



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

## SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO SOBRE EL CAUDAL EN LA CUENCA DEL RÍO CRUCES

Tesis para optar al Título de:  
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor patrocinante:  
Sr. Andrés Iroumé Arrau  
Ingeniero Civil  
Master of Sciences in Management  
Doctor en Ciencias Forestales

Profesor informante:  
Sr. Luis Collarte Concha  
Ingeniero Civil. M.Sc. en Ingeniería Civil  
Especialidad Hidráulica Mecánica de Suelos

Profesor informante:  
Sr. Anton Huber Jaeger  
Ingeniero Forestal  
Doctor en Ingeniería Forestal

Ingeniero Colaborador:  
Sra. Paola Jofré Filgueira  
Ingeniero Forestal, Maître ès Sciences

DAVID EDUARDO TRONCOSO GALLARDO  
VALDIVIA - CHILE  
2009

## INDICE DE CONTENIDOS

	Pag.
RESUMEN – ABSTRACT.....	1
Capítulo I: Introducción .....	2
1.1 Presentación del Problema.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Marco teórico.....	5
1.3.1. Ciclo hidrológico.....	5
1.3.2. Mediciones hidrológicas.....	7
1.3.4. Modelación hidrológica.....	8
1.3.4.1. WaSiM (Water Balance Simulation Model).....	9
1.3.3 Revisión bibliográfica de estudios sobre efectos hidrológicos del cambio de uso de suelos.....	13
Capítulo II: Materiales y métodos.....	15
2.1. Área de estudio.....	15
2.1.1. Antecedentes generales.....	15
2.1.2. Clima, geomorfología y geología.....	17
2.1.3. Tipo y uso de suelos.....	18
2.3. Descripción de la metodología.....	21
2.3.1. Recolección de datos.....	21
2.3.2. Procesamiento de datos.....	21
2.3.2.1. Datos de estación.....	21
2.3.2.2. Datos espacialmente distribuidos.....	22
2.3.3. Modelación.....	25
2.3.3.1. Método de calibración y validación del modelo.....	25
2.2.1.3. Simulación de escenarios de uso de suelos propuestos.....	28
Capítulo III: Resultados y discusión.....	29
3.1. Serie de datos meteorológicos.....	29
3.1.1. Precipitaciones.....	29
3.1.2. Temperaturas.....	33
3.2. Datos de entrada espacialmente distribuidos.....	34
3.2.1. Escenarios de uso de suelos para la simulación.....	34
3.2.2. Tipo de suelos para la simulación.....	35

3.2.3. Modelo de elevación digital.....	36
3.2.4. Índice topográfico.....	38
3.2.5. Subcuencas.....	38
3.3. Calibración del modelo.....	39
3.4. Validación del modelo.....	41
3.5. Análisis de escenarios.....	42
Capítulo IV: Conclusiones.....	50
Bibliografía.....	52

## INDICE DE TABLAS

2.1. Escenarios de cobertura vegetal propuestos.....	23
2.2. Parámetros a calibrar y su rango de variación.....	26
3.1. Precipitación anual para cada estación.....	31
3.2. Valores adoptados de los parámetros de calibración.....	41
3.3. Coeficientes que caracterizan la descarga para cada escenario de uso de suelos.....	47

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
1.1. Ciclo hidrológico.....	5
1.2. Esquema de trabajo del programa WaSiM-ETH.....	9
1.3. Funcionamiento interno del programa WaSiM-ETH.....	10
2.1. Cuenca del río Cruces.....	14
2.2. Red hídrica. Cuenca río Cruces.....	15
2.3. Mapa de distribución geológica. Cuenca río Cruces.....	17
2.4. Mapa de distribución de suelos. Cuenca río Cruces.....	18
2.5. Mapa uso de suelos escenario actual. Cuenca río Cruces. ....	19
3.1. Precipitación en estaciones meteorológicas año 2002.....	28
3.2. Distribución de las estaciones pluviométricas utilizadas y polígonos de Thiessen. Cuenca río Cruces.....	30
3.3. Precipitaciones y descarga en la cuenca para los años 2002 y 2004. Cuenca río Cruces.....	31
3.4. Temperaturas estación Isla Teja.....	32
3.5. Escenario actual de uso de suelo para la simulación. Cuenca río Cruces...	33
3.6 Escenarios de uso de suelo a analizar. Cuenca río Cruces.....	34
3.7. Tipos de suelo para la simulación. Cuenca río Cruces.....	33
3.8. Secuencia para derivar DEM en formato de celdas.....	36
3.9. Representación gráfica del índice topográfico. Cuenca río Cruces.....	37
3.10. Representación gráfica de las subcuencas. Cuenca río Cruces.....	37
3.11. Calibración del modelo. Cuenca río Cruces.....	38
3.11. Distribución de la eficiencia del modelo como reacción a la variación de los parámetros de calibración.....	39
3.13. Validación del modelo. Cuenca río Cruces.....	41
3.14. Caudales medidos y simulados para el escenario 1 .....	42
3.15. Caudales medidos y simulados para el escenario 2 .....	43
3.16. Caudales medidos y simulados para los escenario 3 y 4.....	44
3.17. Caudales medidos y simulados para el escenario 5 y la calibración.....	45
3.18. Caudales medidos y simulados para los escenario 1 y 2.....	47
3.19. Caudales medidos y simulados para los escenario 1 y 4, y 3 y 1.....	48

## RESUMEN

Se examina el régimen hidrológico de la cuenca del río Cruces, con una superficie de 1740 km<sup>2</sup>, ubicada en la depresión intermedia del sur de Chile, con el objeto de analizar la magnitud del efecto del cambio de uso de suelo sobre la escorrentía. Para reproducir los procesos hidrológicos que son influenciados por el cambio de uso de suelo, se utiliza el modelo de simulación distribuido de balance hídrico WaSiM- ETH utilizando la versión basada en Top model. El modelo se calibra para el periodo de enero a diciembre del año 2002 y se valida para igual periodo del año 2004, considerando el uso de suelos actual. En la calibración, el modelo simula una escorrentía anual de 1902mm, la cual se compara favorablemente con la escorrentía anual medida de 1860mm. Lo mismo ocurre para la validación, que arroja una escorrentía anual de 1419mm, mientras que el valor medido fue de 1441mm. Se obtienen buenas correlaciones para ambos casos, lo que significa que el modelo es capaz de representar los procesos hidrológicos que se llevan a cabo en cuencas grandes. Luego se simula la escorrentía para cinco posibles escenarios de uso de suelo en la cuenca del Cruces. Los dos escenarios más extremos analizados corresponden a 100% pradera y 100% plantaciones forestales, los cuales generan diferencias en cuanto a la producción de escorrentías de 266mm anualmente, coincidentes con resultados obtenidos por otros autores como Sun *et al.* (2006).

## ABSTRACT

In this work is analyzed the hydrology regime of the Cruces river basin, with an area of 1740km<sup>2</sup>, located in the intermediate depression in the south of Chile, with the objective to analyze the magnitude of the effect of the landuse change on the runoff. To reproduce the processes influenced by the landuse changes, the water balance simulation model WaSiM-ETH through Top model approach is used. The model is calibrated for the period of January to December of 2002 and is validated for the same period in 2004, considering the actual landuse. To the calibration, the model simulates a yearly runoff of 1902mm, similar compared with the measure data of 1860mm. The same happen to the validation, where the yearly runoff simulated was 1419mm, while the measure valor was 1441mm. In both cases are obtaining good correlations, which means the model is able to represent the hydrological processes that happen in large catchments. Afterwards, the runoff to five possible scenarios of landuse are simulated in the Cruces watershed. The most extreme scenarios analized correspond to 100% grass and 100% forest plantation, which produce difference of 266mm in yearly runoff. It result coincide with results obtained to authors like Sun *et al.* (2006).

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Probablemente, uno de los principales motivos que han conducido a la actual situación de déficit hídrico en algunos lugares haya sido una preocupante ignorancia sobre los mecanismos y los principios físicos que rigen el movimiento de las aguas. Sin embargo, en las últimas décadas, el recurso hídrico es motivo de preocupación social, ocupa grandes espacios en los medios de comunicación y es objeto de numerosos debates. En este sentido un factor muy importante de analizar es cómo afectan las actividades humanas a la producción de agua en un determinado lugar.

La organización del espacio en un territorio obedece a la compleja conjugación de factores ambientales, sociales, de mercado, entre otros, que se traduce en una determinada distribución de los usos en el territorio. En este sentido Croke *et al.* (2004) plantean que es de vital importancia la consideración de las interacciones entre las demandas de agua de las actividades que se desarrollan y el régimen hidrológico de la cuenca.

Se han venido realizando incursiones desde la segunda mitad del siglo XIX para estudiar el efecto de la cubierta del suelo sobre el régimen hidrológico. Sin embargo, fue en un estudio realizado por Bates y Henry (1928) en las montañas de Colorado cuando se pudieron identificar los aspectos básicos que explican el rol de la cubierta vegetal, el comportamiento de la cuenca y las variables climáticas (Andréassian, 2004).

Los usos y cambios de uso del suelo afectan de una u otra forma el régimen hidrológico. Así, la sustitución o la eliminación de la cubierta vegetal afecta los caudales máximos y los volúmenes de flujo totales, especialmente durante meses de verano (estación seca), puesto que en aquel momento los flujos máximos no son influenciados tanto por la precipitación como por la existencia de las reservas de agua (Meunier, 1996). Por otro lado un incremento de la cubierta forestal, reemplazando áreas de pastoreo, pueden traer una reducción anual del caudal (Calder, 1992). No obstante lo anterior, los resultados de estudios individuales presentan una gran variabilidad e incluso autores como Hibbert (1967) los describen como “impredecibles”. Esto coincide con investigaciones más recientes como las reportadas por Andréassian (2004), quién, después de la revisión de una gran cantidad de estudios, plantea que el impacto de los bosques está muy influenciado por el contexto climatológico y pedológico específico de la cuenca.

Vale también destacar que la mayor parte de los estudios realizados analizan el comportamiento de pequeñas cuencas, seguramente porque los factores que intervienen en su comportamiento son más fácilmente identificables, manejables y comparables. En grandes cuencas es más difícil encontrar series de datos extensas, y además es más complejo encontrar alteraciones en los usos de suelo en un porcentaje significativo en su superficie.

Cuando no es posible inferir físicamente modificaciones significativas en la cobertura vegetal sobre la base de registros fluviométricos disponibles, la modelación hidrológica simula el flujo de agua en base a cierta información básica de entrada, que dependerá de las características del modelo. No siempre es posible representar la interacción hidrológica entre los diversos procesos que son influenciados por efecto del uso de suelos en una cierta área usando modelos conceptuales o empíricos. Actualmente se han desarrollado ampliamente los llamados modelos distribuidos, que consideran celdas como unidades de análisis y que permiten representar la variabilidad espacial en la cuenca con una resolución que depende del tamaño de la celda, que a su vez resulta de equilibrar la necesidad de precisión con la capacidad computacional de la que se disponga.

Luego, en este trabajo se muestra el resultado de la aplicación de un modelo de simulación hidrológica, para analizar los efectos potenciales del cambio de uso de suelo sobre el caudal en la cuenca del río Cruces. Para ello se efectúan derivaciones de cinco coberturas de uso de suelo, que permitan analizar la influencia, tanto por las propiedades de los diferentes usos de suelo, la distribución de éstos en la cuenca, y el efecto a través del tiempo de las alteraciones en la utilización del suelo sobre la escorrentía, que se han producido a partir de los años '70 en el área de estudio. Para el cálculo de escorrentías se usa el software de modelamiento distribuido de balance hídrico WaSiM-ETH (Schulla y Jasper, 2001) desarrollado en Suiza, utilizando la versión basada en "Top model approach".

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Simular los efectos del cambio de uso de suelos sobre el caudal en la cuenca del río Cruces.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Calibrar y validar el programa WaSiM-ETH de modelamiento hidrológico para la cuenca del río Cruces, en la condición de uso actual.
- Estudiar diferentes escenarios de uso de suelos y sus potenciales efectos en los caudales de la cuenca del río Cruces.
- Discutir respecto al nivel de aproximación de los resultados del programa WaSiM-ETH y su aplicabilidad en cuencas grandes.

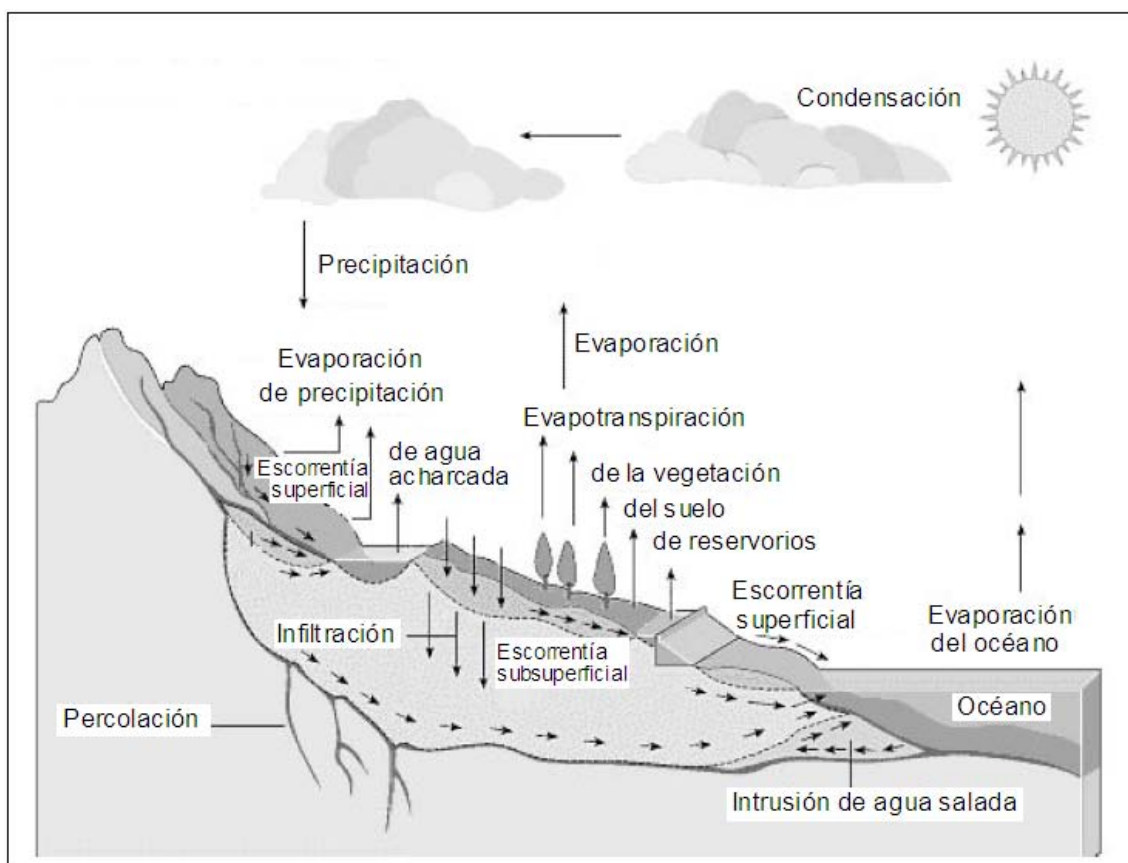


### 1.3. MARCO TEÓRICO

#### 1.3.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico representado en la **figura 1.1** describe al movimiento general del agua a través de la atmosfera, la biosfera y la litosfera en forma de gas, liquido o sólido, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Chow *et al.*, 1993). El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua a través de la energía proveniente del sol y de la gravedad.

**Figura 1.1:** Ciclo hidrológico



Fuente: Basado en Keenan *et al.* (2004). Plantations and Water Use: A Review

La evapotranspiración es una combinación de intercepción, transpiración de las plantas y evaporación del suelo. La precipitación puede ocurrir en forma de lluvia, granizo, nieve o neblina. La vegetación detiene la caída de parte de la precipitación directamente al suelo; a esto se denomina intercepción. La precipitación que es interceptada puede luego transformarse en escorrentía o evaporarse.

La intercepción es controlada por el clima y factores de la vegetación. Los factores climáticos que incluyen son la intensidad, duración, frecuencia y el tipo de precipitación.

Los factores de vegetación incluyen la morfología de la vegetación, su densidad, fisiología y su crecimiento. Estos factores conducen a diferenciar el balance hídrico en función del tipo de vegetación, incluyendo, por ejemplo, praderas y bosques.

El agua se evapora desde ríos, lagos y del suelo. Las plantas transpiran agua durante el proceso de fotosíntesis y respiración. Al conjunto constituido por la evaporación directa desde el suelo, cuerpos de agua, y la transpiración de las plantas se llama evapotranspiración. El volumen total de evapotranspiración en superficies cubiertas con vegetación depende del tipo de vegetación, factores climáticos y de factores del suelo (Calder, 1999). La tasa de transpiración varía con el tipo de vegetación debido a las diferencias en el área foliar, además de la profundidad y densidad del sistema de raíces.

Cuando la precipitación alcanza la tierra y su intensidad es baja y/o el suelo no está saturado, una significativa proporción entra al suelo como infiltración. A cierto nivel de humedad del suelo, la gravedad forzaría a una porción del agua a descender a través del suelo. Dependiendo del suelo y las características de la precipitación, el agua en la zona no saturada puede permanecer disponible para el uso de las plantas o escurrir en forma subterránea. Esta puede finalmente llegar a la descarga como parte del flujo base. Alternativamente, el agua puede continuar escurriendo verticalmente precolándose hasta la zona saturada.

La descarga de la zona saturada ocurre donde el nivel freático intersecta con la superficie del suelo. Este es el principal componente del flujo base.

La escorrentía superficial se origina si la precipitación es mayor que la infiltración del suelo. Esto puede ocurrir porque la lluvia es intensa o el suelo está saturado. El flujo de escorrentía finalmente llega al océano (Keenan *et al.*, 2004).

El balance hídrico en cualquier sistema considera las entradas, las salidas y la variación del almacenamiento, y se puede representar según la siguiente ecuación:

$$P = Q + EVT + \Delta S / \Delta t \quad (1)$$

P representa la forma de ingreso de agua al sistema cuenca

Q representa las salidas del sistema

EVT representa la evapotranspiración en la cuenca

$\Delta S / \Delta t$  representa las variaciones en el almacenamiento de agua

Esta ecuación es la expresión básica de la hidrología y cada una de sus variables es obtenida a través de instrumentos en terreno o derivadas a través de algún método cuya exactitud está ligada a su complejidad y a los demás datos utilizados para su deducción.

### **1.3.2 Mediciones hidrológicas**

#### ***Precipitación***

La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, debido a lo cual su evaluación y el conocimiento de su distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, son problemas básicos en hidrología (Maderrey *et al.*, 2005).

La precipitaciones se expresan en mm ( $1\text{mm} = 1\text{l/m}^2$ ) y la intensidad en unidad de longitud por unidad de tiempo (por ejemplo mm/hr).

El cálculo de la precipitación caída sobre la cuenca se realiza a partir de los datos recogidos por instrumentos de medición como pluviómetros, totalizadores, pluviógrafos o estaciones meteorológicas, haciendo una extrapolación lineal de la cantidad de agua que cae sobre el área de captación del instrumento a la superficie de la cuenca que éste representa, dada su ubicación geográfica.

#### ***Mediciones fluviométricas***

La medición de caudales o salida corresponde a la cuantificación de agua que sale de la cuenca por unidad de tiempo.

Los datos hidrométricos deben ser fiables y continuos; para ello se requiere de un periódico, sistemático y constante mantenimiento de las estaciones. Dado el carácter del proceso, se requieren series temporales de larga duración para realizar interpretaciones del funcionamiento del sistema poco influenciadas por situaciones poco representativas, y así interpretar y enmarcar adecuadamente este tipo de situaciones.

Existen varias formas de medir caudal, entre ellos: el uso de molinetes, aforos químicos (arrojando una sustancia de concentración conocida) o como en el caso del río Cruces, a partir de una estación limnimétrica.

En una estación limnimétrica el principio consiste en que para una sección conocida, existe una relación entre el caudal y la altura de la lámina de agua,  $Q = f(h)$ , que se

denomina curva de descarga. La curva de descarga se determina experimentalmente por medidas repetidas de caudales y alturas en diversas condiciones. A partir de ella, basta con medir la altura para determinar el caudal, o lo que es lo mismo, basta con determinar la variación de la altura del agua con el tiempo, para obtener la variación de los caudales con el tiempo.

### **1.3.3 Modelación Hidrológica**

La modelación hidrológica consiste en simular los procesos físicos asociados al consumo y movimiento de las aguas, que se dan en un medio determinado, basándose para ello en ecuaciones que relacionan diversas variables y algunos parámetros empíricos.

Los primeros modelos con que se trabajó eran concentrados, es decir, representaban la condición promedio de una cuenca entera, sin considerar en forma directa la variabilidad espacial en cuanto a tipo de suelos, uso de suelos y características geográficas, en el cálculo de escurrimientos. En las últimas décadas, se han masificado los modelos distribuidos, los cuales representan explícitamente la variabilidad espacial de las características superficiales de la cuenca y de las precipitaciones.

