

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA USANDO SIG Y SOFTWARE GSSHA. ANÁLISIS EN UNA CUENCA PLUVIAL

Pedro Sanzana C.¹
Maximiliano Arriagada U.²
Ximena Vargas M.³

RESUMEN

Se presenta el modelo de simulación hidrológica distribuido GSSHA, que permite simular crecidas en cuencas de régimen pluvial. Se analizan las fuentes de información disponibles en el país según los requerimientos del modelo, destacándose la escasez de la información meteorológica a un nivel espacial que permita asegurar la validez de los resultados de caudal generados por el modelo. Para una cuenca ejemplo, Estero Puangue en Ruta 78, para las tormentas registradas en el año 2002, se lleva a cabo la calibración y validación del modelo considerando diferentes hipótesis sobre la distribución de la precipitación. Se concluye sobre la necesidad de contar con nuevos métodos de estimación de aquellos parámetros que provocan mayores variaciones en los resultados y se enfatiza que los esfuerzos deben dirigirse a definir cuencas piloto con redes de monitoreo adecuadas para la determinación de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

¹ Ingeniero Civil, Universidad de Chile, email: psanzana@ing.uchile.cl

² Ingeniero Civil, Universidad de Chile, email: marriagada@geo-aguas.cl

³ Ingeniero Civil, Profesor Asociado, Universidad de Chile, email: xvargas@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación hidrológica constituyen una poderosa herramienta de planificación y gestión de los recursos hídricos así como también un valioso aporte para el diseño de las obras hidráulicas que forman parte de los sistemas de aprovechamiento del recurso. El vertiginoso avance tecnológico e informático ha permitido desarrollar modelos de simulación hidrológica distribuidos, que permiten abordar el análisis de sistemas complejos altamente no lineales en cada vez menos tiempo. Sin embargo, estos modelos se caracterizan por requerir una gran cantidad de información de entrada, entre los que cabe destacar coberturas de suelo (uso y tipo), distribución de la vegetación, tipo de vegetación, hidrogeología, topografía de la cuenca y registros de precipitación distribuida espacial y temporalmente.

Los modelos distribuidos son implementados en esquemas de celdas o grillas, con expresiones matemáticas analíticas que existen entre cada celda y no promedian parámetros para representar las características de la cuenca. Las ecuaciones que gobiernan el flujo se plantean con mayor o menor grado de simplificación utilizándose tanto las ecuaciones completas como ondas difusivas y cinemáticas, lo que debe tenerse en consideración al momento de usar el modelo en algún lugar específico. Por ejemplo, se debe tener en cuenta que la onda cinemática es recomendable para ser aplicada en áreas donde la pendiente de la superficie del terreno es dominante y donde los efectos del remanso no son importantes.

El modelo hidrológico distribuido utilizado en este artículo, corresponde al modelo GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) desarrollado por la USACE ERDC (US Army Corps of Engineers Engineering Research and Development Center) a partir del modelo CASCA2D. Éste último corresponde a un modelo distribuido originado como un algoritmo para el análisis del flujo superficial en 2D; dicho algoritmo fue modificado por Saghafian (1993), quien adicionó el método de Green & Ampt para la infiltración y el método de la onda difusiva para el flujo en canales. Posteriormente, el modelo fue reformulado y enriquecido significativamente y escrito en lenguaje de programación C, por Saghafian en el U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory (CERL) (Downer y Odgen, 2003).

La versión utilizada del modelo, conocido como GSSHA 2.1, que corresponde a la modificada en el año 2004, incluye una interfaz con el programa computacional WMS. Esta versión se distingue por la adición de nuevas capacidades, nuevas mejoras y de numerosos arreglos a las anteriores versiones del programa.

El análisis que se presenta incorpora las fuentes de información disponibles para la aplicación de este tipo de modelos en el país. Se incluyen tanto los Sistemas de Información Geográficos (SIG) como la disponibilidad de información hidrológica.

El análisis que se presenta en este artículo tiene como objetivo investigar la aplicación de este tipo de modelos en el país. Se muestran algunas hipótesis necesarias de considerar para la modelación y se incluye un análisis de la sensibilidad de los resultados de la modelación hidráulica en el rango de propiedades de uso y tipo de suelos frente a variaciones de distribuciones espaciales y temporales de la precipitación.

2. MODELO GSSHA

GSSHA es un modelo hidrológico con base física, de parámetros distribuidos, estructurado en una grilla, que simula los procesos hidrológicos de una cuenca sujeta a entradas de parámetros hidrometeorológicos. Los procesos simulados y los métodos utilizados se presentan en la Tabla 1. La cuenca está caracterizada por celdas que componen una red uniforme de diferencias finitas, de modo que los procesos que ocurren antes, durante y después de los eventos de precipitación se calculan para cada celda de la grilla y los resultados de cada celda individual se integran para generar la respuesta final de la cuenca. Los componentes principales del modelo incluyen la precipitación, la acumulación de nieve, el derretimiento, la intercepción de la precipitación, infiltración, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, definición de redes de drenaje, modelación de flujo en las zonas saturada y no saturada, erosión de sedimentos, transporte y depositación de sedimentos entre otros.

