	2.22	3.24	0.002434	2.22	183.81	92.34	0.5
Estero	3.5		Bridge								
Estero	3.4	Max WS	407.33	2.76	2.22	3.08	0.003606	2.5	162.62	91.54	0.6
Estero	3	Max WS	405.95	2.59	1.58	2.8	0.001735	2.02	200.56	86.6	0.42
Estero	2.6	Max WS	405.95	2.47	1.56	2.72	0.002122	2.22	182.75	79.9	0.47
Estero	2.5		Bridge								
Estero	2.4	Max WS	405.95	2.22	1.56	2.54	0.003086	2.49	162.93	79.87	0.56
Estero	2	Max WS	398.3	2.17	1.35	2.42	0.002299	2.21	179.98	84.56	0.48
Estero	1	Max WS	398.17	1.87	1.21	2.17	0.002966	2.43	164.03	82.52	0.55
Estero	0.5	Max WS	-1.01	1.4	-0.35	1.4	0	-0.01	125.09	82.12	0

11.4.2 Análisis de Crecidas del 17 de abril de 2016

11.4.2.1 Precipitaciones

Las Series de Tiempo consideradas para el análisis son las siguientes:

Tabla 11-20 Pluviogramas de Precipitación registrados en Estaciones Meteorológicas

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	VILLA ALEMANA
16abr2016, 18:00	0	0	1.4
16abr2016, 18:15	0	0	0
16abr2016, 18:30	0	0.2	0.2
16abr2016, 18:45	0.3	0	0.4
16abr2016, 19:00	0	0	0.2
16abr2016, 19:15	0	0	0.4
16abr2016, 19:30	0.2	0.2	0
16abr2016, 19:45	0.1	0	0.2
16abr2016, 20:00	0	0	0.8
16abr2016, 20:15	0	0	0.4
16abr2016, 20:30	0	0	0.2
16abr2016, 20:45	0.1	0	0
16abr2016, 21:00	0.3	0.2	0
16abr2016, 21:15	0.7	0.2	0
16abr2016, 21:30	0.2	0	0.2
16abr2016, 21:45	0	0.2	0
16abr2016, 22:00	0.3	0	0.6
16abr2016, 22:15	0	0	0.8
16abr2016, 22:30	0	0	0.8
16abr2016, 22:45	0	0	0.6
16abr2016, 23:00	0	0.2	1.2
16abr2016, 23:15	0.1	0	0.6
16abr2016, 23:30	0.3	0	0.6
16abr2016, 23:45	0	0.2	0.6
17abr2016, 00:00	0.3	0.8	1.2
17abr2016, 00:15	1.7	1.2	0.4
17abr2016, 00:30	1.4	0.6	0
17abr2016, 00:45	1.4	0.4	0
17abr2016, 01:00	0.7	0.6	0.4
17abr2016, 01:15	0.6	0.6	0.2
17abr2016, 01:30	2.2	1	0.2
17abr2016, 01:45	1.6	0.4	0.6
17abr2016, 02:00	0	0.2	0.6

Tabla 11-20 Pluviogramas de Precipitación registrados en Est. Meteorológicas (Cont)

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	V. ALEMANA
17abr2016, 02:00	0	0.2	0.6
17abr2016, 02:15	0.3	0.2	0.4
17abr2016, 02:30	0.3	0.2	0.6
17abr2016, 02:45	0.4	0.4	0
17abr2016, 03:00	0	0	0
17abr2016, 03:15	0.3	1.6	0
17abr2016, 03:30	1.6	0.6	0.2
17abr2016, 03:45	1.2	0.2	1.2
17abr2016, 04:00	0	0	1
17abr2016, 04:15	0.3	0.6	1
17abr2016, 04:30	0	0.8	0.8
17abr2016, 04:45	0.1	1	0.4
17abr2016, 05:00	0	0	0.4
17abr2016, 05:15	2.9	0.8	0.2
17abr2016, 05:30	1.1	0.2	0.4
17abr2016, 05:45	0.4	0.4	0.6
17abr2016, 06:00	0	0.4	0.6
17abr2016, 06:15	0.6	0	0.8
17abr2016, 06:30	0.1	0.4	1
17abr2016, 06:45	1.2	0.6	0.4
17abr2016, 07:00	0	0.8	0.6
17abr2016, 07:15	0.7	2	0.4
17abr2016, 07:30	2.5	1.6	1
17abr2016, 07:45	3.1	0.6	0.4
17abr2016, 08:00	0	0.4	0.8
17abr2016, 08:15	1.8	0.4	1.2
17abr2016, 08:30	0.6	0.6	1
17abr2016, 08:45	0.9	0.6	1
17abr2016, 09:00	0	0.8	0.8
17abr2016, 09:15	1.6	1.4	0.4
17abr2016, 09:30	1.5	0.6	0.8
17abr2016, 09:45	1	1.2	0.4
17abr2016, 10:00	0	1	0.6
17abr2016, 10:15	2.2	1	1
17abr2016, 10:30	1	0.2	0.6
17abr2016, 10:45	0.1	0.4	0.4
17abr2016, 11:00	0	0	0.6
17abr2016, 11:15	0.4	0.6	0.8

Tabla 11-20 Pluviogramas de Precipitación registrados en Est. Meteorológicas (Cont.)

HORA/ESTACION	LAS SALINAS	RODELILLO	V. ALEMANA
17abr2016, 11:30	0.2	0.6	0.4
17abr2016, 11:45	0.8	0.6	0.4
17abr2016, 12:00	0.6	0.6	0.4
17abr2016, 12:15	1	0.6	0
17abr2016, 12:30	0.6	0.6	0.6
17abr2016, 12:45	0.8	0.6	0.2
17abr2016, 13:00	0.6	0.6	0.2
17abr2016, 13:15	0.8	0.6	0.2
17abr2016, 13:30	1.2	0.6	0.4
17abr2016, 13:45	0.8	0.6	0.2
17abr2016, 14:00	0.6	0.6	0.2
17abr2016, 14:15	0.4	0.6	0.2
17abr2016, 14:30	0.6	0.4	0
17abr2016, 14:45	0.8	0.4	0.2
17abr2016, 15:00	0.4	0.4	0.4
17abr2016, 15:15	0.2	0.4	0.2
17abr2016, 15:30	0.4	0.4	0.4
17abr2016, 15:45	0.2	0.4	0.2
17abr2016, 16:00	0.4	0.4	0.4
17abr2016, 16:15	0.2	0.4	0.2
17abr2016, 16:30	0.2	0.4	0.2
17abr2016, 16:45	0.4	0.4	0.2
17abr2016, 17:00	0.2	0.4	0
17abr2016, 17:15	0.2	0.4	0.4
17abr2016, 17:30	0.4	0.4	0.4
17abr2016, 17:45	0.2	0.4	0
17abr2016, 18:00	0.2	0.4	0.4
17abr2016, 18:15	0.4	0.4	0.2
17abr2016, 18:30	0.2	0.4	0.2
17abr2016, 18:45	0.6	0.4	0.2
17abr2016, 19:00	0.4	0.2	0.2
17abr2016, 19:15	0.4	0.2	0.2
17abr2016, 19:30	0.2	0.2	0
17abr2016, 19:45	0.4	0.2	0.2
17abr2016, 20:00	0.2	0	0
TOTAL (mm)	56.9	45	44.8