Según Pusineri *et al.* (s.f.), dos factores han favorecido la difusión de los modelos distribuidos: primero la disponibilidad en soporte digital de los datos topográficos y de otros parámetros del suelo y, segundo, el desarrollo de técnicas de rápido procesamiento de datos espaciales e imágenes satelitales.

Los modelos distribuidos, si bien, respecto a modelos concentrados, requieren una mayor cantidad de información y en general su estructura es de mayor complejidad, en este caso presentan la ventaja de permitir caracterizar de manera completa el área de estudio. Éstos tienen la habilidad de detectar de mejor forma el contexto de la cuenca para determinar su respuesta a partir de una cierta distorsión de sus condiciones de uso actuales, considerando aquellos rasgos específicos de la captación que la pudieran hacer responder de una forma particular.

Respecto a la obtención de la información espacial, los GIS (Sistemas de Información Geográfica) juegan un papel fundamental, no sólo en la integración de los datos, sino en la capacidad que tienen para extraer automáticamente los parámetros necesarios para la modelación hidrológica, a través de operaciones espaciales usadas en algoritmos desarrollados para tal fin.

Los datos históricos que son necesarios para el modelamiento, pueden ser obtenidos de los registros que se disponen del lugar o, cuando no existen mediciones disponibles, se pueden derivar mediante alguna abstracción a partir de información existente en zonas aledañas y/o que presenten características similares.

El modelo a utilizar en este estudio es WaSiM –ETH. A continuación se efectúa una descripción de los principales aspectos de este software de modelamiento hidrológico.

### **1.3.3.1 WaSiM-ETH (Water Balance Simulation Model)**

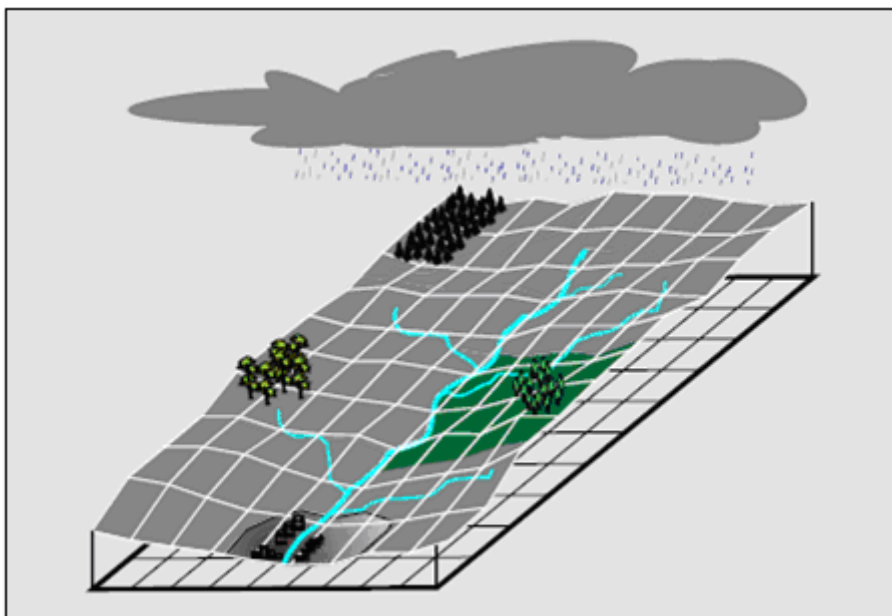
#### **Descripción del modelo**

Originalmente desarrollado para investigar el efecto del cambio climático sobre el balance hídrico, WaSiM-ETH es un modelo determinístico de simulación de balance hídrico espacialmente distribuido que permite simulaciones continuas.

Este software permite escoger y combinar módulos diferentes para la simulación de los distintos procesos de hidrología superficial y subsuperficial en forma eficaz, a fin de lograr un mejor acercamiento a la realidad. Así se puede trabajar con modelos simplificados cuando se dispone de menor cantidad de información o bien, para realizar primeras aproximaciones, y puede efectuar cálculos tan exactos como sea necesario, en función de la disponibilidad de datos, ofreciendo ventajas importantes en cuanto a flexibilidad.

El modelo trabaja discretizando el área, como muestra la **figura 1.2**, mediante celdas igualmente espaciadas.

**Figura 1.2:** Esquema de trabajo del programa WaSiM-ETH.



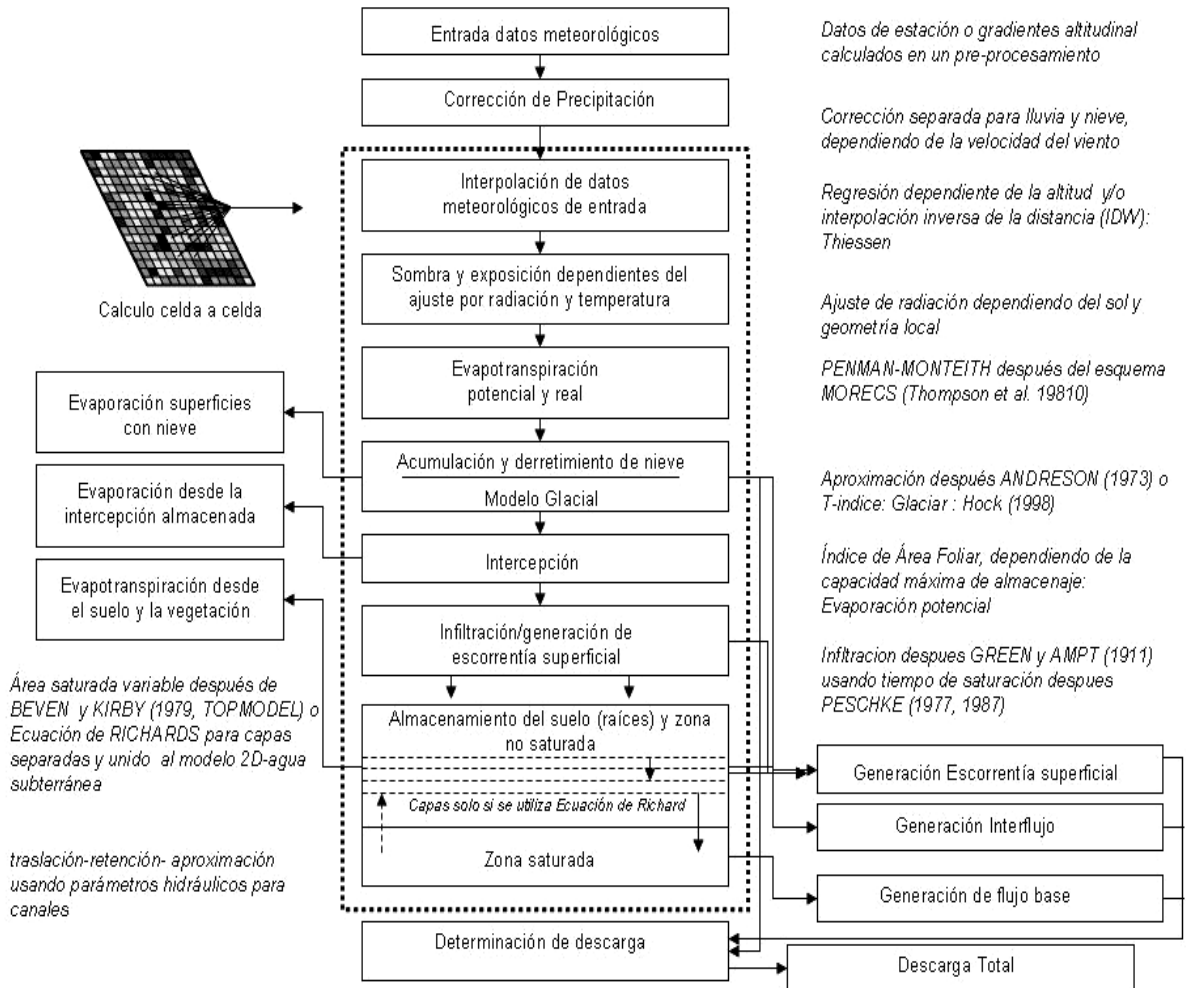
Fuente: Kleeberg, H.-B., M. Becker (1998)

Según Schulla y Jasper (2007) esta discretización es una muy efectiva subdivisión computacional tanto para el pre como para el post procesamiento.

El modelo efectúa, para cada celda, el balance hídrico usando los datos meteorológicos y los derivados de datos espaciales.

La **figura 1.3** muestra el funcionamiento interno, de procesamiento de los datos, efectuados por WaSiM.

**Figura 1.3:** Funcionamiento interno programa WaSiM-ETH.



Fuente: Basado en Schulla y Jasper (2007). Model Description WaSiM-ETH

La modelación, como se observa, contempla los procesos de evapotranspiración, intercepción, almacenamiento superficial, infiltración y transferencia vertical de la humedad del suelo hacia la zona de las raíces, la zona no saturada, y la zona saturada (en que se utiliza el modelo Top Model).

**Información necesaria para la modelación**

Los datos necesarios para la modelación pueden dividirse en las siguientes categorías:

- *Datos espacialmente distribuidos:* modelo digital de elevación y coberturas que describen el tipo y uso de suelo en el área de estudio. Aquí cada una de las matrices de datos que caracterizan espacialmente la zona deben tener el mismo tamaño de celda, además de coincidir la ubicación de cada una de ellas para todas las coberturas. Estos datos son temporalmente invariantes. Dependiendo del tamaño de la cuenca hidrológica bajo investigación los

autores de WaSiM-ETH (Schulla y Jasper, 2007) recomiendan generar celdas de 10m de tamaño para áreas menores de 1km<sup>2</sup> y de 5km<sup>2</sup> para las áreas mayores de 10000km<sup>2</sup>.

- *Series de datos meteorológicos*: temperatura del aire y precipitación son requeridas como datos de estación. Es deseable que los datos de las estaciones sean tomados en intervalos no muy espaciados. Si para la cuenca existen datos de precipitación de más de una estación, WaSiM permite interpolar los datos de la estación para dar una distribución espacial de las condiciones meteorológicas.
- *Datos de caudal*, a fin de calibrar y validar el modelo, midiendo la bondad de ajuste de los resultados de descarga arrojados por WaSiM.

### **Calibración y validación del modelo**

La calibración consiste en el ajuste de los parámetros del modelo, de tal forma que este se adecue a las condiciones de una cuenca particular. La modelación de los procesos hidrológicos requiere de disponibilidad de datos de entrada de buena calidad y el conocimiento sobre los parámetros que se ingresen. El proceso de calibración del modelo no es un problema sencillo, es necesaria tanto la pericia hidrológica como también un profundo entendimiento de la sensibilidad y reacciones del modelo. El dato más importante para la calibración del modelo es descarga de caudal cada cierto intervalo de tiempo.

Los parámetros del modelo pueden estimarse usando parámetros de cuencas con hidrología similar o ser estimado en proceso de ensayo y error. Algunos de ellos pueden también ser obtenidos indirectamente desde algún indicador de medidas. Sin embargo, no siempre hay cuencas con similares características disponibles, además el uso de la experiencia para la estimación de los parámetros del modelo puede también conducir a una elección más subjetiva de los parámetros.

Por otra parte, respecto al período de calibración, Wriedt y Rode (2006) señalan que algunas experiencias en la modelación de precipitación-escorrentía han mostrado que una calibración del sistema de parámetros puede no rendir aproximaciones igualmente buenas a todos los acontecimientos o para diferentes partes de la hidrografía observada, por lo cual los conjuntos de datos se deben elegir cuidadosamente a fin de incluir toda la información necesaria. Sin embargo no existen estudios disponibles que



se enfoquen a la pregunta de cuantos datos son necesarios y que parte del conjunto de datos contienen la información necesaria para realizar las calibraciones.

La validación del modelo consiste en aplicar los parámetros calibrados, y las mismas condiciones espaciales utilizadas en la calibración, a un periodo de tiempo diferente del utilizado para calibrar el modelo. Este procedimiento tiene como objetivo evaluar si el modelo continúa ajustándose a los valores medidos para condiciones meteorológicas diferentes.

#### **1.3.4 Revisión bibliográfica de estudios respecto a los efectos hidrológicos del cambio de uso de suelos**

Si bien es posible encontrar un gran número de publicaciones respecto al efecto del cambio en el uso de suelo sobre la producción de agua, éstos en su gran mayoría han sido efectuados en base a pequeñas cuencas. Esto, debido a razones prácticas, en el sentido que es mucho más viable el manejo de usos de suelo sobre toda la superficie y la delimitación de las distintas unidades hidrológicas en cuencas pequeñas que en cuencas grandes.

A continuación se describen brevemente cinco estudios de diferentes autores, efectuados en cuencas grandes, es decir, cuencas con área superior a  $100\text{km}^2$ , a modo de visualizar algunas conclusiones respecto de cuencas con superficie similar a la estudiada.

Siriwardena *et al.* (2006) estudiaron la cuenca del río Comet en Queensland, Australia, con una superficie de  $16440\text{km}^2$ . Analizaron dos situaciones: una de pre tala de bosques y una de post tala. Concluyeron que se produjo un aumento del 40% en la escorrentía, lo cual es consistente con los resultados en pequeñas cuencas considerando el nivel de deforestación.

Sun *et al.* (2006) estudiaron la sensibilidad anual de la producción de agua a la variable climática en respuesta al cambio de uso de praderas a bosque a lo largo de un gradiente climático para 10 grandes cuencas con superficies entre  $674$  y  $5322\text{km}^2$  en la cuenca de río de Yangze en China. Concluyeron que el aumento de la superficie cubierta por bosques a través de las prácticas forestales puede reducir la producción de agua hasta en un 40%.

Costa *et al.* (2003) estudiaron el efecto del aumento en el uso de suelo para fines agrícolas en la descarga para la cuenca amazónica del río Tocantins de  $175360\text{km}^2$  de

superficie. Concluyeron que si bien no hubo una diferencia notable en la precipitación para los dos periodos considerados, al comparar la descarga, esta aumentó en un 24%, luego de un aumento de 30% a 49% del área destinada a usos agrícolas y de pastoreo, en desmedro de áreas de bosque.

En Chile, Pizarro *et al.* (2004) analizaron el efecto del cambio en la cubierta del suelo en la generación de escorrentía para un periodo de 40 años en la cuenca de Purapel (259km<sup>2</sup>), en la región del Maule. Tal cuenca pasó de 0% de plantaciones en el año 1955, hasta tener un 51.7% de su superficie cubierta por *Pinus radiata* para el año 1997. Concluyeron que el cambio en el tipo de bosque no generó variaciones en la escorrentía (el *Pinus radiata* y el bosque nativo tienen similar comportamiento hidrológico) y las variaciones que se presentan en la descarga está relacionada con la cantidad de precipitación.

También en Chile, Fahle (2007) estudió 6 cuencas de áreas entre 145km<sup>2</sup> y 1472km<sup>2</sup> en la región del Bío- Bío, en las que se incrementó el área de plantaciones forestales. Este autor concluye que en aquellas cuencas en que el aumento en la cubierta superaba el 20% hubo una disminución en la escorrentía.

Por otro lado, según Robinson *et al.* (2003), estudios conducidos bajo condiciones reales de manejo forestal, muestran que el potencial de los bosques para reducir los caudales máximos y los caudales base es mucho menor de lo que se había presumido en el pasado, especialmente en grandes cuencas hidrográficas, es decir, el impacto de los cambios de cobertura vegetal sobre el rendimiento hídrico es más importante en cuencas medianas y pequeñas.

En cuencas pequeñas, en general se ha llegado a la conclusión que la forestación disminuye la generación de escorrentía y la deforestación la hace aumentar (Andréassian, 2004), aunque no existe consenso en cuanto a la magnitud de las variaciones. En cuencas grandes, los resultados son disímiles y no siempre comparables entre sí, dado que los cambios en la cubierta vegetal generalmente son parciales, en el sentido que afectan sólo un cierto porcentaje, no siempre significativo, del la superficie total de la cuenca.

## CAPITULO II: MATERIALES Y METODO

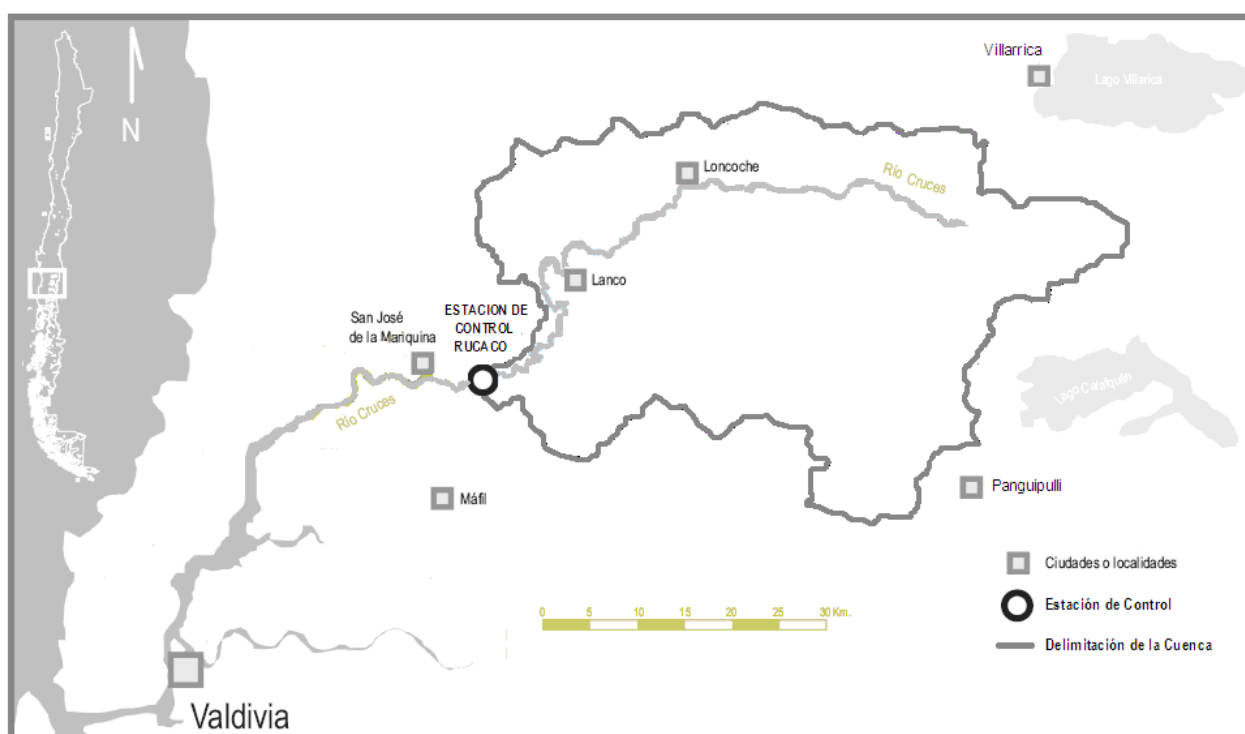
### 2.1 AREA DE ESTUDIO

#### 2.1.1 Antecedentes Generales

El área de estudio comprende a la cuenca del río Cruces, desde su nacimiento en la precordillera de Los Andes hasta la estación fluviométrica en Rucaco, ubicada aguas arriba del puente homónimo.

En la **figura 2.1** se muestra la ubicación de la cuenca, y su emplazamiento respecto de las localidades más importantes del sector.

**Figura 2.1:** cuenca del río Cruces



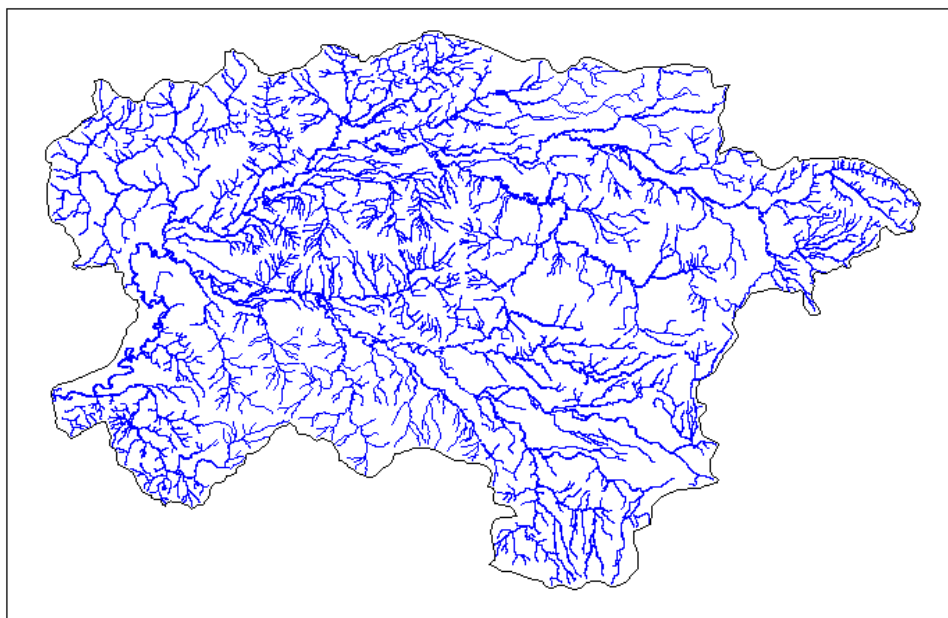
Esta cuenca limita al norte con la cuenca de Toltén y al sur con la subcuenca del río Ñaqué. Comprende al sector entre los 73°33' y 72°54' longitud oeste y entre los 39°15' y 39°36' latitud sur. Esta zona abarca una superficie de 1740km<sup>2</sup>.

