

**Universidad Nacional de Córdoba**  
**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y**  
**Naturales**

**PRÁCTICA SUPERVISADA - Informe Técnico Final**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA SEMI-DISTRIBUIDA EN LA**  
**CUENCA ALTA DEL RIO TERCERO (RIO CTALAMOCHITA,**  
**CÓRDOBA) MEDIANTE EL MODELO SWAT**

**AUTORA: CARRANZA, JOSEFINA**

**TUTOR INTERNO: Dr. Ing. GARCIA RODRIGUEZ, CARLOS MARCELO**

**SUPERVISOR EXTERNO: Ing. ALVAREZ, JAVIER**

**AÑO 2018**



## ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO .....	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. MARCO REFERENCIAL.....	5
1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.....	5
1.3. OBJETIVOS .....	7
1.4. ACTIVIDADES.....	8
CAPÍTULO 2: MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....	9
2.1. Área de estudio .....	9
2.2. Obtención y sistematización de la información .....	10
2.3. Modelación Hidrológica semi-distribuida con SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	13
2.3.1. Introducción al modelo SWAT .....	13
2.3.2. Fundamentos y ecuaciones SWAT.....	14
2.3.3. Aplicación de la modelación hidrológica con SWAT en la cuenca del Río Tercero .....	17
2.3.4. Análisis de datos hidrometeorológicos.....	18
2.3.5. Conclusiones .....	20
CAPITULO 3: Calibración del modelo hidrológico con SWAT-Calibration and Uncertainty Procedures (SWAT-CUP).....	21
3.1. Fundamento de la calibración del modelo hidrológico.....	21
3.2. Introducción al programa SWAT-CUP.....	21
3.3. Calibración del modelo de estudio con SWAT-CUP .....	23
3.4. Resultados de la calibración .....	24
3.5. Validación del modelo de estudio con SWAT-CUP .....	26
3.6. Conclusiones .....	28
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES .....	29
4.1. Modelación Hidrológica y calibración .....	29
4.2. Recomendaciones .....	29
4.3. Reflexiones personales referidas a la experiencia de la Práctica.....	30
CAPITULO 5: BIBLIOGRAFÍA .....	31
CAPITULO 6: ANEXOS .....	32
6.1. Pasos a seguir para modelar en Arc-SWAT .....	33
6.2. Ecuaciones del Modelo Hidrológico SWAT: .....	39
6.3. Pasos a seguir para calibrar en SWAT-CUP .....	46



## ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1: Cuenca del río Carcarañá. ....	7
Imagen 2: Ubicación del área de estudio. ....	10
Imagen 3: Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Tercero.....	11
Imagen 4: Tipo de Suelo de la cuenca del río Tercero.....	11
Imagen 5: Uso de Suelo de la cuenca del río Tercero. ....	12
Imagen 6: DEM de la cuenca del río Tercero ....	12
Imagen 7: Proceso de modelación con SWAT. ....	18
Imagen 8: Caudales simulados vs. observados en SWAT. ....	19
Imagen 9: Caudales observados vs. Caudales simulados. ....	24
Imagen 10: Valores de $R^2$ y NS obtenidos en la calibración. ....	24
Imagen 11 : Valores de $R^2$ y NS como resultado de la calibración del modelo. ....	25
Imagen 12: Caudales observados vs. Caudales simulados (validación). ....	27
Imagen 13: Valores de $R^2$ y NS en la validación.....	27

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de $R^2$ y NS. ....	25
Tabla 2: Caudales observados vs Caudales validados. ....	27
Tabla 3: Tipos de suelo de la cuenca del Río Tercero. ....	35
Tabla 4: Resultados de los caudales mensuales obtenidos con SWAT. ....	38
Tabla 5: Resultados de los caudales mensuales obtenidos con SWATCUP.....	49



## **PRÓLOGO**

El presente trabajo tiene como objetivo principal describir las actividades desarrolladas por el alumno en su práctica profesional supervisada. Dicha práctica tiene como función principal la de trasladar los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera al desarrollo de la vida profesional. Se puede considerar como una primera aproximación del trabajo de un ingeniero civil. Por lo mencionado, resulta importante la ejecución de la práctica supervisada para que el estudiante pueda comenzar a innovar en lo que será su actividad cuando finalice los estudios.

Uno de los obstáculos a vencer al momento de realizar la práctica profesional supervisada es poder interrelacionar los conceptos teóricos aprendidos en las diferentes asignaturas con la aplicación práctica de estos, lo cual no siempre resulta sencillo.