Tabla 11-21 Porcentaje asignado por Estación Pluviométrica para cada Subcuenca

Subcuenca/Estación	Villa Alemana	Las Salinas	Rodelillo
S1	1	0	0
S2	1	0	0
S3	1	0	0
S5	1	0	0
S6	1	0	0
S7	0	0	0
S8	0	0	0
S9	0	0	0
S10	0	0	0
S11	0	0	0
S13	1	0	0
S37	0.83	0.07	0
S38	0	1	0
S40	0	1	0
S43	0	0.7	0.3
S44	0	1	0
S46	0	1	0
S47	0	1	0
S48	0	1	0

11.4.2.2 Parámetros para método Precipitación- Escorrentía

Tabla 11-22 Parámetros Método " SCS Curve Number" para Subcuencas para tormenta del 17 de abril de 2016

Subbasin	Initial Abstration (mm)	Curve Number	Impervious (%)
S1	28.6	64	0
S2	32.5	61	0
S3	35.3	59	0
S5	35.3	59	0
S6	38.3	57	0
S7	36.8	58	0
S8	35.3	59	0
S9	35.3	59	0
S10	29.8	63	0
S11	29.8	63	0
S13	33.9	60	0
S37	26.2	66	0
S38	23.9	68	0
S40	23.9	68	0
S43	23.9	68	0
S44	23.9	68	0
S46	23.9	68	0
S47	23.9	68	0
S48	23.9	68	0

Fuente: Elaboración propia en base a Plan Maestro del Gran Viña del Mar [Ref.:1]

