



**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERIA CIVIL**

**“Modelación Hidrológica a nivel diario de la
Cuenca del Río Petorca, Quinta región de Chile”**

Por

Margaret Carolina Olivares Maturana

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Rodrigo Concha Jopía y Yerel Morales Pino

Julio, 2015

Dedicatoria

A mi madre y padre gracias a ellos sé que con compromiso de dedicación y esfuerzo y que me han demostrado que en el camino hacia la meta se necesita aceptar derrotas y derribar miedos.

A mi pololo, el incondicional abrazo que me motiva y recuerda que debo luchar para llegar a la meta.

Agradecimiento

A la Universidad Valparaíso, por recibir el conocimiento intelectual de cada uno de los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil en especial agradecimiento a mis profesores de tesis Sr. Rodrigo Concha Jopía y Sra. Yerel Morales Pino por sus consejos y dedicación.

Agradezco a todas las personas que estuvieron conmigo en esta etapa de mi vida, a los cuales, les dedico todo el esfuerzo, sacrificio y tiempo que entregué durante el trabajo de título.

Índice

Ítem	Página
Glosario.....	6
Lista abreviaturas o siglas.....	7
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas.....	10
Resumen de la memoria.....	13
Introducción.....	14
Planteamiento del problema.....	15
Objetivos.....	16
Alcances de la Investigación.....	16
Metodología.....	17

1. Generalidades.....	18
1.1 Introducción.....	18
1.2 Ciclo hidrológico.....	18
1.2.1 Precipitación.....	19
1.2.2 Infiltración.....	20
1.3 Disponibilidad de recursos hídricos.....	21
1.4 Tipos de simulación hidrológica.....	21
2. Área de estudio, datos y herramientas utilizadas.....	24
2.1 Descripción del área de estudio.....	24
2.2 Características hidrológicas de la cuenca.....	25
2.2.1 Descripción hidrológica.....	25
2.2.1.1 Pluviometría.....	25
2.2.1.2 Criterios de selección.....	26
2.2.1.3 Relleno de estaciones.....	27
2.2.1.4 Homogeneización de datos.....	27
2.2.2 Fluviometría.....	28
2.2.2.1 Estaciones Fluviométricas.....	28
2.2.2.2 Selección de estaciones Fluviométricas.....	28
2.3 Evapotranspiración.....	29
2.3.1 Coeficiente de cultivo.....	30
2.4 Modelo de elevación digital y modelación hidrológico.....	32
2.4.1 Introducción.....	32
2.4.2 QUANTUM GIS.....	32
2.4.3 HEC-HMS.....	32
3 Procesamiento de información para el modelo de elevación digital.....	34
3.1 Información topográfica.....	34
3.2 Delimitación de la cuenca.....	34
3.3 Delimitación de subcuencas.....	36
3.4 Clasificación uso de suelos.....	36
3.5 Precipitación media de la cuenca.....	42
4 Estimación de parámetros para el modelo hidrológico.....	44
4.1 Introducción.....	44
4.2 Métodos para la modelación hidrológica.....	44
4.2.1 Método de cálculo de pedidas.....	44
4.2.1.1 Uso suelos.....	45
4.2.1.2 Impermeabilidad.....	46

4.2.1.3	Parámetros del método SMA.....	46
4.2.2	Almacenamiento depresiones superficiales.....	50
4.2.3	Método intercepción cubierta vegetal.....	51
4.2.4	Método de Transformación lluvia esorrentía.....	52
4.2.5	Método de propagación de Muskingum.....	54
4.2.6	Método de caudal Base.....	56
4.3	Extracciones de caudales.....	57
5	Modelación hidrológica a escala diaria.....	59
5.1	Introducción.....	59
5.2	Resultados de calibración y validación	60
5.2.1	Resultados de la calibración.....	60
5.2.2	Resultados de validación.....	63
5.2.3	Indicadores de bondad de ajuste.....	62
5.2.3.1	Indicadores de bondad de ajuste de calibración	67
5.2.3.2	Indicadores de bondad de ajuste de validación.....	69
6	Análisis de resultados.....	72
7	Conclusiones.....	76
8	Recomendaciones.....	77
9	Referencias bibliográficas.....	78
	Anexos.....	79

Glosario

- DEM: Es un modelo digital de elevación, una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de un terreno, en este caso particular representa las elevaciones del terreno en relación a un sistema de referencia concreto. Su utilización es muy variada ya que mediante programas de sistemas de información geográfica (sig) se pueden extraer pendientes, red de drenaje, mapas de relieve, etc.
- Raster: Formato digital que almacena, procesa e interpreta datos. Se basa en una imagen en mapa de bits (del inglés *bitmap*)
- Groundwater storage: Es el almacenamiento de agua de los diferentes niveles de acuíferos, éste valor se expresa en milímetros. El programa HEC-HMS distingue dos niveles de acuíferos, uno superficial y otro profundo.

- Hidrograma unitario: Es un método de transformación lluvia-escorrentía, en el cual se obtienen valores de caudal durante el tiempo.
- Modelo continuo: Es un tipo de simulación que intenta representar la evolución de todo el proceso hidrológico. Calcula parte de las precipitaciones que quedan retenidas superficialmente (vegetación y depresiones), que infiltra en el suelo y que genera escorrentía superficial. Pasada la precipitación se debe considerar el almacenamiento del suelo, si se produce evapotranspiración o se infiltra hacia los acuíferos. Finalmente desde éstos puede perderse profundamente o alimentar los cauces.
- Numero de reach: Numero de elementos que es utilizado para trasladar el flujo aguas abajo en el modelo de cuenca.
- Sistema de información geográfica: Son sistemas que permiten el almacenamiento y modelización de grandes cantidades de datos de terreno, que están vinculados a una referencia espacial.
- Soil moisture accounting: Método recomendado para utilizar en Hec Hms para modelación continua, ya que considera la humedad del suelo en cada instante de tiempo. Tiene cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada, estos niveles son la vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero superficial y acuífero profundo

Lista de abreviaturas o siglas

CAD	: Capacidad de almacenamiento en depresiones.
CAS	: Capacidad de almacenamiento del suelo.
CASZ	: Capacidad de almacenamiento en zona de tensión.
DEM	: del inglés, Digital Elevation Model.
DGA	: Dirección General de Aguas.
Ecuación	: Ecuación
EEUU	: Estados Unidos.
ETP	: Evapotranspiración potencial
ETR	: Evapotranspiración Real
GIS	: Del inglés, Geographic Information System.
HMS	: Del inglés, Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System.
HUS	: Hidrograma Unitario.
HUS	: Hidrograma Unitario Sintético
Hr	: Horas

Kc : Coeficiente de cultivos

Km : Kilómetros

Min. : Mínimo

Max. : Máximo

Mm : Milímetros

Pág. : Página

QGIS : del inglés, Quantum GIS.

SMA : Del inglés, Soil moisture accounting

Lista de figuras

Ítem	Pagina
Figura nº 1.1 Ciclo hidrológico del agua.....	19
Figura nº 1.2 Agua interceptada en la cubierta vegetal, retención superficial, infiltración y escorrentía directa.....	19
Figura nº 1.3 Capacidad del suelo de infiltración.....	20
Figura nº 1.4 Sequía de la cuenca del Río Petorca.....	20
Figura nº 1.5 Parámetros a utilizar en el método de perdidas SMA de modelación continua.....	20
Figura nº 2.1 Ubicación geográfica de la cuenca Río Petorca, v región.....	21
Figura nº 2.2 Cuenca del Río Petorca y sus principales afluentes.....	21
Figura nº 2.3 Coeficientes de cultivos según especie plantada.....	21
Figura nº 3.1 Modelo de elevación digital DEM.....	23
Figura nº 3.2 Construcción del área de la cuenca del Río Petorca.....	23
Figura nº 3.3 Red de drenaje.....	24
Figura nº 3.4 Mapa de elevación cuenca del Río petorca.....	24
Figura nº 3.5 Mapa de pendientes cuenca del Río petorca.....	25
Figura nº3.6 Delimitación de las subcuencas en quantum gis.....	25
Figura nº3.7. Modelo de uso de suelo en quantum gis de cuenca de Petorca...	31
Figura nº3.8 Mapa de subcuencas y distribución espacial de polígonos de thessen.....	34
Figura nº 4.1 Almacenamientos de cauce.....	35
Figura nº 4.2 Gráfico de Curva de recesión.....	35
Figura nº 5.1 Modelo hidrológico de la cuenca del Río Petorca.....	35
Figura nº 5.2 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 1.....	35
Figura nº 5.3 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 2.....	35
Figura nº 5.4 Hidrograma para calibración unitario subcuenca 3.....	35
Figura nº 5.5 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 4.....	36
Figura nº 5.6 Hidrograma unitario para validación subcuenca 4.....	36
Figura nº 5.7 Hidrograma unitario para validación subcuenca 4.....	36
Figura nº 5.8 Hidrograma unitario para validación subcuenca 4.....	36
Figura nº 5.9 Hidrograma unitario para validación subcuenca 4.....	36
Figura nº5.10 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº1 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	37
Figura nº5.11 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº2 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	37
Figura nº5.12 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº3 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	42
Figura nº5.13 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº4 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	42

Figura n°5.14. Gráfico de dispersión de la subcuenca n°1 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	55
Figura n°5.15. Gráfico de dispersión de la subcuenca n°2 correspondiente a la etapa de validación de caudales simulados y caudales observados.....	57
Figura n°5.16. Gráfico de dispersión de la subcuenca n°3 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.....	59
Figura n°5.17. Gráfico de dispersión de la subcuenca n°4 correspondiente a la etapa de validación de caudales simulados y caudales observados.....	61
	61
	62
	62
	63
	63
	64
	64
	67
	68

Lista de tablas

Ítem	Página
	68
	69
	70
	70
	71
	71

Tabla nº 2.1 Estaciones pluviométricas existentes.....	26
Tabla nº 2.2 Estaciones fluviométricas existentes.....	28
Tabla nº 2.3 Sector climático para la evapotranspiración.....	29
Tabla nº 2.4 Evapotranspiración mensual según sector climático.....	30
Tabla nº 2.5 Valores de coeficiente de cultivo del la especie palto.....	31
Tabla nº 3.1 Modelo de elevación digital (Dem).....	34
Tabla nº3.2 Características de la cuenca del Río Petorca.....	35
Tabla nº 3.3 Valores de elevación de la cuenca del río Petorca.....	35
Tabla nº 3.4 Valores de pendiente de la cuenca del río Petorca.....	36
Tabla nº 3.5 Subcuenas del río Petorca.....	36
Tabla nº 3.6 Características geomorfológicas de la cuenca del río Petorca..	37
Tabla nº3.7 Tipos de uso de suelos en la cuenca río Petorca.....	37
Tabla nº3.8 Tipos de uso de suelos en la subcuenca 1.....	38
Tabla nº 3.9 Tipo de uso de suelos subcuenca nº2.....	39
Tabla nº 3.10 Tipo de uso de suelos subcuenca nº3.....	40
Tabla nº 3.11 Tipo uso de suelos subcuenca nº 4.....	41
Tabla nº 3.12 Área influencia de subcuenca nº 1.....	42
Tabla nº 3.13Área influencia de subcuenca nº 2.....	42
Tabla nº 3.14Área influencia de subcuenca nº 3.....	42
Tabla nº 3.15Área influencia de subcuenca nº 4.....	43
Tabla nº 4.1 Resumen de métodos a ocupar en la modelación hidrológica...	44
Tabla nº 4.2 Clasificación de suelos según clase hidrológica.....	45
Tabla nº 4.3 Áreas impermeables asociadas a cada subcuenca.....	46
Tabla nº 4.4 Espesores de la capa de suelo.....	46
Tabla nº 4.5 Porosidad del suelo.....	47

Tabla nº 4.6 Capacidad de almacenamiento según subcuenca.....	47
Tabla nº 4.7 Capacidad de infiltración según subcuenca.....	47
Tabla nº4.8 Infiltración según subcuenca.....	48
Tabla nº4.9 Capacidad de almacenamiento del suelo en la zona de tensión del suelo a nivel de subcuenca.....	48
Tabla nº4.10 Percolación del suelo.....	49
Tabla nº4.11 Percolación y capacidad de almacenamiento del suelo de depósito subterráneos.....	49
Tabla nº4.12 Coeficientes de almacenamiento deposito nº1.....	50
Tabla nº 4.13 Almacenamiento superficial en depresiones del terreno.....	50
Tabla nº 4.14 Indica la CAD de cada subcuenca.....	50
Tabla nº4.15 Intercepción cubierta vegetal.....	51
Tabla nº4.16 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº1.....	51
Tabla nº4.17 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº2.....	51
Tabla nº4.18 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº3.....	52
Tabla nº4.19 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº4.....	52
Tabla nº 4.20 Valores de entrada al hidrograma subcuenca.....	53
Tabla nº4.21 Valores del Hidrograma Unitario Sintético modificación Benítez y Arteaga para la subcuenca 1 y 2.....	54
Tabla nº4.22 Valores del Hidrograma Unitario Sintético modificación Benítez y Arteaga para la subcuenca 3 y 4.....	54
Tabla nº 4.23 Parámetros del método de propagación.....	56
Tabla nº 4.24 Numero de Reach mínimo.....	56
Tabla nº4.25 Resumen de parámetros de Muskingum.....	56
Tabla nº 4.26 Resumen de constante de recesión para cada subcuenca.....	57
Tabla nº4.27 Caudales extraídos por subcuenca	58
Tabla nº5.1 Valores de volumen (m3) calibrados.....	

Tabla nº5.2 Valores de volumen (m3) validados.....	66
Tabla 5.3 Indicadores de bondad de ajuste para calibración.....	66
Tabla nº5.4 Indicadores de bondad de ajuste para validación.....	67
Tabla nº6.1 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca nº1.....	69
	72
Tabla nº6.2 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca nº2.....	
Tabla nº6.3 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca nº3.....	73
	73
Tabla nº6.4 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca nº4.....	
Tabla nº 6.5 Correlación lineal.....	73
Tabla nº6.6 Valores de volúmenes simulados y observados.....	74
Tabla nº6.7 Valores de eficiencia de Nash-Sutcliffe	74
	75

Resumen

Los problemas de la falta de registros de estaciones meteorológicas y fluviométricas, hacen más difícil las investigaciones hidrológicas en Chile. Esta dificultad se puede disminuir mediante herramientas hidrológicas como el hidrograma unitario y programas de simulación hidrológica.

El Ciclo Hidrológico es el punto de inicio de cualquier estudio en hidrología, pues mediante éste se generan las precipitaciones. La precipitación es almacenada en el terreno formando un cauce natural. Cabe señalar que no toda precipitación caída produce escorrentía ya que, dependiendo de las características del suelo, hay aguas que son retenidas en la vegetación, depresiones superficiales y otras pueden ser filtradas hacia acuíferos subterráneos.

El estudio principal se enfoca en la cuenca del Río Petorca, ubicado en la Región de Valparaíso, Chile. El objetivo es simular las crecidas de su cauce natural con el programa HEC-HMS, esto con ayuda de imágenes satelitales, es posible discretizar la cuenca en 4 subcuencas, extraer mapas de elevación, vegetación, tipo de suelo y datos que son procesados por el programa de modelación hidrológica.

La modelación hidrológica es realizada a escala diaria, en esta se realiza una simulación continua, donde el método recomendado para este tipo de simulación es el método (SMA) que toma en consideración la humedad del suelo.

De acuerdo a los requerimientos del programa HEC-HMS, se utilizan datos de precipitación de las estaciones pluviométricas en periodos de lluvia a lo largo de 10 años (2003-2013) y datos de estaciones fluviométricas durante el mismo periodo para poder realizar un análisis de calibración de datos, donde se hace una comparación de caudales, a través del hidrograma simulado y el hidrograma observado.

La calibración de los caudales arroja valores estadísticos aceptables y en la validación la regresión lineal entrega valores de correlación mayores que 0.88. En el proceso de simulación se obtienen valores de calibración aceptables, dando como resultado en 7 años de medición un valor del indicador de eficiencia de Nash-Sutcliffe mayor igual que 0.86 para las diferentes subcuencas. En el proceso de validación del sistema de modelación, ésta arroja valores de Nash mayor igual que 0.81 en los últimos 3 años de medición.

La cuenca del Río Petorca supone una gran complejidad de estudio, debido a la escasez de información hidrológica. El análisis realizado a los caudales reales versus los caudales simulados, indica la respuesta hidrológica de la cuenca, pudiendo utilizarse en estudios de evaluación hidrológica.

Palabras clave: PRECIPITACIÓN, ESCORRENTÍA, MODELOS SATELITALES, MODELOS DE SIMULACIÓN, HEC-HMS, NASH-SUTCLIFFE.

Introducción

La información pluviométrica (precipitaciones) y fluviométrica (caudales) es de gran importancia para cualquier estudio ingenieril, pues mediante ésta se construyen hidrogramas para representar de forma gráfica (plano cartesiano), la relación entre el caudal y la precipitación y así poder en un intervalo de tiempo, detectar los caudales máximos que sirve como base para cualquier estudio.

Una herramienta para poder representar un hidrograma unitario son los modelos hidrológicos, que con la ayuda de sistemas de información geográfica (SIG) pueden representar la cuenca y todos los parámetros necesarios para cualquier modelo hidrológico

La representación digital de la cuenca es de gran ayuda para los sistemas de información geográfica (SIG), las imágenes del satélite son provistas de forma gratuita en la página de la NASA.

La información geográfica será analizada mediante el programa QUANTUM GIS (QGIS), éste representa todo tipo de información digital geográfica. A partir de este es posible obtener información necesaria para estudios hidrológicos

La base principal del estudio es obtener hidrogramas de crecidas de la cuenca del río Petorca en la V región a través de una simulación hidrológica de su comportamiento mediante el programa de modelación hidrológica HEC-HMS.

Los programas de simulación hidrológica necesitan información fácil de interpretar, como series de tiempo pluviométricas y fluviométricas, éstas son obtenidas directamente de mediciones en las estaciones.

Se realizará un análisis hidrológico con el programa hidrológico HEC-HMS, donde mediante un método matemático se puede analizar los parámetros hidrológicos como por ejemplo el hidrograma de escorrentía, pérdidas de la cuenca (infiltración, vegetación, depresiones, flujo base, etc.). En esta modelación se evaluará y se comparará el comportamiento de la cuenca hidrográfica en función de los datos registrados en las estaciones, utilizando información de la dirección general de aguas (DGA).

Después del procesamiento de los datos geográficos, se modelará y simulará la cuenca con el programa de modelación hidrológica HEC-HMS, este utiliza parámetros hidrológicos como por ejemplo el hidrograma de escorrentía, pérdidas de la cuenca, flujo base, etc. A través de la modelación se evaluará el comportamiento de la cuenca hidrográfica en función de los datos registrados en las estaciones y se comparará dichos resultados con los obtenidos en la modelación, utilizando información de la dirección general de aguas (DGA).

Planteamiento del Problema

Conocer la disponibilidad de los recursos hídricos es una cuestión fundamental para el desarrollo de las diversas actividades económicas de una región o país. La falta de agua es un problema cíclico que debe ser abordado desde diferentes frentes, comenzando por el hidrológico e incorporando el desarrollo económico y la calidad de vida.

En la zona de Petorca (Quinta Región de Valparaíso, Chile), el recurso agua se utiliza para la agricultura, pues es una zona donde la principal fuente de trabajo está asociada a esta actividad, por lo que es necesario tener una adecuada gestión de este recurso disponible dentro de la cuenca (Salazar et al, 2013).

Los estudios que actualmente indican la disponibilidad y estado de los recursos hídricos de la cuenca del río Petorca, son los realizados por la Dirección General de Aguas (DGA) y El Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios - Valparaíso (CIMFAV). El primero de ellos es el denominado "Informe de Evaluación de los Recursos Superficiales de las Cuencas del río Petorca y del río Ligua, V región"; éste considera el cálculo de los caudales mínimos ecológicos, conforme a la actual normativa (Resolución D.G.A. N° 53). El segundo es el estudio realizado por la Universidad de La Serena y la Universidad de Valparaíso denominado "La Generación de Estrategias para la Sustentabilidad Hídrica de la Provincia de Petorca bajo Escenarios de Cambios Climáticos" (SURHGE Petorca); este estudio está caracterizado por utilizar un modelo de pronóstico para los caudales de cabecera, que permita un diseño estratégico de los recursos hídricos bajo escenario de cambio climático con el fin de dar sustentabilidad a la cuenca (Córdova et al, 2013).

Los estudios anteriores no están basados en los procesos físicos que se ponen de manifiesto en la cuenca cuando ocurren precipitaciones, y por lo tanto, tienen un grado de incertidumbre frente a evaluaciones de la disponibilidad del recurso hídrico. Además, en la provincia de Petorca, el agua es un recurso calificable como escaso, lo que motiva aún más el desarrollo de este Trabajo de Título.