Tabla 1: Procesos simulados por el modelo GSSHA

| Procesos | Aproximación | Procesos | Aproximación |
|----------------------------------|---|--|--|
| Distribución de la precipitación | Polígonos de Thiessen Inversos de la distancia al cuadrado | Lagos | Nivel de la superficie |
| Acumulación de Nieve y Deshielo | Balance de Energía | Humedales | Darcy y Manning |
| Intercepción de la precipitación | Empírica de dos parámetros con variación estacional | Evapotranspiración | Deardorff, Penman-Monteith |
| Retención del agua por el suelo | Profundidad específica | Humedad del suelo en la zona de Vadose | Modelo de dos capas Ecuación de Richards |
| Infiltración | Green & Ampt Green & Ampt multicapas Green & Ampt con redistribución Ecuación de Richards | Flujo subterráneo lateral | Promedio vertical en 2-D |
| Flujo superficial (2-D) | Onda difusiva (2-D) Explícita Alternado de dirección explícita (ADE) ADE predictor corrector | Interacción río-acuífero | Ley de Darcy |
| Flujo superficial (1-D) | Onda difusiva (1-D) | Exfiltración | Ley de Darcy |

Durante un evento, la precipitación, que se distribuye espacial y temporalmente sobre la cuenca, puede ser interceptada por la vegetación antes de llegar al suelo. Una vez que la intercepción llega a su capacidad máxima el resto de la precipitación llega al suelo, donde ésta puede infiltrarse debido a la gravedad y a las fuerzas capilares de los intersticios del suelo, mientras que

el agua que no es interceptada ni se infiltra genera escorrentía superficial en dos dimensiones (2-D). Esta agua que escurre en la superficie finalmente llega a las redes de drenaje, las que la conducen al punto de salida de la cuenca; este flujo canalizado se modela unidimensionalmente (1-D). Entre eventos de precipitación se observan variaciones de la humedad del suelo, evaporación y evapotranspiración, además de flujo subterráneo. Cuando la precipitación cae en forma de nieve, el volumen de agua equivalente que queda en la superficie varía de acuerdo al balance de energía.

El transporte de sedimentos es generado por efecto de los impactos producidos por la lluvia sobre el suelo y los esfuerzos cortantes debido a la escorrentía superficial. Los sedimentos son transportados junto con el agua que genera la escorrentía superficial en dos dimensiones. La erosión y la depositación se producen continuamente en la superficie del suelo.

3. FUENTES DE INFORMACIÓN SIG

Las fuentes de información SIG de Chile se puede obtener de forma muy variada, tanto en instituciones públicas como privadas, recopilaciones de organismos nacionales o internacionales. Las instituciones públicas han desarrollado un rol fundamental en este tema con respecto al manejo de su información para la generación de base de datos SIG con el fin de tener mayor conocimiento y optimizar el manejo de los recursos naturales.

Entre las instituciones que agrupan y generan información se encuentran la Dirección General de Aguas (DGA) con el Sistema de Información Integral de Riego (SIIR), la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y, además, las universidades y consultores.

La DGA ha trabajado en el diseño de un Sistema de Información para la Gestión Integrada de la Información de Recursos Hídricos (SIGIRH), dicho proyecto busca integrar la información gráfica y alfanumérica de los Módulos BNA y CPA. Por otro lado actualmente existe el Sistema de Información Integral de Riego (SIIR⁴) que depende directamente de la Comisión Nacional de Riego, dicho sistema corresponde a un SIG implementado en plataforma ArcView 3.2 con una cobertura a nivel de todo el país y con una cartografía base a escala 1:50.000. También existen recopilaciones de gran utilidad para el investigador como el catastro de CONAF⁵ mediante el cual se cuantificó, dimensionó y categorizó los diferentes usos del suelo en el territorio nacional. Por último, el Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile (SINIA) posee fotos aéreas ortoreferenciadas que pueden ser descargadas en escala 1:115000⁶ mientras la información topográfica se puede obtener de cartas digitales generadas por el IGM⁷ que van desde escalas 1:500.000 hasta 1:25.000.

⁴ Se puede visitar en <http://esiir.cnr.cl/esiir/>.

⁵ Disponible en www.conaf.cl en formato .pdf y puede ser solicitado en formato SIG particular directamente en la institución.

⁶ Disponibles en www.sinia.cl

⁷ Dichos mapas pueden ser consultados en el sitio oficial del IGM www.igm.cl.

A nivel internacional existen variadas fuentes que entregan Modelos de Elevación Digital (MED) o Satélites que publican las imágenes disponibles en Internet. Una de las principales fuentes de información para obtener los MED corresponde al Servicio Nacional de Mapas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS⁸) desde donde se pueden descargar modelos de elevación con resolución de 30 m para Norteamérica y de 90 m para América del Sur.

Otra fuente de información, que ha sido de gran utilidad en la gestión espacial de recursos naturales corresponde a imágenes satelitales, con las que se puede estimar desde la cobertura vegetal hasta una aproximación de la Línea de Nieve, mediante el uso de software como ENVI, ERDAS, IDRISI o GRASS entre otros. Entre las principales fuentes donde es posible obtener información satelital se encuentran la Universidad de Maryland⁹, el Satélite Brasileño¹⁰ y Modis¹¹.

4. FUENTES DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

En Chile existen actualmente por lo menos tres instituciones que operan en forma parcial la red hidrometeorológica nacional: Dirección Meteorológica de Chile (DMC); Dirección General de Aguas (DGA) y Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Cada una de ellas con sus propios objetivos en cuanto a la mantención de las estaciones.

De acuerdo a lo señalado en el estudio “Análisis de la red hidrometeorológica Nacional”, BF Ingenieros Civiles (1985), la red hidrometeorológica corresponde a un sistema organizado de estaciones meteorológicas, interrelacionadas espacial y temporalmente, que están destinadas a recolectar conjuntos de datos para que, junto a la información que entregada por la red fluviométrica, puedan satisfacer los distintos requerimientos de información que plantean los diferentes sectores del país.

La red hidrometeorológica debe medir precipitación, líquida y sólida, evaporación, temperatura, variables climatológicas, entre otras, de la forma más representativa, y poder apoyar los distintos estudios para la gestión de recursos hídricos. La información de la red hidrometeorológica es recolectada ya sea por técnicos u observadores de las instituciones encargadas o bien mediante sistemas automáticos que utilizan plataformas satelitales para el envío de la información. Los antecedentes recopilados, en general, no están accesibles fácilmente y su adquisición tiene, muchas veces, un costo asociado que encarece las investigaciones o estudios que se realizan.