El río Cruces nace en la precordillera al sur de la provincia de Cautín en la vertiente occidental de los cerros situados entre los lagos Villarica y Calafquén, y drena la depresión de San José en la parte norte de Valdivia, avanzando de NE al SW. Pasa por las localidades de Loncoche, Lanco y San José de la Mariquina. Su longitud total alcanza los 125km. Su ancho varía en su parte terminal entre 75m y 3,5km. Su principal afluente es el río Purulón a la altura de Lanco. Hacia su confluencia con el río Valdivia se suman otros afluentes, como los ríos Pichoy, Cayumapu y Chorocamayo,

conformando el extenso humedal que se extiende al norte de Valdivia, que fuera declarado, en 1981 Santuario de la Naturaleza.

La cuenca del río Cruces es una cuenca de régimen fluvial y sin presencia de lagos como se aprecia en la **figura 2.2**.

**Figura 2.2:** Red hídrica. Cuenca río Cruces



Fuente: Centro Experimental Forestal (CEFOR).

En promedio, la profundidad del cauce del río Cruces varía entre cuatro y ocho metros. Las mayores profundidades se encuentran en el sector sur, en los últimos 10km donde puede alcanzar hasta los 12 metros. En las áreas de pantano, la profundidad es de aproximadamente dos metros, presentando fuertes variaciones. Las variaciones en el nivel de las aguas tienen una ocurrencia diaria por el efecto mareal y también estacional. Este río presenta una alta variación anual de caudal, produciéndose en invierno un aumento del caudal del río producto de las lluvias, elevando el nivel alrededor de un metro de la media, en tanto en verano el nivel puede bajar 0.3 metros.

### 2.1.2 Clima, Geomorfología y Geología

De acuerdo a la clasificación de Köeppen, en el área del río Cruces se distinguen dos tipos climáticos. En la denominada "cuenca o depresión de San José de la Mariquina", a la sombra del cordón occidental de la cordillera de la Costa, se ubica el tipo climático templado cálido con menos de cuatro meses secos (Cfsb1) afectando el área norte de los humedales. En tanto el sector sur, cercano a la ciudad de Valdivia, se encuentra bajo la influencia del tipo climático templado lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb2). En esta área se hace clara la evidencia de influencia oceánica, registrándose en Valdivia precipitaciones superiores a los 2.000mm anuales. Existe un régimen pluviométrico que presenta concentraciones de lluvias en invierno y ausencia de un período seco. La evapotranspiración anual en el sector es del orden de 600mm.

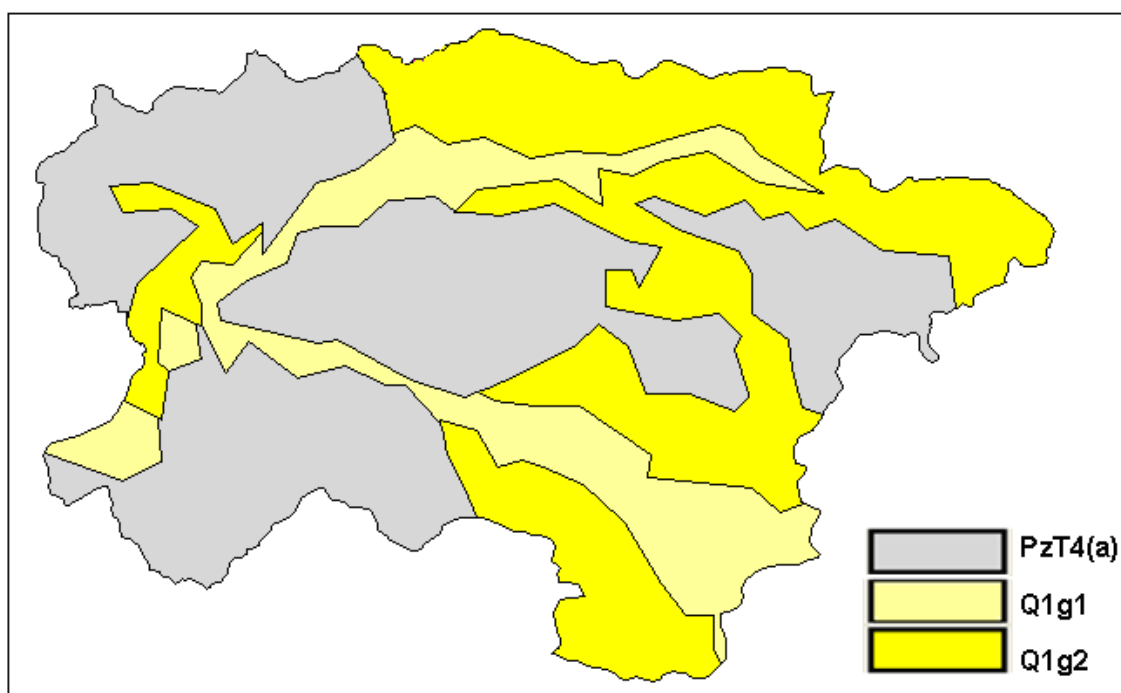
La cuenca del Cruces se ubica en la depresión intermedia y presenta principalmente pendientes bajas a levemente inclinadas, salvo en las cuencas tributarias de orden uno, donde las pendientes medias varían entre 20 y 26% (Palacios, 1992). Según información de curvas de nivel (CEFOR, s.f.), presenta variaciones de altitud entre 50m s.n.m. y 1175m s.n.m.

Según el Ministerio de Obras Públicas (2004), las formaciones geológicas presentes en la cuenca del río Cruces están compuestas principalmente por:

- *Rocas Q1g1*, del tipo sedimentaria del Pleistoceno-Holoceno correspondientes a depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustre, diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales abanicos fluvio-glaciales frontales ovares en las riberas de cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue.
- *Rocas Q1g2*, del tipo sedimentaria del Pleistoceno-Holoceno correspondientes a depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustre, diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales abanicos fluvio-glaciales frontales ovares en las riberas de cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Sta María.
- *Rocas PzTr4*, del tipo metamórficas del Paleozoico-Triásico: Metapelitas, metacherts, metabasitos y en menor proporción neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. Complejo metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos.

La distribución geológica de la cuenca se describe en forma gráfica en la **figura 2.3**.

**Figura 2.3:** Mapa de distribución geológica. Cuenca río Cruces



Fuente: Servicio Nacional de Geología y Minería.

### 2.1.3 Tipo y uso de suelos

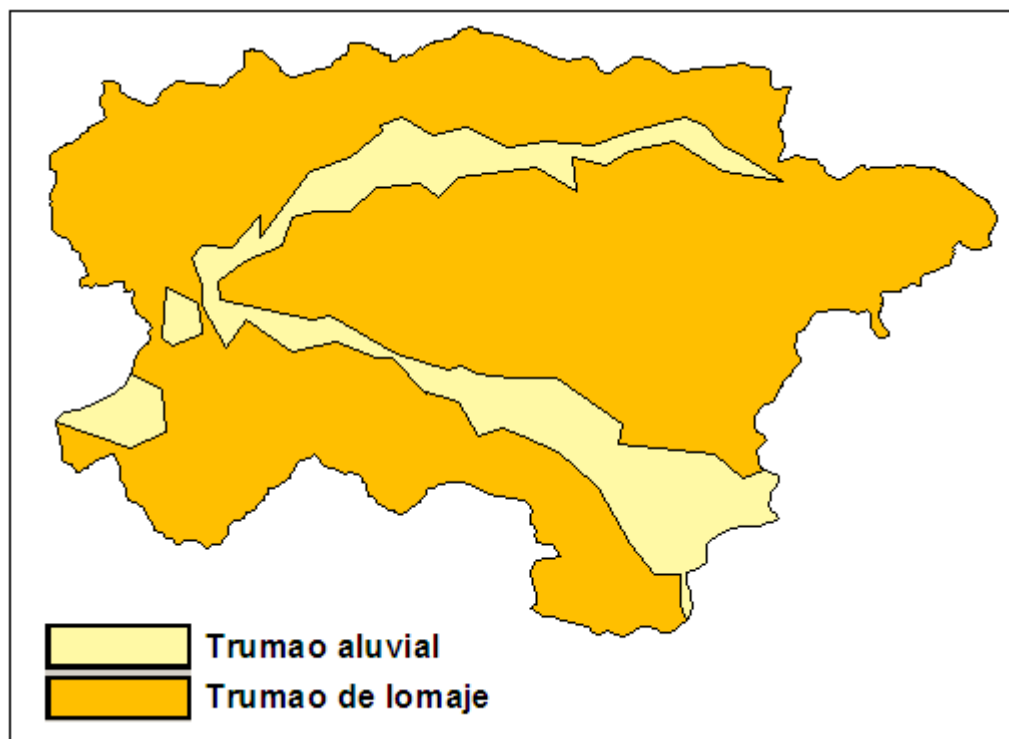
En la cuenca es posible identificar los siguientes tipos de suelo (Ministerio de Obras Públicas, 2004):

- Trumaos de lomaje: son suelos suaves a ondulados y quebrados, normalmente profundos, formados de cenizas volcánicas que descansan usualmente sobre conglomerados volcánicos y/o tobas volcánicas. Sus texturas usuales en la superficie son franco arenosas muy fina o franco limosa, con gran abundancia de materia orgánica que le otorgan un color pardo oscuro y pardo grisáceo. En profundidad la textura va de franco arenosa fina a franco limosa hasta franco arcillosa y el color paulatinamente pasa a pardo amarillento. Tienen un alto poder para retener agua y buena a muy buena permeabilidad. Presenta una erosión moderada de manto y se observan zanjas sólo ocasionalmente.
- Trumaos aluviales: son suelos planos a ligeramente ondulados, aluviales, estratificados, muy variables en profundidad, normalmente desde 0.50m a 1.10m, que descansan en materiales aluviales usualmente en piedras. En algunos descansa en tobas mezcladas con arenas y breccia volcánica. La textura del horizonte superficial va de franco arenosa fina o muy fina a franco limosa,

usualmente granula débil, friable a muy friable; hacia abajo generalmente se mantiene esa misma textura, ligeramente más pesada, con algunas estratos más pesados ocasionalmente. Los colores superficiales son generalmente pardo muy oscuro a gris muy oscuro o pardo grisáceo muy oscuro.

La distribución de los tipos de suelo descritos en la cuenca se muestra en la **figura 2.4**.

**Figura 2.4:** Mapa de distribución de suelos. Cuenca río Cruces



Fuente: Basado en Cartas Generalizadas de Capacidad de Uso y Asociaciones de Suelo. ODEPA (1968) e IREN (1968)

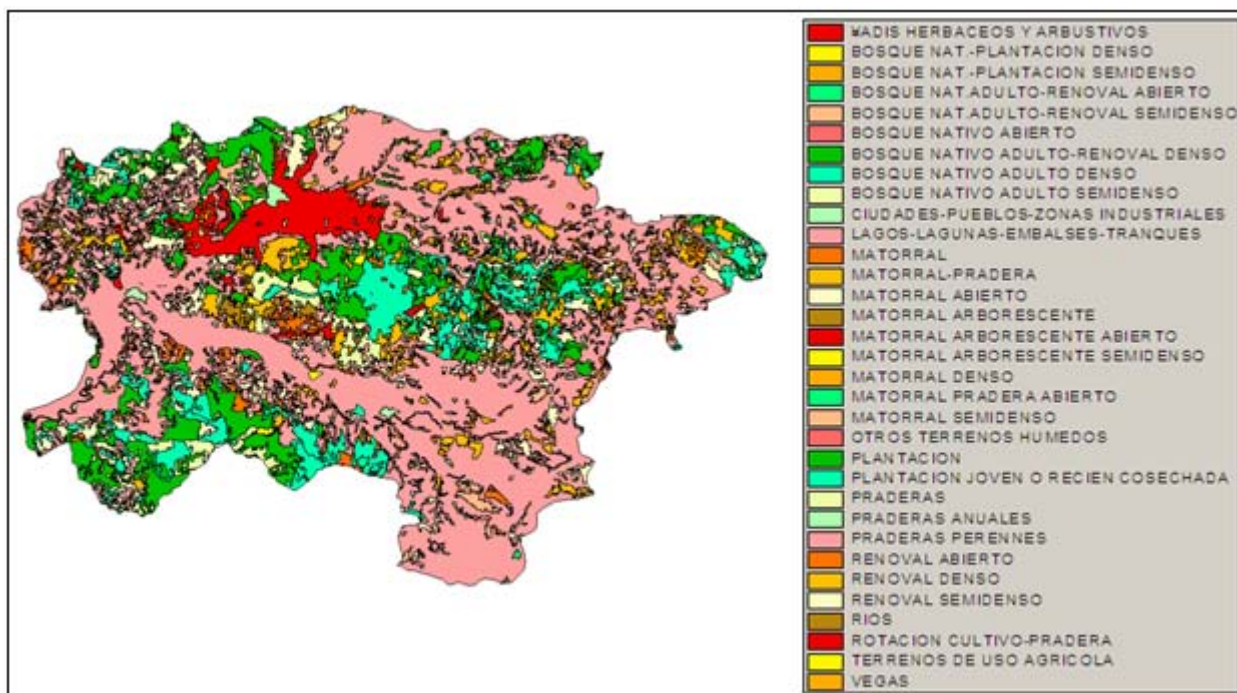
Respecto a la información histórica concerniente al uso de suelos, en el periodo de la preconquista existe información muy escasa sobre la ocupación de las tierras y derivan básicamente de cartas y relatos dejados por los españoles. Sin embargo, algunos sitios arqueológicos investigados (Mostny, 1971) confirman la existencia, antes de 1400 d.C., de cultivos agrícolas rudimentarios en la provincia de Valdivia y Cautín, los que han dejado evidencias de uso de fuego para despejar terrenos para cultivo, aunque su impacto es relativamente reducido sobre los ecosistemas naturales existentes (Rodríguez, 1989).

El periodo de la Conquista y Colonia española, comprendido entre los siglos XVI y XVIII se caracterizó por sus conflictos, pero en periodos relativamente cortos de paz, la introducción de semillas y técnicas de cultivo europeas, la ganadería y el uso del fuego de forma más intensiva se fueron incorporando lentamente a las actividades indígenas, lo que significó el primer cambio significativo en el paisaje (Rodríguez, 1989).

A partir de 1881 en el periodo de la República y colonización europea, a raíz de la derrota del pueblo mapuche, llamada luego “pacificación de la Araucanía”, se da inicio a la colonización europea que siguió aproximadamente durante los primeros 30 a 50 años del siglo XX. Esta ocupación significó una destrucción intensa del bosque nativo, a través de la política de “concesiones” de tierras fiscales para su explotación forestal y que después fueron dedicadas a siembras, pastoreos y, en particular, a monocultivos de trigo, que causaron grados extremos de erosión que se observan hasta hoy (Donoso y Lara,1996). Algunas de estas áreas agrícolas que posteriormente fueron abandonadas dieron origen a superficies que hoy en día son ocupadas por Renovales y Matorrales, sobre todo en el Valle Central (Donoso, 1981). A partir de la aprobación del Decreto 701 de 1974 que estableció importantes subsidios forestales a la forestación, plantaciones con especies exóticas, sobre todo *Pinus Radiata* y en menor escala *Eucalyptus sp.*, pasó a representar una importante actividad económica en la zona, desplazando en cierta medida, al sector agropecuario; además de promover la sustitución de una considerable zona ocupada por bosques nativos.

Según el CEFOR actualmente en el área de estudio se distinguen las coberturas de uso de suelos que ilustra la **figura 2.5**.

**Figura 2.5:** Mapa uso de suelos, escenario actual. Cuenca río Cruces.



Fuente: Centro Experimental Forestal (CEFOR).



## **2.2 DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA**

### **2.2.1 Recolección de datos**

La primera fase para el desarrollo de este estudio es la recolección de los datos necesarios. A continuación se nombran los datos básicos necesarios para el modelamiento y su respectiva fuente.

Datos de estación:

- *Antecedentes de precipitación diaria* se obtienen de estaciones dependientes del Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la Dirección General de Aguas (DGA).
- *Antecedentes de temperatura media diaria* disponibles de la estación meteorológica Isla Teja en Valdivia, dependiente de la Universidad Austral de Chile.
- *Datos de descarga diaria* proporcionados por el Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la Dirección General de Aguas.

Datos especialmente distribuidos

- *Información respecto al tipo y uso de suelo* corresponde a la descrita en el punto 2.1.3.
- *Información en formato digital de curvas de nivel* corresponde a la base cartográfica el Centro Experimental Forestal (CEFOR), generada a partir de la cartografía 1:50000 del Instituto Cartográfico Militar y de la restitución de fotografías aéreas 1:10000.

### **2.2.2 Procesamiento de datos**

#### **2.2.2.1 Datos de estación**

Respecto a la información pluviométrica, se trabaja con las estaciones de Villarrica, Loncoche y Lago Riñihue, ya que cumplen con las condiciones de representar la pluviometría de los distintos sectores de la cuenca (dado que la precipitación no es un fenómeno homogéneo), además de tener una serie de datos lo suficientemente extensa, continua y en con una resolución temporal diaria (menor paso de tiempo para el cual se tiene registro en la cuenca).

Si bien los registros en general son continuos, existen algunos vacíos puntuales en la toma de datos, por lo que se completan los valores faltantes mediante regresiones lineales. Se utiliza el software de estadística Systat para determinar las ecuaciones de regresión y evaluar su bondad de ajuste, para luego completar la información faltante en base a las ecuaciones de regresión obtenidas.

Sólo para tener visión preliminar de lo que ocurre en la cuenca, también se determina la precipitación media de la cuenca a nivel diario y anual sobre el área en estudio, mediante polígonos de Thiessen. El método de Thiessen consiste en atribuir un factor de peso a los totales de precipitación de cada estación pluviométrica, proporcionales al área de influencia de cada una de ellas.

Vale aclarar que el modelo utilizado para determinar escorrentía permite ingresar los datos de cada una de las estaciones pluviométricas por separado, calculando internamente la precipitación en cada uno de los puntos en función de la distancia de éstos respecto de cada una de las estaciones previamente georreferenciadas en el GIS. De esta forma el modelo es capaz de captar la distribución espacial y temporal de la precipitación además de su intensidad y cantidad sin tener la necesidad de calcular precipitaciones de una sola estación representativa de la cuenca completa.

Respecto a los datos de temperatura, éstos no presentan discontinuidad en el registro, por lo que no es necesario efectuar completación alguna.

#### **2.2.2.2 Datos espacialmente distribuidos**

Si bien se dispone de información digitalizada (en el GIS ArcView) que describe algunos aspectos espaciales de la cuenca, éstos se procesan para derivar los datos de entrada necesarios en el formato indicado.

Como se explicó en el marco teórico, el modelo a utilizar trabaja en base a celdas. Luego, antes de comenzar el procesamiento de los datos, se determina la resolución espacial de las celdas en la modelación. En atención a las recomendaciones de Schulla y Jasper (2007) y considerando el tamaño de la cuenca ( $1740\text{km}^2$ ), se resuelve utilizar celdas cuadradas de 500m de lado, es decir, de  $0.25\text{km}^2$ .

A continuación se describe el procesamiento que es necesario efectuar para obtener cada uno de los datos de entrada.

## Uso de suelo

Respecto a las coberturas de uso de suelo, se pueden distinguir la cobertura de uso actual (de la cual existe información), y las coberturas a simular.

El uso de suelo actual es el que muestra la **figura 2.5**, y que se encuentra en formato digital. Sin embargo, por restricciones en cuanto a la capacidad computacional, se integran todos aquellos usos con similar comportamiento hidrológico, generando una capa de utilización de suelo simplificada y en formato de celdas.