En este trabajo de título se desarrolla un modelo hidrológico de base física de la cuenca del río Petorca que permita tener una herramienta adecuada con datos calibrados y validados, para evaluar el estado (disponibilidad) de los recursos hídricos. El modelo integra distintos procesos del ciclo hidrológico (evaporación, infiltración, transformación lluvia-escorrentía, propagación de caudales), utilizando datos de precipitación y caudales registrados en la cuenca de estudio.

Objetivos

Objetivo Principal

- Generar un modelo hidrológico de la cuenca del Río Petorca que sirva como herramienta para la evaluación de los recursos hídricos de la zona.

Objetivos Específicos

- Revisar y analizar la información hidrometeorológica de las estaciones presentes en la zona de estudio.
- Implementar una modelación computacional que permita representar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Petorca, utilizando el programa HEC-HMS.
- Modelar con series temporales extensas (escala diaria) el comportamiento de la cuenca del río Petorca (modelación continua).

Alcances

En el Trabajo de Título se implementa un modelo hidrológico de la cuenca del río Petorca, mediante el uso de los programas HEC-HMS (cálculo hidrológico) y QUANTUM GIS (Sistema de Información Geográfica), éste último para determinar la zona de estudio. Para construir el modelo, se utilizarán las series de precipitaciones a largo plazo, realizando simulaciones continuas, donde el comportamiento cambia continuamente en el tiempo.

Metodología de trabajo

Para alcanzar los objetivos, se llevarán a cabo las siguientes etapas durante el desarrollo del trabajo:

- A. Recopilación bibliográfica: El tipo de información que será utilizada en el modelo consiste en información geomorfológica de la cuenca, información meteorológica (precipitaciones) e hidrológica (caudal) de las estaciones dentro de la zona de estudio. La principal fuente de información meteorológica e hidrológica es la Dirección general de aguas (DGA), como diversa información a través del Internet.
- B. Construcción del modelo de elevación digital: Digitalización de área de la cuenca a analizar con el programa QUANTUM GIS. Previo al modelo hidrológico se realiza una serie de análisis de la zona a partir de la información que brinda el programa SIG (georreferenciación, procesamiento de los mapas digitales de elevación (DEM), definición de la red de drenaje de la cuenca (ríos)) y en base a ella determinar el número de subcuencas que serán introducidas al modelo hidrológico.
- C. Implementación del modelo Hidrológico: Exportación del área de la cuenca obtenida con el programa QUANTUM GIS al software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center–Hydrologic Modeling System). Se definirán modelos y parámetros (evaporación, infiltración, transformación lluvia-escorrentía, propagación de caudales) y se realiza una simulación hidrológica continua, donde se analizarán datos Pluviométricos (precipitaciones) y datos de caudal a nivel diario, para luego determinar el periodo de modelación hidrológica (etapas de calibración y validación).
- D. Análisis de resultados: Finalmente en esta etapa realiza un análisis de resultados obtenidos mediante el modelo hidrológico.
- E. Conclusiones: Se concluye el trabajo con la validación de los datos de los caudales registrados de la cuenca en estudio.

1. Generalidades

1.1 Introducción.

Los Recursos Hídricos están sometidos a un alto nivel de incertidumbre que depende en gran medida de las precipitaciones (ciclo hidrológico), de la demanda del agua para satisfacer las múltiples necesidades que dependen de ella y de la mala distribución del agua durante el tiempo.

En el valle de Petorca, específicamente en la cuenca del río Petorca, el recurso hídrico es un tema muy relevante debido a la escasez hídrica a que se ve enfrentada, por esto es necesario realizar una modelación hidrológica que indique el estado real de los recursos de la zona.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio hidrológico de una zona. Actualmente, con el empleo de estos modelos, es posible manejar hipótesis realistas que ilustren lo que realmente sucede en una zona y que tenga un cierto grado de confianza para obtener resultados adecuados y funcione como un instrumento confiable en situaciones de emergencia hídrica.

Esta modelación hidrológica se realiza con el programa HEC-HMS, éste programa realiza simulaciones por evento de lluvia y en forma continua. La primera toma solamente un evento de lluvia y la segunda toma 1 o más eventos de lluvia incluyendo periodos secos.

1.2 Ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico comprende procesos de movimiento y transferencia de agua en el suelo, en el mar y en la atmósfera. Como su nombre lo dice es un proceso cíclico que estudia diferentes parámetros como la evaporación que se produce en el mar y todo tipo de cuerpos de agua, la evapotranspiración de las plantas, la cual es la combinación del agua que se pierde por evaporación en el suelo y transpiración en el material vegetal. La evapotranspiración, es influenciada por las condiciones climáticas e hídricas de temperatura, radiación, viento y humedad. De esta forma, el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso.

El agua en forma de vapor pasa a la atmósfera, y en esta se produce el proceso de condensación, creando la precipitación.

Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra parte cae al suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura del suelo, del tipo de suelo y de la pendiente del terreno, esta agua puede quedar encharcada, escurrir superficialmente o infiltrarse.

Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, la cual depende de su textura y porosidad; otra porción del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial; otra parte se convierte en flujo subsuperficial, y por último otra percola hacia capas inferiores de aguas subterráneas. El agua que se infiltra llega al mar.

El agua que se infiltra en el suelo, hace varios recorridos que depende del tipo terreno. Puede ser en suelos permeables o suelos impermeables. En terrenos permeables el agua tiende a escurrir para formar parte del acuífero. En cambio cuando el terreno es más bien impermeable el agua puede escurrir superficialmente, esta forma de fluir conduce al agua a acuíferos superficiales o bien sale al terreno.

En la figura 1.1 se ilustra el proceso hidrológico que se desarrolla para generar las precipitaciones, este se inicia con la evaporación del agua, el transporte de vapor, la condensación de éste hasta que finalmente el agua precipita y es recolectada. En los procesos de condensación y recolección del agua se sustraen dos variables hidrológicas, las precipitaciones y los caudales respectivos de

estudio; estos datos servirán como valores de entrada para el programa de modelación, obteniendo finalmente el resultado del modelo.

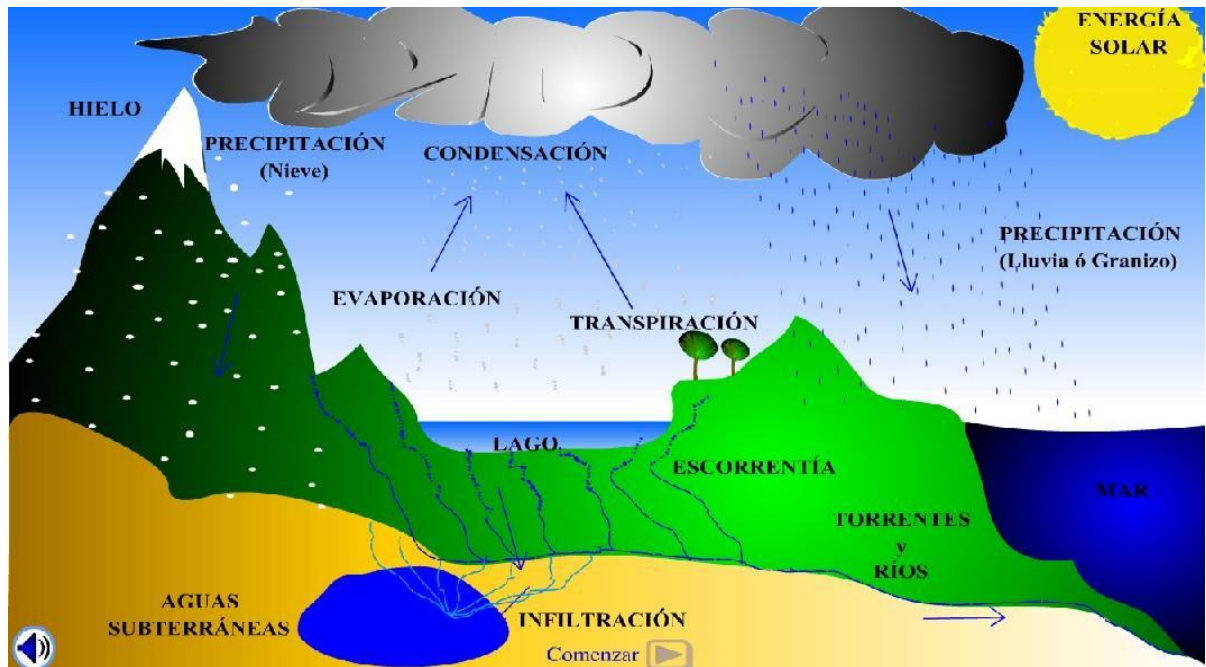


Figura nº 1.1 Ciclo hidrológico del agua.

Ciclo del agua (online):<http://naturaleseso1.blogspot.com/2013/11/el-ciclo-del-agua-en-la-naturaleza.html>.

1.2.1 Precipitación.

La precipitación es la caída de agua sobre la superficie de la tierra en forma líquida o sólida (lluvia o nieve). Esta es importantísima para las distintas etapas del ciclo hidrológico. La precipitación se mide mediante instrumentos llamados pluviómetros, que miden la cantidad de agua caída y los instrumentos llamados nivómetros miden la precipitación sólida caída.

Esta agua puede generar escorrentía directa o precipitaciones que puede ser retenidas en las diferentes capas del terreno, esta puede ser la vegetación, en pequeñas retenciones superficiales o infiltrarse en el suelo a capas inferiores (I. S. Nanía, m. Gómez Valentín, 2004)

En la figura 1.2 se ilustra la precipitación caída la que genera escorrentía superficial y la que intercepta en las diferentes capas del suelo (vegetación, pequeñas retenciones superficiales o infiltración a capas inferiores)

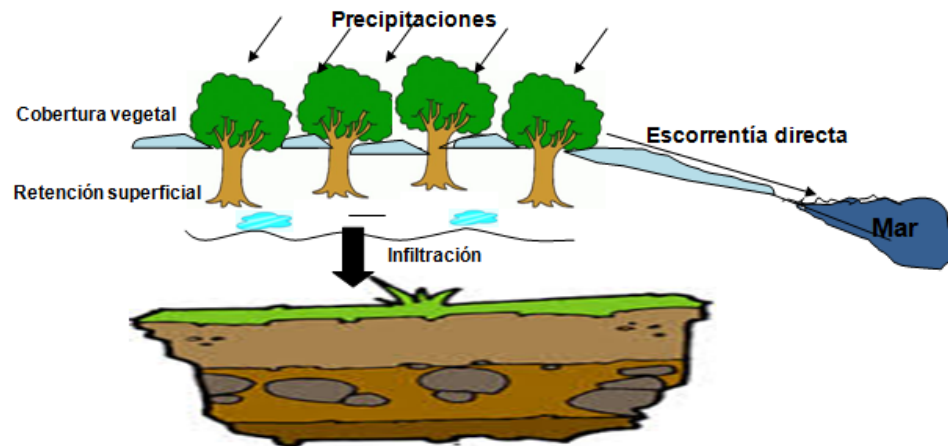


Figura 1.2 Agua interceptada en la cubierta vegetal, retención superficial, infiltración y escorrentía directa.

1.2.2 Infiltración.

La capa de suelo corresponde al estrato de suelo apto para el desarrollo de las raíces y crecimiento de las plantas, formado principalmente por suelo natural y mezcla de suelo vegetal.

En esta capa se producen los procesos de infiltración del agua que se almacena en la superficie y el proceso de percolación del agua infiltrada a la capa de suelo hacia las capa de subterráneas.

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración (Vélez, m. y Vélez., j., 2002).

En la figura 1.3 se ilustran los niveles de capas subterráneas que distingue el programa de modelación hidrológica, éste distingue dos niveles uno superficial y otro subterráneo.

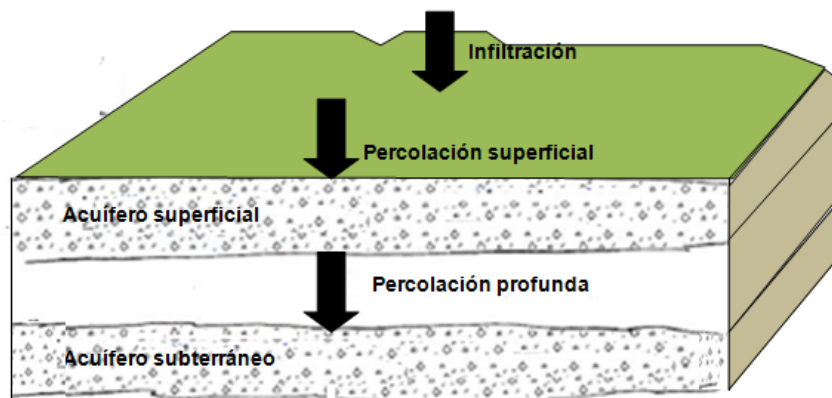


Figura nº 1.3 Capacidad del suelo de infiltración.

1.3 Disponibilidad del recurso hídrico.

El recurso hídrico requiere una inquietante preocupación tanto nivel mundial como nacional. Su escasez amenaza el desarrollo económico al que podría aspirar una región, lo cual es importante para que la población mejore su calidad de vida. La preocupación aumenta producto a factores que influyen en el recurso hídrico. Según la necesidad del recurso hídrico para el desarrollo de las actividades productivas, las necesidades sociales y ecológicas, el ser humano ha sido el principal responsable de su degradación y agotamiento, a causa del desarrollo de actividades económicas que son fuertemente demandadas, sin perder de vista el principal problema que radica producto de la escasez de precipitaciones.

La escasez de agua que afecta a la provincia de Petorca es un problema que pone en peligro el correcto abastecimiento de este recurso en la zona.

En la figura 1.4 se ilustra estado real de escasez hídrica que afecta principalmente la zona de Petorca en la V región, éste estado indica la sequía existente en la zona



Figura nº 1.4 Sequía de la cuenca del Río Petorca

1.4 Tipos de simulación hidrológica.

La aplicación de modelos de simulación hidrológica de cuencas, donde analizan principalmente precipitaciones y caudal, han generado importantes investigaciones hidrológicas para numerosas décadas (Jakemán et al ,1993).

Muchos modelos de cuencas han desarrollado representaciones físicas de procesos de flujo de agua sobre toda la superficie de la cuenca para modelar los procesos de precipitación-escorrentía (Madsen, 2000).

Dependiendo de la aplicación de modelo, lluvia-escorrentía puede estar basada en modelación por evento o continua. Las cuencas basadas en modelación por eventos con características (descarga de caudal “peak”, escorrentía total y tiempo “peak”), son las que consideran eventos de lluvia

individuales. El modelo hidrológico continuo incluye periodos largos y varios eventos de lluvia e incluye calcular el contenido de humedad del suelo durante períodos prolongados y tiene sus efectos mediante el uso de datos de tipo de suelo. Por lo general, se elige un intervalo de tiempo más largo (a diario) para el modelado hidrológico continuo. Las necesidades del modelo continuo radican en tener datos pluviométricos y fluviométricos, textura de suelo y las propiedades del suelo para calcular datos de evaporación, transpiración y procesos hidrológicos que se desarrollan en el subsuelo.

Cabe señalar que el método de pérdidas recomendado para la modelación continua es el Método de Soil Moisture Accounting (SMA), el cual es la principal herramienta que tiene el programa HEC-HMS para el modelado continuo, ya que éste toma en consideración la pérdida contable de humedad del suelo, utilizando cinco capas para representar el movimiento dinámico del agua por encima del suelo y por el subsuelo. Las capas incluyen interceptación de la vegetación, almacenamiento en depresiones de la superficie del suelo, e incluye dos niveles de acuíferos de aguas subterráneas.

Según las necesidades que tiene un modelo continuo, requiere un proceso de calibración y validación, para estos procesos se requiere un gran conjunto de datos.

En la práctica, la disponibilidad de datos es a menudo un problema que debe ser administrado, debido que puede comprometer la calidad general de la modelación, teniendo un efecto más significativo en la precisión de los resultados (Todini, 1996). Por lo tanto, existen desafíos inherentes en el modelado lluvia-escorrentía, procesos con las observaciones hidrológicas limitados.

En este trabajo de título se realizará una modelación continua a escala diaria donde se utilizará el método de SMA, el cual involucra diferentes parámetros que serán detallados en el capítulo 4

En la figura 1.5 se ilustran los diferentes niveles de retención de agua considerados en el programa HEC HMS, partiendo por el agua que se intercepta en la vegetación, retenciones superficiales y la que se infiltra hacia capas inferiores.

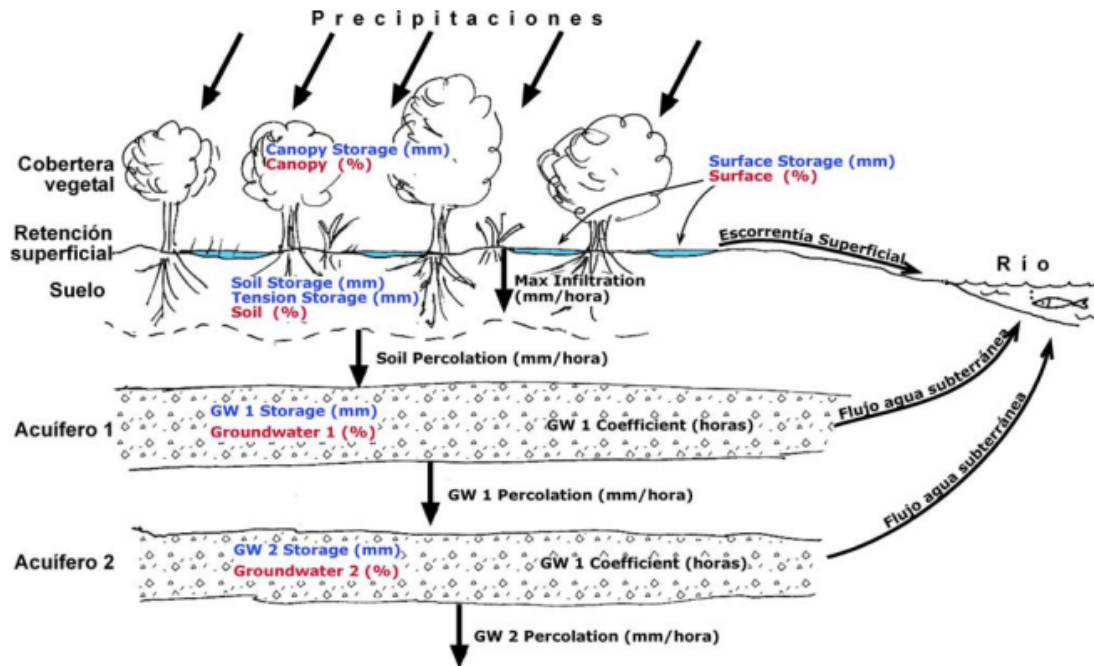


Figura nº 1.5 Parámetros a utilizar en el método de pérdidas SMA de modelación continua.

2. Área de estudio, datos y herramientas utilizadas.

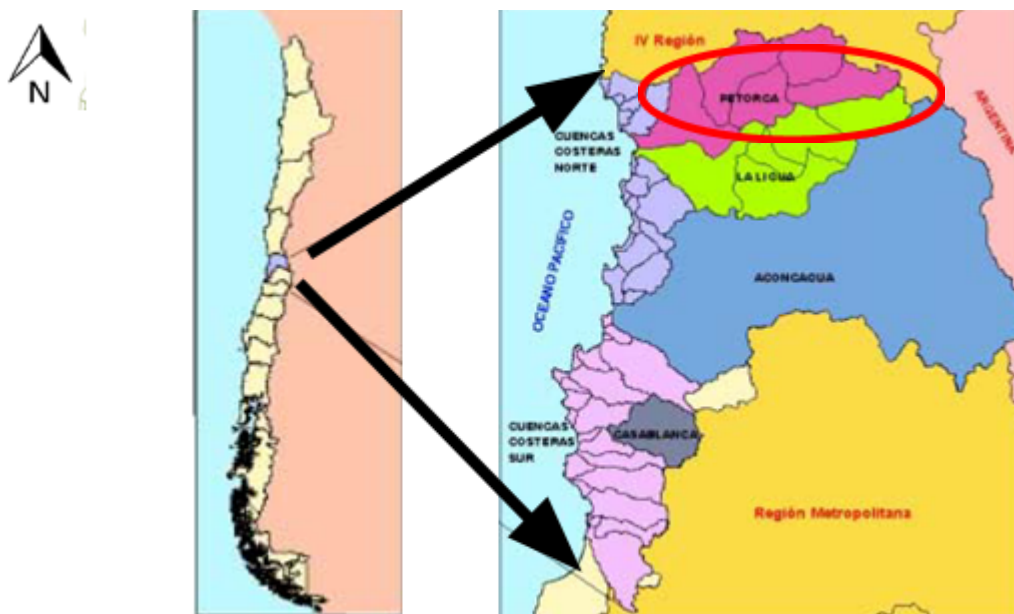
2.1 Descripción del área de estudio.