Una fuente adicional de información, utilizada para representar la distribución espacial y temporal de variables meteorológicas, corresponde a los pronósticos de modelos meteorológicos tales como el MM5 (Mesoscale Model of the 5th generation, National Center for Atmospheric Research, USA), implementado en Chile por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que se pueden extraer mediante rutinas de MATLAB.

⁸ Disponible para descargar en <http://seamless.usgs.gov/>

⁹ Software y manuales disponibles en <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>

¹⁰ Disponible en <http://www.cbers.inpe.br/>

¹¹ Disponible en <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>

5. APLICACIÓN DEL MODELO GSSHA EN LA CUENCA PUANGUE EN RUTA 78

El área de estudio se ubica en las Regiones Metropolitana (RM) y Valparaíso (V), corresponde a la denominada Cuenca Estero Puangue, que forma parte de la Cuenca del Maipo. Esta zona corresponde a una cuenca altamente intervenida en sus usos de agua debido a la actividad agrícola. El estero Puangue riega aproximadamente una superficie de 36.570 Há, todas ubicadas entre las comunas de Curacaví, María Pinto y Melipilla. En la Figura 1 se muestra una visión general de la ubicación de la cuenca en la zona centro de Chile, en la Figura 2 se muestra la Curva de Variación Estacional, en la que se observa el régimen pluvial de la Cuenca Estero Puangue en Ruta 78.

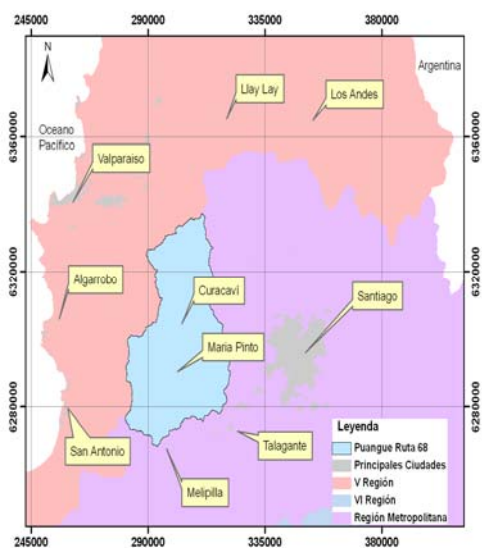


Figura 1 Ubicación General

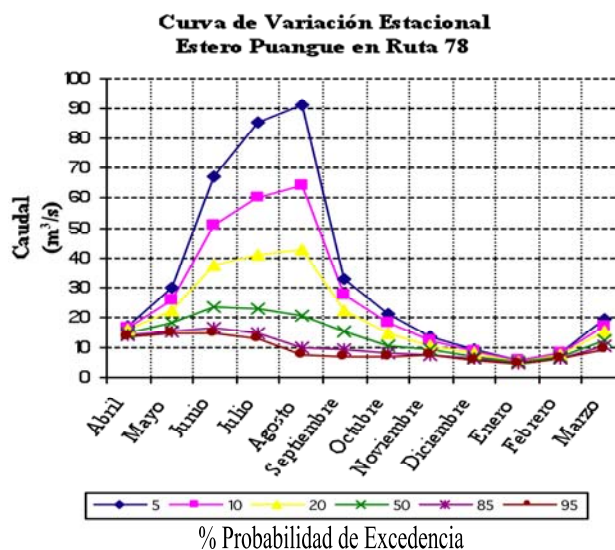


Figura 2 Curva de Variación Estacional. Fuente: CADE-IDEPE, 2004]

La información pluviométrica a nivel horario en la zona es escasa, existen dos estaciones con pluviógrafos pero ninguna de éstas se encuentra disponible en las base de datos de la DGA desde el año 2000 a la fecha, sólo se encuentra en las bodegas de la DGA en forma impresa de papel, por lo que se procedió a transcribir la información para el año 2001 y 2002 entre los meses de Abril y Agosto. Las estaciones pluviométricas y pluviográficas disponibles se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas

| Estación | Código BNA | Tipo Registro | Altura msnm | Norte m | Este m |
|---------------|------------|-----------------------------|----------------|------------|-----------|
| Melipilla | 05740005-6 | Pluviométrico/Pluviográfico | 187 | 294549 | 6268843 |
| Los Panguiles | 05744002-3 | Pluviométrico/Pluviográfico | 315 | 312514 | 6298796 |
| Ib. Alto | 05744003-1 | Pluviométrico | 253 | 284659 | 6296366 |
| Tapihue | 05520002-5 | Pluviométrico | 327 | 287353 | 6314919 |
| Colliguay | 05741002-7 | Pluviométrico | 527 | 299506 | 6328121 |
| Q. Alvarado | 05427008-9 | Pluviométrico | 284 | 303911 | 6341153 |

Estación Melipilla: Esta estación presenta buena calidad en sus registros, sin embargo presenta errores de continuidad en sus datos, lo que significa que se pudieron extraer 5 tormentas para el período 2001 y 2002 entre los meses de Abril y Agosto. Para las tormentas registradas se procedió a comparar lo registrado a nivel horario por el pluviógrafo con lo registrado por el pluviómetro de la estación y para las cinco tormentas registradas se estimó una correcta lectura.

Estación Panguiles: Debido a los errores de taponeo en el sifón no fue posible contar con una estadística de precipitación horaria confiable, por lo que sólo se considera confiable la estadística de precipitación a nivel diaria obtenida del pluviómetro.

Con respecto a la información horaria de caudales se recopiló los registros de dos estaciones que existen en la cuenca, las que se presentan en la Tabla 2 .

