



UNIVERSIDAD DE LA SERENA
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN OBRAS CIVILES

ANÁLISIS DEL MANEJO OPERACIONAL PARA ESCENARIOS CRÍTICOS DEL EMBALSE LA PALOMA

**CARLOS PATRICIO MORALES FLORES
ROBERTO ALEJANDRO ROJAS VALENCIA**

Memoria para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Comisión Revisora:

Dr(c) Ing. Edmundo González Ortuya – Prof. Patrocinante

LA SERENA – CHILE
2010

RESUMEN

En el presente texto se analiza el actual manejo operacional del embalse Paloma, para ello se hace una modelación hidrológica de la cuenca del río Grande utilizando la estadística hidrológica disponible a lo largo de 40 años de funcionamiento del embalse. Posteriormente, se realiza un estudio del comportamiento del embalse y sus compuertas en los años con mayores lluvias registradas en la zona de estudio, intentando simular la operación del embalse a través de los meses y años. En los resultados, se obtiene un buen modelo hidrológico de la cuenca del embalse Paloma, además de las simulaciones realizadas a la operación del embalse, se observa que los actuales criterios utilizados para el vertimiento de los excedentes de agua en el embalse Paloma funcionan bien para la mayoría de los casos, pero existen algunas excepciones, para lo cual se entregan algunas recomendaciones en la operación del vertedero ante la ocurrencia de éstos eventos.

ABSTRACT

In this text examines the current operational management of the Paloma Reservoir, for this makes a hydrological modeling of the Grande River basin using available hydrological statistics of 40 years of operation of the reservoir. Subsequently, makes a study of the reservoir performance and its gates in the more rainy years recorded in the area of study, trying to simulate the operation of the reservoir through the months and years. In the results, gets a good hydrological model from the Paloma Reservoir basin, moreover of the simulations makes to the operation of the reservoir, notes that the current used rules for dumping of surplus water in the Paloma Reservoir work well for most cases, but there are some exceptions, which are delivered some recommendations on the operation of the spillway to the occurrence of these events.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	Exposición general del tema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Contenidos	3

CAPÍTULO 2: DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

2.1	Introducción	5
2.2	Localización geográfica de la cuenca del rio Limarí	5
2.3	Clima	7
2.4	Hidrogeología	8
2.5	Geomorfología	9
2.6	Área de estudio	11
2.6.1	Red Fluviométrica	12
2.6.1.1	Río Grande	12
2.6.1.2	Río Mostazal	12
2.6.1.3	Río Rapel	13
2.6.2	Estaciones Fluviométricas	13
2.6.3	Estaciones Pluviométricas	15
2.6.4	Estaciones que miden Evapotranspiración	16
2.6.5	Estaciones que miden Temperatura	17
2.7	Descripción de la infraestructura de riego	17
2.7.1	El Sistema Paloma	17
2.7.2	Embalse Recoleta	20
2.7.3	Embalse Cogotí	21
2.7.4	Embalse La Paloma	22
2.7.4.1	Estructura del muro del embalse La Paloma	23
2.7.4.2	Estructura del vertedero del embalse La Paloma	24
2.7.4.3	Obras anexas al embalse La Paloma	25

CAPÍTULO 3: ANALISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS

3.1	Introducción	28
3.2	Periodo estadístico considerado para el estudio	29
3.3	Estudio Pluviométrico	29
3.3.1	Generalidades	29
3.3.2	Análisis de la estadística pluviométrica: corrección, relleno y extensión de datos	32
3.4	Estudio Fluviométrico	38
3.4.1	Generalidades	38

3.4.2	Estación Río Grande en Puntilla San Juan	41
3.4.3	Estación Río Rapel en Junta	42
3.5	Estudio de Evapotranspiración	44
3.6	Estudio de Temperatura	46

CAPÍTULO 4: ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DEL EMBALSE PALOMA

4.1	Introducción	49
4.2	Manejo Operacional del Sistema Paloma	50
4.2.1	Estrategias de entrega del Sistema Paloma	50
4.2.2	Asignación por temporada	53
4.2.3	Regla de operación propuesta por Enrique Kalisky	55
4.3	Operación del Embalse Paloma	56
4.3.1	Introducción	56
4.3.2	Reglas básicas de operación	56
4.3.3	Condiciones de operación del embalse	57
4.3.4	Recomendaciones y prácticas establecidas en el Embalse Paloma para la evacuación de crecidas.	58
4.4	Características físicas e hidrológicas de operación	59
4.4.1	Curvas características del Embalse Paloma	59
4.4.2	Evaporación del Embalse Paloma	61
4.4.3	Filtraciones del Embalse Paloma	64
4.5	Comentarios	66

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE ANALISIS

5.1	Introducción	67
5.2	Metodología de trabajo	67
5.3	Descripción de las herramientas de trabajo	68
5.3.1	Introducción	68
5.3.2	HEC-GeoHMS v 1.1	69
5.3.3	HEC-HMS 3.3	70
5.4	Componentes de las herramientas de trabajo	70
5.4.1	Software HEC-GeoHMS v1.1	70
5.4.1.1	Pre-procesado del terreno	70
5.4.1.2	Procesado del terreno	71
5.4.1.3	Delimitación del área de estudio	74
5.4.1.4	Determinación de las sub-cuencas a utilizar	74
5.4.1.5	Características físicas de las sub-cuencas	77
5.4.1.6	Determinación de los tiempos de concentración	78
5.4.1.7	Proyecto HEC-HMS 3.3	79
5.4.2	Software HEC-HMS 3.3	80
5.4.2.1	Introducción	80
5.4.2.2	Esquema de la cuenca	81
5.4.2.3	Esquema meteorológico	84
5.4.2.4	Especificaciones de control	85

5.4.2.5	Datos de entrada	85
5.5	Aplicación software HEC-HMS 3.3	86
5.5.1	Introducción	86
5.5.2	Modelos Adoptados	86
5.5.2.1	Perdidas	86
5.5.2.2	Transformación lluvia-caudal	102
5.5.2.3	Flujo base	104
5.5.3	Componentes del modelo meteorológico	105
5.5.3.1	Precipitación	105
5.5.3.2	Evaporación	108
5.5.3.3	Derretimiento de nieve	109
5.5.4	Componentes de las especificaciones de control	117
5.5.5	Componentes de los datos de entrada	117
5.6	Simulación de la Operación del Vertedero del Embalse Paloma	119
5.6.1	Fundamentos	119
5.6.2	Descripción de la Simulación	119
5.6.3	Elementos Utilizados en la Simulación	121
5.6.3.1	Ecuación de Balance Hidrológico Utilizada	121
5.6.3.2	Estadística disponible del Embalse Paloma	122
5.6.3.3	Planilla de Operación del Embalse Paloma	122
5.6.3.4	Planilla de Operación del Embalse Paloma Modificada para Simulación del Vertedero	126
5.6.3.5	Planilla de Simulación para el Vertedero del Embalse Paloma	128
5.6.4	Consideraciones al momento de realizar la simulación del vertedero.	130
5.6.5	Planilla de Operación del Vertedero del Embalse Paloma.	130
5.6.6	Estimación del Volumen para evacuar mediante el Vertedero del Embalse.	132
5.6.7	Determinación de la Utilización del Vertedero del Embalse Paloma.	133
5.6.8	Esquema de la Planilla de cálculo para el Vertedero del Embalse Paloma.	135

CAPÍTULO 6: RESULTADOS

6.1	Introducción	137
6.2	Modelado de la cuenca	137
6.2.1	Consideraciones adoptadas	137
6.2.1.1	Consideraciones generales	138
6.2.1.2	Consideraciones específicas	139
6.2.2	Calibración y validación	140
6.2.3	Valores calibrados	140
6.2.4	Resultados calibración, Validación y Simulación	143
6.2.5	Figuras calibración, Validación y Simulación	146
6.2.6	Análisis de Resultados HEC-HMS 3.3	150
6.3	Simulación de la Operación del Embalse Paloma y de su vertedero	155
6.3.1	Consideraciones adoptadas	155
6.3.2	Simulaciones por año	155
6.3.2.1	Simulación año 1984	156

6.3.2.2	Simulación año 1987	157
6.3.2.3	Simulación año 1997	159
6.3.2.4	Simulación año 2002	160
6.3.3	Simulaciones por mes	161
6.3.3.1	Criterios utilizados en las simulaciones	163
6.3.3.2	Simulación mes de Julio de 1984	164
6.3.3.3	Simulación mes de Noviembre de 1984	168
6.3.3.4	Simulación mes de Agosto de 1987	170
6.3.3.5	Simulación mes de Diciembre de 1987	171
6.3.3.6	Simulación mes de Diciembre de 1997	173

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Introducción	175
7.2	Conclusiones	175
7.2.1	Conclusiones HEC-HMS	175
7.2.2	Conclusiones de la Simulación de la Operación del Embalse Paloma	176
7.3	Recomendaciones	179

CAPITULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1	Referencias Bibliográficas	182
-----	----------------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2: DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

Figura N°	2.1:	Esquema cuenca del Limarí.	6
Figura N°	2.2:	Principales sub-cuencas del rio Grande; color verde Sub-cuenca rio Grande medio; color celeste Sub-cuenca rio Grande Alto.	11
Figura N°	2.3:	Vista Aérea Embalse Recoleta.	21
Figura N°	2.4:	Vista Aérea Embalse Cogotí.	22
Figura N°	2.5:	Vista Aérea Embalse Paloma.	25

CAPÍTULO 3: ANALISIS DE DATOS

Figura N°	3.1:	Estaciones Pluviométricas presentes en la zona de estudio.	31
Figura N°	3.2:	Precipitaciones medias mensuales de las estaciones Pluviométricas de Interés.	37
Figura N°	3.3:	Estaciones Fluviométricas presentes en la zona de estudio.	39
Figura N°	3.4:	Curva de variación estacional Rio Grande en Puntilla San Juan.	42
Figura N°	3.5:	Curva de variación estacional Rio Rapel en Junta.	43
Figura N°	3.6:	Curvas de Evapotranspiración media mensual en estaciones presentes en la zona.	45
Figura N°	3.7:	Estaciones medidoras de evaporación y temperaturas de Interés de la Cuenca del Río Limarí.	47
Figura N°	3.8:	Temperatura media mensual.	48

CAPÍTULO 4: ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DEL EMBALSE LA PALOMA

Figura N°	4.1:	Curvas características, a) Curva Elevación-Volumen, b) Curva Elevación-Área. Elevación (m), Volumen (m ³), Área (m ²).	60
Figura N°	4.2:	Representación grafica de la evaporación mensual del Embalse Paloma.	62
Figura N°	4.3:	Representación gráfica de la filtración en función de la altura. Embalse Paloma.	64

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE ANALISIS

Figura N°	5.1:	Modelo Digital de Elevaciones. Cuenca del Limarí.	69
Figura N°	5.2:	Procesado del terreno. 1): Flow direction. 2): Flow accumulation. 3): Stream definition. 4): Stream segmentation. 5): Watershed delineation. 6): Watershed Polygon Processing. 7): Stream Segment Processing. 8): Watershed Aggregation.	73

Figura N° 5.3:	Definición del área de trabajo. Cuencas afluentes al embalse Paloma. Cuenca del Limarí.	74
Figura N° 5.4:	Subcuencas afluentes al Embalse Paloma. Subdivisión adoptada en base a subdivisión D.G.A.	75
Figura N° 5.5:	Proyecto HEC-GeoHMS v1.1. Representación esquemática de la cuenca del Limarí y la unión de sus elementos.	79
Figura N° 5.6:	Esquema modelación cuenca hidrológica.	85
Figura N° 5.7:	Método SMA. Representación esquemática de los niveles de infiltración que considera el método.	87
Figura N° 5.8:	Relación aumento o disminución del flujo base.	97
Figura N° 5.9:	Hidrograma Unitario de Clark, para varias relaciones.	103
Figura N° 5.10:	Depósitos lineales en serie.	105
Figura N° 5.11:	Esquema de los polígonos de Thiessen de precipitación.	106
Figura N° 5.12:	Esquema de los polígonos de Thiessen de evaporación.	108
Figura N° 5.13:	Esquema de las bandas de elevación sobre las cuencas afluentes al embalse La Paloma.	116
Figura N° 5.14:	Planilla de Operación actual del Embalse Paloma.	126
Figura N° 5.15:	Planilla de Operación Modificada del Embalse Paloma.	128
Figura N° 5.16:	Gráfico de la curva de descarga para una compuerta en el vertedero del embalse La Paloma.	129
Figura N° 5.17:	Planilla de cálculo para determinar la forma de evacuación de agua en el vertedero del Embalse Paloma.	135

CAPÍTULO 6: RESULTADOS

Figura N° 6.1:	Estaciones fluviométricas calibradas validadas y simuladas.	146
Figura N° 6.2:	Calibración entrada Embalse Paloma sector Río Grande Medio 2000 - 2005.	147
Figura N° 6.3:	Validación entrada Embalse Paloma sector Río Grande 1990 - 2000.	147
Figura N° 6.4:	Simulación entrada Embalse Paloma sector Río Grande 1980 - 2007.	148
Figura N° 6.5:	Calibración entrada Embalse Paloma sector Río Grande 2000 - 2005.	149
Figura N° 6.6:	Validación entrada Embalse Paloma sector Río Grande 1990 - 2000.	149
Figura N° 6.7:	Simulación entrada Embalse Paloma sector Río Grande 1980 - 2007.	150
Figura N° 6.8:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1984.	157
Figura N° 6.9:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1987.	159
Figura N° 6.10:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1997.	160
Figura N° 6.11:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 2002.	161
Figura N° 6.12:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Julio de 1984.	166
Figura N° 6.13:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su	167

	vertedero para el mes de Julio de 1984. Volumen Vertido	
Figura N° 6.14:	Caudales afluentes reales al Embalse Paloma. Julio de 1984.	168
Figura N° 6.15:	Caudales afluentes al Embalse Paloma. Noviembre de 1984.	169
Figura N° 6.16:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Noviembre de 1984.	170
Figura N° 6.17:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Agosto de 1987.	171
Figura N° 6.18:	Caudales afluentes al Embalse Paloma. Diciembre de 1987.	172
Figura N° 6.19:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Diciembre de 1987.	173
Figura N° 6.20:	Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Diciembre de 1997.	174

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2: DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

Tabla N° 2.1:	Listado de estaciones fluviométricas de la zona de estudio.	14
Tabla N° 2.2:	Régimen del Grupo de estaciones fluviométricas.	15
Tabla N° 2.3:	Listado de estaciones pluviométricas de la zona de estudio.	16
Tabla N° 2.4:	Estaciones con registro de evapotranspiración y años de registro.	16
Tabla N° 2.5:	Características Técnicas del Embalse Paloma.	
	Parte I	26
	Parte II	27

CAPÍTULO 3: ANALISIS DE DATOS

Tabla N° 3.1:	Listado de estaciones pluviométricas de la zona de estudio.	30
Tabla N° 3.2:	Correlaciones obtenidas para el grupo 1.	33
Tabla N° 3.3:	Correlaciones obtenidas para el grupo 2.	33
Tabla N° 3.4:	Correlaciones obtenidas para el grupo 3.	34
Tabla N° 3.5:	Precipitación Media Anual (PMA).	34
Tabla N° 3.6:	Precipitaciones anuales. Parte I.	35
Tabla N° 3.6:	Precipitaciones anuales. Parte II.	36
Tabla N° 3.7:	Listado de Estaciones fluviométricas de la zona de estudio.	38
Tabla N° 3.8:	Análisis de frecuencia para el Rio Grande en Puntilla San Juan.	42
Tabla N° 3.9:	Análisis de frecuencia para el Rio Rapel en Juntas.	43
Tabla N° 3.10:	Evapotranspiración media mensual.	45
Tabla N° 3.11:	Estaciones medidoras de evapotranspiración y temperatura.	46
Tabla N° 3.12:	Temperatura media mensual.	47

CAPÍTULO 4: ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DEL EMBALSE LA PALOMA

Tabla N° 4.1:	Estrategias de entregas actuales (entregas máximas anuales).	52
Tabla N° 4.2:	Tipificación de los años hidrológicos.	53
Tabla N° 4.3:	Altura limnimétrica superficie en m ² y volumen en Hm ³ del Embalse Paloma.	61
Tabla N° 4.4:	Registro mensual Evaporación espejo de agua. Embalse Paloma. Valores en Hm ³ .	63
Tabla N° 4.5:	Registro filtración en el vaso. Embalse Paloma. Valores en m ³ *10 ³ .	65

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE ANALISIS

Tabla N° 5.1:	Nombrado y subdivisión de sub-cuencas de acuerdo a subdivisión DGA.	76
Tabla N° 5.2:	Principales ríos en sub-cuencas.	76
Tabla N° 5.3:	Características físicas de las sub-cuencas.	77
Tabla N° 5.4:	Tiempos de Concentración (h) para cada sub-cuenca y diferentes factores correctores según Kirpich.	78
Tabla N° 5.5:	Componentes del Esquema de la Cuenca. Métodos ofrecidos por el software HEC-HMS 3.3.	83
Tabla N° 5.6:	Componentes del Esquema meteorológico. Métodos ofrecidos por el software HEC-HMS 3.3.	84
Tabla N° 5.7:	Parámetros solicitados por el modelo SMA.	89
Tabla N° 5.8:	Valores de capacidad de almacenamiento en la cubierta vegetal.	91
Tabla N° 5.9:	Valores de la máxima capacidad de almacenamiento en la superficie.	92
Tabla N° 5.10:	Valores de la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para la upper zone.	93
Tabla N° 5.11:	Infiltración superficial.	96
Tabla N° 5.12:	Capacidad de Infiltración de agua, según tipo de suelo.	96
Tabla N° 5.13:	Disminución de la capacidad de Infiltración, según porcentaje de pendiente.	97
Tabla N° 5.14:	Determinación Tasa de Percolación.	98
Tabla N° 5.15:	Valores iniciales adoptados para el método SMA. Parte I.	100
Tabla N° 5.15:	Valores iniciales adoptados para el método SMA. Parte II.	101
Tabla N° 5.16:	Valores adoptados del método del Hidrograma Unitario de Clark.	104
Tabla N° 5.17:	Porcentaje de acción de cada pluviómetro sobre cada sub-cuenca.	107
Tabla N° 5.18:	Valores adoptados del método del flujo base constante mensual.	109
Tabla N° 5.19:	Magnitudes relativas de los factores de tasas de derretimiento.	111
Tabla N° 5.20:	Gradiente de temperatura a priori al proceso de calibración.	115
Tabla N° 5.21:	Precipitaciones y volúmenes afluentes históricos al Embalse Paloma.	120

CAPÍTULO 6: RESULTADOS

Tabla N° 6.1:	Valores calibrados del Método Temperatura índice.	141
Tabla N° 6.2:	Valores calibrados ATI-Meltrate.	142
Tabla N° 6.3:	Valores calibrados ATI-coldrate.	143
Tabla N° 6.4:	Valore finales del método de pérdidas SMA. Parte I	144
Tabla N° 6.4:	Valore finales del método de pérdidas SMA. Parte I	145
Tabla N° 6.5:	Clasificación por año hidrológico de acuerdo al índice de precipitación según Brown-Ferrer (1978).	151
Tabla N° 6.6:	Volúmenes de agua en temporada estival para años Muy Húmedos.	153
Tabla N° 6.7:	Volúmenes de agua en temporada estival para años Húmedos.	153
Tabla N° 6.8:	Volúmenes de agua en temporada estival para años Normal	154

	Húmedos.	
Tabla N° 6.9:	Volúmenes de agua en temporada estival para años Normal.	154
Tabla N° 6.10:	Meses con mayores afluentes y volúmenes vertidos del Embalse Paloma	162
Tabla N° 6.11:	Tabla Comparativa del Comportamiento Real y Simulado del Embalse Paloma para el mes de Julio de 1984	165

ANEXOS

Anexo N°	1	Estadística Pluviométrica Disponible.
Anexo N°	2	Estadística Pluviométrica Rellenada.
Anexo N°	3	Estadística Fluviométrica Disponible.
Anexo N°	4	Estadística de Evapotranspiración Disponible.
Anexo N°	5	Estadística de Temperatura Disponible.
Anexo N°	6	Estadística de Temperatura Rellenada.
Anexo N°	7	Métodos de Obtención del Tiempo de Concentración.
Anexo N°	8	Estadística Disponible del Embalse Paloma.
Anexo N°	9	Operación Real Embalse Paloma.
Anexo N°	10	Simulación de la Operación del Embalse Paloma. 10.1 Consideraciones para el presente anexo.
Anexo N°	11	Operación Simulada del Vertedero del Embalse Paloma mediante Volúmenes Mensuales.
Anexo N°	12	Operación Simulada del Embalse Paloma mediante Volúmenes Diarios.
Anexo N°	13	Operación Simulada del Vertedero del Embalse Paloma mediante Volúmenes Diarios. 13.1 Consideraciones para el presente anexo.
Anexo N°	14	Regla de Operación del Embalse Paloma planteada por Enrique Kalisky.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 EXPOSICIÓN GENERAL DEL TEMA

En estos últimos años, ha cobrado importancia en el mundo entero, el manejo eficiente del recurso más importante de nuestro planeta, el agua. Entre los usos más importantes dados a este recurso, se encuentra el riego de cultivos, para lo cual se hace necesaria la implementación de grandes obras de regulación como son los embalses.

Los embalses, permiten almacenar grandes volúmenes de agua, controlar crecidas en temporadas de lluvia y asegurar el regadío de los terrenos de cultivos aguas abajo de la presa. Por lo tanto, resulta imperioso el perfeccionamiento de las técnicas de control y de predicción de crecidas, a modo de optimizar el uso eficiente del agua.

En Chile, una de estas obras es el embalse Paloma el cual fue construido con la finalidad de mejorar la seguridad de riego de los terrenos de cultivo del valle del río Limarí en la Región de Coquimbo. El embalse Paloma forma parte del denominado “Sistema Paloma”, el cual es un conjunto de estructuras de riego formado entre otros por los embalses Recoleta, Cogotí y Paloma, además de una extensa red de canales.

Durante todos estos años el embalse Paloma se ha manejado en base a datos hidrológicos de la década del 70, los cuales se basaron en condiciones hidrológicas distintas a las registradas en los últimos años. Para ello se propone realizar un análisis del actual manejo operacional con el fin de mejorar el modelo de operación del embalse a través de un modelo de simulación hidrológica que

permita operar el embalse con mayor seguridad de riego, de la estructura y de la comunidad aguas abajo.

Los resultados de la presente memoria sirven como apoyo técnico para la administración del embalse Paloma en la toma de decisiones para la operación de las compuertas radiales en periodos de operación crítica, vale decir aquellas operaciones que se encuentran por sobre el estado de operación normal y por debajo de la operación de emergencia del embalse Paloma y que se hallan definidas en el Capítulo 4.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la operación del embalse en los años en donde el nivel de agua se encuentra por sobre la cota de vertimiento de las compuertas sin alertas de crecidas afluentes y determinar si las actuales condiciones de operación responden a las actuales condiciones hidrológicas registradas en las cuencas afluentes al embalse Paloma.

Se pretende generar un modelo de simulación hidrológica para poder obtener los caudales de entrada al embalse Paloma. Con la obtención de los valores de crecidas se intenta revisar las actuales disposiciones para el manejo operacional del embalse, en lo referido al tema de las crecidas y proponer nuevas medidas de operación.

Otros objetivos que serán abordados en el presente texto y que permitirán reevaluar las condiciones hidrológicas de la cuenca aportante al embalse Paloma son los siguientes:

- Aplicación de los programas HEC-GeoHMS v1.1 y HEC-HMS 3.3 siendo usados principalmente para la determinación de un modelo Hidrológico que reproduzca lo mas realmente posible la respuesta de la cuenca

afluente del embalse Paloma, en especial la cuenca del río Grande, ante eventos de precipitaciones que se produzcan en ella, para así generar los hidrogramas de crecidas afluentes al embalse.

- Complementación de los registros de datos, correspondientes a las estaciones pluviométricas mencionadas en el presente estudio mediante el uso de otras estaciones cercanas.
- Revisión del actual manejo operacional del embalse Paloma con la intención de proponer una metodología para la operación de las compuertas de evacuación de caudal en periodos de crecidas de acuerdo a criterios de seguridad de infraestructura y de riego.

Finalmente, en este estudio se presentan algunas consideraciones relativas a las posibilidades de pronóstico de crecidas en el corto plazo y a largo plazo.

1.3 CONTENIDOS

El presente informe considera ocho capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1 “Introducción”. Corresponde al capítulo introductorio, en el que se dan los antecedentes generales del estudio y los objetivos que este contempla.

Capítulo 2 “Descripción General de la Cuenca del Río Limarí”. Se entrega una descripción general del área de estudio, describiendo la zona de la cuenca sobre el embalse Paloma. Se describen los principales cauces de la cuenca que aportan el recurso hídrico al embalse, su geografía, ubicación, afluentes, descripción climática de la zona y de la infraestructura de riego de la cuenca, la cual define en forma simple las características del Sistema Paloma.

Capítulo 3 “Análisis de Datos Hidrológicos”. En este capítulo se hace entrega del análisis de datos hidrológicos recopilados para el presente estudio. Se entrega la nómina de las estaciones pluviométricas y fluviométricas, además de explicar la metodología utilizada para realizar el relleno, ampliación y corrección de la base de datos disponibles.

Capítulo 4 “Actual Manejo Operacional del Embalse La Paloma”. En el capítulo 4, se describe el manejo operacional del embalse Paloma, mostrando su actual sistema de operación para distintos regímenes de entrada y entrega del recurso hídrico. También, se indica su forma de operación, tanto en condición normal, como en escenarios de crecidas afluentes al embalse Paloma. Por último, se describen algunas de las curvas de operación del embalse Paloma.

Capítulo 5 “Metodología de Análisis”. En este capítulo se presenta la metodología adoptada en el presente estudio para crear un modelo de simulación hidrológica de la cuenca afluente al embalse Paloma. Posteriormente se propone una metodología para simular la operación del embalse Paloma considerando la operación de las compuertas de evacuación de crecidas.

Capítulo 6 “Resultados”. En el capítulo 6 se entregan los resultados de la calibración y validación del modelo de simulación hidrológica y además se hace entrega de los resultados obtenidos para la simulación propuesta de la operación de las compuertas del embalse Paloma.

Capítulo 7 “Conclusiones y Recomendaciones”. Se presentan conclusiones y recomendaciones en función de la metodología y resultados alcanzados en el presente estudio.

Capítulo 8 “Referencias Bibliográficas”. En el capítulo 8, se hace alcance a las referencias bibliográficas utilizadas en la redacción del presente estudio.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA DEL RIO LIMARÍ.

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se entregará una descripción de toda la cuenca afluente al embalse Paloma, la cual corresponderá a la zona de estudio. Se describirán los distintos ríos afluentes al embalse Paloma, características geográficas, clima, infraestructura de riego, etc.

También, se entregarán las características de las estaciones de medición que se utilizarán en el estudio. Estas estaciones nos entregarán registros de tipo fluviométricos, pluviométricos de evaporación y temperatura de la cuenca.

Por último, se incluirá una descripción de la obra física del embalse Paloma, entregando características técnicas de la presa, tanto para la estructura de la cortina como el vertedero del embalse, entre otras.

2.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO LIMARÍ.

La cuenca del río Limarí está situada entre los paralelos 30°15' y 31°31' de latitud sur y los meridianos 70°15' y 71°45' de longitud oeste. Esta cuenca está limitada por el norte por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Elqui y de la cuenca costera Elqui-Limarí, por el sur por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Choapa y de la cuenca costera Limarí-Choapa. Al este, la cuenca limita con la Cordillera de Los Andes y al oeste con el

Océano Pacífico. La cuenca del Limarí cubre una superficie de 11.927 Km.², constituyendo la cuenca de mayor superficie de la IV Región.

El cauce más importante de la zona de estudio, es el propio Río Limarí, que nace en la confluencia de los ríos Hurtado y Grande, y desagua al mar al Oeste de la ciudad de Ovalle. El principal afluente del Río Limarí lo constituye el Río Grande. Los principales ríos de la cuenca del Limarí se encuentran esquematizados en la Figura N° 2.1.

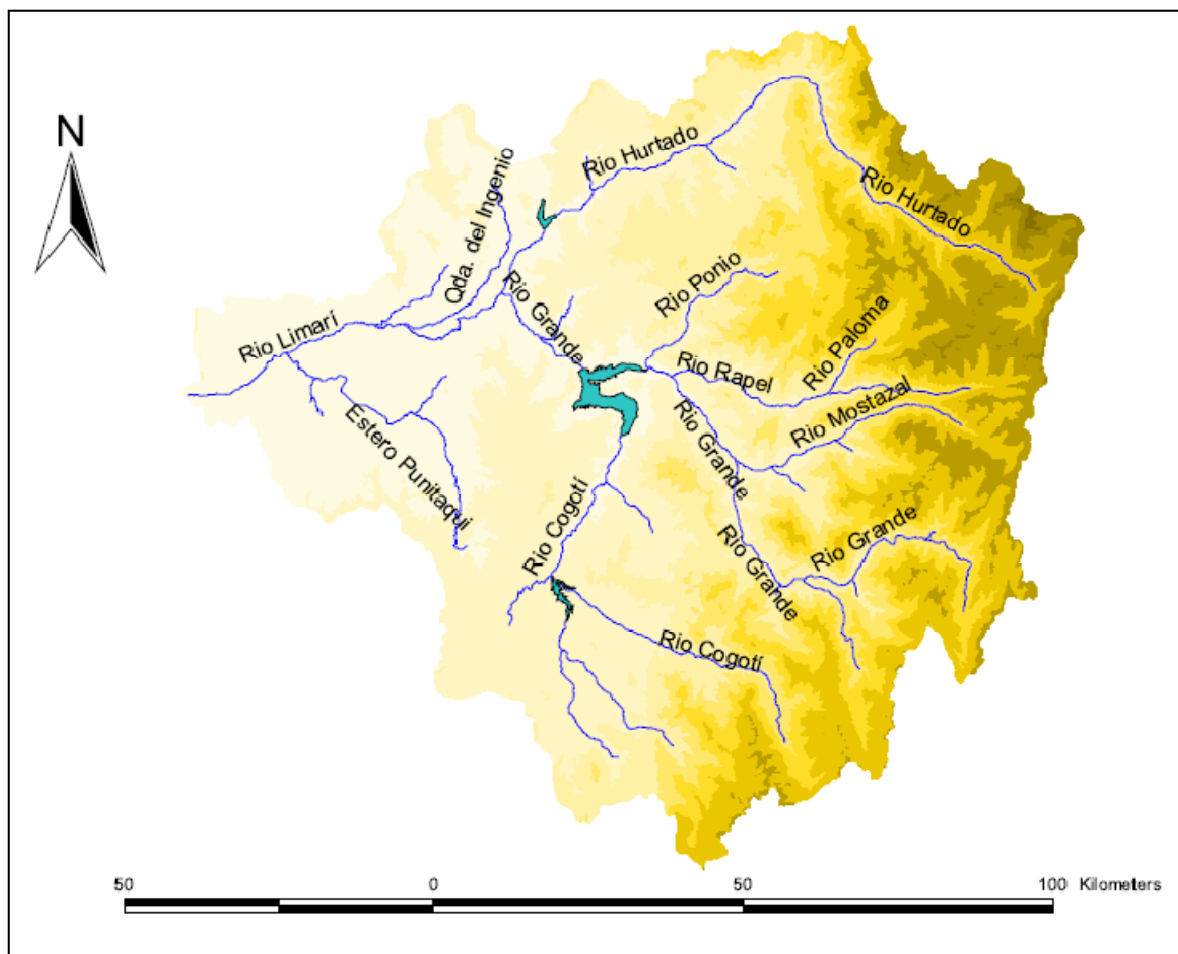


Figura N° 2.1: Esquema cuenca del Limarí. Elaboración propia.

La hoya hidrográfica del Río Grande nace en la Cordillera de los Andes, su desarrollo es de Este a Oeste y de Sur a Norte, abarca el sector noroeste de la

cuenca del Río Limarí y termina al unirse al río Hurtado para formar el río Limarí, aguas abajo del Embalse Paloma, al Este de la ciudad de Ovalle, sin alcanzar el mar. El Río Huatulame constituye el principal afluente del Río Grande y está formado por la confluencia de los ríos Páma y Cogotí, los que confluyen en el embalse Cogotí, y drena en el embalse Paloma. Otro afluente importante del río Huatulame es la Quebrada de Cárcamo. El río Páma, a su vez, recibe el aporte del río Combarbalá, el cual se forma de la unión de los ríos Rabón y Nacimiento y drena la parte Sudeste de la cuenca. El Río Grande, recibe además las aguas de los ríos Turbio, Tascadero, Torca, Mostazal y Rapel,

La sub-cuenca Río Hurtado abarca el sector noreste de la cuenca del Río Limarí, nace en la Cordillera de los Andes y termina aguas arriba del Embalse Recoleta, sin alcanzar el mar.

Aguas abajo de los embalses Paloma y Recoleta, el principal afluente del Río Limarí es el Río Punitaqui, el cual drena gran parte de la hoya, desarrollándose de Sur a Norte, recibiendo en el camino el aporte de un número importante de quebradas.

Otros afluentes importantes del Río Limarí son la Quebrada del Ingenio y el Estero La Placa, que drenan la parte Noreste de la hoya.

2.3 CLIMA

La cuenca del río Limarí, presenta tres tipos climáticos, el Semiárido con nublados abundantes, Semiárido templado con lluvias invernales y Semiárido Frío con lluvias invernales.

a) Clima Semiárido con nublados abundantes: se presenta a lo largo de toda la costa. Su influencia llega hasta el interior hasta 40km, por medio de los valles transversales y quebradas. Su mayor característica es la abundante nubosidad; humedad, temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8 a 9 meses.

b) Clima Semiárido templado con lluvias invernales: este clima se sitúa en el valle del río Limarí, caracterizándose por ser un clima seco en el cual la evaporación es superior a la precipitación y donde no hay excedentes hídricos. Sus temperaturas medias anuales son inferiores a 18°C.

c) Clima Semiárido Frío con lluvias invernales: este clima se localiza en la Cordillera de Los Andes sobre los 3.000 metros de altitud con características de altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival.

En general, esta cuenca se encuentra bajo la influencia de un bio-clima con escasez de precipitaciones y durante nueve meses del año presenta déficit hídrico.

2.4 HIDROGEOLOGÍA

En la parte alta destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas plutónicas e hipabisales del Paleozoico Plutónico, de muy baja permeabilidad hidráulica. En la sección media, predominan las rocas vulcano – sedimentarias del cretácico – Terciario con algunas intrusiones de Terciarias plutónicas de muy baja permeabilidad. Las características de impermeabilidad de las rocas originan que el acuífero escurra paralelo a los cursos de agua.

Destacan claramente tres escurrimientos: uno en dirección suroeste que escurre paralelo al río Hurtado con profundidades freáticas que van de los 2 a los 3,6 m, hasta las cercanías de la localidad de Ovalle.

En dirección noroeste (por un lecho de rocas sedimentario – volcánicas del Cretácico Terciario mixto y Plutónicas del Terciario) escurre un acuífero paralelo al río Grande hasta la confluencia con el río Hurtado en Ovalle. Destacan los bajos niveles freáticos de los acuíferos que van desde lo 17 a lo 4,5 m.

En dirección SN escurre el último acuífero paralelo al río Combarbalá hasta el Embalse La Paloma por un lecho de rocas impermeable constituido de rocas sedimento – volcánicas con profundidades freáticas de 3 a 1,5.

Desde la confluencia del Limarí con el Hurtado a la altura de Ovalle hasta la desembocadura el acuífero escurre en dirección suroeste por un lecho de depósitos no consolidados y rellenos hasta el sector de Barraza, lugar donde atraviesa un lecho de rocas plutónicas del Jurásico hasta la desembocadura al mar con profundidades que van desde los 3,1 a 1,21 m.

2.5 GEOMORFOLOGÍA

El Valle transversal del Limarí se localiza al centro de la región de Coquimbo. La longitud del Río Limarí, desde Peñones al mar, es de 64 km, de los cuales los primeros 43 transcurren en una caja amplia de 2 o más kilómetros de ancho donde desarrolla numerosos meandros, flanqueado por extensas planicies fluviales. Hacia la Cordillera de los Andes se va encajonando, presentando laderas con pendientes muy abruptas como producto del trabajo erosivo de la acción glaciar y del agua.

Al igual que la cuenca del río Elqui, esta cuenca también se encuentra dentro de la segunda agrupación regional de las Planicies Litorales y Cuencas del Sistema Montañoso Andino-costero, presentando características geomorfológicas similares a ésta.

De esta forma, dentro de la unidad de Las Sierras Transversales del Tronco Maestro Andino, se encuentran los afluentes de este valle que son el río Hurtado por el nororiente. Este río se encuentra regulado por el Embalse Recoleta en su curso medio y a pocos kilómetros de la unión de éste con el río Grande para formar el río Limarí, en las cercanías de la ciudad de Ovalle.

El segundo río es el río Grande que recibe la afluencia de numerosos cauces menores; es así como el río Mostazal, prolongación oriental de éste, orienta su cauce en eje Este - Oeste, es el primer valle que se puede llamar con propiedad como transversal, ya que mantiene tal disposición geométrica desde sus nacientes hasta la salida al mar, recibiendo en su curso interior el nombre de Limarí. Al norte del río Mostazal se desplaza en el mismo eje, la cordillera Doña Rosa con alturas superiores a lo 4.000 m.

Más al sur los pequeños afluentes que bajan de la cordillera troncal hacia el río Grande orientan cordones de alturas en el sentido Este - Oeste; tal es el caso de los cerros de Las Vegas Negras, divisoria entre los río Colorado y Tulahuencillo.

El afluente meridional del río Grande es el río Cogotí, en donde el macizo cordillerano se restringe a su menor ancho, donde desaparecen los cordones transversales altos bien constituidos que se presentaban en la región al interior de Ovalle.

2.6 ÁREA DE ESTUDIO

Por recomendación de la Dirección de Obras Hidráulica (de ahora en adelante será denominada por sus siglas D.O.H.), la zona de estudio comprenderá solamente las cuencas afluentes al embalse Paloma provenientes del Río Grande, esto quiere decir, que la zona de estudio estará limitada a la sub-cuenca del río Grande Alto y la sub-cuenca del río Grande Medio. En la Figura N° 2.2 se muestra el área de estudio adoptada y las dos principales sub-cuencas afluentes al embalse La Paloma.

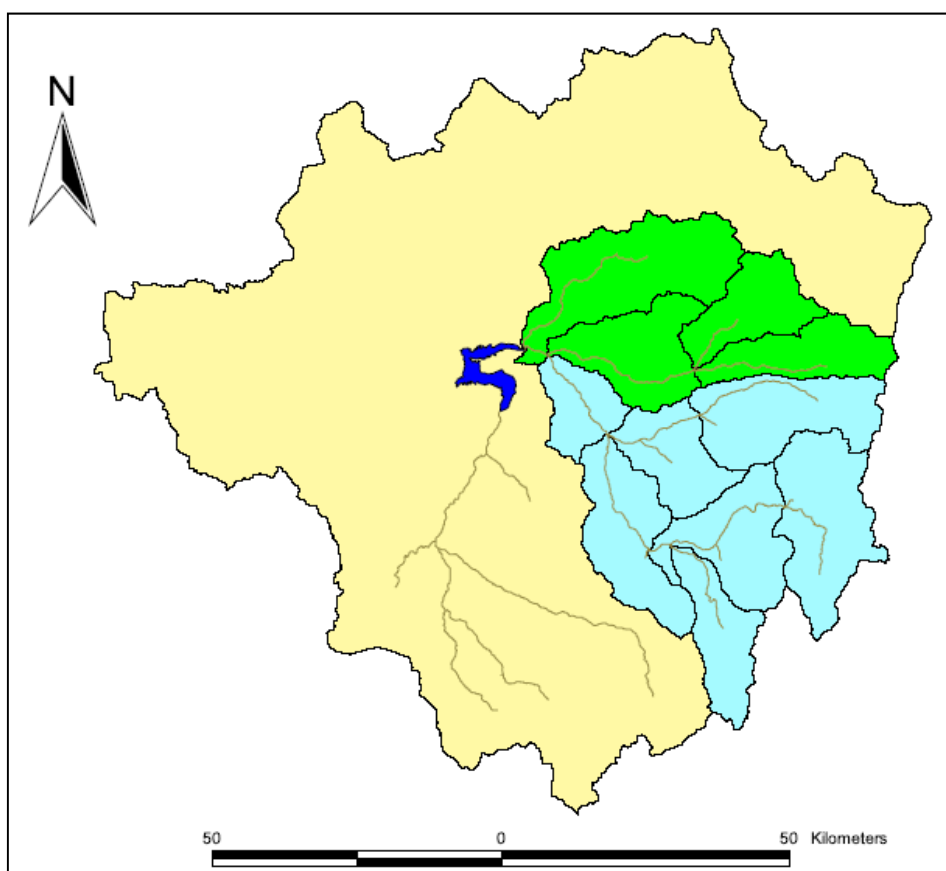


Figura N° 2.2: Principales Sub-cuencas del río Grande; color verde Sub-cuenca río Grande medio; color celeste Sub-cuenca río Grande Alto. Elaboración propia.

2.6.1 Red Fluviométrica

Los cauces considerados en el presente estudio son los siguientes:

2.6.1.1 Río Grande

El río Grande, nace en la alta cordillera andina. Su longitud aproximada es de 115 Km. hasta su confluencia con el río Hurtado. Su orientación general es hacia el nor-oeste. En la confluencia del río Huatulame con el río Grande, está emplazado el embalse Paloma.

Los principales cauces tributarios del río Grande son: en su curso superior cercano a la frontera con Argentina, desembocan los ríos Carachas, Torca, Tascadero y Turbio, además de otros afluentes como los ríos Patillos, Colorado, río del Gordito y la Quebrada El Toro. Más abajo afluyen los ríos Mostazal, Rapel, Ponio y el río Huatulame. En la zona aguas abajo del embalse Paloma, el río Grande tiene como afluente principal la Quebrada Seca, que prácticamente trae caudales sólo en las épocas de lluvia.

2.6.1.2 Río Mostazal

El río Mostazal nace en la alta cordillera andina, en las cercanías del paso fronterizo El Portillo. Escurre con una orientación general sur-oeste hasta confluir con el río Grande frente a la localidad de Carén.

En su desarrollo, de aproximadamente 50 Km., va recibiendo aportes de numerosas quebradas de fuerte pendiente y corto desarrollo. Por la ribera derecha descargan las quebradas Mollaquita, El Maitén, Rapelcillo, Agua Amarilla y Colliguay. Por la ribera izquierda, desembocan las quebradas Panguecillo, Sasso,

El Maquí, Pampa Grande y Los Palquis. Los ríos San Miguel y Tulahuencito, que afluyen por la ribera izquierda son los tributarios más importantes, tanto por su extensión, como por los caudales aportantes.

2.6.1.3 Río Rapel

El río Rapel recibe la afluencia, por la ribera derecha, de las quebradas Del Buitre, Cabrería, El Rincón, El Bato, El Maquí y el río Tomes. La quebrada Ñipas es la única quebrada significativa que cae por la ribera izquierda. En el río Los Molles se encuentra emplazada la Central Hidroeléctrica de Los Molles, la que tiene una capacidad de generación de 20.000 Kw.

2.6.2 Estaciones Fluviométricas.

Para los objetivos de este estudio se recopiló la estadística histórica de las estaciones fluviométricas de la cuenca aportante al embalse Paloma, tal información fue proporcionada por BNA de la Dirección General de Aguas.

En la Tabla N° 2.1, se presenta la nómina de estaciones fluviométricas utilizadas en el presente estudio, con su correspondiente código asignado por la D.G.A.

De los registros fluviométricos se puede decir que los principales ríos de la zona en su parte alta, tienen un régimen fluviométrico marcadamente nival y con gran variación interanual de caudales. Es así como en las estaciones fluviométricas de cabecera de los ríos se observa el aumento de sus caudales entre los meses de Octubre y Febrero, correspondiendo precisamente al período de deshielo, para años lluviosos; mientras que en períodos de marcadas sequías, los caudales llegan a niveles mínimos, o simplemente desaparecen.

Tabla Nº 2.1: Listado de estaciones fluviométricas de la zona de estudio.

Núm.	Código BNA	Estación
1	04513001-0	Rio Grande en Cuyano
2	04511002-8	Rio Grande en las Ramadas
3	04523002-3	Rio Grande en Puntilla San Juan
4	04520001-9	Rio los Molles en Ojos de Agua
5	04515002-K	Rio Mostazal en Carén
6	04514001-6	Rio Mostazal en Cuestecita
7	04522002-8	Rio Rapel en Junta
8	04512001-5	Rio Tascadero en Desembocadura

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

Para el análisis hidrológico se han considerado dos grupos de estaciones fluviométricas, ya que se aprecian dos regímenes de importancia dentro del área de estudio. El primer grupo es el de régimen nival y el segundo es de régimen nivo – pluvial:

- Grupo1, Régimen Nival: Este grupo está compuesto por la mayoría de las estaciones fluviométricas de esta cuenca. Estas estaciones se ubican en los principales afluentes y sub-afluentes de río Limarí. Contiene las estaciones fluviométricas ubicadas en los ríos Los Molles, Mostazal, Grande, Tascadero.
- Grupo2, Régimen Nivo – Pluvial: Este grupo está formado por las estaciones fluviométricas ubicadas en la parte baja de los ríos Grande y Limarí. Estas estaciones muestran influencia nival y pluvial, aunque los aportes navales son más importantes.

Existe un tercer y cuarto grupo denominados de regímenes Mixto y Pluvial los cuales se ubican aguas abajo del embalse Paloma en la parte cercana a la costa del río Limarí. Sin embargo por no estar contenido dentro del área de estudio en esta oportunidad solo será mencionado. En la Tabla N° 2.2 se exhibe un resumen del régimen de los ríos presentes en el estudio.

Tabla N° 2.2: Régimen del Grupo de estaciones fluviométricas.

<i>Estación</i>	<i>Régimen</i>
<i>Rio Grande en Cuyano</i>	Nival
<i>Rio Grande en las Ramadas</i>	Nival
<i>Rio los Molles en Ojos de Agua</i>	Nival
<i>Rio Mostazal en Carén</i>	Nival
<i>Rio Mostazal en Cuestecita</i>	Nival
<i>Rio Rapel en Junta</i>	Nival
<i>Rio Tascadero en Desembocadura</i>	Nival
<i>Rio Grande en Puntilla San Juan</i>	Nivo-Pluvial

Fuente: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad; Cuenca del Limarí (2004).

En general todos los ríos de la zona tienen una gran variabilidad interanual en sus caudales, existiendo marcados períodos secos de varios años de duración.

2.6.3 Estaciones Pluviométricas.

Aparte de recopilar estadísticas fluviométricas de los distintos afluentes al embalse Paloma, se ha recuperado información pluviométrica de la cuenca en estudio, información facilitada por la Dirección General de Aguas. Con ésta información se pueden definir los períodos en los cuales se producen las mayores precipitaciones en la cuenca aportante al embalse, analizando el volumen de escorrentía que genera.

En la Tabla 2.3, se presenta la nómina de estaciones pluviométricas que existen en la cuenca:

Tabla Nº 2.3: Listado de estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

<i>Núm.</i>	<i>Estaciones</i>	<i>Código BNA</i>
1	Carén	04513004-5
2	El Tome	04537003-8
3	Las Ramadas	04511003-6
4	Pabellón	04501003-1
5	Paloma Embalse	04540006-9
6	Pichasca	04503003-2
7	Rapel	04522003-6
8	Tascadero	04512002-3
9	Tulahen	04513003-7

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

Todas estas estaciones se encuentran en funcionamiento y corresponden a la base de datos que maneja en la actualidad la Dirección General de Aguas.