La cuenca del río Petorca pertenece administrativamente a la V región de Valparaíso, geográficamente se ubica en la zona comprendida entre el paralelo 32° y 32° 20' de latitud sur, donde sus coordenadas UTM comprenden al Norte de 6.410.000 a 6.455.000 y las coordenadas UTM al Este de 270.000 a 370.000, se localiza cercano al límite septentrional de la región de Valparaíso con la región de Coquimbo, limita al norte con la cuenca del río Choapa y por el sur con la del río La Ligua. El río Petorca nace de los afluentes principales río Sobrante y Río Pedernal y su cuenca tiene una extensión aproximada de 1922 km², ésta desemboca en el mar en la bahía de La Ligua y sus aguas se utilizan para el riego en el Valle de Petorca.

La zona bajo estudio nace en la Cordillera de Los Andes y se genera de la confluencia en Chincolco, de los ríos Pedernal y el Sobrante, después de la confluencia de estos dos ríos toma el nombre de río Petorca, tomando como afluentes principales al estero Las Palmas y a unos 19 kms. de su desembocadura a la quebrada Denker. Su pendiente es de aproximadamente de 3,22% con una dirección general hacia el sudoeste y desemboca en el mar en Ligua a través de la Laguna de Longotoma. La figura 2.1 indica la ubicación de la cuenca del río Petorca en Chile.

Figura 2.1. Ubicación geográfica de la cuenca río Petorca, v región.

Fuente: Informe de zonificación hidrogeológica para las regiones metropolitana y v de la DGA.



En la figura 2.2 se ilustra la cuenca del Río Petorca y sus afluentes principales (Río Pedernal, Río Sobrante, Estero Chalaco).



Figura nº 2.2: Cuenca del río Petorca y sus principales afluentes.

2.2 Características hidrológicas de la cuenca.

2.2.1 Descripción hidrológica de la zona.

Este subcapítulo tiene por objetivo realizar la selección y análisis de datos de las estaciones (pluviométricas y fluviométricas). Según la selección de estaciones pluviométricas, son sólo consideradas 9 estaciones (Sobrante, Artificio, Trapiche, El Salvador, Hierro Viejo, Colmenas, Palquico y Pedernal) y de estaciones fluviométricas según su disponibilidad de datos son consideradas 4 estaciones (Pedernal, Petorca en Longotoma, Petorca en Peñón y Sobrante). Los datos de estaciones pluviométricas son rellenados por el método de "Inverso a la Distancia" al cuadrado y la homogeneización de datos es realizada con el método de "la Curva Doble Acumulada". Según las estaciones fluviométricas consideradas se utilizan solo los datos existentes en la estaciones.

2.2.1.1 Pluviometría.

Según los antecedentes brindados por la Dirección General de agua (DGA), se determinó la existencia de 17 estaciones pluviométricas con 10 años de medición, donde se recopilaron los registros de precipitaciones diarias de las estaciones vigentes, distribuidas en la superficie de la cuenca.

En la tabla 2.1 se puede apreciar las estaciones pluviométricas existentes en la zona a estudiar y sus respectivas coordenadas geográficas.

Tabla N° 2.1 Estaciones pluviométricas existentes

Nombre	Este(UTM)	Norte(UTM)	Latitud	Longitud	Altitud	Estado
Artificio	303116	6414199	32° 23' 29"	71° 05' 35"	250	Vigente
Chalaco	331872	6437764	32° 11' 01"	70° 47' 00"	880	Vigente
Chincolco	326640	6434195	32° 12' 54"	70° 50' 22"	650	Suspendida
El Salvador	304239	6423711	32° 18' 21"	71° 04' 45"	340	Vigente
El Sobrante hacienda	331897	6433051	32° 13' 34"	70° 47' 02"	810	Vigente
El Trapiche	338866	6432887	32° 13' 43"	70° 42' 36"	1180	Vigente
Frutillar Alto	308556	6440339	32° 09' 24"	71° 01' 48"	780	Vigente
Hacienda el Rancho	348808	6433379	32° 13' 32"	70° 36' 16"	2000	Suspendida
Hierro viejo	311657	6427210	32° 16' 32"	70° 59' 59"	440	Vigente
Las Colmenas	288861	6423216	32° 18' 27"	71° 14' 33"	80	Vigente
Longotoma	276590	6413583	32° 23' 31"	71° 22' 30"	20	Vigente
Nacimiento del Sobrante	360191	6437670	32° 11' 18"	70° 28' 59"	3380	Vigente
Palquico	298523	6429484	32° 15' 10"	71° 08' 19"	450	Vigente
Pedral Hacienda	330115	6448825	32° 05' 01"	70° 48' 00"	1100	Vigente
Rio Petorca en Peñón o Hierro Viejo	312684	6426891	32° 16' 43"	70° 59' 20"	450	Vigente
Rio Sobrante en Piñadero	338677	6433255	32° 13' 31"	70° 42' 43"	1300	Vigente
Santa Marta	287264	6422011	32° 19' 05"	71° 15' 35"	100	Suspendida

2.2.1.2 Criterios de selección de estaciones pluviométricas.

Entre las estaciones pluviométricas inicialmente consideradas se realizó una selección de las que podían considerarse como representativas de la cuenca de estudio. Dicha selección se ha basado en algunos criterios, entre los que cabe señalar:

- a) Serie de datos disponible: Se seleccionó aquellas estaciones que presentan las series de datos más extensas a partir del año 2003 y a la vez más completas, es decir, con el menor

número posible de vacíos en los registros de precipitación. Tratando de reducir la cantidad de datos a estimar a partir de la información de otros pluviómetros, con objeto de conseguir una mayor precisión en los cálculos realizados a partir de las series de precipitación de las estaciones elegidas.

- b) Situación en la cuenca: Se trató de escoger estaciones pluviométricas que presentaran una distribución homogénea en el espacio para una mejor representación de la cuenca.

2.2.1.3 Relleno de datos de estaciones pluviométricas.

Para el relleno de datos estadísticos incompletos de cada una de las estaciones pluviométricas consideradas en el estudio se utilizó el método del recíproco de la distancia al cuadrado. Este método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad (W), igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación a rellenar.

La ecuación 1 nos indica la fórmula para calcular la precipitación faltante de la estación pluviométrica.

$$P = \frac{\sum (P_i \times W_i)}{\sum W_i} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

P_i = Precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares circundantes, en milímetros.

W_i = Relaciona la distancia al cuadrado entre cada estación circundante y la estación incompleta.

La ecuación 2 indica la fórmula para calcular la distancia al cuadrado entre la estación circundante y la estación incompleta.

$$W_i = \frac{1}{D_j^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

D_j = relaciona la distancia al cuadrado entre cada estación circundante y la estación incompleta

Se efectuó el relleno de los datos de precipitaciones diarias, entre enero de 2003 y Diciembre de 2013 que serán detallados en el anexo n°1.

2.2.1.4 Homogeneización de datos pluviométricos.

Al recopilar datos pluviométricos diarios como son mediciones muy puntuales en el tiempo, estos datos pueden tener diferentes errores, estos pueden ser debido a:

- Deficiencias por el pluviómetro.
- Mala ubicación de la estación, que puede alterarse debido a la vegetación, relieve, etc.
- Equivocación al recoger datos para medir la lluvia
- Mal digitalización de datos.

Debido a todos los errores posibles, se debe analizar la homogeneidad de datos, estos se pueden analizar en forma anual y mensual, debido a que los errores a nivel diario son mucho más difíciles de detectar por la mayor sensibilidad de imprecisión (Vauchel, 2006).

Existen varios métodos para el tratamiento de homogeneización, el método más conocido es el "método de doble masa" y es el que se utilizó en el presente trabajo. La curva doble masa permite detectar heterogeneidades de datos y corrige las inconsistencias en la información.

Se analiza la consistencia de datos pluviométricos medido de una estación "X" en base a los datos tomados de una estación patrón "Y, donde se construye un gráfico con valores acumulados de la estación patrón y la estación a analizar. Esta homogeneización de datos se utiliza cuando puede suceder un cambio relativo de pendiente de los datos acumulados registrados en una estación pluviométrica. Si todos los datos aparecen sobre la línea de tendencia de datos, los datos son validos sin corrección. Si se detecta un cambio de pendiente de debe tomar el tramo más confiable y se realiza el ajuste necesario para tener una serie de datos homogéneos. Se detallará el análisis de la homogeneidad de datos en el anexo nº 2.

2.2.2 Fluviometría.

2.2.2.1 Estaciones Fluviométricas.

Según los antecedentes brindados por la Dirección General de agua (DGA), se logró determinar la existencia de 7 estaciones fluviométricas con 10 años de medición, donde se recopilaron los caudales a nivel diario de las estaciones vigentes distribuidas en la superficie de la cuenca. El período cubierto por los registros de las estaciones vigentes, se extiende entre enero de 2003 hasta diciembre de 2013.

En la tabla 2.2 se pueden apreciar las estaciones fluviométricas existentes en la zona, indicando su ubicación en coordenadas (en coordenadas UTM y en latitud-longitud).

Nombre	este(UTM)	Norte(UTM)	Latitud	longitud	Altitud	Estado
Estero Las palmas en Palquico	299026	6429309	32° 15' 16"	71° 07' 60"	0	Suspendida
Rio Chalaco en Embalse	328697	6439590	32° 10' 00"	70° 49' 00"	1883	Suspendida
Rio Pedernal en Tejada	334209	6450310	32° 04' 15"	70° 45' 23"	1080	Vigente
Rio Petorca en Longotoma	276847	6415161	32° 22' 40"	71° 22' 19"	126	Vigente
Rio Petorca en peñón	312684	6426891	32° 16' 43"	70° 59' 20"	450	Vigente
Rio Petorca en Petorca	317861	6430159	32° 15' 00"	70° 56' 00"	0	Vigente
Rio sobrante en Piñadero	338677	6433255	32° 13' 31"	70° 42' 43"	1300	Vigente

Tabla N°2.2 Estaciones Fluviométricas existentes.

2.2.2.2 Selección de estaciones Fluviométricas.

Una vez conocida las estaciones existentes en la cuenca del Río Petorca y su distribución dentro de ella, se realiza la selección de estaciones.

El criterio utilizado para dicho procedimiento es considerar estaciones que tengan la mayor cantidad de datos existentes, debido a que para el caudal a nivel diario no existe un método de relleno de estadística, además las alzas y bajas de caudal se puede deber a lluvia, a deshielo y a otros factores que podrían ser obviada si existiese un método para el relleno, por lo que se optó solo por utilizar datos existentes. Las estaciones seleccionadas para el estudio considerando el criterio mencionado anteriormente son Pedernal, Petorca en Peñón, Petorca en Longotoma y sobrante.

2.3 Evapotranspiración.

La evapotranspiración es la cantidad de agua, expresada en mm/día, que es evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal.

Los valores de la evapotranspiración son muy escasos en la zona, debido a la falta de información de las variables que depende su cálculo y a la escasez de información de las estaciones pluviométricas de la dirección general de aguas (DGA), se optó por la utilización del estudio llamado "Análisis del Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile, Volumen II, Regiones V, Metropolitana, VI y VII", DGA-IPLA, 1996 (Gcf Ingenieros limitada, 1996).

Este estudio define valores de evapotranspiración potencial mensual para tres zonas climáticas, Litoral, Interior y Central, éstas serán definidas de acuerdo a las subcuencas descritas en el capítulo 3.

La zona litoral pertenece a la subcuenca n°4, la zona interior corresponde a la subcuenca n°3, esta zona abarca desde estación Fluviométrica Pedernal hasta la estación Fluviométrica Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo y por último la zona climática Litoral que comprende la subcuenca n° 1 y n°2.

En la tabla 2.3 se muestra en detalle el sector climático asociado a cada subcuenca según el estudio antes mencionada. (Ver figura 3.6)

Tabla n° 2.3 Sector climático para la evapotranspiración.

Subcuenca	Sector Climático
1	Central
2	Central
3	Interior

4	Litoral
---	---------

La ecuación 3 hace referencia a la evapotranspiración potencial, se obtiene con el método Blaney y Criddle.

$$Et_p = p \times (0.46 \times t + 8.13) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

p : Porcentaje diario de horas diurnas anuales.

t : Temperatura media mensual (°C).

Et_p : Evapotranspiración potencial mensual (mm).

En la tabla 2.4 se muestra en detalle los cálculos de la evapotranspiración potencial (Et_p) mensual para las tres zonas climáticas del estudio utilizado.

Tabla nº 2.4 Evapotranspiración mensual según sector climático.

Mes	Evapotranspiración (mm)		
	Clima Central	Clima Interior	Clima Litoral
Enero	194	179	140
Febrero	159	147	112
Marzo	149	118	93
Abril	96	78	66
Mayo	70	42	43
Junio	55	30	30
Julio	47	35	34
Agosto	70	45	43
Septiembre	85	55	54
Octubre	119	99	71
Noviembre	142	129	114

Diciembre	189	174	133
Total	1375	1131	933

2.3.1 Coeficiente de cultivo.

Para calcular la evapotranspiración real que nos servirá de base para la modelación hidrológica debemos tener presente el coeficiente de cultivo asociado a cada subcuenca y a nivel mensual.

La ecuación 4 calcula la evapotranspiración real, se calcula con el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración potencial mensual mencionada anteriormente

$$Et_r = K_c \times Et_p \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Et_r : Evapotranspiración mensual real (mm)

K_c : Coeficiente de cultivo.

Et_p : Evapotranspiración potencial mensual (mm).

Para el cálculo del coeficiente de cultivo se consideran los valores según el estudio "Situación hídrica actual de la región de Valparaíso" realizado por el Seremi de Agricultura el año 2013.

En la figura 2.3 se detallan los valores coeficientes de cultivo según el tipo de plantación y mes a utilizar.

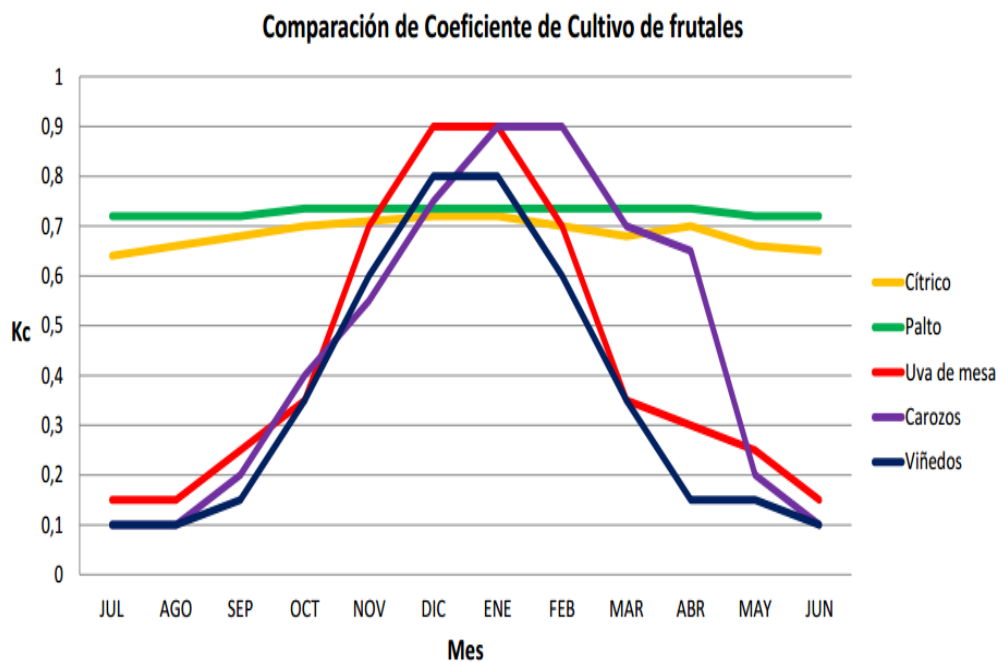


Figura N° 2.3 Coeficientes de cultivos según especie plantada.

Fuente "Situación hídrica actual de la región de Valparaíso" realizado por el seremi de agricultura el año 2013.

En la tabla 2.5 se especifican los coeficientes de cultivo para la zona. Para la zona de Petorca en forma generalizada se presentan mayoritariamente la especie frutal palto por lo que se optó por considerar esta especie.

Tabla n° 2.5 Valores de coeficiente de cultivo del la especie palto.

Mes	Coefficiente cultivo(kc)
Enero	0.75
Febrero	0.75
Marzo	0.75
Abril	0.75
Mayo	0.72
Junio	0.72
Julio	0.72
Agosto	0.72
Septiembre	0.72
Octubre	0.75
Noviembre	0.75
Diciembre	0.75

2.4 Modelo de elevación digital y modelación hidrológica.

2.4.1 Introducción.

Existen distintos programas de modelación hidrológica, siendo el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC-HMS por sus siglas en inglés), el aplicado en el presente trabajo de título, ya que es un programa computacional gratuito y que provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y tránsito de caudales (Feldman, 2000).

Este modelo utiliza diversos métodos de precipitación-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía generados por las precipitaciones en una cuenca o región. Este programa permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, hidrogramas, flujo base,

propagación de caudales, entre otros. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación y la simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de estos eventos.

En relación a lo antes mencionado, y como herramienta de apoyo a la modelación hidrológica, están los Sistemas de Información Geográficos (SIG), que permiten la integración de los resultados de la modelación hidrológica con las diferentes características físico-geográficas una cuenca.

El sistema de información geográfica QUANTUM GIS, permite generar la información que caracteriza a la cuenca y los parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS.

2.4.2 QUANTUM GIS.

El programa QUANTUM GIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG), se utiliza para la gestión geoespacial y análisis de datos, procesamiento de imágenes, gráficos, producción de mapas, modelado espacial y visualización.

Quantum gis es utilizado actualmente en ámbitos académicos y comerciales en todo el mundo, así como aplicaciones ingenieriles y de planificación territorial. Este programa puede visualizar y manipular datos vectoriales, como carreteras, ríos, límites, etc., además puede también utilizarse para la actualización de mapas utilizando sus herramientas de digitalización y dispone también de capacidad para manejar datos raster.

El modelo de elevación digital entrega cálculos de delimitación de cuencas y red de drenaje del río, subcuencas, pendientes, uso de suelo y características topográficas de la zona.

Por lo tanto sirve como base para el cálculo hidrológico con el software Hec-hms, los datos espaciales son incorporados al programa de modelación y simulación hidrológica.

2.4.3 HEC HMS.

El programa HEC HMS (hydrologic engineering center hydrologic modeling system), es un programa de simulación de procesos lluvia-escorrentía en cuencas. Es de carácter gratuito y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU.

Este programa se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, incluye modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada al modelo.

El modelo contiene diferentes fases como descripción física de la cuenca, descripción meteorológica, simulación hidrológica, estimación de parámetros, análisis de simulaciones y conexión con SIG (sistema de información geográfica).

El lapso de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

El programa contiene diferentes fases para la separación de la lluvia, estas fases son:

- ✓ Separación de la lluvia neta (parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo).
- ✓ Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- ✓ Suma del escurrimiento directo y el base.

- ✓ Cálculo de hidrogramas a medida que escurre a lo largo del cauce.

El programa HEC-HMS permite establecer varias subcuencas, donde se realizan la suma de todos los caudales transitados a lo largo del recorrido, y además proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

Además el programa HEC-HMS incluye en su simulación, modelos por eventos de lluvia y modelos continuos, que permiten abordar el tratamiento de ambos tipos de situaciones.

Dependiendo del tipo de modelación el programa tiene diferentes métodos para infiltración, tránsito de caudales, caudal base, hidrogramas, etc., donde es posible simular y obtener un análisis hidrológico de la zona de estudio.

3. Procesamiento de información para el modelo de elevación digital.

3.1 Información topográfica.

La información topográfica es extraída de las imágenes satelitales, son obtenidas en la página web de la NASA y vienen en formato Raster. Es una página gratuita, que descarga archivos digitales en todo el mundo, dando un formato digital del terreno, para poder analizar a través del software Quantum gis.

En la figura 3.1 se muestra el archivo DEM que se utiliza en los cálculos de la cuenca del Río Petorca, y la tabla 3.1 indica los valores de elevación del DEM.