11.4.2.3 Resultados

Figura 11-10.- Hidrograma de Crecida para J-S48 con Modelo Original

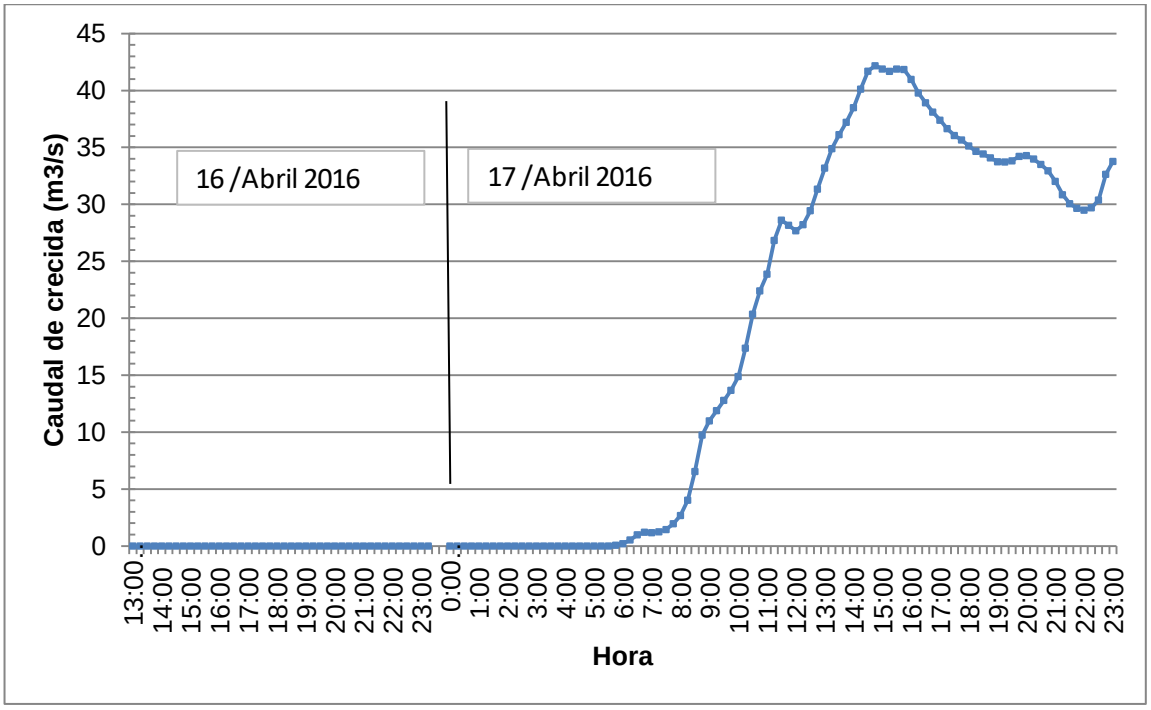


Figura 11-11.- Hidrograma de Crecida para J-S49 con Modelo Original

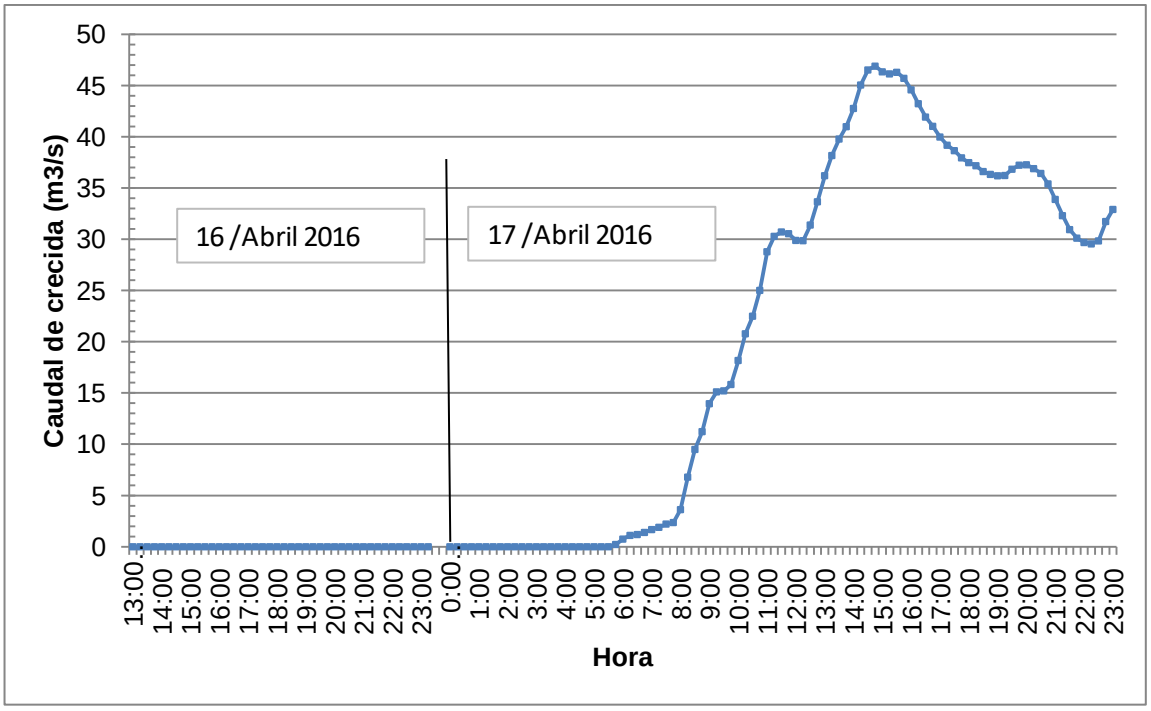


Figura 11-12.- Hidrograma de Crecida para J-S48 con CN Original reducida en 10%

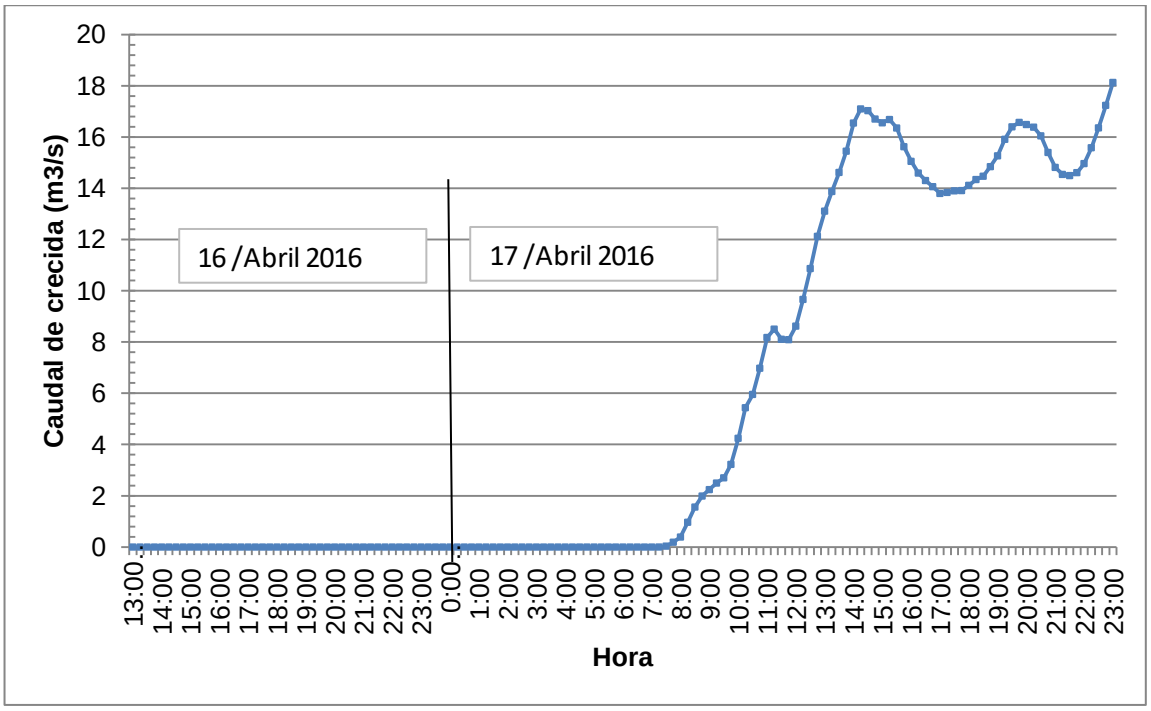
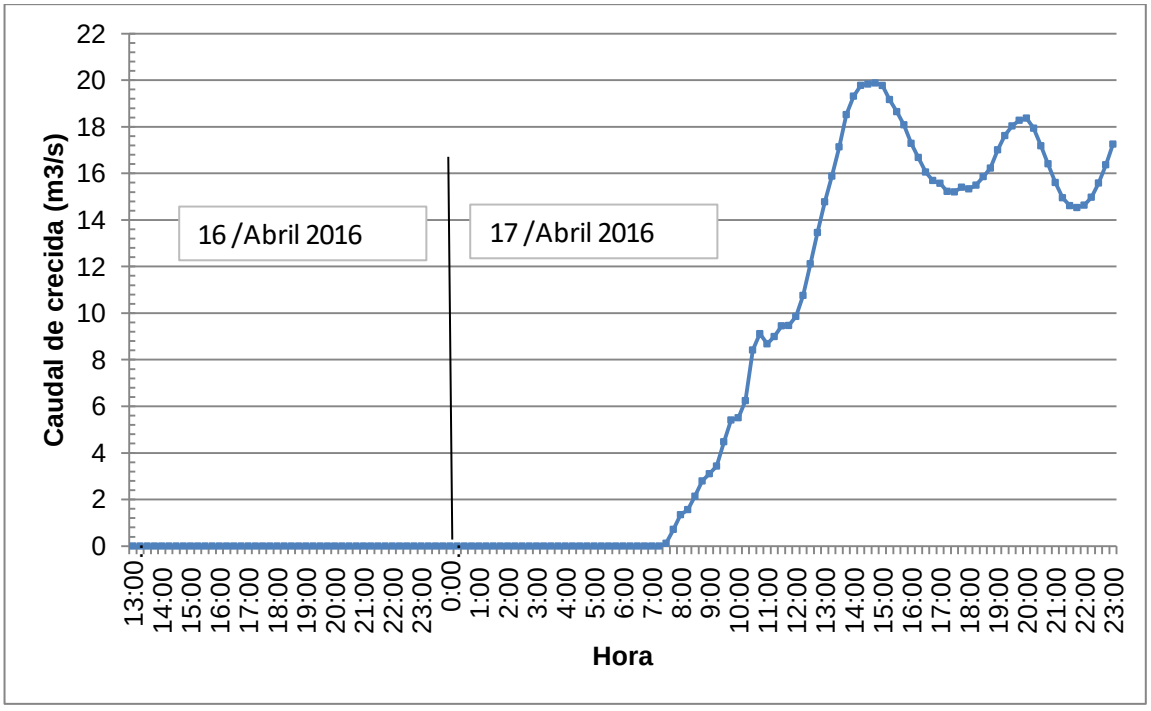


Figura 11-13.- Hidrograma de Crecida para J-S49 con CN Original reducida en 10%



11.5 ANEXO E: Antecedentes para Pronóstico de Caudales y Niveles de Agua

11.5.1 Pronóstico de Crecidas tormenta del 05-06 de agosto de 2015

11.5.1.1 Pronóstico Precipitaciones

Tabla 11-23 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 5 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)	
		Modelo. GFS	Modelo ECMWF
05-08-15:00	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	6.7	0.0	0.0
06-08-3:00	7.0	0.3	6.4
06-08-9:00	41.1	21.1	24.9
06-08-15:00	34.8	40.6	12.4
06-08-21:00	3.9	7.4	4.1
07-08-3:00	0.0	1.3	2.5
TOTAL (mm)	**93.5**	**70.6**	**50.3**

Tabla 11-24 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 5 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)	
		Modelo. GFS	Modelo ECMWF
05-08-15:00	0.2	0.0	0.0
05-08-21:00	4.0	0.0	0.3
06-08-3:00	9.6	0.3	8.4
06-08-9:00	26.4	23.6	23.9
06-08-15:00	35.6	39.6	11.2
06-08-21:00	10.8	11.2	3.8
07-08-3:00	1.2	2.8	2.5
TOTAL (mm)	**87.8**	**77.5**	**50.0**

Tabla 11-25 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 5 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)	
		Modelo. GFS	Modelo ECMWF
05-08-15:00	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	5.6	0.0	0.0
06-08-3:00	11.4	0.3	4.8
06-08-9:00	40.8	18.3	24.4
06-08-15:00	44.4	39.1	13.0
06-08-21:00	7.2	5.8	4.8
07-08-3:00	0.2	0.5	3.0
TOTAL (mm)	**109.6**	**64.0**	**50.0**