En relación a las coberturas a simular, se definen los posibles escenarios descritos a continuación:

- *Escenario 1:* en este escenario se extrema el uso de praderas a toda la cuenca a fin de obtener una cota superior en cuanto a producción de escorrentía, a la vez de permitir observar las características de la respuesta en este tipo de cobertura.
- *Escenario 2:* aquí se considera la cuenca cubierta completamente con plantaciones forestales, a fin de tener una cota inferior en cuanto a producción de escorrentía para el área en estudio, además de observar su comportamiento en estas condiciones.
- *Escenario 3:* se considera ocupadas por bosques todas aquellas zonas en que la pendiente supera el 20%, lo cual corresponde aproximadamente al 7% de la superficie total de la cuenca, mientras que el resto se encuentra cubierto con praderas. Este escenario tiene como finalidad observar el efecto de la protección (por parte de vegetación arbórea) de zonas de mayor pendiente.
- *Escenario 4:* considera el caso inverso al anterior, es decir, se usa con praderas aquellas zonas en que la pendiente excede el 20%, considerando lo demás cubierto con bosques. En este caso se analiza el efecto de un uso diferente en zonas de diferente pendiente.
- *Escenario 5:* a fin de determinar si en los últimos años se ha producido un cambio significativo en la escorrentía, influenciado por el cambio en la utilización del suelo, este escenario considera una aproximación de la situación existente en los años '70 (antes que muchos de los terrenos de uso agrícola pasaran a uso forestal, producto de los subsidios que se le otorgaban a esta actividad en aquel tiempo). Para representar este panorama y a raíz de la escasez de información de la época, se utiliza la hipótesis de que los terrenos de pendiente menor que 20% que actualmente son utilizados como plantaciones forestales, previamente fueron utilizados con fines agrícolas, de donde se obtiene una variación porcentual, en proporción al área total, de aproximadamente un 5.7%.

La **tabla 2.1**: muestra un resumen de la descripción de los escenarios a simular.

**Tabla 2.1:** Escenarios de cobertura vegetal propuestos

Escenario	Descripción
1	100% pradera
2	100% plantación
3	pradera con bosque en sectores con pendientes mayores a 20%
4	bosque con pradera en sectores con pendientes mayores a 20%
5	modelo de uso de suelo en los años '70

Como ya se ha dicho, cada uno de estos escenarios también debe ser ingresado en formato raster o de celdas.

### **Tipo de suelo**

En este caso es posible digitalizar la descrita en 2.1.3, mediante el GIS ArcView en formato vectorial, y luego traspasarla a formato raster (celdas) con las herramientas que proporciona el GIS.

### **Modelo de elevación digital**

Los modelos de elevación digital (DEM) son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felícimo, 1994).

Este es un dato secundario, en el sentido que se deriva, mediante el GIS ArvView, a partir de otro dato primario capturado en terreno, en este caso las curvas de nivel. Se obtiene en formato de tipo vectorial llamado TIN (Triangulated Irregular Network), y luego es llevado a formato raster.

### **Índice Topográfico**

Numéricamente el índice topográfico está definido como  $\ln(a/\tan b)$ , donde  $a$  es el área de drenaje hacia este punto de la cuenca y  $b$  la pendiente del terreno. Conceptualmente indica de la susceptibilidad de ciertos puntos de la cuenca a saturarse y por ello, según Buytaert *et al.* (s.f.), puede ser visto como un índice de homogeneidad hidrológica.

El índice topográfico es la base de la modelación utilizando Top Model. Corresponde a un dato secundario, derivado a partir del modelo de elevación digital en formato raster, mediante el GIS SAGA.

## **Subcuencas**

Si bien no es un dato necesario como requerimiento espacialmente distribuido propiamente tal, es preciso conocer el número de subcuencas al completar la hoja control de WaSiM.

La identificación de las subcuencas permite calibrar con mayor flexibilidad, pudiendo otorgar parámetros de comportamiento diferente a cada una de ellas a través de la hoja control.

El número de subcuencas que se generan también es función de la resolución utilizada, es decir, mientras más pequeño es el tamaño de las celdas, la cuenca será dividida en un mayor número de subcuencas.

La derivación de las subcuencas también se efectúa a partir del modelo de elevación digital mediante del GIS SAGA.

### **2.2.3 Modelación**

En esta etapa se reúnen todos los datos tanto de estación como espacialmente distribuidos y se ingresan en el formato correspondiente al software de modelamiento WaSiM.

#### **2.2.3.1 Método de calibración y validación del modelo**

La primera etapa de la modelación corresponde a la calibración del modelo.

Para evaluar la aproximación de los resultados de descarga son utilizados los registros fluviométricos de la estación limnimétrica Río Cruces, ubicada en Rucaco. Así, el modelo permite una rápida y más objetiva estimación de los parámetros de simulación, a través del ensayo y error, evaluando la bondad de ajuste de los resultados que arroja el modelo con los valores observados de la descarga en el periodo a considerar.

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utilizan el coeficiente de determinación  $R^2$  y el coeficiente de eficiencia E de Nash y Sutcliffe (1970) ampliamente utilizados en estudios de hidrología.

El coeficiente de determinación se calcula mediante la expresión 2 y su resultado varía entre 0 y 1, tomando el valor 1 cuando el ajuste es perfecto.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (2)$$

donde:

O : valores observados

P : valores estimados

$\bar{O}$  : promedio de valores observados

$\bar{P}$  : promedio de valores estimados

El coeficiente de eficiencia E, se obtiene mediante la expresión 3, considerando la misma nomenclatura anterior, pudiendo variar entre entre  $-\infty$  y 1, con una perfecta correspondencia en  $E = 1$ .

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

Para calibrar el modelo se procede efectuando una serie de corridas del modelo, variando cada uno de los parámetros, dentro de su rango, y luego comparando (mediante  $R^2$  y E) los valores arrojados por el modelo con los valores observados, de forma sucesiva, hasta lograr una buena aproximación.

La **tabla 2.2** muestra todos los parámetros a calibrar en la hoja control del modelo y su rango de variación.

**Tabla 2.2:** Parámetros a calibrar y rango de variación

Parám.	Descripción	Rango
$m$	Parámetro de recesión de flujo base	0.001 - 0.1(m)
$T_{corr}$	Factor de corrección para transmisibilidad del suelo	0.05 - 20
$K_{corr}$	Factor de corrección para infiltración vertical	600 - 2000
$k_D$	Constante de recesión del reservorio único. Escorrentía superficial	10 – 80 (h)
$H_{max}$	Capacidad de almacenamiento máximo del interflujo	10 – 200(mm)
$k_H$	Constante de recesión del reservorio único. Interflujo	50 – 300 (h)
$t_{or}$	Temperatura limite para lluvia	-2.0 – 2.0 (C)
$t_0$	Temperatura limite para derretimiento de la nieve	-2.0 – 2.0 (C)
$C_0$	Factor día-grado	1.0-5.0(mm/d/C)
$C_{melt}$	Fracción de la nieve derretida que se transforma en escorrentía	0.0 – 1.0

Fuente: Basado en Blume (2007).

No todos los parámetros son igualmente importantes, ya que los más sensibles son los parámetros  $m$  y  $T_{corr}$  (Shulla y Jasper, 2007).

Un valor de  $m$  más pequeño indica que más agua sale del suelo, llevando a una disminución rápida del nivel freático y así a un aumento rápido del déficit de la saturación. Conjuntamente con una recarga más alta el invierno y pérdidas más altas de la evaporación en el verano. Esto lleva a un régimen con altas tasas de flujo base en el invierno y flujos base bajos en el verano, es decir, hay solamente un pequeño efecto del almacenamiento de larga duración bajo tierra y el flujo base tiene un gran dinamismo. Valores de  $m$  más grandes darán lugar a un almacenaje temporal del agua en la zona saturada, transfiriendo el agua de invierno a verano.

Un valor de  $T_{corr}$  más alto lleva a un régimen temporal más uniformemente distribuido que un valor pequeño. Esto lleva a un alto dinamismo del nivel de agua subterránea (o de la zona saturada), dando lugar también a altos valores de la recarga luego de las precipitación y así a inundaciones relativamente pequeñas. Debido a la amplia gama para los valores de  $T_{corr}$ , ambos parámetros deben ser estimados muy cuidadosamente.

El factor de escala de filtración  $K_{corr}$  tiene sentido solamente en áreas con suelos con napas profundas. En tales cuencas, un primer pico de la inundación es seguido a menudo por una segunda inundación, generalmente mucho más lenta en decaer, pero que puede tener incluso un peak más alto que el primero. En la mayoría de las cuencas, este efecto puede ser descuidado y allí  $K_{corr}$  se debe fijar a un valor suficientemente grande para evitar una desconexión hidráulica a la zona saturada. Schulla y Jasper (2007) proponen fijar el factor de escala de filtración en 1000.

Si las descargas del flujo máximo o los períodos de la recesión no son satisfactorios, un aumento o una disminución de la constante de recesión responsable  $k_D$  y  $K_H$  pueden aumentar la eficacia del modelo.

Si la fracción de escorrentía subsuperficial en el flujo total modelado es insatisfactoria, las variaciones  $H_{max}$  ayudarán a balancear los componentes. Un mayor  $H_{max}$  llevará generalmente a escorrentía subsuperficial creciente, mientras que un  $H_{max}$  más pequeño la hará disminuir.

Los parámetros  $t_{0r}$ ,  $t_0$ ,  $C_0$ ,  $C_{melt}$  tienen ingerencia cuando la cuenca tiene influencia nival. En este caso, como la cuenca es pluvial, no es necesario calibrar estos parámetros.

Los parámetros de calibración se consideran constantes para todas las subcuencas componentes de la cuenca del modelo.

En este estudio se utiliza un periodo de un año para la calibración, el que se considera suficiente considerando que la cuenca es de carácter pluvial, lo que significa que los peak son registrados en invierno, donde se producen las máximas precipitaciones y luego en verano, donde la precipitación disminuye, se registra un periodo de estiaje, a diferencia de cuencas de carácter nival en las que se producen crecidas importantes en periodos de verano debido a deshielo, por lo cual podría ser necesario un periodo mayor para caracterizar su comportamiento. El periodo considerado comprende entre el 01 de enero 2002 al 31 de diciembre de 2002.

Seguido de la etapa de calibración, se valida el modelo para un periodo de tiempo diferente. El periodo considerado en este caso comprende entre el 01 de enero 2004 al 31 de diciembre de 2004.

Si bien se considera un periodo de un año para la calibración y la validación, al efectuar la modelación también se incluyen condiciones iniciales. Se utilizan datos meteorológicos desde el año 2000. Estos datos permiten independencia respecto de los valores iniciales que, por defecto, arroja el programa, permitiendo una mejor aproximación para el periodo de análisis.

### **2.2.1.3. Simulación de escenarios de uso de suelo propuestos**

Luego de calibrado y validado el modelo para las condición de uso de suelo actual, se simulan los escenarios virtuales definidos previamente. Éstos escenarios se analizan para el periodo comprendido entre el 01 de enero al 31 de diciembre de 2002, considerando las mismas condiciones iniciales que para la calibración.

Para cada escenario se simulan los caudales a nivel diario en la cuenca del río Cruces y se comparan con la situación actual y también entre diferentes escenarios. Luego se discuten los resultados, tanto respecto al ajuste del modelo, como los que éste arroja para los diferentes escenarios simulados, para finalmente obtener las respectivas conclusiones.



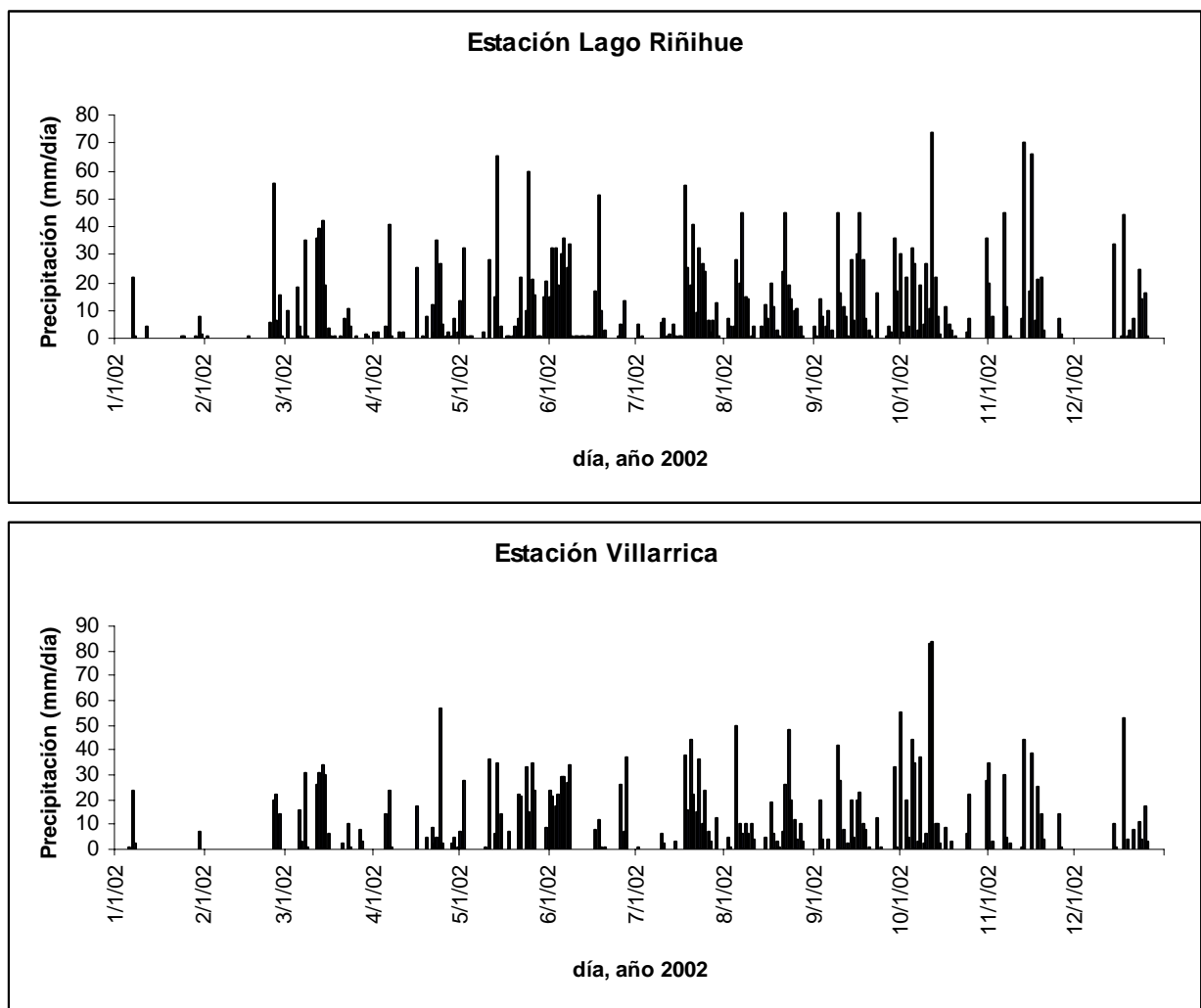
## CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSION

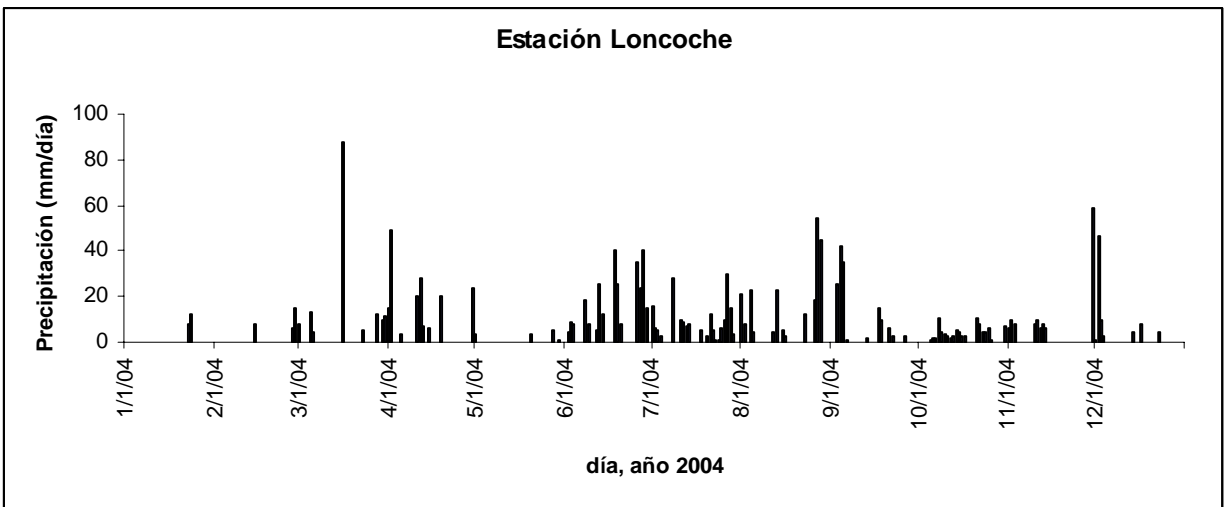
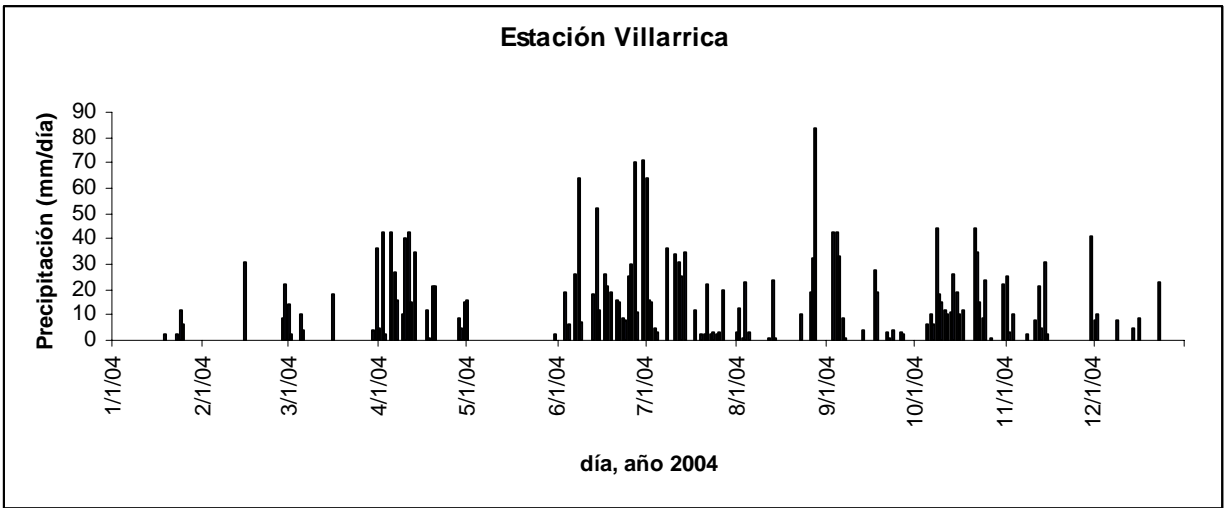
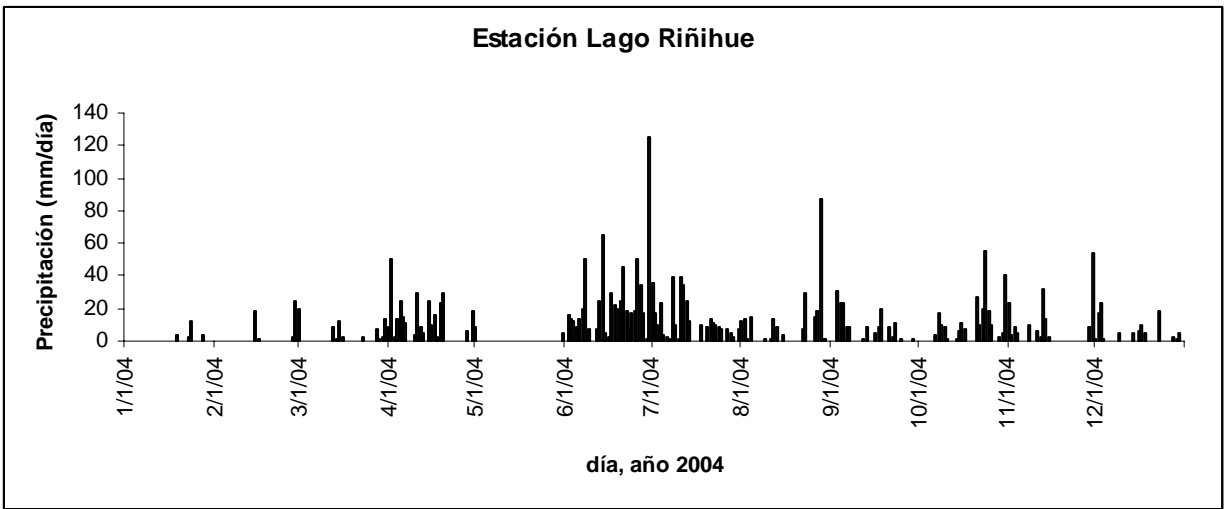
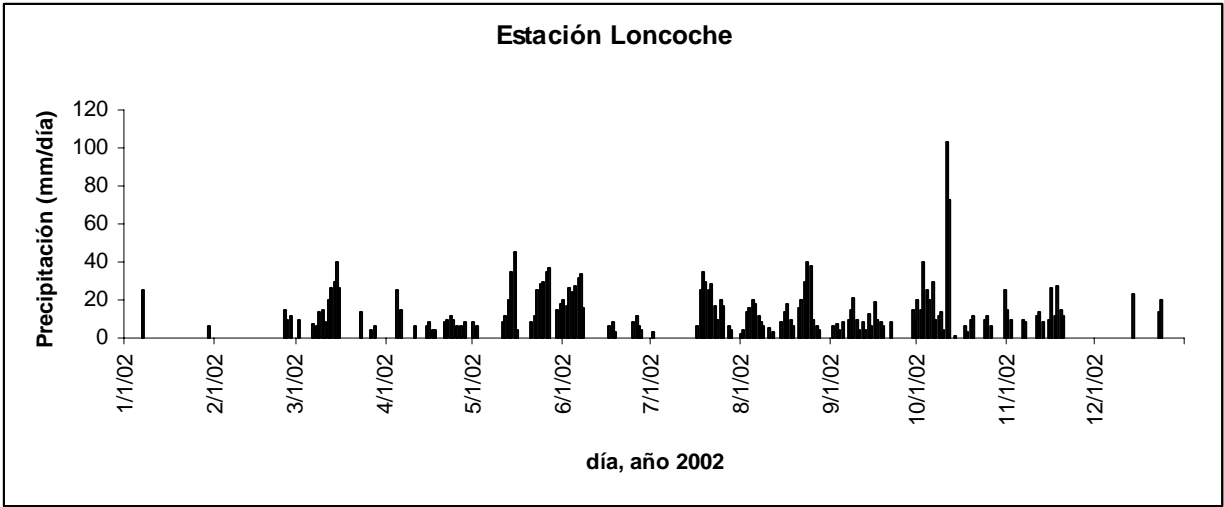
### 3.1 SERIE DE DATOS METEOROLÓGICOS

#### 3.1.1 Precipitaciones

En la **figura 3.1** se muestran las precipitaciones de las estaciones pluviométricas de Villarrica, Loncoche y Lago Riñihue, luego de completados los datos para el año 2002 (utilizado para la calibración y el análisis de escenarios) y el año 2004 (utilizado para la validación).