2.6.4 Estaciones que miden Evapotranspiración.

Dentro de la zona de estudio solo se registran 4 estaciones que miden la evapotranspiración de las sub-cuencas, estas estaciones y sus años de registros se pueden observar en la Tabla Nº 2.4.

Tabla Nº 2.4: Estaciones con registro de evapotranspiración y años de registro.

<i>Núm.</i>	<i>Estaciones</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Año de registro de datos</i>
1	Carén	740	Jun1967/Mar2008
2	Cogotí Embalse	740	Jan1965/Mar2008
3	Las Ramadas	1380	Nov1969/Mar2008
4	Paloma Embalse	320	May1964/Mar2008

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

2.6.5 Estaciones que miden Temperatura.

Las estaciones que poseen registros de temperatura son las mismas aparecidas en la Tabla Nº 2.4 y los años de registros son también los correspondientes a la misma tabla.

2.7 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE RIEGO

En esencia, para describir la estructura de riego en la cuenca en estudio, y en general, de la cuenca completa del río Limarí, se debe estudiar a lo que se conoce como Sistema Paloma.

2.7.1 El sistema Paloma

El Sistema Paloma corresponde al conjunto de obras de regadío ubicado en la Hoya Hidrográfica del Río Limarí, cerca de la ciudad de Ovalle, en la provincia del Limarí, en la región de Coquimbo. Está formado principalmente por los embalses Recoleta, Paloma y Cogotí, los cuales en su conjunto poseen una capacidad útil de 1000 millones de m³.

El Sistema Paloma ha permitido la regulación de los recursos hídricos disponibles en toda la provincia del Limarí, teniendo como principal pilar, el aporte realizado por el embalse Paloma. Con la infraestructura de riego existente, se busca otorgar una mayor seguridad de riego a una superficie estimada en más de 50.000 Ha, regando en forma directa más de 44.000 Ha e indirectamente 7.500 Há., es decir zonas bajo y sobre los embalses.

En la década del 30' fueron construidos los embalses Recoleta, sobre el río Hurtado, y el embalse Cogotí en la confluencia de los ríos Páma y Cogotí, el cual se ubica aguas arriba del embalse Paloma. La puesta en servicio del embalse Paloma en 1968, aportó un volumen de 750 millones de m³, aparte de los 100 y 150 millones de m³ que podían almacenar los embalses Recoleta y Cogotí, respectivamente, lo que permitió regular y almacenar un máximo de 1.000 millones de m³ en los tres embalses, esto es, para todo el Sistema Paloma. Ésta gran capacidad de regulación interanual, es la que permite efectuar una redistribución de aguas en toda la hoya. Además, todas las operaciones de distribución se ven facilitadas por la existencia de una vasta red de canales. Los terrenos situados aguas abajo del embalse La Paloma, pueden regarse con los sobrantes de los años de abundancia acumulados en él.

Toda esta completa infraestructura, permitió otorgar seguridad de riego a las áreas beneficiadas bajo embalse y aquellas sobre embalse, al quedar estas últimas liberadas de tributar los recursos destinados a las áreas aguas abajo.

El sistema opera de acuerdo a las disponibilidades de agua de cada embalse, de forma que se obtenga una seguridad de riego uniforme y un máximo aprovechamiento de los recursos disponibles.

El sistema de riego Paloma actualmente está constituido por:

- El embalse Paloma y su red de canales
- El embalse Recoleta y su red de canales
- El embalse Cogotí y su red de canales
- El río Grande y su red de canales
- El río Huatulame y su red de canales
- El río Cogotí y su red de canales
- El río Hurtado y su red de canales

- El río Limarí y su red de canales

Por contraste quedan excluidos del sistema, por no tener beneficios directos ni indirectos, los siguientes ríos y con sus respectivos afluentes:

- El río Mostazal
- El río Rapel
- El río Ponio
- El río Combarbalá
- El río Páma
- El estero Punitaqui
- La Quebrada del Ingenio

A continuación, se indican las organizaciones de agricultores usuarios que se han constituido en la Junta de Vigilancia del Sistema Paloma:

- Asociación de Canalistas del embalse Cogotí.
- Asociación de Canalistas del embalse Recoleta
- Junta de Vigilancia del Río Grande y Limarí y sus afluentes.
- Asociación de Canalistas del Canal Camarico
- Asociación de Canalistas del Canal Derivado Punitaqui
- Junta de Vigilancia del Río Hurtado
- Junta de Vigilancia del Río Cogotí
- Asociación de Canalistas del Canal Maurat-Semita
- Junta de Vigilancia del Río Huatulame

Como ya se ha indicado, el Sistema Paloma se sostiene principalmente por los aportes de los embalses Paloma, Recoleta y Cogotí. A continuación, se describen brevemente los embalses Recoleta, Cogotí y Paloma.

2.7.2 Embalse Recoleta.

El embalse Recoleta se ubica a 25 Km. al noreste de la ciudad de Ovalle, emplazado sobre el río Hurtado, a 14 Km. aguas arriba de la confluencia con el río Grande. Su entrada en servicio es a partir del año 1935, posee una superficie correspondiente a la cuenca hidrográfica aportante de 2.210 Km², y la superficie inundada alcanza a 555 Ha. El embalse Recoleta posee una capacidad útil de 100 millones de m³.

La obra consiste en un muro de tierra homogéneo, con un núcleo de hormigón armado y enrocado de protección. El talud de aguas arriba tiene una relación de 3:1 (h: v) y el de aguas abajo 2:1 (h: v). La longitud del muro es de 815 m y su altura máxima 46,5 m. El evacuador de crecidas es lateral de tipo caída libre y tiene una capacidad de descarga de 3.000 m³/s.

En el sector izquierdo del embalse se ubica la obra de toma del Canal Villaseca, que consiste en un túnel bypass de 35 m de longitud. El agua alumbrada y cae a una cámara disipadora de energía para continuar por el cauce. En el sector derecho se ubica la obra de toma del Canal Matriz Recoleta, que consiste en una torre de toma alimentada desde un túnel. El agua escurre por una tubería subterránea hasta alumbrar en un vertedero de pared gruesa, donde se mide el agua.

La propiedad del embalse pertenece a los usuarios y es administrada por la Asociación de Canalistas del Embalse Recoleta. La Figura N° 2.3 se observa una vista aérea del embalse Recoleta.



Figura Nº 2.3: Vista Aérea Embalse Recoleta. Archivo fotográfico embalse La Paloma.

2.7.3 Embalse Cogotí.

El embalse Cogotí es una obra construida durante la década de los 30. Su entrada en operación se produjo el año 1938 y está emplazado en la confluencia de los ríos Cogotí y Páma, a 43 Km. aguas arriba del embalse Paloma y a 19 Km. al norte de la ciudad de Combarbalá.

La hoya hidrográfica afluente al embalse Cogotí tiene una superficie de 1.450 Km². La superficie inundada alcanza a 850 Ha Tiene una capacidad útil de 150 millones de m³.

La obra propiamente tal, consiste en un muro rock-fill, con cortina de hormigón en el talud de aguas arriba. La longitud del muro es de 160 m y su altura máxima es de 87,7 m. El talud de aguas arriba tiene una relación 1,25:1 (h: v) y el de aguas abajo 1,5:1 (h: v). El evacuador de crecidas es de tipo caída libre y tiene una capacidad de descarga de 5.000 m³/s.

Además, para incrementar la capacidad de almacenamiento del embalse Cogotí, en el año 2003 se implementó un sistema de cortina inflable o también

llamado “Rubber Dum”, el cual permitió aumentar la capacidad del embalse hasta los 158 millones de m³.

La propiedad de la obra pertenece a los usuarios y es administrada por la Asociación de Canalistas del Embalse Cogotí. Los canales que distribuyen los recursos del embalse Cogotí son: Matriz Cogotí, Derivado Palqui Cauchil, Derivado Tabalí, Derivado Cerro Grande y Derivado Punitaqui.

Las obras de entrega del embalse Cogotí tienen salida hacia el río Huatulame. Los recursos destinados al canal Cogotí son captados por éste en la ribera izquierda, a unos 15 Km. aguas abajo del Embalse. En la Figura N° 2.4 se observa una vista aérea del embalse Cogotí.



Figura N° 2.4: Vista Aérea Embalse Cogotí. Archivo fotográfico embalse La Paloma.

2.7.4 Embalse La Paloma

En éste punto nos detendremos en la estructura de riego principal de la provincia de Limarí, y la cual es uno de los puntos fundamentales de nuestra investigación, la cual corresponde al embalse Paloma.

El embalse Paloma se ubica en la confluencia de los ríos Grande y Huatulame, a 23 Km. al este de la ciudad de Ovalle. Se ubica en las coordenadas UTM: Norte 6.602.280 y Este 305.020, a una altura de 380 m.s.n.m. Este embalse comienza a prestar servicios el año 1969.

Gracias a su emplazamiento, el embalse tiene una hoya hidrográfica tributaria de 6.253 Km². Su superficie inundada es del orden de las 3.000 Ha y permiten al embalse tener una capacidad útil de 750 millones de m³.

2.7.4.1 Estructura del muro del embalse La Paloma.

La obra propiamente tal, consiste en una presa de tierra clasificada, con núcleo impermeable de arcilla, relleno permeable y talud aguas arriba de enrocado. La longitud del muro es de 1000 m. y tiene una altura máxima aproximada de 82 m. El talud de aguas arriba es de 3:1 (h: v) y el agua abajo 2,5:1 (h: v). Este muro esta formado por un volumen de material total alrededor de los 8 millones de m³, el cual fue extraídos de ubicados en las localidades de Huana y Huanilla, que se localizan a 4 Km. aguas arriba del muro.

El material extraído de estos empréstitos, correspondía a una arcilla limosa inorgánica de mucha plasticidad, la que fue utilizada en la fundación y núcleo de la presa. Además, se extrajo este material del empréstito de Tamecura, que se encuentra 1 Km. aguas abajo del muro, el cual contiene una arcilla arenosa de baja plasticidad.

Para conformar el relleno permeable, se ocupó una grava arenosa, obtenida de la caja del Río Grande. En el caso de la coraza protectora exterior, se sacó material obtenido de la excavación del vertedero y de las obras de desviación y entrega del embalse. Este material era una granodiorita con buena resistencia.

2.7.4.2 Estructura del vertedero del embalse La Paloma.

La estructura para la evacuación de agua consta de una longitud de 100 metros, considerados en la longitud total de la presa; consiste en un vertedero de hormigón, construido en roca, compuesto de 8 compuertas frontales de 12,5 x 6 metros.

El vertedero se encuentra ubicado en el extremo izquierdo del muro, 50 m aguas abajo del eje de éste. Consistía en un tranque de concreto de 10,5 de altura fundado en la roca de la ladera del cerro. La cota del umbral es de 400,5 m.s.n.m. A este umbral llega el agua por un canal de acceso de 390 m de longitud hasta la cresta del vertedero, donde se encuentran 8 compuertas de sector de 6 m de altura y 12,5 m de luz cada una, permitiendo evacuar un gasto de 6500 m³/s, el cual puede aumentar hasta 7320 m³/s con el lago a cota 413,5 m.s.n.m, es decir, usando la revancha.

El vertedero fue cortado en la roca granodiorita, material que fue ocupado posteriormente en la coraza protectora del muro. El diseño de todas las obras del vertedero fue hecho sobre la base de experimentos con modelos a escala realizados en la Universidad de Chile. Al lado izquierdo de la entrada del túnel de desviación, el cual entrega un caudal de hasta 12 m³/s al río, hay un túnel de entrega de hormigón armado, de 2 m de diámetro, que abastece normalmente de 8 m³/s al canal matriz Paloma y 3,5 m³/s al canal Camarico, caudales que son regulados mediante válvulas de dispersión de 1 m de diámetro. Existe además, una torre de admisión de hormigón armado, con entrada vertical, ubicado en el extremo de aguas arriba del túnel de entrega ya descrito.

2.7.4.3 Obras anexas al embalse La Paloma.

El conjunto de obras de infraestructura que permite asegurar el riego de la amplia zona que queda bajo cota del Embalse Paloma, está constituido por el Canal Matriz Paloma; Derivado Recoleta; Derivado Cogotí; Derivado Punitaqui y Sub-derivados El Toro y La Higuera.

Cabe señalar que las aguas embalsadas en Paloma, a través del Canal Camarico y Tabalí permiten regar prácticamente la totalidad de las zonas de terrazas o llanos sur del río Limarí. En la Figura N° 2.5 se observa una vista aérea del embalse Paloma.

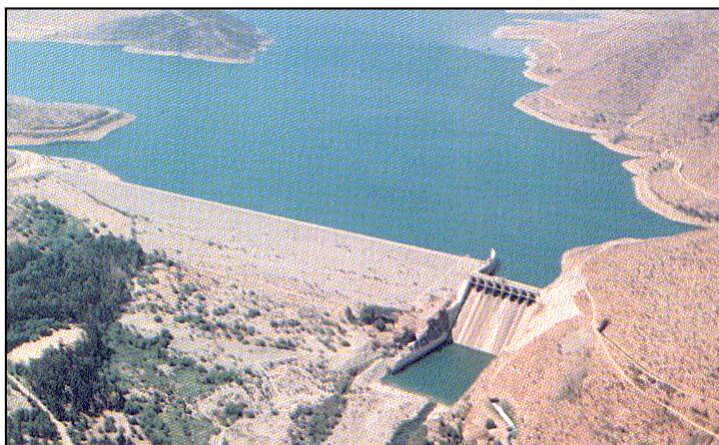


Figura N° 2.5: Vista Aérea Embalse La Paloma. Archivo fotográfico embalse La Paloma.

A continuación se presenta la Tabla N° 2.5 en donde se mencionan las características técnicas que posee el embalse La Paloma.

Tabla Nº 2.5: Características Técnicas del Embalse Paloma. Parte I.

<i>Situación</i>	Cuenca Hidrográfica	Río Limarí
	Ubicación	a 22 km. de Ovalle
	Comuna	Monte Patria
	Provincia	Limarí
	Región	Cuarta
	Ríos Afluentes	Río Grande y Huatulame
<i>Características</i>	Regulación	Multianual
	Superficie Cuenca	6.253 Km ²
	Superficie embalse	3.000 Ha
	Capacidad Embalse	750.000.000 m ³
	Caudal Medio Anual	9,89 m ³ /s
	Cota Máxima Aguas	411,4 m.s.n.m
<i>Presa</i>	Tipo	De tierra, con núcleo impermeable de arcilla, relleno permeable y enrocado
	Cota coronamiento	415,5 m.s.n.m
	Longitud coronamiento	1.000 m
	Altura muro	82 m
	Ancho coronamiento	10 m
	Ancho basal	500 m
	Talud aguas arriba	3,0/1
	Talud aguas abajo	2,5/1
	Volumen del muro	7.500.000 m ³
	Volumen del núcleo	1.500.000 m ³
	Revancha sobre aguas máximas normales	4,0 m
<i>Vertedero</i>	Alturas útil de aguas con respecto túnel bypass	72 m
	Ubicación	Lado izquierdo
	Tipo	Frontal de parábola con compuerta
	Longitud	100 m
	Capacidad de diseño	6.500 m ³ /s
	Capacidad Máx. Riego	4.000 m ³ /s
	Nº de compuertas	8 de sector
	Altura de compuertas	6,5 m

Tabla Nº 2.5: Características Técnicas del Embalse Paloma. Parte II.

<i>Rápido de Descarga</i>	Tipo	Recto con colchón dissipador
	Longitud	75 m
	Ancho	107 m
	Pendiente	80 °
<i>Obra de Toma (Torre de Toma)</i>	Altura	11 m
	Longitud del túnel conductor	650 m
	Material	hormigón armado
	Presión admisible	60 Ton/m ²
<i>Túnel de desvío y entrega</i>	Longitud	300 m
	Sección	70 m ²
	Gasto	18 m ³ /s
	Válvulas (bypass)	2 de espejo y 2 de chorro hueco (Howell Bunker) de 700 mm de diámetro
	Válvulas de entrega	2 de mariposa y 2 de chorro hueco (Howell Bunker) de 1000 mm de diámetro actualmente en uso
	Válvulas de entrega Canal Camarico	1 de espejo y 1 de chorro hueco (Howell Bunker) de 700 mm de diámetro, para un gasto de 8 m ³ /s

Fuente: Brown y Ferrer, 1976, Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Paloma

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se hace referencia a la estadística hidrológica que ha sido necesaria obtener para el desarrollo del presente estudio. Para ello, se indica la información pluviométrica, fluviométrica, de evapotranspiración y temperatura recopilada y existente de los últimos 40 años (1968-2008), además dentro del capítulo se intenta explicar los métodos utilizados para el relleno y ampliación de éstas estadísticas. Una vez que las estaciones han sido rellenadas, se procede a entregar el resultado del análisis de homogeneidad y consistencia, realizado para verificar la calidad de la información utilizada en ésta memoria.

Los registros utilizados corresponden a la base de datos que actualmente posee la Dirección General de Aguas. Además, se han incluido y tomado como referencia otros estudios hidrológicos realizados con anterioridad en la zona, encontrándose en algunos casos, diferencias mínimas entre los registros de datos generados por cada estudio, los cuales son recopilados y mencionados en el texto de acuerdo a cada caso.

El objetivo final de éste análisis de datos hidrológicos, es crear una base de datos confiable de modo de obtener los parámetros hidrológicos propios de la cuenca, que sean necesarios para determinar los caudales afluentes al embalse Paloma. Esta información, será la que se utilizara como datos de entrada (datos pluviométricos, fluviométricos, temperatura y evapotranspiración) para modelar la cuenca del Limarí y obtener de este modo la escorrentía resultante afluente al embalse Paloma, a través del programa HEC-HMS.

3.2 PERÍODO ESTADÍSTICO CONSIDERADO PARA EL ESTUDIO.

En general, los registros estadísticos anteriores a 1960 merecen poca confianza en su exactitud y corresponden a estaciones aisladas que no permiten formarse un concepto general de los recursos de agua de las distintas partes de la hoya hidrográfica. Por este motivo se ha tomado como punto de partida para el período estadístico el mes de abril de 1968, ya que desde esa fecha existen datos suficientes en el resto de la hoya para hacer posible un estudio general de la cuenca. El período de estudio se extenderá hasta el mes de marzo inclusive de 2008, con lo cual se forma un lapso de 40 años.

Este lapso de 40 años está perfectamente justificado ya que se trata de estudiar un embalse de una capacidad suficiente para almacenar el agua de los años lluviosos para ser usada en los años secos siguientes. En estas condiciones la existencia de años aislados extraordinariamente secos no significa un gran problema para el buen funcionamiento del embalse y son las condiciones medias del escurrimiento a lo largo de varios años, las que entregarán una mejor idea de la forma en que funciona el embalse Paloma.

3.3 ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

3.3.1 Generalidades

Como criterio de selección de las estaciones pluviométricas se optó por utilizar las más relevantes de la cuenca, es decir, estaciones para las cuales la D.G.A. tiene información lo suficientemente extensa y reciente para los fines de este estudio. Además, se consideró la disposición geográfica de cada estación, para así abarcar la mayor extensión territorial de la cuenca aportante al embalse.

De acuerdo a estos criterios, se escogieron 9 estaciones de medición, que cumplen con las condiciones antes mencionadas. La estadística base observada de cada estación, se indica en el Anexo 1.

En la Tabla N° 3.1, se presenta la nómina de estaciones pluviométricas consideradas en la zona de estudio, se indican además las coordenadas y la altura en que se encuentra posicionada cada estación.

Tabla N° 3.1: Listado de estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

Núm.	Estaciones	Código D.G.A.	Latitud (S)	Longitud (W)	U.T.M. Norte (m)	U.T.M. Este (m)	Altura (m)
1	Carén	04513004-5	30 51 17	70 46 15	6585105	330669	740
2	El Tome	04537003-8	30 49 04	70 58 14	6588881	311496	420
3	Las Ramadas	04511003-6	31 01 05	70 35 09	6567266	348619	1380
4	Pabellón	04501003-1	30 24 40	70 33 16	6634584	350683	1920
5	Paloma Embalse	04540006-9	30 41 45	71 02 10	6602287	304978	320
6	Pichasca	04503003-2	30 23 32	70 52 04	6636222	320546	725
7	Rapel	04522003-6	30 43 16	70 46 31	6599909	330009	870
8	Tascadero	04512002-3	31 00 55	70 39 59	6567461	340924	1230
9	Tulahen	04513003-7	30 58 01	70 45 50	6572676	331530	1020

Fuente: Dirección General de Aguas (D.G.A.).

Los registros de precipitaciones de las estaciones mencionadas en la Tabla N° 3.1, no se encuentran completos en su totalidad. Por el contrario, existen ocasiones en que la falta de datos va desde un par días a unos cuantos meses, en otras ocasiones el dato faltante se encuentra inmerso dentro de varios años de registros completos.

La pérdida de datos en algunos períodos, puede deberse a muchas razones, entre ellas a la inclusión de datos de precipitación erróneos, los cuales fueron eliminados con posterioridad, o a una mala lectura del operador y/o a una salida de operación de la estación por alguna condición climática. Debido a la ausencia de algunos datos, se debió recurrir a procedimientos de relleno,

extensión y corrección de las estadísticas de cada estación, así se logró obtener un registro completo y revisado de las estadísticas pluviométricas entre los años 1968-2008, que será el período utilizado en el presente estudio.

A continuación en la Figura N° 3.1 indica la disposición geográfica de las estaciones pluviométricas dentro de la zona de estudio.

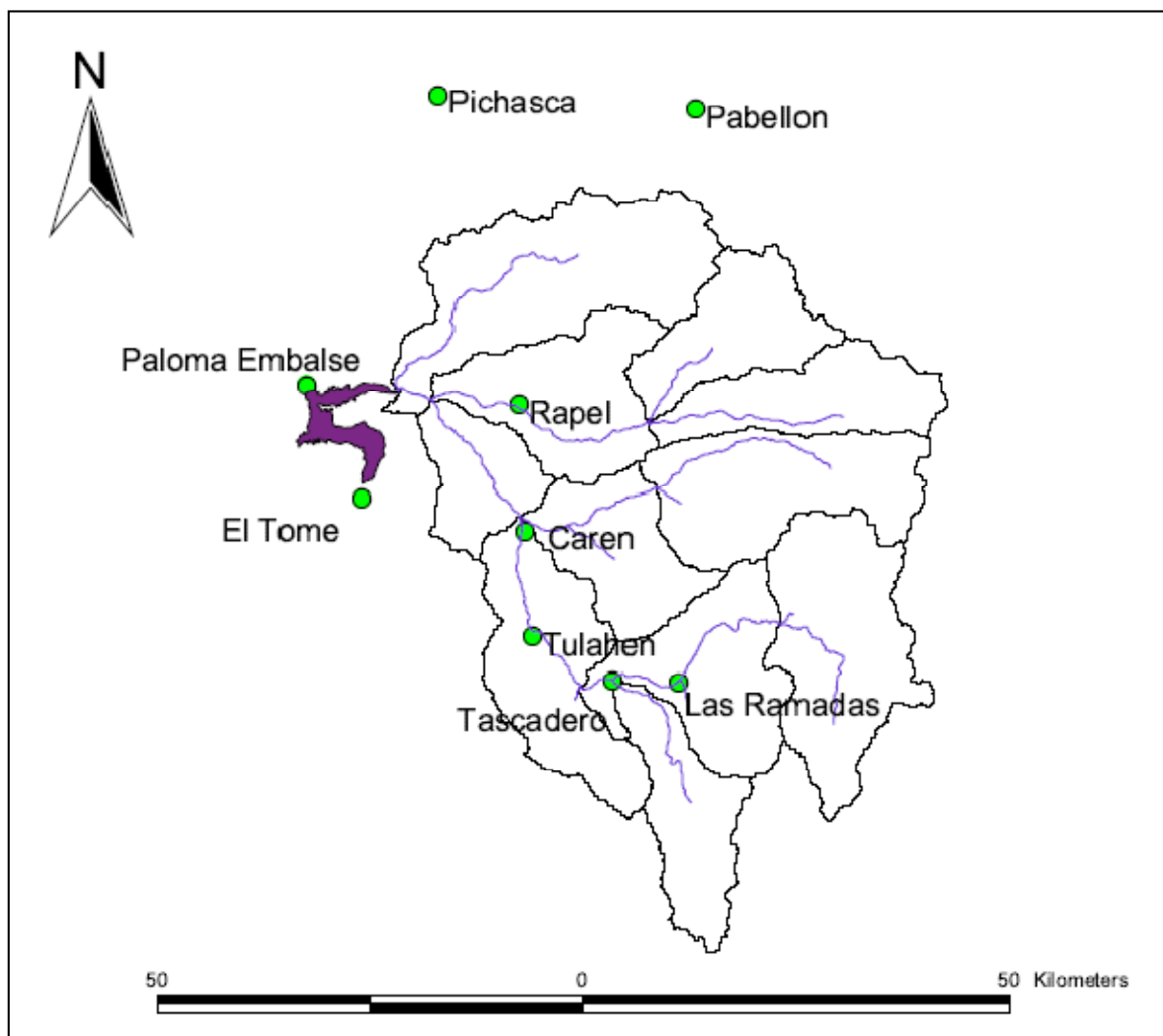


Figura N° 3.1: Estaciones Pluviométricas presentes en la zona de estudio. Elaboración propia.

3.3.2 Análisis de la estadística pluviométrica: corrección, relleno y extensión de datos

El procedimiento adoptado en una primera parte consistió en reconocer las estaciones que no estaban completas en sus registros y señalar aquellos períodos en donde se producían éstos vacíos de información.

Sabiendo esto, se debió rellenar y/o extender las estadísticas de las estaciones incompletas. Para ello, se determinó utilizar el Método de los Cocientes Normales para rellenar los datos faltantes en las estaciones de la cuenca.

Este método, considera básicamente que cada estación tiene un cierto “peso” a la hora de conformar la estadística de la estación faltante o por llenar. El método toma en consideración la presencia de varias estaciones alrededor de la estación por rellenar, además las estaciones deben tener un período común de registro, que sea suficientemente extenso (20-30 años).

La relación que describe el método está dada por la ecuación 3.1:

$$P_X = \frac{P_{med_X}}{n} \times \left(\frac{P_A}{P_{med_A}} + \frac{P_B}{P_{med_B}} + \frac{P_C}{P_{med_C}} + \dots + \frac{P_n}{P_{med_n}} \right) \quad (3.1)$$

En donde: P_{med_X} , P_{med_A} , P_{med_B} , P_{med_C} ,..., P_{med_n} : Son los valores normales o promedio de las precipitaciones anuales registradas en las estaciones A, B, C, hasta la estación n-ésima y el promedio de precipitación anual de la estación faltante X, durante el período de estudio establecido; P_A , P_B , P_C ,..., P_n : son las precipitaciones mensuales en las estaciones A, B, C hasta la estación n-ésima, durante el período que falta en la estación X y n: corresponde al número de estaciones continuas consideradas en el relleno de la estación X.

A continuación se determinaron tres grupos de estaciones, las que fueron separadas por su ubicación geográfica (las más cercanas entre sí y que se encontraran en una altitud semejante). A partir de cada grupo, se realizó el relleno de las estaciones faltantes. Estos grupos se detallan a continuación.

- Grupo 1: Estaciones Las Ramadas, Tascadero, Carén y Tulahuén.
- Grupo 2: Estaciones Paloma Embalse, El Tome y Rapel.
- Grupo 3: Estaciones Pabellón y Pichasca.

Como información adicional, podemos señalar, que al realizar un análisis de correlación para las estaciones de cada grupo, observamos un valor alto para todos los grupos de estaciones estudiados, por lo que, se establece que los datos utilizados muestran una cierta correspondencia entre sí.

A continuación de la Tabla N° 3.2 a la Tabla N° 3.4 se presentan los resultados de las correlaciones obtenidas en los tres grupos de estaciones pluviométricas, presentes en la zona.

Tabla N° 3.2: Correlaciones obtenidas para el grupo 1.

GRUPO 1	LAS RAMADAS	TASCADERO	CARÉN	TULAHUÉN
<i>Las Ramadas</i>	-	89,35	92,45	90,24
<i>Tascadero</i>	89,35	-	87,43	89,95
<i>Carén</i>	92,45	87,43	-	95,47
<i>Tulahuén</i>	90,24	89,95	95,47	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.3: Correlaciones obtenidas para el grupo 2.

GRUPO 2	PALOMA EMBALSE	EL TOME	RAPEL
<i>Paloma Embalse</i>	-	95,06	91,12
<i>El Tome</i>	95,06	-	92,16
<i>Rapel</i>	91,12	92,16	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.4: Correlaciones obtenidas para el grupo 3.

GRUPO 4	PABELLÓN	PICHASCA
<i>Pabellón</i>	-	83,06
<i>Pichasca</i>	83,06	-

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió al relleno y extensión de las estaciones, mediante el método de los cocientes. Los valores obtenidos con las estaciones rellenas se indican en el Anexo 2.

Una vez realizado el relleno de las estaciones pluviométricas se procedió a conocer el comportamiento de las precipitaciones en la hoya hidrográfica, para ello se calcularon las precipitaciones anuales, las precipitaciones medias anuales y las precipitaciones medias mensuales, de las estaciones mencionadas en la Tabla N° 3.1.

A continuación la Precipitación Media Anual (PMA) calculada para el periodo de registro de 1968-2008 se presenta en la Tabla N° 3.5, en la Tabla N° 3.6 se muestran las Precipitaciones Anuales (PA) observadas y en la Figura N° 3.2 se muestran los gráficos de las Precipitaciones Medias Mensuales (PMM) de cada una de las estaciones Pluviométricas.

Tabla N° 3.5: Precipitación Media Anual (PMA).

	ESTACIONES								
	Carén	El Tome	Las Ramadas	Pabellón	Pa loma embalse	Pichasca	Rapel	Tascadero	Tulahén
PMA	183.0	154.3	293.5	143.3	126.9	119.7	169.4	259.6	215.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nº 3.6: Precipitaciones anuales. Parte I.

Año	Carén	El Tome	Las Ramadas	Pabellón	Paloma Embalse	Pichasca	Rapel	Tascadero	Tulahen
1968/1969	52.5	43.1	68.0	24.0	45.9	38.0	51.0	60.0	58.5
1969/1970	32.3	30.5	30.9	35.5	23.6	26.0	69.3	36.4	46.0
1970/1971	69.5	51.4	137.9	82.0	42.5	34.0	38.5	112.9	78.6
1971/1972	94.5	107.0	123.0	49.5	83.8	79.0	103.0	115.5	115.5
1972/1973	338.0	322.0	618.6	303.6	291.3	243.5	340.0	477.2	381.0
1973/1974	105.2	74.0	134.0	57.5	81.0	68.0	103.6	137.3	145.7
1974/1975	94.0	70.6	133.9	57.0	67.3	56.0	83.5	116.5	92.2
1975/1976	137.0	100.5	164.5	90.0	85.2	100.5	154.0	163.0	165.0
1976/1977	145.5	129.0	141.5	90.0	123.8	88.0	128.5	161.5	117.0
1977/1978	195.5	184.5	313.5	156.0	157.8	133.6	162.0	268.5	259.0
1978/1979	333.0	214.0	428.9	238.0	135.0	109.2	178.5	363.5	404.8
1979/1980	24.5	14.0	118.5	39.0	13.0	19.5	37.5	58.9	45.0
1980/1981	282.5	230.5	473.0	228.2	243.0	208.5	294.7	389.0	336.9
1981/1982	129.5	106.4	193.3	73.0	109.7	100.9	164.7	162.0	125.0
1982/1983	226.0	171.5	425.0	235.5	156.6	104.9	192.5	375.5	298.5
1983/1984	310.0	250.0	468.0	196.5	221.1	202.5	297.5	413.2	295.9
1984/1985	418.0	361.5	536.5	282.5	311.3	312.0	339.6	474.0	534.6
1985/1986	56.5	62.8	123.9	72.0	42.8	66.0	60.0	81.0	79.0
1986/1987	154.1	93.0	288.0	150.0	72.0	133.5	143.0	247.0	197.0
1987/1988	426.0	398.5	679.4	246.5	274.7	315.4	406.5	741.0	579.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nº 3.6: Precipitaciones anuales. Parte II.

Año	Carén	El Tome	Las Ramadas	Pabellón	Paloma Embalse	Pichasca	Rapel	Tascadero	Tulahen
1988/1989	45.3	30.8	63.3	18.3	26.3	14.0	50.0	59.0	43.2
1989/1990	171.0	139.7	357.0	109.5	102.1	91.5	183.8	293.9	219.0
1990/1991	61.5	50.1	155.7	111.5	37.1	29.0	55.0	92.0	67.0
1991/1992	308.3	281.0	481.5	273.5	216.3	218.0	291.3	496.9	337.3
1992/1993	298.6	294.8	469.4	230.5	240.9	130.7	225.0	439.0	353.0
1993/1994	158.5	117.6	279.6	87.0	101.3	71.5	155.0	240.0	224.6
1994/1995	67.0	47.2	149.3	81.5	45.1	43.9	87.0	106.0	88.5
1995/1996	23.5	27.0	80.5	20.0	23.8	3.0	23.5	46.5	44.7
1996/1997	102.2	83.5	216.7	92.5	70.0	66.0	118.5	176.0	129.5
1997/1998	555.2	461.5	888.4	399.0	364.6	393.0	446.0	807.0	628.0
1998/1999	53.9	44.5	78.3	60.6	19.1	33.5	74.0	108.0	59.0
1999/2000	196.3	110.5	209.9	98.0	70.3	72.2	155.5	175.5	158.0
2000/2001	332.4	264.5	464.6	236.0	200.3	206.5	323.5	487.0	429.5
2001/2002	212.1	189.0	289.6	143.0	202.0	159.5	159.0	300.0	293.5
2002/2003	378.8	363.0	683.4	411.0	282.1	369.5	401.0	593.0	457.5
2003/2004	152.9	121.5	228.4	145.5	119.7	80.0	105.5	168.0	121.0
2004/2005	194.1	200.1	295.6	114.5	155.5	144.5	215.0	239.0	189.4
2005/2006	201.4	122.0	447.9	208.0	83.1	105.0	163.1	317.0	215.9
2006/2007	109.1	93.5	158.2	100.3	78.1	79.0	129.5	154.0	137.0
2007/2008	73.2	76.5	143.2	86.0	57.7	39.5	68.0	131.0	83.5

Fuente: Elaboración propia.

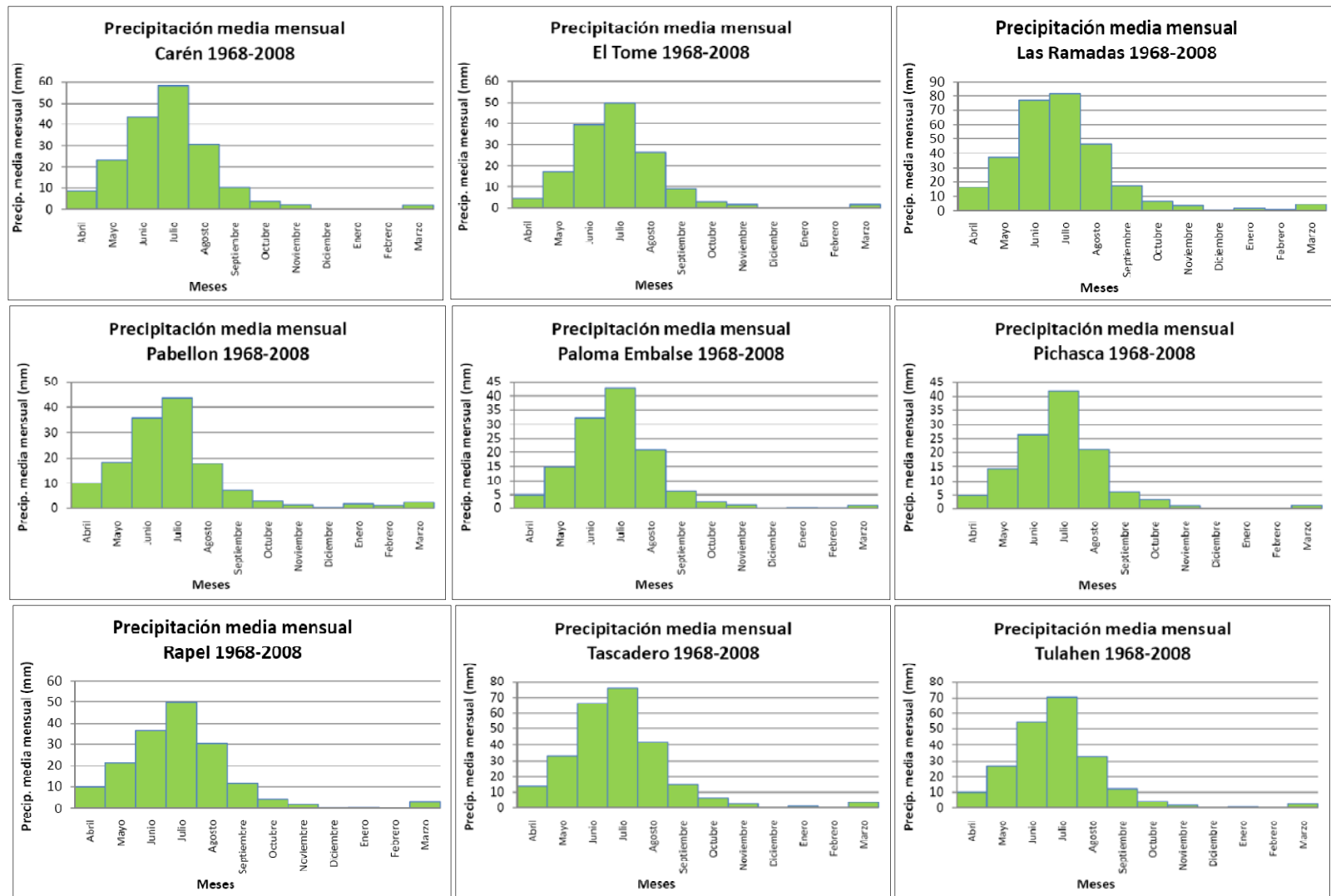


Figura Nº 3.2: Precipitaciones medias mensuales de las estaciones pluviométricas de Interés. Elaboración propia.

En la Figura N° 3.2 se puede observar a simple vista, que las precipitaciones se concentran en el periodo de invierno durante 4 meses, Mayo, Junio, Julio y Agosto, por otro lado, también es posible observar la escasez de precipitaciones en la temporada estival Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero. Cabe mencionar que el año hidrológico considerado en el presente estudio abarca desde el mes de abril hasta el mes de marzo del año siguiente.

3.4 ESTUDIO FLUVIOMÉTRICO

3.4.1 Generalidades

Las estaciones fluviométricas, presentes en la zona contienen los registros diarios de los caudales observados durante el periodo 1968-2008, estos registros indican el caudal medio diario del cauce en que se encuentra. La Tabla N° 3.7 indica las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca afluente al embalse Paloma, sus cauces asociados y su ubicación geográfica. Los registros de los caudales medios mensuales se encuentran disponibles en el Anexo 3. Los caudales diarios utilizados en el presente estudio se encuentran disponibles en la versión digital.

Tabla N° 3.7: Listado de Estaciones fluviométricas de la zona de estudio.

Núm.	Código BNA	Estación	Latitud (S)	Longitud (W)	UTM norte	UTM este
1	04513001-0	Rio Grande en Cuyano	30 55 27	70 46 23	6577404	330580
2	04511002-8	Rio Grande en las Ramadas	31 01 00	70 36 00	6567451	347271
3	04523002-3	Rio Grande en Puntilla San Juan	30 42 17	70 55 28	6601491	315694
4	04520001-9	Rio los Molles en Ojos de Agua	30 44 37	70 26 20	6597878	362256
5	04515002-K	Rio Mostazal en Carén	30 50 32	70 46 10	6586494	330781
6	04514001-6	Rio Mostazal en Cuestecita	30 48 46	70 36 46	6589984	345718
7	04522002-8	Rio Rapel en Junta	30 42 29	70 52 22	6601205	320649
8	04512001-5	Rio Tascadero en Desembocadura	31 00 43	70 39 52	6567834	341105

Fuente: Dirección General de Aguas (D.G.A.).

A continuación en la Figura N° 3.3 se puede observar la ubicación de estas estaciones en el área de estudio.

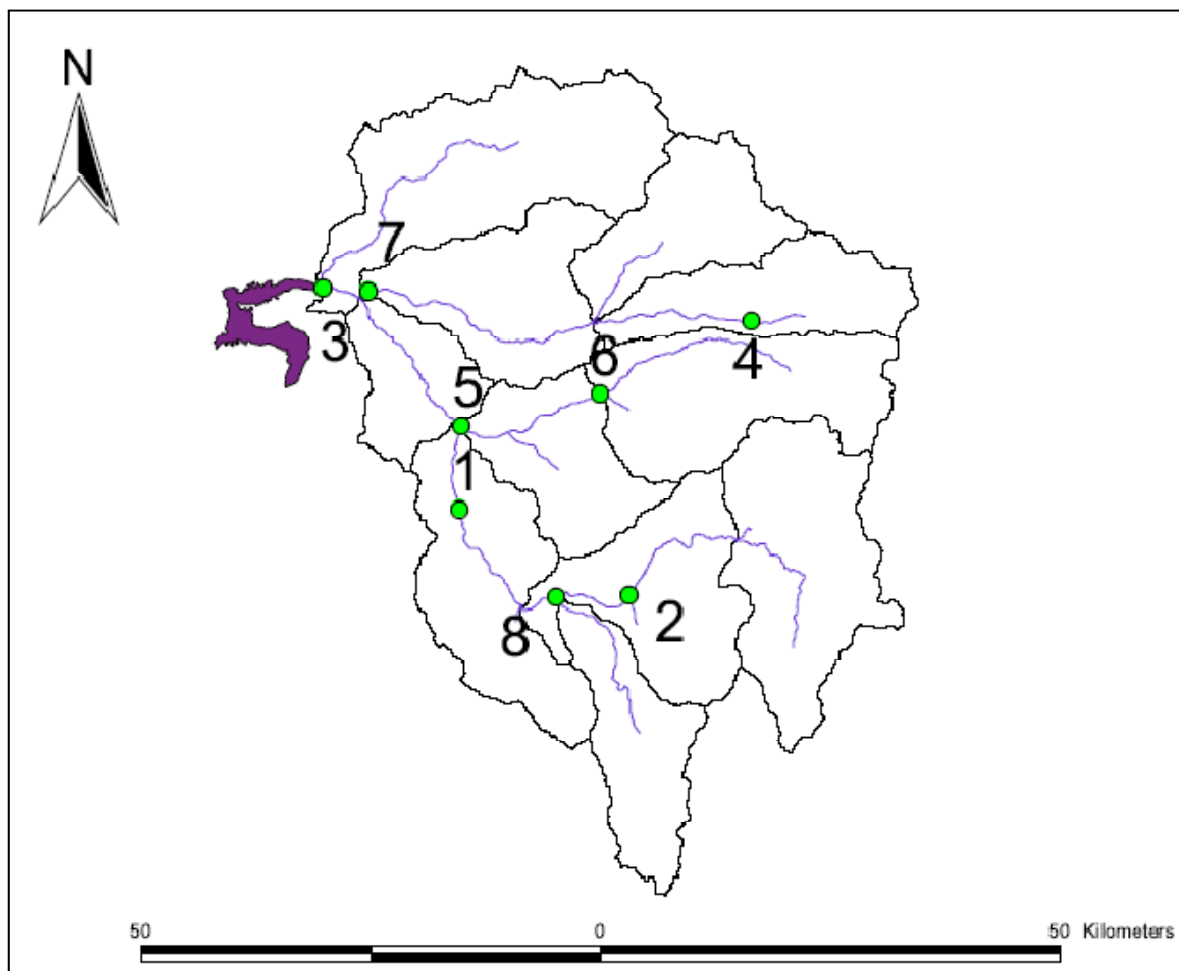


Figura N° 3.3: Estaciones Fluviométricas presentes en la zona de estudio. *Elaboración propia.*

Con respecto a la información fluviométrica, se obtuvieron los registros de todas las estaciones medidoras de caudal referidas en la Tabla N° 3.7. Sin embargo y después de haber analizado el funcionamiento del software HEC - HMS 3.3, se tomó la decisión de realizar el estudio de la cuenca en base a los registros históricos de solo 2 estaciones, las cuales cumplen con una cantidad y calidad de datos aceptables para el periodo comprendido entre abril de 1968 y marzo de 2008 y que presentan pérdidas o vacíos de registros no muy extensos.

Las estaciones escogidas fueron las 2 estaciones más cercanas al embalse Paloma, vale decir, las estaciones N° 3 y N° 7 de la Figura N° 3.3, en otras palabras la estación Rio Grande en Puntilla San Juan y la estación Rio Rapel en Junta.

La pérdida de registros en algunos períodos de las estaciones mencionadas en la Tabla N° 3.7, es debido principalmente a que los instrumentos de medición son absorbidos y arrastrados por las corrientes de los ríos, cuando ocurren grandes avenidas de agua debido a las lluvias o deshielos repentinos y de periodos de retorno muy alto.

Con respecto al relleno de los registros de las estaciones fluviométricas, estas no se realizarán. La razón es simple, el proceso de calibración que se debe ejecutar en el software HEC-HMS 3.3, se puede realizar de dos maneras, la primera de ellas es hacerlo de manera automática utilizando alguno de los métodos de ajuste incorporados dentro del programa, en este caso se requiere del ingreso de datos fluviométricos con registros completos, esto implica que la calidad del registro deba ser muy cercana a la realidad para obtener resultados aceptables, de esta forma y de manera automáticamente se ajusta la curva del hidrograma generado con la curva del hidrograma del registro histórico entregando un error de ajuste asociado al volumen de agua generado versus el volumen de agua observado.

La segunda forma de realizar la calibración es de manera manual, para este caso los registros de caudales medios diarios no necesariamente deben estar completos, ya que son utilizados por el operador para comparar un resultado obtenido con el registro histórico, de esta forma el registro histórico sirve de guía al operador (persona que realiza la calibración) para variar o no los parámetros ingresados de acuerdo a su necesidad.

Finalmente la metodología adoptada en el proceso de calibración para el presente estudio es a través de una calibración manual, la cual no necesita que se rellenen los registros de caudales, lo que a la vez implica un gran esfuerzo, pero que a la larga lleva a comprender de mejor manera la respuesta de la cuenca ante los parámetros ingresados.

A continuación se presentan las variaciones estacionales en las estaciones de Río Grande en Puntilla San Juan y la estación Río Rapel en Junta, los datos y resultados finales fueron obtenidos del estudio “Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad”, Cuenca del Limarí, D.G.A.