Elevación(m)
0.00-1.00
1-357.47
357.47-713.95
713.95-1070.42
1070.42-1426.89
1426.89-1783.37
1783.37-2139.84
2139.84-2496.32
2496.32-2852.79
2852.79-3209.26
3209.26-3565.74
3565.74-3922.21
3922.21-4278.68
4278.68-4635.16
4635.16-4991.63
4991.63-5348.11
5358.11-5704.58
5704.58-6061.05
6061.05-6417.53
6417.53-6774.00



Tabla n° 3.1 Valores de elevación del DEM utilizado en la cuenca del río Petorca

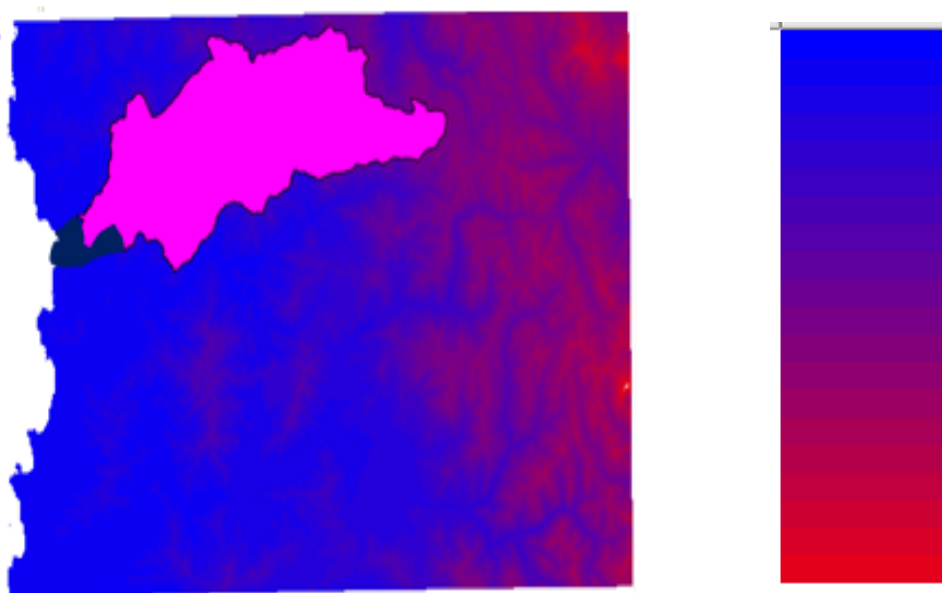


Figura n° 3.1 Modelo de elevación digital DEM

3.2 Delimitación de la cuenca.

La cuenca del Río Petorca tiene un área aproximada 1922 km², ésta y su red de drenaje es delimitada con el programa QUANTUM GIS. La red de drenaje de la cuenca Río Petorca está constituida por el cauce principal (Río Petorca) y sus afluentes principales (Río Sobrante, Río Pedernal). Las características en cuanto a elevación, pendiente, red de drenaje son extraídas del archivo raster.

La figura 3.2 indica la delimitación de la cuenca extraídas del archivo raster a través del programa quantum y la figura 3.3 detalla el formato raster de la red de drenaje.



Figura nº3.2 y Figura nº3.3 (Derecha e izquierda) Construcción del área de la cuenca del Río Petorca y su red de drenaje.

La tabla 3.2 indica las características topográficas de la cuenca del Río Petorca (Pendiente, elevación, longitud, etc.).

Tabla nº 3.2 Características de la cuenca Río Petorca

Cuenca	Pendiente (%)			Elevación(m)			Longitud (km.)
	Minima	Maxima	Media	Minima	Maxima	Media	Cauce principal
Petorca	0.77	46.61	23.69	8.32	3175.28	1591.8	81.5

En la figuras 3.4 y 3.5 se muestran los mapa de elevación y pendientes asociado a la cuenca del Río Petorca y las tabla 3.3 y 3.4 indican los valores asociados a elevación y pendiente respectivamente

Tabla nº 3.3 Valores de elevación de la cuenca del río Petorca.

Elev. (m)	Color
8.32	
360.	
712.03	
1063.98	
1415.80	
1767.74	
2119.63	
2471.51	
2823.40	
3175.28	



Figura n° 3.4 Mapa de elevación cuenca del Río petorca

Tabla n° 3.4 Valores de pendientes de la cuenca del río Petorca.

Pendientes (%)	Color
0.77	
5.75	
10.73	
15.71	
20.70	
25.68	
30.66	
35.64	
40.63	
45.61	

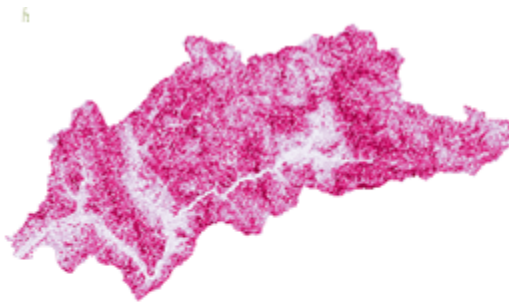
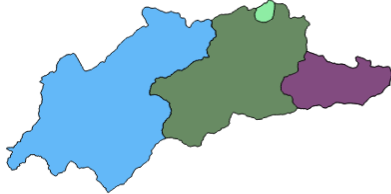


Figura nº 3.5 Mapa de pendientes cuenca del Río petorca.

3.3 Delimitación de las subcuencas del Río Petorca.

La delimitación de la cuenca en subcuencas se realiza a través de modelos de digital elevación (DEM) en el programa QUANTUM GIS y es requerida para modelar la respuesta hidrológica de la cuenca. El método de discretización de la cuenca es dividir en sub-áreas con propiedades uniformes, donde el flujo de drenaje representada por un flujo (ríos, estero, quebrada, etc.) de la cuenca, se consideraron los flujos principales, y se seleccionaron las subcuencas fluviométricas seleccionadas para el estudio, por lo cual se delimitaron las subcuencas.



En la figura 3.6 se ilustra la discretización de las diferentes subcuencas, realizada a través del programa quantum gis. En la tabla 3.5 se indican las diferentes subcuencas asociadas al mapa.

Tabla nº 3.5 Subcuencas del río Petorca

Subcuenca	Colores
1	Morado
2	Azul claro
3	Marrón
4	Rojo

Figura n°3.6 Delimitación de las subcuencas en QUANTUM GIS

La tabla 3.6 muestra los parámetros topográficos (Área, longitud, elevación, pendiente) de cada subcuenca.

Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente (%)			Elevación(m)			Longitud (km)
		Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	
1	223.3	4.1	43.3	24.7	1337.3	3463.9	2301.7	30.3
2	17.3	3.7	43.2	23.3	1333.4	2917.2	2223.3	3.3
3	697.7	2.3	43.6	23.9	332.6	1801.1	3049.7	17.3
4	981.4	2.1	43.2	23.6	60.2	2030.2	1033.1	37.9

Tabla n° 3.6 Características geomorfológicas de la cuenca del río Petorca

3.4 Clasificación del tipo de uso suelo.

El uso del suelo es a lo que se destina el territorio, por ejemplo, áreas comerciales, industriales, zonas agrícolas, terrenos forestales, entre otros; además ésta se refiere a las unidades vegetacionales que cubren la superficie terrestre, diferenciándolas por estructura (praderas, matorrales, matorrales arborescentes, bosques, plantaciones) y densidad (abierto, semidenso, denso). La clasificación del tipo de uso de suelo de la cuenca del Río Petorca, se realiza a través del programa QUANTUM GIS, utilizando mapas de uso de suelos, obtenidos del Ministerio del Medio Ambiente (infraestructura de datos espaciales).

En la figura 3.7 se muestra en detalle el mapa de uso de suelos de la cuenca del río Petorca y la tabla 3.7 indica los diferentes tipos de uso de suelos pertenecientes a la cuenca.



Figura n°3.7 Modelo de uso de suelo QUANTUM GIS de la cuenca de Petorca.

Tabla n°3.7 Tipos de uso de suelos en la cuenca Río Petorca.

	Afloramientos Rocosos
	Área sobre límites vegetación
	Bosque Nat. Achaparrado denso
	Bosque Nat. Achaparrado denso
	Bosque Achaparrados
	Caja de ríos
	Ciudades pueblos Zonas industriales
	Derrumbe sin vegetación
	Estepa andina central
	Lago laguna embalse tranque
	Matorral abierto
	Matorral Arbores. Muy abierto
	Matorral Arbores. semidenso
	Matorral Arbores. abierto
	Matorral Arbores. denso
	Matorral denso
	Matorral muy abierto
	Matorral pradera muy abierto
	Matorral pradera semidenso
	Matorral semidenso
	Matorral-suculentas muy abierto
	Matorral-suculentas abierto
	Matorral-suculentas semidenso
	Minería industrial
	Nieves
	Otros terreno húmedos
	Otros terrenos sin vegetación
	Planta joven recién cosechada
	Plantación
	Playas y dunas
	Praderas
	Praderas anuales
	Praderas Perennes
	Renoval abierto
	Renoval semidenso
	Ríos
	Rotación cultivo pradera
	Suculentas
	Terreno de uso agrícola

Desde la tabla 3.8 a la tabla 3.11 muestran en detalle los tipos de usos de suelos de cada subcuenca del Río Petorca con su respectivo porcentaje:

Tabla n°3.8 Tipos de uso suelo subcuenca n°1.

Uso actual	Área	Porcentaje
Matorral arborescente muy abierto	0.04	0.02
Matorral abierto	3.68	1.63
Praderas anuales	6.15	2.73
Renoval semidenso	2.89	1.28
Matorral semidenso	0.38	0.17
Matorral muy abierto	41.19	18.27
Otros terrenos sin vegetación	12.16	5.39
Afloramientos rocosos	101.44	44.99
Lago-laguna-embalse-tranque	0.07	0.03
Estepa andina central	45.59	20.22
Matorral pradera muy abierto	7.56	3.35
Otros terrenos húmedos	0.44	0.20
Vegas	1.2	0.53
Derrumbes sin vegetación	0.7	0.31
Bosque natural achaparrado semidenso	1.99	0.88
Total	225.48	100.00

Tabla n° 3.9 Tipos de uso suelo subcuenca n° 2.

Uso actual	Área	Porcentaje
Otros terrenos húmedos	1.27	7.26
Matorral muy abierto	4.01	22.91
Afloramientos rocosos	10.55	60.29
Matorral pradera muy abierto	1.67	9.54
Total	17.5	100

Tabla nº 3.10 Tipos de uso de suelos subcuenca nº3.

Uso actual	Área	Porcentaje
Cajas de ríos	5.17	0.74
Otros terrenos húmedos	3.81	0.55
Otros terrenos sin vegetación	47.73	6.84
Matorral muy abierto	138.95	19.92
Lago-laguna-embalse-tranque	0.09	0.01
Afloramientos rocosos	94.95	13.61
Matorral abierto	63.49	9.10
Matorral semidenso	14.77	2.12
Terrenos de uso agrícola	38.09	5.46
Vegas	0.52	0.07
Praderas anuales	54.96	7.88
Matorral arborescente abierto	3.32	0.48
Matorral arborescente semidenso	1.18	0.17
Matorral denso	0.09	0.01
Minería industrial	0.71	0.10
Ciudades pueblos zonas industriales	0.36	0.05
Matorral arborescente denso	1.72	0.25
Matorral arborescente Muy abierto	12.71	1.82
Matorral-suculenta muy abierto	20.7	2.97
Matorral-suculentas abierto	89.41	12.82
Matorral-suculentas semidenso	19.08	2.73
Áreas sobre limite vegetación	2.46	0.35
Estepa andina central	2.48	0.36
Matorral pradera muy abierto	43.18	6.19
Matorral pradera semidenso	15.16	2.17
Nieves	2.09	0.30
Suculentas	14.34	2.06
Bosque natural achaparrado denso	0.23	0.03

Renoval semidenso	0.93	0.13
Rotación cultivo-pradera	2.19	0.31
Plantación	0.08	0.01
Bosque natural achaparrado semidenso	0.46	0.07
Bosques achaparrados	2.23	0.32
	697.64	100

Tabla nº 3.11 Tipos de uso de suelos subcuenca nº4.

Uso actual	Área	Porcentaje
Cajas de ríos	0.24	0.02
Otros terrenos sin vegetación	26.98	2.75
Matorral muy abierto	86.44	8.81
Lago-laguna-embalse-tranque	0.12	0.01
Afloramientos rocosos	20.42	2.08
Matorral abierto	94.6	9.64
Matorral semidenso	231.24	23.56
Terrenos de uso agrícola	51.9	5.29
Praderas anuales	12.93	1.32
Matorral arborescente abierto	22.9	2.33
Matorral arborescente semidenso	120.48	12.28
Matorral denso	87.07	8.87
Ciudades-pueblos-zonas industriales	2.14	0.22
Matorral arborescente denso	15.88	1.62
Matorral arborescente Muy abierto	18.73	1.91
Matorral-suculenta muy abierto	5.07	0.52
Matorral-suculentas abierto	42.85	4.37
Matorral-suculentas semidenso	62.34	6.35
Áreas sobre limite vegetación	35.4	3.61
Matorral pradera muy abierto	13.74	1.40
Matorral pradera semidenso	8.9	0.91
Nieves	2.48	0.25
Praderas	1.5	0.15
Suculentas	0.1	0.01
Renoval semidenso	13.18	1.34
Rotación cultivo-pradera	0.55	0.06
Renoval abierto	2.27	0.23
Plantación	0.94	0.10

	981.39	100
--	--------	-----

3.5 Precipitación media de la cuenca.

Para calcular la precipitación media de una cuenca la técnica empleada fue el método de los polígonos de Thiessen, para realizar la modelación con una única serie de precipitación por subcuenca, éste método se basa en calcular el área de influencia de cada estación pluviométrica y ponderar las precipitaciones de cada estación influyente en la subcuenca.

La figura nº 3.8 muestra en detalle el mapa de las subcuencas del Río Petorca según su distribución espacial de los polígonos de Thiessen, el área de influencia asociada a cada estación pluviométrica se muestra una línea divisoria entre cada superficie de influencia de cada estación.

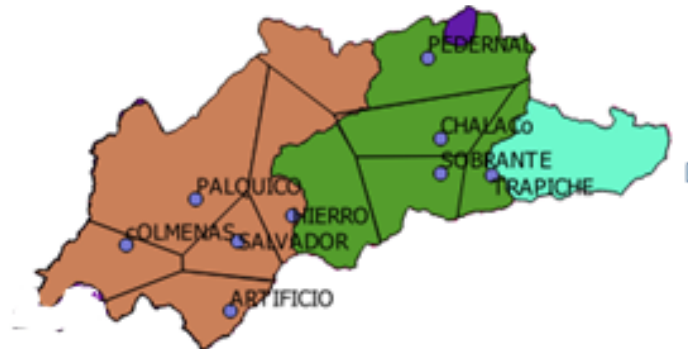


Figura nº 3.8 Mapa de las subcuencas del Río Petorca y la distribución espacial de polígonos de Thiessen según cada estación pluviométrica.

Desde la tabla 3.12 a la tabla 3.15 muestran en detalle el área de influencia de cada estación pluviométrica con su respectivo porcentaje.

Tabla nº 3.12 Área de influencia de subcuenca nº 1.

Estación influyente	Área influencia (km ²)	% Área total
Sobrante	225.48	100

Tabla nº3.13 Área de influencia de subcuenca nº 2.

Estación influencia	Área influencia(km ²)	% Área total
Pedernal	17.50	100

Tabla nº 3.14 Área de influencia de subcuenca nº 3.

Estación influyente	Área influencia(km²)	%Área total
Chalaco	147.93	21.20
Hierro	169.13	24.24
Pedernal	188.67	27.04
Sobrante	120.17	17.23
Trapiche	71.74	10.28

Tabla nº 3.15 Área de influencia de subcuenca nº 4.

Estación influyente	Área influencia	% Área total
Artificio	113.84	11.60
Chalaco	0.95	0.10
Colmenas	126.46	12.89
Hierro	143.31	14.60
Palquico	377.41	38.46
Pedernal	125.76	12.81
Salvador	93.66	9.54

Según el área de influencia de cada estación pluviométrica y la precipitación asociada a cada Pluviógrafo obtenemos la Precipitación media por cada subcuenca.

4. Estimación de parámetros para el modelo hidrológico.

4.1 Introducción

Para la construcción del modelo hidrológico a través de software HEC-HMS se debe extraer los datos obtenidos de la red de drenaje y las subcuencas al programa HEC-HMS, para posteriormente realizar el modelo hidrológico y seleccionar los métodos a utilizar en el software.

Para realizar el paso a precipitación neta se deberá aplicar alguno de los métodos que evalúe las pérdidas por infiltración, además se deben aplicar métodos por evapotranspiración, retención en depresiones e interceptación de la vegetación. La confección del modelo hidrológico, requiere de la elección de métodos a aplicar según el tipo de simulación hidrológica, ésta simulación puede ser por eventos de lluvias o en forma continua. En este trabajo de título se llevará a cabo una simulación en forma continua, donde se empleará un método de pérdidas llamado Soil Moisture Accounting (SMA), el cual considera la humedad del suelo sus diferentes capas. Así, una vez obtenida la lluvia neta, se debe realizar una transformación lluvia-escorrentía mediante un hidrograma unitario. A falta de tener como dato el hidrograma unitario real de la cuenca se debe escoger uno sintético. Por sencillez de definición, se ha utilizado el hidrograma unitario sintético de Snyder. Los hidrogramas obtenidos a la salida de las cuencas circulan a través del cauce. Por lo tanto, se debe aplicar un método que evalúe la propagación en el cauce. El método utilizado en el estudio es el de Muskingum (desarrollado en el subcapítulo 4.2.5).

Además se debe considerar métodos para el caudal base, el agua interceptada por la vegetación, la retención de agua en el suelo, entre otros.

En la tabla n° 4,1 se detallan los métodos a ocupar en la modelación hidrológica continua a escala diaria.

Tabla n° 4.1: Resumen de métodos a ocupar en la modelación hidrológica.

Calculo	Método
Pérdidas	Soil moisture accounting(SMA)
Transformación	Snyder hidrograma unitario
Caudal base	Recesión
Propagación	Muskingum
Precipitación	Especificadas desde 2003-2013
Evapotranspiración	Evapotranspiración mensual
Vegetación	Simple canopy
Retención superficial	Simple surface

4.2 Métodos para la modelación hidrológica:

4.2.1 Método de cálculo de pérdidas: (Soil Moisture Accounting(SMA))

Los parámetros que influyen en el cálculo son la impermeabilidad, infiltración, percolación del suelo, precipitación, el almacenamiento de agua, almacenamiento subterráneo, entre otros; además para su cálculo se debe tener presentes algunas características, entre las cuales cabe mencionar el tipo de suelo y uso de suelo (desarrollado en capítulo 3) e impermeabilidad del suelo.

4.2.1.1 Tipo de suelo.

Para la clasificación del tipo de suelo en la zona de estudio de la provincia de Petorca se realizó una recopilación de información general de toda la zona de Petorca, la cual radica en forma generalizada en la categoría de suelos molisoles, este tipo de suelo presenta textura arenosa fina y muy fina y textura arcillosa arenosa.

En la tabla 4.2 Se muestra la clasificación de suelo según diversos parámetros velocidad de infiltración, transmisibilidad, profundidad y textura, ésta clasificación se considera para las subcuencas.

Tabla nº 4.2 Clasificación de suelos según clase hidrológica según Aparicio, 2008 (Aparicio, 2008).

Características	Grupos			
	A	B	C	D
Velocidad de infiltración	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Transmisibilidad	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Profundidad	Muy profundos	Profundos	Moderada	Muy moderada
Textura	Arenas y gravas	Medio arenosa	Medio arcillosa	Arcillas pesadas

Para un análisis más específico de la cuenca, se consideran los tipos de suelos según estudio de la DGA a cargo del departamento de administración de recursos hídricos en el año 2002, cabe señalar que éste estudio fue realizado a nivel de subcuencas (DGA, 2002).

El tipo de suelo asociado a cada subcuenca se muestra a continuación:

- Subcuenca nº1 y subcuenca nº2: La primera corresponde a la a una parte del río Del Sobrante y la segunda subcuenca corresponde a una parte del río Pedernal, ellos presentan una transmisibilidad entre 20 y 60 (m²/día). Los valores de transmisibilidad manifiestan una baja aptitud de los rellenos a la presencia de flujos subterráneos, característica condicionada por la presencia de sedimentos finos en toda la columna estratigráfica. Según la clasificación hidrológica del suelo corresponde a un suelo tipo D.
- Subcuenca nº3 : Corresponde al tramo desde la estación fluviométrica Pedernal hasta la estación fluviométrica Hierro Viejo, donde se presenta un rango de transmisibilidad de 20 a 200 (m²/día), magnitud que muestra un aumento respecto al tramo de aguas arriba.

Según la clasificación hidrológica del suelo corresponde a un suelo tipo D y a un suelo tipo C.

- Subcuenca nº4: Corresponde al tramo entre estación fluviométrica Hierro Viejo y estación fluviométrica Río Petorca en Longotoma. En esta zona se encuentran con transmisibilidades bastante heterogéneas, siendo al inicio de la subcuenca con valores medios aproximadamente de 200 (m²/día) y la zona en Longotoma presenta un rango más amplio para el coeficiente de transmisibilidad, de 100 a 1200 (m²/día). En esta zona el rendimiento hídrico de los depósitos continúa siendo bajo, condicionado por la presencia de estratos de arcilla a partir de los 15 m de profundidad. Según la clasificación hidrológica del suelo corresponde a suelos tipo A y B.