Tabla 2: Estaciones Fluviométricas

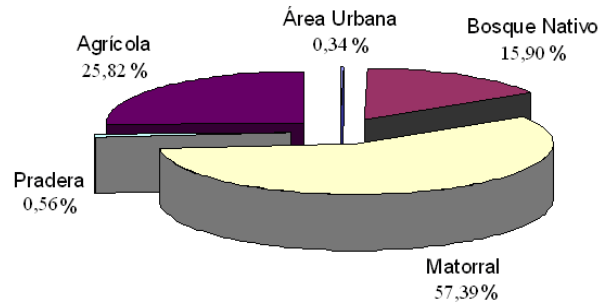
| Estación | Código BNA | Tipo Registro | Altura m.s.n.m. | Norte m | Este m |
|---------------------|------------|---------------|--------------------|------------|-----------|
| Puangué en Boquerón | 05741001-9 | Fluviométrico | 488 | 6328121 | 301321 |
| Puangué en Ruta 78 | 05746001-6 | Fluviométrico | 100 | 6273184 | 283551 |

La estación Puangué en Boquerón presenta mayor problema en sus registros ya que permite el paso del agua fuera de la zona controlada por la estación. La estación que se encuentra aguas abajo, Puangué Ruta 78, presenta mejor calidad de su información ya que se encuentra en mejor estado de mantención.

La información para la creación de los archivos SIG de entrada para el modelo hidrogeológico distribuido debe permitir inferir parámetros con respecto a la cobertura, rugosidad, y con respecto a la infiltración. En la Tabla 3 se muestran los parámetros asociados a cada SIG. La fuente principal de información que se utilizó para la generación de los archivos Shape de uso de suelo corresponde al levantamiento de la información cartográfica de Uso del Suelo en la Región Metropolitana que desarrolló la CONAF en 1997. El monitoreo de cambios en el Uso del Suelo y la Vegetación se realizó mediante la utilización de los siguientes materiales: fotografías aéreas digitales color ortorectificadas (2000), (escala original 1:115.000), cobertura vectorial del Catastro de años anteriores y fotografías aéreas pancromáticas del año 2005 (escala 1:20.000 y 1:30.000). La información proporcionada por la CONAF se complementó con fotografías aéreas del sitio web SINIA, para poder delimitar de manera más precisa los límites urbanos existentes en la cuenca, así como para verificar curso y ubicación de cauces. En la Figura 3 se muestra los usos observados de suelo expresados en porcentajes.

Tabla 3: Parámetros asociados a cada SIG

| Parámetros | Relacionado con: | SIG |
|---|-------------------------|---------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Rugosidad, n_{Manning} | Cobertura Superficial | Uso de Suelo |
| <ul style="list-style-type: none"> • Conductividad hidráulica (K_h) • Carga de succión (Ψ) • Porosidad efectiva (θ_i) • Humedad inicial del suelo (H_i) | Depósitos, Infiltración | Tipo de Suelo |



[Fuente: CONAF, 1997 modificado]

Figura 3: Porcentaje del uso de suelo en la cuenca Estero Puangue.

En la Figura 4 se muestra el resultado obtenido en ArcGIS para ser ingresado al modelo GSSHA en formato Shape (.shp) en modelo vectorial, todas las zonas son representadas como polígonos. Al analizar la información de tipo y uso de suelo se identifican los principales parámetros para una modelación distribuida. Se eligen los parámetros y sus rangos según valores recomendados por diferentes autores (Downer, 2002 y Vieux, 2001).