En el caso de la presente práctica, se guio a la misma en el campo de la investigación siendo esta una de las incumbencias de la ingeniería civil. Dicha práctica fue desarrollada en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba bajo la tutoría del Dr. Ing. GarciaRodriguez, Carlos Marcelo y de la supervisión del Ing. Álvarez, Javier quienes brindaron la oportunidad de realizar dicha investigación en el centro. Cabe mencionar que los mencionados profesionales no solo abrieron las puertas a la oportunidad de realizar la práctica, sino que también, brindaron las herramientas necesarias y compartieron sus conocimientos y experiencias en el área para que la práctica fuera llevada a cabo de la mejor manera. Por lo tanto, el presente informe es el resultado de un trabajo en equipo el cual no hubiera sido factible si los ingenieros no hubieran aportado de la manera en que lo realizaron.



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. MARCO REFERENCIAL**

Para abordar la temática propia de dicho trabajo resulta necesario hacer mención sobre los estudios realizados anteriormente. En primera medida, Luis Bas, estudiante de ingeniería civil de la Universidad Nacional de Córdoba, en el marco de su práctica profesional supervisada realizó una modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tercero que sentaron las bases para el informe de práctica supervisada realizado por Sebastián López, estudiante de ingeniería civil de la misma universidad, el cual se titula "MODELACION HIDROLOGICA E HIDRAULICA REQUERIDAS PARA LA GESTION EFICIENTE DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL DURANTE EVENTOS EXTREMOS". Se puede notar que en ambos trabajos se abordó la temática de modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tercero pero tratándose de una modelación por eventos y concentrada. Como conclusión a esto, se puede mencionar que existe un vacío de investigación a cerca de modelación hidrológica continua y semi-distribuida que resulta ser uno de los motivos principales del presente trabajo.

Por otra parte, en la tesis de maestría del Ing. Diaz Lozada, José Manuel se desarrolló el tema " CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ". Esta tesis presenta una descripción exhaustiva de los procesos hidrológicos e hidráulicos dentro de la cuenca del río Carcarañá, de la cual el río Tercero es uno de los principales tributarios a dicho río. A su vez, la cuenca alta del río tercero es dónde se encuentra la naciente del río. Las descripciones en esta tesis de maestría resultaron en un pilar fuerte para el presente trabajo.

Por último, la Universidad Nacional de Córdoba en conjunto con el Ministerio de Agua Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, en el momento de elaboración de esta Práctica Supervisada, se encuentran trabajado en el proyecto de "BASES DEL PLAN DIRECTOR PARA LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ". En este trabajo han abordado distintos aspectos de la cuenca como: un profundo análisis de la hidrología superficial, estudios de variabilidad y cambio climático en la cuenca, inventario de estaciones hidrometeorológicas en la cuenca, estudios de hidrogeología e hidro-geomorfología, entre otros. Sin embargo, hasta el momento no se realizó una simulación hidrológica distribuida de la cuenca del Carcarañá, lo que genera un área de vacancia.

## **1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO**

El principal motivo de este trabajo de investigación es generar una herramienta numérica que permita representar los procesos hidro-meteorológicos a observarse en el transcurso del proyecto denominado RELAMPAGO (Observación de Electrificación, Rayos, y procesos de Meso y Micro-escala con Observaciones Terrestres Adaptables). Este proyecto es desarrollado por: el Instituto para el Avance de los Estudios de la Ingeniería y la



Tecnología (CONICET), el Centro de Estudios y Tecnología de Agua (CETA), Centro Nacional de Estudios Atmosféricos (NCAR, USA), la Universidad de Illinois (USA) y la Universidad del Estado Colorado (USA).

El objetivo principal del proyecto es observar las tormentas convectivas en Argentina ya que los modelos de clima no las representan bien. Estas lluvias se caracterizan por ser lluvias que en poco tiempo generan una gran cantidad de precipitación. Su origen se debe a un inusual ascenso de aire que provoca la condensación del vapor de agua, ésta pasa a estado líquido, y finalmente precipita. Entre otras partes del mundo donde se observan este tipo de comportamientos, Argentina fue elegida por presentar una zona relativamente pequeña de convección, resultando esto favorable para el desarrollo de experimentos móviles.