3.4.2 Estación Río Grande en Puntilla de San Juan

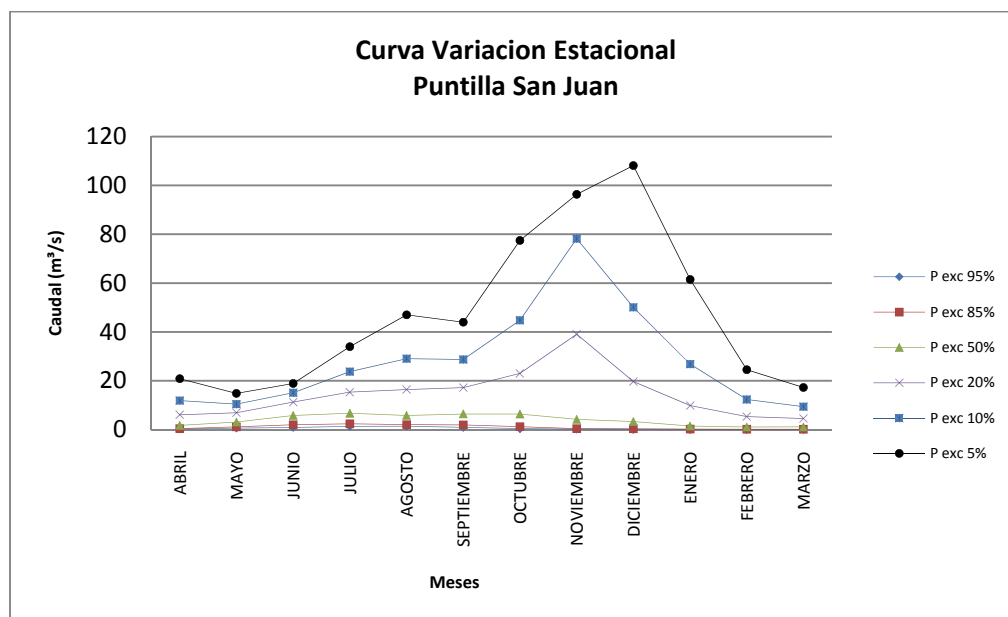
Esta estación presenta un régimen nivo – pluvial, de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla N° 3.8 y en la Figura N° 3.4, también se observa que en años húmedos los mayores caudales ocurren entre octubre y enero, producto de deshielos, mientras que los menores lo hacen entre marzo y junio. Entre julio y agosto se presentan aumentos considerables producto de lluvias invernales.

En años secos los caudales se mantienen muy bajos durante el año, con valores menores a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, salvo leves aumentos entre mayo y octubre.

Tabla N° 3.8: Análisis de frecuencia para el Rio Grande en Puntilla San Juan.

P. exc. (%)	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
5	20.8	14.8	18.9	34.0	47.0	44.0	77.5	96.3	108.1	61.5	24.5	17.3
10	11.9	10.5	15.1	23.7	29.1	28.7	44.8	78.2	50.1	26.8	12.3	9.4
20	6.1	6.9	11.3	15.4	16.4	17.2	23.0	39.1	19.7	9.8	5.4	4.5
50	1.7	3.1	5.8	6.7	5.8	6.4	6.4	4.2	3.3	1.5	1.1	1.1
85	0.4	1.1	2.0	2.4	2.1	1.9	1.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2
95	0.3	0.6	0.9	1.3	1.4	0.9	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1

Fuente: "Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad", Cuenca del Limarí, D.G.A. (2004).

**Figura N° 3.4:** Curva de variación estacional Rio Grande en Puntilla San Juan. Elaboración propia.

3.4.3 Estación Rio Rapel en Junta

En la Tabla N° 3.9 y la Figura N° 3.5 es posible observar que esta estación muestra un régimen nival, con sus mayores caudales en meses de primavera, producto de los deshielos.

En años húmedos los mayores caudales se presentan entre noviembre y diciembre, mientras que los menores lo hacen entre febrero y octubre.

En años secos los caudales permanecen muy bajos a lo largo de todo el año, con valores inferiores a $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, salvo entre los meses de junio y agosto, cuando se observan leves aumentos que no superan los $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla Nº 3.9: Análisis de frecuencia para el Rio Rapel en Juntas.

P. exc. (%)	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
5	8.10	7.39	4.84	4.53	5.94	7.42	8.23	25.74	29.52	13.41	6.39	5.90
10	3.48	3.93	3.55	3.76	4.17	4.13	4.01	8.56	9.32	4.25	2.27	2.33
20	1.26	1.83	2.42	2.95	2.71	2.03	1.68	2.26	2.31	1.06	0.65	0.76
50	0.19	0.42	1.12	1.74	1.16	0.52	0.32	0.19	0.17	0.08	0.07	0.10
85	0.03	0.07	0.37	0.67	0.36	0.10	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
95	0.01	0.02	0.15	0.18	0.16	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Fuente: "Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad", Cuenca del Limarí, D.G.A. (2004).

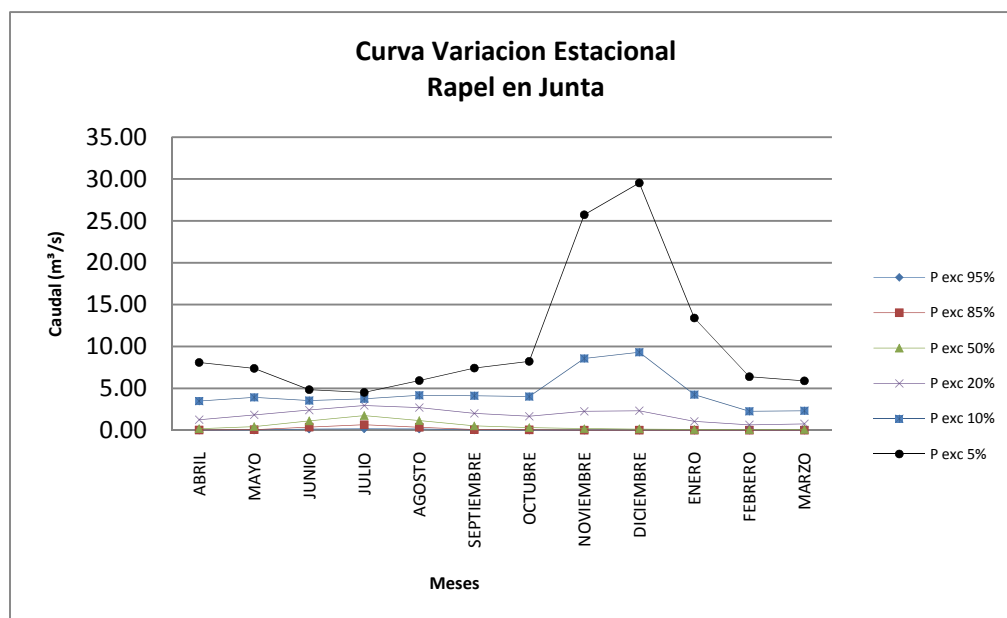


Figura Nº 3.5: Curva de variación estacional Rio Rapel en Junta. Elaboración propia.

3.5 ESTUDIO DE EVAPOTRANSPIRACION

Los registros de evapotranspiración fueron entregados por la Dirección General de Aguas. Las estaciones medidoras de evapotranspiración se encuentran indicadas más adelante en la Tabla N° 3.10, en donde se mencionan las coordenadas y alturas de las estaciones medidoras, la ubicación de las estaciones dentro de la zona de estudio se encuentra reflejada en la Figura N° 3.6. Los registros mensuales de evapotranspiración se encuentran en el Anexo 4.

Antiguamente existían 6 estaciones que podían realizar mediciones de evapotranspiración, sin embargo las estaciones de Puntilla San Juan y El Tome fueron descontinuadas el año 1979 y 1988 respectivamente, por lo cual no fueron consideradas en el análisis.

Con respecto a los registros históricos de evapotranspiración, se puede señalar que solo se obtuvieron los datos de 4 estaciones presentes en la zona, esto implica que los valores se tuvieron que transponer a las demás cuencas en donde no se realiza medición, el método para la obtención de un valor de evapotranspiración en las demás cuencas, es explicado más adelante en el Capítulo 5.

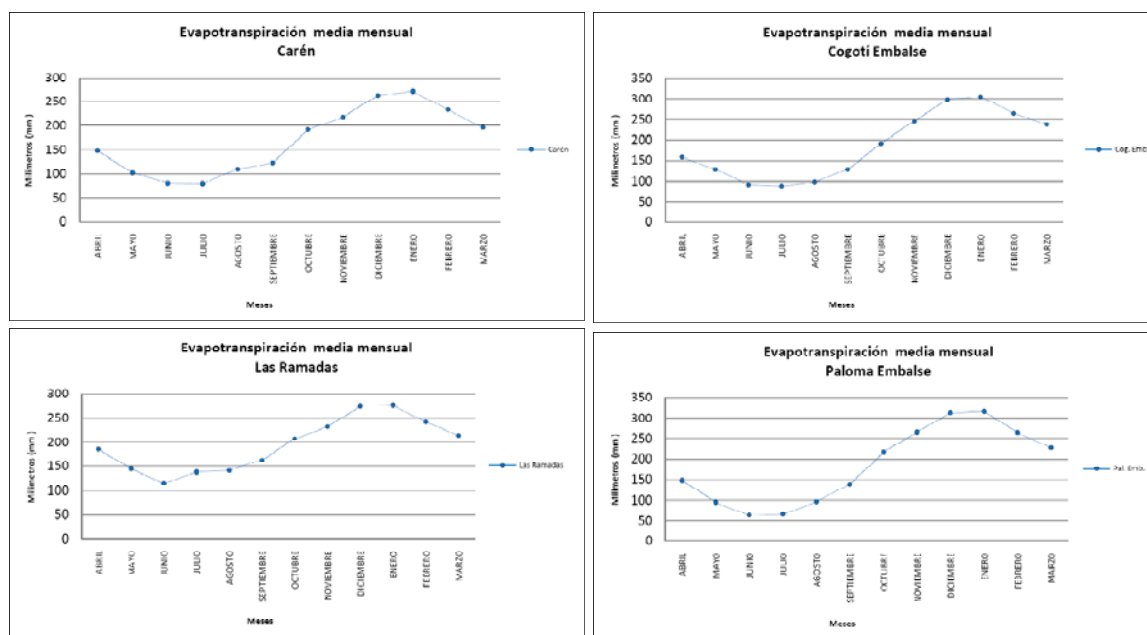
El relleno de los registros faltantes, no son un problema ya que solo se requiere el promedio mensual de evapotranspiración de cada estación, además el software HEC-HMS 3.3, otorga la posibilidad de ponderar el valor de evapotranspiración en un factor que va desde cero a uno, a gusto o necesidad de quien realice la calibración, según requiera maximizar o minimizar la variable de evapotranspiración en la cuenca.

A continuación la Figura N° 3.6 muestra los gráficos de evapotranspiración media mensual, para las estaciones presentes en la zona de estudio. La Tabla N° 3.10 muestra los valores alcanzados.

Tabla N° 3.10: Evapotranspiración media mensual.

Estaciones	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
Carén	148.7	102.2	82	80.9	109.6	123.5	191.5	217.6	263.7	272.1	233.4	195.7
Cogotí Embalse	158.5	128.3	92.5	89.2	98.2	128.3	191.8	244.6	298.1	305.3	264.3	237.7
Las Ramadas	185.8	144.8	115.8	138.5	141.5	162.9	207.9	232.7	275.4	276.8	242.7	214.7
Paloma Embalse	148.4	95	64.5	66.4	96.7	138.9	215.4	264.7	312.5	316.6	263.4	226

Fuente: Dirección General de Aguas (D.G.A.).

**Figura N° 3.6: Curvas de Evapotranspiración media mensual en estaciones presentes en la zona. Elaboración propia.**

3.6 ESTUDIO DE TEMPERATURA

Las estaciones que realizan mediciones de temperatura son las indicadas en la Tabla N° 3.11 y su ubicación dentro de la zona de estudio se puede observar en la Figura N° 3.7, se puede mencionar que las estaciones que poseen registros de temperaturas y las que registran evapotranspiración son las mismas, inclusive en sus años de registros, según se observa en la Tabla N° 2.4 de la sección 2.6.4 del Capítulo 2.

Con estas estaciones, se busca determinar el comportamiento de las temperaturas en la parte alta de la montaña y solo sirven para evaluar la acumulación o derretimiento de nieve durante el periodo estudiado.

Con respecto a los registros históricos, se utilizarán las temperaturas medias diarias. Los registros entregados por D.G.A., contemplan las mediciones de las temperaturas máximas y mínimas diarias de cada estación, por lo que se realizará un promedio de ambos datos. Frente a la falta de registros en algunos días, se decide adoptar la metodología presentada en la sección 3.3.2. Los registros disponibles y rellenados de temperaturas medias mensuales se encuentran disponibles en el Anexo 5 y 6 respectivamente.

Tabla N° 3.11: Estaciones medidoras de evapotranspiración y temperatura.

Núm.	Estaciones	Código D.G.A.	Latitud (S)	Longitud (W)	U.T.M. Norte (m)	U.T.M. Este (m)	Altura (m)
1	Carén	04513004-5	30 51 17	70 46 15	6585105	330669	740
2	Cogotí Embalse	04535001-0	31 00 28	71 05 08	6567617	300887	740
3	Las Ramadas	04511003-6	31 01 05	70 35 09	6567266	348619	1380
4	Paloma Embalse	04540006-9	30 41 45	71 02 10	6602287	304978	320

Fuente: Dirección General de Aguas (D.G.A.).

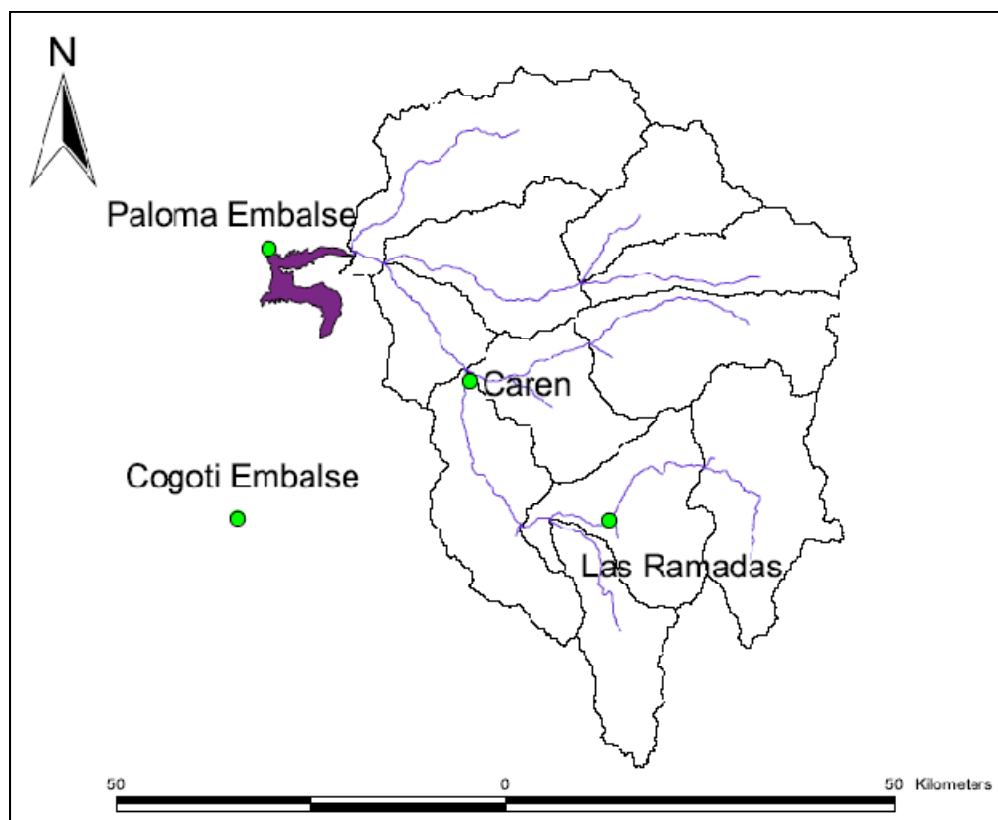


Figura Nº 3.7: Estaciones medidoras de evaporación y temperaturas de Interés de la Cuenca del Río Limarí. Elaboración propia.

En la Tabla Nº 3.12 se presentan las temperaturas medias mensuales y en la Figura Nº 3.8, se realiza una comparación de temperaturas medias mensuales para las estaciones presentes en la zona.

Tabla Nº 3.12: Temperatura media mensual.

Estaciones	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
Carén	17.8	15.3	13.5	13.1	14.2	15.6	17.5	19.1	20.6	21.3	21.1	19.9
Cog. Emb.	17.3	14.9	12.8	12.1	13.2	14.5	16.7	18.5	20.1	20.9	20.5	19.6
Las Ramadas	16.9	14.8	13.1	12.0	13.2	13.9	16.0	18.0	19.3	20.1	19.9	19.0
Pal. Emb.	17.2	14.9	13.1	12.5	13.6	15.0	16.9	18.5	20.3	21.4	21.2	19.8

Fuente: Dirección General de Aguas (D.G.A.).

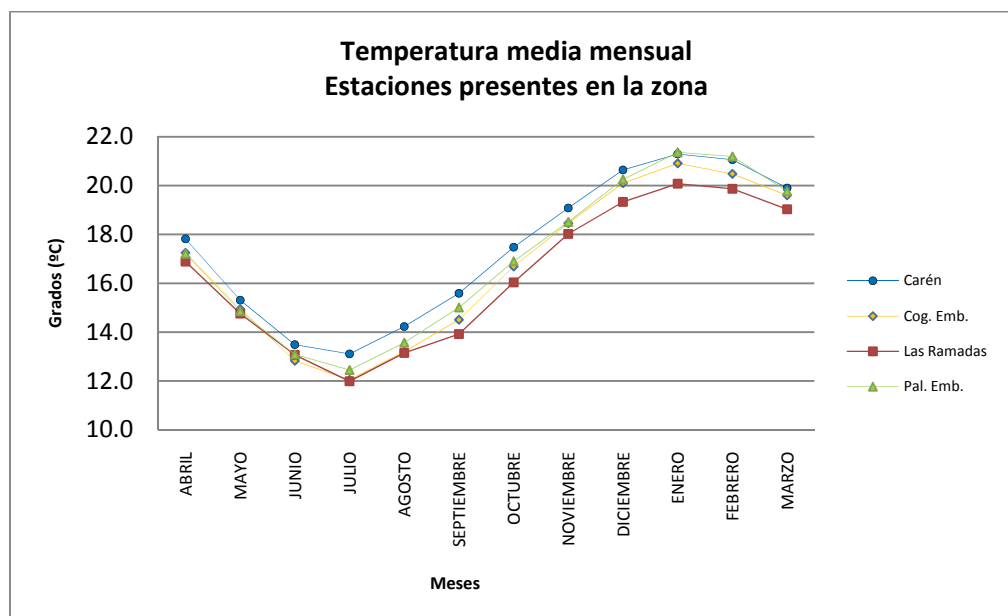


Figura Nº 3.8: Temperatura media mensual. Elaboración propia.

En la Figura Nº 3.8, se puede observar que el gradiente no es constante y no sigue una regla que se pueda extrapolar para mayores alturas. En efecto, si se comparan las estaciones de Las Ramadas (1380 m.s.n.m.) v/s Carén (740 m.s.n.m.), se observa que para el mes de septiembre existe un gradiente de temperatura cercano a $-2.61^{\circ}/(1000\text{ m})$, si se realiza la comparación entre Paloma Embalse (320 m.s.n.m.) v/s Cogotí Embalse (740 m.s.n.m.) para el mismo mes, resulta un gradiente $-1.22^{\circ}/(1000\text{ m})$. Esto implica, el cuidado que debe tenerse al momento de considerar la acumulación y derretimiento de nieve en la parte alta de la montaña, ya que es muy susceptible a la altura de la estación medidora de temperatura y al gradiente escogido, para alcanzar la isoterma cero. Este tema será tratado con mayor profundidad en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 4

ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DEL EMBALSE PALOMA

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se describirán aspectos relacionados con el manejo operacional actual del embalse Paloma. Este manejo operacional, se tratará desde el punto de vista del manejo de crecidas afluentes al embalse, las cuales consideran los dos casos donde se produce este evento: el manejo en las épocas de invierno de una crecida, debido a precipitaciones en ese período que generan aumentos rápidos de caudales afluentes al embalse Paloma; y el manejo de crecidas en la época de primavera, debido al aumento gradual del volumen afluente al embalse, por efecto de los deshielos en la alta cordillera.

El actual manejo del embalse Paloma, se apoya en varios estudios realizados entre los años 1978 y 1980. Entre ellos, destacan el estudio realizado por los ingenieros consultores Ernesto Brown y Patricio Ferrer, los cuales recomendaron algunas reglas de operación para el embalse y para todo el Sistema Paloma en su conjunto, según los distintos volúmenes afluentes sobre el embalse. Estas recomendaciones son descritas en el estudio denominado “Metodología de Pronósticos para el Sistema Paloma”, realizada en Septiembre de 1978 por los ingenieros E. Brown y P. Ferrer. De este texto, se considera dicha metodología al incluir en la información hidrológica el pronóstico de los volúmenes de deshielo [Ref. 6].

Otro estudio importante, acerca del control de crecidas en el embalse Paloma, corresponde al texto “Operación del Sistema Paloma, Considerando Control de Crecidas”, realizado por el ingeniero civil Enrique Kaliski, el cual será tomado en cuenta en nuestro estudio [Ref. 26].

Además, en este capítulo, se explicará la metodología actual de operación del embalse, correspondiente al las indicaciones planteadas en el Manual de Operaciones del Embalse Paloma [Ref. 19]. Por último, se hace mención de las curvas de operación que han sido tomadas para este estudio, como son las curvas de cota-volumen, cota superficie, evaporación y filtraciones del embalse.

4.2 MANEJO OPERACIONAL PARA EL SISTEMA PALOMA

Para explicar en forma clara, como se realiza la operación del embalse Paloma, debemos explicar como están dispuestas las entregas con las que debe cumplir en forma mensual y anual el Sistema Paloma, el cuál, como se ha mencionado, se compone además de los embalses Recoleta y Cogotí.

En primer lugar, se define la entrega total del Sistema Paloma, según los estudios operacionales realizados por los autores ya citados, como el cumplimiento de las distintas metas de entrega anual para cada embalse, siendo la entrega total del sistema la suma de todas ellas.

Además, se determina como período de entrega, a los meses comprendidos entre Mayo y Abril, período también conocido como “año agrícola”, para toda la zona que alimenta el Sistema Paloma.

4.2.1 Estrategias de entregas del Sistema Paloma

Las entregas, como sabemos no son constantes a lo largo de los años, debido a la variabilidad pluviométrica de la cuenca, por lo cual se establecen estrategias de entregas, los cuales dependen del volumen disponible almacenado en los embalses que componen el sistema.

La asignación anual para el sistema, es distribuida por los embalses según una cierta proporción. Las estrategias de entrega actuales (Según “Operación

Sistema Paloma” año 1978, Brown y Ferrer) tienen la característica que para los distintos niveles de entrega, la proporción en que éstas se efectúan desde cada embalse, tiene muy poca variación, como se indica en la Tabla N° 4.1

Las estrategias de entregas consisten en establecer una curva de entrega total anual del Sistema en función del volumen disponible en los embalses. Estas estrategias se han determinado de modo de cumplir con los siguientes criterios de seguridad:

(i) Las entregas del sistema deben ser iguales a las metas máximas o a lo menos a un 90% de ellas, en el 85% o más de los años en que se ha realizado una simulación.

(ii) Estas entregas pueden ser inferiores a las metas máximas pero no inferiores a la meta mínima en un 14% o menos de los años.

(iii) Se acepta que las entregas sean inferiores a la mínima en el 1% de los años, sin que ésta sea inferior al 25% de la meta máxima. En el caso del Sistema Paloma, este año corresponde al último de la extrema sequía ocurrida entre 1968 y 1971, que según consideraciones hidrológicas, ocurriría una vez en 100 años.

La proporción de entregas adoptada para los 3 embalses es la siguiente:

- Embalse Recoleta: 12.5 %	}	= 100 % de entregas
- Embalse Paloma: 75.0 %		
- Embalse Cogotí: 12.5 %		

Tabla N° 4.1: Estrategias de entregas actuales (entregas máximas anuales).

Estrategia	Total	Entregas anuales (millones de m ³)			Porcentaje de la Entrega Total		
		Paloma	Recoleta	Cogotí	Paloma	Recoleta	Cogotí
1	320	240	40	40	75,000	12,500	12,500
2	310	230	40	40	74,200	12,900	12,900
3	300	222	39	39	74,000	13,000	13,000
4	290	214	38	38	73,800	13,100	13,100
5	285	211	37	37	74,040	12,980	12,980
6	280	208	36	36	74,280	12,860	12,860
7	270	200	35	35	74,070	12,965	12,965

Fuente: Operación Sistema Paloma (1978) Brown y Ferrer. Ingenieros Civiles [Ref. 5].

En la actualidad, se adoptan como referencia en el manejo del sistema, tanto las estrategias 1, 4 y 7, siendo utilizada en la actualidad la estrategia 1, para definir la asignación normal para cada una de las organizaciones de regantes que se benefician del sistema Paloma, la cual dispone de un volumen máximo de entregas del Sistema de 320 millones de m³, de los cuales 240 millones son aportados por el embalse Paloma.

En el estudio “Influencia de un Volumen de Reserva para Crecidas” [Ref. 5], se presentaron algunas estrategias mediante tablas de valores discretos, de entregas anuales estimadas. En estas tablas, se determina la entrega anual del Sistema, conociendo el volumen disponible en los embalses y el tipo de año. Para determinar el tipo de año, se ha propuesto utilizar el siguiente índice aproximado denominado índice de precipitación (aplicable hasta el momento de disponer del pronóstico de deshielo).

$I = 0.75 * (\text{Precipitación acumulada en Las Ramadas desde Enero a la fecha, en el año actual}) + 0.25 * (\text{Precipitación acumulada en Las Ramadas desde Enero a Diciembre del año anterior}).$

El tipo de año que ocurre se ha caracterizado además por un volumen afluente característico anual a los embalses, según el anexo I del estudio “Operación del Sistema Paloma” de 1978 [Ref. 5].

En la Tabla N° 4.2 se detalla la determinación del tipo de año y su volumen afluente característico según el rango en que se encuentra el índice señalado. Con estos antecedentes es posible estimar en el transcurso del año agrícola, el tipo de año que ocurrirá. Considerando además el volumen disponible en los embalses, se determinan las entregas según alguna de las estrategias ya descritas. Este valor es sólo aproximado, ya que en esa fecha no se conoce aún el tipo de año que ocurrirá. Con el comienzo de los deshielos (1° de Septiembre) es posible hacer un pronóstico más seguro de la disponibilidad de agua del sistema para el año agrícola. En esta última fecha es posible decidir un aumento de las entregas ofrecidas en Mayo o mantenerlas.

Tabla N° 4.2: *Tipificación de los años hidrológicos.*

Valor de I (mm)	Tipo de Año	Volumen Afluente Anual (millones de m ³)
>400	Muy Húmedo	700
340-400	Húmedo	410
280-340	Normal Húmedo	265
220-280	Normal	180
170-220	Normal Seco	120
120-170	Seco	70
<120	Muy Seco	40

Fuente: Operación Sistema Paloma (1978) Brown y Ferrer. Ingenieros Civiles.

4.2.2 Asignación por temporada

El Sistema Paloma establece para cada temporada agrícola de condiciones normales, la asignación de 320 millones de m³, de los cuales 240 son aportados por el embalse Paloma, 40 por Cogotí y 40 por el embalse Recoleta, distribuidos

en proporción a las acciones de cada organización del Sistema. Esta oferta de agua creada por la presencia del embalse Paloma se encuentra regularizada en su aspecto legal mediante la resolución DGA N° 323 del año 1986 inscrita en el Conservador de Bienes Raíces de Ovalle en el año 1988.

La asignación por temporada está condicionada a la operación del conjunto de embalses como si fuera uno solo de 1.000 millones de m³ (750 millones de m³ Paloma, 150 millones de m³ Cogotí y 100 millones de m³ Recoleta), de acuerdo a la siguiente modalidad, que otorga una seguridad de riego a toda el área de influencia del 85%. Si el volumen de los embalses es:

- Mayor o igual a 1.000 millones de m³, se declara *DOTACIÓN LIBRE*.
- Mayor que 500 millones de m³, *DOTACIÓN MÁXIMA DE 320 MILLONES DE M³*.
- Menor o igual a 500 millones de m³, *DOTACIÓN RESTRINGIDA, ENTREGANDO EL 50% DE LO ALMACENADO*.

Si algún embalse, de acuerdo a sus recursos acumulados, no alcanza a satisfacer el 40% de su demanda, debe asimilar su operación a la situación sin embalse, la cual se denomina **Tributación**:

- Embalse Recoleta : 16 millones de m³.
- Embalse Cogotí : 16 millones de m³.
- Embalse Paloma : 96 millones de m³.

Saldos de temporadas:

- Todos los saldos de agua que queden en los diferentes embalses del sistema Paloma como resultado del manejo operacional de los recursos de la temporada agrícola, se contabilizarán para la temporada siguiente con el correspondiente descuento de evaporación del 8 %. El factor establecido

del 8 % de evaporación, es un valor unificado acordado por todas las organizaciones del sistema Paloma, para aplicarlo directamente a los diferentes saldos de temporadas de cada organización en los 3 embalses.

- Los saldos de temporada que se registren en los diferentes embalses del sistema, se pierden automáticamente de la contabilidad sólo cuando se produzca vertimiento en los embalses producto de las lluvias o deshielos.
- Los saldos de agua se traspasan de una temporada a otra, y son acumulativos con la asignación de la temporada siguiente.

4.2.3 Regla de operación propuesta por Enrique Kalisky

Tras conocer las reglas de operación establecidas para todo el Sistema Paloma, corresponde conocer las reglas que rigen directamente el funcionamiento del Embalse Paloma. Estas reglas fueron planteadas en el año 1980 por el ingeniero civil Enrique Kalisky [Ref. 26] y tienen como objetivo establecer las normas que se deben seguir para realizar las entregas desde los embalses, especialmente en el Paloma, ya que estas reglas consideran un enfoque desde el punto de vista de las posibles crecidas de los afluentes al embalse, teniendo en cuenta lo que ocurre sobre el embalse Paloma y bajo él. En este texto, se plantea la utilización de los recursos disponibles y disminuir al máximo los daños de crecidas aguas abajo del embalse Paloma, considerando adicionalmente que existirá un caudal de diseño del vertedero, inferior al máximo afluente en una situación milenaria. Este autor, planteó su modelo considerando tanto aspectos hidrológicos, como parámetros agrícolas de la cuenca para el Sistema Paloma.

Según Kalisky, la operación del sistema debe anticipar en alguna medida, los daños que producen las crecidas en el valle aguas abajo del embalse Paloma, que es regado por el río Limarí.

El modelo de regulación de crecidas planteado por Kalisky es actualmente tomado en cuenta para el manejo del embalse Paloma, principalmente en dos aspectos: el primero, fue establecer un volumen o “colchón” regulador de crecidas para el embalse durante los meses de invierno (Mayo a Agosto), el cual reducía notoriamente los daños en los sectores aguas abajo del embalse ante crecidas de importancia. Este volumen de reserva o colchón amortiguador de crecidas que actualmente se utiliza en el embalse Paloma, corresponde a 50 millones de m^3 . El segundo aspecto se relaciona con el primero, ya que considerando un volumen de reserva, se mantiene un volumen de entregas aceptable para el Sistema, el valor de 320 millones de m^3 ya indicado durante éste capítulo.

En el desarrollo de éste trabajo, se trabajará con los valores de reserva para simular la operación del Embalse Paloma, en 50 y 100 millones de m^3 .

4.3 OPERACIÓN DEL EMBALSE PALOMA

4.3.1 Introducción

Una operación es la simulación del comportamiento del embalse a través del tiempo. La operación esta condicionada por reglas de operación las cuales son afectadas por los datos hidrológicos, por lo que la regulación del embalse debe ser ajustada a las condiciones reales de funcionamiento que se presenten.

4.3.2 Reglas básicas de operación

Las reglas establecidas para la operación del embalse, se encuentran establecidas en el Manual de Operaciones del embalse Paloma, del año 2005.

Cabe recordar, que la función primordial del embalse es la regulación multianual de riego. Además, en sus funciones considera el control de crecidas, de

manera de minimizar los daños que pudieran ocasionar a las zonas agrícolas, construcciones, instalaciones y, naturalmente, a vidas humanas y animales.

Aquí se resumen las prácticas en uso con que se opera el embalse Paloma:

- Asignación por temporada, con seguridad igual o superior a 85%.
- Entrega Normal, 320 millones de m³.
- Capacidad máxima para meses de invierno: 700 millones de m³.
- Volumen de reserva: 50 millones de m³.
- Evacuación de crecidas con caudales tales que tengan en cuenta los eventuales daños hacia aguas abajo.
- Nivel máximo normal, 411,40 m que equivale a 750 millones de m³ en el embalse.
- Nivel máximo emergencia, 413,50 m que equivale a 800 millones de m³.

4.3.3 Condiciones de operación del embalse

Se caracterizan tres condiciones de operación del embalse: normal, crítica y en emergencia, dependiendo del nivel del embalse y las condiciones climáticas y de deshielo.

Operación normal: aquella operación que se realiza con el nivel del embalse bajo la cota 411,40 m, con o sin alertas provocadas por el clima o deshielos. El caudal máximo admisible a evacuar por cada compuerta del vertedero es de 200 m³/s. Nivel máximo normal: 411,40 m.

Operación crítica: aquella operación que se realiza con niveles del embalse a la cota 411,40 m o superior, sin alertas de crecidas afluentes. El caudal máximo admisible a evacuar por cada compuerta del vertedero es de 200 m³/s.

Operación de emergencia: aquella operación con nivel en el embalse 411,40 m o superior con alertas de crecidas afluentes. El caudal máximo admisible a evacuar por todas las compuertas del vertedero es de 4.000 m³/s. Nivel máximo de emergencia: 413,50 m.

4.3.4 Recomendaciones y prácticas establecidas en el Embalse Paloma para la evacuación de crecidas

De las reglas básicas establecidas [Ref. 19], surgen algunas condiciones que se tienen en consideración en el momento de evacuar caudales de crecidas.

- A más tardar el mes de abril de cada año, es decir, previo al inicio del año hidrológico en la zona, debe realizarse movimientos con todas las compuertas a fin de asegurar que estén en condiciones de operar.
- La evacuación de caudales debe realizarse de modo de mantener una regularidad de caudal en evacuación, evitando cambios bruscos que pueden generar daños en las estructuras de los regantes.
- El caudal máximo total a evacuar en operación normal o crítica es de 200 m³/s, determinado de acuerdo a criterios prácticos de seguridad de las obras y poblaciones aguas abajo.
- Volumen máximo a embalsar, 750 millones de m³, nivel máximo embalse, 411,40 m.
- Volumen máximo a embalsar por 12 horas, 800 millones de m³, sin evacuación, nivel máximo embalse, 413,20 m.
- Caudal máximo total a evacuar en operación de emergencia, 4000 m³/s, correspondiente a todas las compuertas abiertas 4,0 m y nivel en el embalse 413.00 m.
- Abertura máxima de las compuertas del vertedero: 4,1 m.

Previo a la apertura de las compuertas y realizar el vertimiento, la Administración del embalse debe:

- Programar las evacuaciones.
- Examinar el entorno de aguas abajo y hacer recomendaciones de seguridad a la comunidad.
- Coordinar cualquier evacuación con el Director Regional de Obras Hidráulicas.
- Avisar de la evacuación a la Gobernación y a La Municipalidad.
- Invitar a las autoridades y medios de comunicación al inicio del vertido como un medio de difusión hacia la comunidad.
- Cumplir con la normativa legal vigente en el sentido de mantener en funciones al personal de guardia.

4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DE OPERACION

4.4.1 Curvas características del embalse paloma.

El almacenamiento de un embalse queda definido y controlado por la curva cota-área y la curva cota-volumen, ambas curvas son obtenidas por planimetría topográfica del vaso, en un proceso previo a la construcción del embalse.

Curva Cota-Área: Indica la superficie inundada correspondiente a cada elevación.

Curva Cota-Volumen: Se obtiene mediante la integración de la curva cota-área e indica el volumen almacenado correspondiente a cada elevación.

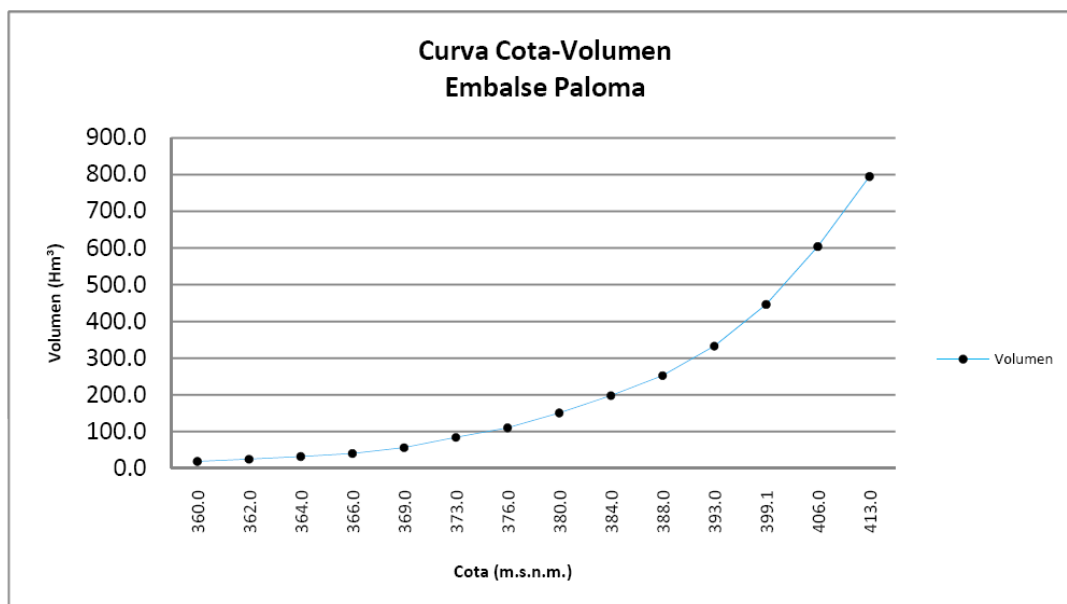
La Tabla N° 4.3, es una tabla muy reducida en donde se muestra la altura limnimétrica v/s volumen y superficie del embalse Paloma.

Tabla N° 4.3: Altura limnimétrica superficie en m^2 y volumen en Hm^3 del Embalse Paloma.

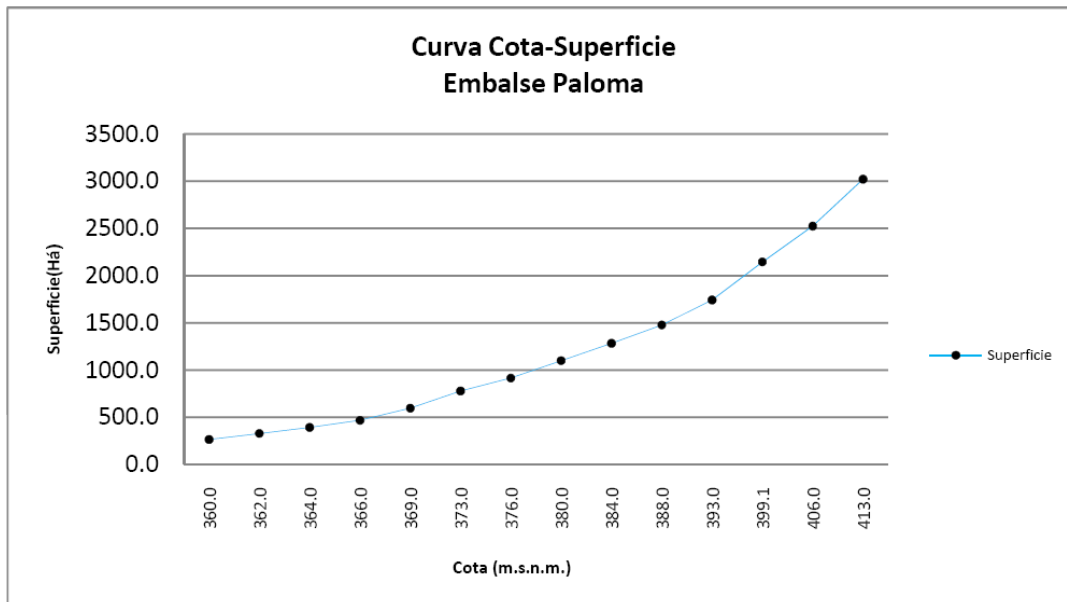
Cota (msnm)	Volumen	Superficie
360.00	18.75	265.00
362.00	24.65	329.00
364.00	31.80	393.00
366.00	40.32	468.00
369.00	56.13	597.00
373.00	84.09	778.00
376.00	110.20	916.00
380.00	150.60	1100.00
384.00	198.00	1284.00
388.00	252.40	1477.00
393.00	332.70	1743.00
399.05	446.00	2145.00
406.00	604.00	2524.00
413.00	794.80	3022.00

Fuente: Administración embalse Paloma.

La Figura N° 4.1 es una representación de las curvas Cota- Volumen y de la curva Cota- Área del embalse Paloma.



a)



b)

Figura N° 4.1: Curvas características, a) Curva Elevación-Volumen, b) Curva Elevación-Área. Elevación (m), Volumen (m^3), Área (m^2). Elaboración propia.

4.4.2 EVAPORACIÓN DEL EMBALSE PALOMA

Las pérdidas de evaporación corresponden al volumen de agua que se pierde por la acción diaria de la temperatura y del viento en la superficie del vaso, la cantidad de agua evaporada va a depender de área del espejo de agua, de la ubicación del embalse y de las fluctuaciones de temperatura de la temporada.

Se dispone de información de evaporación del embalse Paloma, entregada por la administración del embalse. Las series de datos corresponden a mediciones del mes de noviembre del año 1985 hasta noviembre del año 2008. En la Figura N° 4.3 se presenta la evaporación media mensual.

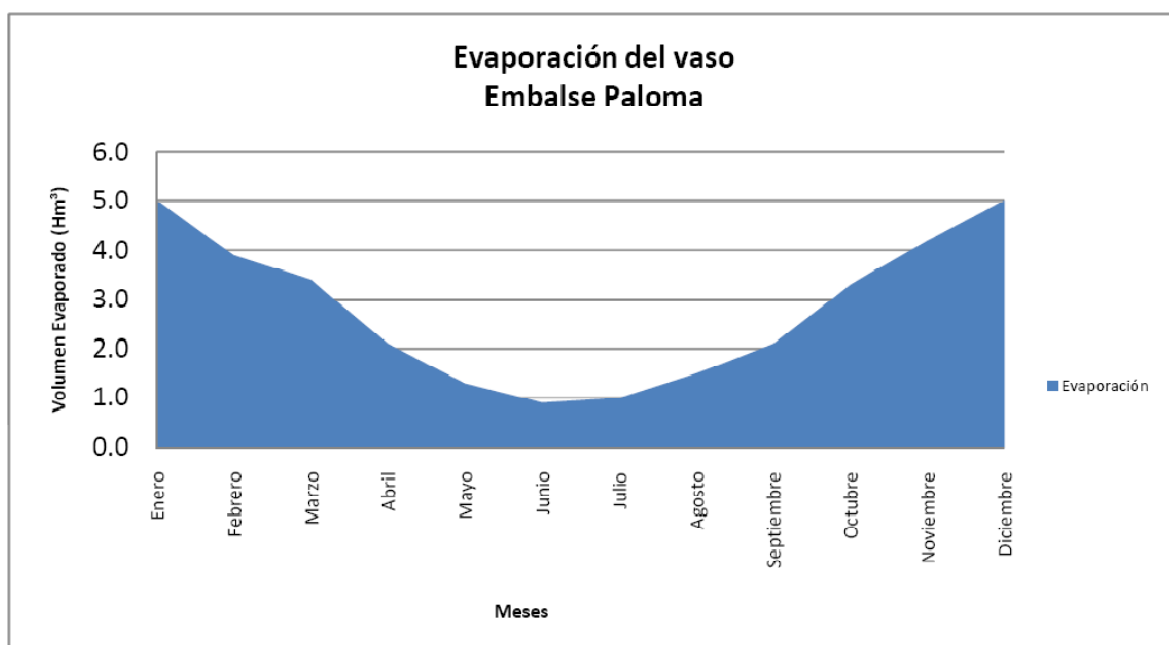


Figura N° 4.2: Representación grafica de la evaporación mensual del Embalse Paloma.
Elaboración propia.

Los datos registrados de 1985 hasta 2008 son presentados en la Tabla N° 4.4, en el cual sus valores están en millones de metros cúbicos, representados como evaporación media mensual.

Tabla N° 4.4: Registro mensual Evaporación espejo de agua. Embalse Paloma.
Valores en Hm³.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1985											4.5	5.2
1986	5.2	3.9	3.4	2.3	1.2	0.8	1.2	1.4	2.4	3.2	3.8	5.1
1987	0.2	4.1	3.1	2	0.9	0	0.5	1.1	2.1	2.7	4.2	5.6
1988	5.4	4.7	4.1	2.9	1.8	1.5	1.6	2.3	3.1	4.7	5.2	6.2
1989	5.4	4.5	3.7	2.1	1.3	1.3	1.2	1.4	2.2	3.8	3.9	5.4
1990	4.9	4	3.3	2.2	1.8	1.3	1.1	1.7	2.5	3.3	3.9	4.9
1991	4.5	3.4	2.8	1.9	1.3	0.5	0.7	1.1	1.9	3.1	4.3	5.1
1992	5.4	4.4	3.3	2.1	1.5	0.6	1.1	1.5	2	4.1	4.7	6.2
1993	5.9	4.7	5.9	2.4	1.6	1.1	1.3	2.4	2.9	4	5	5.1
1994	4.8	4	3.2	2.4	1.6	1.2	1.1	1.9	2.5	3.4	3.9	4.6
1995	4.5	3.3	2.9	1.8	1.2	1.1	1	1.6	1.5	2.8	2.8	2.9
1996	3.1	2.3	2	1.3	0.8	0.6	0.6	0.8	1.4	1.9	2.3	2.3
1997	2.2	1.5	1.1	0.7	0.4	0.2	0.4	0.8	1.5	3.3	4.6	5.7
1998	6.2	4.1	4	2.1	1.7	1.1	1.6	2.3	3.2	3.7	5.1	5.6
1999	5.2	4.3	3.7	2.5	1.5	1	1.2	1.7	2	2.7	3.9	5.2
2000	5.1	4.1	3.3	1.8	1.3	0.8	0.8	1.4	1.5	3	4.3	5.8
2001	5.5	4.4	3.9	2.5	1.5	1.4	1.1	1.3	1.8	3.5	4.8	5.3
2002	5.6	4.3	4.4	2.3	1.1	0.7	1	0.9	1.8	3.6	4.4	5.3
2003	5.6	4.7	3.6	2.6	1.6	0.7	0.8	1.7	2.8	3.8	4.8	5.6
2004	5	4.2	3.3	2.2	1.3	1.1	1	1.2	2.2	3.2	3.9	4.8
2005	4.6	3.5	2.8	2	1	0.9	1.1	1.3	1.8	3.1	4.1	5
2006	5.5	4	3.6	2.1	1.4	1	0.8	1.4	2.8	3.6	4.8	5.2
2007	5.2	3.9	3.3	2	1.2	0.9	1.3	1.2	2	3.2	3.8	4.1
2008	4.4	3.7	3.1	1.8	1	0.7	0.6	1.1	1.6	3	3.5	
Promedio	5	3.9	3.4	2.1	1.3	0.9	1	1.5	2.1	3.3	4.2	5

Fuente: Administración Embalse Paloma.

	Dato Faltante
	Dato Dudoso

4.4.3 FILTRACIONES DEL EMBALSE PALOMA

Las pérdidas por filtración es el volumen de agua perdido por el embalse en condiciones normales, en donde el agua se filtra por las capas subterráneas de suelo, alcanzando acuíferos o desplazándose por las capas de suelo, incluso fuera de los límites del embalse.

Se dispone de información de filtración del embalse Paloma, entregada por la D.O.H. de la provincia del Limarí a través de su administración. Las series de datos corresponden a mediciones del año 1985 hasta el año 2008 y la información disponible esta en función del registro del volumen filtrado v/s la cota que se encontraba el embalse al momento de la medición. En la Figura N° 4.4 se presenta la filtración en m³ en función de la cota.