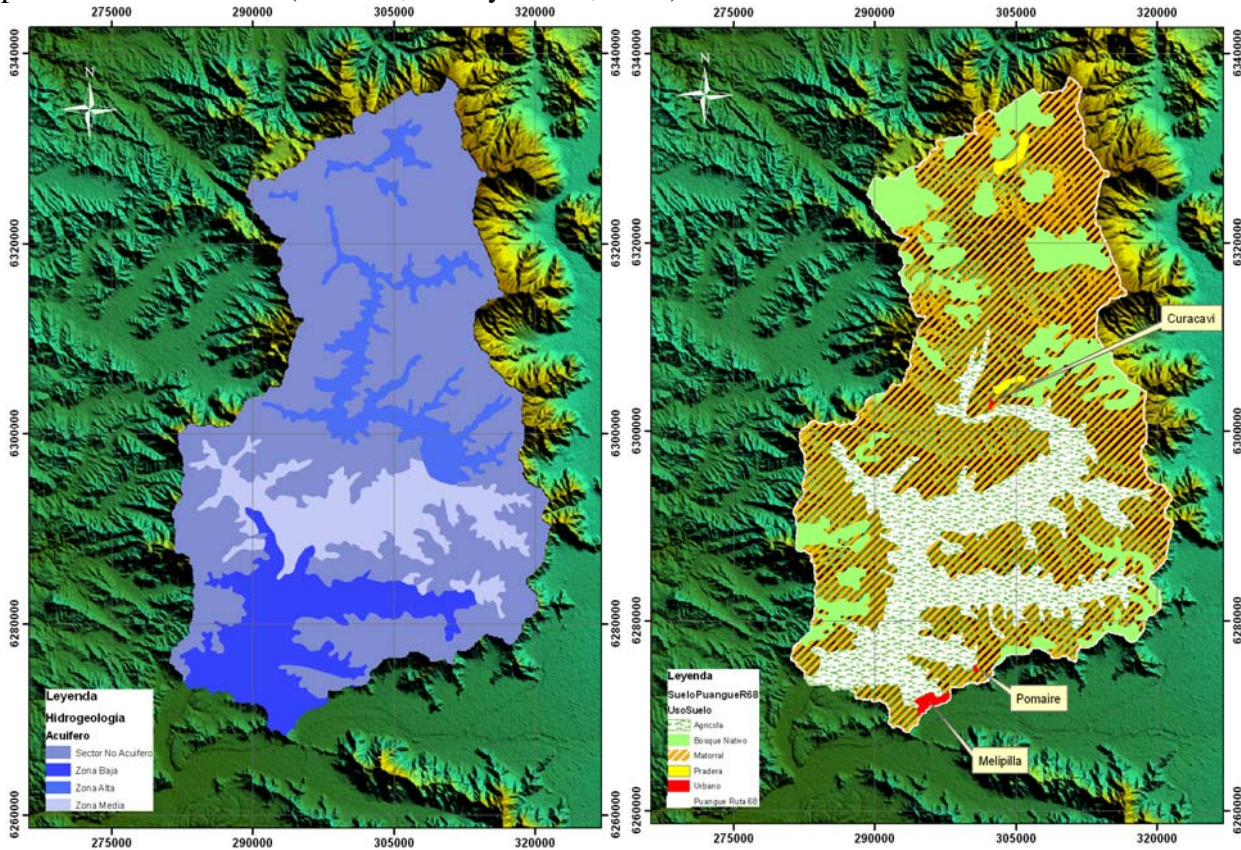


Figura 4: Tipo y Uso de suelo de Puangue en Ruta 78.

En la Tabla 4 se muestra la lista completa con los parámetros, los nombres de la zona a la que corresponden y el SIG al que están asociados. En la Figura 5 se muestra el modelo hidrológico de grilla, GSSHA, de la Cuenca Estero Puangue en Ruta 78.

Tabla 4: Parámetros considerados en el modelo

| N° | Parámetro | Nombre | SIG asociado |
|----|------------|-------------------------------------|---------------|
| 1 | n_1 | Rugosidad Matorral | Uso de Suelo |
| 2 | n_2 | Rugosidad Agrícola | |
| 3 | n_3 | Rugosidad Bosque Nativo | |
| 4 | n_4 | Rugosidad Área Urbana | |
| 5 | n_5 | Rugosidad Pradera | |
| 6 | K_1 | Conductividad Sector No Acuífero | Tipo de Suelo |
| 7 | K_2 | Conductividad Zona Puangue Bajo | |
| 8 | K_3 | Conductividad Zona Puangue Alto | |
| 9 | K_4 | Conductividad Zona Puangue Medio | |
| 10 | Ψ_1 | Carga de Succión Sector No Acuífero | |
| 11 | Ψ_2 | Carga de Succión Zona Puangue Bajo | |
| 12 | Ψ_3 | Carga de Succión Zona Puangue Alto | |
| 13 | Ψ_4 | Carga de Succión Zona Puangue Medio | |
| 14 | θ_1 | Porosidad Sector No Acuífero | |
| 15 | θ_2 | Porosidad Zona Puangue Bajo | |
| 16 | θ_3 | Porosidad Zona Puangue Alto | |
| 17 | θ_4 | Porosidad Zona Puangue Medio | |
| 18 | H_1 | Humedad Inicial Sector No Acuífero | |
| 19 | H_2 | Humedad Inicial Zona Puangue Bajo | |
| 20 | H_3 | Humedad Inicial Zona Puangue Alto | |
| 21 | H_4 | Humedad Inicial Zona Puangue Medio | |

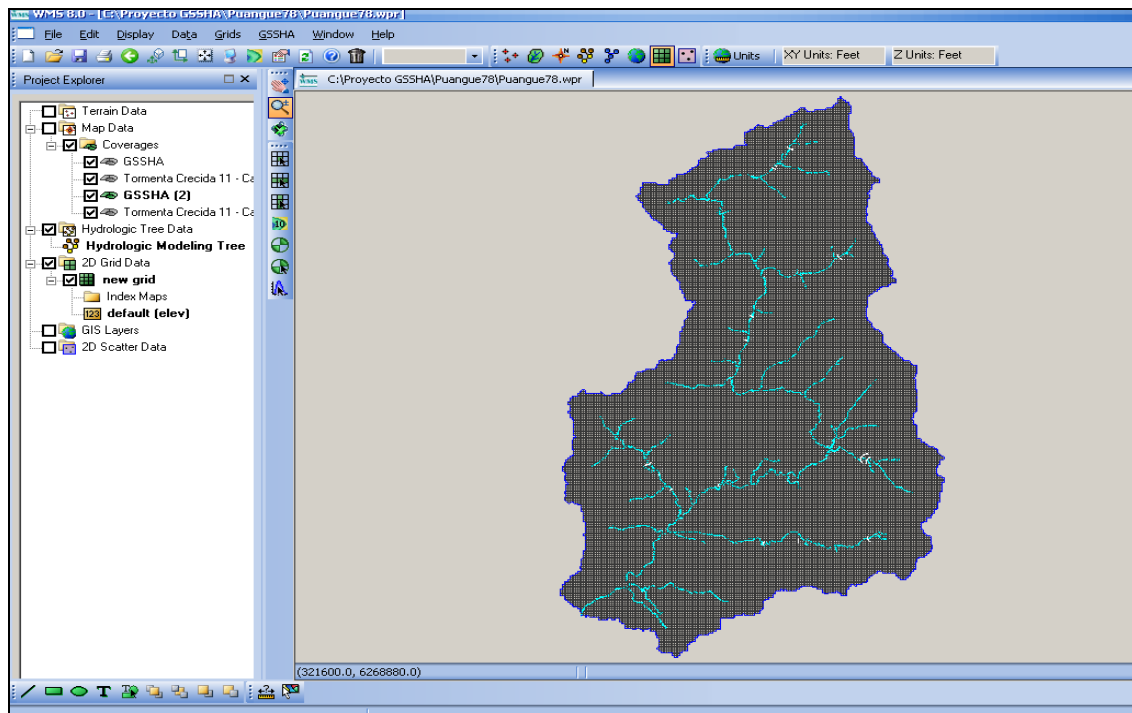


Figura 5. Modelo Hidrológico Distribuido GSSHA de la Cuenca Estero Puangue en Ruta 78