4.2.1.2 Impermeabilidad.

En la modelación hidrológica, un parámetro de difícil cuantificación es el porcentaje de áreas impermeables. Un aspecto que complica la tarea de estimar este parámetro es la complejidad de encontrar varios tipos de uso en espacios muy reducidos. Otra complicación es el hecho de que el porcentaje de áreas impermeables es un parámetro muy sensible en cualquier modelo de hidrología. El área impermeable de una cuenca corresponde a la impermeabilidad de las diferentes superficies de usos de suelo. Para calcularla se definió un criterio, el cual consiste principalmente en utilizar las áreas de uso de suelos que son categorizados como áreas impermeables, tales como afloramientos rocosos, zonas industriales, minería, bosques y matorrales densos.

En la tabla nº 4.3 se muestran en detalle las áreas impermeables asociadas a cada subcuenca.

Tabla nº 4.3 Áreas impermeables asociadas a cada subcuenca.

Subcuenca	Minería	Área (%)			
		Bosques y matorrales densos	Afloramientos rocosos	Zonas industriales	impermeable
1			44.99	-	44.99
2			60.29	-	60.29
3	0.77	0.29	13.61	0.10	14.00
4		10.49	2.08	0.22	12.79

4.2.1.3 Parámetros del método SMA.

Para el método de cálculo de pérdidas, se debe tener en cuenta algunos parámetros que dependen del suelo, los cuales serán detallados a continuación:

- Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage)(mm.):

La entrada es la infiltración desde la superficie. La salida son la evapotranspiración y la percolación hacia el acuífero subyacente.

Para poder estimar la capacidad de almacenamiento en el suelo (CAS), se debe tener en cuenta la estimación del espesor y de su porosidad, para ello se consideran los valores adoptados en el estudio de la Comunidad Autónoma de Cantabria en el 2004 (Santander, 2004). Es posible

considerar este estudio como fuente de información, tomando como variable a considerar la textura del suelo.

En la tabla 4.4 se muestran los espesores asociados a los diferentes tipos de suelos.

Tabla nº 4.4 Espesores de la capa de suelo.

Tipo de suelo	Espesor(mm)
A	500
B	250
C	200
D	125

La decisión de considerar espesores menores de los suelos al ir disminuyendo su calidad, desde el punto de vista hidrológico, se ha basado en la observación de la localización de los suelos tipo D, ubicados en general en la parte alta de la cuenca, en contraposición a los suelos tipo A, que se ubican generalmente en la parte media-baja de la misma.

La tabla 4.5 muestra la porosidad considerada según los cuatro tipos de suelos, y están establecidos en la publicación “Geotécnica y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas”, de J.A. Jiménez Salas y J.L. de Justo Alpañés. (Jiménez y Salas, 1975).

Tabla nº 4.5 Porosidad del suelo.

Tipo de suelo	Porosidad (%)
A	30
B	34
C	35
D	40

Con la información de espesores y porosidad según la clasificación de tipos de suelos indicados anteriormente, se ha obtenido la capacidad de almacenamiento de agua.

La tabla 4.6 indica la capacidad de almacenamiento del suelo a nivel de subcuenca, cabe señalar que como en la subcuenca nº3 y nº4 existen dos tipos de suelo se saca un promedio de ambos.

Tabla nº4.6 Capacidad de almacenamiento del suelo de cada subcuenca.

Subcuenca	Tipo de suelo	Espesor(mm)	Porosidad (%)	CAS(mm)
1	D	125	40	50
2	D	125	40	50
3	C y D	163	37.5	61.12
4	A y B	375	32	120

Cabe señalar que en la subcuenca nº 3 y nº 4 se considera un promedio del espesor de cada tipo de suelo.

- b) Infiltración máxima (Máx infiltration) (mm/h).

Es el agua no retenida por la vegetación que pasa a la superficie del terreno, después de la retención superficial comienza la infiltración. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia las capas inferiores del suelo.

En la tabla 4.7 Se muestra la clasificación establecida por el Soil Conservation Service de EE.UU. y la capacidad de infiltración superficial según Skaggs y Khaleel en 1982 (Skaggs and Khaleel, 1982). Para obtener el parámetro máximo de infiltración se han seleccionado valores medios para la máxima capacidad de infiltración.

Tabla n°4.7 Capacidad de infiltración.

tipo de suelo	Infiltración superficial (mm/h)	Infiltración media (mm/h)
A	7.6-11.4	9.5
B	5.8-7.6	5.7
C	1.3-5.8	2.6
D	0.0-1.3	0.7

En la tabla 4.8 se detalla la infiltración máxima según cada subcuenca, cabe señalar que para la subcuenca 3 y 4 se obtiene un promedio de los valores medios de infiltración.

Tabla n°4.8 Infiltración según subcuenca.

Subcuenca	tipo de suelo	Infiltración (mm/h)
1	D	0.7
2	D	0.7
3	C Y D	1.65
4	A Y B	7.6

c) Tensión de almacenamiento (Tensión storage)(mm):

Es cuando el agua almacenada en el suelo supere el máximo de infiltración.

Para el cálculo del agua libre que está disponible para pasar a los depósitos inferiores, se obtiene la información tomada de Rawls et al. (1982), donde toma en cuenta textura del suelo y el tipo de suelo. Al analizar las relaciones de los parámetros anteriores, se obtiene la parte de agua almacenada en porcentaje para cada tipo de suelo.

En la tabla 4.9 se obtiene la capacidad de almacenamiento en la zona de tensión y teniendo en cuenta los parámetros anteriores se obtiene el porcentaje en la zona de tensión del suelo y además se obtiene el parámetro CAT (capacidad de almacenamiento en tensión) multiplicando los porcentajes.

Tabla n° 4.9 Capacidad de almacenamiento del suelo en la zona de tensión del suelo a nivel de subcuenca.

Subcuenca	tipo de suelo	CAS(mm)	CAT (%)	CAT (mm)
1	D	50	90	45
2	D	50	90	45
3	C Y D	61.12	87.5	53.5
4	A Y B	120	82.5	99

d) Percolación del suelo (Soil Percolation) (mm/h):

El agua comienza a percolar sin superar el valor máximo infiltrado. La percolación es el movimiento de agua que pasa a través del suelo, el estudio de ésta es importante porque es la única fuente de captación de agua subterránea (pozos y manantiales) (Ortiz y Ortiz, 1988).

En el presente trabajo se establecen los valores a la capa de percolación hacia capas profundas (CAP), según la textura de suelo adoptada.

En la tabla 4.10 se detalla la percolación del suelo según su textura. Los valores de percolación utilizados son los de Amisial y Jegat (1976). La clasificación de la percolación se establece según la textura. En la segunda columna se establecen los intervalos normales de la capa de percolación del suelo. Los intervalos de percolación real varían mucho la estructura del suelo y su estabilidad estructural, incluso, aún más de lo indicado en esta columna.

Tabla nº 4.10 Percolación del suelo.

Subcuenca	Textura	Percolación(mm/h)
1	Arcilloso	0.1
2	Arcilloso	0.1
3	Franco arcilloso	2.5
4	Franco arenoso	13

e) Almacenamiento de acuífero (GW1 storage)(mm.).

El modelo HEC-HMS distingue dos niveles de acuífero: uno superficial que recibe directamente la percolación del agua que no ha sido atrapada por la evapotranspiración y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o bien percolar hacia un acuífero profundo.

Para representar la capacidad de almacenamiento de percolación en el primer almacenamiento (CAD1), se ha adoptado un valor igual a la mitad de la capacidad de percolación del suelo, pues más profundo el análisis del suelo es menor la percolación. El segundo de los depósitos subterráneos hacia capas más profundas no es considerado en el cálculo del modelo, debido a la nula información en esa capa de suelo.

Para calcular la capacidad de almacenamiento y la percolación del suelo se adoptaron valores del estudio de recursos hídricos de Cantabria el 2004, se consideran los valores de la capacidad máxima de almacenamiento del primer depósitos entre 15-25 mm., por lo que se ha supuesto un valor igual a 20 mm. y la capacidad de almacenamiento del segundo no es considerado en el cálculo.

En la tabla 4.11 se detalla la percolación en mm/hr y la capacidad de almacenamiento en mm del depósito superficial.

Tabla nº 4.11 Percolación y capacidad de almacenamiento del suelo del primer depósito subterráneo.

	Depósito1	Depósito1
Subcuenca	Percolación(mm/h)	CAD1(mm)
1	0.05	20
2	0.05	20

3	1.25	20
4	6.5	20

f) Coeficiente de almacenamiento del suelo del depósito (GW1 coefficient) (hr.)

Es el tiempo de retardo que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles acuífero salga lateralmente y alimente al cauce como caudal base.

Según el estudio de recursos hídricos de los ríos de la vertiente de Cantabria en el año 2004 indica que la variación del coeficiente de almacenamiento en el primer acuífero se considera aproximadamente igual a 80-100 horas, para las cuencas de superficie menor o igual que 100 km² y va aumentando su valor hasta 300 horas para cuencas de superficie aproximadamente igual a 450 km². Por interpolación y extrapolación de datos según el área de cada subcuenca se obtiene el coeficiente de almacenamiento del acuífero 1. Cabe destacar que esta información es referencial y toma en consideración las texturas de suelo presentes en las subcuencas.

En la tabla 4.12 se considera el área de cada subcuenca y según ésta por extrapolación se obtiene el coeficiente de almacenamiento del acuífero 1 que es detallado por subcuenca. Para la modelación se considera un sistema de dos estanques, por lo cual para efectos de cálculos el acuífero profundo del modelo no es utilizado.

Tabla nº 4.12 Coeficientes de almacenamiento deposito nº1.

Subcuenca	Área(km)	Coeficiente (h)
1	225.48	165.29
2	17.5	40.5
3	697.64	448.58
4	981.39	618.83

4.2.2 Almacenamiento en depresiones superficiales:

Es el volumen de agua retenida en las irregularidades de la superficie del terreno. La entrada son las precipitaciones que no han sido interceptadas en la vegetación. Las salidas son inicialmente la infiltración y la Evapotranspiración.

Según la tabla 4.13 indica la capacidad de almacenamiento superficial del agua en depresiones (CAD), fue estimada por Dunne y Leopold en 1978 ^[24] y por Chow en 1964 (Chow, 1964), donde se considera una distinción entre zonas pavimentadas y zonas con pendiente, en la segunda columna se estableces los rangos de pendientes según el departamento de agricultura de EE.UU.(USDA,1993) y por último se establecen los valores de capacidad de almacenamiento superficial las distinciones adoptadas.

Tabla nº 4.13 Almacenamiento superficial en depresiones del terreno.

Descripción	Pendiente media (%)	CAD(mm)
Zonas pavimentadas		3.2-6.4
Pendientes fuertes	30 %	1.0
Pendientes suaves	10-30%	12.7-6.4
Zonas llanas	0-5%	50.8

La tabla 4.14 indica la CAD por cada subcuenca según su pendiente media.

Tabla nº 4.14 Indica la CAD de cada subcuenca.

Subcuenca	Pendiente media (suaves 10-30%)	CAD(12.7-6.4)
1	24.68	9.33
2	25.45	9.31
3	23.96	9.27
4	23.61	9.34

4.2.3 Método de intercepción en la cubierta vegetal.

Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada es la precipitación y la única salida es la evapotranspiración. La vegetación es muy importante en la evapotranspiración de la precipitación, ya que puede llegar a retener una cantidad de agua que va del 20 al 50% de la precipitación total (Gerrits et al, 2008). El estudio de las pérdidas por intercepción tiene gran importancia en el balance hídrico de las cuencas, en especial cuando las precipitaciones son escasas e irregulares.

La tabla 4.15 muestra la intercepción de agua en la cubierta vegetal (ICV) depende el tipo de vegetación y usos del suelo.

Tabla n°4.15 Intercepción cubierta vegetal.

Tipo de vegetación	Intercepción(mm)
Bosque	9.0
Matorral	4.0
Herbazal	3.0
Urbano y Baldío	0.0
Desnudo	0.0
Plantación Forestal	9.0
Parques urbanos	3.0
Cultivos agrícolas	1.0

Las tablas 4.16 a 4.19 indican la intercepción de la cubierta vegetal según cada subcuenca y según la clasificación se la tabla 4.15.

Tabla n°4.16 Intercepción cubierta vegetal subcuenca n°1.

Vegetación	Área	% Área	Intercepción
Bosques	4.88	2.164	9.0
Matorral	52.85	23.44	4.0
Herbazal	51.74	22.95	3.0
Desnudo	116.01	51.45	0.0
Intercepción			1.82

Tabla n°4.17 Intercepción cubierta vegetal subcuenca n°2.

Vegetación	Área	% Área	Intercepción
matorral	5.68	32.46	4
desnudo	11.82	67.54	0
Intercepción			1.30

Tabla nº4.18 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº3.

Vegetación	Área	% Área	Intercepción
Bosques	3.85	0.55	9
Matorral	423.76	60.74	4
Herbazal	74.24	10.64	3
Desnudo	155.43	22.280	0
Cultivos agrícolas	40.36	5.79	1
	Intercepción		2.80

Tabla nº4.19 Intercepción cubierta vegetal subcuenca nº4.

Vegetación	Área	% Área	Intercepción
Bosques	15.45	0.55	9
Matorral	810.24	82.56	4
Herbazal	49.93	5.09	3
Cultivos agrícolas	53.39	5.44	0
Desnudo	52.38	5.34	1
	Intercepción		3.56

4.2.4 Método de transformación lluvia-escorrentía.

En la modelación del flujo de una cuenca se necesita conocer el caudal de ella, éste depende de los fenómenos de precipitación que ocurren en la cuenca.

Es mucho más fácil disponer de datos de precipitación para una zona, que los caudales para cada una de las cuencas de la misma, debido a que existe más extensión de la red pluviométrica. Por ello se utilizan modelos de transformación lluvia-escorrentía que permiten estimar el caudal generado a partir de los datos de precipitación. Para calcular esta transformación existen modelos hidrológicos que aproximan el hidrograma de una cuenca a partir de la precipitación en la zona y de datos físicos de ella (pendiente, longitud, longitud del centroide, etc.).

Para el método de transformación a través del hidrograma unitario Snyder, se necesitan parámetros, entre los cuales cabe mencionar el tiempo de retardo y coeficiente de Snyder.

- a) Tiempo de de retardo.

Según las características físicas de la cuenca, se ajusta el hidrograma unitario de Snyder con los valores Benítez y Arteaga, éste ajusta los parámetros del HU. Los datos considerados para la modelación son los siguientes:

- Tiempo Punta del caudal (T_p): define la longitud de tiempo entre el centroide del peso de la precipitación y el caudal punta del hidrograma.
- Constante del caudal punta del HU (C_{peak}): mide el flujo del hidrograma que resulta en una unidad de precipitación.

La ecuación 5, 6 y 7 nos indican las formulas para calcular los parámetros del hidrograma, son extraídas del manual técnico HEC-HMS (Cuerpo de ingeniero, 2000).

$$T_p = C_t \left(\frac{L \times L_c}{\sqrt{S}} \right)^{n_t}$$

(Ecuación 5) Donde:

- C_t = coeficiente base HU región del Valparaíso.
- L = longitud cauce principal.
- L_c = longitud entre el centroide de la cuenca con la salida del cauce.
- S = pendiente media de la cuenca.

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_{peak}}{t_p} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

- U_p = caudal punta HU. n_p
- A = área cuenca.
- C_{peak} = constante caudal punta HU.
- C = constante de conversión (con valor 2.75).

$$U_p = C_p t_p^{n_p} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

- C_p = coeficiente HU región de Valparaíso
- n_p = exponente HU región de Valparaíso

La tabla 4.20 indica las características necesarias de cada subcuenca para calcular los valores de tiempo peak y caudal peak.

Tabla 4.20 Valores de entrada al hidrograma.

Subcuenca	L(km)	Lc(km)	Área(km ²)	Pendiente (%)
1	30.46	11.78	225.48	24.68
2	5.34	2.66	17.5	25.45
3	17.46	18.54	697.64	23.96
4	57.87	28.11	981.39	23.61

La tabla 4.21 indica los valores HUS Snyder modificación Benítez y Arteaga, Región de Valparaíso para las subcuencas 1 y 2 y la tabla 4.22 indica los valores HUS Snyder modificación Benítez y Arteaga, Región de Valparaíso para las subcuencas 3 y 4.

Tablas 4.21 Valores del Hidrograma Unitario Sintético modificación Benítez y Arteaga para las subcuencas 1 y 2.

Subcuenca 1		Subcuenca 2	
C_t	0.324	C_t	0.324
C_p	140.014	C_p	140.014
n_t	0.421	n_t	0.421
n_p	-0.784	n_p	-0.784
T_p	6.816	T_p	1.405
Q_p	31.095	Q_p	107.259
C	2.75	C	2.75
C_{peak}	0.342	C_{peak}	3.131

Tablas 4.22 Valores del Hidrograma Unitario Sintético modificación Benítez y Arteaga para las subcuencas 3 y 4.

Subcuenca 3		Subcuenca 4	
C_t	0.324	C_t	0.324
C_p	140.014	C_p	140.014
n_t	0.421	n_t	0.421
n_p	-0.784	n_p	-0.784
T_p	6.863	T_p	11.946
Q_p	30.928	Q_p	20.027
C	2.750	C	2.5
C_{peak}	0.111	C_{peak}	0.089

El programa HEC HMS toma algunas limitaciones en cuanto al C_{peak} por lo que considera valores comprendidos entre 0.1 y 1, como dos subcuencas se escapan de esos valores se consideran el valor mínimo o máximo según corresponda. Los valores que se escapan de las limitaciones del programa se pueden ajustar a través del proceso de calibración de otros parámetros para poder tener el ajuste del hidrograma.

4.2.5 Método de propagación de Muskingum.

El método Muskingum está basado en el principio que una onda de crecida en un río, el cual depende de la fricción del fondo y de los almacenamientos naturales en el río. Donde un tramo de río este se puede dividir en dos partes. El primer tramo del tipo de almacenamiento está basado en un prisma, que depende solamente de las salidas y sería la superficie libre del agua paralelo al fondo del río. El segundo tipo de almacenamiento es en cuña, depende de la pendiente de la superficie libre del agua, está depende de las entradas y de las salidas.

En la figura 4.1 se muestra las dos partes del almacenamiento de un cauce.

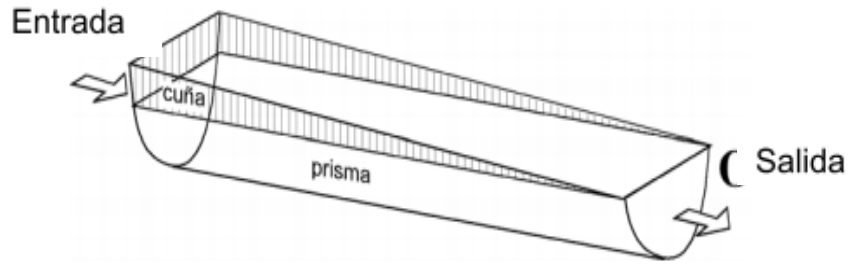


Figura nº 4.1 Almacenamiento de cauce.

Fuente: Aparicio, 2003

Durante la crecida, el caudal de entrada (aguas arriba) es mayor al de salida en (aguas abajo). El almacenamiento toma la forma de un prisma (aguas arriba). Cuando baja la crecida, la situación es contraria y el almacenamiento tiene su base en la sección aguas abajo.

La ecuación 8 y 9 indican los dos tipos de almacenamiento en forma de cuña y en forma de prisma.

$$V_{prisma} = K * Q \quad \text{(Ecuación 8)}$$

$$V_{cuña} = KX * (I - Q) \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

K : Factor de proporcionalidad, es el tiempo de tránsito de la onda de creciente a lo largo del tramo del canal.

X : Factor de ponderación entre $0 < X < 0.5$ según los límites del programa HEC-HMS.

El factor de ponderación es cero para un almacenamiento tipo embalse (no se produce cuña) y es 0.5 (existe cuña). En corrientes naturales el valor de **X** es próximo a 0.2 (fuente: http://eias.entalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/articulos_cientificos/pizarro_hormazabal_leon_morales.pdf)

Para cálculo del parámetro **X**, para cauces naturales, el valor está entre 0 y 0.3, considerando 0.5 para los tramos ubicados en la parte alta de la cuenca y para la parte baja hasta un valor 0.20. En la ecuación 10 se muestra como puede ser estimado el parámetro Muskingum (**K**) y la ecuación 11 indica la condición que debe cumplir, si no cumple se debe buscar el “número de reach (**n**)” por lo que debemos utilizar la ecuación 12 y 13.

$$K = 0.18 * \left(\frac{\Delta x}{i^{0.25}} \right)^{0.76} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

Δx : es la distancia máxima en Kilómetros (km.)

i : es la pendiente máxima de la subcuenca

$$\Delta t > (2 * \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde:

Δt : es el incremento de tiempo que se utiliza para representar los resultados, en este caso se utiliza un incremento de 1 día.

$$\Delta t > \left(\frac{2 * k * x}{n} \right) \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$n > \left(\frac{2 * k * x}{\Delta t} \right) \quad \text{(Ecuación 13)}$$

En la tabla 4.23 se muestran las medidas necesarias para calcular el parámetro k de Muckinham y la tabla 4.24 señala la condición de debe cumplir para cada subcuenca.