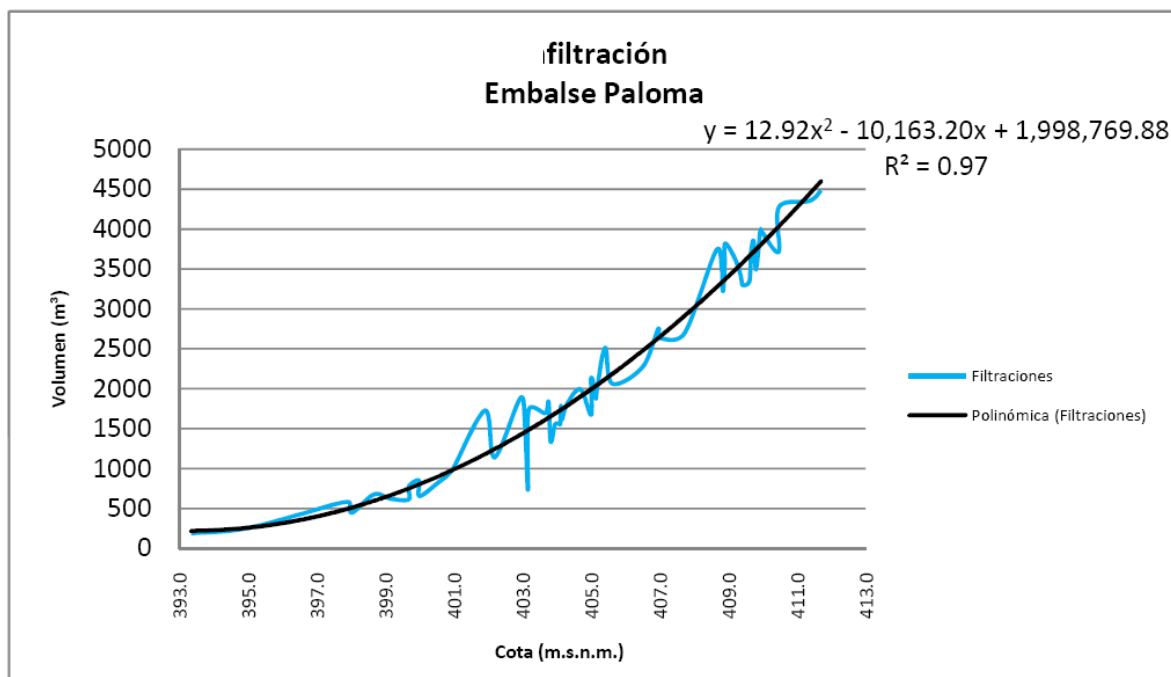


Figura N° 4.3: Representación gráfica de la filtración en función de la altura.
Embalse Paloma. Elaboración propia.

Tabla N° 4.5: Registro filtración en el vaso. Embalse Paloma. Valores en $m^3 \cdot 10^3$.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1985	58	45	42	35							71	67
1986	39	26	23	17	34	35	42	44	46	46	41	42
1987	141	157	167	154	16	16	30	89	89	77	87	130
1988	105	85	85	69	155	152	152	150	144	141	126	118
1989	75	60	53	43	69	66	64	72	77	79	79	82
1990	17	11	9	5	41	35	36	38	37	35	28	25
1991	48	48	48	50	4	5	7	8	9	15	22	37
1992	162	144	155	142	60	74	120	131	135	141	145	170
1993	104	86	81	70	153	129	132	138	132	132	122	116
1994	35	21	16	10	60	56	56	56	53	53	45	41
1995	3	1	0	0	7	7	7	7	7	7	4	3
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
1997	109	108	123	125	0	0	0	0	19	79	80	96
1998	106	83	83	73	131	123	132	134	130	130	119	107
1999	55	39	42	32	63	63	64	64	62	63	56	55
2000	118	109	111	99	30	27	31	48	51	63	77	102
2001	126	98	103	84	97	93	125	114	124	134	130	129
2002	135	120	119	107	82	108	118	124	105	83	86	136
2003	86	67	62	54	107	105	111	108	107	107	99	100
2004	35	24	23	19	42	47	48	52	60	61	52	44
2005	66	57	59	54	18	14	15	20	20	26	52	61
2006	54	50	32	25	51	48	54	61	61	69	75	71
2007	18	16	8	6	24	22	22	22	21	20	19	19
2008					6	5	5	6	7			

Fuente: Administración Embalse Paloma.

	Dato Faltante
	Dato Dudoso

4.5 COMENTARIOS

En el presente capítulo se pretendió dar a conocer el actual manejo operacional con que funciona el embalse Paloma, mencionando los diversos estudios y autores que han formado el actual manejo del embalse paloma.

Es importante señalar que el manejo operacional del embalse Paloma, en la actualidad, está enfocado desde dos puntos de vista: el primero se orienta a repartir equitativamente los volúmenes de agua que logran almacenar los embalses de una temporada para otra, es decir, el manejo se realiza en función de mantener la seguridad de riego de los terrenos que sirve. La segunda orientación, es que el embalse en función del volumen almacenado va manejando un margen o colchón en caso de un aumento de los caudales afluentes a su estructura, realizando un proceso de regulación de crecidas, para lo cual fija una serie de procedimientos a realizar a medida que se produce un aumento en su volumen almacenado.

Además se mencionan, las curvas características del embalse paloma y se revisan los registros de evaporación y filtración que tiene el embalse.

CAPITULO 5

METODOLOGIA DE ANALISIS

5.1 INTRODUCCIÓN

La metodología de análisis se separó en dos temas: el primero de ellos tiene relación con la descripción de las herramientas para generar un modelo de simulación hidrológica que represente de la manera más fiel posible el comportamiento de las aguas afluentes al embalse La Paloma. Para ello se hace uso de un software de simulación hidrológica de uso libre denominado HEC-HMS 3.3, en este contexto se explican además algunos de los métodos incluidos en el software y los parámetros solicitados para cada método utilizado, posteriormente en el proceso de calibración y simulación se obtiene la mejor combinación de parámetros que simulan el comportamiento de las cuencas afluentes al embalse La Paloma, con el fin de poder determinar su caudales de entrada.

El segundo tema analiza la operación de las compuertas del embalse La Paloma. Para esto, se trabajó con la estadística disponible de los años más lluviosos registrados en el embalse, proponiendo una metodología de análisis para la evacuación de las crecidas en años críticos. El método considera como factores el estado inicial del embalse al comenzar la simulación, el caudal afluente entregado por el software HEC-HMS 3.3, la altura de apertura de la compuerta, la cantidad de compuertas que deben abrirse y el volumen de reserva propuesto para recibir las crecidas.

5.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La preocupación inicial al comenzar el estudio, es intentar simular el trabajo del embalse con respecto a su manejo operacional, para ello primero es necesario

ser capaz de modelar el comportamiento de las cuencas afluentes al embalse a través del tiempo, para luego trabajar sobre el embalse y analizar su operación en distintos escenarios de crecidas.

Una vez definidas las características físicas de las cuencas, se dispone a calibrar el modelo físico según su comportamiento en el tiempo, vale decir, se debe ajustar la precipitación caída o acumulada, para luego ser reflejada implícitamente en los caudales de los ríos.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE TRABAJO

5.3.1 Introducción

En este punto se hará una breve descripción de las herramientas utilizadas en la modelación de las cuencas afluentes al embalse Paloma.

Inicialmente se obtiene la zona de estudio descrita en el Capítulo 2, el cual se adquirió de un modelo digital de elevaciones de la cuenca o DEM, según su sigla en inglés (Digital Elevation Model). Este archivo, se obtuvo de la página web del Consorcio de Investigación Espacial, el cual depende del Consultive Group for International Agriculture Research (CGIAR). El enlace para descargar la imagen DEM es el siguiente:

<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

Cada punto del archivo DEM representa la elevación del terreno en ese mismo lugar. De la página web anterior se puede bajar información de la elevación del terreno de prácticamente todo el mundo.

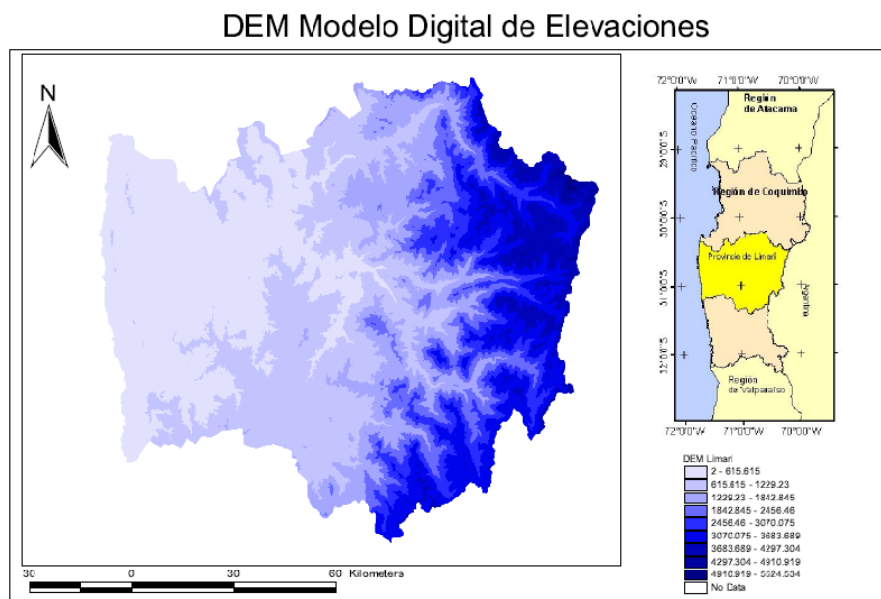


Figura Nº 5.1: Modelo Digital de Elevaciones. Cuenca del Limarí.
Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 HEC-GeoHMS v1.1.

El software HEC-GeoHMS v1.1 es una extensión para la plataforma de ArcView perteneciente a U.S. Army Corps of Engineers y fue utilizado en el procesamiento del archivo DEM, para obtener las características físicas de la cuencas aguas arriba del embalse La Paloma.

El programa ofrece un pre-procesamiento del terreno, permitiendo a los usuarios construir un plan hidrológico de las cuencas en las cabeceras, en las estructuras hidráulicas y en otros puntos de control. HEC-GeoHMS v1.1 prepara la información de terreno para luego ser importada a HEC-HMS 3.3, donde se realiza la simulación.

5.3.3 HEC-HMS 3.3

El software HEC-HMS 3.3 (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) es un modelo hidrológico de eventos aislados y/o continuos desarrollado por el US Army Corp of Engineers de los Estados Unidos.

El software HEC-HMS 3.3 ha sido diseñado para simular el proceso de precipitación escurrimiento de cuencas con drenaje dendrítico. El modelo ha sido concebido para ser aplicado a un gran rango de situaciones geográficas para resolver un gran número de problemas. Esto incluye desde disponibilidad de agua y problemas de inundaciones para grandes cuencas hasta el drenaje urbano de pequeñas cuencas. Los hidrogramas producidos pueden ser utilizados directamente o en conjunto con otros programas para el estudio de problemas relacionados con disponibilidad de agua, drenaje urbano, predicción de inundaciones, impacto de urbanización futura, diseño de aliviaderos para represas, reducción de daños por inundaciones, legislación sobre planicies de inundación y operación de sistemas.

5.4 COMPONENTES DE LAS HERRAMIENTAS DE TRABAJO

5.4.1 Software HEC-GeoHMS v1.1

5.4.1.1 Pre-procesado del terreno

De acuerdo a la sección anterior, el DEM fue descargado en forma gratuita de la plataforma del Consorcio de Información Espacial (CGIAR-CSI). Este archivo necesita ser procesado, debido a que existen depresiones en el mapa digital que provocan que el agua no fluya y se estanque, por lo que produce que el programa genere un encauzamiento de las aguas, lo que distorsiona el cauce real.

Para ello, el DEM escogido se debe “corregir hidrológicamente”, suavizando la superficie del terreno de la cuenca, mediante el relleno de las depresiones y celdas vacías que tenga el archivo. Este proceso, lo realiza la extensión HEC-GeoHMS v1.1 por medio del comando Fill Sink, el cual entrega un DEM sin depresiones. La corrección en sí, corresponde a un relleno de las depresiones existentes en el DEM original, aumentando la cota de las celdas que estén rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta manera el agua podrá fluir de una celda a otra sin “estancarse”.

Finalmente, se obtiene un DEM visualmente idéntico al original, pero internamente ha reacomodado las celdas para minimizar las depresiones, permitiendo al paso del agua a través de los cauces naturales de la zona.

5.4.1.2 Procesado del terreno

Una vez que se obtiene el DEM sin depresiones, se está dispuesto a procesar el terreno, para ello se deben realizar los siguientes pasos:

1. *Flow direction*: En este paso se define la dirección de la mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas de las celdas circundantes a cada una de ellas.
2. *Flow accumulation*: Este paso determina el número de celdas que drenan a cada celda. El área de drenaje de una celda dada se puede calcular multiplicando el número de celdas por el área de cada celda.
3. *Stream definition*: Este paso clasifica todas las celdas con flujo procedente de un número de celdas mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje. El umbral puede especificarse como área en unidades del DEM al cuadrado o como número de celdas. El valor

por defecto es del 1% de la mayor área de drenaje de toda la cuenca y cuanto menor sea el umbral, mayor será el número de subcuencas que defina HEC-GeoHMS v1.1.

4. *Stream segmentation*: Este paso divide los cauces en segmentos. Los segmentos son tramos de cauces situados entre 2 uniones de cauces sucesivas, una unión y la salida, o una unión y el límite de la cuenca.
5. *Watershed delineation*: En este paso, se define una cuenca por cada segmento de cauce.
6. *Watershed Polygon Processing*: Este paso convierte las subcuencas de formato grid a formato vector.
7. *Stream Segment Processing*: Este paso convierte los cauces de formato grid a formato vector.
8. *Watershed Aggregation*: Este paso aglutina las subcuencas que vierten a cada confluencia de cauces.

El procesamiento del terreno puede realizarse paso a paso seleccionando cada uno de los comandos descritos anteriormente o realizarse todos de una sola vez por medio de la instrucción “*Full Processing*”, eventualmente el resultado es el mismo.

Una vez procesado el terreno se obtendrán 8 capas diferentes de la cuenca inicial que en conjunto representaran los atributos físicos e hidrológicos de la cuenca y sub-cuencas del archivo DEM (Ver Figura 5.2).

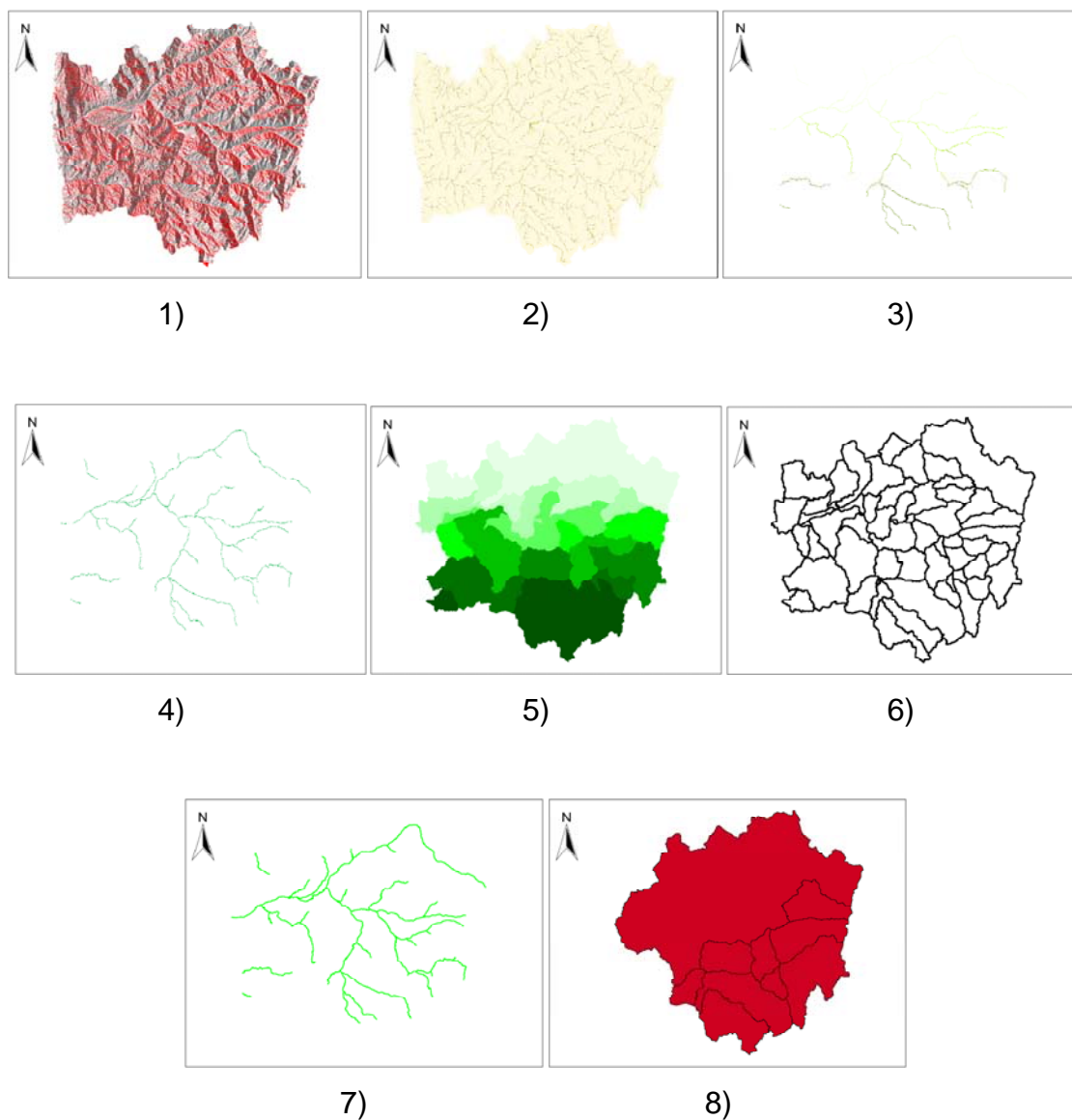


Figura Nº 5.2: Procesado del terreno. 1): Flow direction. 2): Flow accumulation. 3): Stream definition. 4): Stream segmentation. 5): Watershed delineation. 6): Watershed Polygon Processing. 7): Stream Segment Processing. 8): Watershed Aggregation. HEC-GeoHMS v1.1.

5.4.1.3 Delimitación del área de estudio

Una vez que el terreno se ha procesado, se debe escoger el sector de cuenca a analizar, para ello se elige un punto sobre un cauce o río, el cual tomará todas las cuencas afluentes aguas arriba de ese río. Siguiendo la recomendación de la D.O.H. se escoge el sector ocupado por las cuencas afluentes provenientes del río Grande, según se muestra en la Figura N°5.3.

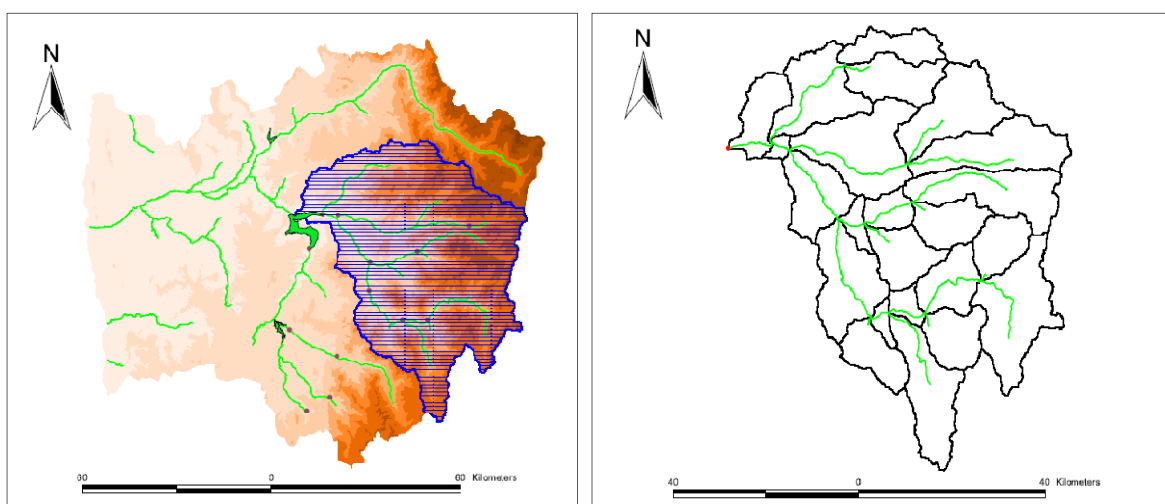


Figura N° 5.3: Definición del área de trabajo. Cuencas sector Río Grande. Cuenca del Limarí. Elaboración propia.

5.4.1.4 Determinación de las subcuencas a utilizar.

Se adoptó la subdivisión de sub-cuencas lo más parecido a la adoptada por D.G.A. en el informe final denominado “*Levantamiento y Catastro de Bocatomas en Cauces Naturales*”, *III Etapa, Santiago 2002*, perteneciente a CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, a continuación la forma de nombrar a las sub-cuencas se realizó en una secuencia desde aguas arriba a aguas abajo. La convención adoptada agrega la sigla “SC” + 01, 02, etc. en forma correlativa.

Como resultado de esta subdivisión se obtuvieron 11 sub-cuencas, correspondientes a las cuencas aportantes al río Grande.

El ordenamiento y disposición final de las sub-cuencas a utilizar se encuentra reflejada en la Figura N° 5.4, además en las Tablas N° 5.1 y N° 5.2, se presenta la ubicación de cada sub-cuenca de acuerdo a la subdivisión D.G.A. y los principales ríos a los que pertenece cada sub-cuenca adoptada, respectivamente.

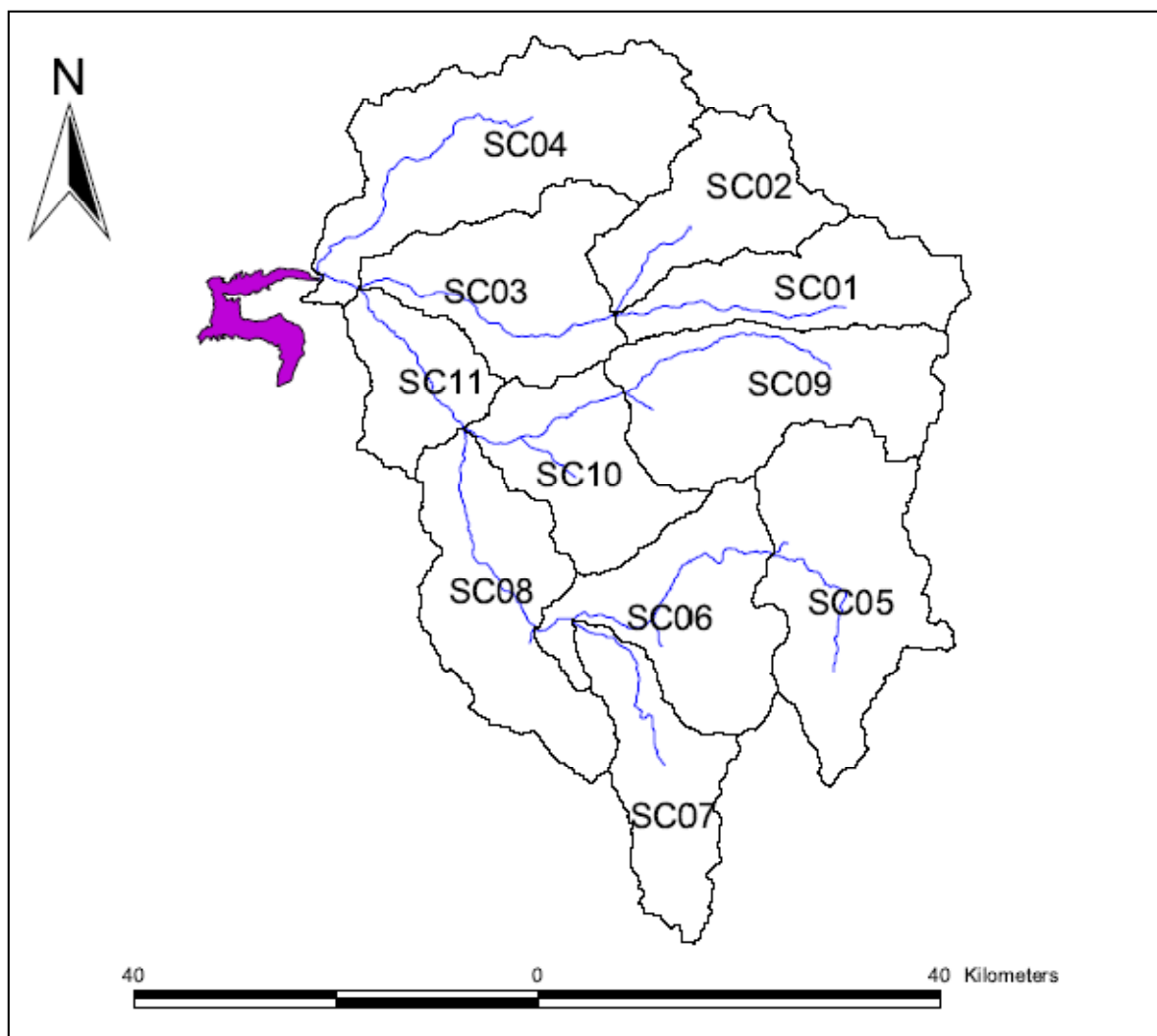


Figura N° 5.4: Sub-cuencas afluentes al Embalse Paloma. Subdivisión adoptada en base a subdivisión D.G.A. Elaboración propia.

Tabla N° 5.1: Nombrado y subdivisión de sub-cuencas de acuerdo a subdivisión DGA.

<i>Código sub-cuenca</i>	<i>Sub-cuenca a la que pertenece</i>
SC01	Sub-cuenca río Grande Medio
SC02	Sub-cuenca río Grande Medio
SC03	Sub-cuenca río Grande Medio
SC04	Sub-cuenca río Grande Medio
SC05	Sub-cuenca río Grande Alto
SC06	Sub-cuenca río Grande Alto
SC07	Sub-cuenca río Grande Alto
SC08	Sub-cuenca río Grande Alto
SC09	Sub-cuenca río Grande Alto
SC10	Sub-cuenca río Grande Alto
SC11	Sub-cuenca río Grande Alto

Fuente: Levantamiento y Catastro de Bocatomas en Cauces Naturales.

Tabla N° 5.2: Principales ríos en sub-cuencas.

<i>Código sub-cuenca</i>	<i>Río al cual pertenece</i>
SC01	Río Molles en junta Río Paloma
SC02	Río paloma
SC03	Río Rapel entre Río Paloma y Río Grande
SC04	Río Grande entre Río Rapel y bajo junta Río Ponio
SC05	Río Grande bajo junta Río Palillos
SC06	Río Grande entre Río Palillos y Río Tascadero
SC07	Río Tascadero
SC08	Río Grande entre Río Tascadero y Río Mostazal
SC09	Río Mostazal en bajo junta Río San Miguel
SC10	Río Mostazal entre Río San Miguel y Río Grande
SC11	Río Grande entre Río Mostazal y Río Rapel

Fuente: Levantamiento y Catastro de Bocatomas en Cauces Naturales.

5.4.1.5 Características físicas de las sub-cuencas

Luego de seleccionar las sub-cuencas a analizar, se deben determinar sus características físicas, para ello HEC-GeoHMS v1.1 calcula varias características topográficas de los cauces y las subcuencas. Estas características son útiles para comparar cuencas entre si y estimar parámetros hidrológicos. A continuación, se presentan los parámetros entregados por HEC-GeoHMS v1.1 (Ver Tabla N° 5.3).

Los parámetros a determinar son los siguientes:

- Área.
- Perímetro.
- Elevación media.
- Pendiente media.
- Longitud del cauce más largo.

Tabla N° 5.3: Características físicas de las subcuencas.

<i>Código sub-cuenca</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Perímetro (m)</i>	<i>Elevación media (m)</i>	<i>Pendiente media (%)</i>	<i>Longitud del cauce mas largo (m)</i>
SC01	258.82	112319.6	3762.7	8.56	40407.1
SC02	246.75	106098.8	2813.3	10.57	31183.3
SC03	318.26	116985.2	1284.2	8.58	37687.8
SC04	520.02	170553.0	2508.8	6.29	57206.1
SC05	429.00	141522.7	2682.7	5.03	41191.9
SC06	338.24	132364.4	1449.7	7.69	35816.7
SC07	240.12	112665.2	2305.8	5.99	42848.3
SC08	361.71	134438.0	1178.4	5.96	46093.2
SC09	392.17	127698.8	3944.7	6.81	42339.6
SC10	247.70	98841.3	1737.8	9.46	32640.9
SC11	173.32	75686.1	682.4	6.82	29556.5

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.6 Determinación de los tiempos de concentración

Ante la imposibilidad de obtener el tiempo de concentración en las diferentes sub-cuencas a partir de datos específicos sobre caudales y precipitaciones, se ha recurrido al empleo de fórmulas empíricas, habitualmente utilizadas en los estudios hidrológicos, habiéndose seleccionado, en principio, las que se indican a continuación:

- Tiempo de concentración según Kirpich
- Tiempo de concentración según Témez
- Método TR-55

La metodología adoptada en cada uno de los métodos mencionados es explicada con mayor detalle en el Anexo 7, cabe mencionar además que la metodología TR-55 viene incluida en la extensión HEC-GeoHMS v1.1 y es quizás la que mejor representa las condiciones orográficas del terreno de cada sub-cuenca (Ver Tabla N° 5.4).

Tabla N° 5.4: *Tiempos de concentración.*

<i>Código sub-cuenca</i>	<i>Témez Tc (h)</i>	<i>Kirpich Tc (h)</i>	<i>TR-55 Tc (h)</i>
SC01	7.95	5.88	5.71
SC02	6.28	4.44	3.94
SC03	7.54	5.57	5.71
SC04	10.99	8.66	8.82
SC05	8.94	7.36	9.06
SC06	7.41	5.59	6.32
SC07	8.90	7.07	6.86
SC08	9.41	7.48	8.62
SC09	8.62	6.67	6.43
SC10	6.63	4.80	4.74
SC11	6.56	5.06	6.03

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.7 Proyecto HEC-HMS 3.3

Una vez concluida la determinación de los parámetros físicos, se debe incluir un proceso de nombrado automático de tramos y subcuencas, además de revisar errores en la conectividad de los cauces para poder producir el esquema de la cuenca y ser enviada al software HEC-HMS 3.3. HEC-GeoHMS v1.1 realiza este proceso automáticamente y genera los siguientes ficheros:

- **.basin
- **.hms
- **.map
- **.mod

Este pequeño grupo de ficheros define un proyecto HMS, el que se puede cargar y ejecutar directamente desde HMS sin más manipulación, aunque se recomienda un control de los datos antes de realizar las simulaciones con HMS.

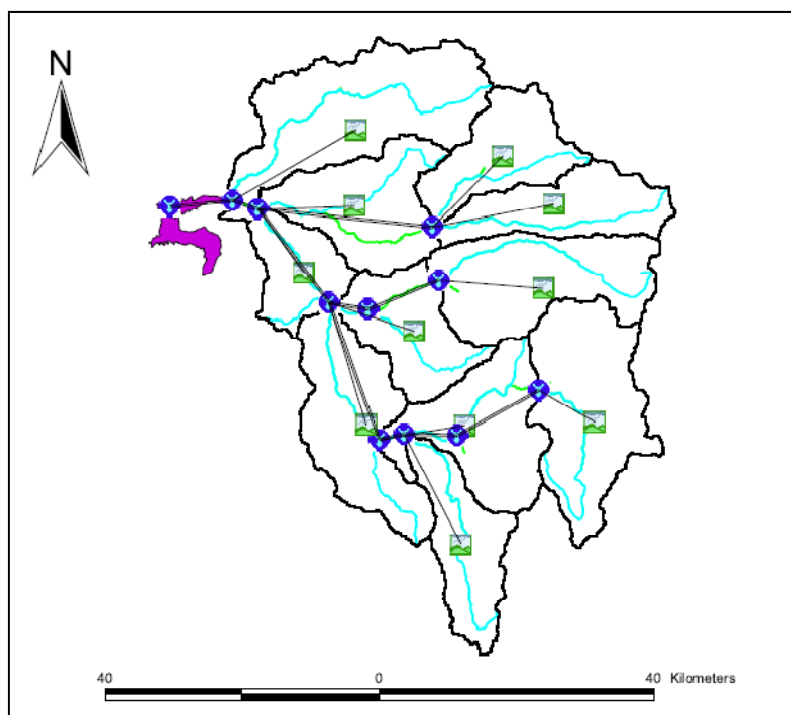


Figura Nº 5.5: Proyecto HEC-GeoHMS v1.1. Representación esquemática de la cuenca del Limarí y la unión de sus elementos. HEC-GeoHMS v1.1.

5.4.2 SOFTWARE HEC-HMS 3.3

5.4.2.1 INTRODUCCIÓN

Para el análisis de las variables hidrológicas de las sub-cuencas que tributan en el embalse Paloma, se utiliza el programa HEC-HMS 3.3 (Hidrologic Model System) de la U.S Army Corps of Engineers. Este software realiza una modelación de cuencas, solicitando la entrada de series de datos de precipitación, temperatura, y fluviometría, entregando el hidrograma de salida de las cuencas analizadas.

La respuesta de las cuencas analizadas es comparada con la estadística de fluviometría y ajustada a través del proceso de calibración a los parámetros introducidos al modelo meteorológico, al modelo de pérdidas y al modelo de transformación precipitación-escorrentía. El objetivo es minimizar el error entre el hidrograma calculado y el observado.

El proceso final consiste en evaluar a través de un proceso de validación, los parámetros ingresados, y compararlos con series de tiempo distintos a los utilizados en el proceso de calibración.

El software esta dividido en 4 esquemas principales:

- Esquema de la cuenca.
- Esquema meteorológico
- Especificaciones de control
- Datos de entrada

5.4.2.2 ESQUEMA DE LA CUENCA

Con objeto de poder representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma, que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En dicha representación esquemática se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los procesos hidrológicos antes descritos.

En este sentido, el programa HEC-HMS 3.3 incluye diferentes tipos de elementos, cuya descripción y funcionalidad se indican a continuación:

- a) **Sub-cuenca:** Este tipo de elemento se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en la sub-cuenca a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base. Se utiliza para representar cuencas vertientes de muy variado tamaño.
- b) **Tramo de cauce:** Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente. Este tipo de elementos se suele utilizar para representar tramos de ríos o arroyos en los que se produce el tránsito de un determinado hidrograma.
- c) **Embalse:** Es un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos, y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente. Se utiliza para poder representar fenómenos de laminación de avenidas en lagos y embalses.

d) **Confluencia:** Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

e) **Derivación:** Este tipo de elemento se caracteriza porque da lugar a dos flujos salientes, principal y derivado, procedentes de uno o más flujos entrantes. Se puede utilizar para representar la existencia de vertederos laterales que derivan el agua hacia canales o zonas de almacenamiento separadas del cauce propiamente dicho.

f) **Fuente:** Junto con la sub-cuenca, es una de las dos maneras de generar caudal en el modelo de cuenca. Se suele utilizar para representar condiciones de contorno en el extremo de aguas arriba, y el caudal considerado puede proceder del resultado del cálculo efectuado en otras cuencas.

g) **Sumidero:** Recibe uno o varios flujos entrantes y no da lugar a ningún flujo saliente. Este tipo de elemento puede ser utilizado para representar el punto más bajo de una cuenca endorreica o el punto de desagüe final de la cuenca en cuestión.

La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total. El esquema de la cuenca lo componen tres tipos de modelo:

- Modelo de pérdidas.
- Modelo de transformación lluvia-caudal.
- Modelo de flujo base.

Cada modelo esta compuesto por un grupo de métodos presentes en el programa según se detalla en la Tabla N° 5.5:

Tabla N° 5.5: Componentes del Esquema de la cuenca. Métodos ofrecidos por el software HEC-HMS 3.3.

<i>Tipo de modelo</i>	<i>Método</i>
<i>Pérdidas</i>	Déficit y tasa constante (DC)
	Inicial y tasa constante
	Exponencial
	Número de curva CN SCS
	Green y Ampt
	Consideración de la humedad del suelo (SMA)
	DC por celdas
	CN SCS por celdas
	SMA por celdas
<i>Transformación lluvia-caudal</i>	Hidrograma Unitario (HU) de Clark
	Onda cinemática
	ModClark
	HU SCS
	HU Snyder
	HU especificado por el usuario
<i>Flujo Base</i>	Hidrograma en S del usuario
	Recesión restringida
	Constante mensual
	Depósito lineal
	Recesión

Fuente: Archivo ayuda del HEC-HMS.

5.4.2.3 ESQUEMA METEOROLÓGICO

El esquema meteorológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de cada sub-cuenca. El esquema meteorológico puede usar precipitación puntual o por celdas, y puede modelar precipitación sólida y líquida. Los métodos de evapotranspiración incluyen el método constante mensual y el de Priestley Taylor. El método de derretimiento de nieve a la vez también puede desarrollarse puntual o por celdas ocupando el método de la Temperatura Índice. Un método de evapotranspiración se requiere únicamente cuando se desee una respuesta de la cuenca continua o a largo plazo. El esquema meteorológico lo componen tres tipos de modelos de acuerdo a la Tabla N° 5.6:

Tabla N° 5.6: Componentes del Esquema meteorológico. Métodos ofrecidos por el software HEC-HMS 3.3.

<i>Tipo de modelo</i>	<i>Método</i>
<i>Precipitación</i>	Tormenta asociada a frecuencia Pluviómetros con pesos Precipitación por celdas Inversa de la distancia Tormenta del SCS Hietograma especificado Tormenta de proyecto estándar
<i>Evaporación</i>	Priestley-Taylor por celdas Promedios mensuales Priestley-Taylor
<i>Derretimiento de nieve</i>	Método Temperatura Índice por celdas Método Temperatura Índice

Fuente: Archivo ayuda del HEC-HMS.

5.4.2.4 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo fecha, hora de inicio y fin del proyecto e intervalo de cálculo, además puede realizarse para ver la respuesta de la cuenca en minutos o a través de los años.

5.4.2.5 DATOS DE ENTRADA

Son todos los datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas que son requeridos como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de la cuenca y meteorológicos. Los datos de entrada pueden introducirse a mano o bien pueden referenciarse a un registro en un fichero HEC-DSS (HEC-Data Storage System).

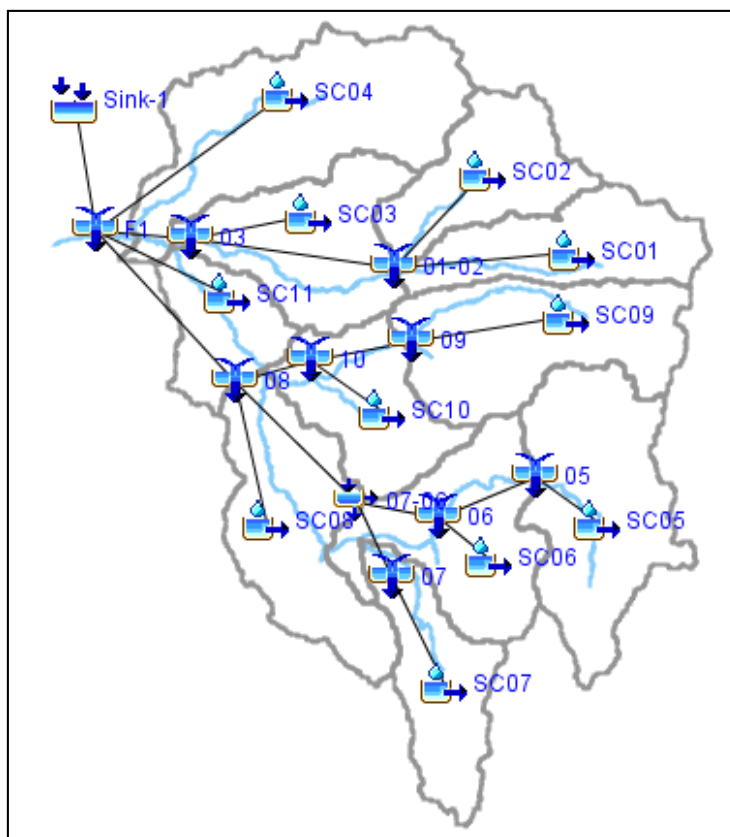


Figura N° 5.6: Esquema modelación cuenca hidrológica. Elaboración propia HEC-HMS 3.3.

5.5 APLICACIÓN SOFTWARE HEC-HMS 3.3

5.5.1 INTRODUCCIÓN

Esta sección define los componentes del esquema de la cuenca, del esquema meteorológico, de las especificaciones de control y de los datos de entrada utilizados en las cuencas afluentes al embalse Paloma.

5.5.2 MODELOS ADOPTADOS

5.5.2.1 PÉRDIDAS

El método escogido para calcular las pérdidas de las subcuencas es el método SMA (Soil Moisture Accounting), El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, como se muestra esquemáticamente en la Figura N° 5.7, en la que se pueden ver también las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos. Este procedimiento considera cinco niveles de retención y almacenamiento de agua:

- a) *Interception Canopy* (Interceptación en la cubierta vegetal). Representa la parte de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno. La única entrada son las precipitaciones y la única salida la evapotranspiración. El programa HMS coloca aquí las primeras precipitaciones hasta que se alcance la capacidad máxima.
- b) *Surface depression storage* (Almacenamiento en depresiones superficiales). Representa el almacenamiento de agua en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones. La entrada son las precipitaciones que no han sido interceptadas por la vegetación. Las salidas son inicialmente la infiltración y la ET. Posteriormente, si el volumen almacenado supera el máximo establecido, esta agua pasará a la escorrentía superficial.

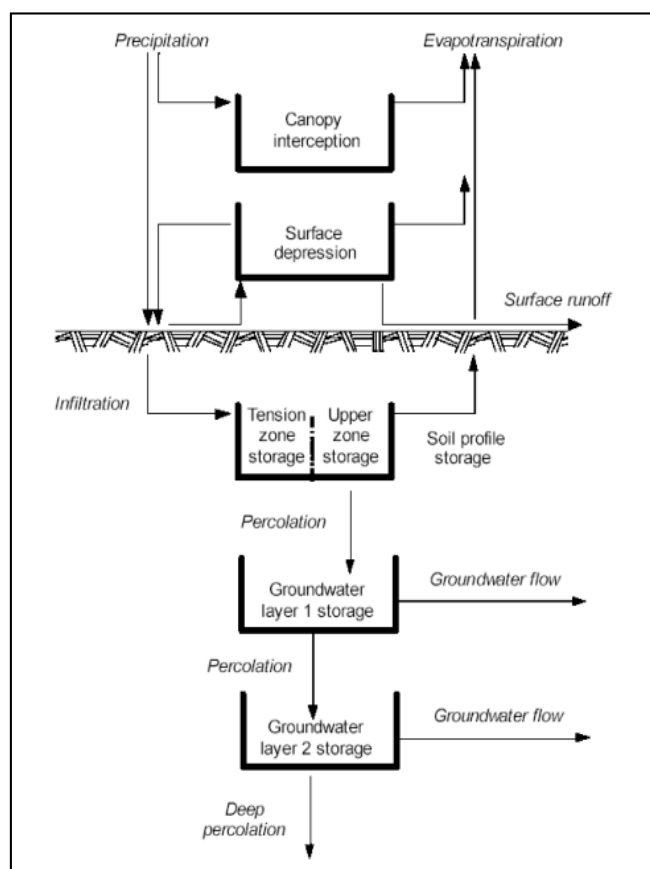


Figura N° 5.7: Método SMA. Representación esquemática de los niveles de infiltración que considera el método. Archivo de ayuda HEC-HMS 3.3.

- c) *Soil profile storage* (almacenamiento en el suelo). Pasando al interior del terreno, hay que señalar la existencia de un depósito que trata de representar el fenómeno complejo de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo, que está dividido, a su vez, en dos zonas: la upper zone, que está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o percolación, y la tension zone, que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. En realidad, la subdivisión del depósito de almacenamiento del suelo en dos zonas trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo. La entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas son la ET y la percolación hacia el acuífero subyacente.

- d) *Groundwater storage*. (Almacenamiento en los acuíferos). El modelo HMS distingue dos niveles: un acuífero más superficial, “Layer 1”, que recibe directamente la percolación del agua gravífica que no ha sido atrapada por la ET y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero más superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o bien percolar hacia un acuífero más profundo, “Layer 2”. Análogamente, desde este acuífero el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea o percolar aún más profundamente; en este caso el modelo considera esta agua perdida, sale del sistema y no será considerada.

Para la modelación de los procesos hidrológicos que se desarrollan en cada sub-cuenca, hay que establecer los valores de 18 parámetros mostrados en la Figura N° 5.7, pertenecientes al modelo SMA reflejados en la Tabla N° 5.7.

Para la estimación de los valores de los parámetros de la Tabla N° 5.7, hay que tener en cuenta que unos tienen más repercusión que otros en los resultados obtenidos. Además, algunos de ellos influyen más en épocas de lluvias y otros tienen más repercusión en el caso de períodos secos. De todo ello se deduce la importancia que adquiere el hecho de tener un buen conocimiento del funcionamiento del programa HEC-HMS 3.3 y de la respuesta que cabe esperar ante la modificación de algunos parámetros.

La dificultad se acrecienta, por otro lado, al comprobar que diferentes combinaciones de valores de los parámetros pueden proporcionar resultados muy parecidos.

Para hacer frente a todas estas dificultades, se utilizan diferentes tipos de estrategias, dependiendo de las características de cada uno de los parámetros. Así, en aquellos parámetros que tienen un cierto sentido físico se trata de establecer relaciones entre sus valores y algunas características geomorfológicas

de las cuencas, recurriendo para ello a expresiones matemáticas o a la utilización de tablas, con rangos de valores orientativos, propuestas por diferentes autores.

Tabla Nº 5.7: *Parámetros solicitados por modelo SMA.*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>
<i>Canopy</i>	%
<i>Surface</i>	%
<i>Soil</i>	%
<i>Groundwater 1</i>	%
<i>Groundwater 2</i>	%
<i>Canopy Storage</i>	mm
<i>Surface Storage</i>	mm
<i>Soil Storage</i>	mm
<i>Tension Storage</i>	mm
<i>GW 1 Storage</i>	mm
<i>GW 2 Storage</i>	mm
<i>Max Infiltration</i>	mm/h
<i>Soil Percolation</i>	mm/h
<i>GW 1 Percolation</i>	mm/h
<i>GW 2 Percolation</i>	mm/h
<i>GW 1 Coeficient</i>	h
<i>GW 1 Coeficient</i>	h
<i>Impervious</i>	%

Fuente: Archivo ayuda del HEC-HMS.

Los valores de algunos de los parámetros que no tienen un significado físico claro están sujetos a algunos condicionantes de tipo matemático, dentro de la definición del modelo, lo cual limita el rango de variación de los mismos. Finalmente, hay algunos parámetros cuyos valores se estiman directamente por criterios de tipo subjetivo, comparándolos con los adoptados en otros estudios similares.

En cualquier caso, los valores de los parámetros se pueden determinar también mediante un proceso de calibración, siempre y cuando se cuente con hidrogramas reales. No obstante, con objeto de facilitar el desarrollo del proceso

de calibración, se suele recurrir a los procedimientos antes indicados para el establecimiento de los valores iniciales de los parámetros.

A continuación se resume la información recopilada en cuanto a tablas, cuadros, fórmulas y métodos utilizados para el establecimiento de los valores iniciales de los parámetros que intervienen en los diferentes modelos considerados, sin que ello haya supuesto una solución definitiva al problema planteado en relación con los valores de los parámetros.