**Figura 3.1:** Precipitación en estaciones meteorológicas los años 2002 y 2004





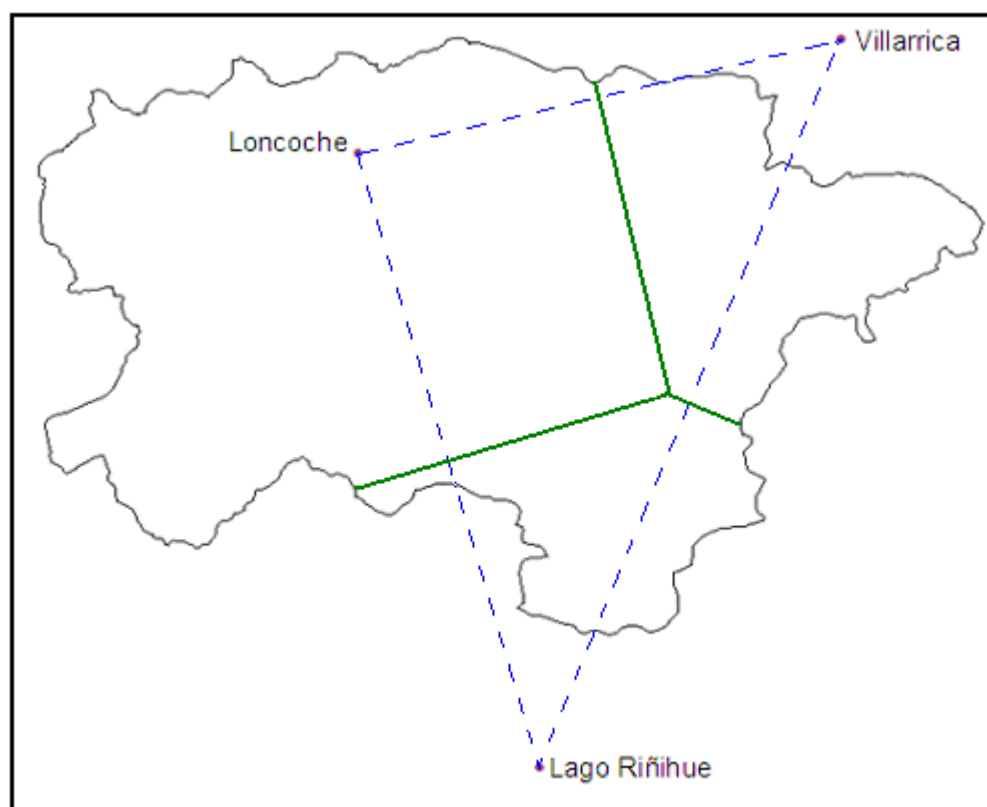
Las precipitaciones anuales para cada estación se indican en la **tabla 3.1**:

**Tabla 3.1:** precipitación anual para cada estación

Estación	2002	2004
Lago Riñihue	2995mm	2408mm
Villarrica	2568mm	2382mm
Loncoche	2462mm	1571mm

Luego de disponer de la totalidad de los datos de precipitación y a fin de observar la respuesta hidrológica para la situación real de la cuenca, se determina la precipitación media. En este caso, para el cálculo, se utiliza el método de los polígonos de Thiessen que se observan en la **figura 3.2**.

**Figura 3.2:** Distribución de estaciones pluviométricas utilizadas y polígonos de Thiessen. Cuenca del río Cruces.



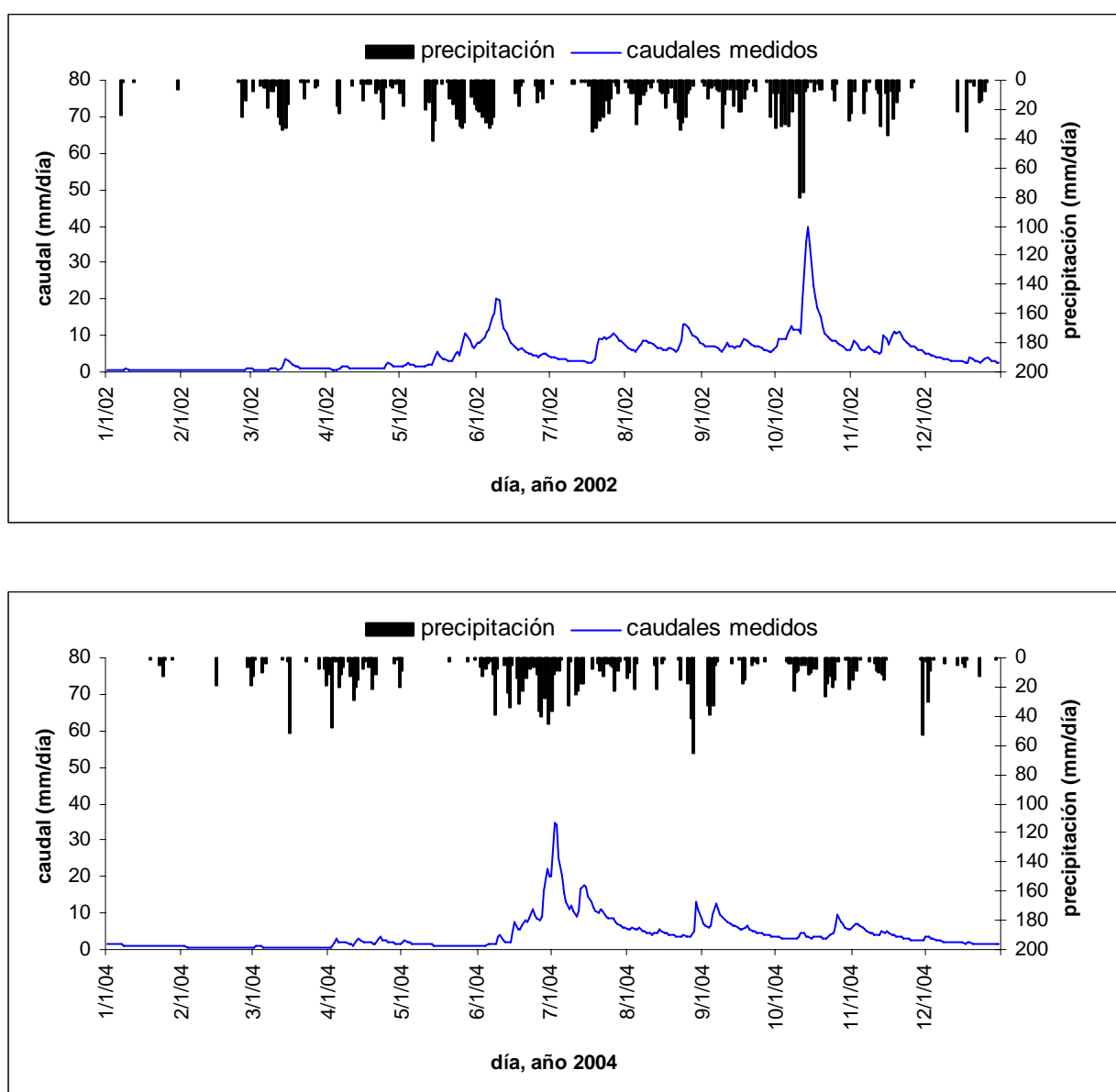
Según la aplicación de los polígonos de Thessen, la precipitación media en la cuenca resulta de la siguiente suma ponderada:

$$P = 0.63P_{\text{Loncoche}} + 0.21P_{\text{Villarrica}} + 0.16P_{\text{Lago Riñihue}}$$

Luego, la precipitación anual para toda la cuenca, corresponde a 2570mm para el año 2002 y 1875 para el año 2004. En base a las estadísticas que se disponen de la zona, la precipitación media en la cuenca es de aproximadamente 2000mm, luego se observa que el año 2002 presenta precipitaciones anuales sobre el promedio y el 2004 presenta precipitaciones bajo el promedio.

La **figura 3.3** muestra el comportamiento del caudal (mm/día) de la cuenca ante los eventos de precipitación producidos en cada uno de los periodos.

**Figura 3.3:** Precipitaciones y caudales en la cuenca para los años 2002 y 2004. Cuenca río Cruces



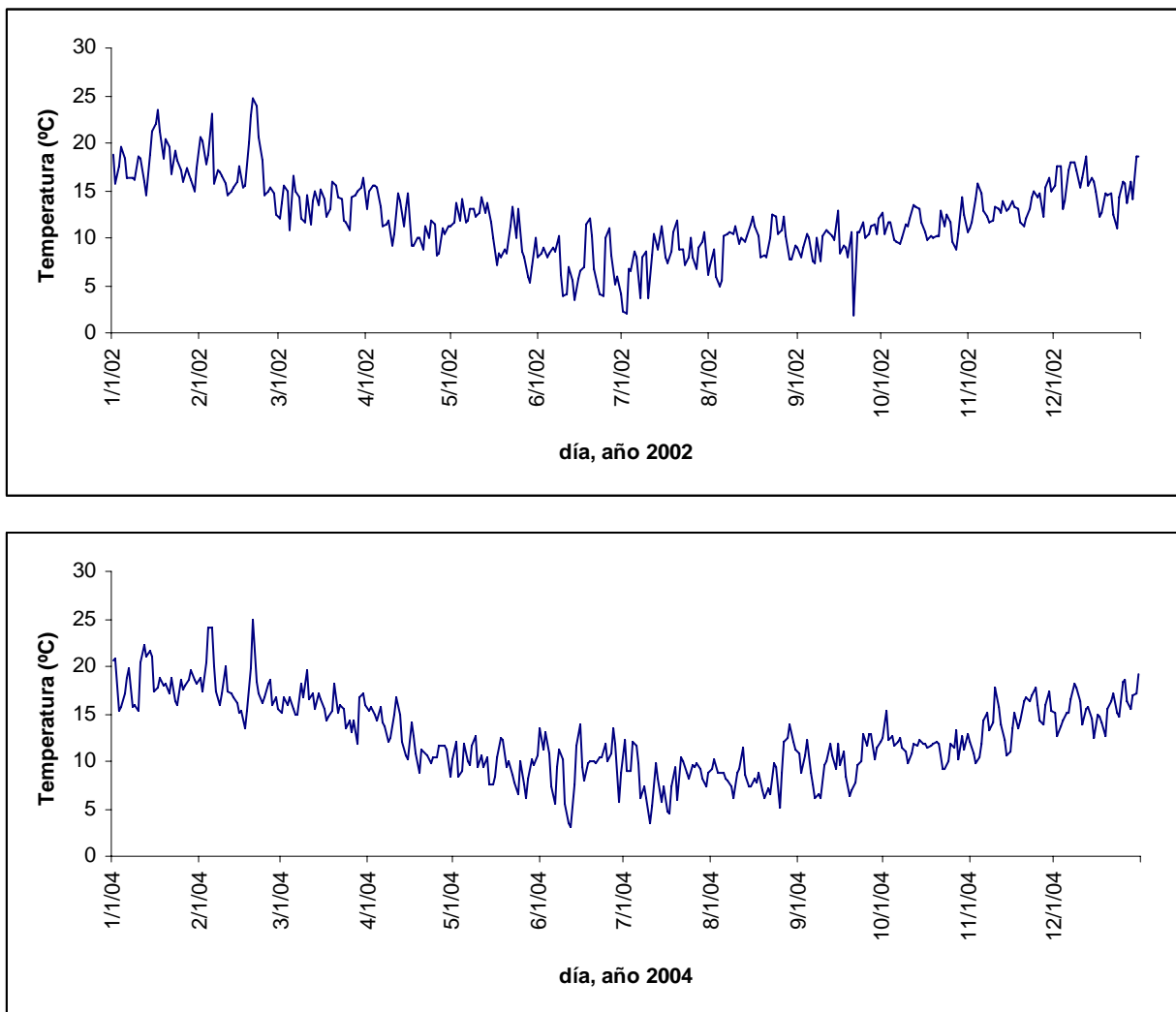
Se observa que para el período de estiaje las precipitaciones no tienen un efecto importante en la escorrentía. Sin embargo, a partir del mes de mayo, donde el suelo ya se encuentra saturado, las precipitaciones generan una respuesta más pronta en la descarga.

### 3.1.2 Temperaturas

Dado que no se dispone de información de estaciones mas cercanas a la zona estudiada, se considera que en toda la cuenca del río Cruces se dan las mismas condiciones de temperatura media que en la estación Isla Teja.

La **figura 3.4** muestra la temperatura para la estación Isla Teja para los años 2002 y 2004.

**Figura 3.4:** Temperaturas estación Isla Teja



Luego, de estos datos, se obtiene una temperatura media de 12.1°C para el año 2002 y de 12.4°C para el año 2004, además de una desviación estándar de 4°C para ambos años. De los resultados y de las gráficas se observa que ambos periodos muestran bastantes similitudes en cuanto a sus temperaturas.

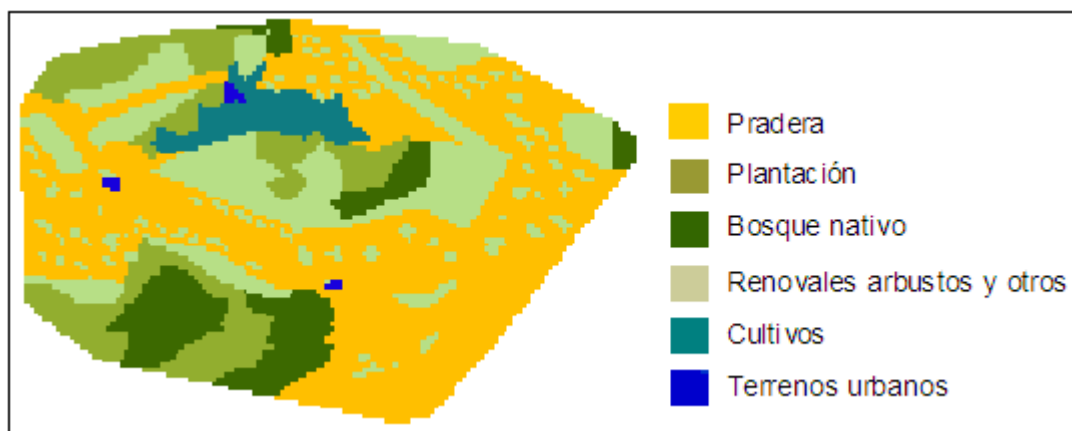
## 3.2 DATOS DE ENTRADA ESPACIALMENTE DISTRIBUIDOS

### 3.2.1 Escenarios de uso de suelos para la simulación

#### *Uso actual*

Luego de la integración que se efectuó entre todos aquellos usos de similar comportamiento hidrológico, y luego de darle el formato de celdas necesario, se llega al resultado que muestra la **figura 3.5**.

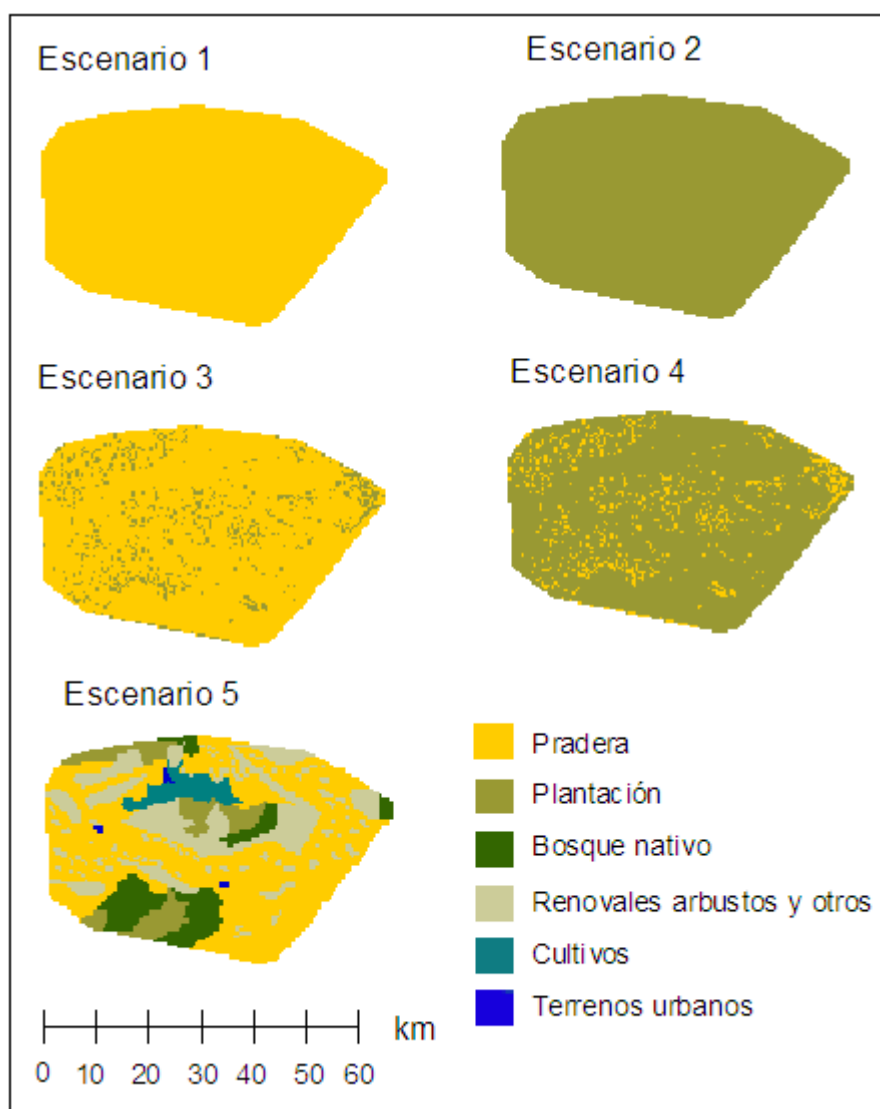
**Figura 3.5:** Escenario actual de uso de suelos para la simulación. Cuenca río Cruces



#### *Escenarios propuestos*

Las coberturas de uso de suelo (en formato de celdas) a considerar para evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca ante diferentes escenarios, son los que se representan en la **figura 3.6**, en conformidad a lo descrito en el punto 2.3.2.2.