Tabla nº 4.23 Parámetros de método de propagación.

	Longitud	Pendiente	Muckinham
Tramos	$\Delta x(\text{km})$	i(%)	k
Unión confluencia-Peñón	17.49	2.3	1.4
Unión Peñón-Longotoma	57.87	2.05	3.4

Tabla nº 4.24 Número de reach mínimo.

Tramos	k	$\Delta t(\text{día})$	x	condición cumplir		reach
Unión confluencia-Peñón	1.4	1	0.4	1.08	no cumple	2
Unión Peñón-Longotoma	3.4	1	0.4	2.75	no cumple	3

La tabla 4.25 indica los parámetros a ocupar en cuenca del Río Petorca en el método de propagación de Muckinham.

Tabla Nº 4.25 Resumen parámetros métodos de Muckinham.

Tramos	k	x	n
Unión confluencia-Peñón	1.4	0.4	2
Unión Peñón-Longotoma	3.4	0.4	3

4.2.6 Método del caudal base

El caudal de una corriente puede ser representado por un hidrograma. La separación del hidrograma en escorrentía superficial directa (proveniente de las lluvias) y en escorrentía base (proviene de aguas subterráneas) es importante y necesaria para el estudio hidrológico de la cuenca hidrográfica.

Existen varios métodos para calcular el caudal base en el programa HEC-HMS, en los cuales cabe destacar el método "flujo base recesivo" y es el que se utilizará en el modelo.

La ecuación 14 indica la fórmula para calcular el caudal base, consiste en un modelo de recesión exponencial que representa la cuenca y se define como el flujo de caudal (Q_t) en un intervalo de tiempo (t).

$$Q_t = Q_o * k^t \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Con:

Q_t = flujo base en un intervalo de tiempo t

Q_0 = flujo base inicial en $t=0$.

K = constante exponencial de decaimiento.

Para la calcular el parámetro K , se realiza un análisis exponencial, donde se separa la curva de descenso de la curva de agotamiento y se realiza un análisis de tendencia lineal entre ambas en el cual se define un punto de intersección. Finalmente se estima un valor promedio de la regresión exponencial a lo largo de los años de estudios.

La figura 4.2 muestra un ejemplo de la curva de recesión de la cuenca del Río Petorca y la tabla 4.26 nos detalla la constante de recesión de cada subcuenca.

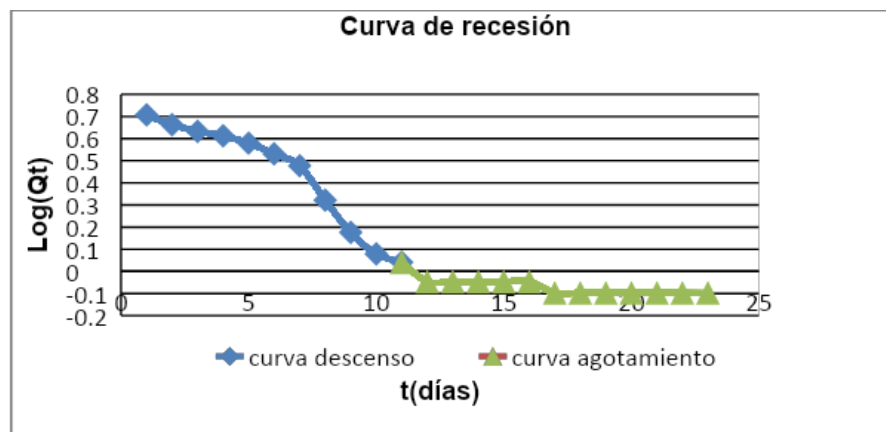


Figura n° 4.2 Gráfico de Curva de recesión

Tabla N° 4.26 Resumen de constante de recesión para cada subcuenca.

Subcuenca	Constante recesión
1	0.9033
2	0.9646
3	0.9065
4	0.9557

4.3 Extracción de caudales a nivel de subcuencas:

La extracción de caudales superficiales en la cuenca del Río Petorca se realiza a través de pozos y drenes, los valores adoptados de caudales son los que se presentan en el estudio de la DGA llamado "Actualización Informe de Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de las Cuencas Petorca y La Ligua, Región de Valparaíso" del año 2013 (Salazar et al, 2013). En la tabla nº 4.27 se detalla un resumen de los diferentes caudales extraídos a nivel de subcuencas.

Tabla nº4.27 Caudales extraídos por subcuenca.

Subcuenca	Caudal(l/s)
Pedernal	0
Sobrante	0
Media	3043.33
Baja	2306.3

5. Modelación hidrológica a escala diaria

5.1 Introducción

El estudio hidrológico está orientado a determinar el comportamiento de la cuenca. Para ello se ha recopilado previamente antecedentes que resultan relevantes para la realización del modelo, el cual busca representar el comportamiento de la cuenca en un cierto intervalo de tiempo ante las diversas forzantes hidrometeorológicas presentes en éste. Los datos de entrada son parámetros requeridos como condiciones de borde en la cuenca, los cuales pueden variar en el proceso de calibración y validación.

En este capítulo se calibra y valida el modelo utilizando información meteorológica de escala temporal diaria. Durante el proceso de calibración se busca encontrar los parámetros que definan el comportamiento de la cuenca con la menor incertidumbre posible, mientras que en la validación

se verificará que los parámetros resultantes del proceso anterior sigan representando el comportamiento de la zona ante las forzantes involucradas en dicho periodo.

En la figura 5.1 se muestra el modelo hidrológico realizado en el programa HEC-HMS.

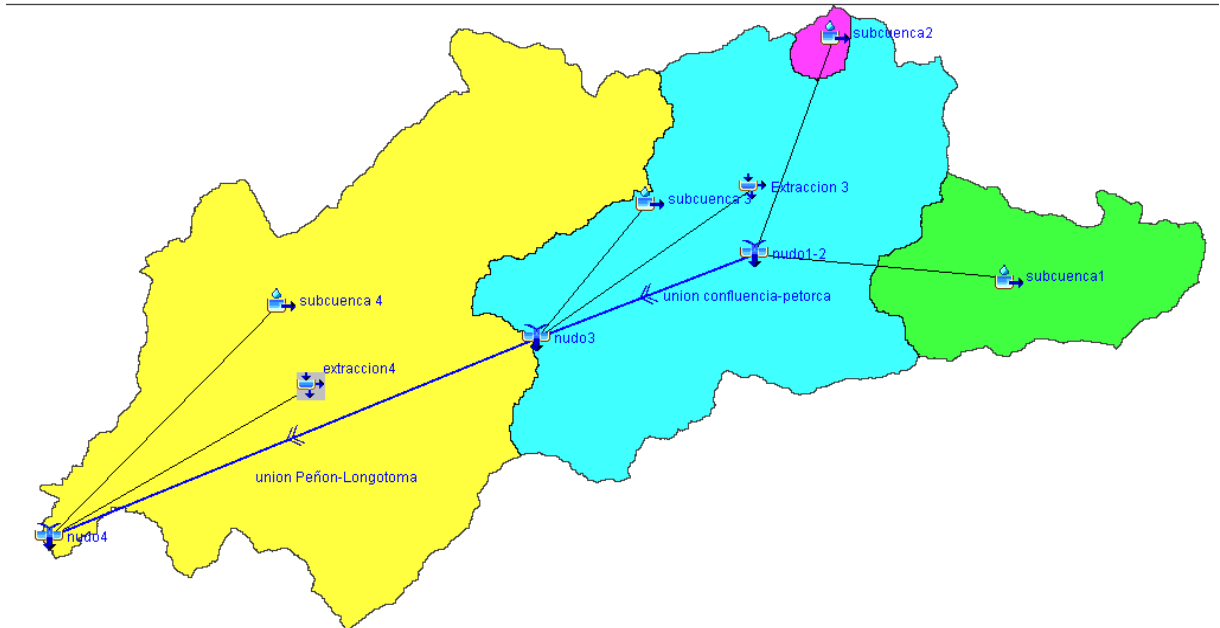


Figura nº 5.1 Modelo hidrológico de la cuenca del Río Petorca.

5.2 Resultados Calibración y validación

Según la necesidad de que los parámetros que intervienen en la definición del modelo de cuenca tengan valores adecuados, la dificultad radica incluso en aquellos que están relacionados con las características geomorfológicas de la cuenca y del cauce, por lo cual se debe realizar un proceso de calibración y validación.

Para el proceso de calibración se considera el periodo correspondiente al 1 de enero del año 2003 hasta el 31 de diciembre año 2010 (7 primeros años de estudios) y para el proceso de validación se considera el periodo correspondiente al 1 de enero del año 2011 hasta el 31 de diciembre año 2013 (los últimos 3 años de estudio), se debe considerar que hay datos de registros faltantes de las estaciones de la DGA, por lo que se considera solo los datos existentes.

Para el proceso de calibración de datos en forma generalizada existe un proceso de adaptación del hidrograma, donde el hidrograma calculado se comienza a similar al hidrograma observado, por lo general se considera el primer año de medición. Para determinar el nivel de ajuste del hidrograma simulado se consideran criterios como la eficiencia de Nash, el volumen y correlación lineal.

El proceso de calibración de datos se puede realizar en forma manual o automática, estas son las siguientes:

a) Calibración manual.

Se realizan modificaciones de los parámetros, a criterio del usuario, lo cual da lugar a la realización de consideraciones según su capacidad. La aplicación de esta forma de calibrar exige un profundo conocimiento del programa HEC-HMS y del modelo de cuenca en particular, así como de la sensibilidad de su respuesta ante diversas modificaciones de los parámetros. Se debe tener siempre presente las características geomorfológicas de la cuenca y del cauce.

b) Calibración automática o prueba de optimización.

El programa HEC-HMS contempla la posibilidad de realizar el proceso de calibrado de manera automática, basándose en las funciones objetivo y en los algoritmos de ajuste. Al introducir datos reales de aforos para compararlos con los caudales generados por HEC HMS. Al ver los resultados de la comparación de los caudales es posible cambiar algunos parámetros para conseguir resultados similares a los datos históricos de caudales. Este proceso se realiza en forma automática la cual se denomina proceso de optimización, es necesario haber ejecutado una simulación en la que hayan incluido caudales reales.

5.2.1 Resultados de calibración

Se detalla en las figuras 5.2, 5.2, 5.3 y 5.4 los Hidrogramas unitarios asociados a cada subcuenca para la etapa de calibración de parámetros, donde se grafican caudales simulados y caudales observados.

Subcuenca 1

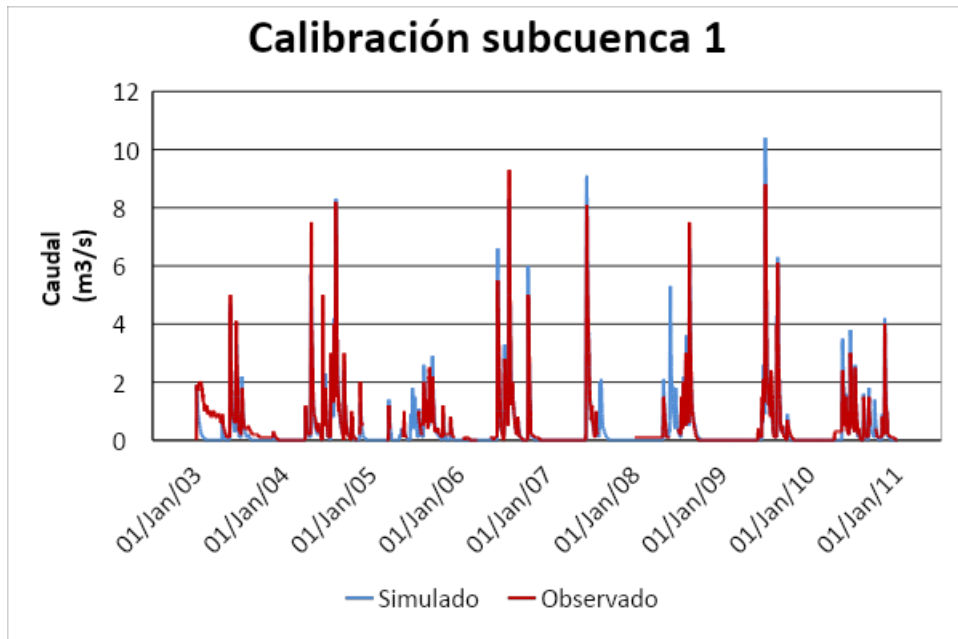


Figura nº 5.2 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 1

□ Subcuenca 2

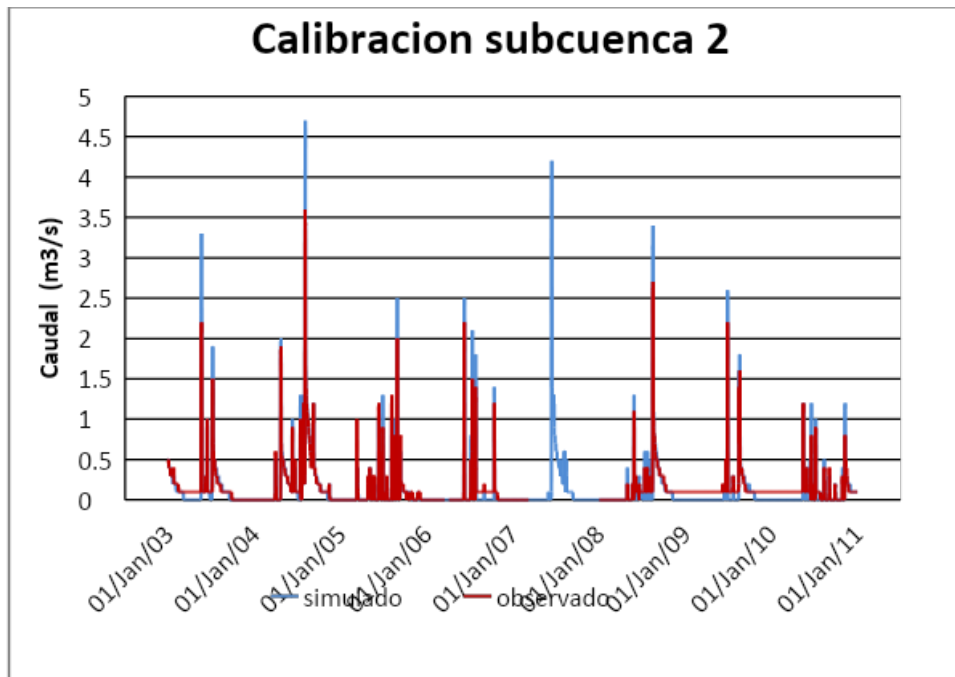


Figura nº 5.3 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 2

□ Subcuenca 3

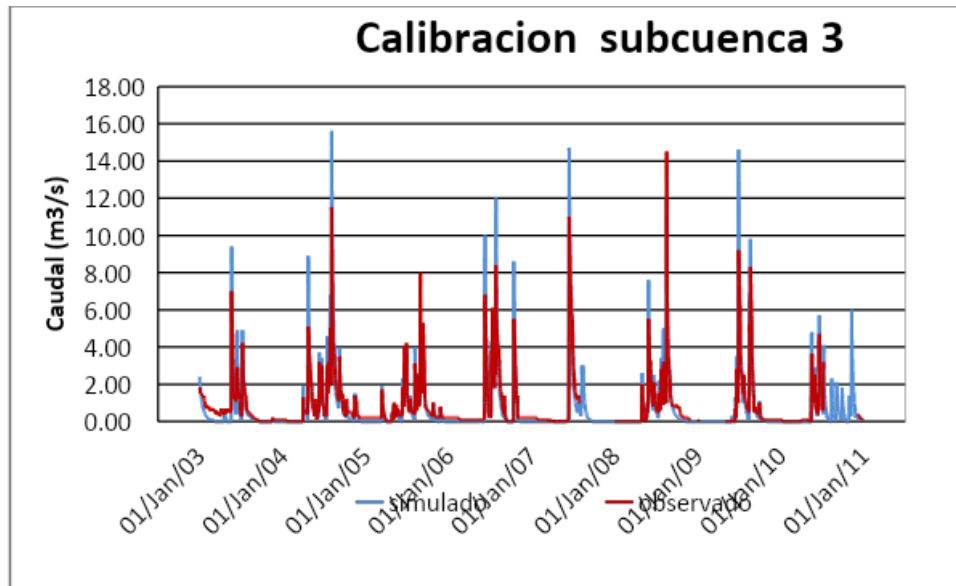


Figura nº 5.4 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 3

□ Subcuenca 4

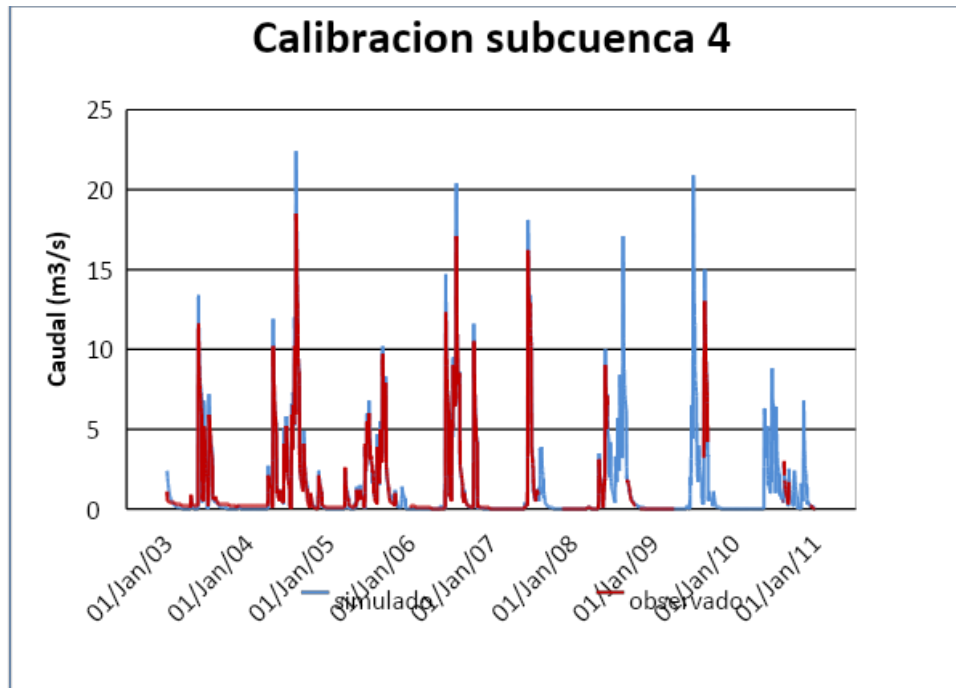


Figura nº 5.5 Hidrograma unitario para calibración subcuenca 4

5.2.2 Resultados de validación

Se detalla en las figuras 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 los Hidrogramas unitarios asociados a cada subcuenca para la etapa de validación de parámetros, donde se grafican caudales simulados y caudales observados.