Tabla 11-26 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 5 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)	
		Modelo. GFS	Modelo ECMWF
05-08-15:00	0	0	0
05-08-21:00	4	0	0
06-08-3:00	10	0.5	4.3
06-08-9:00	36	14.2	23.4
06-08-15:00	42.2	32.0	14.7
06-08-21:00	11.6	5.3	6.4
07-08-3:00	0	0.5	4.1
TOTAL (mm)	**103.8**	**52.6**	**52.8**

Tabla 11-27 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 2 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.0	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	6.7	1.3	0.0	0.0
06-08-3:00	7.0	7.6	2.0	3.6
06-08-9:00	41.1	25.4	22.4	6.6
06-08-15:00	34.8	39.4	20.3	10.3
06-08-21:00	3.9	30.7	24.6	25.8
07-08-3:00	0.0	27.7	28.2	5.6
TOTAL (mm)	**93.5**	**132.1**	**97.5**	**51.9**

Tabla 11-28 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 2 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.2	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	4.0	1.5	0.0	0.0
06-08-3:00	9.6	8.1	2.0	3.8
06-08-9:00	26.4	25.1	21.1	7.1
06-08-15:00	35.6	38.9	19.6	9.8
06-08-21:00	10.8	31.5	23.1	26.8
07-08-3:00	1.2	25.7	27.7	6.1
TOTAL (mm)	**87.8**	**130.8**	**93.5**	**53.6**

Tabla 11-29 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 2 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.0	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	5.6	1.3	0.0	0.0
06-08-3:00	11.4	7.6	2.3	3.7
06-08-9:00	40.8	25.1	22.4	14.3
06-08-15:00	44.4	37.1	20.8	9.1
06-08-21:00	7.2	32.5	23.4	27.0
07-08-3:00	0.2	32.5	26.7	7.6
TOTAL (mm)	**109.6**	**136.1**	**95.5**	**58.6**

Tabla 11-30 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 2 días de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	4	1.8	0.0	0.0
06-08-3:00	10	7.6	2.5	1.0
06-08-9:00	36	24.4	21.3	17.3
06-08-15:00	42.2	34.0	21.6	15.6
06-08-21:00	11.6	33.5	22.4	30.6
07-08-3:00	0	38.1	25.1	8.1
TOTAL (mm)	**103.8**	**139.4**	**93.0**	**72.6**

Tabla 11-31 Valores de precipitación pronosticados para Estación Las Salinas a 1 día de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.0	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	6.7	2.3	0.3	0.1
06-08-3:00	7.0	10.7	5.3	1.3
06-08-9:00	41.1	6.1	24.1	4.4
06-08-15:00	34.8	35.1	5.6	9.5
06-08-21:00	3.9	31.2	4.3	25.8
07-08-3:00	0.0	19.6	5.3	5.6
TOTAL (mm)	**93.5**	**104.9**	**45.0**	**46.7**

Tabla 11-32 Valores de precipitación pronosticados para Estación Rodelillo a 1 día de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.2	0.0	0.0	0.0
05-08-21:00	4.0	2.8	0.8	0.1
06-08-3:00	9.6	10.9	5.6	1.5
06-08-9:00	26.4	6.6	23.9	4.6
06-08-15:00	35.6	35.1	5.8	9.3
06-08-21:00	10.8	30.0	3.8	26.8
07-08-3:00	1.2	17.3	5.6	6.1
TOTAL (mm)	**87.8**	**102.6**	**45.5**	**48.4**

Tabla 11-33 Valores de precipitación pronosticados para Estación Quilpué a 1 día de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0.0	0.3	0.0	0.0
05-08-21:00	5.6	2.0	0.5	0.1
06-08-3:00	11.4	10.9	5.3	1.6
06-08-9:00	40.8	5.8	25.1	5.3
06-08-15:00	44.4	35.1	6.6	9.1
06-08-21:00	7.2	35.1	4.8	27.0
07-08-3:00	0.2	24.9	6.4	6.4
TOTAL (mm)	**109.6**	**114.0**	**48.8**	**49.5**

Tabla 11-34 Valores de precipitación pronosticados para Estación Villa Alemana a 1 día de inicio del evento.

Fecha, hora	Precipitación Observada (mm)	Precipitación Pronosticada (mm)		
		Modelo GFS	Modelo ECMWF	Modelo WRF
05-08-15:00	0	0.3	0	0
05-08-21:00	4	2.5	0.8	0.1
06-08-3:00	10	10.7	5.3	2.1
06-08-9:00	36	6.9	25.4	7.3
06-08-15:00	42.2	36.6	7.9	10.8
06-08-21:00	11.6	37.6	5.3	30.6
07-08-3:00	0	33.0	7.6	8.1
TOTAL (mm)	**103.8**	**127.5**	**52.3**	**59**

11.5.1.2 Pronóstico Caudales

Figura 11-14.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 5 días del evento

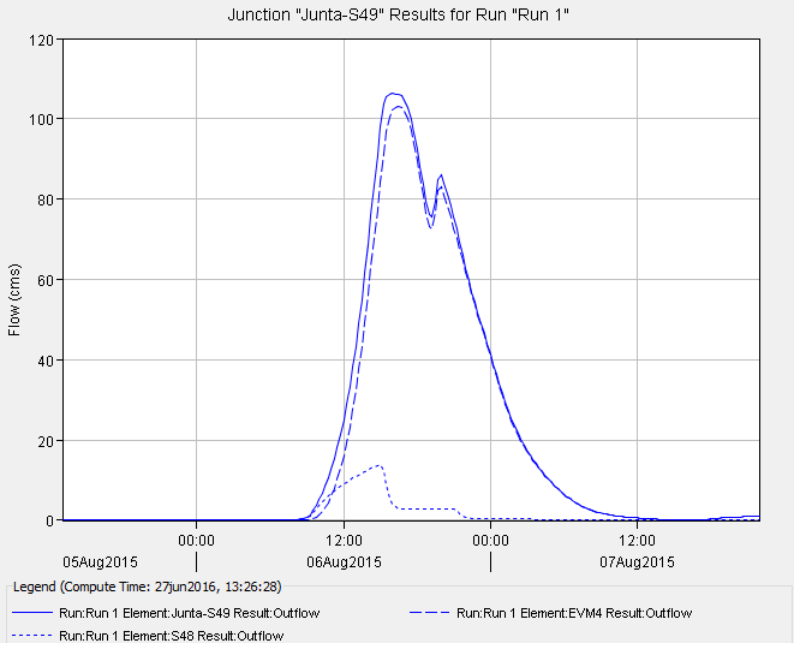


Figura 11-15.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 5 días del evento