**Figura 3.6:** escenarios de uso de suelo a analizar. Cuenca río Cruces.

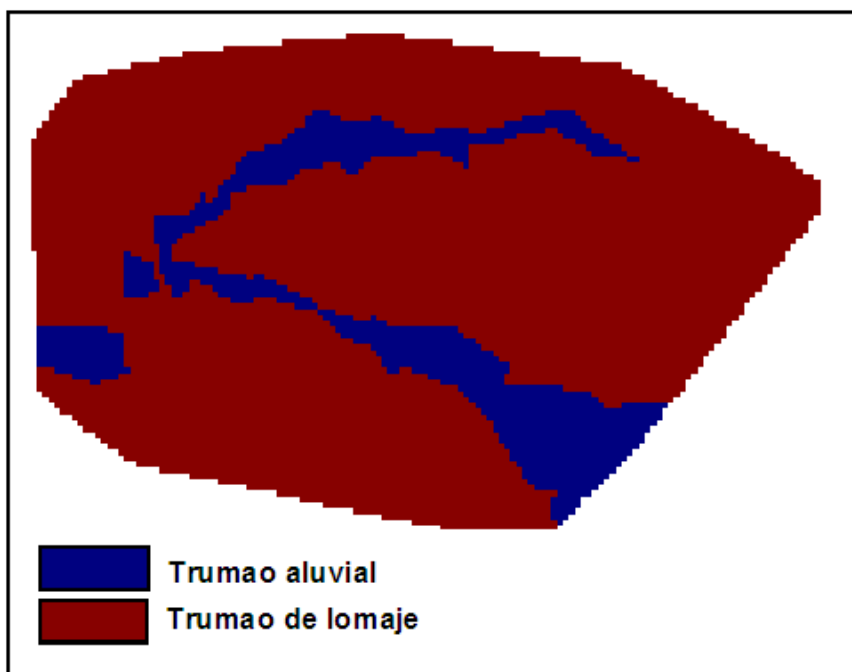


### 3.2.2 Tipo de suelos para la simulación

A partir de la información descrita en 2.1.3 y en función de la codificación que utiliza Wasim para leer la información, se origina el modelo que representa los tipos de suelo en la zona de estudio. Para ello se han incorporado las zonas de suelos trumaos aluviales como franco arenoso (sandy loam) y trumaos de lomaje como franco limoso (silty loam).

La **figura 3.7** muestra la cobertura resultante de uso de suelos, en formato de celdas, para la simulación.

**Figura 3.7 :** Tipos de suelo para la simulación. Cuenca río Cruces

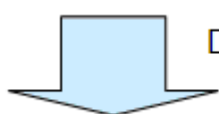
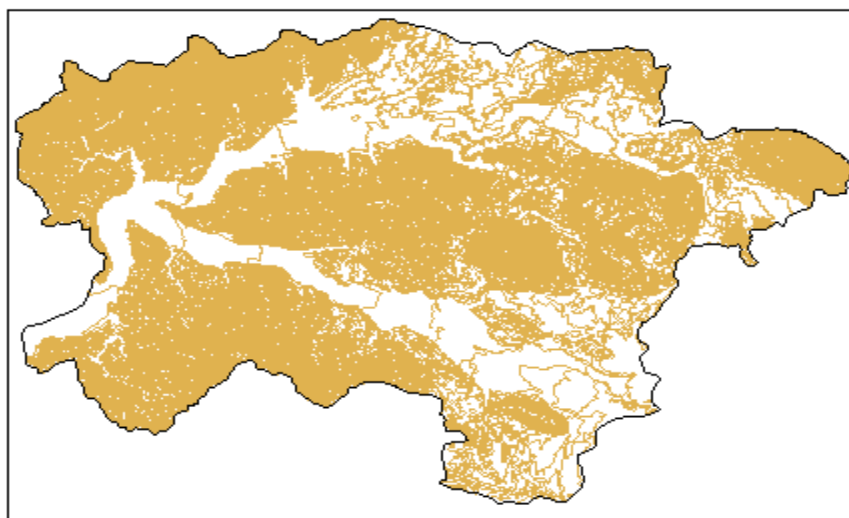


### 3.2.3 Modelo de elevación digital

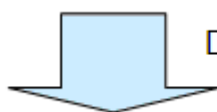
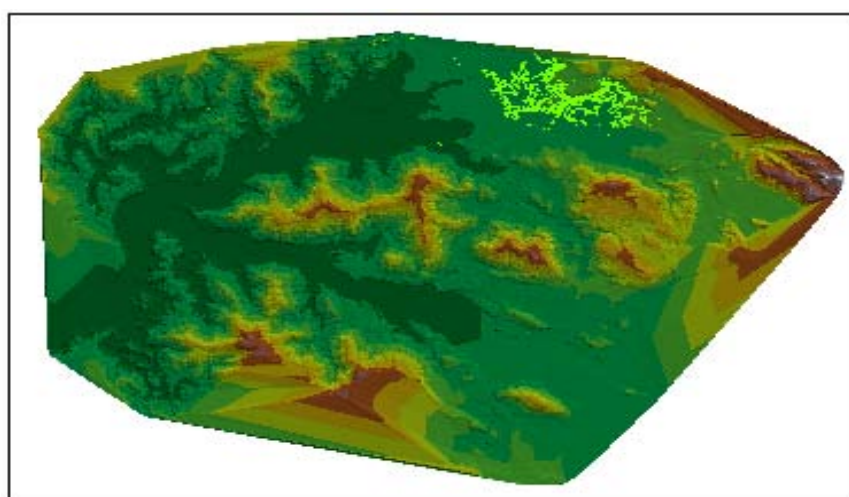
La **figura 3.8** muestra el proceso para derivar el modelo de elevación digital (MED) para la zona en estudio, en el formato necesario para la modelación, basado en la información de curvas de nivel en formato digital que se dispone. En la representación final del MED, los colores más calidos representan las zonas más elevadas y los colores azules representan altitudes menores.



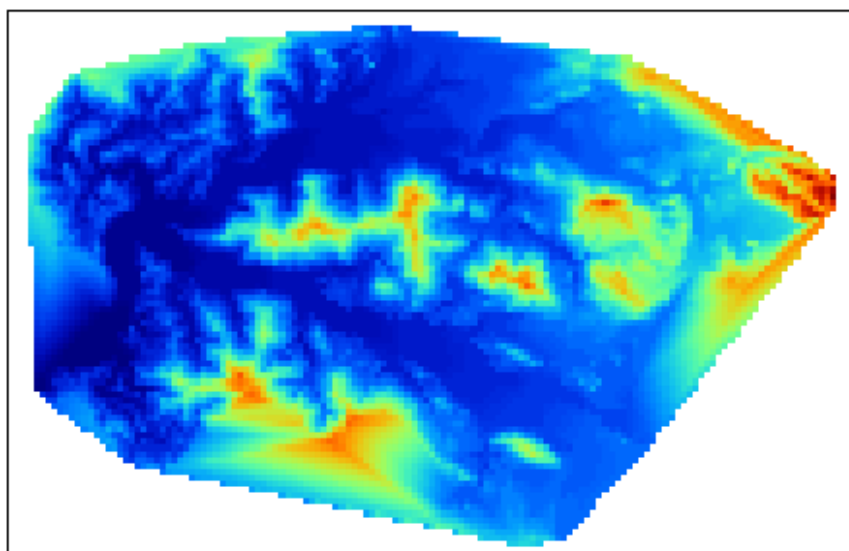
**Figura 3.8:** Secuencia para derivar DEM en formato de celdas



De curvas de nivel a TIN



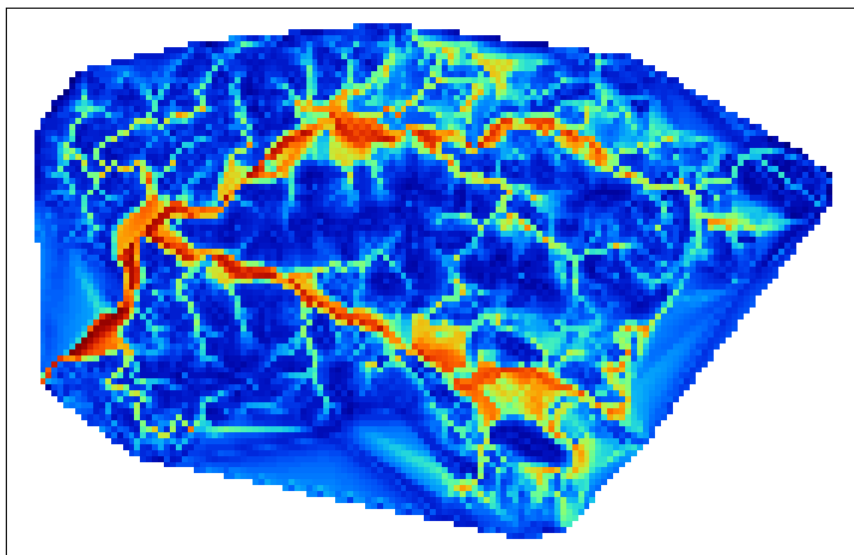
De Tin a raster



### 3.2.4 Índice Topográfico

La **Figura 3.9** es una representación gráfica de los valores numéricos que toma el índice topográfico en las diferentes celdas. Los colores más cálidos representan una mayor susceptibilidad a saturarse, y esta zona lógicamente coincide con el lugar en que se ubican los cauces y sus riveras.

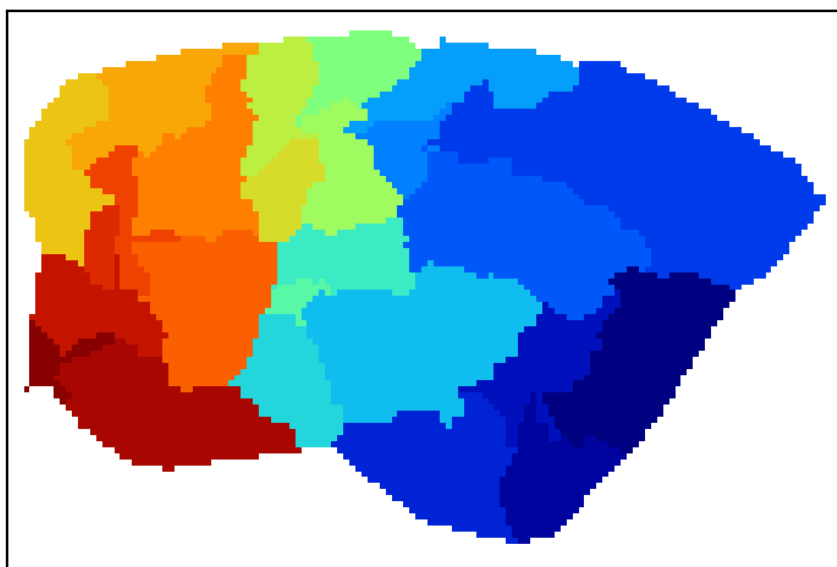
**Figura 3.9:** Representación gráfica del índice topográfico. Cuenca río Cruces



### 3.2.4 Subcuencas

La figura 3.10, muestra las subcuencas que se generan para la cuenca, considerando el tamaño de grilla. Se generan 25 subcuencas.

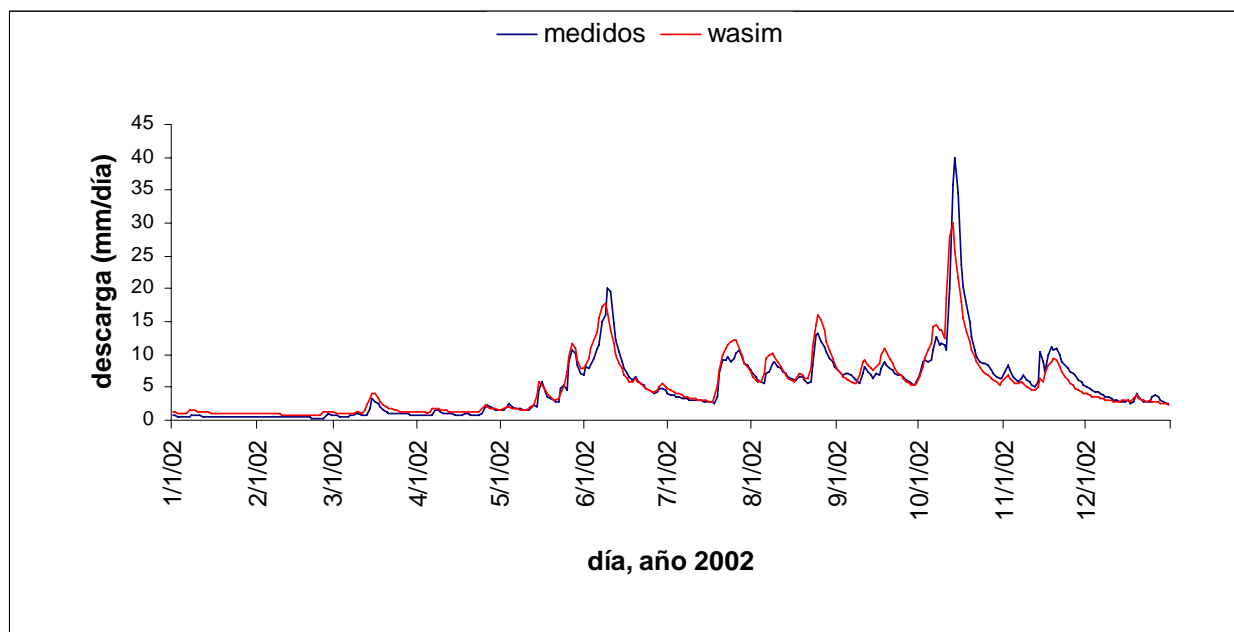
**Figura 3.10:** Representación gráfica de las subcuencas. Cuenca del río Cruces



### 3.3 CALIBRACION DEL MODELO

En la **figura 3.11** se muestran el resultado de la simulación efectuada por WaSiM y los valores medidos para la calibración, efectuados para el año 2002.

**Figura 3.11:** Calibración del modelo. Cuenca río Cruces.



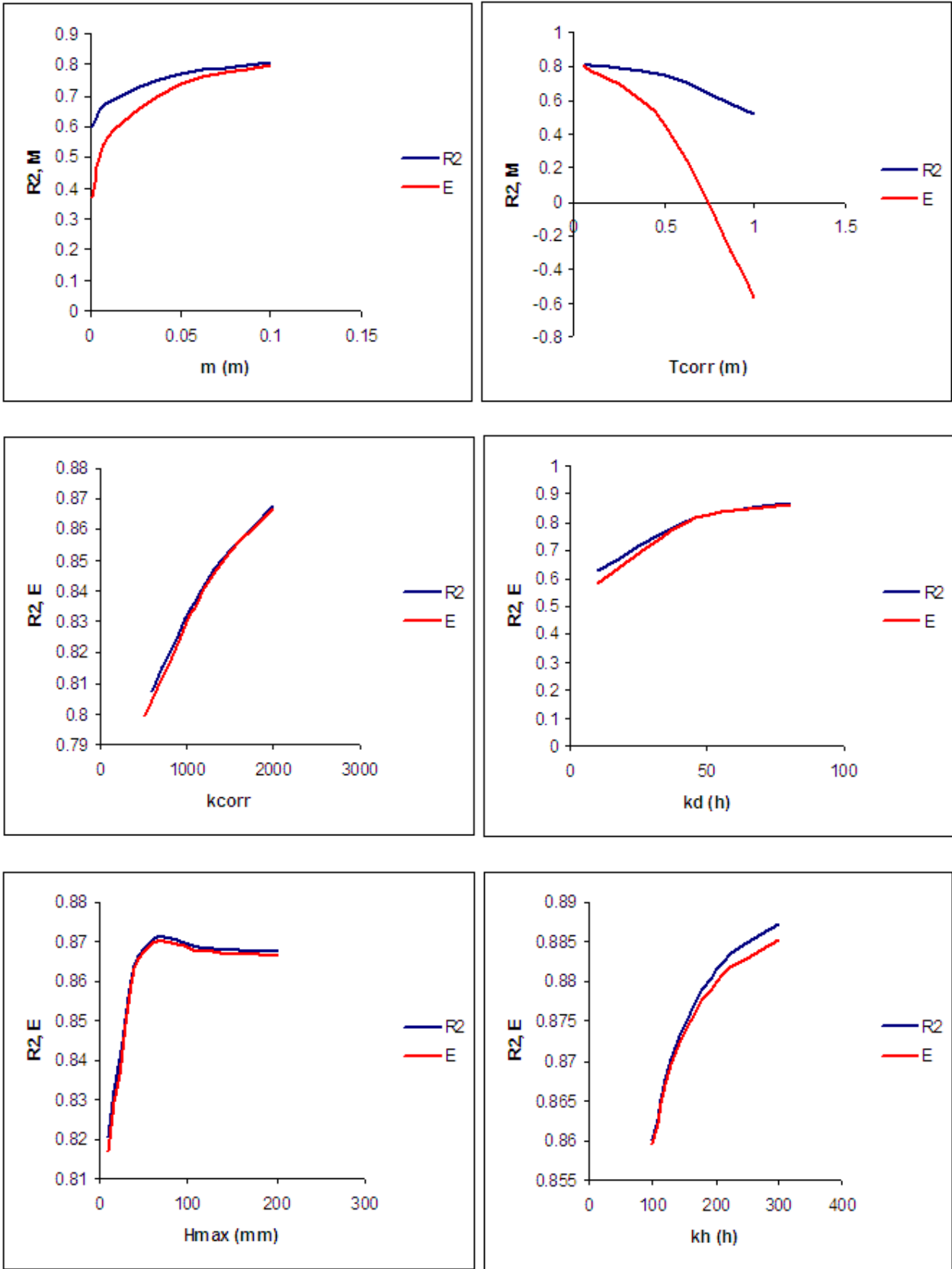
Al analizar los resultados, se obtiene que la escorrentía total registrada durante el periodo corresponde a 1902mm. Este valor difiere levemente respecto del valor medido de 1860mm, equivalente a un error de 2.26%.

Comparando escorrentía a nivel diario, para el periodo se obtiene un coeficiente de determinación de 0.887 y un coeficiente de eficiencia de 0.885, lo cual indica, en general una buena aproximación tanto punto a punto.

Si bien los resultados obtenidos son satisfactorios, observando en forma más detallada la respuesta del modelo se observa que en el periodo de estiaje el modelo sobreestima el flujo base, sin embargo, se advierte sensibilidad en la respuesta respecto a eventos puntuales de precipitación, ajustándose satisfactoriamente a los valores observados en la estación seca. En el periodo de invierno se observa una buena estimación del flujo base, no obstante algunos peak son levemente sobreestimados, en tanto que el modelo no es capaz de lograr una buena aproximación del caudal máximo diario registrado en el periodo, dado que se obtuvo un valor bastante inferior al valor observado.

Como se indicó en la metodología, la calibración es un proceso de ensayo y error, variando los parámetros del modelo, hasta lograr un buen ajuste de éste. En la **figura 3.12** se muestra la variación de los estadígrafos utilizados para evaluar el ajuste de los resultados en función de la variación de los parámetros de calibración.

**Figura 3.12:** Distribución de la eficiencia del modelo como reacción a la variación de los parámetros de calibración



La calibración, mostrada en la figura, se efectúa paso a paso, es decir, se parte ajustando un parámetro (evaluando en base a los coeficientes  $R^2$  y de eficiencia), para luego continuar con los demás. Al ajustar cada uno también se consideran los valores asignados a los demás parámetros, de modo que a partir del segundo parámetro calibrado, al evaluar su eficiencia se considera el ajuste del parámetro en cuestión y la de los parámetros calibrados previamente, de tal forma que el ajuste mejora en cada paso.

De la gráfica se puede observar además que en todos los casos el coeficiente  $R^2$  se encuentra por sobre el coeficiente de eficiencia, dado que este último está más influenciado por los valores extremos.

La **tabla 3.2** se muestran los valores óptimos de los parámetros que se calibraron que se obtuvieron para la cuenca completa.

**Tabla 3.2:** Valores adoptados para los parámetros de calibración

Parámetro	Descripción	Valor óptimo
m	Parámetro de recesión de flujo base	0.1(m)
$T_{corr}$	Factor de corrección para transmisibilidad del suelo	0.05
$K_{corr}$	Factor de corrección para la infiltración vertical	2000
$k_D$	Constante de recesión del reservorio único. Escorrentía superficial	80(h)
$H_{max}$	Capacidad de almacenamiento máximo de interflujo	60(mm)
$k_H$	Constante de recesión del reservorio único. Interflujo	300(h)

En este caso, para la mayoría de los parámetros de calibración, el valor óptimo se registró en el límite de su rango de variación, sin embargo, en general el valor óptimo corresponde a un valor intermedio.

### 3.4 VALIDACION DEL MODELO

Se validó el modelo para el periodo comprendido entre el 01 de enero al 31 de diciembre de 2004.