- Subcuenca 1

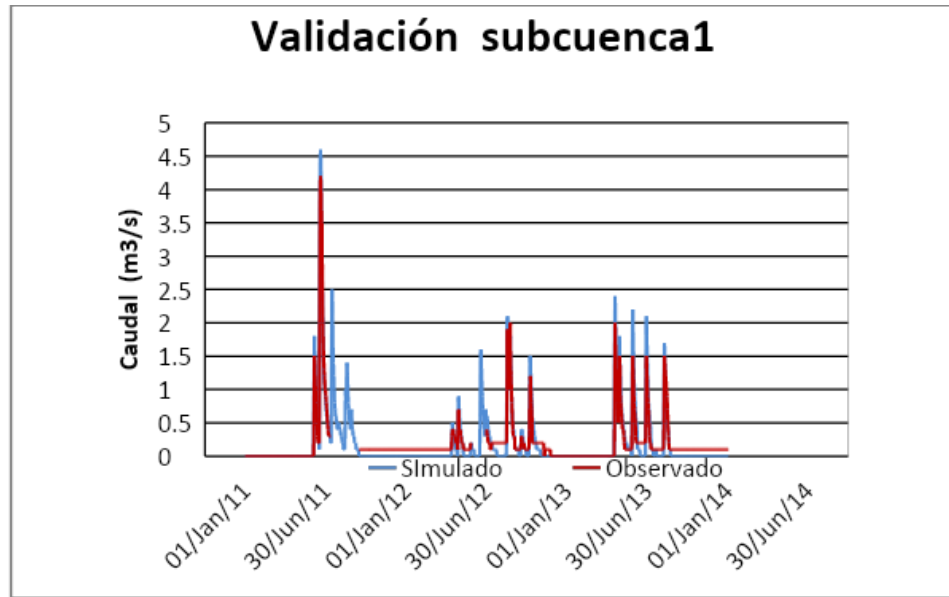


Figura nº 5.6 Hidrograma unitario para validación subcuenca 1

- Subcuenca 2

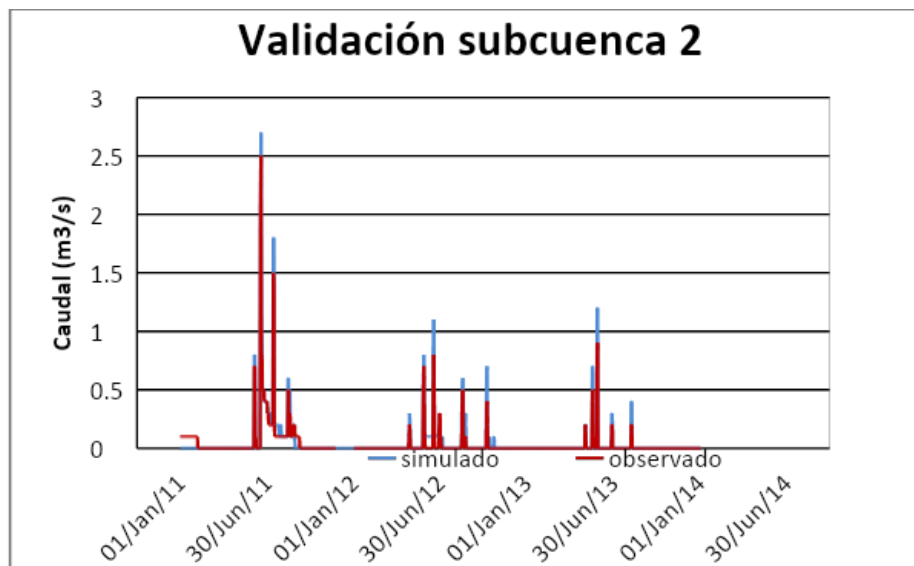


Figura nº 5.7 Hidrograma unitario para validación subcuenca 2

□ Subcuenca 3

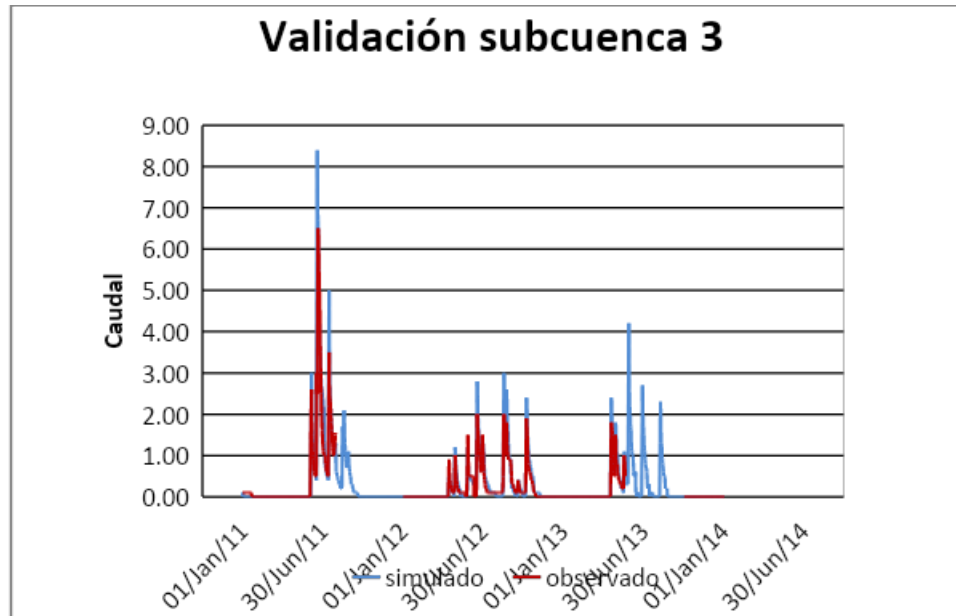


Figura nº 5.8 Hidrograma unitario para validación subcuenca 3

□ Subcuenca 4

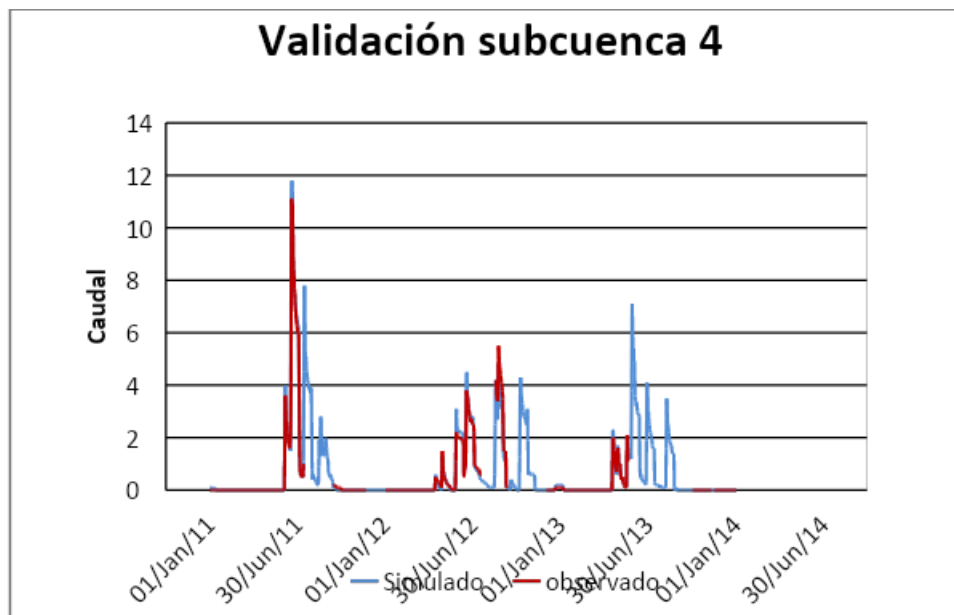


Figura nº 5.9 Hidrograma unitario para validación subcuenca 4

5.2.3 Indicadores de bondad de ajuste

La bondad de ajuste de un modelo describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones, considerando la discrepancia entre los valores observados y los valores simulados.

Existen varios indicadores de bondad de ajuste en los que se considera el análisis de correlación lineal (R^2) de datos, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) y el volumen (E_r). El primero consiste en considerar la ecuación de la recta que “mejor se ajuste” a la nube de puntos (recta de mínimos cuadrados) del diagrama de dispersión, si el coeficiente de correlación del diagrama de dispersión da cercano a 1 es una relación perfecta y si es cercana a 0 no existe relación entre los datos, el segundo consiste en realizar una prueba de estadísticas, donde la comprobación estadística propone una medida para corroborar la modelación hidrológica. El dominio matemático del valor del coeficiente E es de $-\infty$ a 1, donde la unidad representa la simulación perfecta. Cuando $E = 0$ la varianza de los errores es igual a la varianza observada, lo cual significa que el modelo produce estimaciones del promedio de las observaciones en todos los intervalos. Los valores negativos indican un deficiente desempeño del modelo.

La ecuación 15 indica como calcular la eficiencia de Nash (E), utilizando datos de caudales simulados y observados.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^t (Q_{ot} - Q_{mt})^2}{\sum_{t=1}^t (Q_{ot} - Q_{oprom})^2} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde:

Q_o = Caudal observado (m^3/s).

Q_m = Caudal modelado (m^3/s).

Q_{oprom} = Caudal observado promedio (m^3/s).

Además para analizar los hidrogramas unitarios de cada subcuenca se realizará un análisis en cuanto a volumen de caudal, en el cual se obtendrá el porcentaje de error entre el volumen simulado y observado, si el error es $E_r < 0$ está subestimado el modelo, si $E_r > 0$ esta sobreestimado el modelo y si es 0 el modelo esta perfecto.

En la ecuación 16 se detalla el cálculo del % de error en volumen.

$$E_r (\%) = \frac{(V_{sim} - V_{obs}) * 100}{V_{obs}} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Donde:

V_{sim} = Volumen simulado (m^3)

V_{obs} = Volumen observado (m^3)

E_r = Error en volumen (%)

La ecuación 17 indica como calcular la correlación lineal de datos, utilizando datos de caudales simulados y observados.

$$R^2 = \left(\frac{\frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^t (Q_{ot} \times Q_{promot}) \times (Q_{mt} - Q_{promst})}{\frac{1}{n} \times \sum ((Q_{ot} - Q_{promot})^2) \times \left(\frac{1 - \sum ((Q_{mt} - Q_{promst})^2)}{n} \right)^{1/2}} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

- Q_o = Caudal observado (m³/s).
 Q_s = Caudal modelado (m³/s).
 Q_{promot} = Caudal observado promedio (m³/s).
 Q_{promst} = Caudal modelado promedio (m³/s).
 n = numero de observaciones.

Cabe señalar que los indicadores de bondad de ajuste se analizarán para los años de calibración y validación. El volumen se obtiene en forma diaria donde se sumarán los volúmenes parcializados para el proceso de calibración y validación.

En la tabla 5.1 se detallan los volúmenes observados y simulados para el proceso de calibración de datos. En la tabla 5.2 indica los valores de volúmenes para el proceso de validación de datos.

Tabla n°5.1 Valores de volúmenes (m³) calibrados.

	Calibración	
Subcuenca	Vsimulado(m ³)	Vobservado(m ³)
1	92111040	106000000
2	23086080	28131840
3	164730240	173560320
4	238852800	233573760

Tabla n°5.2 Valores de volúmenes (m³) validados

	Validación	
Subcuenca	Vsimulado (m ³)	Vobservado(m ³)
1	13780800	16528320
2	3983040	3404160
3	21651840	18861120
4	33436800	33402240

5.2.3.1 Indicadores de bondad de ajuste para calibración.

En la tabla 5.3 se detallan los indicadores de bondad de ajuste para un proceso de calibración de parámetros de caudales.

Tabla 5.3 Indicadores de bondad de ajuste para calibración.

	Nash-Sutcliffe	Error volumétrico (%)	correlación
Subcuenca	Calibración	Calibración	Calibración
1	0.91	-12.89	0.91
2	0.87	-17.94	0.90
3	0.86	-5.09	0.89
4	0.98	2.26	0.98

Desde la figura 5.10 a la figura 5.13 indican los gráficos de dispersión para la etapa de calibración de cada subcuenca, con su línea de tendencia de los datos (color negro), su línea de tendencia perfecta ($y=x$), en color rojo) y su coeficiente de correlación lineal. Con la lineal de tendencia lineal se obtiene un coeficiente de correlación de datos.

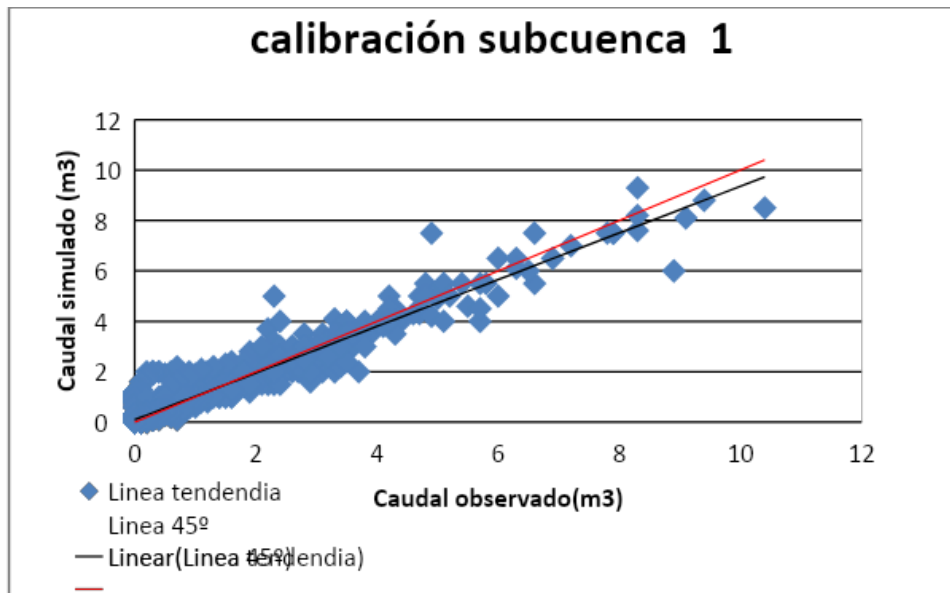


Figura n° 5.10 Gráfico de dispersión de la subcuenca n°1 correspondiente a la etapa de calibración de caudales simulados y caudales observados.

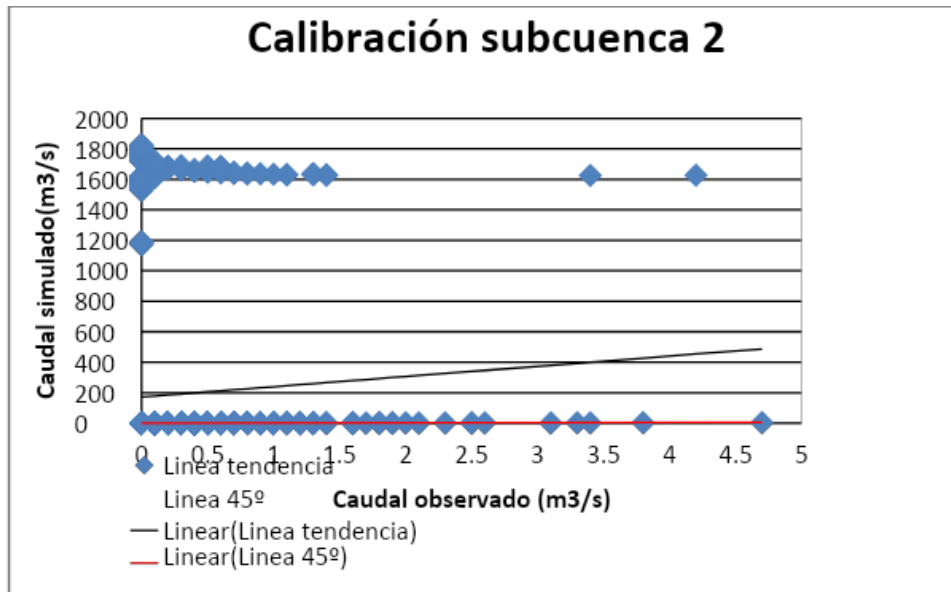


Figura nº 5.11 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº2 correspondiente a la etapa de Calibración de caudales simulados y caudales observados.

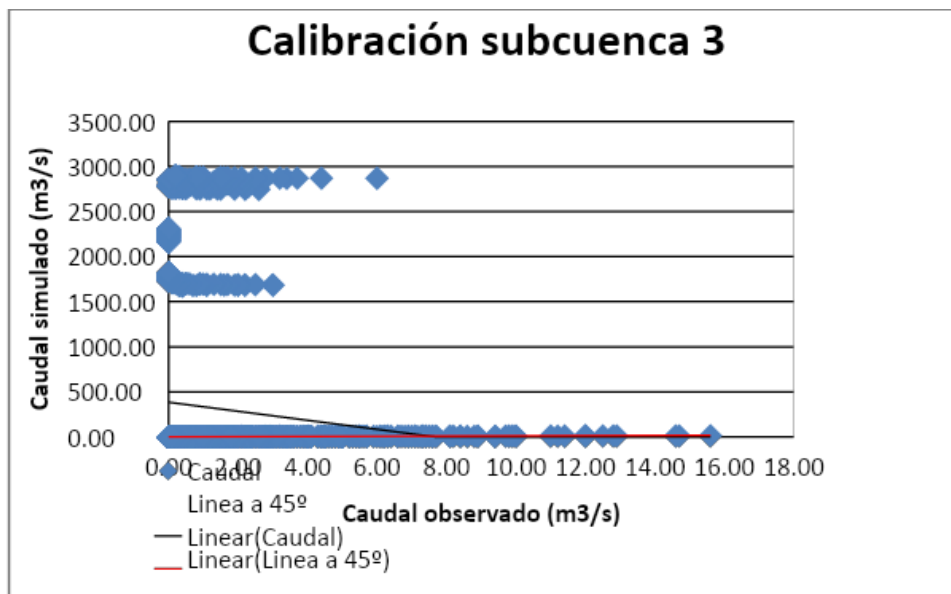


Figura nº 5.12 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº3 correspondiente a la etapa de Calibración de caudales simulados y caudales observados.

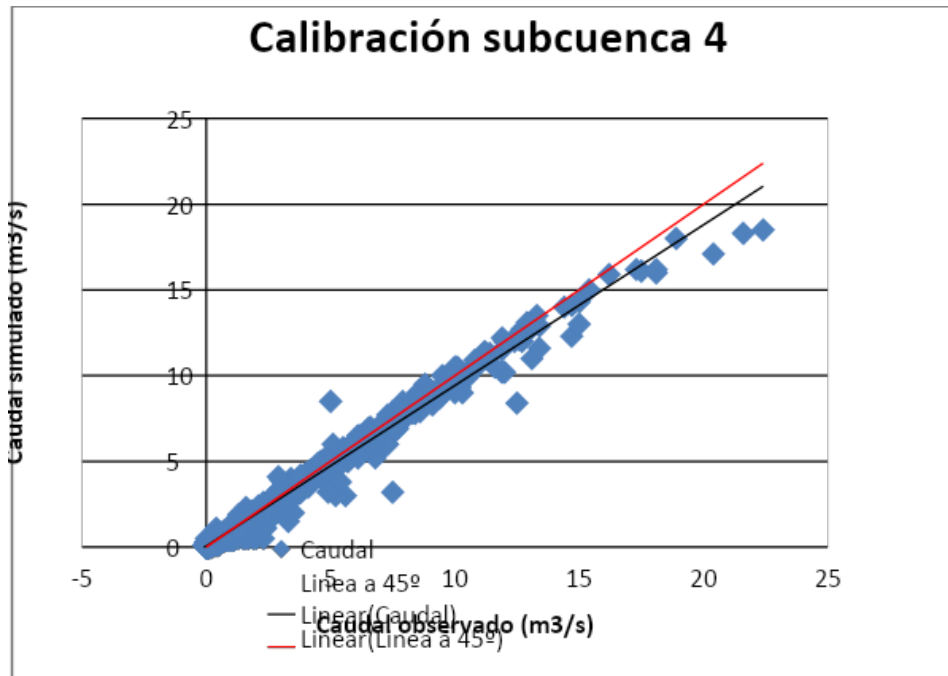


Figura nº 5.13 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº4 correspondiente a la etapa de Calibración de caudales simulados y caudales observados.

5.2.3.2 Indicadores de bondad de ajuste para validación

En la tabla 5.4 se detallan los indicadores de bondad de ajuste para un proceso de validación de parámetros de caudales.

Tabla 5.4 Indicadores de bondad de ajuste para validación

	Nash-Sutcliffe	Error volumétrico (%)	correlación
Subcuenca	Validación	Validación	Validación
1	0.91	-16.62	0.92
2	0.89	17.01	0.94
3	0.81	14.80	0.88
4	0.98	0.1	0.98

Desde la figura 5.14 a la figura 5.17 indican los gráficos de dispersión para la etapa de calibración de cada subcuenca, con su línea de tendencia de los datos, su línea de tendencia perfecta ($y=x$) y su coeficiente de correlación lineal. Con la lineal de tendencia lineal se obtiene un coeficiente de correlación de datos.

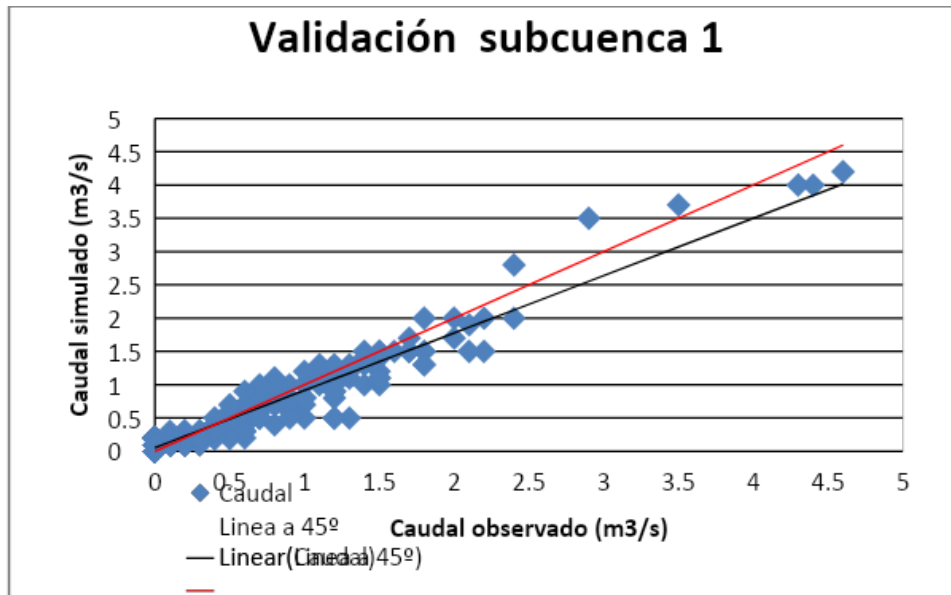


Figura nº 5.14 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº1 correspondiente a la etapa de Validación de caudales simulados y caudales observados.