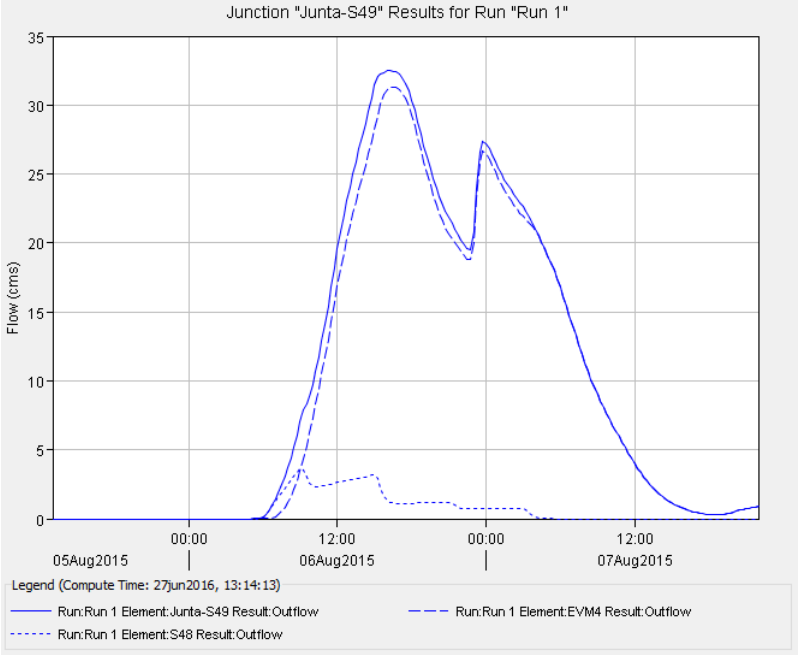


Figura 11-16.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 2 días del evento

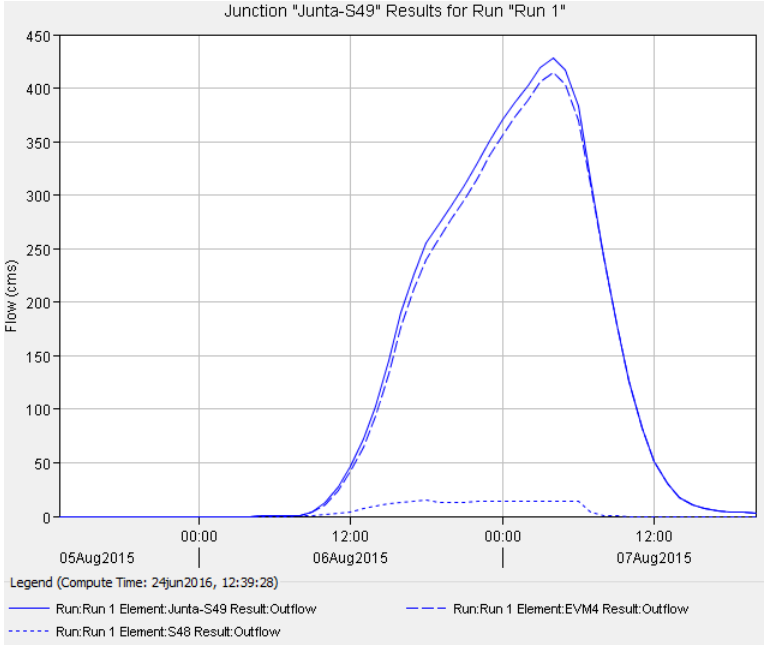


Figura 11-17.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 2 días del evento

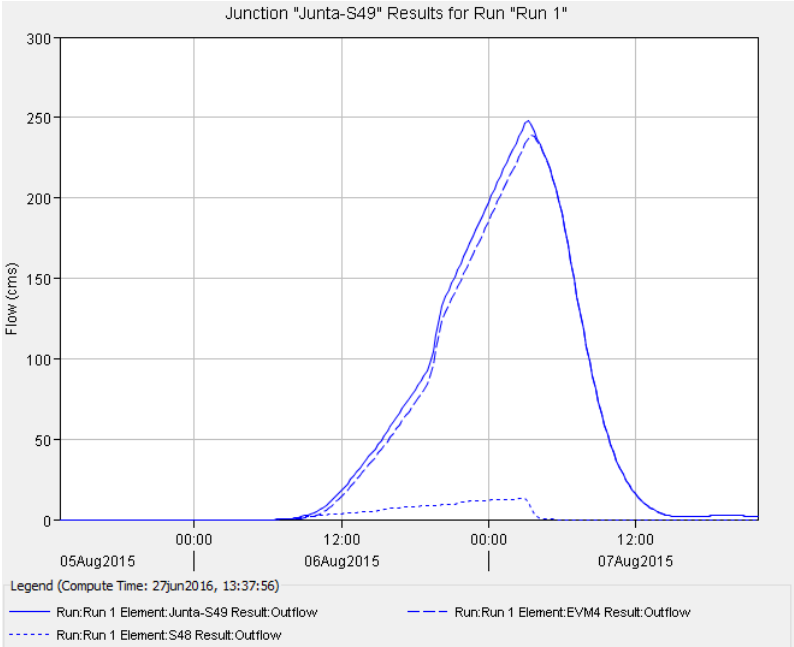


Figura 11-18.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo WRF a 2 días del evento

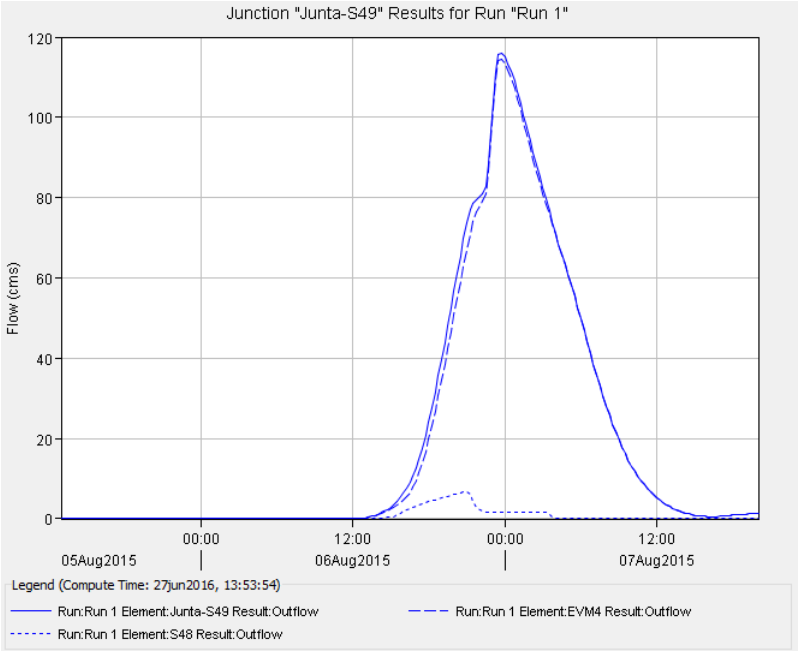


Figura 11-19.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo GFS a 1 día del evento