Las fuentes de información (CONAF-CONAMA; USGS; DGF, UCH) poseen un rango variable del tamaño de grilla entre 90 m hasta 15.000 m, por lo que la seleccionada debiera estar entre estos dos rangos, ya que colocar un modelo con una grilla menor a 90 no aporta mayor calidad en los resultados si la información de variación espacial de los parámetros no es tan precisa. Un punto importante de tener en cuenta en el ingreso de información es el suavizar la topografía dado posibles efectos de falsas acumulaciones o zonas de almacenamiento (Digital Dams) que resultan como consecuencia de las interpolaciones en las curvas de nivel y en la altura promedio que se le asigna a cada celda. También en el cauce, esto debe ser corregido, ya que por efecto de las interpolaciones al elegir una discretización del cauce de 200 m (debe ser similar al espaciamiento de la grilla) se pueden generar pendientes adversas en zonas donde esto no existe.

El método de rastreo de flujo superficial corresponde a una solución explícita de la aproximación de la onda difusiva, este método genera alta estabilidad en el modelo y puede ser utilizada para flujos críticos, subcríticos y supercríticos (Downer et al, 2002). El método de infiltración que se utiliza corresponde a Green&Ampt; dentro de las opciones también se encuentra la de Green&Ampt con redistribución de humedad, sin embargo éste se recomienda utilizarlo cuando se desea modelar episodios consecutivos de tormentas, del orden de varios días. Como resultado de un análisis de sensibilidad se observa como los parámetros asociados a la rugosidad del suelo son los que mayor incertidumbre generan en la modelación de la escorrentía. Los parámetros asociados a la infiltración generan menos variación en el hidrograma de escorrentía, siendo la conductividad el segundo parámetro con mayor incertidumbre asociada y por último la porosidad del suelo.

Calibración del Modelo

La estación pluviográfica de la que se obtuvieron los registros corresponde a la Estación Melipilla, ya que la Estación Panguiles presenta escaso registros para el año 2002. En la Tabla 5 se presenta un resumen con la fecha de inicio y término de las tormentas, la precipitación registrada por la estación y comentarios sobre la calidad de los registros. Las tormentas 1, 7 y 8, corresponden a tormentas de la temporada de inicio y término del período Abril /Agosto 2002, en los que se procedió a calibrar los distintos parámetros del modelo mientras las tormentas 3 y 5, corresponden a tormentas de la mitad del periodo Abril/Agosto 2002 usadas para verificar el comportamiento de la modelación.

Tabla 5: Selección preliminar de Tormentas para el proceso de calibración

| Tormenta | Fecha Inicio | Fecha Termino | PpTotal (mm) | Comentario |
|----------|----------------|----------------|--------------|---|
| 1 | 14-05-02 14:00 | 15-05-02 19:00 | 42,6 | Buena calidad en el registro. |
| 2 | 25-05-02 9:00 | 26-05-02 16:00 | - | Deficiencia por errores en el registro. |
| 3 | 31-05-02 17:00 | 01-06-02 2:00 | 32,6 | Buena calidad en el registro. |
| 4 | 02-06-02 21:00 | 05-06-02 6:00 | - | Deficiencia por errores en el registro. |
| 5 | 22-07-02 11:00 | 23-07-02 18:00 | 57,9 | Buena calidad en el registro. |
| 6 | 30-07-02 2:00 | 30-07-02 10:00 | - | Deficiencia por errores en el registro. |
| 7 | 07-08-02 3:00 | 07-08-02 22:00 | 38,2 | Buena calidad en el registro. |
| 8 | 23-08-02 13:00 | 24-08-02 20:00 | 23,9 | Buena calidad en el registro. |

Para estimar la precipitación media horaria en la cuenca, se consideró que la distribución temporal diaria observada en la estación de Melipilla era representativa de toda la cuenca.

Uno de los indicadores de ajuste de la calibración de los parámetros corresponde al coeficiente de Nash y Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), que corresponde a minimizar la varianza del error. También se revisó el porcentaje de sobreestimación o subestimación de las variables Volumen de escorrentía, Caudal máximo y Tiempo al peak.

En la Figura 6 se presentan los resultados de calibración para las Tormentas 1, 7 y 8, según los indicadores mencionados anteriormente. En la Tabla 6 se resumen los valores de los parámetros para dichas calibraciones, apreciándose que sólo algunos son coincidentes (celdas sombreadas) por lo que se hace necesario utilizar algún criterio para seleccionar los parámetros definitivos. El análisis realizado mostró que resultaba más conveniente promediar los valores de los parámetros que utilizar alguno de los conjuntos determinados para una tormenta específica.

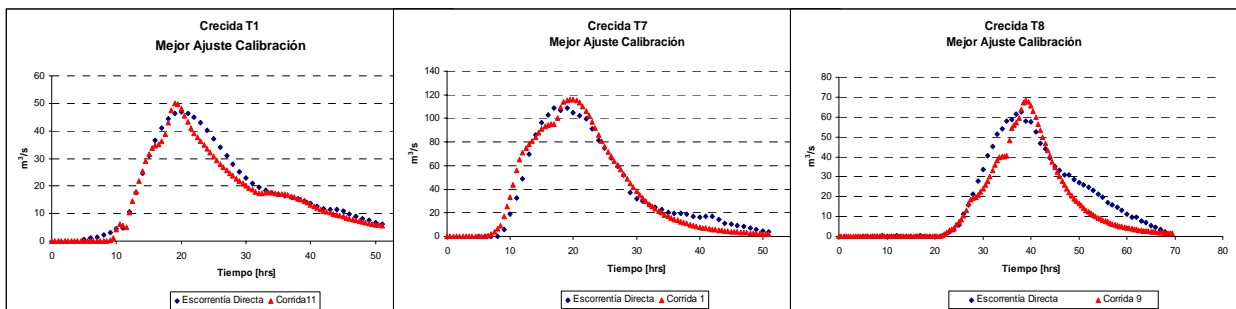


Figura 6: Resultados Calibración Tormentas 1 (NS= 0,970), 7 (NS=0,955) y 8 (NS=0,915)