I) Valores con unidad en porcentaje

a) Canopy, Surface, Soil, GW1 y GW2

Los cinco primeros parámetros cuya unidad se expresa en porcentaje, representan los contenidos iniciales de llenado de los depósitos de almacenamiento de agua al inicio del análisis. Debido a que en el modelo se va a realizar es un análisis continuo, casi se puede decir que el valor adoptado para cada uno de ellos es irrelevante, ya que afecta tan sólo al comportamiento del modelo en las primeras etapas (algunas semanas) de la simulación.

b) Impervious

Abarca el porcentaje de área de la cuenca que es impermeable. Este valor a priori es muy difícil de establecer, más aun cuando no existen registros de la impermeabilidad en la zona, sin embargo en zonas con abundante vegetación y arboles se espera que esta impermeabilidad sea muy baja cercana al 15 o 20 %. Del mismo modo en zonas intervenidas por el hombre o demasiado urbanizadas, se esperan porcentajes de impermeabilidad muy cercanos al 90 %.

II) Valores con unidad en mm

a) Canopy Storage

El parámetro refleja la máxima capacidad de almacenamiento en la cubierta vegetal. Dicho valor depende del tipo de vegetación y usos del suelo, existiendo en la literatura especializada varios criterios, en forma de tablas, propuestos por diferentes autores. En principio se ha seleccionado, el criterio utilizado en el “Estudio de Evaluación de los Recursos Hídricos Totales en el Ámbito de la CAPV”, que se refleja en la Tabla N° 5.8.

Tabla N° 5.8: Valores de capacidad de almacenamiento en la cubierta vegetal.

<i>Cobertura del suelo</i>	<i>Capacidad de almacenamiento(mm)</i>
<i>Bosque 100 %</i>	9,0
<i>Bosques coníferos</i>	< 5,1
<i>Bosques de hoja caduca</i>	< 2,0
<i>Matorrales y arbustos</i>	< 2,0
<i>Vegetación en general</i>	< 1,3
<i>Desnudo</i>	0,0

Fuente: “Estudio de evaluación de los recursos hídricos totales en el ámbito de la CAPV”, (2003).

b) Surface Storage

Es la máxima capacidad de almacenamiento superficial del agua en depresiones, esto quiere decir, agua que queda estancada sobre la superficie del suelo debido a surcos, obstáculos o fallas en el suelo y que esta íntimamente ligada a la pendiente y al tipo de suelo. Bennet (1998) recoge en su Tesis Doctoral los valores inicialmente estimados por Dunne y Leopold (1978) y Chow (1964), que se reflejan en la Tabla N° 5.9.

Tabla Nº 5.9: Valores de la máxima capacidad de almacenamiento en la superficie.

Descripción	Capacidad de almacenamiento (mm)
Zonas pavimentadas, Áreas Impermeables	3,2 - 6,35
Pendientes fuertes	1,0
Pendientes Moderadas a suaves	6,35 - 12,7
Terrenos planos con surcos	50,8

Fuente: Plan de investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria, (2004).

c) Soil Storage

Para la estimación de la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, es necesario, en general, tener un conocimiento detallado del espesor del suelo y de su porosidad. En este sentido, hay que comenzar por señalar que no existe ninguna publicación en la que se determinen los distintos espesores de suelo en las cuencas afluentes al embalse Paloma. Además se debe agregar que en el caso de HEC-HMS 3.3 la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo viene dado por la ecuación 5.12.

$$S_{Soil} = S_{Tension\ zone} + S_{Upper\ zone} \quad (5.1)$$

En donde S_{Soil} es el Soil Storage en [mm]; $S_{Tension\ zone}$ corresponde a Tension Storage en [mm] y $S_{Upper\ zone}$ corresponde a la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de la *upper zone* en [mm]. Vale decir, Soil Storage es la suma de la capacidad de almacenamiento de la zona de tensión y en la zona superior de agua libre.

Antes que nada, es necesario definir los valores de la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para la *upper zone* $S_{Upper\ zone}$. Los

manuales entregan una tabla, en la cual, la capacidad de este estanque depende inversamente de la frecuencia de la escorrentía superficial (Ver Tabla N° 5.10).

Sin embargo, las limitaciones asociadas a este método son:

- El parámetro depende solamente de una variable.
- Son indefinidos los calificativos de las tormentas: “*casi todas*”, “*regulares*” y “*grandes*”.
- En algunas tormentas no es claro si se produjo o no escorrentía superficial.
- Si el intervalo de tiempo de simulación es grande (12 o 24 horas), es posible que durante la calibración este parámetro debe disminuirse. HEC-HMS 3.3 supone que la precipitación cae uniformemente durante un intervalo de tiempo, generándose intensidades de lluvia mucho menores que las reales.

Tabla N° 5.10: Valores de la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para la upper zone.

<i>Frecuencia de escorrentía superficial</i>	<i>$S_{Upper\ zone}$ (mm)</i>
<i>En casi todas las tormentas</i>	10.2 – 15.2
<i>Tormentas regulas y fuertes</i>	15.2 – 25.4
<i>Solo durante grandes tormentas</i>	25.4 – 40.6
<i>Nunca</i>	> 40.6

Fuente: HMS help file.

Por ultimo, cabe mencionar que a través de la revisión de diferentes trabajos realizados con HEC-HMS 3.3, en algunos lugares se ha constatado que el máximo valor que puede alcanzar $S_{Upper\ zone}$ bordea los 150 mm e incluso más..

d) Tension Storage

Como se menciono anteriormente el agua contenida en la capa superior del suelo esta dividida por dos zonas: la primera denominada *upper zone* que está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o percolación, y la *tension zone*, que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. El software nos solicita la entrada en mm de la Tension Storage que es la máxima capacidad de almacenamiento de agua dentro del estrato de suelo en la *tension zone*.

Este parámetro puede determinarse considerando una lluvia precedida por un período seco. El lapso sin lluvia debe ser suficientemente largo como para dejar agotado el estanque y la precipitación lo suficientemente apreciable como para llenarlo y rebasarlo. Cuando se da esta situación el agua se infiltra y percola. Dependiendo de la tasa de infiltración y de las características de la cuenca, se produce aumento de flujo base y de escorrentía superficial. Esto se refleja en un aumento considerable de caudal. La capacidad de este elemento de almacenamiento se evalúa como la suma las precipitaciones de los días anteriores al aumento brusco del hidrograma.

Esta manera de obtener el almacenamiento en la zona de tensión se condicionada a que:

- En el común de los casos este estanque no se encuentra agotado al producirse una precipitación que sea capaz de llenarlo.
- Por lo general este estanque se llena durante un intervalo de tiempo en que la precipitación es muy apreciable.

e) GW 1, GW 2 Storage.

Estos estanques representan los volúmenes de la máxima capacidad de almacenamiento para flujo base primario y flujo base secundario.

Debido a la falta de información respecto de este punto se ha adoptado los valores iniciales que se entregan en el anexo 2 del estudio denominado “*Plan de investigación integral para la caracterización y diagnostico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria*”, (2004), de manera arbitraria con el objetivo de ir mejorándolos a medida que se desarrolla la calibración, para ello se han asignados los siguientes valores:

- El valor de la máxima capacidad de almacenamiento del primero de los depósitos subterráneos se ha supuesto igual a 20 mm.
- Para el segundo de los depósitos subterráneos, el valor de la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el mismo se ha supuesto igual a 30 mm.

Estos valores son solo los valores iniciales supuestos para ambos depósitos, lo que sin duda variarían a lo largo de la calibración.

III) Valores con unidad en mm/h

a) Infiltración

Skaggs y Khaleel (1982) propusieron valores concretos para la capacidad máxima de infiltración, Partiendo de la agrupación de los suelos (A, B, C y D), establecida por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos presentada en la Tabla N° 5.11.

Tabla N° 5.11: Infiltración superficial.

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Infiltración superficial (mm/h)</i>
<i>A</i>	7,6 - 11,4
<i>B</i>	3,8 - 7,6
<i>C</i>	1,3 - 3,8
<i>D</i>	0,0 - 1,3

Fuente: Estudio de Recursos Hídricos de Cantabria, anexo 2 (2004).

Por otro lado en la tesis de Gaete Vergara denominada “Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado” año 2001, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Talca, hace mención a dos tablas obtenidas de “Handy Data for the Sprinkling Expert, Perrot”. Estos valores son presentados en las Tablas N° 5.12 y N° 5.13 y relacionan la textura del suelo con un factor reductor de acuerdo a la pendiente que tenga el mismo suelo.

Tabla N° 5.12: Capacidad de Infiltración de agua, según tipo de suelo.

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Capacidad de Infiltración (mm/h)</i>
<i>Arenoso</i>	20
<i>Franco - Arenoso</i>	12
<i>Franco</i>	10
<i>Arcilloso</i>	8

Fuente: Gaete Vergara, “Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado”, (2001).

Tabla Nº 5.13: Disminución de la capacidad de Infiltración, según porcentaje de pendiente.

Pendiente (%)	% de disminución
Bajo 5	0
5 a 8	20
9 a 12	40
13 a 20	60
Sobre 20	75

Fuente: Gaete Vergara, "Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado", (2001).

b) Soil Percolation, GW 1 Percolation y GW 2 Percolation

La tasa máxima de percolación (Soil Percolation) esta definida como la tasa de movimiento entre el perfil del suelo y la capa de agua subterránea. De acuerdo al informe final de "Modelación de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Rio Maule", (2005) de la Universidad de Chile, la percolación puede ser considerada como un porcentaje de la infiltración de acuerdo a la Figura Nº 5.8 y la Tabla Nº 5.14:

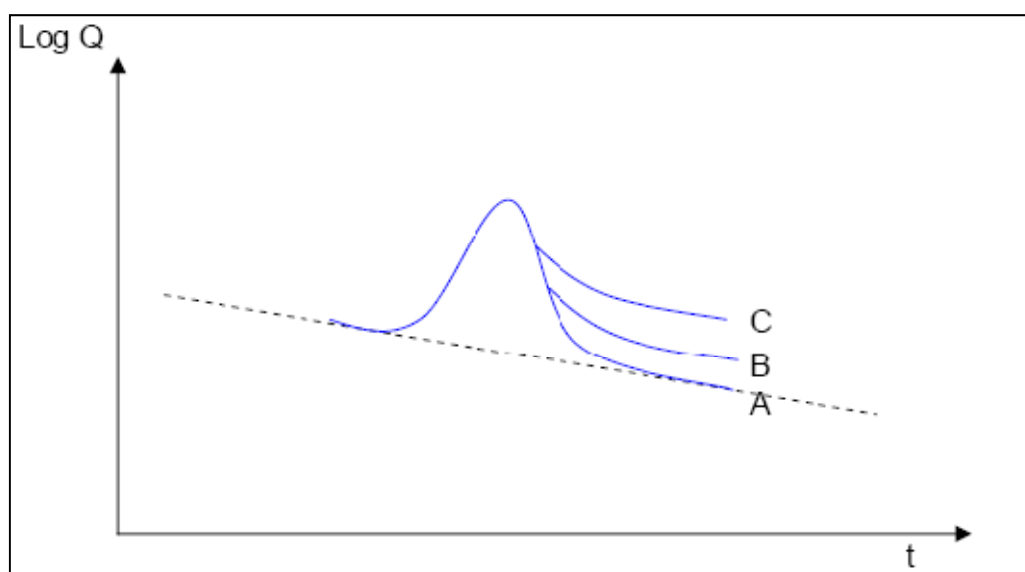


Figura Nº 5.8: Relación aumento o disminución del flujo base. Fuente: "Modelación de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Rio Maule", (2005)

Tabla Nº 5.14: Determinación tasa de Percolación.

Caso	Aumento del flujo base	% de la infiltración correspondiente a Percolación
A	Pequeña o nada	0 a 0.1
B	Notable	0.2 a 0.3
C	Significativo	0.4 a 0.5

Fuente: “Modelación de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Río Maule”, (2005)

Para determinar las tasas de percolación en los estanques a GW1 (Flujo base primario) y GW2 (flujo base secundario), algunos autores han sugerido utilizar la conductividad hidráulica del suelo, como valor de percolación de las capas subterráneas, sin embargo y debido a la falta de información del tipo suelo presente en el área de estudio, se tomaran como referencia inicial los valores aparecidos en el estudio “Modelación de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Río Maule”, (2005) de la Universidad de Chile:

$$\text{GW1 Percolation} = 0.019$$

$$\text{GW2 Percolation} = 0.113$$

IV) Valores con unidad en h

De acuerdo a el anexo 2 del “Plan de investigación integral para la caracterización y diagnostico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria”, (2004) los valores de los coeficientes de almacenamiento de los dos depósitos subterráneos de almacenamiento de agua, son directamente proporcionales a la superficie de la cuenca vertiente.

- En relación a esto mismo, hay que precisar que el valor de dicho coeficiente, para el primero de los dos depósitos subterráneos de almacenamiento de agua, se ha considerado aproximadamente igual a 80-

100 horas, para las cuencas de superficie menor o igual que 100 km², aumentando su valor hasta 300 horas para cuencas de superficie aproximadamente igual a 450 km² y valores superiores para cuencas de mayor envergadura.

- Para el coeficiente de almacenamiento del segundo de los depósitos considerados, se ha supuesto un valor medio de 1.000 horas, habida cuenta de que la variación del mismo en función del área drenada, aunque existe, es mucho menor que en el caso anterior, en términos relativos.

De las conclusiones obtenidas en el estudio *“Modelación de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Río Maule”*, (2005) de la Universidad de Chile, se puede mencionar que para valores altos de K cercanos a 2000 horas, se reproducen muy bien los flujos primarios, pero se hace muy difícil reproducir con nitidez la señal para valores intermedios. Para valores bajos de K , entre 50 y 100 horas, se reproducen muy bien los flujos secundarios, pero es muy difícil reproducir de manera adecuada los caudales extremos (peaks altos, y caudales mínimos).

De las consideraciones anteriores se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla N° 5.15, considerados como valores iniciales antes de comenzar el proceso de calibración:

Tabla Nº 5.15: Valores iniciales adoptados para el método SMA. Parte I. Elaboración propia.

Código Sub-cuenca SMA	SC01	SC02	SC03	SC04	SC05	SC06	SC07	SC08	SC09	SC10	SC11
Canopy (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Surface (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Soil (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Groundwater 1 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Groundwater 2 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canopy Storage (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Surface storage (mm)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Max. Infiltration (mm/h)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Impervious (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 5.15: Valores iniciales adoptados para el método SMA. Parte II. Elaboración propia.

Código Sub-cuenca SMA	SC01	SC02	SC03	SC04	SC05	SC06	SC07	SC08	SC09	SC10	SC11
Soil storage (mm)	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Tension Storage (mm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Soil Percolation (mm/h)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
GW1 Storage (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
GW1 Percolation (mm/h)	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
GW1 Coefficient (h)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
GW2 Storage (mm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
GW2 Percolation (mm/h)	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
GW2 Coefficient (h)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2.2 TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL

El método escogido para realizar la transformación lluvia-caudal es el modelo de Clark, la elección entre las diferentes alternativas contempladas por el programa HEC-HMS 3.3 y referidas en el apartado 5.4.2.2, está justificada básicamente por el tipo de estudio a realizar y la cantidad información disponible en relación con las cuencas en cuestión.

El citado modelo de Clark considera dos parámetros, el tiempo de concentración (t_c) y el coeficiente de almacenamiento (R), cuyos valores deben ser definidos por el usuario. El coeficiente de almacenamiento, que se expresa en unidades de tiempo (h), es un índice del almacenamiento temporal de la precipitación excedente en el interior de la cuenca, que drena hacia el punto de desagüe de la misma.

En relación con la estimación del coeficiente de almacenamiento (R), existen fórmulas propuestas por diferentes autores, que tratan de relacionarlo con las características físicas de la cuenca. Dichas fórmulas presentan serias dudas sobre su aplicabilidad en cuencas diferentes de aquellas que se han utilizado para su establecimiento, por lo que se ha desechado su utilización. Como alternativa, se ha considerado la siguiente expresión empírica, habitualmente utilizada en la práctica:

$$\lambda = \frac{R}{t_c + R} \quad (5.2)$$

En donde λ corresponde a el parámetro, cuyo valor se sitúa en un rango de variación comprendido entre 0.1 y 0.9, correspondiendo este último valor a zonas con poca pendiente y uso agrícola; t_c el tiempo de concentración en horas y R es el coeficiente de almacenamiento en horas.

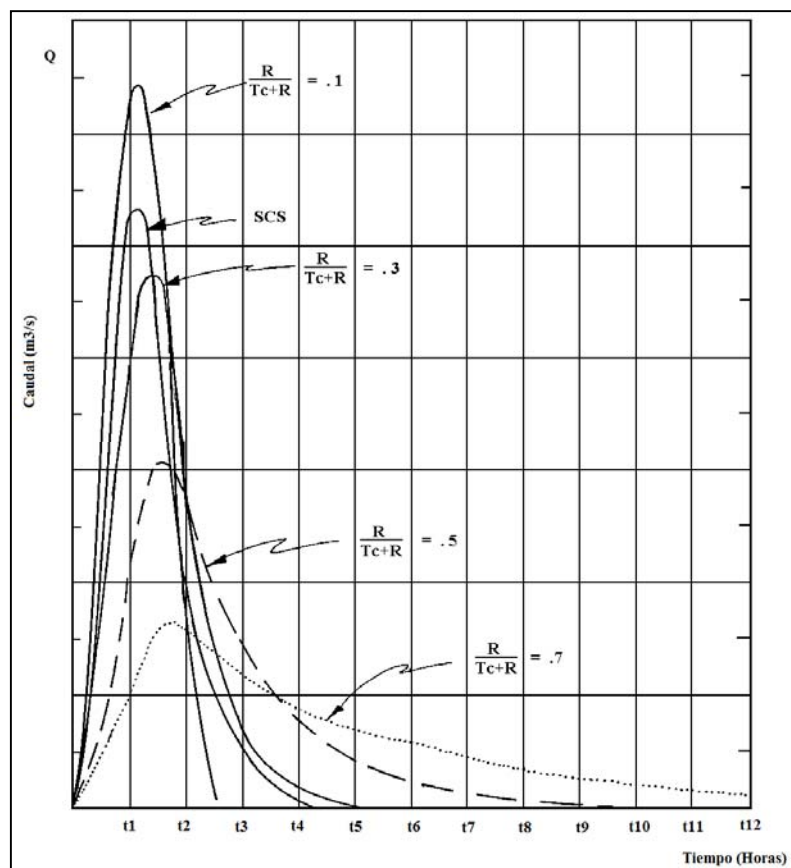


Figura N° 5.9: Hidrograma Unitario de Clark, para varias relaciones.

Fuente: EM 1110-2-1417, USACE 1994.

De acuerdo a la Figura N° 5.9, mientras mas cercano a 1 sea el valor del parámetro λ (cuencas de pendientes suaves), más bajo es el peak y más ancho el hidrograma. Al revés mientras menor sea la relación (cuencas de pendientes fuertes), mas alto será el peak y mas angosto su ancho, esta respuesta es la que se asemeja al comportamiento de las cuencas urbanas.

De acuerdo a lo anterior se crea una escala arbitraria, en la cual se le asignan valores de λ a los valores de las pendientes medias de las subcuencas, obteniéndose los siguientes valores de R para cada una de las subcuencas y para cada método de obtención del tiempo de concentración.

Tabla N° 5.16: Valores adoptados del método del Hidrograma Unitario de Clark. Fuente: Elaboración propia.

Código sub-cuenca	Pendiente media (%)	λ	Témez T_c (h)	R (h)	Kirpich T_c (h)	R (h)	TR-55 T_c (h)	R (h)
SC01	8.56	0.91	7.95	84.9	5.88	62.8	5.71	61.0
SC02	10.57	0.89	6.28	67.3	4.44	49.8	3.94	48.3
SC03	8.58	0.91	7.54	84.7	5.57	62.7	5.71	60.8
SC04	6.29	0.94	10.99	118.5	8.66	87.6	8.82	85.0
SC05	5.03	0.95	8.94	150.1	7.36	111.0	9.06	107.8
SC06	7.69	0.92	7.41	95.5	5.59	70.6	6.32	68.5
SC07	5.99	0.94	8.90	124.8	7.07	92.3	6.86	89.6
SC08	5.96	0.94	9.41	125.5	7.48	92.8	8.62	90.1
SC09	6.81	0.93	8.62	108.8	6.67	80.5	6.43	78.1
SC10	9.46	0.91	6.63	76.1	4.80	56.3	4.74	54.6
SC11	6.82	0.93	6.56	108.6	5.06	80.4	6.03	78.0

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2.3 FLUJO BASE

La elección del tipo de modelo a utilizar para representar la contribución del flujo base en el hidrograma total resultante en el punto de desagüe de la cuenca está condicionada por la utilización previa del modelo SMA. En cuanto al modelo a utilizar, es el modelo de depósitos lineales, es decir, el que supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales sucesivos, tal como se indica en el esquema de la Figura N° 5.10.

En general, se establecen dos modelos de depósitos lineales independientes, cuyos parámetros pueden tener valores diferentes en uno y otro caso. Cada uno de los mencionados depósitos lineales, tienen un mismo valor del coeficiente de almacenamiento, que es uno de los parámetros del modelo que debe definir el usuario. El otro parámetro es el número de depósitos conectados en serie. A falta de mayor información al respecto, se ha utilizado un criterio simplista para estimar los valores iniciales de dichos parámetros.

Dicho criterio ha consistido en suponer que el coeficiente de almacenamiento de cada uno de ellos es igual al correspondiente del depósito de agua subterránea al que se encuentra asociado en el modelo SMA, y que el número de depósitos lineales es igual a la unidad en ambos casos.

El caudal de salida final de cada una de las dos series de depósitos lineales se combina para constituir el hidrograma del flujo base, que se suma al resultante de la aplicación del modelo de Clark para dar lugar al hidrograma global en el punto de desagüe de la cuenca.

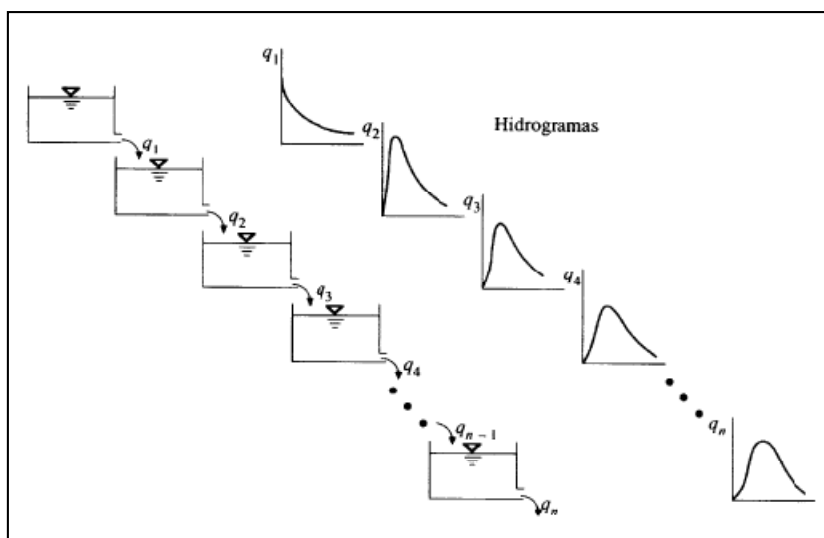


Figura Nº 5.10: Depósitos lineales en serie. Fuente: Plan de investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria, (2004).

5.5.3 COMPONENTES DEL MODELO METEOROLÓGICO

5.5.3.1 PRECIPITACIÓN

El método de los Polígonos de Thiessen, fue el método escogido para cuantificar la precipitación media caída en cada sub-cuenca. Este método resalta por sobre los demás porque es el procedimiento más sencillo y fácil de

implementar en el programa HEC-HMS. Los polígonos de Thiessen asignan el peso que tiene una estación medidora de precipitación a un cierto territorio, dicho de otra manera, representa el porcentaje de acción de un pluviómetro sobre una determinada área de una cuenca.

En el esquema de la Figura N° 5.11 se presenta la subdivisión de los polígonos de Thiessen, el cual se realizó en la plataforma ArcView Gis 3.2a y consistió básicamente en la obtención de las áreas de influencia de los pluviómetros.

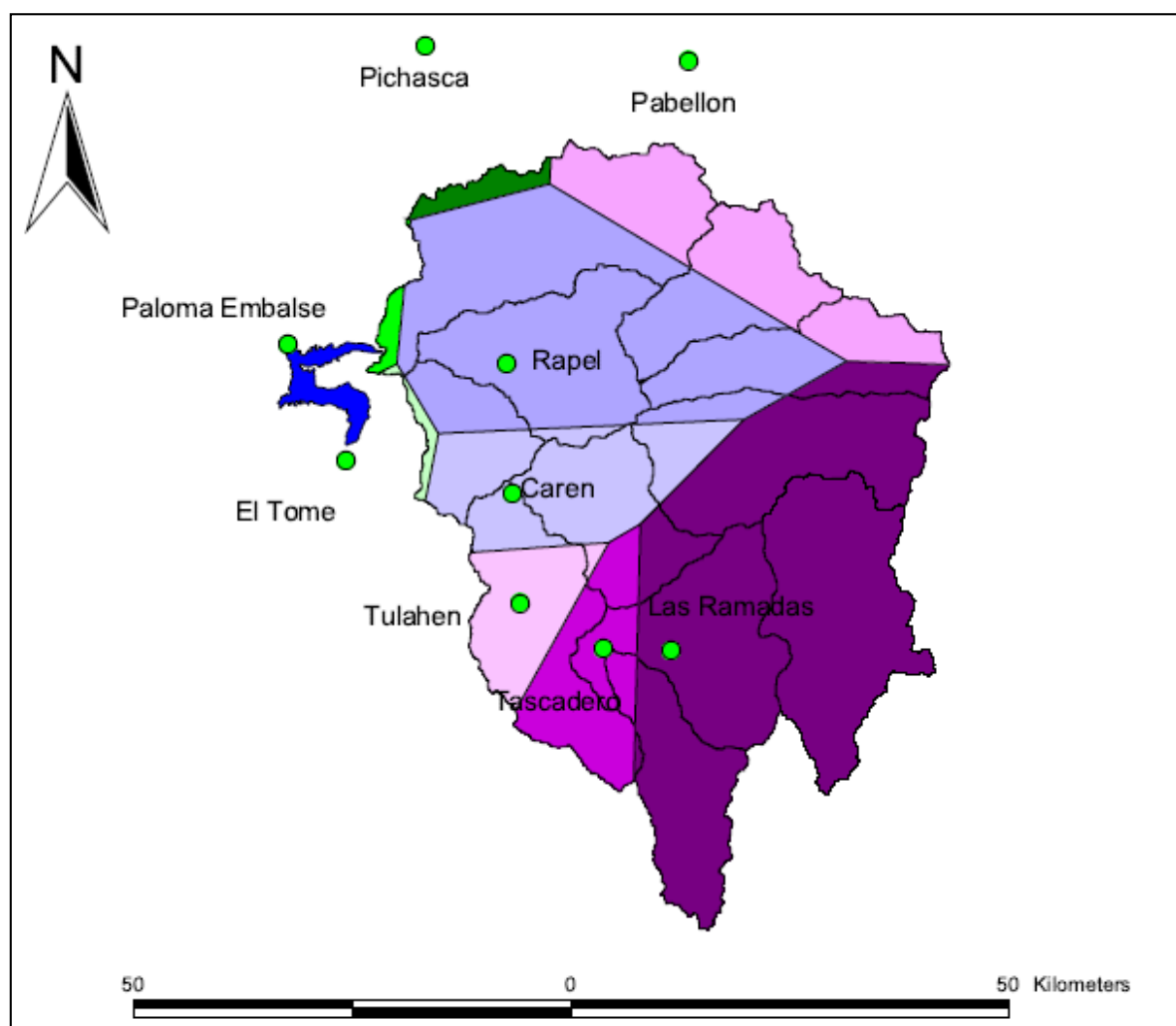


Figura N° 5.11: Esquema de los polígonos de Thiessen de precipitación. Elaboración propia

Los pluviómetros considerados son los presentados en el Capítulo 3, en la Tabla N° 3.1. A continuación se presenta la Tabla N° 5.17 en donde se aprecian los porcentajes de acción sobre cada sub-cuenca.

Tabla N° 5.17: Porcentaje de acción de cada pluviómetro sobre cada sub-cuenca.

Código sub-cuenca	Área (Km ²)	Carén %	El Tome %	Las Ramadas %	Pabellón %	Paloma Embalse %	Pichasca %	Rapel %	Tascadero %	Tulahen %
SC01	258.8			19.4	32.1			48.4		
SC02	246.7				55.2			44.8		
SC03	318.3	4.7						95.3		
SC04	520.0		0.3		29.8	3.8	7.6	58.5		
SC05	429.0			100.0						
SC06	338.2			86.4					13.6	
SC07	240.1			91.4					8.6	
SC08	361.7	15.0		1.0					38.7	45.3
SC09	392.2	14.9		74.9				10.1		
SC10	247.7	61.8		20.6				0.0	15.2	2.4
SC11	173.3	51.2	8.8					40.0		

Fuente: Elaboración Propia.

5.5.3.2 EVAPORACIÓN

Se escoge el método de promedios mensuales ya que este método cobra importancia si se quiere realizar un análisis a través del tiempo o a largo plazo.

En la cuenca solo existen 4 estaciones medidoras de evaporación, por lo tanto para paliar la escasez de estaciones medidoras y de datos de evaporación se adopta la utilización de la metodología aplicada en el apartado 5.5.3.1 de precipitación, con la intención de brindar un valor de evaporación a todas las cuencas. Para ello se deben realizar polígonos de Thiessen que brinden un porcentaje de acción de la evaporación medida en estas cuatro estaciones sobre las cuencas vecinas. En la Figura N° 5.12, se presentan los polígonos de Thiessen de evaporación y en la Tabla N° 5.18, se aprecian los porcentajes de acción de los evaporímetros para cada sub-cuenca. El software HEC-HMS 3.3, tiene además la posibilidad de ponderar el valor de la evaporación medida con un factor que varía entre 0 a 1.

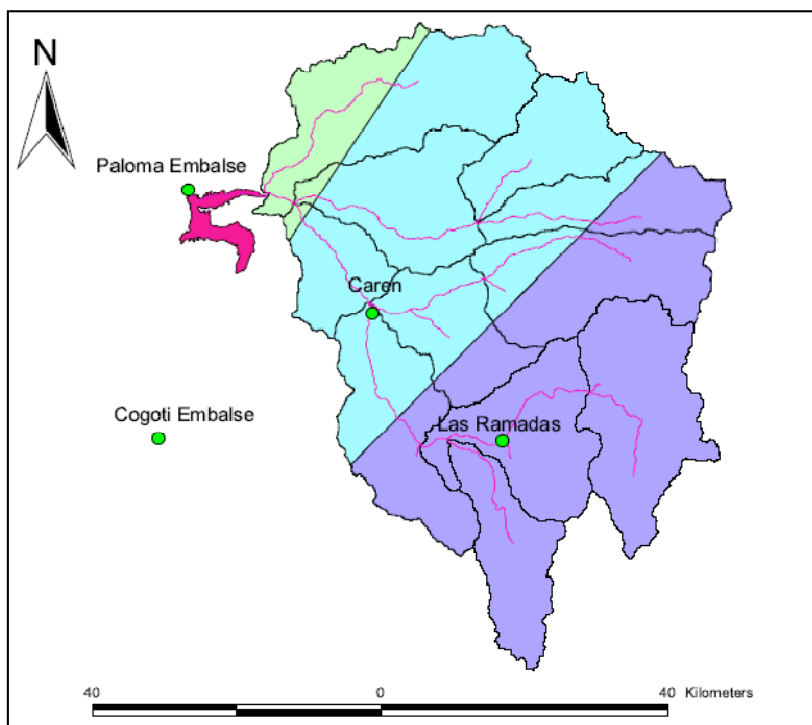


Figura N° 5.12: Esquema de los polígonos de Thiessen de evaporación. Elaboración propia.

Las estaciones consideradas son los presentados en el Capítulo 3, en el apartado 3.5.

Tabla Nº 5.18: Valores adoptados del método del flujo base constante mensual.

<i>Código sub-cuenca</i>	<i>Caren %</i>	<i>Cogotí Embalse %</i>	<i>Las Ramadas %</i>	<i>Paloma Embalse %</i>
SC01	48.6		51.4	
SC02	100.0			
SC03	95.0			5.0
SC04	55.6			44.4
SC05			100.0	
SC06			100.0	
SC07			100.0	
SC08	48.7		51.3	
SC09	24.2		75.8	
SC10	65.9		34.1	
SC11	94.3			5.7

Fuente: Elaboración propia.

5.5.3.3 DERRETIMIENTO DE NIEVE

La temperatura es sin duda, uno de los elementos que más influyen en la transformación de la nieve recién caída. Sus efectos, sin embargo, sólo alcanzan a unos 30 cm. de profundidad de la masa nevada debido a que la nieve es mala conductora del calor.

Por el contrario, la disminución de la temperatura provoca en la nieve que se modifique la estructura de los cristales aumentando la ramificación de su radio. El interior, por efecto de la sublimación, permanece invariable. En el caso de la nieve húmeda, el agua de fusión se hiela superficialmente, lo que da lugar a la

nieve costra, quebradiza, que protege el resto de la masa y en caso de persistir el frío se convierte en nieve en polvo.

El software trae por defecto el método de la Temperatura Índice, para calcular el volumen de agua que se obtiene en el proceso de derretimiento del manto de nieve. Este método es una aproximación del método Grado-día (Degree-day).

Básicamente realiza una aproximación para tener una cantidad de nieve derretida por cada grado Celsius que se encuentre por encima de los 0°.

La metodología se subdivide en dos grandes partes, una general que afecta a todas las subcuencas por igual y otra mucho mas especifica que afecta a cada sub-cuenca por separado.

I) Parámetros generales comunes a todas las subcuencas.

La ecuación 5.14 representa la ecuación básica del método Temperatura Índice (Temperature Index):

$$M = C_m (T_a - T_b) \quad (5.3)$$

En donde es M Nieve derretida, (mm); C_m corresponde a la tasa de derretimiento o factor grado día, variable, (mm/(°C*día)); T_a es la temperatura del aire, (°C) y T_b corresponde a la temperatura base que generalmente se toma como 0° o cercana a ella, (°C).

Varios investigadores a través de los años han ofrecido variaciones a la ecuación 5.3 con variaciones en el factor grado día (C_m). En esta ecuación, los valores de variación de la tasa de derretimiento factor C_m “*varían entre 1.8 a 3.7*

mm/°C” (de acuerdo a EM 1110-2-1406) para lluvia en condiciones normales. Valores mayores son esperados en casos extremos. Estos factores podrían ser valores bajos si la temperatura índice usada son las temperaturas máximas diarias. Los posibles casos del factor grado día son mostrados en la Tabla N° 5.19.

Tabla N° 5.19: Magnitudes relativas de los factores de tasas de derretimiento.

Caso	T_a °C	T_b °C	Derretimiento (mm)	C_m	Comentario
1	38	0	64.516	1.697	Bajo albedo
2	38	0	60.960	1.604	40% forestación
3	33	0	38.354	1.160	Cubierta nubosa
4	38	0	43.942	1.156	Cubierta fresca
5	18	0	82.296	4.572	Lluvia fuerte ventosa
6	18	0	74.168	4.120	Lluvia suave ventosa
7	18	0	28.194	1.566	Lluvia suave vientos suaves

Fuente: EM 1110-2-1406, USACE 1998.

Para el presente estudio se utilizó la temperatura promedio media ya que de utilizar la temperatura máxima o mínima, varía considerablemente la utilización del factor grado día (Degree-day).

Ecuación de temperatura diaria utilizada:

$$t_a = \frac{t_{max} + t_{min}}{2} \quad (5.4)$$

En donde t_a es la Temperatura del aire, (°C); t_{max} corresponde a la temperatura máxima registrada en 24 horas, (°C) y t_{min} es la temperatura mínima registrada en 24 horas, (°C).

La temperatura base es usualmente un valor cercano a 0 °C, si se utilizaran valores de temperatura de aire máximos la temperatura base seria cercana 4.44 °C.

Esta metodología evalúa el contenido de frío o grado de madurez del manto de nieve, vale decir cuantifica el calor necesario para elevar la temperatura del estrato de nieve a 0 °C (Contenido de frío o Cold Content). El contenido de frío se expresa como mm de agua líquida. Cuando la temperatura media diaria del aire está por debajo del congelamiento (0°C), generalmente se asume que no ocurrirá derretimiento y en ese estado la nieve puede perder o ganar energía. Anderson (1976) propone una ecuación para determinar el contenido de frío de una masa de nieve con la siguiente expresión:

$$W_s = C_f (T_s - T_a) \quad (5.5)$$

En donde W_s es la tasa de cambio en el contenido de frío en ($mm/día$); C_f es el factor grado-día para el contenido de frío en ($mm/día$); T_a corresponde a la temperatura media diaria del aire, (°C) y T_s es la temperatura superficial de la nieve, (°C).

Otros parámetros presentes en el método son el porcentaje máximo de agua acumulada y la cantidad de agua derretida por efecto del calor del suelo, el primero se refiere a la cantidad de agua en porcentaje presente en una muestra de nieve, este valor fluctúa normalmente entre el 2 y el 5 %, valores mayores son propios de zonas ventosas encontrándose valores del orden del 20 % para estos casos. El segundo parámetro se refiere al volumen de agua derretido que ocasiona la fusión del manto de nieve con el terreno, por lo general este valor se aproxima a cero o muy cercano a el, afectando principalmente a sectores cercanos a la isoterma cero donde si es importante su efecto.

Los Parámetros solicitados por HEC-HMS para el modelo de nieve son los siguientes:

Px Temperature (Temperatura de precipitación): Especifica si la precipitación cae como lluvia o como nieve. Cuando la temperatura del aire es inferior a la temperatura especificada, cualquier precipitación que cae se supone que es nieve, esta discriminación es por lo general 1 o 2 grados por encima de la congelación.

Base Temperature (Temperatura base): Es la temperatura con la cual se inicia el derretimiento, normalmente, la temperatura base debe ser 0 °C o cercana a ella.

Rain Rate Limit (Tasa de lluvia límite): Corresponde a la tasa máxima de lluvia en mm/día especificada por el usuario. Determina si el derretimiento es seco (cuando llueve a ritmos mayores a la especificada) o húmedo (cuando llueve a ritmos menores a la especificada, se calcula como si no existiera precipitación).

Wet Meltrate (Tasa de derretimiento húmedo): La tasa de derretimiento húmedo representa la tasa en la cual el manto de nieve se derrite cuando llueve a ritmos mayores que la tasa de lluvia límite.

ATI Meltrate Coefficient: Corresponde al factor de ponderación de la temperatura del aire que actuará como temperatura superficial de la nieve para intervalos de tiempo cuando la tasa es menor a la tasa de límite.

Cold Limit (Límite frío): El límite de frío se considera para los cambios rápidos de temperaturas que se somete al manto de nieve durante altas tasas de precipitación. Cuando la tasa de precipitación es mayor al límite de frío, el ATI Coldrate se toma a la temperatura de la precipitación. Si la temperatura está por encima de la temperatura base, el índice de contenido de frío se establece para la temperatura base. Si la temperatura está por debajo de la temperatura base, el índice de contenido de frío se establece para la temperatura actual. Si la tasa de precipitación es menor que el límite de frío, el índice de contenido de frío es calculado por el ATI Coldrate.

ATI Coldrate Coefficient: Corresponde al factor de ponderación de la temperatura del aire que actuará como temperatura superficial de la nieve para intervalos de tiempo cuando la tasa sea menor o mayor a la tasa Cold Limit.

Water Capacity (Máxima capacidad de agua líquida): Es la cantidad de agua derretida que puede acumularse en el manto de nieve antes de que se disponga de agua líquida en la superficie del suelo para la infiltración o la escorrentía. Típicamente, la máxima agua líquida que se mantiene es del orden de 3% - 5% de la nieve equivalente en agua, aunque puede ser mayor.

Groundmelt (Derretimiento del suelo): Derretimiento generado por el aumento de la temperatura del suelo.

Las definiciones anteriores fueron obtenidas de la versión oficial del Manual HEC-HMS 3.3, "Chapter 7 Meteorology Description".

II) Parámetros propios para cada sub-cuenca

A) Gradiente de temperatura

Representa el cambio de temperatura en función de la elevación, este valor, no es constante de hecho el gradiente es variable de acuerdo a la altura en que se mida. Sin embargo el software solicita un valor constante de gradiente de temperatura para cada sub-cuenca.

La ecuación que gobierna este fenómeno:

$$\delta = \frac{dT}{dz} \quad (5.6)$$

En donde δ es el gradiente de temperatura, ($^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$); T corresponde a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y z es la elevación (m).

La respuesta a esta duda se pudo determinar ingresando a la página <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> de la Universidad de Wyoming,

donde se lleva un registro localizado con estaciones de todo el mundo donde se puede obtener la variación de este parámetro. De acuerdo a estos datos se puede observar que dentro de los primeros 2000 m de altura no se observa un patrón e incluso permanece invariable, después de los 2000 m el gradiente se establece cerca de su valor estándar ($-6\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$) incluso bajando cada 1000 m de elevación.

Tabla Nº 5.20: Gradiente de temperatura a priori al proceso de calibración.

<i>Elevación (m)</i>	<i>δ ($^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$)</i>
0-1000	0.1
1000-2000	-0.2
2000-3000	0.59
3000-4000	0.62
4000-5000	0.63
5000-6000	0.65

Fuente: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

B) Bandas de elevación

El software nos solicita subdividir las cuencas en bandas de elevación, en donde se identifican valores de frontera y valores de condiciones iniciales al instante de comenzar la simulación. Dividir la cuenca mediante bandas permite contar con una variación espacial de la cuenca para asignar una mejor distribución de las variables climáticas para una adecuada respuesta del sector en estudio. La forma de ingreso de los valores de las bandas de elevación es a través del área de influencia que una banda tiene sobre una cuenca a través del porcentaje de acción que posee sobre la misma. El rango de las bandas de elevación es autónomo y debe ser definido por el usuario, este rango es de suma importancia y se obtendrán respuestas de las cuencas muy variables si el rango es más amplio.

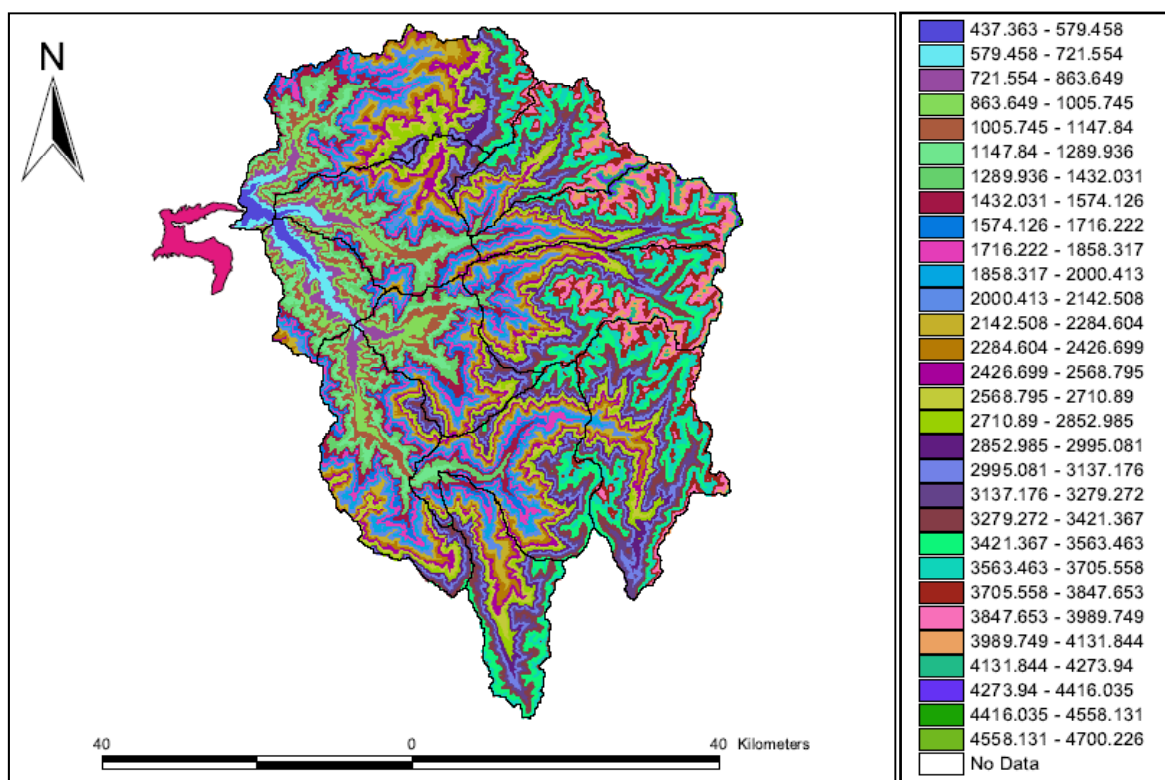


Figura Nº 5.13: Esquema de las bandas de elevación sobre las cuencas afluentes al embalse La Paloma. Elaboración propia.

C) Los Parámetros solicitados de cada sub-cuenca, son los siguientes:

Percent (%): Porcentaje de área total de la sub-cuenca que cubre la banda.

Elevation (m): Elevación promedio a la cual se ubica la banda.

Initial SWE (mm): Nieve equivalente en agua al inicio del periodo que debe ser ingresada. Este valor es cero si no hay nieve.

Initial Cold Content: Contenido de frío inicial que existe al comienzo de la simulación. Representa el calor requerido para poner la temperatura de la nieve a 0 °C y es expresado como un número equivalente en mm de agua congelada. Si el valor no es conocido, este se puede ajustar a cero.

Initial Liquid Water: Agua líquida mantenida dentro de la nieve al inicio de la simulación. Si no se conoce el contenido de frío al inicio de la simulación, este valor se puede ajustar a cero.

Initial Cold Content ATI (°C): Índice de temperatura antecedente inicial para el contenido de frío. Si la temperatura inicial no es conocida, este parámetro puede ajustarse a 0 °C.

Initial Melt ATI (°C): Si no hay nieve sobre el suelo en el inicio de la simulación, este parámetro puede ajustarse a 0 °C*día. También puede ser ajustado a cero si la simulación se inicia en el transcurso o al final de un periodo de frío cuando la temperatura del aire está por debajo de la temperatura base.

Las definiciones anteriores fueron obtenidas de la versión oficial del Manual HEC-HMS 3.3, "Chapter 7 Meteorology Description".

5.5.4 COMPONENTES DE LAS ESPECIFICACIONES DE CONTROL.

Se determina que el proceso de modelación a ejecutar se fija en un tiempo de 24 horas, debido a que los datos tanto de temperatura como de precipitación diaria están en 24 horas.

5.5.5 COMPONENTES DE LOS DATOS DE ENTRADA

Los datos requeridos por el software son los siguientes:

- Precipitación
- Temperatura
- Fluviometría

Los dos primeros son de suma importancia para hacer correr el programa y deben ser datos de series continuos (sin datos faltantes), si existieran datos faltantes estos deberían ser rellenados con algún proceso adecuado y de acuerdo a el intervalo de tiempo definido en el apartado anterior. Los datos de fluviometría son importantes en el proceso de calibración y validación ya que se construye el hidrograma de las cuencas obtenido a través del software y es comparado con los datos de fluviometría registrados, para luego ser ajustados por el usuario. En tal caso el relleno del registro de las series fueron estudiadas en el Capítulo 3.