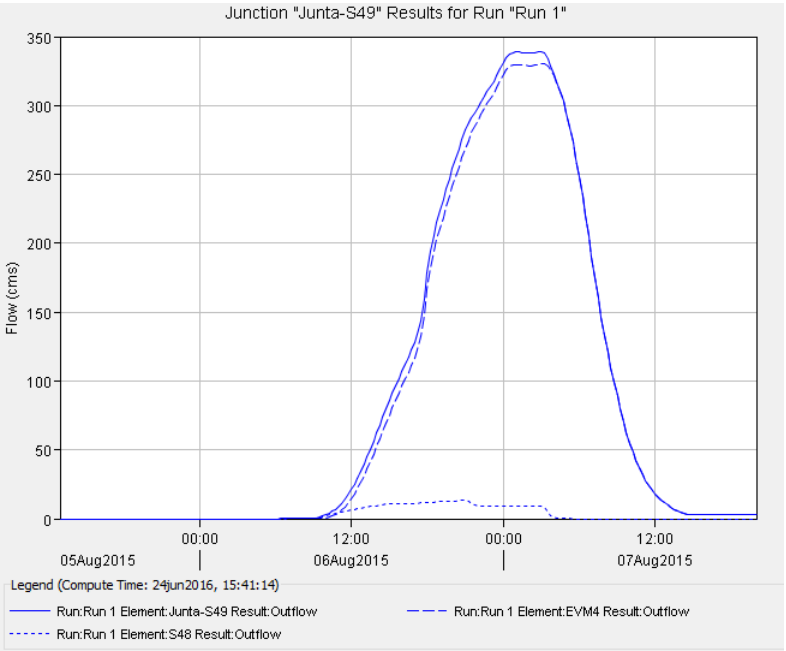


Figura 11-20.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo ECMWF a 1 día del evento

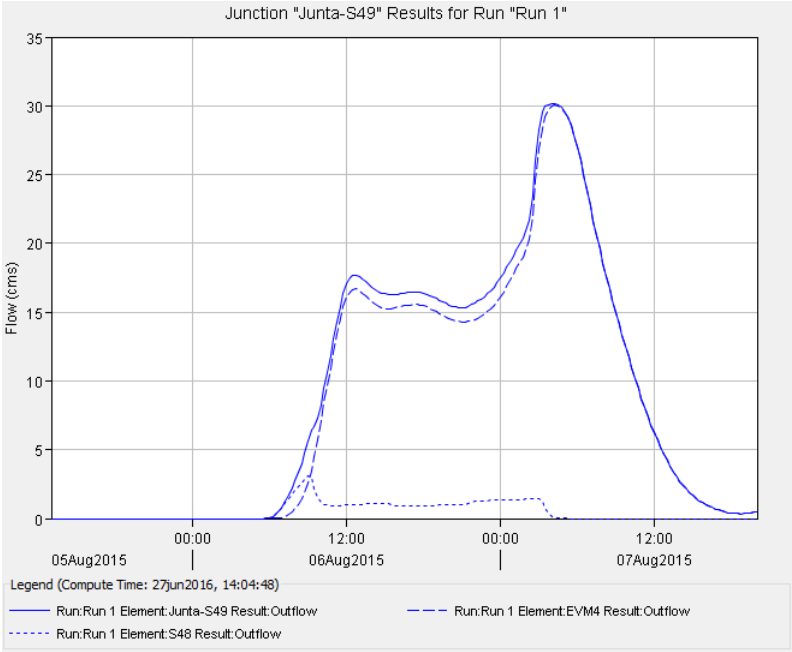
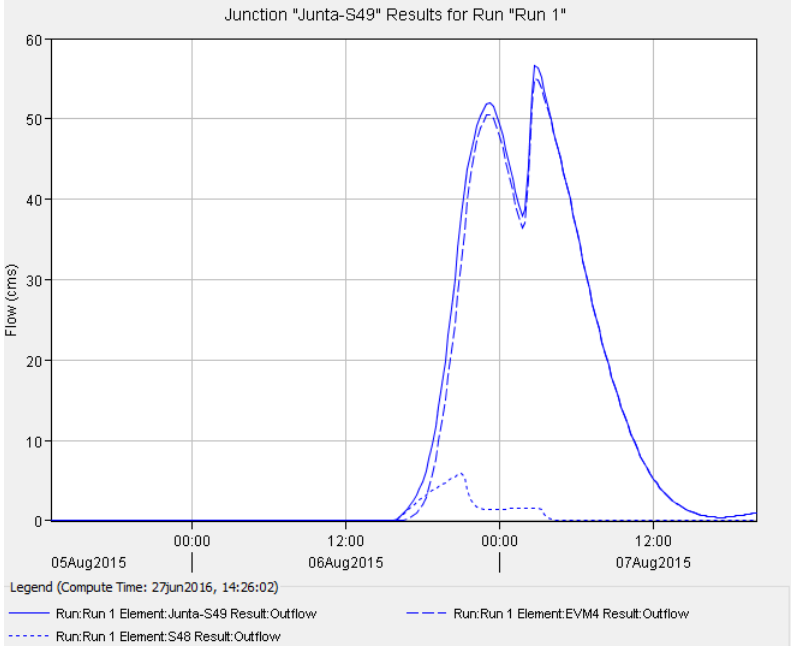


Figura 11-21.- Pronóstico de Crecidas para J-S49 con Modelo WRF a 1 día del evento



11.5.1.3 Pronóstico Niveles de Agua en Estero Marga-Marga

Tabla 11-35 Resultados Simulación Hidráulica para Pronóstico de Crecidas con Modelo GFS a 2 días del evento

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Estero	8	Max WS	420.99	0.04	4.25	3.15	4.45	0.001550	1.96	214.40	89.50	0.40
Estero	7	Max WS	420.98	-0.01	3.85	3.31	4.18	0.003734	2.55	164.98	90.03	0.60
Estero	6.6	Max WS	420.98	0.16	3.72	2.83	3.97	0.002152	2.21	190.32	84.94	0.47
Estero	6.5		Bridge									
Estero	6.4	Max WS	420.98	0.16	3.58	2.83	3.86	0.002629	2.35	179.01	84.94	0.52
Estero	6	Max WS	420.97	0.16	3.55	2.48	3.76	0.001679	2.03	207.79	89.87	0.43
Estero	5	Max WS	420.96	0.39	3.37	2.06	3.55	0.001250	1.88	223.59	86.26	0.37
Estero	4	Max WS	434.47	0.50	3.08	2.28	3.34	0.002406	2.26	191.93	92.65	0.50
Estero	3.5		Bridge									
Estero	3.4	Max WS	434.54	0.50	2.86	2.28	3.19	0.003451	2.53	171.59	91.88	0.59
Estero	3	Max WS	434.44	-0.19	2.70	1.64	2.91	0.001720	2.07	209.64	86.61	0.43
Estero	2.6	Max WS	391.32	-0.71	2.58	1.52	2.79	0.001700	2.05	191.25	79.92	0.42
Estero	2.5		Bridge									
Estero	2.4	Max WS	391.32	-0.71	2.43	1.52	2.67	0.002094	2.18	179.41	79.90	0.46
Estero	2	Max WS	391.23	-0.43	2.40	1.34	2.60	0.001583	1.96	199.54	84.57	0.41
Estero	1	Max WS	391.01	-0.50	2.24	1.20	2.45	0.001646	2.01	194.40	82.84	0.42
Estero	0.5	Max WS	-1.01	-0.50	1.40	-0.35	1.40	0.000000	-0.01	125.09	82.12	0.00

Tabla 11-36 Resultados Simulación Hidráulica para Pronóstico de Crecidas con Modelo GFS a 1 día del evento