Por otro lado, la cuenca del río Carcarañá se sitúa en el centro-sudeste de la provincia de Córdoba desembocando al sur de la provincia de Santa Fé. El principal cauce de la cuenca es el propio río Carcarañá el cual desemboca en el río Paraná. El relieve de la cuenca es de llanura y la misma va tomando cierta ondulación hacia el oeste que se transforman en serranías bajas y tiene su punto de máxima altitud en el cerro Champaquí. Este es el punto en donde nace la cuenca y el agua es drenada, en esta zona de la cuenca, a través del río Tercero y el río Cuarto que son afluentes del río Carcarañá.

Por estos motivos, la zona de estudio del proyecto RELAMPAGO se centra en la cuenca del río Carcarañá (Imagen N° 1) y lo que se busca es realizar controles terrestres sobre precipitaciones e inundaciones en dicha cuenca. Como resultado de ello, se caracteriza los flujos terrestres (evaporación, infiltración, etc.) y los impactos hidrológicos de las tormentas (inundación).

El equipo de hidrometeorología que llevará a cabo el proyecto realizará mediciones básicas de las diferentes variables atmosféricas tales como precipitación, temperatura, etc. Además, se instalarán en el transcurso del proyecto torres de flujo para determinar la evapotranspiración y el calor sensible, y se realizarán mediciones de caudales en el río Carcarañá.

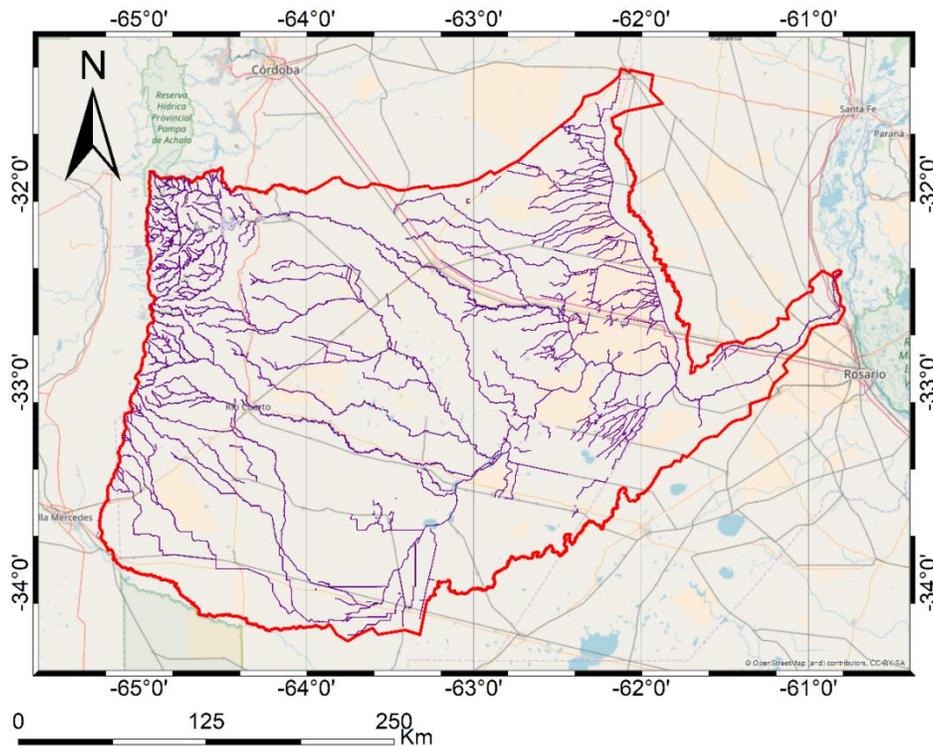


Imagen 1: Cuenca del río Carcarañá.

Como se observa en la imagen, el río Tercero, junto con el Arroyo Tortugas y el río Cuarto, es uno de los principales afluentes del río Carcarañá por lo cual hace que la determinación de caudales en dicho río sea uno de los datos relevantes al momento de modelar la cuenca del río en estudio en el marco del proyecto RELAMPAGO.

Por último, el río Tercero (Río Ctalamochita) surge como efluente del Embalse Fitz Simon, también conocido como Embalse de río Tercero, reservorio donde se capturan los afluentes de los ríos Santa Rosa, La Cruz, Quillinzo y Río Grande. Este embalse se posiciona dentro de la cuenca alta del río Tercero como el de mayor envergadura, no solo desde el punto de vista de su capacidad de almacenamiento, sino también en los aprovechamientos que aquí se realizan del recurso hídrico: generación hidroeléctrica, pesca, turismo, aprovisionamiento de agua potable y atenuación de crecidas. Además, este lago juega un rol crucial en la regulación de caudales dentro del sistema de embalses emplazados en la cuenca, la mayoría destinados a la generación de energía hidroeléctrica principalmente.