En este proceso se hizo uso del software HEC-DSSVue desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers. El HEC-DSSVue (Hec Data Storage System Visual Utility Engine) es un programa que a través de una interfaz gráfica permite ver, editar y procesar datos de una base de datos particular, denominada DSS. El programa HEC-DSSVue utiliza un bloque de datos secuenciales como unidad básica de almacenamiento. Esta forma de almacenamiento resulta más eficiente a la hora de acceder a series temporales que otro modo de almacenamiento secuencial. En otras palabras la secuencia del registro diario es ingresado al software HEC-DSSVue en un vector ordenado de acuerdo a la fecha de toma de la medición.

Finalmente los componentes de entrada son ingresados a HEC-DSSVue y a través de HEC-HMS 3.3 son solicitados y procesados para la obtención del hidrograma de salida.

5.6 SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL VERTEDERO DEL EMBALSE PALOMA

5.6.1 FUNDAMENTOS

Como se explica en capítulos anteriores, dentro de las normas de operación del embalse Paloma, establece la presencia de un volumen de reserva o de resguardo ante crecidas importantes que ingresen al embalse. Este volumen debe ser compatible con la función básica de una estructura de éstas características, la cual es lograr almacenar volúmenes de agua para los periodos de escasez.

Para lograr complementar ambas condiciones en la mejor forma posible, se debe regular el embalse de tal forma que pueda almacenar la mayor cantidad de agua posible, y a su vez, mantener un cierto espacio en el embalse que permita absorber afluentes mayores de agua, y si corresponde, realizar evacuaciones reguladas de agua, las cuales no afecten a los elementos aguas abajo del embalse.

Para realizar una simulación del funcionamiento del vertedero del embalse, ante el aumento de agua almacenada, se generó una planilla de Excel, que permita simular su forma de evacuación de agua con sus compuertas.

5.6.2 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Para simular la forma de evacuación de agua del embalse Paloma, se comenzó por analizar la estadística disponible del embalse.

Con la estadística existente, se buscaron los períodos en los cuales se produjeron los mayores volúmenes afluentes al embalse. Estos afluentes, fueron identificados en los períodos de invierno producto de eventos de altas precipitaciones, y en el período de primavera, donde comienzan los deshielos en la alta cordillera.

Como un importante parámetro de identificación de los períodos en que se produjo los mayores afluentes producto de las lluvias, se buscaron las mayores precipitaciones producidas en la cuenca del embalse, y los respectivos volúmenes

de agua que se generaron durante el mes de éstas precipitaciones. Para ello, se tomo como referencia los registros de precipitación de la estación de Embalse Paloma desde el año 1984 hasta el año 2008.

A partir de estas dos condiciones, se lograron identificar los periodos más relevantes para realizar las simulaciones, los cuales tienen directa relación con los eventos históricos de precipitación en la cuenca de Paloma. Estos períodos que serán simulados, corresponden a los años 1984, 1987, 1997 y 2002.

Tabla N° 5.21: *Precipitaciones y volúmenes afluentes históricos al Embalse Paloma.*

Fecha	Precipitación (mm)	Vol. Afluente mes (m3)
10-04-1980	69,40	77.902.560
07-07-1983	84,00	97.315.321
01-07-1984	97,00	380.265.194
02-07-1984	58,40	
04-07-1984	41,20	
10-07-1984	51,80	
15-07-1987	69,00	248.371.295
24-07-1987	95,50	
04-06-1992	64,00	94.299.449
06-05-1993	46,50	103.105.875
11-06-1997	48,00	134.971.947
16-08-1997	77,00	333.641.388
17-08-1997	54,00	
19-07-2001	67,00	50.793.585
04-06-2002	72,30	169.407.353
23-07-2002	49,80	120.658.030

Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto importante a considerar, corresponde a contar con los datos de los niveles de agua embalsado, los cuales debían permitir el uso del vertedero. Como condición inicial, el volumen almacenado debía estar sobre la cota 400,5 m., la cual corresponde a la cota donde termina el vertedero de hormigón del embalse y tienen base las compuertas de sector que posee el embalse.

5.6.3 ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

5.6.3.1 ECUACIÓN DE BALANCE HIDROLÓGICO UTILIZADA

Para realizar la modelación del funcionamiento del vertedero del embalse, se considera como base la ecuación de balance hídrico, de la cual, la incógnita por determinar será el volumen almacenado con el cual terminará el embalse al final de un determinado período.

En líneas generales, lo que se hace es desglosar e identificar los parámetros que influyen en el comportamiento del balance hídrico al interior del embalse. La expresión inicial que describe el embalse, corresponde a la ecuación de continuidad, la cual describe el cambio de almacenamiento dentro de un sistema por un intervalo de tiempo.

La ecuación de continuidad se describe de la siguiente manera:

$$\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (5.7)$$

En donde dV representa el cambio de volumen de almacenamiento; dt es el intervalo de tiempo; $I(t)$ es el volumen de entrada por unidad de tiempo y $Q(t)$ es el volumen de salida por unidad de tiempo.

De forma práctica, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$V_0 + V_i - V_E - V_V - V_{FV} - V_{FI} = V_F \quad (5.8)$$

En donde V_0 es el volumen registrado al inicio del período (m^3); V_i es el volumen de entrada al embalse (m^3); V_E es el volumen entregado para el riego (m^3); V_V es el volumen vertido por el embalse (m^3); V_{FV} es el volumen evaporado

del espejo del embalse (m^3); V_{FI} es el volumen filtrado del embalse (m^3); V_F es el volumen registrado al final del período (m^3).

5.6.3.2 ESTADÍSTICA DISPONIBLE DEL EMBALSE PALOMA

Para trabajar el balance hídrico del embalse descrito en la planilla, se incorporaron algunos datos estadísticos del embalse. Estos datos corresponden a los volúmenes respectivos en todos los períodos analizados, los cuales se refieren a distintos parámetros controlados en el embalse:

- Volumen afluente al embalse (m^3)
- Volumen almacenado (m^3)
- Entrega de agua para riego (m^3)
- Volumen evacuado por vertedero (m^3)
- Evaporación (m^3)
- Filtración (m^3)

5.6.3.3 PLANILLA DE OPERACIÓN DEL EMBALSE PALOMA

Para realizar parte importante de la simulación del vertedero del embalse, se recurrió a la actual planilla de operación del embalse Paloma. Esta planilla fue formulada por la Dirección de Obras Hidráulicas en el año 1985, a partir del cual se lleva el registro estadístico del embalse como se conoce hasta la actualidad.

En esta planilla, se recolectan datos de los parámetros controlados en el embalse y que se pueden relacionar claramente con la expresión de balance ya descrita.

Basándonos en éste principio, se conocen las variaciones de volúmenes diarias registradas en el embalse, indicadas en los datos limnométricos del embalse, se conocen todas las salidas de sistema (datos de filtraciones,

evaporación, entregas para riego y eventualmente, volúmenes liberados a través de las compuertas de vertedero del embalse), con lo cual se llega a conocer los afluentes del embalse (caudales afluentes al embalse por escorrentía y precipitaciones). A continuación se describe cada uno de los elementos señalados.

Datos limnimétricos del embalse: Estos datos relacionan entre sí los cambios de volumen de almacenamiento presentes en el embalse Paloma. Estos cambios de volumen son registrados cada 24 horas. Los datos registrados son: Altura limnimétrica del embalse (m), Volumen embalsado (m^3) y variación de volumen embalsado respecto al día anterior (m^3). Además, se lleva registro de los datos de precipitaciones diarias en el embalse.

Datos de evaporación del embalse: Se registra la evaporación medida en milímetros, además de calcular el volumen evaporado diariamente del embalse (m^3) en base a la curva cota-volumen del embalse.

Datos de filtraciones del embalse: Se lleva registro del caudal que filtra a través del muro del embalse, y se calcula el respectivo volumen de agua filtrado (m^3).

Datos de entregas de agua para riego: Se determina el caudal medio diario de agua entregado por el riego (m^3/s), además, se calcula el volumen de agua respectivo que se entregó (m^3).

Datos de evacuación de aguas mediante el vertedero del embalse: Se registra el caudal evacuado por las compuertas de sector del embalse (m^3/s) y su respectivo volumen asociado a esta salida (m^3).

Datos de caudal afluente al embalse: Se lleva registro diario del afluente al embalse Paloma, el cual es determinado indirectamente mediante la planilla de

balance hídrico. Se registra el volumen afluente (m^3) y el respectivo caudal de entrada (m^3/s).

Todos los datos antes mencionados se vinculan en la planilla mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta V = V_j - V_{j-1} \quad (5.9)$$

$$T.A.Salida = V_E + V_V + V_{FV} + V_{FI} \quad (5.10)$$

$$T.A.Entrada = T.A.Salida + \Delta V - V_P \quad (5.11)$$

En donde ΔV es la variación de Volumen embalsado (m^3); V_j es el volumen medido en el período j ; V_{j-1} es el volumen medido en el período $j - 1$; $T.A.Salida$ es el volumen total afluente de salida del embalse (m^3); V_E es el volumen entregado para el riego (m^3); V_V es el volumen vertido por el embalse (m^3); V_{FV} es el volumen evaporado del espejo del embalse (m^3); V_{FI} es el volumen filtrado del embalse (m^3); $T.A.Entrada$ es el volumen total afluente de entrada al embalse (m^3) y V_P es el volumen por lluvia en el espejo del embalse durante el período (m^3).

Por ejemplo, si se cuenta con los siguientes datos:

$$V_j : 573.116.500 \text{ m}^3 \quad (\text{Cota } 57.235 \text{ m})$$

$$V_{j-1} : 573.833.500 \text{ m}^3 \quad (\text{Cota } 57.265 \text{ m})$$

De la ecuación 5.9 se obtiene:

$$\Delta V : 573.116.500 - 573.833.500 = - 717.000 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_E : 880.200 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_V : 0 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_{FV} : 148.566 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_{FI} : 2.514 \text{ (m}^3\text{)}$$

De la ecuación 5.10 se obtiene:

$$T.A. Salida: 880.200 + 0 + 148.566 + 2.514 = 1.031.280 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_P : 0 \text{ (m}^3\text{)}$$

De la ecuación 5.11 se obtiene:

$$T.A. Entrada: 1.031.280 + (-) 717.000 + 0 = 314.280 \text{ (m}^3\text{)}$$

A continuación se muestra la planilla Excel donde se realiza en forma diaria el balance hidrológico del embalse Paloma y se indican todos los elementos ya mencionados.

DIRECCION DE OBRAS HIDRAULICAS DEPARTAMENTO DE EXPLOTACION IV REGION COQUIMBO										CAPACIDAD MAXIMA DE EMBALSE: 760 Mill.m3 GASTO MAXIMO VERTEDERO: 4.500 m3/seg H. Limim. Ultimo Día Mes Anterior: 57,300 Vol. [m3] Ultimo Día Mes Anterior: 574.670.000				
Observaciones mes de :										EMBALSE PALOMA SEPTIEMBRE 2008				
DÍA	LLUVIA	LIMNIM	VOL. EMB.	VAR. V. EMB.	EVAPORACION		FILTRAC.		AGUA ENTREGADA		VERTEDERO		T. A. SALIDA	T. A. ENTRADA
	mm	m	m3	m3	mm	mm * 0.7	m3	m3	m3/seg	m3	m3/seg	m3	m3	m3/seg
76.4														
1	57,265	573.833.500	(836.500)	9,3	6,51	158.943	29,1	2,514	11,250	972.000	0,000	0	1.133.457	296.957
2	57,235	573.116.500	(717.000)	8,7	6,09	148.566	29,1	2,514	10,188	880.200	0,000	0	1.031.280	314.280
3	57,210	572.519.000	(597.500)	11,1	7,77	189.417	29,1	2,514	9,550	825.120	0,000	0	1.017.051	419.551
4	57,175	571.682.500	(836.500)	8,7	6,09	148.348	29,1	2,514	10,125	874.800	0,000	0	1.025.663	189.163
5	57,140	570.846.000	(836.500)	9,2	6,44	156.734	29,1	2,514	10,150	876.960	0,000	0	1.036.209	199.709
6	57,105	570.009.500	(836.500)	9,3	6,51	158.297	29,1	2,514	10,150	876.960	0,000	0	1.037.771	201.271
7	57,075	569.292.500	(717.000)	8,5	5,95	144.560	29,1	2,514	10,150	876.960	0,000	0	1.024.034	307.034
8	57,040	568.456.000	(836.500)	8,5	5,95	144.440	29,1	2,514	12,269	1.060.020	0,000	0	1.206.974	370.474
9	57,030	568.217.000	(239.000)	10,2	7,14	173.229	29,1	2,514	4,063	351.000	0,000	0	526.743	287.743
10	57,020	567.978.000	(239.000)	10,1	7,07	171.486	29,1	2,514	3,700	319.680	0,000	0	493.681	254.681
11	57,010	567.739.000	(239.000)	9,3	6,51	157.863	29,1	2,514	3,700	319.680	0,000	0	480.057	241.057
12	56,985	567.149.000	(590.000)	8,8	6,16	149.309	29,1	2,514	7,650	660.960	0,000	0	812.783	222.783
13	56,950	566.330.000	(819.000)	10,6	7,42	179.711	29,1	2,514	11,600	1.002.240	0,000	0	1.184.466	365.466
14	56,905	565.277.000	(1.053.000)	10,2	7,14	172.753	29,1	2,514	12,333	1.065.600	0,000	0	1.240.867	187.867
15	56,860	564.224.000	(1.053.000)	8,0	5,60	135.336	29,1	2,514	12,400	1.071.360	0,000	0	1.209.210	156.210
16	56,815	563.171.000	(1.053.000)	9,7	6,79	163.906	29,1	2,514	12,400	1.071.360	0,000	0	1.237.780	184.780
17	56,770	562.118.000	(1.053.000)	10,6	7,42	178.906	29,1	2,514	12,400	1.071.360	0,000	0	1.252.780	199.780
18	56,730	561.182.000	(936.000)	11,3	7,91	190.512	29,1	2,514	12,033	1.039.680	0,000	0	1.232.707	296.707
19	56,695	560.363.000	(819.000)	9,3	6,51	156.642	29,1	2,514	10,419	900.180	0,000	0	1.059.336	240.336
20	56,660	559.544.000	(819.000)	9,4	6,58	158.184	29,1	2,514	10,825	935.280	0,000	0	1.095.978	276.978
21	56,620	558.608.000	(936.000)	8,7	6,09	146.262	29,1	2,514	11,350	980.640	0,000	0	1.129.417	193.417
22	56,580	557.672.000	(936.000)	9,5	6,65	159.547	20,7	1,788	11,350	994.140	0,000	0	1.155.475	219.475
23	56,535	556.619.000	(1.053.000)	10,0	7,00	167.760	20,7	1,788	11,550	997.320	0,000	0	1.167.468	114.468
24	56,495	555.683.000	(936.000)	10,5	7,35	175.954	20,7	1,788	11,550	997.320	0,000	0	1.175.662	239.662
25	56,450	554.630.000	(1.053.000)	12,3	8,61	205.890	20,7	1,788	11,550	997.320	0,000	0	1.205.599	152.599
26	56,410	553.694.000	(936.000)	11,7	8,19	195.631	20,7	1,788	11,313	977.400	0,000	0	1.174.820	238.820
27	56,370	552.758.000	(936.000)	12,0	8,40	200.439	20,7	1,788	11,750	1.015.200	0,000	0	1.217.428	281.428
28	56,330	551.822.000	(936.000)	10,0	7,00	166.859	20,7	1,788	11,250	972.000	0,000	0	1.140.647	204.647
29	56,290	550.886.000	(936.000)	10,2	7,14	170.019	20,7	1,788	10,250	885.600	0,000	0	1.057.408	121.408
30	56,260	550.184.000	(702.000)	12,4	8,68	206.502	20,7	1,788	6,658	575.280	0,000	0	783.570	81.570
31	56,235	549.599.000	(585.000)	10,6	7,42	176.399	20,7	1,788	6,350	548.640	0,000	0	726.827	141.827
0,0		-24.486.000	-25.071.000	308,7	216,09	5.208.403		70.684		26.994.060	0,000	0	27.241.143	7.202.147
A FEU 76.4														

Figura Nº 5.14: Planilla de operación actual del Embalse Paloma.
Elaboración propia.

5.6.3.4 PLANILLA DE OPERACIÓN DEL EMBALSE PALOMA MODIFICADA PARA SIMULACIÓN DEL VERTEDERO.

Tomando la planilla mostrada en el punto 2.1.3, se realizaron algunas modificaciones, a fin de lograr simular la operación diaria del embalse. En general el procedimiento de cálculo para esta nueva planilla es similar al utilizado en la planilla original. Los datos como el volumen evaporado, el volumen filtrado, el volumen de agua entregado para el riego son datos conocidos. También se conoce el volumen afluente diario al embalse.

La diferencia se encuentra en el cálculo de dos términos: la cota diaria del embalse y el volumen vertido. La cota diaria, la que nos permite conocer el volumen diario embalsado, con la simulación será una cota “ficticia”, y se calculará a través de la propia planilla de balance y no como ocurre en la actualidad, que corresponde a la primera lectura del día, tomada por el vigilante en el muro de hormigón del embalse.

Para esto, se completarán los datos ya mencionados más el volumen vertido para el día indicado. Como se tiene el caudal afluente real o generado por HEC-HMS, se realizará una iteración de la cota del embalse hasta lograr el menor error o diferencia entre el caudal afluente real conocido, contra el caudal afluente que se genera al cambiar la cota de agua del embalse, la cual modifica el volumen embalsado. Estos datos se observan en la Figura N° 5.15 donde se muestra la planilla de simulación mensual generada para el embalse, donde las columnas tercera y cuarta (de izquierda a derecha en color azul) son la cota del embalse y el volumen embalsado respectivamente. Las últimas tres columnas de la tabla muestran el caudal afluente simulado, el caudal afluente real y la diferencia de ambos caudales.

Cabe señalar que la relación entre el volumen afluente y el caudal afluente se observa en la ecuación 5.11, ya que el caudal afluente diario al embalse se

obtiene dividiendo el $T.A. Entrada$ por 86.400 segundos (que son los segundos que tiene un día) según se observa en la expresión 5.12. Este caudal se observa en la planilla de operación del embalse en la última columna de la tabla de registro mensual, según se observa en la Figura N° 5.14.

$$Caudal Afluyente Diario = \frac{T.A. Entrada}{86.400} \quad (5.12)$$

Estos términos se relacionan con la cota y con el volumen almacenado a través del término $T.A. Entrada$, ya que se puede obtener la cota del embalse tomando las ecuaciones 5.9, 5.10 y 5.11 (término V_j de la ecuación).

CAPACIDAD MAXIMA DE EMBALSE: 760 Mill.m ³													
GASTO MAXIMO VERTEDERO: 4.500 m ³ /seg													
H. Limim. Ultimo Día Mes Anterior:												63,450	
Vol. [m ³] Ultimo Día Mes Anterior:												735.630.000	
ENTREGA DE													
DÍA	LLUVIA	LIMNIM.	VOL. EMB.	VAR. V. EMB.	EVAPORAC.	FILTRAC.	AGUA	VERTEDERO	T. A. SALIDA	T. A. ENTRADA	Q ENTRADA	Q ENTRADA	ERROR
	mm	m	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³ /s	REAL m ³ /s	m ³ /s
1		63,170	727.358.000	(7.672.000)	139.523	2.342	897.027	17.072.632	16.111.524	10.439.524	120,828	121,45	0,62
2		62,320	721.253.600	(6.704.400)	139.523	2.342	897.027	16.842.355	17.881.247	11.176.847	123,362	128,33	-0,43
3		62,630	713.835.400	(7.418.200)	139.523	2.342	897.027	16.634.056	17.672.348	10.254.748	118,689	119,26	0,57
4		62,340	706.090.800	(7.744.600)	139.523	2.342	897.027	16.389.114	17.428.006	9.683.406	112,076	112,25	0,17
5		62,050	698.081.000	(8.009.800)	139.523	2.342	897.027	16.140.455	17.179.347	9.163.547	106,129	106,28	0,15
6		61,935	696.565.500	(1.515.500)	139.523	2.342	897.027	8.356.346	9.375.838	8.460.338	97,321	97,53	-0,33
7		61,930	694.817.000	(1.748.500)	139.523	2.342	897.027	8.912.224	9.351.116	8.202.616	94,938	94,53	-0,35
8		61,820	691.858.000	(2.959.000)	139.523	2.342	897.027	8.877.498	9.316.390	6.357.390	80,525	81,19	0,66
9		61,725	689.302.500	(2.555.500)	139.523	2.342	897.027	8.822.652	9.861.544	7.306.044	84,561	83,87	-0,69
10		61,625	686.612.500	(2.690.000)	139.523	2.342	897.027	8.777.523	9.816.415	7.126.415	82,482	81,72	-0,76
11		61,545	684.460.500	(2.152.000)	139.523	2.342	897.027	8.727.106	9.765.398	7.613.398	88,125	87,94	-0,18
12		61,455	682.057.500	(2.403.000)	139.523	2.342	897.027	8.686.562	9.725.454	7.322.454	84,751	85,16	0,41
13		61,355	679.407.500	(2.650.000)	139.523	2.342	897.027	8.640.722	9.679.614	7.029.614	81,361	81,85	0,49
14		61,265	677.022.500	(2.385.000)	139.523	2.342	897.027	8.589.502	9.628.394	7.243.394	83,836	84,16	0,32
15		61,195	675.167.500	(1.855.000)	139.523	2.342	897.027	8.543.142	9.582.034	7.727.034	89,433	88,85	-0,58
16		61,150	673.975.000	(1.192.500)	139.523	2.342	897.027	8.506.309	9.545.801	8.353.301	96,682	96,91	0,23
17		61,135	673.577.500	(397.500)	139.523	2.342	897.027	8.480.334	9.519.826	9.122.326	105,582	105,86	0,28
18		61,140	673.710.000	132.500	139.523	2.342	897.027	8.475.729	9.514.621	9.647.121	111,656	111,45	-0,21
19		61,165	674.372.500	662.500	139.523	2.342	897.027	8.475.729	9.514.621	10.177.121	117,791	117,56	-0,23
20		61,205	675.432.500	1.060.000	139.523	2.342	897.027	8.491.333	9.530.225	10.590.225	122,572	122,30	-0,27
21		61,265	677.022.500	1.590.000	139.523	2.342	897.027	8.512.034	9.550.386	11.140.386	128,347	129,06	0,71
22		61,330	678.745.000	1.722.500	139.523	2.342	897.027	8.543.142	9.582.034	11.304.534	130,840	131,33	0,49
23		61,385	680.202.500	1.457.500	139.523	2.342	897.027	8.574.077	9.612.969	11.070.469	128,130	128,60	0,47
24		61,470	682.455.000	2.252.500	139.523	2.342	897.027	8.604.300	9.643.792	11.896.292	137,689	137,07	-0,62
25		61,520	683.788.000	1.333.000	139.523	2.342	897.027	8.645.827	9.684.719	11.017.719	127,520	127,80	0,28
26		61,615	686.343.500	2.555.500	139.523	2.342	897.027	8.671.309	9.710.201	12.265.701	141,964	142,25	0,29
27		61,705	688.764.500	2.421.000	139.523	2.342	897.027	8.722.048	9.760.340	12.181.340	140,395	141,17	0,78
28		61,815	691.723.500	2.959.000	139.523	2.342	897.027	8.767.463	9.806.355	12.765.355	147,747	148,45	0,70
29		61,915	694.413.500	2.690.000	139.523	2.342	897.027	8.822.652	9.861.544	12.551.544	145,272	145,37	0,10
30		62,020	697.252.400	2.838.900	139.523	2.342	897.027	8.872.526	9.911.418	12.750.318	147,573	148,06	0,49
31													
Pp tot	0,0		-38.377.600	-38.377.600	4.185.698	70.252	26.910.797	299.753.161	330.925.908	292.548.308	112,866	112,944	

Figura N° 5.15: Planilla de operación modificada del Embalse Paloma.
Elaboración propia.

Para el caso del volumen de agua evacuado por vertedero, éste se calculará con una nueva planilla generada en este trabajo y que se explica en

detalle en el punto siguiente (5.6.3.5). Calculando éstos valores, podremos representar el comportamiento del embalse ante la alternativa de operación planteada y proceder al análisis de los resultados que se obtengan.

5.6.3.5 PLANILLA DE SIMULACIÓN PARA EL VERTEDERO DEL EMBALSE PALOMA

Para lograr representar el funcionamiento del vertedero del embalse Paloma, se trabajó en la formulación de una planilla que lograra calcular el caudal que se puede evacuar a través de las compuerta del embalse, entregando para ello algunos datos de operación, como por ejemplo, la abertura que le daremos a la compuerta, el número de compuertas a operar, etc.

Esta formulación se basa en la expresión que representa la abertura de una de las compuertas del vertedero, la cual está definida en el Manual de Operaciones del Embalse Paloma, la cual corresponde al estudio realizado por Serprin.

$$Q = m * L * G \sqrt{2 * g * H_{escurrim}} \quad (5.13)$$

En donde Q representa el caudal evacuado por una compuerta (m^3/s); m es el coeficiente de gasto de la compuerta ($m = 0,69$); L es el ancho de la compuerta (m); G abertura de la compuerta (m); g corresponde a la aceleración de gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y $H_{escurrim}$ es la altura del escurrimiento antes de las compuertas (m).

De acuerdo a esta expresión, se calcularon los caudales de salida para una compuerta, los cuales se representan en la Figura N° 5.16.

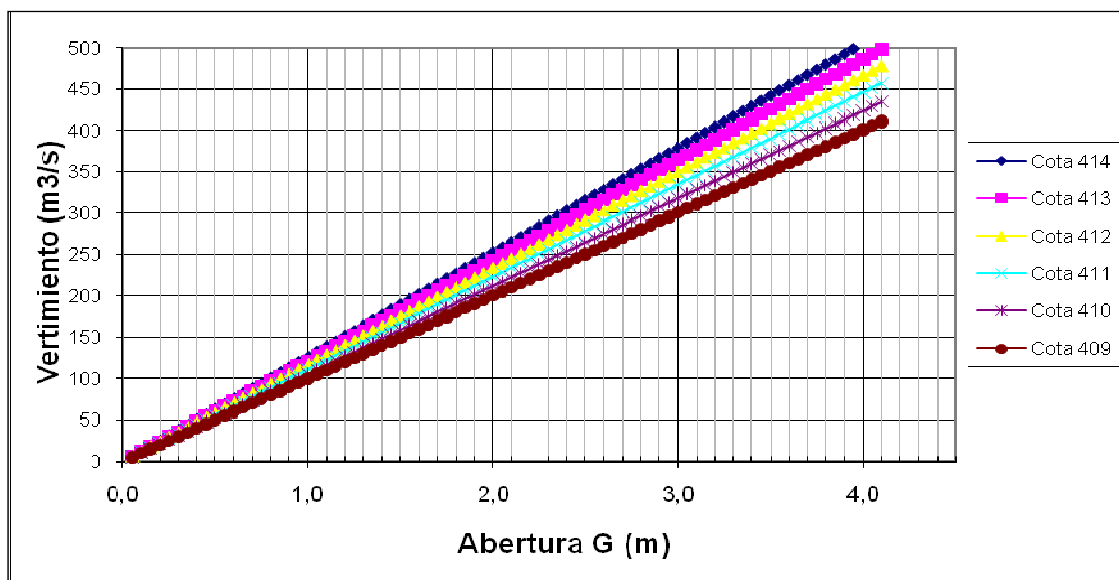


Figura N° 5.16: Gráfico de la Curva de descarga para una compuerta en el vertedero del Embalse Paloma. Manual de Operaciones del Embalse Paloma (2005).

A partir de esta base de datos generada, se pueden determinar caudales de salida del vertedero en distintos estados y niveles de almacenamiento, lo que nos permite obtener volúmenes de salida del embalse para un intervalo de tiempo determinado.

5.6.4 CONSIDERACIONES AL MOMENTO DE REALIZAR LA SIMULACIÓN DEL VERTEDERO

En la realización de esta planilla para representar la operación del vertedero se han asumido ciertas consideraciones que deben tomarse para la evacuación desde el embalse.

La primera corresponde a una restricción del caudal máximo permitido para evacuar desde el embalse. Este caudal corresponde a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, valor indicado en el manual de operaciones del embalse [Ref.19], y que permite evitar daños de consideración aguas abajo del embalse. Por lo tanto, la primera restricción de la simulación es que el caudal de salida total del embalse sea menor a este valor.

Otra consideración corresponde a la cota de inicio de la operación del vertedero. Esta cota debe ser mayor a los 400,5 metros, ya que esta cota corresponde a la cresta del vertedero, por lo cual no tendría sentido abrir las compuertas en el caso que la cota del embalse se encuentre bajo este valor.

5.6.5 PLANILLA DE OPERACIÓN DEL VERTEDERO DEL EMBALSE PALOMA

La planilla para simular la operación de las compuertas del vertedero, nos permite obtener los volúmenes que deben ser evacuados del embalse para mantener ciertas condiciones de operación, además de la forma de evacuar dichos volúmenes.

En una primera etapa, la planilla nos permite determinar el volumen efectivo total a evacuar por el vertedero para mantener la capacidad establecida para que opere el embalse respetando la regla operacional (referido al volumen almacenado permitido). En la segunda etapa, podemos decidir la forma en que operarán las compuertas y como se podrán evacuar los volúmenes ya determinados en la primera etapa, además de darnos una idea del tiempo requerido para realizar esta evacuación desde el embalse.

Para comenzar la simulación de la operación del vertedero, se requiere conocer la cota con la que se encuentra el embalse para iniciar la simulación. A partir de ésta cota, se recurre a la curva de almacenamiento del embalse para determinar el volumen almacenado en el embalse.

Los restantes datos para la simulación, son condiciones que podrá establecer el operador, a fin de generar distintas condiciones y escenarios para la operación del embalse.

Estas condiciones, influyen directamente en el volumen almacenado en el embalse, tanto en lo referente a su capacidad de almacenamiento, como el volumen afluente que puede aceptar el embalse. Estas condiciones iniciales corresponden a las siguientes:

1.- **Volumen afluente esperado al embalse:** El operador podrá indicar el volumen afluente esperado al embalse, el cual podrá generarse en base a distintas metodologías de cálculo.

2.- **Volumen colchón del embalse:** Se debe indicar el volumen de reserva o colchón del embalse. Este volumen si bien, las reglas de operación actuales del embalse, lo establecen en 50.000.000 m³, para nuestra simulación podremos hacerlo variar según los distintos escenarios que se planteen a lo largo de éste trabajo.

3.- **Factor de Seguridad (F.S):** Como una condición adicional, se ha incorporado un factor de seguridad, el cual nos permite en cierta forma “mayorar” el afluente de agua que llega al embalse. Esta condición nos permite aumentar, si así se estima conveniente, el volumen afluente del embalse, y con ello, se aumenta el volumen que deberá ser evacuado para conservar el colchón del embalse.

5.6.6 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN PARA EVACUAR MEDIANTE EL VERTEDERO DEL EMBALSE

Una vez que se tiene los datos necesarios, se procede a realizar el cálculo del volumen efectivo a evacuar en el embalse. Este volumen se estima de la siguiente forma:

$$V_0 + V_C + V_I * F.S. - V_{EP} = V_V \quad (5.14)$$

En donde V_0 es el volumen registrado al inicio del período (m^3); V_C es el volumen de reserva o colchón del embalse (m^3); V_I es el volumen de entrada al embalse (m^3); $F.S.$ corresponde al Factor de Seguridad sugerido; V_{EP} es la capacidad de almacenamiento del embalse Paloma (m^3) correspondiente a 750 millones de m^3 ; y V_V es el volumen para evacuar por el embalse (m^3).

Conociendo este volumen, se puede proceder a la siguiente etapa, la que consiste en determinar la forma en la cual será evacuada el agua por vertedero que se ha estimado como excedente para el embalse.

5.6.7 DETERMINACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL VERTEDERO DEL EMBALSE

En esta etapa, la planilla de cálculo permite generar distintas formas de operar una o varias compuertas del embalse. Esta operación, permitirá planear distintas estrategias para evacuar agua desde el embalse y así proteger todas las zonas aguas abajo del embalse, como también lograr proteger la infraestructura del embalse.

Para esta etapa, se debe tener algunos puntos que en este caso, la administración del embalse debe determinar para el uso de las compuertas del embalse.

1.- **Número de compuertas:** El operador debe definir el número de compuertas que serán operadas en la evacuación de agua. Cabe señalar, que en el caso del embalse Paloma, existe la posibilidad de operar hasta 8 compuertas en el vertedero.

2.- **Cota de inicio de uso del vertedero:** Este dato es uno de los que permite establecer el caudal a evacuar por las compuertas del embalse, ya que estos caudales varían en forma directa con respecto al aumento de la cota de agua embalsada.

3.- **Apertura de cada compuerta:** A partir de este dato, se determina el caudal que se evacuará por el embalse. Corresponde al valor que determina el paso de agua a través de cada una de las compuertas.

Una vez ingresados estos parámetros, podemos conocer los resultados y verificar que la simulación obtenida sea recomendable para operar el vertedero del embalse.

De esta simulación realizada con la planilla, se logran obtener los siguientes valores:

- Caudal a evacuar en cada compuerta (m^3/s). Este caudal se calcula de acuerdo a los valores que se obtienen de la ecuación 5.8 y que se observan en la Figura N° 5.16.

- Caudal total a evacuar por vertedero (m^3/s). Este caudal se calcula multiplicando el caudal evacuado por una compuerta por el número de compuertas que se ha decidido operar.
- Volumen a evacuar desde el embalse por día (m^3). Se puede calcular el volumen total evacuado por día, multiplicando el caudal total a evacuar por 86.400 segundos, que corresponde a la conversión del caudal a volumen diario. Cabe señalar, que también se realizó esta estimación de volumen para otros intervalos de tiempo (horas, etc.).
- Tiempo que debe funcionar el vertedero para liberar el volumen estimado como excedente. Este tiempo sirve para planificar la evacuación de agua, permitiendo tener una estimación del tiempo en que el embalse recupera su volumen de reserva o colchón, para que así se encuentre nuevamente en condiciones de recibir nuevas crecidas importantes. Para el caso de la simulación anual del funcionamiento del embalse, este tiempo se expresa en días, ya que se simula lo que va ocurriendo mensualmente en el embalse. Para el caso de la simulación de realizada para solamente un mes, este tiempo se calculó en horas, ya que la operación del embalse se va simulando diariamente.

5.6.8 ESQUEMA DE LA PLANILLA DE CÁLCULO PARA EL VERTEDERO DEL EMBALSE PALOMA

De acuerdo a los elementos ya descritos, finalmente se tiene la planilla en formato Excel, con la cual se procederá a simular el comportamiento para el vertedero del embalse Paloma.

Datos:		
1.- Estado actual del embalse		
Altura Embalse (m):	406,59	
Cota (m):	59,085	
Vol Almacenado (m3):	618.793.000	
Volumen colchon embalse (m3):	100.000.000	
Volumen Afluente esperado (m3)	268.556.400	
F.S (Factor Seguridad)	1	
Volumen Afluente esperado (m3)	268.556.400	
Volumen para evacuar por vertedero (m3):	237.349.400	
2.- Uso de Compuertas de vertedero		
N° Compuertas que seran operadas (1-8):	1	
Volumen a evacuar por cada compuerta (m3)	237.349.400	
Cota de inicio para uso de vertedero	407,60	
Apertura en cada compuerta (m)*	1,50	
Caudal a evacuar en cada compuerta (m3/s)	152,696	
Caudal total a evacuar (m3/s):	152,696	OK
Volumen a evacuar por día (m3)	13.192.976	
Tiempo que debe operar el vertedero (dias)	18,0	
Regla evacuacion Qtotal evacuacion max < 200 m3/s	200	
Volumen máximo a evacuar por día (m3)	17.280.000	
Tiempo que debe operar el vertedero Con Qmax(dias)	13,7	
En azul son los datos de entrada a la planilla		
* La apertura de compuerta esta dada cada 5 cm		

Figura Nº 5.17: Planilla de cálculo para determinar la forma de evacuación de agua en el vertedero del Embalse Paloma. Elaboración propia.

Como observamos en la Figura Nº 5.17, en la primera parte (punto 1.- Estado actual del embalse) se ingresan los datos marcados en color azul: la cota del embalse (con la que a través de la curva de embalse se conoce el volumen embalsado), el volumen colchón o de reserva en el embalse, el volumen afluente

esperado y un factor de seguridad, si se estima conveniente. Con esto datos se calcula el volumen a evacuar por el vertedero.

Para la segunda parte (punto 2.- Uso de compuertas de vertedero), conocido el volumen a evacuar por el vertedero, se deben conocer el número de compuertas a ocupar, la cota con la cual se abrirá(n) la(s) compuerta(s) y la abertura de cada compuerta. Con estos datos, la planilla permite buscar en la base de datos creada a partir de la expresión 5.8, el caudal a evacuar por una compuerta, y con ello, determinar el volumen total a evacuar por el vertedero en un período de tiempo determinado.

En el caso, de que al realizar el cálculo del volumen para evacuar por el vertedero se obtenga un valor negativo, éste valor no representa un error de cálculo de la planilla, sino que indica que de acuerdo a las condiciones establecida por la regla operacional del embalse, no es necesario realizar una evacuación de los excedentes del embalse, ya que la capacidad de almacenamiento que en ese momento tiene el embalse, permite absorber sin problemas éste volumen afluente.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se entregan los resultados del modelo de simulación hidrológica para la cuenca aportante al embalse. Se describen los resultados de la calibración final escogida y su proceso de validación.

Además, se entregan los resultados obtenidos para la simulación propuesta del funcionamiento de las compuertas del vertedero del embalse Paloma. Estos resultados corresponden a dos tipos de simulaciones realizadas: la primera corresponde a una simulación anual de la operación del embalse y de su vertedero; la segunda corresponde a una simulación por mes de la operación del embalse y de su vertedero. También, se indican las consideraciones adoptadas para las simulaciones realizadas.

6.2 MODELADO DE CUENCA

6.2.1 Consideraciones adoptadas

Una vez definidas las características físicas de las cuencas, subcuencas y ríos del área de estudio, se debe determinar el tipo de estudio que se pretende realizar, este tipo de estudio deberá estar relacionado con el tiempo en que se quiere evaluar el comportamiento de la zona.

Bajo esa premisa se debe discriminar entre un estudio de corto plazo relacionado a eventos aislados de duración de solo algunos pocos días y otro de

largo plazo o también llamado de análisis continuo para evaluar la respuesta de la o las cuencas a través de semanas meses e incluso años, ya que en ambos casos los datos requeridos y los resultados obtenidos discrepan y tienen fines distintos.

Como se menciona en el Capítulo 3, se deben hacer ciertas observaciones a los datos ingresados en el software HEC-HMS v 3.3, relacionados al tipo de estudio que se pretende realizar.

Por ejemplo si se realizase un estudio de eventos serían innecesarios los datos de evapotranspiración de las cuencas ya que no tendría influencia en la respuesta de una lluvia puntual, ahora si se realizase un estudio de análisis continuo mayor a un año las pérdidas no podrían estudiarse por el método de curva número.

Por esta razón se pretende dejar en claro las consideraciones adoptadas en los Capítulos anteriores.

6.2.1.1 Consideraciones generales

El tipo de estudio a realizar es un análisis continuo multianual. Para ello se han seleccionado 40 años de estadística de precipitación, fluviometría, evapotranspiración y temperaturas. Los años de registro son del mes de abril de 1968 hasta el mes de marzo del 2008. Las series de datos recopiladas son de carácter diario, estos registros pueden ser vistos en la copia digital de esta memoria mientras que en los anexos se encuentran los valores medios mensuales de las series mencionadas. Las características generales de los registros de la estadística disponible fueron analizadas en el Capítulo 2 y más específicamente en el Capítulo 3.

Otro aspecto relevante a considerar es la existencia o no de cuencas nivales en el área de estudio, ya que en ellas son muy importantes los registros de evapotranspiración y temperaturas, para ejecutar el proceso de acumulación o derretimiento de nieve.

6.2.1.2 Consideraciones específicas

Fueron tomadas las precipitaciones de 9 estaciones cercanas al área de estudio, para ello se procedió a rellenar los datos faltantes de la serie de registros a través del método especificado en el Capítulo 3, posteriormente se distribuyó la precipitación de la zona a través del método de los polígonos de Thiessen, de acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 5.

Los registros fluviométricos no necesitan ser rellanados por ningún método ya que el software HEC-HMS 3.3 los solicita para realizar un ajuste del hidrograma generado por el programa con el hidrograma de registro histórico, este proceso se conoce con el nombre de calibración y puede realizarse de manera automática o manual haciendo variar algunos parámetros.

Que el estudio sea de análisis continuo implica que la evapotranspiración en las cuencas tiene una relevancia mayor, para ello se cuenta solo con 4 estaciones medidoras de evapotranspiración, las cuales fueron distribuidas a las demás cuencas a través del método empleado en el Capítulo 5.

Cabe mencionar además que en las cuencas propiamente nivales, la evapotranspiración fue considerada con solo un porcentaje mínimo cercano a un factor 0.1, ya que el proceso que gobierna estas cuencas está condicionado por la variación en la reserva de nieve acumulada, la cual depende netamente de la oscilación de la temperatura que presentan este tipo de cuencas.

Como ya se menciona en los Capítulos anteriores las temperaturas solamente son requeridas en el caso de encontrarse con cuencas nivales y son exclusivamente utilizadas para desarrollar el proceso de derretimiento y acumulación de nieve.

6.2.2 Calibración y Validación.

Como en todo modelo, para que los resultados de la simulación en HEC-HMS 3.3 representen con algún grado de confiabilidad el comportamiento de la cuenca que se está analizando, es necesario someterlos a pruebas de calibración y validación.

La calibración o estimación de parámetros se basa en dos o más registros históricos de precipitación y caudales para un mismo evento. Estos registros son escasos en la mayoría de las cuencas, así que no se puede hacer mucho juego con las posibilidades. Si se cuenta sólo con dos registros lluvia-caudal por ejemplo, entonces uno debe ser usado en la calibración y el otro en la validación. En la medida en que el número aumente, se deben discriminar los dos grupos de datos para que la validación no resulte viciada con los datos de la calibración. La calibración se realizó para un período de 6 años desde el 1 de Abril del 2000 hasta el 31 de Diciembre de 2005.

La validación de los resultados del modelo después de calibrados los parámetros se hace directamente con la simulación del programa al cual se le introduce un registro de precipitación de verificación y se compara el hidrograma de salida calculado con los registros para el mismo evento. La validación se realizó para un período de 10 años, desde el año 1990 hasta el año 2000.

6.2.3 Valores Calibrados.

A través del largo proceso de calibración de los parámetros utilizados en el HEC-HMS 3.3, destacan los valores obtenidos del modelo meteorológico de las cuencas nivales y en especial los del método de Temperatura Índice para todas las sub-cuencas. En la Tabla N° 6.1 se indican los valores obtenidos a través del proceso de calibración, los cuales se detallan mas adelante.

Tabla N° 6.1: Valores calibrados del método Temperatura Índice.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>PX Temperature</i>	1.5	°C
<i>Base Temperature</i>	0	°C
<i>Wet Meltrate</i>	5	mm/(°C*día)
<i>Rain Rate Limit</i>	70	mm/día
<i>ATI - Meltrate Coefficient</i>	1	
<i>Cold Limit</i>	0.9	mm/día
<i>ATI - Coldrate Coefficient</i>	1	
<i>Water Capacity</i>	10	%
<i>Groundmelt Method</i>	0	mm/día

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de la Tabla N° 6.1 fueron presentados y definidos en la sección 5.5.3.3. En dicha tabla se determino el valor 1.5 °C, como la temperatura que discrimina si la precipitación que cae como lluvia o como nieve, valor razonable y recomendado por diversos autores, del mismo modo se determina como temperatura base el valor de 0 °C aquella que define que bajo este umbral existe derretimiento. Los siguientes dos parámetros Wet Meltrate y Rain Rate Limit están relacionados con el comportamiento de las precipitaciones y su acción sobre el manto de nieve que son valores propios de cada cuenca, sin embargo como no se encontró información al respecto sobre las cuencas del Limarí se adoptaron valores recomendados en el archivo de ayuda de HEC-HMS 3.3. Los valores de los coeficientes ATI representan el grado de madurez del manto de nieve y por lo general deben ser índices menores a la unidad que se utilizan para determinar las

tasas de derretimiento o congelación que se produce en el transcurso de los días, sus valores fueron los recomendados por el manual del HEC-HMS 3.3.

Para el caso del Cold Limit, se ha supuesto un valor menor a 1 ya que a través de la calibración se llegó a la conclusión que valores mayores a la unidad no presentan cambios significativos apreciables. En el caso de Water Capacity se adoptó un porcentaje de 10% considerado como nieve húmeda con un alto grado en contenido de agua. Finalmente frente a la opción de derretimiento en el subsuelo se adoptó el valor 0.

Adicionalmente, se presentan los valores que relacionan la tasa de derretimiento con los factores Grado-Día y el contenido de frío con los factores del Grado-Día, los cuales deben ser ingresados al HEC-HMS 3.3 en forma de datos pareados. A continuación en la Tabla N° 6.2 se presentan los datos ingresados para la variación estacional de la tasa de derretimiento, posteriormente en la Tabla N° 6.3, se presenta los valores del contenido de calor con sus correspondientes factores Grado-Día.

Tabla N° 6.2: Valores calibrados ATI-Meltrate.

<i>Ati (°C-Día)</i>	<i>Meltrate (mm/(°C-Día))</i>
0	0
25	0.8
50	1
75	3
100	4
150	3
200	1
500	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 6.3: Valores calibrados ATI-Coldrate.

Ati (°C)	Coldrate (mm/(°C-Día))
-1000	100
-100	40
-50	20
-20	2
0	2

Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto importante de mencionar con respecto a la elección de los valores ATI-Meltrate, es que esta elección puede realizarse de dos maneras, la primera es tal cual como se presento en la Tabla N° 6.2, vale decir, los valores del Meltrate son variados de acuerdo a cada factor grado-día, la otra manera de asumir estos valores es seleccionar un valor fijo, habitualmente entre 1.8 a 3.5 (mm/(°C-Día)), entre un valor inicial y un valor final ATI, por ejemplo, escoger un valor de 2.5 (mm/(°C-Día)) en el Meltrate y que sea constante entre 0 y 500 grados-días. Esta manera de trabajar la tabla ATI tiene la ventaja de poder hacer variar solamente el valor del Meltrate hasta ajustarlo a un valor adecuado, sin embargo al realizarse de esta forma debe introducirse otro factor denominado “Annual Pattern”, que representa la variación que experimenta el Meltrate en para cada mes en porcentaje, pero que a la vez tiene la desventaja de ocasionar que el tiempo de ejecución del software se cuadruplique al momento de realizar una simulación.

6.2.4 Resultados Calibración, Validación y Simulación.

A continuación se presentan los resultados finales obtenidos del proceso de calibración y posterior validación de resultados, para la cuenca afluente al embalse Paloma. En la Tabla N° 6.4 se presentan los valores finales del modelo de pérdidas.

Tabla N° 6.4: Valores finales del método de perdidas SMA.