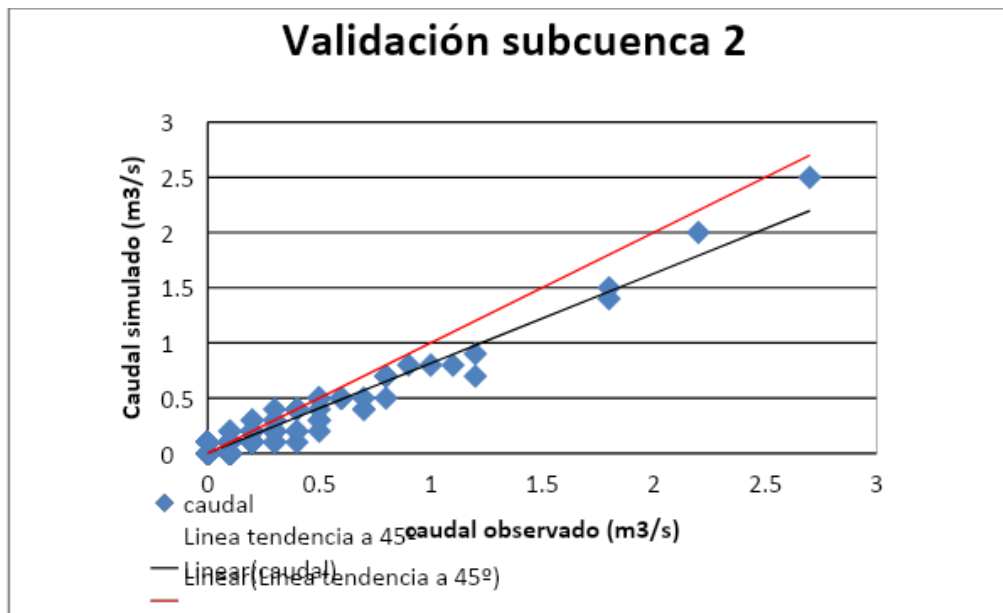


Figura nº 5.15 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº2 correspondiente a la etapa de Validación de caudales simulados y caudales observados.

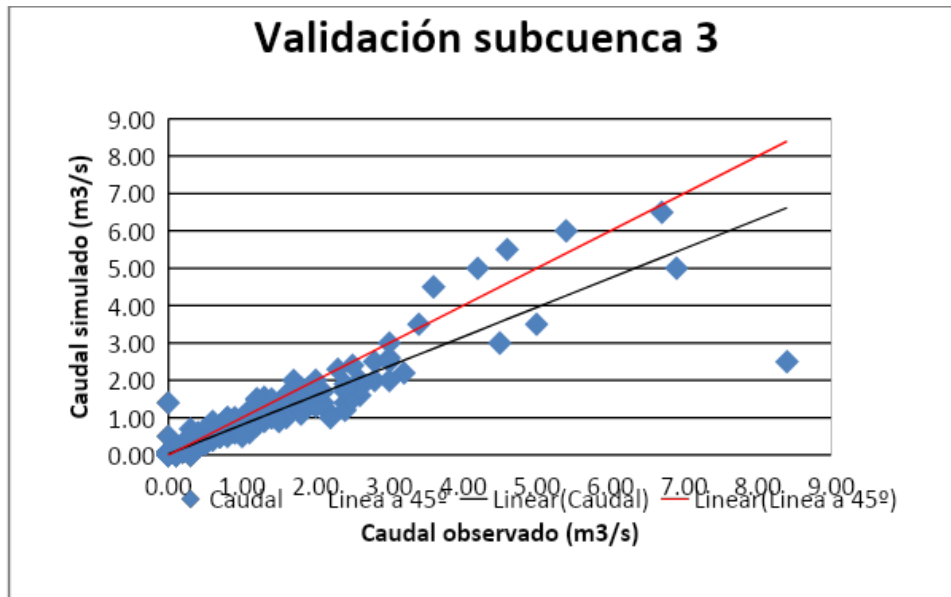


Figura nº 5.16 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº3 correspondiente a la etapa de Validación de caudales simulados y caudales observados.

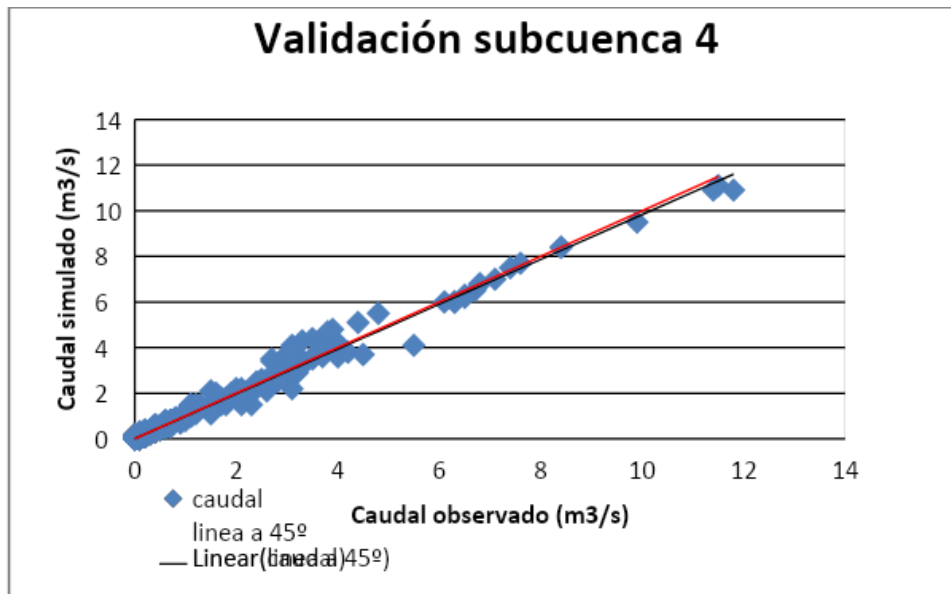


Figura nº 5.17 Gráfico de dispersión de la subcuenca nº4 correspondiente a la etapa de Validación de caudales simulados y caudales observados.

6. Análisis de resultados

En primer lugar se considera necesario destacar que la división de la zona de estudio en subcuencas es adecuada, ya que los parámetros considerados en la modelación difieren entre ellas, lo cual queda de manifiesto en las tablas 6.1 a 6.4, donde las variaciones más relevantes están asociadas a los parámetros infiltración, coeficiente de almacenamiento y percolación.

La discretización realizada entrega la posibilidad de obtener información fluviométrica en diferentes puntos de la zona de estudio y no solo en la salida de ésta, los cuales están asociados al área de drenaje de cada una de las subcuencas consideradas.

El tener la posibilidad de realizar una discretización del sistema es de gran utilidad para proceso de calibración del modelo, ya que permite una mejora en los resultados producto de una representación más adecuada de la zona, logrando considerar las variaciones geomorfológicas y de las características del suelo (tipos y usos), dada la gran extensión de la zona de estudio. Lo antes mencionado hace que los errores de la modelación se reduzcan, ya que existe un mayor número de puntos de control que aportan información al sistema disminuyendo el nivel de incertidumbre.

En el proceso de calibración se ajustaron los parámetros del método de pérdidas SMA para cada subcuenca. Las tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 indican los parámetros de ajuste del modelo hidrológico de cada subcuenca.

Tabla nº6.1 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca nº1

Subcuenca 1	
Parámetro	Valor
Infiltración(mm/Hr)	5
Impermeabilidad (%)	33
Almacenamiento del suelo(mm)	30
Tensión de almacenamiento(mm)	20
Percolación del suelo(mm/Hr)	3
Almacenamiento acuífero 1 (mm)	50
Percolación acuífero 1	0.5
Coefficiente de almacenamiento 1 (Hr)	100
Almacenamiento acuífero 2 (mm)	0
Percolación acuífero 2	0
Coefficiente de almacenamiento 2 (Hr)	0

Tabla n°6.2 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca n°2.

Subcuenca 2	
Parámetro	Valor
Infiltración(mm/Hr)	6
Impermeabilidad (%)	45
Almacenamiento del suelo(mm)	30
Tensión de almacenamiento(mm)	10
Percolación del suelo(mm/Hr)	2.5
Almacenamiento acuífero 1 (mm)	50
Percolación acuífero 1	0.88
Coefficiente de almacenamiento 1 (Hr)	70
Almacenamiento acuífero 2 (mm)	0
Percolación acuífero 2	0
Coefficiente de almacenamiento 2 (Hr)	0

Tabla n°6.3 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca n°3

Subcuenca 3	
Parámetro	Valor
Infiltración(mm/Hr)	10
Impermeabilidad (%)	11
Almacenamiento del suelo(mm)	25
Tensión de almacenamiento(mm)	15
Percolación del suelo(mm/Hr)	4
Almacenamiento acuífero 1 (mm)	20
Percolación acuífero 1	2
Coefficiente de almacenamiento 1 (Hr)	300
Almacenamiento acuífero 2 (mm)	0
Percolación acuífero 2	0
Coefficiente de almacenamiento 2 (Hr)	0

Tabla n°6.4 Parámetros de calibración del método SMA para la subcuenca n°4

Subcuenca 4	
Parámetro	Valor
Infiltración(mm/Hr)	14
Impermeabilidad (%)	9
Almacenamiento del suelo(mm)	150
Tensión de almacenamiento(mm)	99
Percolación del suelo(mm/Hr)	7
Almacenamiento acuífero 1 (mm)	20
Percolación acuífero 1	6.5
Coefficiente de almacenamiento 1 (Hr)	500
Almacenamiento acuífero 2 (mm)	0
Percolación acuífero 2	0
Coefficiente de almacenamiento 2 (Hr)	0

Viendo las gráficas de caudales simulados y registrados por la DGA (Ver capítulo 5) se observa un buen ajuste de los caudales históricos existente en la zona, pero existen otros criterios además de la inspección visual, como los criterios de bondad de ajuste para evaluar la precisión numérica de los resultados de la simulación. El período de validación utilizado para la verificación debería ser lo suficientemente extenso para incorporar varios eventos de lluvia, por lo que se utilizó 3 años. Entre los métodos más comunes de análisis estadísticos se tienen el Coeficiente de Nash-Sutcliffe, correlación lineal y error volumétrico, estos analizan la eficacia del modelo.

Se analiza cada indicador por subcuenca para la etapa de calibración y validación. A continuación se detalla el análisis de cada indicador:

□ Correlación(R^2)

Los resultados obtenidos para este indicador, tanto en el proceso de calibración como validación, se consideran óptimos, dado que son cercanos con un valor mínimo de todas las subcuencas de 0.88, tal como se aprecia en la tabla 6.5. A través del mismo análisis es posible verificar que en todas las subcuencas analizadas los caudales son subdimensionados en ambos procesos, tal como se observa en las figuras 5.10 a 5.17, donde el mayor error se produce durante el proceso de validación en la subcuenca 3 con un subdimensionamiento de alrededor del 20%, lo cual se considera aceptable.

Tabla n°6.5 Coeficientes de correlación lineal.

Subcuenca	Correlación	
	Calibración	Validación
1	0.91	0.92
2	0.90	0.94
3	0.89	0.88
4	0.98	0.98

□ Error volumétrico (%)

Para el análisis volumétrico del proceso de calibración y validación de datos, los valores de los volúmenes de cada hidrograma entregan resultados aceptables, pues los valores son muy similares entre Volumen real y Volumen simulado. En la tabla 6.6 serán detallados los valores de volúmenes simulados y observado para el proceso de calibración y validación.

Tabla n°6.6 Valores de volúmenes simulados y observados

Subcuenca	Calibración	Validación
	Error (%)	Error (%)
1	-12.89%	-16.62
2	-17.94%	17.01%
3	-5.09%	14.8%
4	2.26 %	0.1 %

Los valores negativos indican la subestimación y los valores positivos muestran una sobrestimación asociadas a los caudales. Si bien en el caso anterior (r^2) todos los valores en ambos procesos (calibración y validación) indican subestimación, al observar las figuras 5.13 a 5.17 se ve que existen algunos puntos asociados a caudales elevados que hacen que los volúmenes indiquen sobreestimación aunque la tendencia de la mayoría de los datos muestre lo contrario.

□ Eficiencia Nash-Sutcliffe

En la etapa de calibración y validación la eficiencia de Nash-Sutcliffe, una de las más utilizadas para la evaluar el comportamiento de una modelación hidráulica, indica que para una de las subcuencas analizadas los resultados son aceptables, ya que éste se acerca a uno. Los valores de Nash-Sutcliffe se ven reflejados en la tabla 6.7 para ambos procesos (calibración y validación).

Tabla n°6.7 Valores de eficiencia de Nash

Subcuencas	Nash-Sutcliffe	
	Calibración	Validación
1	0.91	0.91
2	0.87	0.89
3	0.86	0.81
4	0.98	0.98

Los resultados de este indicador son consistentes con los analizados anteriormente dejando de manifiesto que el modelo obtenido puede considerarse como representativo de la zona de estudio.

Los criterios de bondad de ajustes dan resultados óptimos, pero es necesario tener en cuenta que los caudales analizados son bajos, pues la escorrentía presente en la cuenca analizada es baja producto de la escasez hídrica de la región.

Para el ajuste del comportamiento del hidrograma, específicamente en la curva de descenso y agotamiento, se optó por utilizar un valor menor de impermeabilidad de hasta un 25% para poder obtener un mejor ajuste en el hidrograma.

7. Conclusiones y comentarios.

7.1 Comentarios

Los sistemas de información geográficas son una herramienta que facilitan la discretización de la zona de estudio, haciendo más expedita la obtención de los parámetros geomorfológicos de la cuenca analizada, así como también clasificación del suelo con respecto a su uso o tipo dependiendo siempre de la información disponible en la zona.

El modelo HEC HMS luego del proceso de calibración en un periodo de tiempo continuo a escala diaria, logra para la cuenca analizada un buen ajuste en función de la discretización adoptada según la información disponible en la región.

Al considerar estudios no chilenos para extraer características relevantes para un modelo hidrológico, se debe considerar a grandes rasgos el tipo de suelo similar al utilizado para poder ser utilizado en estudios chilenos y poder representar lo que realmente sucede en la zona.

7.2 Conclusiones

Cabe señalar que los valores de comparación (caudales simulados y caudales observados) se consideran aceptables, ya que al observar los gráficos de caudales, éstos dan valores que se encuentran cercanos a la realidad. Hay diferencias de caudales puntas en las diferentes subcuencas de hasta 5 m³/s, representando un error como máximo de hasta un 30% que es un valor aceptable.

La modelación no es exacta generando errores volumétrico de hasta +-18% y coeficiente de Nash Sutcliffe por sobre 0.8. Los errores en la modelación pueden atribuirse a que la medición de datos no haya sido correcta debido a diferentes factores, entre los cuales cabe destacar factores climatológicos que pudieron afectar el registro en las estaciones meteorológicas, provocando alteraciones en las medidas e incertidumbre en los datos de entrada.

Después de realizar todo el proceso y analizando los resultados obtenidos, se considera que la modelación realizada logra representar el comportamiento de la cuenca con buenos resultados y que el modelo se pueda considerar como una herramienta útil para la evaluación de recursos hídricos en la zona, entregando información en varios puntos al interior de la cuenca asociados al área de drenaje de cada una de las subcuencas utilizadas para la modelación.

Este trabajo de título puede utilizarse satisfactoriamente como herramienta en simulaciones continuas, con el fin de analizar la disponibilidad de recursos hídricos presentes en la zona.

8. Recomendaciones

Las indicaciones que se pueden dar para futuros estudios o utilidades del HEC – HMS, a partir de los aciertos o problemas presentados en el desarrollo de esta memoria son los siguientes:

- Se recomienda el uso integrado de sistemas de información geográficos (SIG) para realizar la división de la cuenca en sub-cuencas, así como el uso de mapas temáticos de vegetación, suelos, usos de suelo, etc. para la extracción de los parámetros que serán utilizados por el modelo.
- Se recomienda que los métodos de cálculo para cada uno de los pasos que realiza el modelo sean seleccionados de acuerdo al tipo de cuenca, afluente, suelo, etc.
- Se debe tener en cuenta también, la disponibilidad de información antes de seleccionar los métodos, ya que tal vez existe toda la información para trabajar con un método y no con otro.
- La división de la cuenca en sub-cuencas se debe realizar hasta una escala que los datos lo permitan, no es de gran ayuda realizar una división donde queden subcuencas sin información, esto puede incluso aumentar el error y la incertidumbre del modelo.
- Replicar el estudio en una nueva cuenca de la zona, previa verificación que ésta cuente con estudios de suelo y vegetación dentro de sus límites.
- Si bien lo ideal es contar con toda la cartografía para un proyecto, se considera de gran utilidad que ésta se encuentre en formato digital, ya que facilita de forma notable la serie de cálculos de longitudes y áreas que se deben realizar para obtener algunos parámetros que exige el programa HEC – HMS en su base de datos.

9. Referencias bibliográficas

- Amisial, R., Jegat h., 1976. Aprovechamiento y modelos de aguas subterráneas, Cidiat, Mérida Venezuela.
- Aparicio, M.J, 2008. Fundamentos de hidrología de superficie, México, Limusa
- Archivos digital pagina de la nasa (online) <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>
- Chow, V.T. (ed.) (1964) "Handbook of applied hydrology". Mc Graw-Hill.
- Ciclo del agua (online):<http://naturaleseso1.blogspot.com/2013/11/el-ciclo-del-agua-en-la-naturaleza.html>
- Córdova et al, 2013. Surhge Petorca "demanda hídrica de la cuenca de Petorca", universidad de Valparaíso y universidad de la serena.
- Cuerpo de ingenieros, 2000 "HEC-HMS, manual de referencia"
- Dga departamento de administración de recursos hídricos, 2002 informe de zonificación hidrogeológica para las regiones metropolitana y v.
- Dirección General de Aguas, página principal (online), snia.dga.cl/bnaconsultas/reportes
- Vélez, m., Vélez., j. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad nacional de Colombia, unidad de hidráulica.
- Dunne t. And L. Leopold, 1978. Water in environmental planning. Freeman 86. San Francisco, Usa.
- Feldman, a. 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation.html>.
- Gcf ingenierios limitada, 1996 "Análisis del uso actual y futuro de los recursos hídricos de chile, volumen ii, regiones v, metropolitana, vi y vii", DGA-IPLA.
- Gerrits, A.M.J; Pfister L and Savenije H.H.G., 2008.Uncertainties in canopy and forest floor interception. Geographical research abstracts, vol 10, Egu.
- Infraestructura de datos espaciales, ide servicio de mapas del ministerio del medio ambiente (online) ide.mma.gob.cl
- Jakeman, A. J., Chen, t. H. Post, D. A. Hornberger, g. M. Littlewood, i. G. And whitehead p. G. (1993)
- Jiménez Salas, J.A., de Justo Alpañes J.L., 1975. Geotecnia y cimientos I.propiedades de los suelos y de las rocas. Editorial rueda (p. 357-358)
- L. S. Nania, M. Gómez Valentín (2004) ingeniería hidrológica. Grupo editorial universitario. Granada
- Madsen, H. 2000 Automatic calibration of a conceptual rainfall – runoff model using multiple objectives. Journal of hydrology vol 235 pág. 276-288.
- Ortiz V., B y C.A. Ortiz s. 1988. Edafología. 7a edición. Universidad autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, and K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. pág 1316–1330.
- Salazar et al, 2013."Actualización informe evaluación de los recursos hídricos superficiales de las cuencas del río Petorca y el río la Ligua, región de Valparaíso", Dirección General de Aguas (DGA).
- Santander 2004 anejo 2: descripción y características del programa HEC-HMS, gobierno Cantabria.
- Seremi de Agricultura, 2013 "Situación hídrica actual de la región de Valparaíso" realizado por el.
- Skaggs, R.W., and R. Khaleel. 1982. Infiltration. pág. 121–166. In c.t. haan et al. (ed.) Hydrologic modeling of small watersheds. Asae monogr. 5. Asae, st. Joseph, mi.
- Todini, E. 1996. The arno rainfall-runoff model. Journal of hydrology, pág. 339-382.
- Vauchel, 2006 "Homogenización de los datos pluviométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo" Proyecto de gestión integrada y plan maestro de la cuenca del río Pilcomayo.