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Estero	8	Max WS	330.19	0.04	3.96	2.93	4.12	0.001448	1.75	188.66	89.44	0.38
Estero	7	Max WS	330.07	-0.01	3.55	3.12	3.84	0.004164	2.40	137.63	90.02	0.62
Estero	6.6	Max WS	329.70	0.16	3.40	2.62	3.61	0.002176	2.02	163.35	84.94	0.46
Estero	6.5		Bridge									
Estero	6.4	Max WS	329.72	0.16	3.27	2.62	3.50	0.002755	2.17	152.01	84.93	0.52
Estero	6	Max WS	329.72	0.16	3.22	2.27	3.39	0.001632	1.84	179.01	87.61	0.41
Estero	5	Max WS	329.68	0.39	3.05	1.85	3.20	0.001155	1.68	196.63	85.38	0.35
Estero	4	Max WS	338.68	0.50	2.79	2.06	3.00	0.002388	2.06	164.80	91.63	0.49
Estero	3.5		Bridge									
Estero	3.4	Max WS	338.68	0.50	2.58	2.06	2.85	0.003556	2.32	145.71	90.90	0.59
Estero	3	Max WS	338.66	-0.19	2.41	1.43	2.58	0.001571	1.83	185.04	86.58	0.40
Estero	2.6	Max WS	338.66	-0.71	2.31	1.40	2.51	0.001870	1.99	169.99	79.88	0.44
Estero	2.5		Bridge									
Estero	2.4	Max WS	338.66	-0.71	2.14	1.40	2.38	0.002460	2.17	156.31	79.86	0.49
Estero	2	Max WS	338.65	-0.43	2.10	1.22	2.29	0.001857	1.95	173.97	84.56	0.43
Estero	1	Max WS	338.63	-0.50	1.90	1.07	2.11	0.002063	2.04	166.02	82.55	0.46
Estero	0.5	Max WS	-1.01	-0.50	1.40	-0.35	1.40	0.000000	-0.01	125.09	82.12	0.00

11.6 ANEXO F: Manual de utilización del Modelo Hidrológico de la Cuenca del Estero Marga-Marga en HEC-HMS

El presente anexo constituye una guía básica para la ejecución del modelo de Cuenca del Marga-Marga elaborado para el desarrollo de la presente memoria utilizando la versión 4.0 del sistema de modelaje hidrológico HEC-HMS.

Esta guía es complementaria a lo descrito en los capítulos 5 y 6 de este informe en los que se describieron los componentes del programa, componentes del modelo de cuenca y modelo meteorológico, especificaciones de control, datos de entrada, metodologías y parámetros de cálculo.

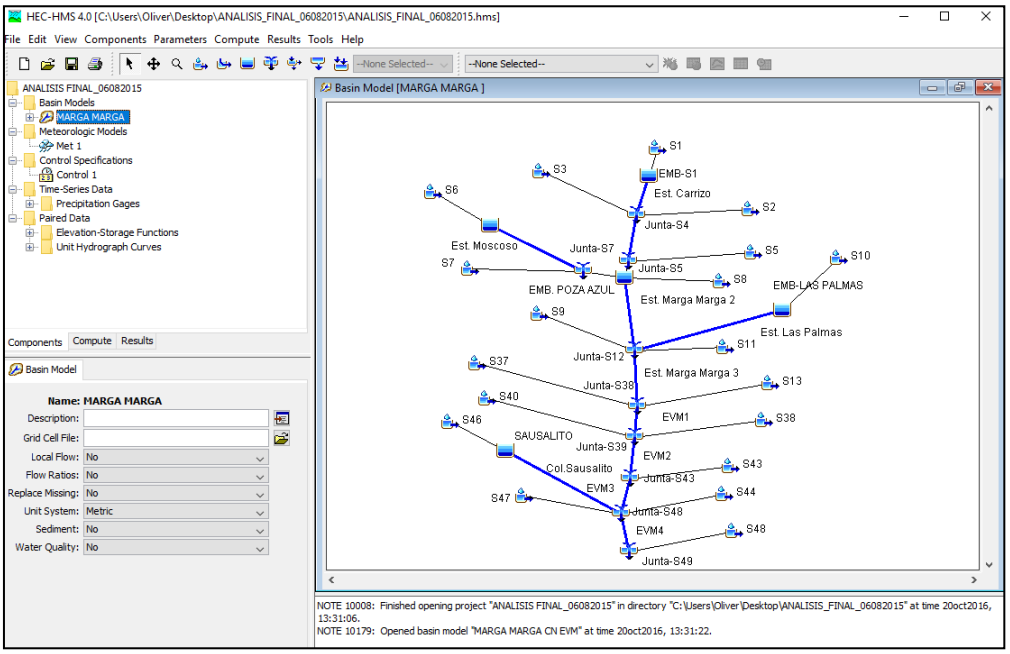
Los pasos requeridos para la ejecución del modelo hidrológico son los siguientes:

a. Descargar el instalador del programa disponible de manera gratuita en la dirección: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx

b. Cambiar la configuración regional y de idioma del equipo. En la pestaña “Números”: En “Símbolo decimal” cambiar la coma por un punto. En “Símbolo de separación de miles” cambiar el punto por un espacio en blanco.

c. Una vez instalado el software en el equipo abrir el archivo "ANALISIS_FINAL_06082015.hms" (adjunto a esta memoria) y que corresponde al Modelo de hidrológico de la Cuenca del Marga-Marga para la tormenta del 06 de agosto de 2015. Se desplegará en pantalla la interfaz que se muestra en la Figura 11-22.

Figura 11-22.- Interfaz de Usuario Modelo de Cuenca "ANALISIS_FINAL_06082015.hms"