<i>Código Sub-cuenca SMA</i>	<i>SC01</i>	<i>SC02</i>	<i>SC03</i>	<i>SC04</i>	<i>SC05</i>	<i>SC06</i>	<i>SC07</i>	<i>SC08</i>	<i>SC09</i>	<i>SC10</i>	<i>SC11</i>
<i>Canopy (%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Surface (%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Soil (%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Groundwater 1 (%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Groundwater 2 (%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Canopy Storage (mm)</i>	150	150	50	50	10	5	60	50	10	50	50
<i>Surface storage (mm)</i>	50	50	80	80	150	150	130	80	150	80	80
<i>Max. Infiltration (mm/h)</i>	0.6	0.6	2	2	0.6	0.7	0.2	2	0.6	2	2

<i>Impervious (%)</i>	15	20	0.1	0.1	20	55	20	0.1	20	10	0.1
<i>Soil storage (mm)</i>	150	150	510	510	90	100	250	510	90	510	510
<i>Tension Storage (mm)</i>	120	120	80	80	40	55	45	80	45	80	80
<i>Soil Percolation (mm/h)</i>	2	2	1.5	1.5	1.5	2	0.8	1.5	1.5	1.5	1.5
<i>GW1 Storage (mm)</i>	10	10	200	200	10	30	100	200	10	100	200
<i>GW1 Percolation (mm/h)</i>	2	2	0.4	0.4	2	2.5	0.2	0.4	2	0.4	0.4
<i>GW1 Coefficient (h)</i>	50	50	45	45	20	70	25	45	20	45	45
<i>GW2 Storage (mm)</i>	10	10	50	50	10	40	10	50	10	50	50
<i>GW2 Percolation (mm/h)</i>	2	2	0.8	0.8	4	4	0.6	0.8	4	0.8	0.8
<i>GW2 Coefficient (h)</i>	200	200	5	5	4	100	120	5	4	5	5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 6.1 se indica la ubicación de las estaciones fluviométricas calibradas, validadas y simuladas en las cabeceras de la sub-cuenca del Río Grande Medio y de la sub-cuenca del Río Grande Alto. Estas estaciones además fueron escogidas gracias a que poseían registros fluviométricos extensos y confiables y por su cercanía al espejo de agua del embalse Paloma.

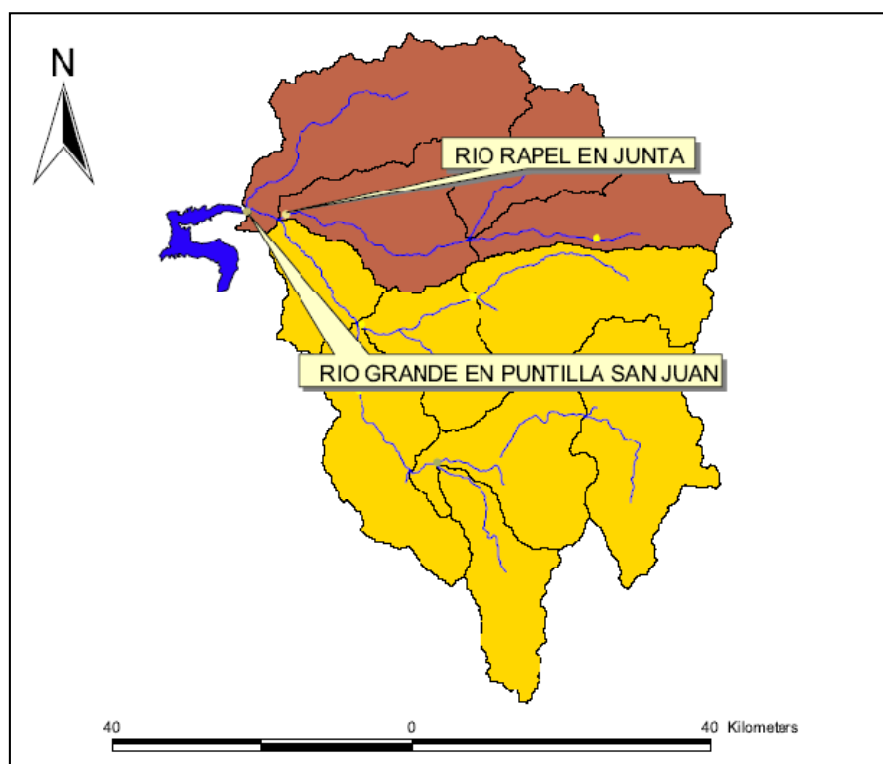


Figura N° 6.1: Estaciones fluviométricas calibradas, validadas y simuladas. Elaboración propia.

6.2.5 Figuras calibración, validación y simulación.

a) Río Rapel en Junta.

La sub-cuenca del Río Grande Medio cuya cabecera es la unión del Río Rapel con el Río Grande, fue dividida en 3 subcuencas, dos de ellas (ubicadas al Este) se modelaron con un comportamiento nival. Para determinar la variación de

acumulación de nieve se tomo como temperatura de referencia la estación Paloma Embalse ubicada a 320 m.s.n.m. Para la calibración se utilizaron las estaciones fluviométricas del Rio Los Molles en Ojos de Agua y Rio Rapel en Junta. La calibración se realizó para un periodo de 6 años, desde el 01 de abril del 2000 y hasta el 31 de diciembre del 2005, la validación fue realizada por un periodo de 10 años desde 1990 a 2000 y la simulación corresponde al periodo 1980 al 2007. La Figura N° 6.2 muestra el hidrograma de salida para la calibración, la Figura N° 6.3 muestra la validación y la Figura N° 6.4 representa la simulación por un periodo de 27 años.

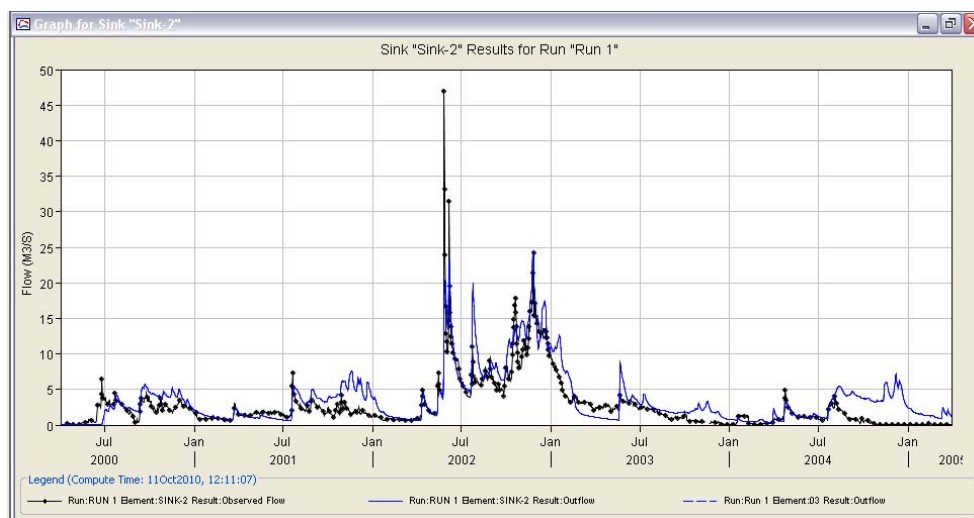


Figura N° 6.2: Calibración entrada embalse Paloma, sector Rio Grande Medio 2000-2005.
Elaboración propia.

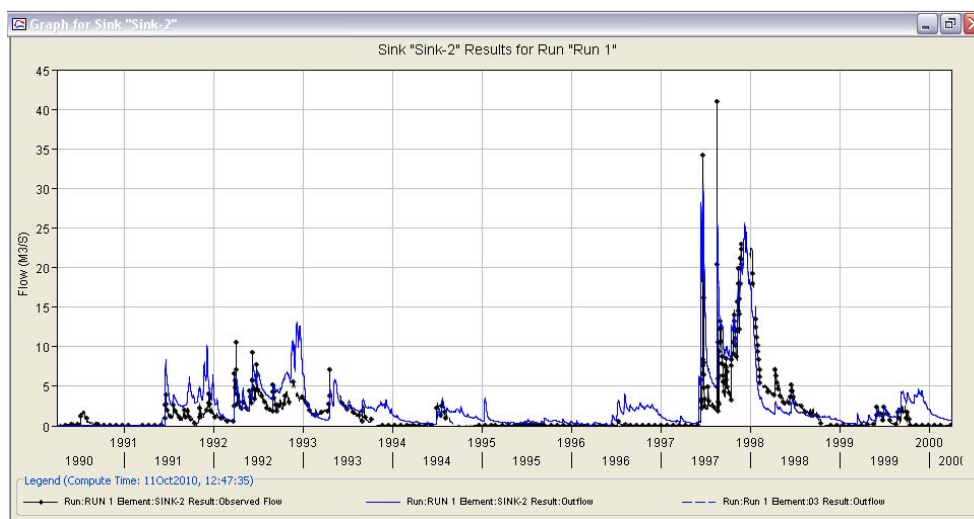


Figura N° 6.3: Validación entrada embalse Paloma, sector Rio Grande 1990-2000.
Elaboración propia.

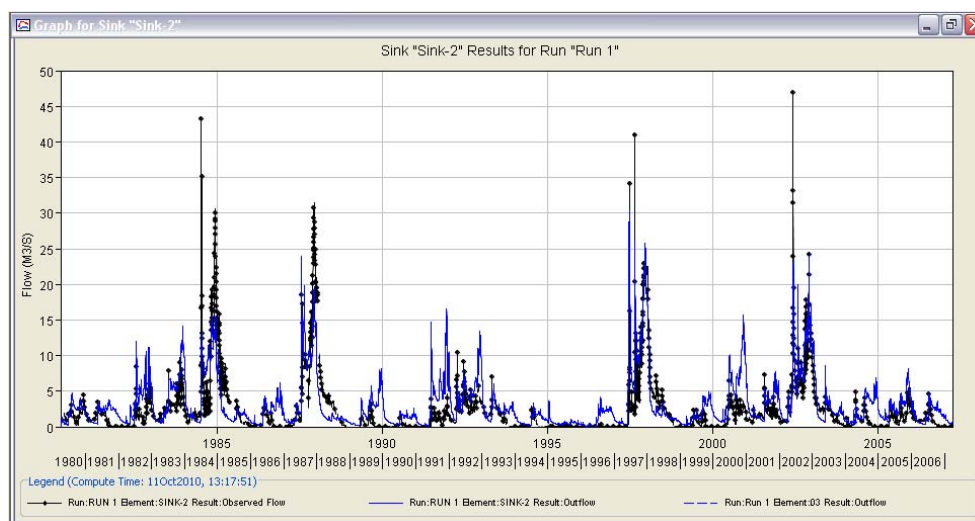


Figura N° 6.4: Simulación entrada embalse Paloma, sector Rio Grande 1980-2007.
Elaboración propia.

Nota: En todos los casos la línea punteada representa el caudal observado.

b) Rio Grande en Puntilla San Juan.

El Caudal de la sub-cuenca del Río Grande Medio, se une al caudal de las subcuencas del Rio Grande Alto, ambos caudales son medidos en la estación fluviométrica ubicada en la localidad de Puntilla San Juan. Estos registros reflejan los aportes de la totalidad de las sub-cuencas ubicadas aguas arriba del embalse. De ellas 6 sub-cuencas se modelaron con un comportamiento nival y el resto con un comportamiento nivo-pluvial. Para determinar la variación de acumulación de nieve se tomo como temperatura de referencia la estación Carén ubicada a 740 m.s.n.m. Para la calibración se utilizaron las estaciones fluviométricas del Rio Grande en el Cuyano, Rio Grande en Las Ramadas, Rio Grande en Puntilla San Juan, Rio Mostazal en Carén, Rio Mostazal en Cuestecita y Rio Tascadero en Desembocadura. La calibración se realizó para un periodo de 6 años, desde el 01 de abril del 2000 y hasta el 31 de diciembre del 2005, la validación fue realizada

por un periodo de 10 años desde 1990 a 2000 y la simulación corresponde al periodo 1980 al 2007. La Figura N° 6.5 muestra el hidrograma de salida para la calibración, la Figura N° 6.6 muestra la validación y la Figura N° 6.7 representa la simulación por un periodo de 27 años.

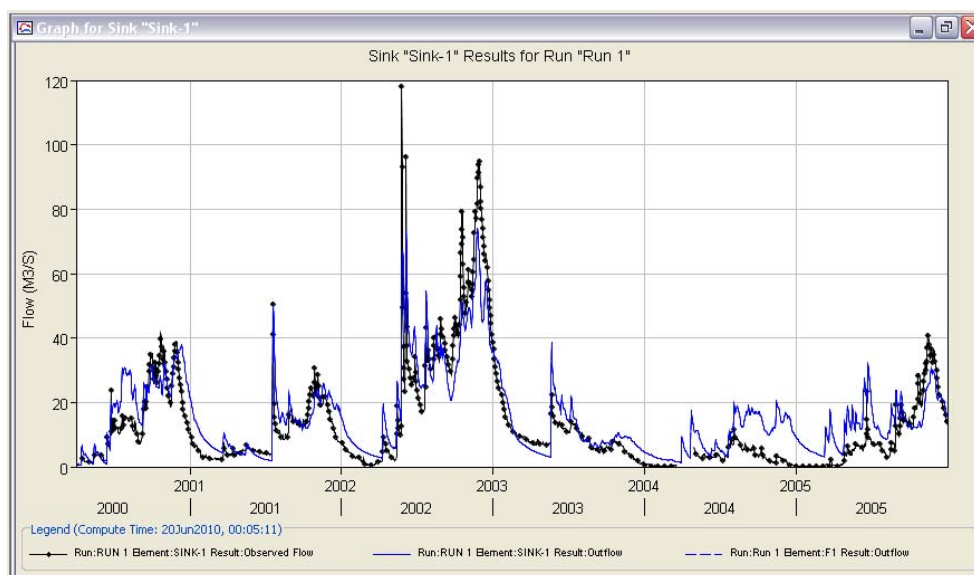


Figura N° 6.5: Calibración entrada embalse Paloma, sector Rio Grande 2000-2005.
Elaboración propia.

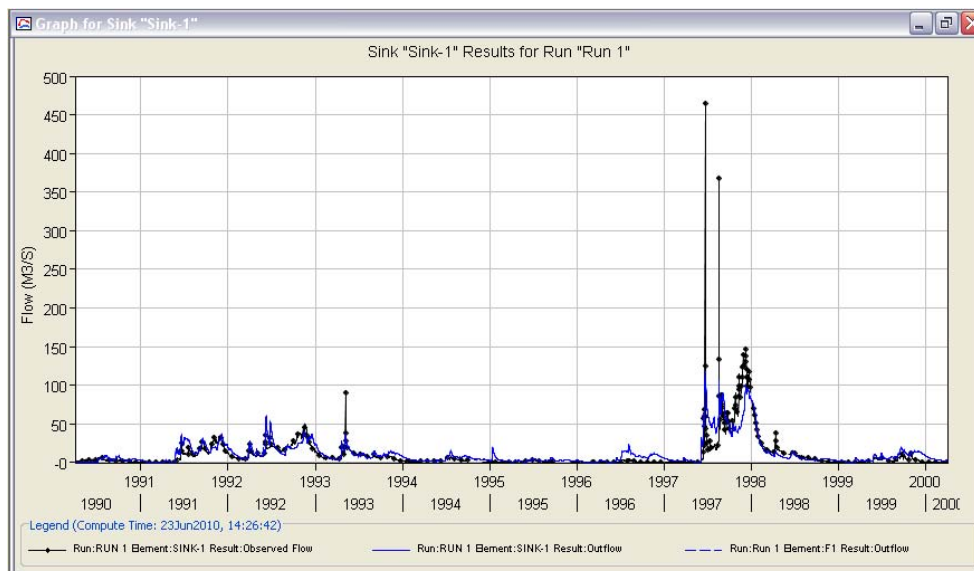


Figura N° 6.6: Validación entrada embalse Paloma, sector Rio Grande 1990-2000.
Elaboración propia.

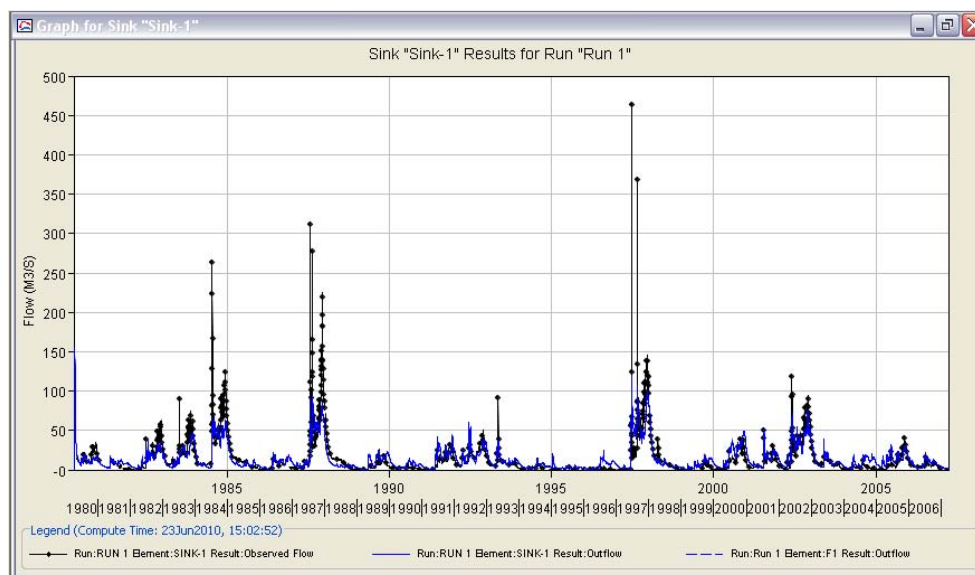


Figura N° 6.7: Simulación entrada embalse Paloma, sector Rio Grande 1980-2007.
Elaboración propia.

Nota: En todos los casos la línea punteada representa el caudal observado.

6.2.6 Análisis de resultados HEC-HMS 3.3

El análisis de los resultados obtenidos en la sección anterior, demuestra a primera vista que en los años más lluviosos en específico los años 1984-1987-1997, no se alcanzan los caudales máximos de invierno causados por lluvias intensas, de periodos de retorno altos y poco habituales. Con esto no se cumple el objetivo inicial que pretendía reflejar de la mejor manera posible los años lluviosos en invierno, por lo que la calibración en especial de las cuencas pluvio – nivales en el software HEC-HMS 3.3 no es completamente efectiva.

Las lluvias que no son consideradas como extremas, aquellas que quedan fuera de los años catalogados como lluviosos poseen una representación en la calibración mas acorde con los registros históricos y pueden ser utilizados para

representar la respuesta de las cuencas del Rio Grande, de aquellos años considerados “normales”.

Para el periodo estival, la representación de los volúmenes de agua, provenientes del derretimiento de la nieve acumulada en las altas cumbres, se considera aceptable para los años muy húmedos, húmedos y normal húmedo, pero no representa de manera correcta los años normal, normal seco, seco y muy seco, de acuerdo a la categorización de años del Capítulo 4.

De acuerdo a lo anterior, los resultados entregados por la calibración del modelo hidrológico podrían utilizarse para realizar pronósticos del volumen afluente del Rio Grande para la temporada estival, considerando ciertos criterios previos de aplicación. La metodología utilizada inicialmente considero una categorización de los años de acuerdo al criterio empleado en el Capítulo 4 y que relaciona si un año puede ser calificado como muy lluvioso en un extremo o muy seco en otro. A continuación en la Tabla N° 6.5, se presenta la clasificación por año hidrológico de acuerdo al índice de precipitación presentado en la sección 4.2.1.

Tabla N° 6.5: Clasificación por año hidrológico de acuerdo al índice de precipitación según Brown- Ferrer (1978).

	Año	IP
Muy Húmedo	1983	440.8
	1992	452.9
	1972	485.0
	1984	499.5
	1987	577.1
	2002	585.0
	1997	671.5
Húmedo	1982	340.8
	1978	349.4
	1980	358.5
	1991	374.9
	2005	394.4
	2000	396.4

Normal Húmedo	1989	283.6
	2001	315.9
	1993	327.1
	2003	330.8
Normal	2006	226.1
	2004	228.2
	1973	246.9
	1981	252.7
	1977	256.6
	1998	273.9
Normal Seco	1996	172.5
	1990	206
	1988	217.3
	1986	217.7
	1985	208.3
	1979	190.1
Seco	2007	147
	1999	168.2
	1994	157.9
	1976	134.5
	1975	150.9
	1974	131.8
	1971	126.7
Muy Seco	1995	93.1

Fuente: Elaboración propia

Se ha realizado un estudio de correspondencia para ver que tan acertado se encuentran los valores de los volúmenes calculados por el software HEC-HMS en la estación medidora de caudal a la entrada del embalse Paloma, la estación Rio Grande en Puntilla San Juan. Para ello se calculó el volumen de agua afluente entre el 01 de septiembre hasta el 30 de marzo, desde 1971 hasta 2007, luego se tomó en consideración la categorización de años propuesta por Brown-Ferrer (1978) en su trabajo denominado “Metodología de Pronósticos para el Sistema Paloma”, trabajo que fue detallado en el Capítulo 4 en la sección 4.2.1 y se compararon los resultados obtenidos.

La Tabla N° 6.6 muestra los resultados obtenidos de los volúmenes de agua comparativos en los meses de verano entre lo calculado y lo real, la

correspondencia esta expresada en porcentaje, el volumen observado es el volumen de agua acumulado entre el 01 del mes de septiembre y el 30 de marzo del año hidrológico, el volumen calculado corresponde al volumen de agua acumulado y calculado por el software HEC-HMS, el factor es un factor de ajuste que puede ser aplicado para pronosticar el volumen de agua fluente y el error es el error relativo entre el volumen observado en la temporada y el calculado por HEC-HMS.

Tabla N° 6.6: Volúmenes de agua en temporada estival para años Muy Húmedos.

MUY HUMEDO							
Año	IP	Correspondencia	Observado	Calculado	FACTOR	Esperado	Error Relativo
1997	637.3	82.2	12534.6	10300.8	1.4	14421.1	-15.1
1987	577.1	70.5	12769.2	9008.5	1.3	11711.1	8.3
2002	571.4	86.7	8080.8	7003.7	1.35	9455.0	-17.0
1984	488.3	66.6	11029.2	7340.9	1.25	9176.1	16.8
1992	452.9	106.4	4113.7	4377.6	1.1	4158.7	-17.1
1972	441.5	100.9	5961.4	6017.9	1	6017.9	-0.9
1983	430.3	92.9	5390.2	5007.6	0.9	4506.8	16.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6.7: Volúmenes de agua en temporada estival para años Húmedos.

HUMEDO							
Año	IP	Correspondencia	Observado	Calculado	FACTOR	Esperado	Error Relativo
2005	362.9	105.2	3196.3	3361.9	0.75	2521.43	21.1
2000	347.8	155.7	3434.3	5348.8	0.6	3209.28	6.6
1980	347.6	101.3	2532.9	2564.8	0.9	2308.32	8.9
1991	335.9	119.9	3263.9	3911.8	0.9	3520.62	-7.9
1978	324.7	78.9	5548.3	4376	1.4	6126.40	-10.4
1982	324.0	69.2	5892	3465.8	1.4	4852.12	17.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6.8: Volúmenes de agua en temporada estival para años Normal Húmedo.

NORMAL HUMEDO							
Año	IP	Correspondencia	Observado	Calculado	FACTOR	Esperado	Error Relativo
2003	330.8	219.3	617.1	1353.3	0.5	676.65	-9.6
1993	327.1	215.5	894.1	1927.1	0.5	963.55	-7.8
2001	315.9	135.5	2265.6	3069.9	0.63	1934.037	14.6
1989	283.6	169.7	1450.8	2461.6	0.65	1600.04	-10.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6.9: Volúmenes de agua en temporada estival para años Normal.

NORMAL							
Año	IP	Correspondencia	Observado	Calculado	FACTOR	Esperado	Error Relativo
1998	273.9	255.2	324	827	0.4	330.8	-2.1
1977	256.6	109	2733.3	2979.1	0.9	2681.19	1.9
1981	252.7	663.4	249.6	1655.9	0.15	248.385	0.5
1973	246.9	245	479.4	1172	0.4	468.8	2.2
2004	228.2	675.6	371.9	2512.5	0.15	376.875	-1.3
2006	226.1	227.3	643.9	1463.5	0.4	585.4	9.1

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los años normal seco, seco y muy seco no fueron representados debido a que la correspondencia entre lo calculado y lo observado presentaban diferencias sobre el 600%.

De la tabla anterior se observa que en los años muy húmedos se pueden realizar estimaciones del volumen de agua afluente al embalse Paloma disponible para los meses de verano, aplicando un factor de ajuste y de acuerdo al índice de precipitación. Para los años húmedos y normal húmedo también se pueden realizar estimaciones, pero con errores mayores a los observados que en años muy húmedos. Para los años normales, normal seco, seco y muy seco, no se observa una correspondencia clara y los volúmenes acumulados no coinciden con un factor de ajuste apropiado al IP, por lo que para este grupo de clasificación de años hidrológicos no se pueden realizar estimaciones del volumen afluente al embalse en los meses de verano.

6.3 SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PALOMA Y SU VERTEDERO

6.3.1 Consideraciones adoptadas

Los resultados obtenidos de la simulación de la operación del embalse Paloma y de sus compuertas de evacuación de crecidas son presentados de dos maneras: en la primera de ellas se realizara un estudio del embalse de acuerdo a una simulación realizada por año, en las cuales, se simulan los volúmenes de los meses en los cuales de acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo anterior se debe operar el vertedero del embalse. En la segunda se realiza una simulación mensual de la operación del embalse, y en los casos requeridos, se simula la operación del vertedero del embalse. En ambas situaciones se presentan los resultados gráficos y numéricos obtenidos.

6.3.2 Simulaciones por año

A partir de las expresiones indicadas en la capítulo 5, se han realizado simulaciones a distintos períodos operacionales del embalse Paloma. Estos períodos han sido escogidos por tener los mayores volúmenes afluentes al embalse a lo largo de su historia y por lo cual se ha requerido liberar grandes cantidades de agua a través de su vertedero. Los períodos escogidos corresponden a los años: 1984, 1987, 1997 y 2002.

Para estos 4 periodos, en una primera etapa se realizó una simulación anual de los distintos volúmenes que manejará el embalse mes a mes con un determinado colchón o volumen de reserva, lo que incide en la variación del volumen a evacuar por vertedero. Se contrastarán gráficamente la operación real del embalse (Anexo 9) versus estrategias de manejo bajo la condición de un

volumen de reserva fijado en 50.000.000 m³ (Anexo 10) y 100.000.000 m³ (Anexo 11).

6.3.2.1 Simulación Año 1984

Se simuló la evacuación en el embalse para los meses de Julio a Diciembre, en donde el caudal que llega al embalse aumenta considerablemente.

De acuerdo a la operación realizada ese año (Anexo 9.1), el mes de Julio esta registrado como el mes con mayor volumen afluente al embalse Paloma, el cual fue de 455.499.661 m³. Como el aumento de caudal ocurrió en pleno invierno, se debió generar una evacuación de agua en el menor tiempo posible, para lograr mantener el volumen de reserva del embalse ante una nueva crecida. Cabe señalar que cuando ocurrió este aumento brusco de volumen afluente, el embalse se encontraba con 680 millones de m³ almacenados, por lo cual el embalse ya alcanzaba más de un 90 % de su capacidad de almacenamiento.

El volumen total real evacuado por el embalse durante este año fue de 1.284.340.730 m³. Realizando las simulaciones se obtienen volúmenes de 1.333.826.353 m³ y 1.383.752.353 m³, las cuales superan levemente la operación realizada en el embalse en un 3,9 y 7,7 % respectivamente.

La mayor diferencia de operación obtenida, ocurre para el mes de Julio, que como se ha indicado tuvo el mayor volumen afluente al embalse. De acuerdo a la simulación, se reduce el volumen evacuado hasta los 400 millones de m³ para ambos colchones, lo que nos muestra una diferencia de aproximadamente 225 millones que de acuerdo a la metodología sugerida no se deberían haber evacuado en ese mes, y que según se observa en la Figura N° 6.8 debieron ser evacuados en los meses anteriores (en el caso del colchón de 100 millones de m³), y que con la regulación propuesta se podrían haber evacuado paulatinamente en los meses siguientes sin comprometer la seguridad del embalse.

La operación sugerida para ambos casos es operar una compuerta con una abertura permanente de 1.5 metros (lo que equivale a una caudal aproximado de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ que deben ser evacuados a través del vertedero del embalse).

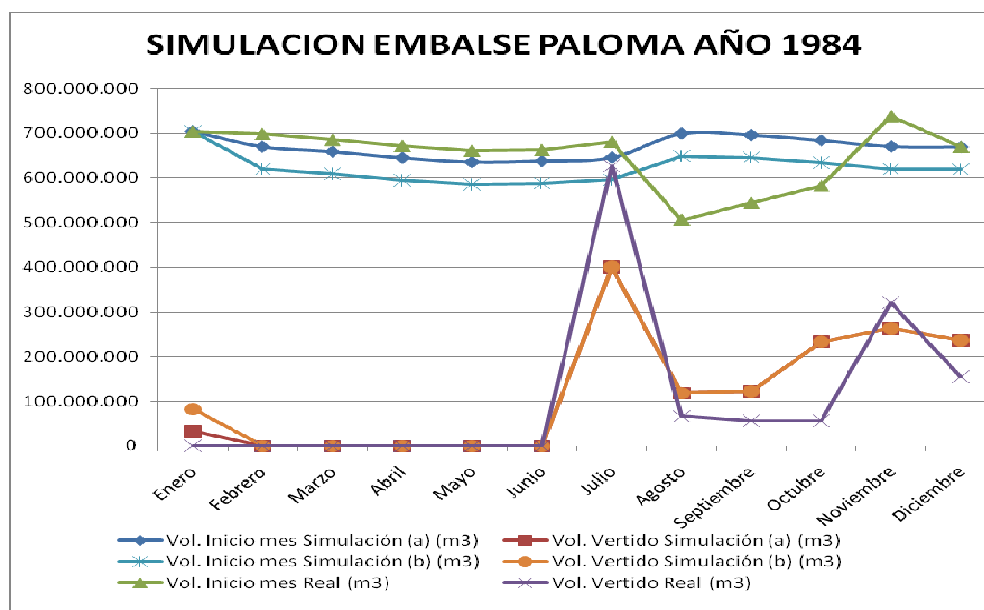


Figura N° 6.8: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1984. Elaboración propia.

6.3.2.2 Simulación Año 1987

Para este año nuevamente los volúmenes afluentes se concentraron en los meses de Julio a Diciembre. Como se observa en la Figura N° 6.9, el volumen almacenado cuando comienza la operación del vertedero bordea los 400 millones de m^3 , por lo cual se cuenta con una importante capacidad disponible para enfrentar una crecida (entre 250 – 300 millones de m^3 , según el colchón establecido).

Observando la Figura N° 6.9, las simulaciones y la operación real realizada son muy semejantes. El volumen vertido en el mes de Agosto, donde se producen

los mayores eventos de precipitaciones es similar para la operación realizada (381 millones) y para la simulación con un colchón de 100 millones (384 millones de m³ vertidos).

Durante los meses de deshielos, con las simulaciones se logra aumentar el volumen almacenado a inicio de cada mes, especialmente para el modelo con colchón de 50 millones de m³. Desde Agosto a Diciembre, los volúmenes vertidos simulados son levemente menores a la operación realizada, exceptuando Noviembre, en el cual existe un aumento de 133 millones más de m³ que son vertidos por el embalse.

Para los meses con volúmenes para vertir superiores a los 350 millones de m³, se sugiere operar una compuerta con una abertura de 2.0 metros, la cual es equivalente al caudal de 200 m³/s que fija como límite el Manual de Operaciones (cabe señalar que este valor depende de la cota en que se encuentre el embalse, la que como se sabe influye directamente en el cálculo del caudal de evacuación de una compuerta). Este caso se dio considerando un volumen de reserva de 100 millones de m³. Los otros meses puede operarse una compuerta y con una altura de 1.0 metros (se obtendría un caudal de salida de unos 100 m³/s aproximadamente).

Para el volumen de reserva de 50 millones, se puede operar una compuerta con una abertura de 1.5 metros (caudales de evacuación entre 150 – 170 m³/s aproximadamente). Cabe indicar que esta compuerta estaría abierta casi el mes completo en los meses de Agosto, Noviembre y Diciembre.

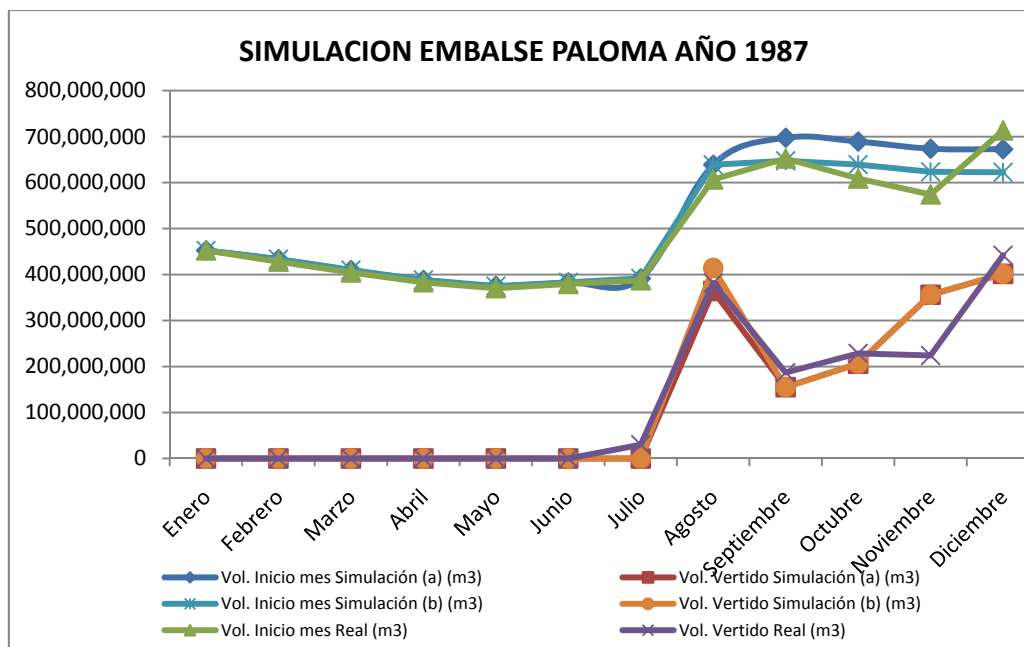


Figura N° 6.9: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1987. Elaboración propia.

6.3.2.3 Simulación Año 1997

Durante este año, se observa que la operación del vertedero, es mayor para los meses de Septiembre a Diciembre. Con respecto a años anteriores, este año el embalse se encontró con volúmenes almacenados muy bajos, llegando a inicios de Agosto llega con un volumen almacenado cercano a los 200 millones de m^3 .

Respecto a la operación del vertedero, las simulaciones son semejantes a la operación real, especialmente para la simulación con un colchón de 50 millones de m^3 .

En ambas simulaciones, se opera una compuerta del vertedero con una abertura de 1.5 metros, con caudales de salida que varían entre los 110 a 170 m^3/s según la cota de agua que se tenga, lo cual según los volúmenes que deban evacuarse determina que las compuertas se deban abrir desde los 9 días (90 millones de m^3 por evacuar), hasta los 26 días (370 millones de m^3 por evacuar).

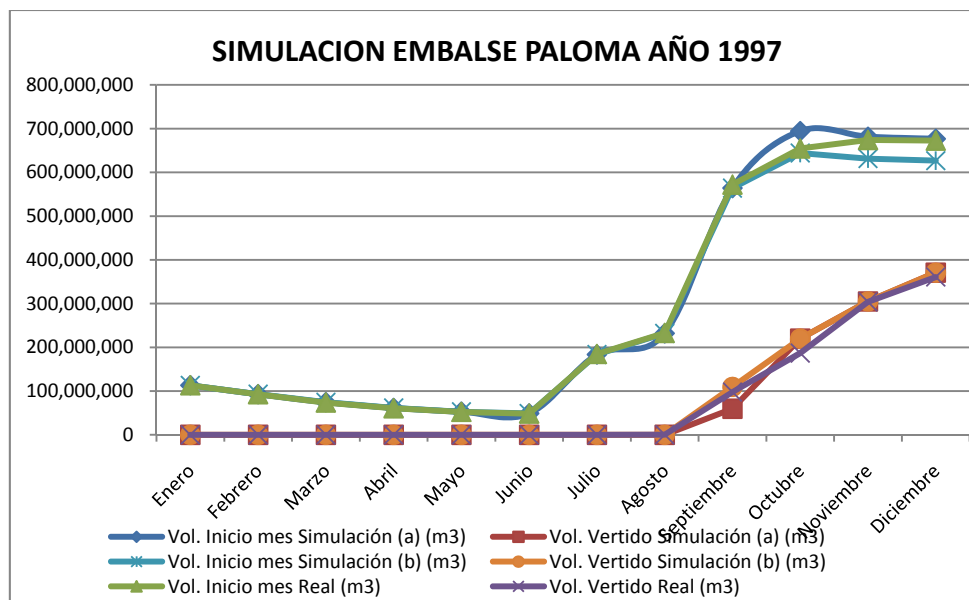


Figura N° 6.10: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 1997. Elaboración propia.

6.3.2.4 Simulación Año 2002

De acuerdo a lo observado, los volúmenes embalsados simulados coinciden con los reales, especialmente en la simulación para un colchón de 50 millones de m³.

Revisando la operación real en el vertedero, esta coincide con las simulaciones (meses de Junio a Diciembre), excepto los meses de Julio, Agosto y Septiembre, donde se obtiene que en las simulaciones se vierte menos agua que la operación real, pero en los meses de Octubre y Noviembre se da lo contrario.

Para el caso del colchón de 100 millones de m³, se produce un leve ajuste en el mes de Enero, donde se vierten un poco más de 39 millones de m³, mientras que en los otros escenarios no se realiza esta operación, esto es buscando que el nivel del embalse se ajuste lo mejor posible a su volumen colchón. Para ambas simulaciones, se supone la apertura de una compuerta a una altura de 1.0 metros, con caudales de salida entre 90 y 110 m³/s, mientras que el tiempo que debe

permanecer en operación el vertedero es variable según los volúmenes que deban evacuarse (ver Anexo 11).

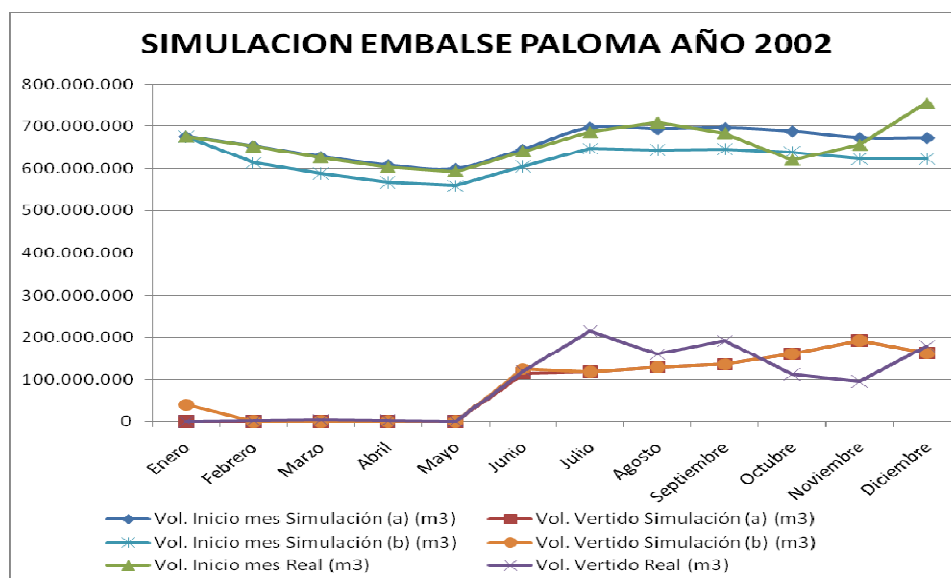


Figura N° 6.11: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el año 2002. Elaboración propia.

6.3.3 Simulaciones por mes

En esta etapa, se ha simulado la operación del vertedero desde su operación día a día. Para ello, se tomaron los meses con los mayores volúmenes afluentes registrados al embalse y además, se consideró el volumen embalsado a inicio de mes para considerar si corresponde operar el vertedero, ya que no tiene sentido simular la operación de las compuertas si el volumen afluente es menor a la capacidad que aún tenga el embalse para almacenar agua.

Conocidos estos meses, se simuló la operación diaria realizada en el embalse Paloma con respecto a la operación real ocurrida en éstos periodos. Se simuló la apertura de las compuertas, el caudal evacuado y el volumen evacuado, a fin de definir una forma en la cual se logre mantener el volumen almacenado en el embalse de acuerdo a la capacidad establecida en las normas de operación y en el volumen de reserva sugerido en los diferentes meses del año.

Tabla N° 6.10: Meses con mayores afluentes y volúmenes vertidos del Embalse Paloma.

Mes	Volumen Vertido		Volumen Afluyente	Volumen inicio	Capacidad	Volumen Total	Volumen por
	Año	Real (m ³)	Real (m ³)	mes (m ³)	disponible (m ³)	(m ³)	evacuar (m ³)
Julio	1984	626.694.544	380.265.194	680.500.000	69.500.000	1.060.765.194	310.765.194
Noviembre	1984	321.982.668	294.476.716	738.668.000	11.332.000	1.033.144.716	283.144.716
Agosto	1987	381.586.803	425.622.403	606.772.000	143.228.000	1.032.394.403	282.394.403
Noviembre	1987	223.990.527	382.491.255	574.192.000	175.808.000	956.683.255	206.683.255
Diciembre	1987	442.037.347	428.993.611	713.579.600	36.420.400	1.142.573.211	392.573.211
Agosto	1997	253.800	333.641.388	232.818.000	517.182.000	566.459.388	-183.540.612
Noviembre	1997	304.005.354	323.377.281	674.240.000	75.760.000	997.617.281	247.617.281
Diciembre	1997	360.785.029	393.957.886	672.782.500	77.217.500	1.066.740.386	316.740.386

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla N° 6.5 se seleccionaron 5 meses a simular en su operación diaria, los cuales se nombran a continuación:

- Del año 1984, se toman los meses de Julio y Noviembre.
- Del año 1987, se toman los meses de Agosto y Diciembre.
- Del año 1997, se tomó el mes de Diciembre.
- Del año 2002, no se tomó ningún mes.

Los meses restantes de los años mencionados no fueron considerados por las siguientes razones:

- Volumen afluente menor a 300 millones de m³.
- Volumen vertido real menor a los 250 millones de m³.
- Volumen almacenado inicial del mes de simulación bajo. Esto se verifica bajo las siguientes relaciones, ya que a menor volumen almacenado, existe mayor capacidad disponible en el embalse, y por lo tanto, se puede

almacenar mayor volumen de agua de las crecidas. Además, se calcula el volumen por evacuar (ecuación 6.3).

$$V_D = V_{EP} - V_0 \quad (6.1)$$

$$V_D < V_I \quad \rightarrow \quad \text{Se debe usar vertedero} \quad (6.2)$$

$$V^* = V_0 + V_I - V_{EP} \quad (6.3)$$

En donde V_D corresponde al volumen o capacidad disponible en el embalse (m^3); V_{EP} es la capacidad de almacenamiento del embalse Paloma (m^3); V_0 representa al volumen registrado al inicio del período (m^3); V_I es el volumen de entrada al embalse (m^3) y V^* es el volumen por evacuar (m^3).

6.3.3.1 Criterios utilizados en las simulaciones

Para realizar las simulaciones diarias para los meses seleccionados, se han tomado en cuenta los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el punto 3.1. A partir de éstos resultados, se han sugerido nuevas hipótesis las cuales tratarán de ser resueltas en las simulaciones. Estas indicaciones son las siguientes:

- Para los meses de Mayo a Septiembre, se sugiere adoptar un volumen de reserva de 100.000.000 de m^3 , debido principalmente a los resultados de las simulaciones anteriores, ya que en éstos meses es donde los volúmenes afluentes al embalse son mayores, principalmente por eventos de precipitaciones, por lo que se dan en cortos períodos de tiempo y por lo tanto se requiere un volumen disponible en el embalse mayor para amortiguar dichas crecidas.

- Para los meses de Octubre a Abril, se sugiere adoptar un volumen de reserva de 50.000.000 de m^3 , ya que en éstos meses los volúmenes afluentes son de un comportamiento más “constante”, por lo cual se puede predecir de mejor forma éstos volúmenes y su forma de llegada al embalse (caudales) , por lo que se puede regular con mayor anticipación la operación del embalse y de su vertedero.
- En la determinación de los caudales del vertedero, se optó por graficar los caudales reales al embalse a la fecha de cada simulación, luego de lo cual se fueron realizando proyecciones de los caudales afluentes venideros, para así permitir que el embalse una vez alcanzado su volumen almacenado recomendado, solamente se limitara a evacuar en forma aproximada el caudal afluente diario.
- Especial atención presenta el mes de Junio de 1984 por las condiciones operacionales que debió enfrentar el embalse. Es por ello, que aparte de la simulación con los parámetros antes mencionados, se realizarán otras dos simulaciones: una considerando un caudal de evacuación en el vertedero de 250 m^3/s (levemente superior a lo permitido en el Manual de Operaciones); y otra simulación considerando un volumen inicial a principio de mes de 650.000.000 m^3 almacenados, el cual difiere del volumen real con el que se inician las simulaciones de la operación en este mes. Cabe señalar que en los registros del embalse Paloma, el volumen almacenado registrado en ésta fecha fue de 673.975.000 m^3 .

6.3.3.2 Simulación mes de Julio de 1984

Como se indicó anteriormente, para este mes se realizaron 3 simulaciones, las cuales se comparan con la operación real. Estas simulaciones se indican de la siguiente forma:

- (1) Simulación Normal: esta corresponde a la simulación realizada en base a las condiciones ya mencionadas, principalmente al caudal de evacuación de 200 m³/s y del volumen colchón, para este caso de 100.000.000 m³.
- (2) Simulación con caudal de evacuación mayor: Simulación donde se establece como condición el caudal máximo de evacuación en 250 m³/s, valor mayor al permitido en el Manual de Operaciones del Embalse.
- (3) Simulación con Volumen Inicial establecido: Simulación donde se considera como volumen embalsado en el primer día del mes como 650.000.000 m³, valor correspondiente al considerar el volumen de reserva en forma efectiva en el embalse (100.000.000 m³)

Los resultados principales de estas simulaciones se relacionan con el volumen embalsado obtenido y con el volumen evacuado por vertedero. Respecto a los volúmenes embalsados, tan solo en la simulación (2) se consigue que este volumen no sea superior a la capacidad máxima del embalse, con lo cual no se arriesga la estabilidad del embalse. En las simulaciones restantes se supera este valor, incluso en la simulación (1) se alcanza un valor de 798.888.000 m³, valor cercano al volumen crítico del embalse. Estos resultados se observan en detalle en la Tabla N° 6.11.

Tabla N°6.11: *Tabla Comparativa del Comportamiento Real y Simulado del Embalse Paloma para el mes de Julio de 1984.*

Tipo de Operación	Volumen Vertido (m ³)	Volumen Final Mes (m ³)	Día con Mayor Volumen Embalsado en el Mes (m ³)
Real	626.694.544	508.801.000	769.720.000 (Día 10)
Simulación (1)	477.711.552	657.080.000	798.888.000 (Día 11)
Simulación (2)	481.031.433	654.352.500	749.927.000 (Día 11)
Simulación (3)	457.463.583	654.079.500	773.702.500 (Día 11)

Fuente: Elaboración propia.

También, con las simulaciones se logra finalizar el mes con el volumen que se considera como óptimo de acuerdo a lo establecido en las condiciones de

inicio, lo cual se observa claramente en el Figura N° 6.12, donde todas las simulaciones nos entregan un volumen almacenado al día 31 del mes cercano a los 650 Hm³.