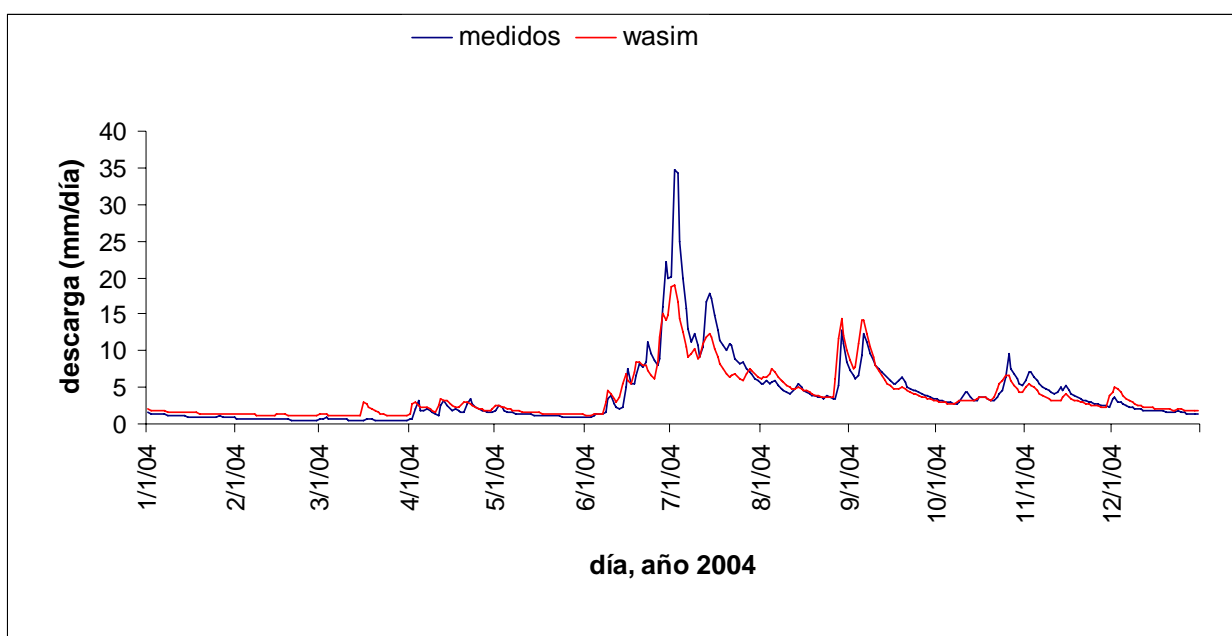
Se obtuvo una escorrentía total del periodo de 1419mm, mientras que el valor medido por la estación limnimétrica es de 1441mm, lo que significa que el error respecto al total anual alcanza al 1.53%.

Además, del análisis a nivel diario, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.85 y un coeficiente de eficiencia de 0.81, lo cual representa una buena aproximación del modelo respecto a los valores medidos, aunque es apreciable una subestimación del

peak máximo registrado para el periodo, lo que de alguna forma se representa en la disminución en el resultado del coeficiente de Nash-Sutcliffe, tal como ocurrió en el caso de la validación del modelo.

La **figura 3.13** muestra los valores de descarga obtenidos para el periodo de validación.

**Figura 3.13:** Validación del modelo



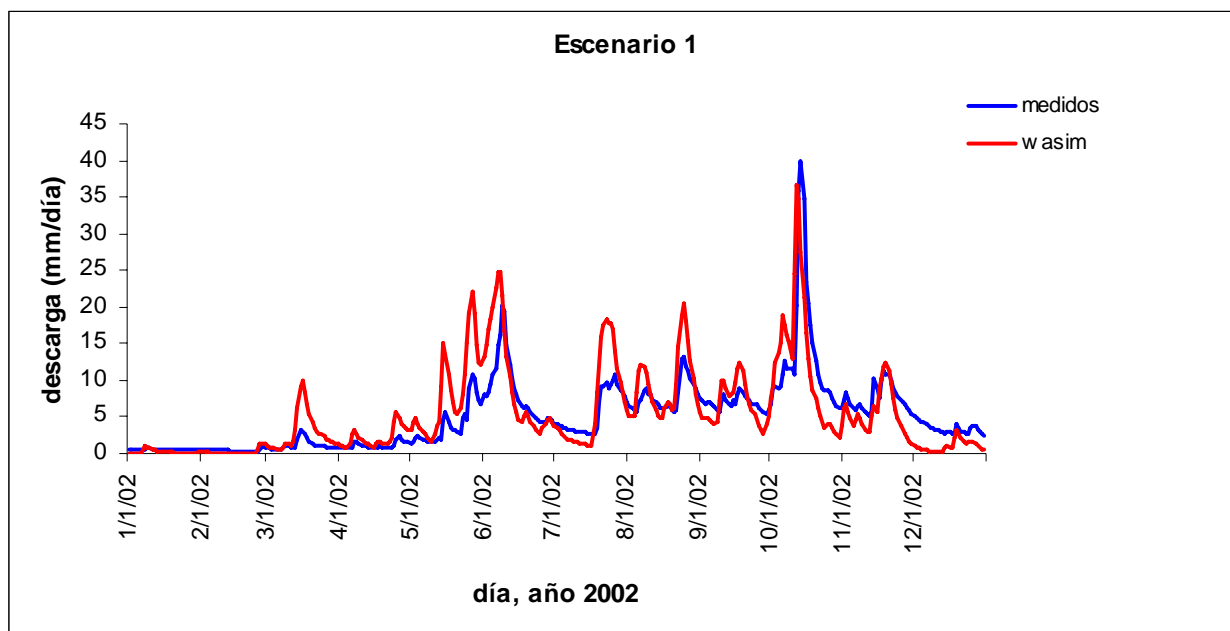
Es notorio que pese a que las precipitaciones registradas para el periodo de calibración correspondan a un año de características meteorológicas diferentes (bastante más lluvioso) al utilizado en la validación, el modelo de igual forma presenta, en general, muy buenas correlaciones respecto de los caudales observados.

### 3.5 ANALISIS DE ESCENARIOS

Se analizaron 5 diferentes escenarios utilizando WaSiM para el año 2002. Se analiza los resultados de descarga obtenidos para cada uno de los escenarios, respecto de los datos medidos, y se efectúan comparaciones entre los resultados obtenidos de la modelación de escenarios entre sí.

En la **figura 3.14** se muestra los resultados de escorrentía del escenario 1, correspondiente a praderas.

**Figura 3.14:** caudales medidos y resultantes para escenario 1



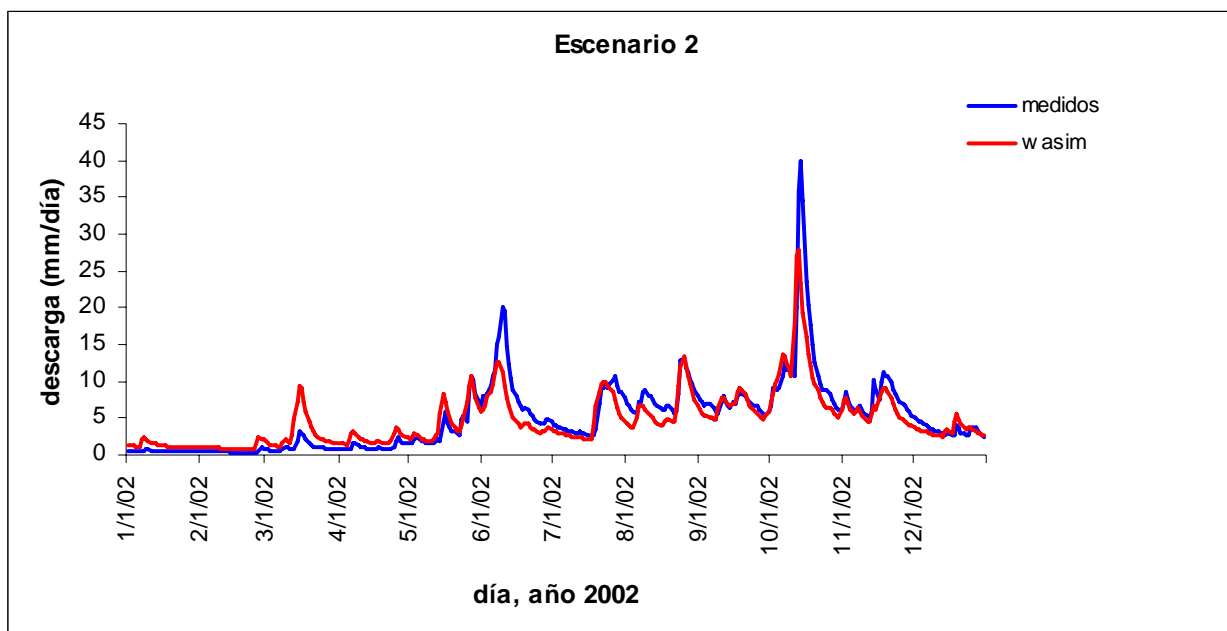
Este escenario origina una alta tasa de escurrimiento, así, a nivel anual se obtienen 2012mm de escorrentía y por ende un coeficiente de escorrentía 0.78.

Se observa además una alta variabilidad en la escorrentía, con valores muy pequeños en periodo de estiaje y crecidas muy bruscas cuando se producen precipitaciones, lo cual se reflejada numéricamente en el valor que se obtiene para la desviación estándar de 6.05mm.

Las altas tasas de escurrimiento y las fuertes variaciones en el caudal se producen debido a que las praderas no son capaces de retener el flujo en la misma proporción que lo realiza la vegetación arbórea, de tal forma que una parte importante del agua que precipita escurre, reduciendo notablemente el flujo base.

La **figura 3.15** muestra los valores simulados para el escenario 2, junto a los valores medidos.

**Figura 3.15:** caudales medidos y resultantes para escenario 2



En esta situación las tasas de escurrimientos disminuyen considerablemente respecto a los valores medidos. A nivel anual se obtiene una escorrentía de 1746mm y un coeficiente de escorrentía de 0.68.

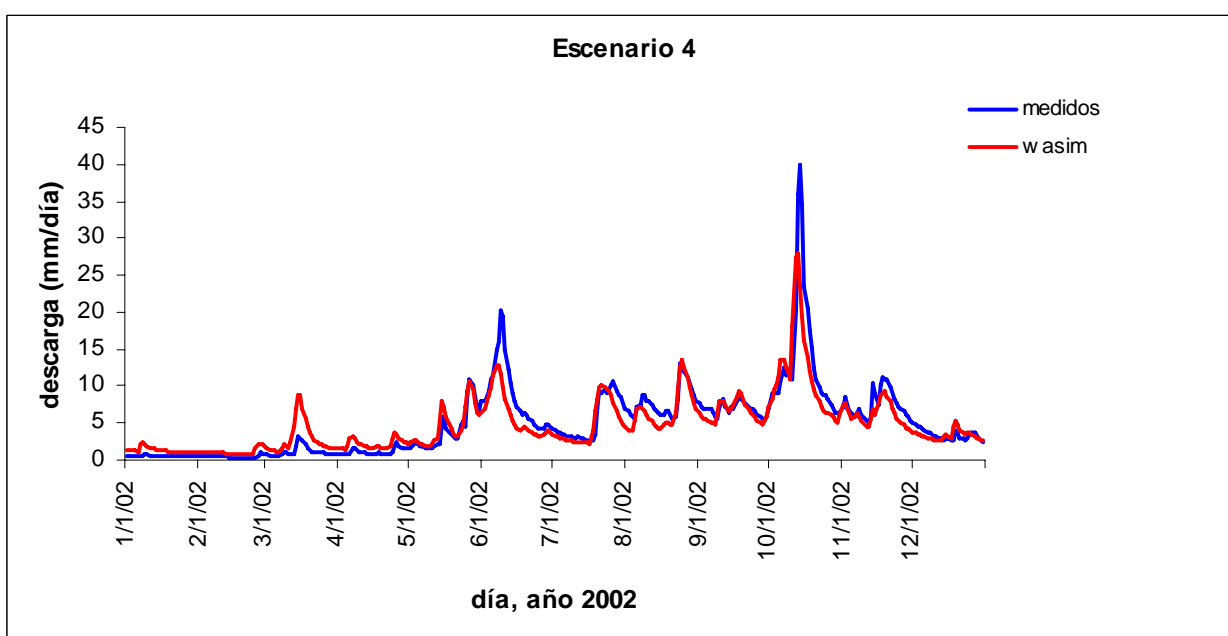
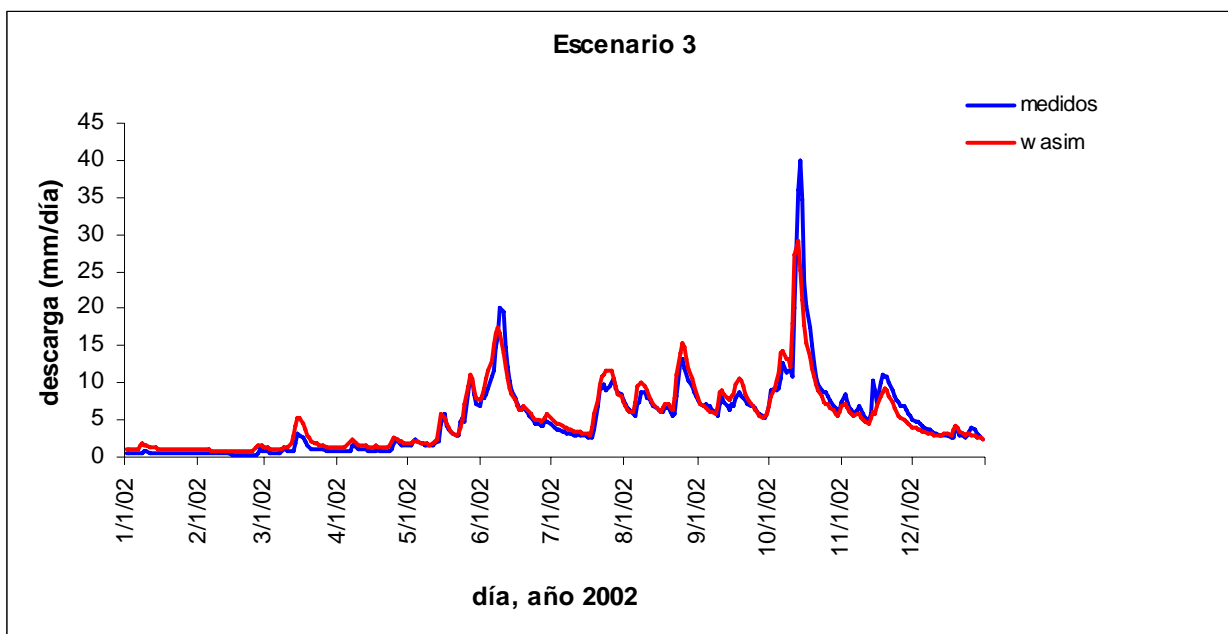
En los primeros meses del año, correspondientes a estación seca, se observa que los caudales en esta cobertura son superiores a los medidos para el uso actual. Además, respecto a la dispersión de los resultados dentro del periodo, se observa que esta cobertura muestra una mayor estabilidad que la situación medida. Lo anterior se corrobora al comparar las desviaciones estándar de la situación medida 5.02 versus la simulada de 3.77.

Los resultados anteriores son coherentes, debido a la capacidad que tienen los bosques de retener la escorrentía gracias a sus raíces mas profundas, permitiendo así transferir flujo desde periodos de mayor precipitación a periodos secos.

En la **figura 3.16** se muestran los valores medidos y los valores obtenidos para el escenario 3 y 4.



**Figura 3.16:** caudales medidos y resultantes para los escenarios 3 y 4



A grandes rasgos, para el escenario 3 se puede observar que los caudales son similares a los medidos. Se obtiene una escorrentía anual de 1939mm y un coeficiente de escorrentía de 0.75, valores semejantes a los obtenidos en terreno (escorrentía anual de 1860 y coef. escorr de 0.72). Comparando la distribución de los datos, se obtuvo una desviación estándar de 4.4mm, menor que la obtenida en terreno, aunque esta discrepancia es fundamentalmente producida por diferencias propias de la calibración.

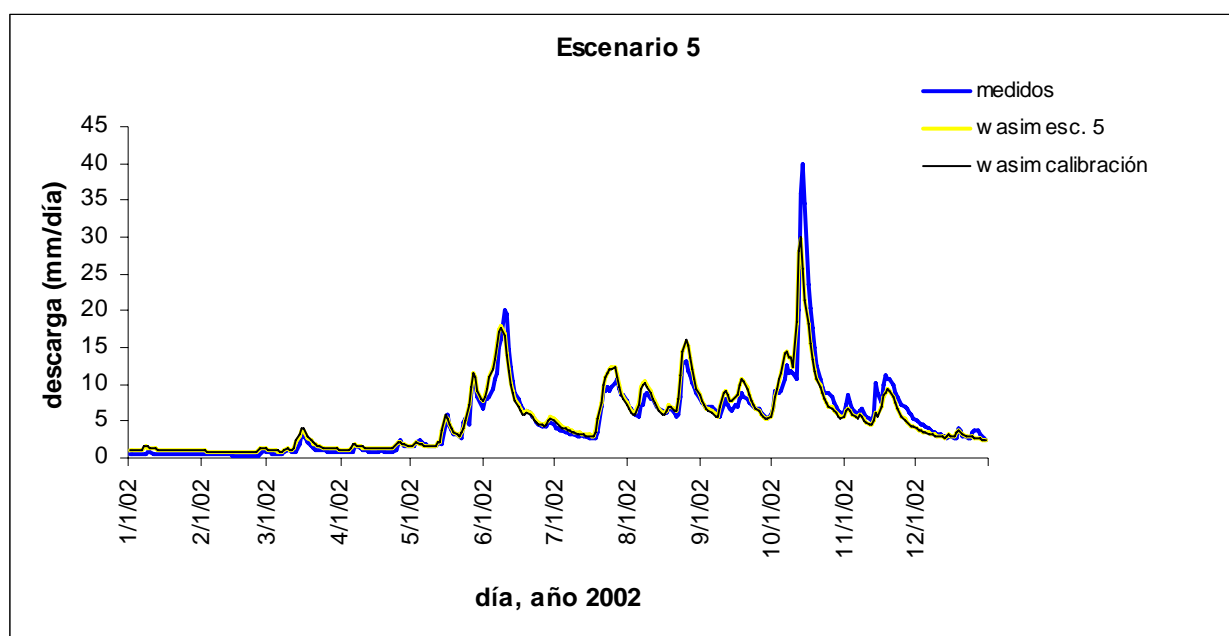
En el escenario 3 se puede apreciar fundamentalmente el efecto de la pendiente en cuanto a la producción de agua. Éste, a pesar de que cuantitativamente en su gran mayoría está constituido por pradera, arroja valores similares a los medidos en la estación limnimétrica, dado que los mayores escurrimientos se producen en zonas de mayor pendiente, donde se encuentra cubierto por bosques, los cuales ayudan a la retención de la esorrentía.

Para el escenario 4 se produce una importante disminución en la esorrentía comparado con los datos medidos, obteniendo una esorrentía anual de 1765mm y un coeficiente de esorrentía de 0.68. Se obtiene, para esta cobertura una desviación estándar de 3.81mm, también, inferior al valor obtenidos de las mediciones.

Para el escenario 4, si bien las áreas de mayor pendiente se encuentran desprotegidas, estas solo representan una pequeña área respecto al total de la cuenca, luego, el predominio del uso de bosques impide un escurrimiento rápido, manteniendo a su vez altos niveles de caudal en estación seca.

La **figura 3.17** muestra los valores simulados para el escenario 5, los valores medidos, pero también se incluyen los valores que arroja el modelo para la calibración para el uso actual.

**Figura 3.17:** caudales medidos y simulados para escenario 5 y la calibración



El escenario 5, respecto al uso actual, significa un cambio en el uso del suelo, en proporción al área total de la cuenca de aproximadamente un 5.7% (area que pasó de uso agrícola a plantaciones forestales).

Para este escenario se obtiene sólo un pequeño cambio en la escorrentía, respecto a los valores medidos, fundamentalmente causados por diferencias producto de la calibración. Se obtiene una escorrentía anual de 1916mm presentando una disminución en el tiempo de 13mm respecto del valor que arroja el modelo para la calibración, para el uso actual, es decir, entre el escenario 5 y la calibración se produjo una reducción de aproximadamente 0.7% en la escorrentía.

Si bien, este descenso en la descarga en el tiempo se justifica, ya que en los años '70, existía una mayor cantidad de superficie de uso agrícola, lo cual favorece el escurrimiento, la diferencia no es significativa. Se obtiene una desviación estándar de 4.54mm y un coeficiente de escorrentía de 0.74, valores también muy similares a los obtenidos para la calibración.

Estos resultados coinciden con lo que plantean autores como Keenan *et al.* (2004), quienes plantean que, para casos en que la cuenca es afectada en un porcentaje menor al 20%, es difícil detectar un impacto.

En la **tabla 3.3** se presenta un resumen de los resultados que permiten caracterizar la descarga para las diferentes coberturas de uso de suelo, para el año 2002.