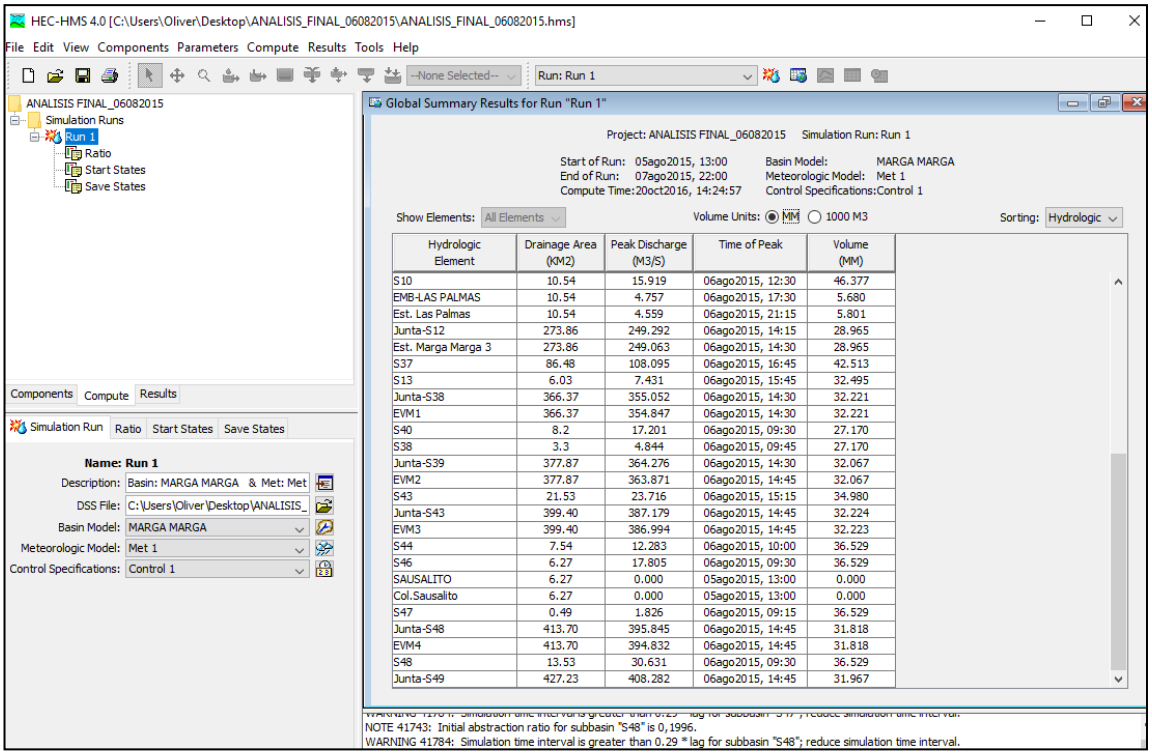


Mediante la interfaz es posible acceder a todas las componentes del modelo de Cuenca del Estero Marga-Marga, definidas en el Capítulo 6 (características físicas de subcuencas, métodos y parámetros de cálculo, series de precipitación, Hidrogramas unitarios, curvas de descargas de embalses, etc.)

d. Para ejecutar una corrida de simulación del modelo se debe seleccionar "Compute Run [Run 1]" desde la barra de Menú. Se accede a los resultados de la simulación seleccionando "Global Summary Table" desde el Menú "Results" (Ver figra 11-23).

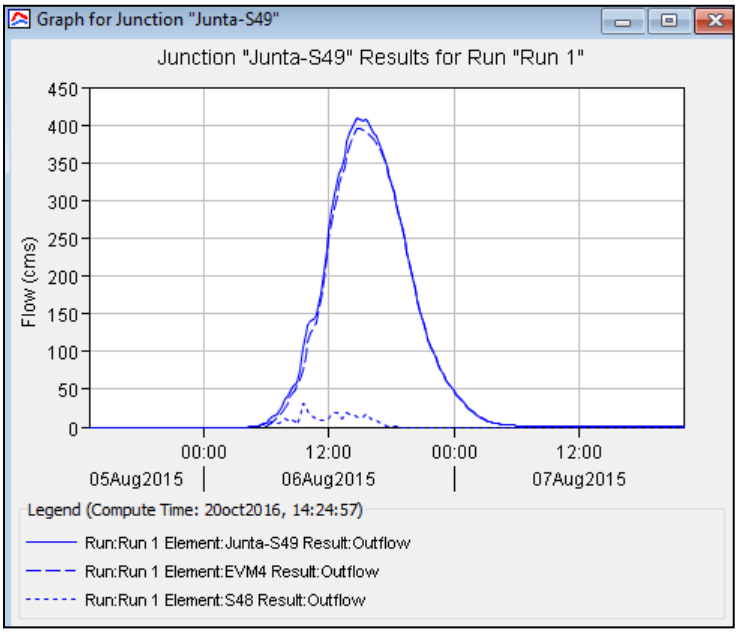
También es posible observar los gráficos y series de tiempo de cualquier elemento del modelo seleccionándolo desde el explorador de cuencas o desde el escritorio. En la Figura 11-24 se observa el hidrograma de salida en la junta J-S49 del modelo (desembocadura) y la serie de tiempo correspondiente.

Figura 11-23.- Despliegue de resultados de simulación "ANALISIS_FINAL_06082015.hms"



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
S10	10.54	15.919	06ago2015, 12:30	46.377
EMB-LAS PALMAS	10.54	4.757	06ago2015, 17:30	5.680
Est. Las Palmas	10.54	4.559	06ago2015, 21:15	5.801
Junta-S12	273.86	249.292	06ago2015, 14:15	28.965
Est. Marga Marga 3	273.86	249.063	06ago2015, 14:30	28.965
S37	86.48	108.095	06ago2015, 16:45	42.513
S13	6.03	7.431	06ago2015, 15:45	32.495
Junta-S38	366.37	355.052	06ago2015, 14:30	32.221
EVM1	366.37	354.847	06ago2015, 14:30	32.221
S40	8.2	17.201	06ago2015, 09:30	27.170
S38	3.3	4.844	06ago2015, 09:45	27.170
Junta-S39	377.87	364.276	06ago2015, 14:30	32.067
EVM2	377.87	363.871	06ago2015, 14:45	32.067
S43	21.53	23.716	06ago2015, 15:15	34.980
Junta-S43	399.40	387.179	06ago2015, 14:45	32.224
EVM3	399.40	386.994	06ago2015, 14:45	32.223
S44	7.54	12.283	06ago2015, 10:00	36.529
S46	6.27	17.805	06ago2015, 09:30	36.529
SAUSALITO	6.27	0.000	05ago2015, 13:00	0.000
Col.Sausalito	6.27	0.000	05ago2015, 13:00	0.000
S47	0.49	1.826	06ago2015, 09:15	36.529
Junta-S48	413.70	395.845	06ago2015, 14:45	31.818
EVM4	413.70	394.832	06ago2015, 14:45	31.818
S48	13.53	30.631	06ago2015, 09:30	36.529
Junta-S49	427.23	408.282	06ago2015, 14:45	31.967

Figura 11-24.- Despliegue de resultados de simulación "ANALISIS_FINAL_06082015.hms" para elemento Junta-S49



Project: ANALISIS FINAL_06082015 Simulation Run: Run 1
Junction: Junta-S49

Start of Run: 05ago2015, 13:00 Basin Model: MARGA MARGA
End of Run: 07ago2015, 22:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 20oct2016, 14:24:57 Control Specifications: Control 1

Date	Time	Inflow from... (M3/S)	Inflow from... (M3/S)	Outflow (M3/S)
06ago2015	12:15	269.663	16.694	286.357
06ago2015	12:30	288.801	19.707	308.509
06ago2015	12:45	306.552	18.023	324.575
06ago2015	13:00	320.992	14.491	335.484
06ago2015	13:15	332.561	11.472	344.033
06ago2015	13:30	344.434	15.356	359.791
06ago2015	13:45	358.435	19.625	378.059
06ago2015	14:00	372.215	16.844	389.059
06ago2015	14:15	383.098	14.673	397.771
06ago2015	14:30	390.751	14.184	404.935
06ago2015	14:45	394.832	13.450	408.282
06ago2015	15:00	394.681	12.485	407.167
06ago2015	15:15	392.476	12.595	405.071
06ago2015	15:30	390.580	17.044	407.624
06ago2015	15:45	389.040	16.750	405.790
06ago2015	16:00	385.845	11.061	396.906
06ago2015	16:15	380.905	8.109	389.015
06ago2015	16:30	376.186	9.063	385.249
06ago2015	16:45	371.524	7.659	379.184
06ago2015	17:00	365.006	4.217	369.223
06ago2015	17:15	356.008	2.008	358.016
06ago2015	17:30	345.434	0.961	346.395
06ago2015	17:45	333.918	0.429	334.347
06ago2015	18:00	321.766	0.193	321.959
06ago2015	18:15	309.007	0.091	309.098
06ago2015	18:30	295.374	0.043	295.416
06ago2015	18:45	280.710	0.008	280.718