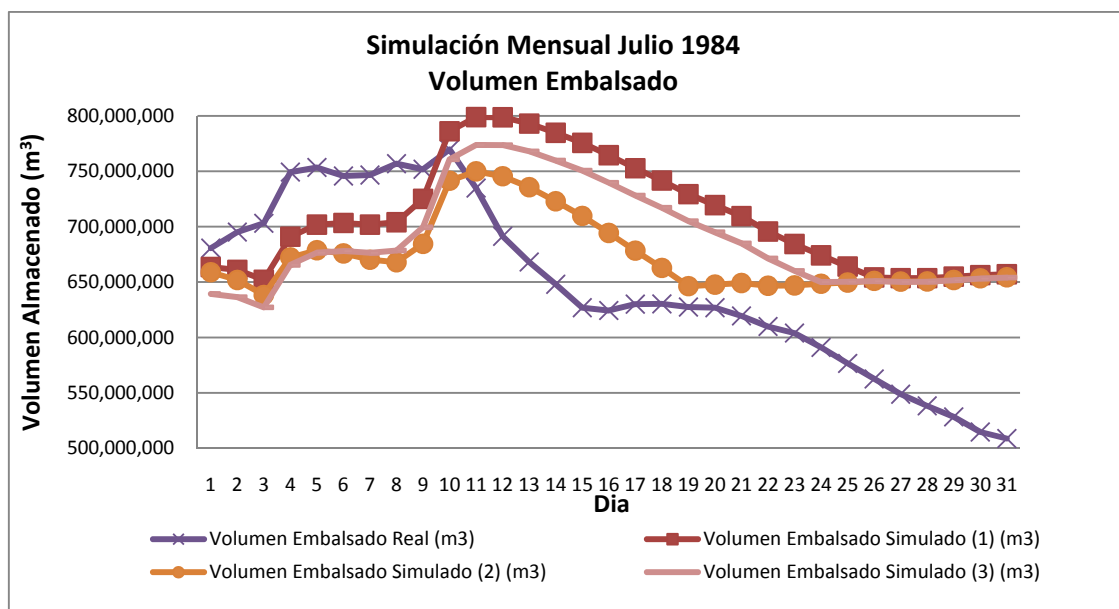


Figura N° 6.12: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Julio de 1984. Volumen Embalsado. Elaboración propia.

Respecto a los volúmenes vertidos, se observa la reducción del volumen a evacuar por el vertedero del embalse es en promedio de unos 150 Hm³ en los 3 modelos simulados, lo cual indica que quizás no era necesario llegar a evacuar durante este mes un volumen tan elevado desde el embalse (626.694.544 m³), por los efectos nefastos que un gran volumen evacuado podría provocar aguas abajo. Esto se observa al ver las estadísticas de operación de ese mes, donde algunos días se llegó a evacuar volúmenes del orden de 60 Hm³ de agua, lo cual en promedio equivalen a un caudal de 700 m³/s.

Además, si observamos la Figura N° 6.13, se infiere que al tener un mayor volumen evacuado como lo plantea la simulación (2) se logra estabilizar el volumen embalsado en un menor tiempo que en las otras 2 simulaciones, las

cuales claramente son de comportamiento similar y solamente varían por el volumen almacenado inicial que registran.

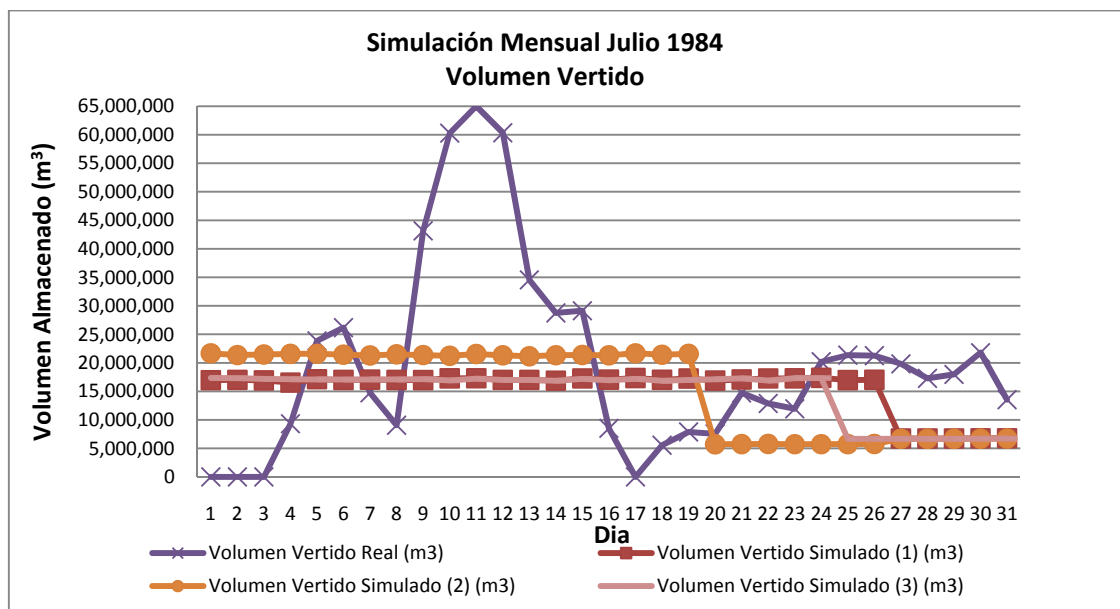


Figura N° 6.13: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Julio de 1984. Volumen Vertido. Elaboración propia.

Respecto a la forma de operación del vertedero, los caudales de evacuación se decidieron en razón al volumen embalsado con que el embalse se encontraba al momento de simular su comportamiento, buscando que se logre retomar en el menor tiempo posible el volumen almacenado recomendado.

Por ello, el embalse en la simulación (2) se simuló con un caudal de evacuación de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, hasta que el volumen embalsado llegase a los 650 Hm^3 , luego de lo cual se simuló con caudales vertidos de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ y luego aumentar a $80 \text{ m}^3/\text{s}$, para así mantener el volumen embalsado en 650 millones.

En el caso de las simulaciones (1) y (3), el vertedero funcionaba con su caudal de evacuación máximo permitido ($200 \text{ m}^3/\text{s}$) hasta los días 27 y 25 del mes respectivamente y el caudal de salida se reduce a $80 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.

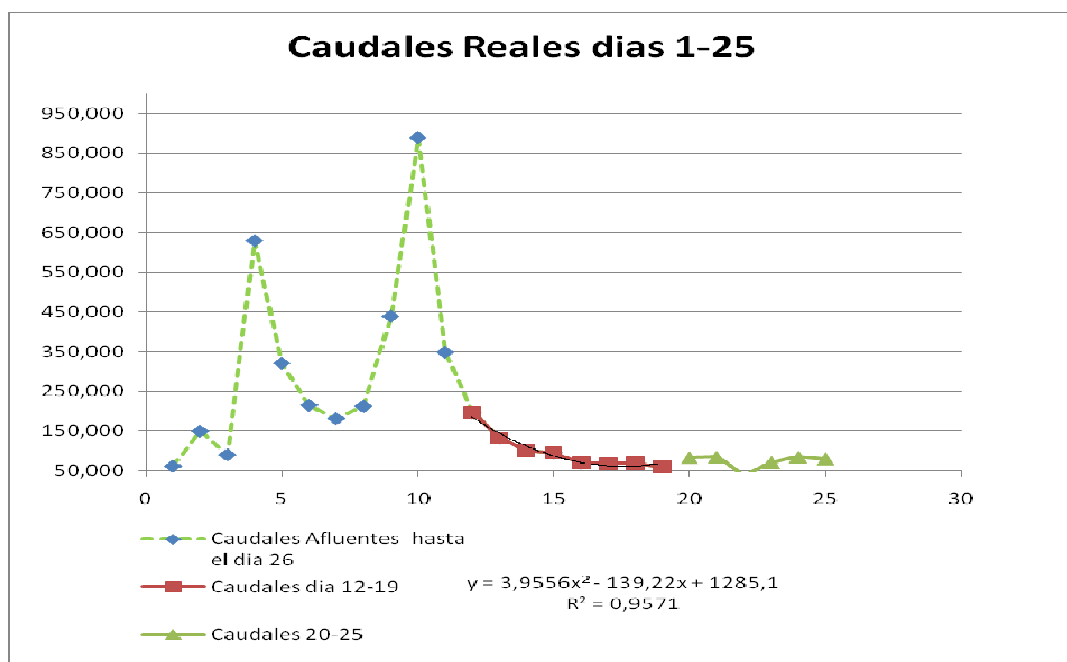


Figura N° 6.14: Caudales afluentes reales al embalse Paloma. Julio de 1984.
Elaboración propia.

6.3.3.3 Simulación mes de Noviembre de 1984

De acuerdo a lo observado, los volúmenes embalsados tanto en la simulación como en la operación real son muy semejantes. Solamente se observa una leve diferencia en los días finales del mes donde aumenta levemente el volumen embalsado.

Respecto a los volúmenes vertidos, la simulación disminuye en 20 Hm³ de agua evacuada por el vertedero, bajando desde los 321 Hm³ que fueron evacuados ese mes a los 301 Hm³ que se obtienen de la simulación.

En líneas generales, la simulación comenzó con el uso del vertedero en su mayor caudal permitido (200 m³/s) hasta que el día 6 el volumen embalsado baja de lo 700 Hm³, según las condiciones planteadas para su operación. A partir de ese día se reduce el caudal vertido a 90 m³/s, según la tendencia observada en

relación a los caudales afluentes al embalse. Este caudal se mantiene hasta el día 25, debido al aumento de los afluentes al embalse (ver Figura N° 6.14), el caudal de evacuación aumenta a $140 \text{ m}^3/\text{s}$, para así mantener el volumen almacenado en el valor recomendado.

En el caso de la operación real efectuada, se observa que esta mantuvo caudales de salida entre los $120 - 140 \text{ m}^3/\text{s}$ evacuados diariamente.

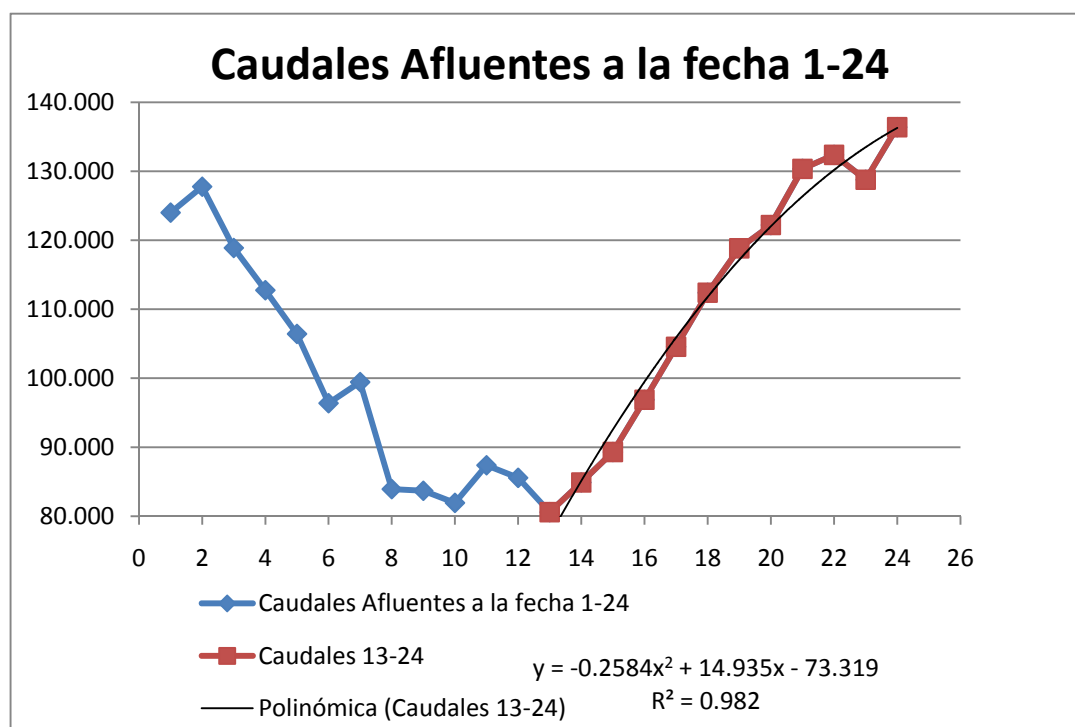


Figura N° 6.15: Caudales afluentes al embalse Paloma. Noviembre de 1984.
Fuente: Elaboración propia.

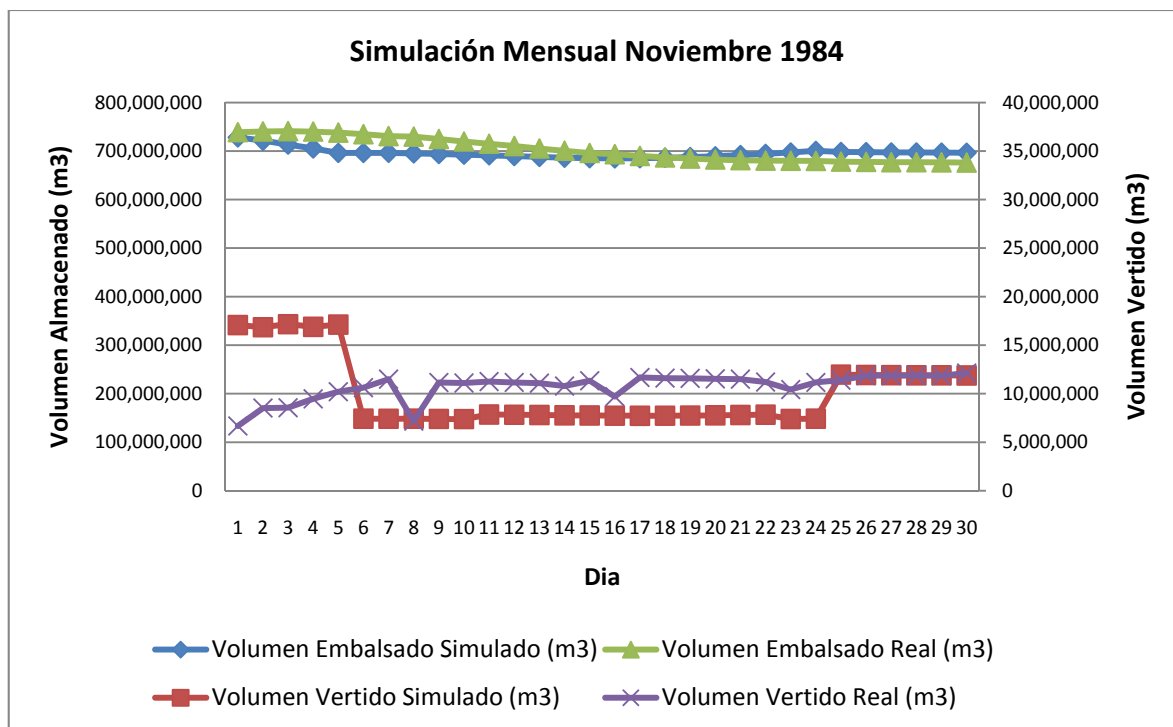


Figura N° 6.16: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Noviembre de 1984. Elaboración propia.

6.3.3.4 Simulación mes de Agosto de 1987

Para este mes, la simulación del embalse entregó un volumen vertido levemente menor con respecto a la operación real registrada. El volumen vertido simulado fue de 372.090.948 m³, contra los 381.588.803 m³ que se registraron en la estadística de Paloma. Según lo observado en esta simulación, si bien se recomendó un volumen máximo embalsable de 650.000.000 m³, en algunos días la simulación sobrepasó los 700 millones embalsados, llegando a un volumen peak de 725 millones de m³ en el embalse, lo cual se debe principalmente a las lluvias que ocurrieron a lo largo de este mes, las cuales incrementaron los caudales afluentes al embalse. Cabe señalar que este tipo de comportamiento es usual en meses de invierno, donde las crecidas debido a las lluvias provocan esto cambios bruscos en los volúmenes afluentes al embalse.

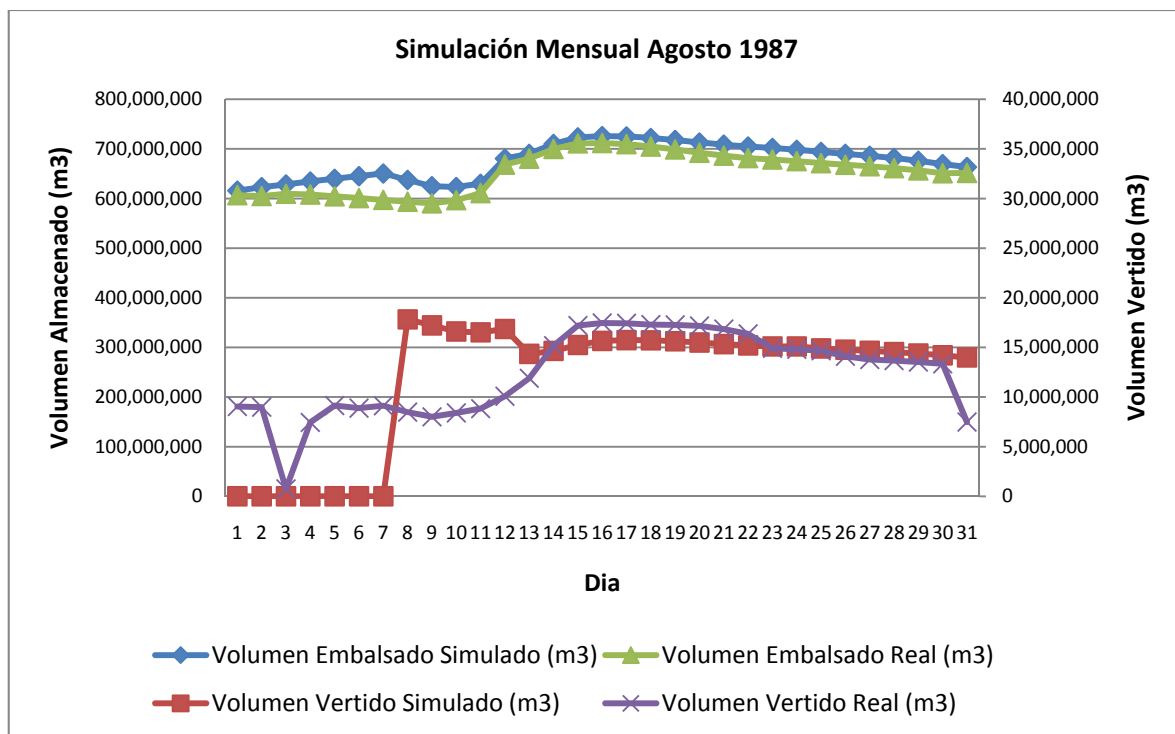


Figura N° 6.17: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Agosto de 1987. Elaboración propia.

Para el vertedero del embalse, la simulación estableció solamente su operación a partir del día 8, que es el momento en que se superó el volumen embalsado recomendado de 650 millones. A partir de este día, debido a ser un mes con mayor probabilidad de lluvia que otros, se decide comenzar su operación con un caudal de 200 m³/s, lo cual se vio respaldado por el aumento de los afluentes al embalse. Luego el caudal vertido se dejó en 190 m³/s, para así mantener el volumen almacenado recomendado.

6.3.3.5 Simulación mes de Diciembre de 1987

Según la operación simulada, los volúmenes almacenados en el embalse no difieren mayormente de la operación del embalse ya realizada. Solamente, desde el día 14 en adelante, comienza a observarse un leve aumento del volumen embalsado. Esto se explica por la disminución del volumen evacuado en el

embalse, ya que en un principio se simuló la evacuación de 200 m³/s y a partir del día 13, se reduce a un caudal promedio de 130 m³/s, lo cual ocurre cuando el embalse alcanzó de nuevo los 700 millones de m³ almacenados.

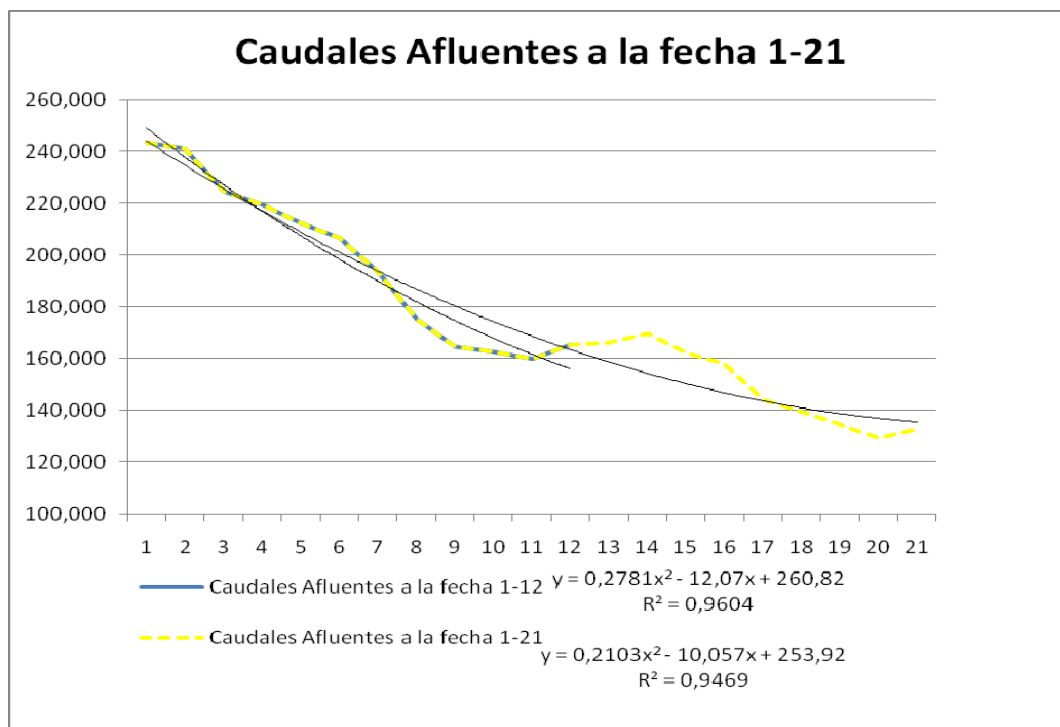


Figura N° 6.18: Caudales afluentes al embalse Paloma. Diciembre de 1987. Elaboración propia.

Respecto a los volúmenes evacuados por vertedero, con la simulación se logra mantener embalsados unos 20 millones de m³ adicionales a los obtenidos con la operación real realizada. El volumen vertido en la simulación alcanza los 421.812.203 m³, mientras que el volumen real vertido fue de 442.037.347 m³.

Además, se logra disminuir el volumen peak almacenado en el embalse en el mes, desde los 719 a 716 millones de m³.

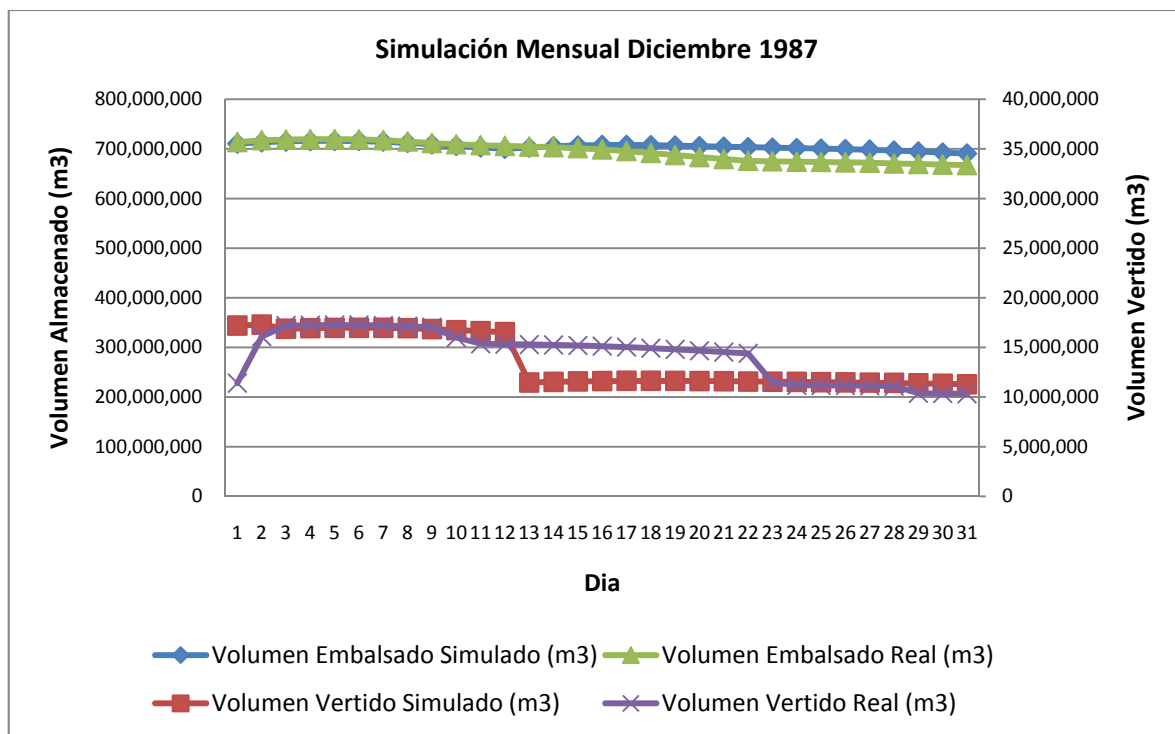


Figura N° 6.19: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Diciembre de 1987. Elaboración propia.

6.3.3.6 Simulación mes de Diciembre de 1997

De acuerdo a lo observado, los volúmenes embalsados simulados son semejantes a los reales, y solamente se produce una diferencia de volumen almacenado en los primeros días del mes.

Respecto a los volúmenes vertidos, tanto la simulación como el volumen vertido real bordean los 360 millones de m³.

Las diferencias se producen solamente en la operación del vertedero, ya que la operación real plantea que las compuertas operaron a lo largo de todo el mes. Mientras que la operación comenzó una vez que se alcanzó un volumen almacenado de 700 millones de m³. A partir de éste día, los caudales de

evacuación fueron de 160, 140 y 120 m³/s a partir de los días 3, 15 y 27, lo cual permitió mantener el volumen almacenado recomendado.

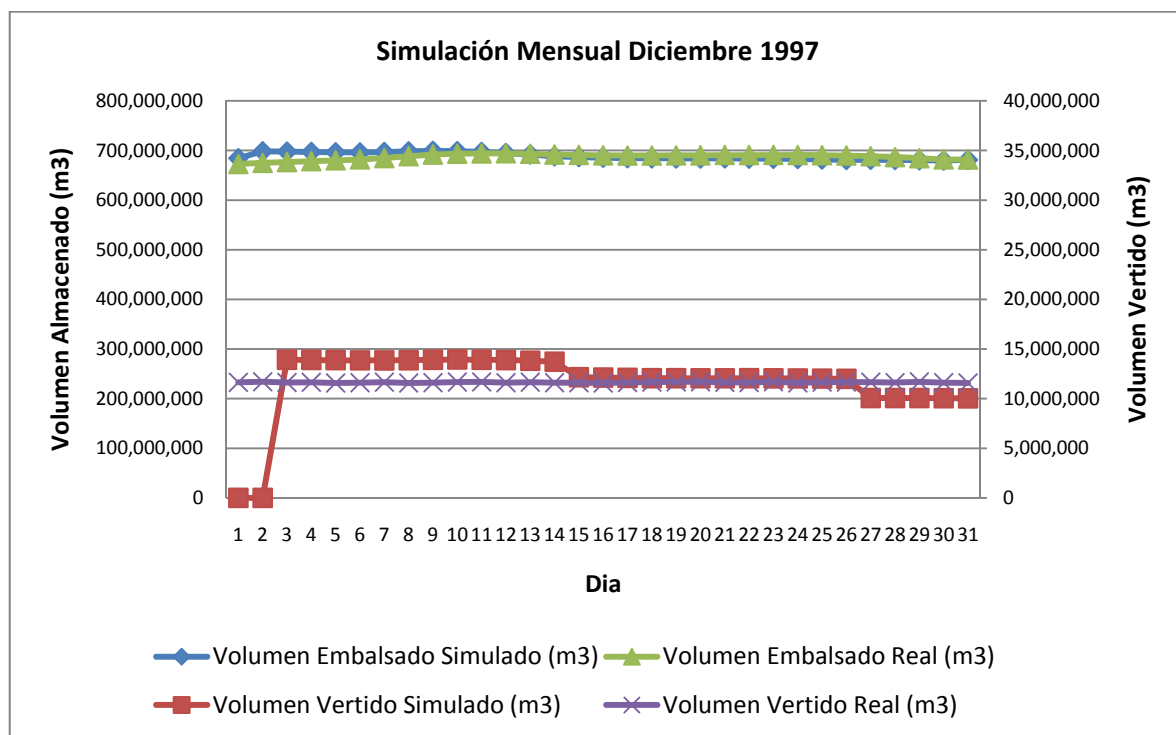


Figura N° 6.20: Simulación del funcionamiento del Embalse Paloma y su vertedero para el mes de Diciembre de 1997. Elaboración propia.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se entregan las conclusiones y recomendaciones finales del estudio denominado “Análisis del manejo operacional para escenarios críticos del embalse La Paloma”.

7.2 CONCLUSIONES

7.2.1 Conclusiones HEC-HMS

Respecto a la aplicación del software HEC-HMS, se logró calibrar y validar un modelo de simulación hidrológica en cuencas nivo-pluviales de la hoya hidrográfica del río Limarí aguas arriba del embalse Paloma. Se ha generado una metodología adecuada para la utilización del modelo HEC-HMS y la determinación de sus parámetros, complementando la investigación con tablas y pasos a fin de obtener los valores iniciales antes de realizar la calibración.

En la cuenca afluente al embalse Paloma, se logró una buena calibración del modelo para los periodos de verano, con una gran exactitud en la predicción de las crecidas correspondientes a los derretimientos de nieve en la parte alta de la cuenca, sin embargo para los periodos invernales en donde se producen crecidas puntuales debido a las precipitaciones, el modelo presenta algunas variaciones respecto a los valores reales debido quizás a que tales precipitaciones se presentan durante un día a distintas duraciones e intensidades y los valores peaks de dichos eventos no se reflejan en el estudio de un modelo diario de 24 horas y continuo. Bajo el punto anterior es muy difícil alcanzar los peak históricos considerando un estudio de tipo continuo con un registro de precipitaciones diarias

como el que se quiso plantear en el presente estudio, lo que nos lleva a concluir que el estudio debería realizarse individualmente, realizando un estudio de tormentas con un registro del tipo horario o instantáneo para poder reflejar el comportamiento de las cuencas.

De acuerdo a los resultados, la cantidad de humedad presente en el suelo principalmente de las cuencas pluviales o con poco aporte nival y para el caso de encontrarse en la temporada invernal, es un parámetro influyente que responde muy sensiblemente al periodo estacional en que se realice la calibración, por lo que el método que se elija es de suma importancia. En nuestro caso, la elección del modelo de perdidas SMA implica un mayor número de parámetros que controlan los diferentes flujos, asegurando un mayor ajuste a los caudales simulados a los caudales registrados, pero aumentando el grado de dificultad en la calibración del modelo y la obtención de los valores iniciales de los parámetros.

Se ha propuesto una metodología robusta y rápida para la determinación de los valores iniciales de los parámetros del modelo HEC-HMS. Los resultados de esta metodología permiten convertir este estudio en una guía práctica para quien quiera desarrollar algún modelo a través del software HEC-HMS.

Los resultados finales de la calibración nunca serán del todo correctos para todo el mundo, y siempre serán insatisfactorios para la persona encargada de la calibración, de hecho la calibración es un arte y el resultado final depende de las expectativas del artista y de la visión que este tenga del problema. Sin embargo los resultados aquí expuestos pueden y deben ser considerados como una buena aproximación.

7.2.2 Conclusiones de la Simulación de la Operación del Embalse Paloma.

Si nos referimos a las simulaciones del funcionamiento del vertedero del embalse Paloma, se llega a la conclusión de que en los meses de Enero a Mayo,

meses que por lo general no registran aumentos importantes de caudal afluente al embalse, permiten que el embalse sea operado bajo el volumen de regulación establecido, esto se debe principalmente a que mantienen la condición del volumen de reserva, y porque además no se ha considerado en este valor el agua consumida para el riego, lo cual contribuye a la regulación del volumen almacenado.

Respecto a la metodología utilizada para analizar el comportamiento operacional del embalse Paloma, la primera metodología, en la cual simulamos el comportamiento de un año completo para el embalse, si bien nos entrega resultados aceptables en término de los volúmenes de agua que se obtienen, presenta algunas carencias como por ejemplo, el intervalo de tiempo en que se trabaja es muy amplio, ya que se logran calcular volúmenes mensuales para la operación del embalse y de su vertedero, pero se pierde la operación en caso de que los eventos sean de forma diaria, como ocurre en la operación existente para el embalse. Por lo cual, esta forma de simular el embalse serviría como una aproximación del comportamiento del embalse ante los caudales y volúmenes afluentes simulados.

Para el caso de la segunda metodología utilizada, claramente se observa que los resultados obtenidos representan de mejor manera la operación del embalse Paloma, ya que estos valores son la simulación de la operación diaria del embalse, en este caso, para un mes completo de operación del embalse. Con estas simulaciones, se logra establecer el comportamiento del embalse ante determinados caudales diarios de entrada y como se sugiere operar su vertedero, determinando caudales y volúmenes de evacuación.

De acuerdo a las simulaciones realizadas para la operación del embalse Paloma y de su vertedero, en los meses de aumento de los caudales afluentes de agua (Junio a Diciembre), se obtuvo una mejor regulación del nivel del embalse, logrando almacenar un volumen mayor de agua y evitando grandes vertimientos

que hagan disminuir bruscamente el nivel del embalse y que supongan algún riesgo aguas abajo del embalse.

Con respecto al vertedero del embalse Paloma, se ha observado en este estudio que para cumplir con la restricción actual del caudal de salida máximo de los 200 m³/s, según el Manual de Operaciones del Embalse Paloma, basta solamente con operar una de las 8 compuertas existentes en el vertedero del embalse. Cabe señalar que esta condición la establece el Manual de Operaciones del embalse Paloma.

Esta restricción de caudal de evacuación del embalse Paloma, según la información analizada en éste trabajo, ha tenido un buen comportamiento a lo largo de los años, permitiendo que el caudal evacuado por el embalse no sea superior a la media de caudal afluente en los años analizados, inclusive para los años de mayores afluentes al embalse. Es así como en los años 1984, 1987 y 1997, los caudales medios mensuales máximos se encuentran en 141.97, 160.17 y 147.09 m³/s respectivamente, por lo cual, cuando se han producido crecidas en el embalse con estos caudales de entrada, el embalse es capaz de cumplir con la regulación de su capacidad sin problemas. No obstante, para eventos puntuales (caudales diarios), los caudales de entrada al embalse han sobrepasado con creces los 200 m³/s, llegando incluso a los 1314.095 m³/s (año 1997), que equivalen en promedio a unos 113.000.000 de m³ de agua que ingresarían al embalse en un solo día. Por lo cual, si el embalse se encuentra con su capacidad casi completa, deberá realizarse una evacuación de agua mayor a los 200 m³/s ya señalados, para evitar la restricción de capacidad de almacenamiento del embalse.

De la forma en que se establecieron los caudales de salida del vertedero del embalse, se llega a la conclusión de que en los meses de Septiembre a Marzo, en los cuales solo se producen las crecidas por derretimiento de nieve en la cordillera, funciona de buena forma comparar, graficar y proyectar los caudales afluentes al embalse en base a curvas de tendencias de los datos disponibles en

ese momento (caudales afluentes) y fijar así un caudal de salida del vertedero, en base a los valores que se puedan obtener de éstos afluentes, siguiendo el supuesto de que el vertedero se utilizará para mantener un volumen almacenado estable. Esto ocurre porque en estos meses, al no producirse precipitaciones, el derretimiento de nieve se produce en forma gradual, por lo cual no existen variaciones bruscas en los caudales afluentes del embalse y con ello, se puede planificar los caudales de salida del vertedero.

7.3 Recomendaciones

Las recomendaciones que se entregan de este trabajo son las siguientes:

Respecto a la operación simulada para el vertedero del embalse Paloma, se recomienda que en el caso de simular su funcionamiento en base a la metodología de simulaciones por año, en las que se utilizan volúmenes totales medidos mes a mes, todos estos volúmenes deben ser datos conocidos, como ocurre principalmente con los afluentes producidos por los derretimientos de nieve en la alta cordillera, ya que así la simulación nos permite generar una planificación para los plazos y caudales que deban evacuarse desde el embalse en el mes o meses analizados, teniendo una buena aproximación del comportamiento de los volúmenes de agua que llegarán al embalse. Además, esta forma de simular el embalse sea considerado solamente como una aproximación de la operación del embalse.

En el caso de los meses con precipitaciones, los caudales afluentes al embalse son muy variables, por lo cual, el proyectar caudales afluentes al embalse en forma gráfica o utilizando líneas de tendencias no nos permite establecer un caudal de salida certero para el vertedero, por lo cual se sugiere utilizar el mayor caudal permitido para evacuar por vertedero ($200 \text{ m}^3/\text{s}$), y en casos de tener caudales afluentes mayores, operar el embalse con un caudal mayor. No obstante, para los meses en que los afluentes del embalse se producen principalmente por

el derretimiento de la nieve almacenada en la cordillera (generalmente durante los meses de Septiembre a Marzo), y como se demostró en este trabajo, es recomendable considerar que los caudales afluentes al embalse pueden representarse en base a comparaciones, estimaciones y proyecciones mediante gráficos de tendencia de dichos caudales afluentes, con los cuales se puede suponer un caudal de salida del vertedero en base a los valores que se puedan obtener de éstos afluentes, siguiendo el supuesto de que el vertedero se utilizará para mantener un volumen almacenado estable (lo que sale sea igual o más de lo que entra).

En el caso de eventos particulares en los cuales ocurran aumentos importantes en los caudales afluentes al embalse Paloma, como la crecida de Julio de 1984, al simularla con una condición de caudal de evacuación mayor al sugerido, es decir $250 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtienen buenos resultados para reducir el aumento repentino en el nivel de agua del embalse. Al ser este mes, a nuestro juicio, uno de los más complicados en la operación que ha tenido el embalse Paloma en su historia, se sugiere tener en cuenta esta nueva propuesta de caudal de evacuación, para eventos de precipitaciones que provoquen caudales afluentes como los generados por esta crecida.

Para el caso de las crecidas pluviales importantes, como la mencionada crecida de Julio de 1984, es de suma importancia que el embalse tenga la capacidad disponible para amortiguar este tipo de crecidas, ya que se ha observado que se generan rápidamente volúmenes afluentes al embalse. Además, como precaución el embalse debe mantener el colchón o volumen de reserva, por lo cual en algunos casos, se deberá evacuar los excedentes de agua para mantener el volumen de reserva determinado por la Regla de Operación que establezca el embalse, esto se debe realizar ante la eventualidad de un nueva lluvia que haga subir bruscamente el nivel del embalse. Como recomendación, y observando el comportamiento de la estadística de los volúmenes afluentes en épocas de invierno, es que se sugiere aumentar el volumen de reserva o colchón

hasta los 100.000.000 de m³ durante los meses de Abril a Septiembre de cada año.

Durante los meses de Octubre a Marzo y de acuerdo al comportamiento mostrado por el embalse, se recomienda mantener el actual volumen de reserva de 50.000.000 m³. Esto se debe a que con la información disponible, se observó que el aumento o disminución de caudales afluentes en estos meses es más paulatina, por lo cual se puede programar con mayor tiempo la salida de excedentes de agua desde el embalse, a fin de recibir sin problemas los volúmenes que se están generando en la cordillera por el derretimiento de la nieve.

Para aprovechar de mejor forma el uso del software HEC-HMS, es necesario contar con mayor disponibilidad de información de la cuenca, especialmente para los sectores de la cuenca afluente al embalse Cogotí (Cuenca de los ríos Pama, Cogotí y Combarbalá). Durante el presente trabajo, no se tuvo a disposición toda la información deseada de ésta zona, en particular la información nival de ésta área, ya que a la fecha no existe ninguna estación en el sector que pueda aportar este tipo de información. Si en trabajos posteriores, se logra incorporar esta información al programa, se puede desarrollar un mejor proceso de calibración y mejorar la validación y simulación para la cuenca modelada mediante HEC-HMS.

Igualmente, se recomienda contar con una estación del tipo nival para la zona alta de la cuenca del río Grande, ya que si bien se cuenta con registro de la estación de Vega Negra en Quebrada Larga, ésta no es suficiente para realizar una estimación del volumen afluente al embalse que pueda entregarnos la nieve disponible en la zona cordillerana, provocando errores en la estimación de dichos volúmenes y por ende, errores en los pronósticos de agua que llegará al embalse debido a los deshielos.

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ref.1.- AGUILERA R., GABRIELS D., LOBO D., MOYANO M., OVALLES F., PIZARRO R., SANGÜEZA C., SANTIBAÑEZ F. Y URR A N. (2003). "Guía Metodológica para la Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Sub-húmedas Secas de América Latina y El Caribe". CAZALAC-PHI UNESCO
- Ref.2.- ALFARO, C. & HONORES, C. (2001). "Análisis de la Disponibilidad del Recurso Hídrico Superficial en Cauces Controlados de las Cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de La Serena, Chile.
- Ref.3.- ANDERSON, E. A. (1973). "National Weather Service River Forecast System – Snow Accumulation and Ablation Model". NOAA Tech. Memo. NWS HYDRO-17, US Dept. Commer., Washington, DC.
- Ref.4.- ANDERSON, E. A. (1976). "A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover". US National Weather Service, Report N°. TR-NWS-19.
- Ref.5.- BF BROWN Y FERRER INGENIEROS CIVILES (1978) "Operación del Sistema Paloma. Influencia de un Volumen de Reserva para Crecidas". Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref.6.- BF BROWN Y FERRER INGENIEROS CIVILES (1978). "Metodología de Pronósticos para el Sistema Paloma". Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref.7.- BF BROWN Y FERRER INGENIEROS CIVILES (1980) "Estudio de las Crecidas Pluviales Afluentes al Embalse Paloma". Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 8.- BF Brown y Ferrer Ingenieros Civiles (1992). "Análisis Estadístico de Caudales en los Ríos de Chile". Dirección General de Aguas – Ministerio de Obras Públicas. Etapa II.
- Ref.9.- BROWN E. Y FERRER P. (1976) "Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Paloma". Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.

- Ref.10.- CHOW, V. T. (1959). "Hidráulica de Canales Abiertos". McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, USA. p. 109 – 113.
- Ref. 11.- CHOW, V. T. (1988). "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill Publishing Co. Inc. New York, USA.
- Ref. 12.- COLLAO D. Y GUTIÉRREZ S. (2009). "Modelo Hidrológico para Manejo de Embalses a partir de Pronósticos de Caudales". Facultad de Ingeniería – Universidad de La Serena.
- Ref. 13.- CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, (2002). "Levantamiento y Catastro de Bocatomas en Cauces Naturales, III Etapa, Informe Final". Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Chile.
- Ref. 14.- DIAZ, R. (2008). "El Recurso Hídrico: Acceso, Reglas y Restricciones en Zonas Áridas Cuencas del Limarí, Chile". Memoria para optar al Título de Ingeniero Agrónomo, Universidad de La Serena, Chile.
- Ref. 15.- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (1987). "Balance Hídrico de Chile". Departamento de Hidrología. Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 16.- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. (2007). "Banco Nacional de Aguas". Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, La Serena.
- Ref. 17.- DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE (2001). "Climatología de Chile". Dirección Meteorológica de Chile – Dirección General de Aeronáutica Civil.
- Ref. 18.- EDWARDS R. (1966). Proyecto Paloma. "Riego en la zona de Punitaqui"
- Ref. 19.- EMBALSE PALOMA (2005). "Manual de Operación y Mantenimiento de Equipos para Entrega y Evacuación de Agua". Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 20.- ENGMAN, E. T. (1986). "Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff". Journal of Irrigation and Drainage Engineering 112 (1): 39 – 53.
- Ref. 21.- FREIXAS, G. (2002). "Variabilidad de las Líneas Medias de las Nieves en la Zona Central de Chile". Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Sub-Departamento Meteorología y

Nieves. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.

- Ref. 22.- GAETE, V. (2001). "Manual de Diseño de Sistemas de Riego Tecnificado". Memoria para optar al Título de Ejecución Mecánico, Universidad de Talca, Chile.
- Ref. 23.- HENRIQUEZ P. Y VALENZUELA A. (2008). "Análisis Hidrológico en Períodos de Déficit de la Cuenca que Abastece del Recurso Hídrico la Comuna de Combarbalá". Facultad de Ingeniería – Universidad de La Serena.
- Ref. 24.- INGENDESA EMPRESA DE INGENIERÍA INGENDESA S.A. (1992). "Consultoría OME-04. Mejoramiento Sistema Paloma. IV Región". Estudio Hidrológico. Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 25.- INGENDESA EMPRESA DE INGENIERÍA INGENDESA S.A. (1992). "Consultoría OME-04. Mejoramiento Sistema Paloma. IV Región". Modelo de Simulación. Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 26.- KALISKI E. (1981). "Operación del Sistema Paloma, Considerando Control de Crecidas". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Escuela de Ingeniería – Universidad de Chile.
- Ref. 27.- KUUSISTO, E. (1980). "On the Values and Variability of Degree-Day Melting Factor in Finland, Nordic Hydrology, Vol. 11", pp. 235-242.
- Ref. 28.- MARTINEC, J. (1977). "Snowmelt Hydrography from Spatially Varied Input". In: Proc. Third International Hydrology Symposium, Fort Collins, pp 110-111.
- Ref. 29.- ROMERO J. (1982). "Estadística Hidrométrica Embalse Paloma. Marzo 1969 – Mayo 1982". Ministerio de Obras Públicas – Dirección de Obras Hidráulicas.
- Ref. 30.- SANCHEZ SAN ROMAN, F.J. (2009). "HEC-HMS. Manual Elemental". Versión 3, Depto. De Geología, Universidad de Salamanca, España.
- Ref. 31.- SANTANDER (2004). "Estudio de Recurso Hídricos", Plan de investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria, Anexo 2 "Descripción y Características del programa HEC-HMS"

- Ref. 32.- SIGA CONSULTORES LTDA. INGENIERÍA & CONSULTORÍA. "Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Ovalle, IV Región". Dirección de Obras Hidráulicas – Ministerio de Obras Públicas.
- Ref. 33.- SINGH, P. & Singh, V. (2001). "Snow and Glacier Hydrology", Kluwer Academic Publishers.
- Ref. 34.- SOUVIGNET, M. (2007). "Climate Change Impacts on Water Availability in the Semiarid Elqui Valley, Chile". Thesis submitted to the Cologne University of Applied Sciences, Institute for Technology in the Tropics (ITT) as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science.
- Ref. 35.- U. S. Army Corps of Engineers (1956). "Snow Hydrology, Summary Report on the Snow Investigations". North Pacific Div. Corps of Engineers, Portland, Oregon.
- Ref. 36.- U. S. Army Corps of Engineers (1994). "Flood Run-off Analysis". Engineer Manual EM 1110-2-1417.
- Ref. 37.- U. S. Army Corps of Engineers (1998). "Runoff from Snowmelt". Engineer Manual EM 1110-2-1406.
- Ref. 38.- U. S. Army Corps of Engineers (2000). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual".
- Ref. 39.- U. S. Army Corps of Engineers (2003). "Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS User's Manual". Version 1.1.
- Ref. 40.- U. S. Army Corps of Engineers (2003). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS Release Notes". Version 2.2.2.
- Ref. 41.- U. S. Army Corps of Engineers (2008). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual". Version 3.3.
- Ref. 42.- USDA (1986). "Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55". U. S. Department of Agriculture.