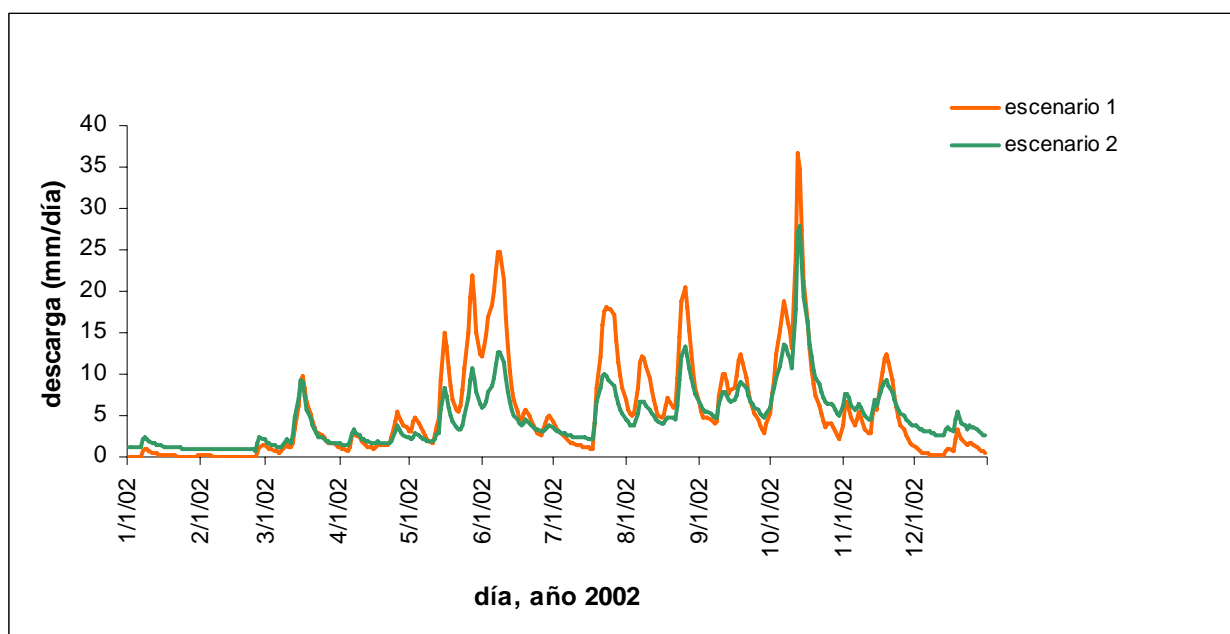
**Tabla 3.3:** Coeficientes que caracterizan la descarga para cada escenario de uso de suelo

Escenario uso suelos	Escorr. media (mm)	Desviación estándar (mm)	Escorr. anual (mm)	Coeficiente escorrentía (Q/pp <sub>media</sub> )
Real (datos de estaciones)	5.10	5.02	1860	0.72
Calibración	5.21	4.52	1902	0.74
Escenario 1	6.77	6.05	2012	0.78
Escenario 2	4.78	3.77	1745	0.68
Escenario 3	5.31	4.40	1939	0.75
Escenario 4	4.84	3.81	1765	0.68
Escenario 5	5.25	4.54	1916	0.74

De la tabla se puede observar claramente (de las escorrentías anuales o coeficientes de escorrentía) que la mayor escorrentía la genera el escenario 1 y la menor lo genera el escenario 2. Observando las desviaciones estándar, también las mayores dispersiones, respecto del promedio de los resultados, la genera también el escenario 1 y las menores el escenario 2.

A continuación, en la **figura 3.18**, se efectúa una comparación entre los escenarios 1 y 2, correspondientes a los cambios de uso de suelos más extremos, en cuanto a la generación de escorrentía.

**Figura 3.18:** caudales resultantes para los escenarios 1 y 2



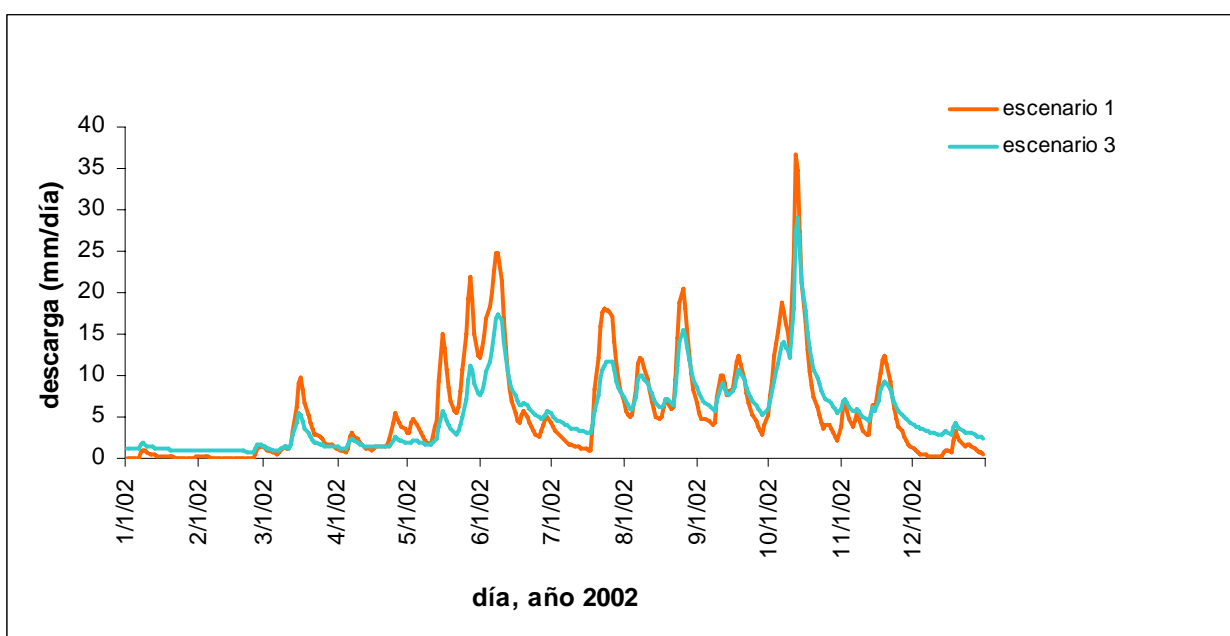
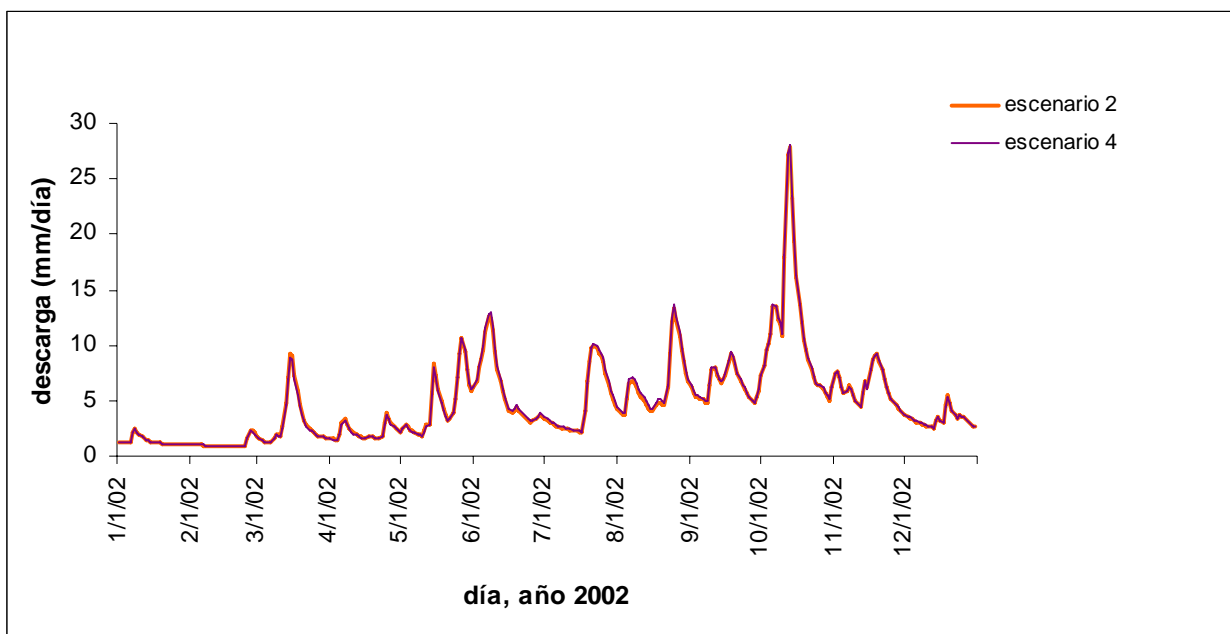
Al comparar los escenarios 1 y 2 se analiza el cambio que se produciría al pasar de una cobertura de 100% pradera a 100% bosque (o viceversa) en la cuenca del río Cruces. Se observa, en cuanto a la producción anual de agua, que se origina, a partir de este cambio, una diferencia anual de 266mm, lo cual es un monto significativo (reducción del 13.2%) que coincide con los resultados de modelaciones efectuadas por otros autores como Sun *et al.* (2006) quienes encontraron diferencias de hasta 300mm en zonas tropicales de China.

Además al comparar los resultados obtenidos para los tres primeros meses, donde las descarga se obtiene fundamentalmente de las reservas de agua (flujo base), se observa que el escenario cubierto por bosques genera 63mm más de escorrentía que el cubierto por praderas, explicitando las diferencias que existen entre ambas coberturas en cuanto a la capacidad de retención de agua.

Otro factor interesante de comparar es la velocidad de las crecidas para ambos escenarios. Observando la pendiente de la curva de descarga versus tiempo, cuando se producen las mayores crecidas se puede ver claramente que para el escenario 1 el nivel del agua aumenta con mayor rapidez que para el escenario 2.

A continuación, la **figura 3.19** comprara el escenario 2, respecto del escenario 4 y también el escenario 1, respecto del escenario 3.

**Figura 3.19:** caudales resultantes para los escenarios 1 y 4, y 3 v/s 1



Comparando los valores obtenidos de los escenarios 4 y el 2, éstos arrojan valores muy similares, ambos fundamentalmente influidos por la superficie que ocupa el uso dominante (bosque) en la cuenca. En cambio, al comparar el uso 1 con el 3, donde existe una marcada diferencia en la producción de escorrentía, a pesar de la gran influencia del uso praderas respecto del área total, originan resultados muy diferentes, explicitando el efecto que puede producir la protección de zonas de mayor pendiente, en la generación de escorrentía.

## **CAPITULO IV: CONCLUSIONES**

Dado el actual contexto de cambio climático y la necesidad de cuantificar las repercusiones de la actividad humana sobre el régimen hidrológico se efectúa este estudio, cuyo propósito es identificar la variación de la respuesta hidrológica ante la modificación de la cobertura vegetal en la cuenca del río Cruces, que con sus 1740 Km<sup>2</sup> de superficie cae dentro de la denominación de cuenca grande. Para ello, dado el carácter no lineal del comportamiento de la naturaleza, se utiliza el modelo de simulación hidrológica WaSiM que permite la inclusión en forma directa de cambios en el uso de suelos en la cuenca.

Una vez recolectados y procesados los datos para la modelación se procede a la calibración del modelo. El periodo de calibración de un año es un periodo suficiente, dado el carácter fluvial de la cuenca, lo que a su vez se respalda en el buen ajuste, respecto a valores medidos de descarga, para el periodo de calibración y validación, pese a las diferencias existentes respecto a las precipitaciones registradas en ambos periodos. Lo anterior da una idea respecto a la eficiencia y la comprensión de los procesos del modelo WaSiM, el que si bien ha sido probado ampliamente en investigaciones orientadas a investigar efectos de cambio de uso de suelos en pequeñas cuencas, también es aplicable a cuencas de mayor tamaño, transformándose así en una herramienta eficaz y práctica para la planificación y la toma de decisiones.

Por otra parte, y aunque este no era un aspecto trascendental para este estudio, se concluye que si bien el modelo es capaz de caracterizar el comportamiento del flujo con un buen nivel de ajuste como de proveer una buena aproximación de caudal a nivel anual en base a datos diarios de precipitación, no arrojó datos suficientemente exactos para predecir los caudales máximos diarios (considerando esta resolución de datos de entrada), ya que tanto para el caso de la calibración como la validación, estos valores fueron subestimados por el modelo.

A partir del análisis de escenarios se observa claramente la sensibilidad de la respuesta hidrológica a nivel de cuenca ante los cambios en la utilización del suelo, en base a la comparación de los efectos que suceden al cubrir la cuenca completamente con pradera versus el caso en que está completamente cubierta con plantaciones forestales. Esto produce efectos sobre la velocidad de las crecidas, cantidad de flujos base tanto en invierno como en verano, flujo total y la dispersión de los datos obtenidos de descarga. Esto es debido a que los bosques influyen sobre la cantidad de precipitación que alcanza la tierra, tienen mayor capacidad de retención de flujo gracias a sus raíces más profundas y a la intercepción de sus hojas, mientras que las praderas

oponen menor resistencia a la escorrentía, y por ende arrojan un coeficiente de escorrentía superior al que produce la cobertura de bosques.

También se estudió el efecto de la distribución de los usos, pudiéndose observar la influencia que tiene la pendiente sobre el proceso de escorrentía. El modelo demuestra que al dejar las mayores pendientes provistas de vegetación arbórea ayuda a contener una parte importante de la escorrentía. Así se deduce que si bien las propiedades y demandas de cada uno de los usos son un factor importante a considerar, también lo es la distribución de ellos dentro del área a intervenir.

A partir de la derivación de una cobertura representativa del escenario que existía en los años '70, es decir, previo a la explosión de la industria forestal impulsada por importantes subvenciones estatales, se determina que no se ha producido una diferencia significativa en la descarga del río Cruces por este efecto, ya que el cambio en la utilización de suelos no fue lo suficientemente significativo en relación a la extensión total de la cuenca, estimándose ésta en casi un 6%. Este resultado coincide con lo observado por Fahle (2007) en algunas de las cuencas que él estudió, en las que reafirma la idea que en aquellos casos en que el cambio no supera el 20% el cambio no es perceptible.

Finalmente también se comprobó que gracias a los avances tecnológicos, actualmente los modelos han aumentado su complejidad. El hombre ha ido entendiendo el efecto de cada elemento en particular que pudiera afectar el flujo de las aguas, como son las hojas, las raíces, tipo de suelos, detalles en cuanto a la topografía, clima, entre otros. Se han incluido en los modelos dimensiones temporales y espaciales, para satisfacer una necesidad creciente de estudiar las consecuencias de diversos factores tanto de origen antrópico como natural, sobre procesos hidrológicos y entender con mayor exactitud la magnitud de su respuesta.

## BIBLIOGRAFIA

Andréassian, V. 2004. Wathers and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291:1-27.

Blume T. 2007. Hydrological processes in volcanic ash soils- Measuring, modelling and understanding runoff generation in an undisturbed catchment. Tesis Doctoral. University of Potsdam, Alemania. Pp.: 101-123.

Buytaert W., R. Célleri, B. De Bièvre, J. Deckers, G. Wymenre. S.F. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el sur de Ecuador con Top Model. Universidad de Cuenca, Cda, Ecuador (Disponible en : [http://www.infoandina.org/apc-aa-files/4a35c8d167fc21e295706fff5f781c6c/Comportamiento\\_paramo.pdf](http://www.infoandina.org/apc-aa-files/4a35c8d167fc21e295706fff5f781c6c/Comportamiento_paramo.pdf). Consultado el 29 de abril de 2008).

Calder, I., 1992. Hydrologic effects of land-use change. In: Maidment, D. (Ed.), *Handbook of Hydrology*. Mc Graw- Hill, Estados Unidos, p. i. (Original no consultado, citado por Pizarro *et al.* En Pizarro R., S. Araya, C. Jordán, C. Frias, J. Flores (2006). The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology* 327: 249-257).

Calder, I., 1999. The blue revolution: Land use and Integrated Water Resources Management Earthscan Publications. London.. (Original no consultado, citado por Keenan *et al.* En Keenan, R.J; Parsons, M; O'Loughlin, E; Gerrand, A; Beavis, S; Gunawardana, D; Gavarn, M; Bugg, A. 2004. *Plantations and Water Use: A Review*. Victoria, Forest & Wood Products Research & Development Corporation. Pp.: 3-5).

Chow, V.T.; D. Maidment, L Mays. 1993. *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill, Pag.: 2-5.

Costa, M.H., Botta, A., Cardille, J.A., 2003. Effects of largescale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology* 283: 206–217.

Croke A, W Merritt, A Jakeman. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 291: 115-131.



Donoso C. 1981. Tipos forestales de bosques nativos en Chile. Documento de trabajo n° 38, Serie de Investigación y Desarrollo (CONAF/FAO/PNUD). Santiago. 70 pp (Original no consultado, citado por Nunes A. 1996. En Nunes A. 1996. Análisis del sistema de gestión de los recursos naturales en la cuenca del río Cruces comuna de San José de la Mariquina, provincia de Valdivia. Tesis Magister en Ciencias. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Pp 80- 83).

Donoso C., A. Lara. 1996. Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. Extraído de "Bosques Templados del Sur de Chile y Argentina. Universidad de Chile. pp 363-387 (Original no consultado, citado por Nunes A. 1996. En Nunes A. 1996. Análisis del sistema de gestión de los recursos naturales en la cuenca del río Cruces comuna de San José de la Mariquina, provincia de Valdivia. Tesis Magister en Ciencias. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Pp: 80- 83).

Fahle, C. 2007. Evaluación de los efectos potenciales de pérdida de producción de agua en grandes cuencas a causa de plantaciones forestales, de las regiones VIII y IX de Chile. Tesis Grado Universidad Austral de Chile, Facultad Ciencias. Forestales. Pp: 45.

Felisícimo A. 1994. Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales (Original no consultado, citado por Pusineri G., R. Pedraza, C. Lozeco En: Pusineri G., R. Pedraza, C. Lozeco (s.f). Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas- Universidad del Litoral. Argentina. Pp: 1-8).

Hibbert, A.R., 1967. Forest treatment effects on water yield. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Eds.), Forest Hydrology, Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar, Pergamon Press, Oxford. Pp: 527–543.

Keenan, R.J; Parsons, M; O'Loughlin, E; Gerrand, A; Beavis, S; Gunawardana, D; Gavarn, M; Bugg, A. 2004. Plantations and Water Use: A Review. Victoria, Forest & Wood Products Research & Development Corporation. Pp.: 3-5.

Kleeberg, H.-B., M. Becker (1998). ASGi Handbuch. En Theiner D. Invmod/Wasim. Institute of Hydraulic Engineering. (Disponible en: [http://www.dps.uibk.ac.at/~marek/projects/invmod\\_wasim/Hydrological%20models.htm](http://www.dps.uibk.ac.at/~marek/projects/invmod_wasim/Hydrological%20models.htm). Consultado el 29 de abril de 2008).

Maderey L., A. Jiménez. 2005. Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Pp.: 15 a 28.

Meunier, M., 1996. La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. Revista Unasyva 47 (185), 29–37. (Original no consultado, citado por Pizarro R., S. Araya, C. Jordán, C. Frias, J. Flores .2006. En Pizarro R., S. Araya, C. Jordán, C. Frias, J. Flores .2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. Journal of Hydrlogy 327(1): 249-257).

Ministerio de Obras Públicas. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Valdivia. Dirección General de Aguas. Pp.: 123.

Nash J., J. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual model, I, A discusión of principios, J. Hydrol (Original no consultado, citado por Legates *et al.* En: Legates D., G. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic an hydroclimatic model validation. Water resources research 35(1): 233-234).

Palacios H. 1992. Simulación hidrológica en la cuenca del río Cruces. Tesis Grado Universidad Austral de Chile, Facultad Ciencias. Forestales. Pp: 180.

Pizarro R., S. Araya, C. Jordán, C. Frias, J. Flores .2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. Journal of Hydrlogy 327(1): 249-257).

Robinson, M., A.L. Cognard-Plancq, C. Cosandey, J. David, P. Durand, H.W. Fuhrer, R. Hall, M.O. Hendriques, V. Marc, R. McCarthy, M. McDonnell, C. Martin, T. Nisbet, P. O’Dea, M. Rodgers y A. Zollner (2003) Studies of the impacts of forests on peak fl ows and base fl ows: a European perspective. Forest Ecology and Management 186: 85-97. (Original no consultado, citado por Oyarzun *et al.* en Oyarzun C., L. Nahuelhual, D. Nuñez (2004). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. Revista Ambiente y Desarrollo 20(3)-21(1): 88-95).

Rodríguez M. 1989. Geografía agrícola de Chile. Editorial Universitaria. Santiago. pp 317. (Original no consultado, citado por Nunes A. 1996. En Nunes A. 1996. Análisis del sistema de gestión de los recursos naturales en la cuenca del río Cruces comuna de

San José de la Mariquina, provincia de Valdivia. Tesis Magister en Ciencias Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Pp: 80- 83).

Shulla J., K. Jasper (2007). Model description WaSiM-ETH. (Disponible en: <http://mail.google.com/mail/?ui=1&attid=0.6&disp=vah&view=att&th=11980ecafc578627>. Consultado el 29 de abril de 2008).

Siriwardena, L; Finlayson, B.L; McMahon T.A. 2006. The impact of land use change on hidrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. Journal of Hydrology 326: 199-214.

Sun, G; Zhou, G; Zang, Z; Wei, X; McNulty, S; Vose, J. 2006. Potential water yield reduction due to forestation across China. Journal of Hydrology 328: 548-558.

Servicio Nacional de Geología y Minería (2003). Mapa Geológico de Chile: Version Digital. Ubicación Geológica Digital, N° 4, CD- ROM, version 1.0, 2003. Pp: 12-14.

Wriedt G., M. Rode (2006). Investigation of parameter uncertainly and identifiability of the hydrological model WaSiM-ETH. Advanced in Geosciences 9: 145–150. 6.