Tabla 6: Resumen de los parámetros calibrados

| Parámetro | Unidades | Sector | T1 | T7 | T8 | Valor Adoptado |
|------------|----------|---------------|------|------|------|----------------|
| n_1 | - | Matorral | 0,45 | 0,25 | 0,35 | 0,35 |
| n_2 | - | Agrícola | 0,20 | 0,10 | 0,35 | 0,22 |
| n_3 | - | Bosque Nativo | 0,45 | 0,35 | 0,35 | 0,38 |
| n_4 | - | Urbano | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| n_5 | - | Pradera | 0,35 | 0,45 | 0,45 | 0,42 |
| K_1 | mm/hr | No Acuf | 0,14 | 0,09 | 0,10 | 0,11 |
| K_2 | mm/hr | Ac. Bajo | 0,50 | 0,08 | 0,05 | 0,21 |
| K_3 | mm/hr | Ac. Alto | 0,25 | 0,30 | 0,40 | 0,32 |
| K_4 | mm/hr | Ac. Medio | 0,03 | 0,35 | 0,40 | 0,26 |
| Ψ_1 | cm | No Acuf | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Ψ_2 | cm | Ac. Bajo | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Ψ_3 | cm | Ac. Alto | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Ψ_4 | cm | Ac. Medio | 10 | 10 | 10 | 10 |
| θ_1 | % | No Acuf | 0,75 | 0,45 | 0,45 | 0,55 |
| θ_2 | % | Ac. Bajo | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| θ_3 | % | Ac. Alto | 0,65 | 0,45 | 0,45 | 0,52 |

Tabla 6: Resumen de los parámetros calibrados

| Parámetro | Unidades | Sector | T1 | T7 | T8 | Valor Adoptado |
|------------|----------|-----------|------|------|------|----------------|
| θ_4 | % | Ac. Medio | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| H_{i2} | % | No Acuf | 0,10 | 0,30 | 0,45 | 0,28 |
| H_{i3} | % | Ac. Bajo | 0,42 | 0,45 | 0,45 | 0,44 |
| H_{i4} | % | Ac. Alto | 0,05 | 0,25 | 0,25 | 0,18 |
| H_{i5} | % | Ac. Medio | 0,45 | 0,45 | 0,43 | 0,44 |

Verificación del modelo

Debido a los fuertes supuestos que se realizan con respecto a la distribución de la precipitación en la zona, resulta débil un modelo distribuido calibrado solo con tres escenarios, por lo que se procedió a realizar la validación con las tormentas 3 y 5. Se utilizó como base el modelo ya calibrado y se evaluó con tres distribuciones de precipitación disponible para las tormentas: la distribución observada, la distribución pronosticada por el MM5 y la distribución corregida del MM5. En Figura 7 se muestran las tres tipos de distribución de precipitación para realizar la validación de las tormentas 3 y 5. Tal como se aprecia en esta figura, las distribuciones de precipitación poseen marcadas diferencias, por lo que para evaluar la calibración se tomó en cuenta la correspondiente a la distribución observada, dejando las restantes para evaluar la capacidad predictiva del modelo considerando como entrada los antecedentes proporcionados por un modelo de pronóstico como MM5.

Los hidrogramas observados y modelados que resultan del ingreso de la precipitación observada, pronosticada y corregida del MM5, se presentan en la Figura 8, mientras que la Tabla 7 contiene los valores de los distintos índices que permiten comparar el error del modelo asociado a la generación de volumen de escorrentía y caudal máximo. Se aprecia que en una de las tormentas, T3, la corrección de la precipitación del modelo MM5 entrega un valor de caudal máximo más cercano al observado mientras que en la tormenta T5 esto ocurre para el valor sin corregir.

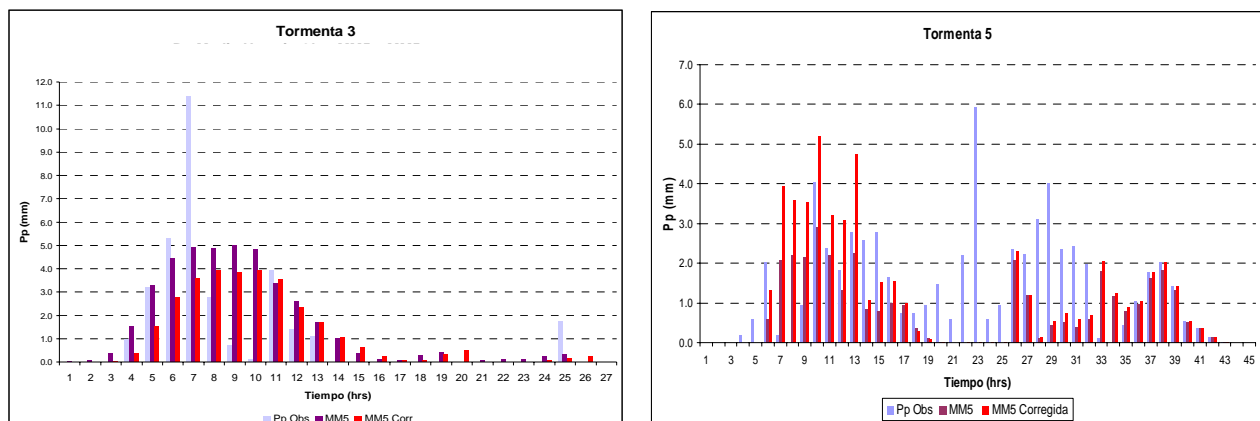


Figura 7: Distribuciones de precipitación disponibles

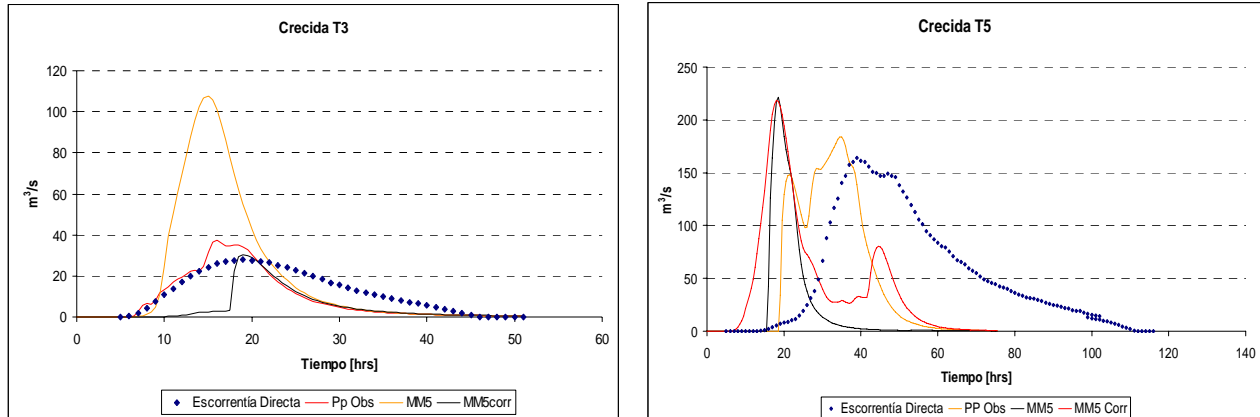


Figura 8: Hidrogramas de Validación y Predicción

Tabla 7: Comparación entre volúmenes de escorrentía y caudales máximos observados y simulados

| Tormenta 3 | Volumen m^3 | | Q_{max} m^3/s | | Δ Volumen | ΔQ_{max} |
|--------------------------|------------------|-----------|----------------------|-----------|------------------|------------------|
| | GSSHA | Observado | GSSHA | Observado | | |
| PpObs | 1 777 966 | | 37,25 | | -21% | 34% |
| MM5 | 3790485 | 2244487 | 107,89 | 27,89 | 69% | 287% |
| MM5 _{corregido} | 1008159 | | 30,47 | | -55% | 9% |
| Tormenta 5 | Volumen m^3 | | Q_{max} m^3/s | | Δ Volumen | ΔQ_{max} |
| | GSSHA | Observado | GSSHA | Observado | | |
| PpObs | 12472512 | | 218,55 | | -31% | 33% |
| MM5 | 13501260 | 18098574 | 183,95 | 164,29 | -25% | 12% |
| MM5 _{corregido} | 6073047 | | 221,36 | | -66% | 35% |

Del proceso de validación se concluye que el error de simulación de volumen de escorrentía y caudal máximo bordea el 30% cuando se utiliza como input la precipitación observada. Teniendo en consideración que en el proceso de calibración este error no fue superior al 10% se sugiere revisar los parámetros óptimos, especialmente aquellos de la rugosidad y de la conductividad que presentaban mayor variabilidad.

Los resultados más desfavorables se obtienen cuando se ingresa la precipitación del modelo MM5, por lo que a pesar de entregar información con mayor detalle a nivel horario en distintos puntos no se puede considerar como información válida para el pronóstico de caudales, al menos cuando se usa el modelo hidrológico distribuido GSSHA en esta zona.

6. CONCLUSIONES

La realización del análisis preliminar de la sensibilidad de los parámetros del modelo GSSHA, de uso y tipo de suelo, permitió conocer como afecta cada variable en el hidrograma de salida, lo que se considera esencial para reducir el período de calibración.

El análisis de los resultados obtenidos indica que la mayor fuente de incertidumbre asociada a los parámetros de suelo corresponde a la rugosidad y la conductividad hidráulica. Además, se constató que es posible identificar en qué usos y tipos de suelo se genera mayor incerteza, por lo que se pueden enfocar los esfuerzos para representar de mejor manera aquellas zonas.

La incertidumbre asociada al modelo hidrológico puede tener distintas fuentes, como las propiedades de uso y tipo de suelo que fueron analizadas en este trabajo, sin embargo, no hay duda respecto a que son las distribuciones espaciales y temporales de la precipitación las que generan mayor incerteza en los resultados. En el sector estudiado, a pesar de los errores inferiores al 10% obtenidos en la calibración, dados los resultados obtenidos en la validación (errores del orden del 30% en los caudales máximos y volumen de escorrentía directa) ninguna de las aproximaciones efectuadas puede considerarse aceptable. Por este motivo, se enfatiza que los esfuerzos deben dirigirse a definir cuencas piloto con redes de monitoreo adecuadas para la determinación de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

REFERENCIAS

BF Ingenieros Civiles, 1985. "Análisis de la Red Hidrometeorológica Nacional". Estudio para la DGA-MOP, Gobierno de Chile.

CADE-IDEPE, 2004. "Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Maipo". Estudio para CONAMA, Gobierno de Chile

Downer, C. W., and Ogden, F. L., 2003. "GSSHA User's Manual, Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis Version 1.43 for WMS 6.1", ERDC Technical Report, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970. "River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles" . J. Hydrol. 10 (3): 282-290.

Saghafian, B. 1993. "Implementation of a distributed hydrologic model within Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)". Proceedings of the Second International Conference of Integrating Environmental Models and GIS, Breckenridge, CO.

Vieux B. 2001. Distributed hydrologic modeling using GIS" 1st Edition, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, Water Science Technology Series, Vol 38. ISBN 0-7923-7002-3 9.