Por todos estos motivos resulta importante modelar la cuenca alta del río Tercero y determinar los períodos de sequía/excesos para hacer una adecuada operación del embalse.

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo de este trabajo es calibrar y validar un modelo hidrológico semi-distribuido en la cuenca alta del río Tercero para que pueda ser utilizada como



herramienta que permita representar los procesos hidro-meteorológicos a observarse en el transcurso del proyecto RELAMPAGO, a la vez, generar un instrumento para optimizar la operación del sistema de embalses en la cuenca.

### **Objetivos Específicos**

- Aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el desarrollo de la carrera de Ingeniería Civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Aprender a utilizar softwares de modelación hidrológica.
- Se busca calibrar y validar un modelo hidrológico semi-distribuido como herramienta de determinación de los períodos de sequía/excesos y, a la vez, generar un instrumento para optimizar la operación del sistema de Embalses en la cuenca, en la cuenca alta del río Tercero (río Ctalamochita, Córdoba).

### **1.4. ACTIVIDADES**

A continuación, se detallan las actividades que se llevarán a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados

1. Recopilación de antecedentes, información hidrológica e hidro-meteorológica de la cuenca y del evento a analizar.
2. Caracterización de la cuenca (Área, longitud de cauces, pendientes, etc.).
3. Visita al área de estudio y recopilación de información in-situ.
4. Calibración del modelo hidrológico en base a la información recopilada.
5. Validación del modelo hidrológico y evaluación de resultados.
6. Elaboración de sugerencias y recomendaciones.
7. Escritura de la práctica profesional supervisada y difusión de los resultados.



## **CAPÍTULO 2: MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

### **2.1. Área de estudio**

La cuenca de estudio es la del río Tercero, ubicada en la Provincia de Córdoba, Argentina, entre los 64° 57' 17" y 64° 21' 20" de longitud Oeste y los 31° 55' 20" y 32° 39' 22" de latitud Sur, conformando un área de 3160 km<sup>2</sup> sobre el faldeo oriental de las Sierras Grandes. Su principal colector, el río Tercero, está formado por los ríos Santa Rosa, Río Grande, Río Quillinzo y Río La Cruz (Imagen 2).

El río Terceronace en las proximidades del cerro Champaquí a una altura aproximada de 2360 m.s.n.m. y la salida tiene una altitud de 540 m.s.n.m. Dicho desnivel, de 1820 m, se alcanza en 307 km. Junto con el río Cuarto, constituye uno de los afluentes del río Paraná. Su cuenca alta corre por el valle de Calamuchita. A poco de salir de ese valle, discurre por el valle de La Cruz hasta ingresar a una penillanura en donde se han construido diversos lagos artificiales entre los que encontramos: cerro Pelado, embalse de Río Tercero y Piedras Moras. Entre las funciones que cumplen los lagos mencionados podemos mencionar como las más relevantes la de obtención de energía eléctrica y regulación del caudal. Además, presentan gran interés para el desarrollo de actividades turísticas e importantes centros de pesca. Cabe destacar que cuando se menciona al cerro pelado hay que diferenciar que se trata de una central hidroeléctrica y dos diques: complejo cerro Pelado-Arroyo Corte y complejo Río Grande. Dicha central es de punta, esto quiere decir a que la misma turbina en los períodos de mayor demanda. A su vez, es una central de bombeo aprovechando los tiempos de menor demanda, generalmente de noche, para restituir el agua.

Aunque las nacientes concretas del río Tercero se ubican sobre las Sierras Grandes, las dos denominaciones por la cual se conoce a este río (Tercero o Calamuchita) recién tienen su origen a partir del vertedero del embalse FitzSimon(Embalse Río Tercero).

Las pendientes, elevadas se distribuyen en: 677 km<sup>2</sup> pendientes entre el 0 y el 5%, 2113 km<sup>2</sup> entre el 5% y el 30% y los 370 km<sup>2</sup> restantes superan el 30%.

En la región predomina el clima sub-húmedo con estación seca y el ecosistema serrano funciona como cuenca adaptadora (conservadora de la humedad de las masas de aire) y reguladora del sistema hidrográfico de la provincia. El estado de conservación y el manejo que de él se haga tiene una gran importancia porque influenciará la calidad y permanencia de la red hidrográfica.

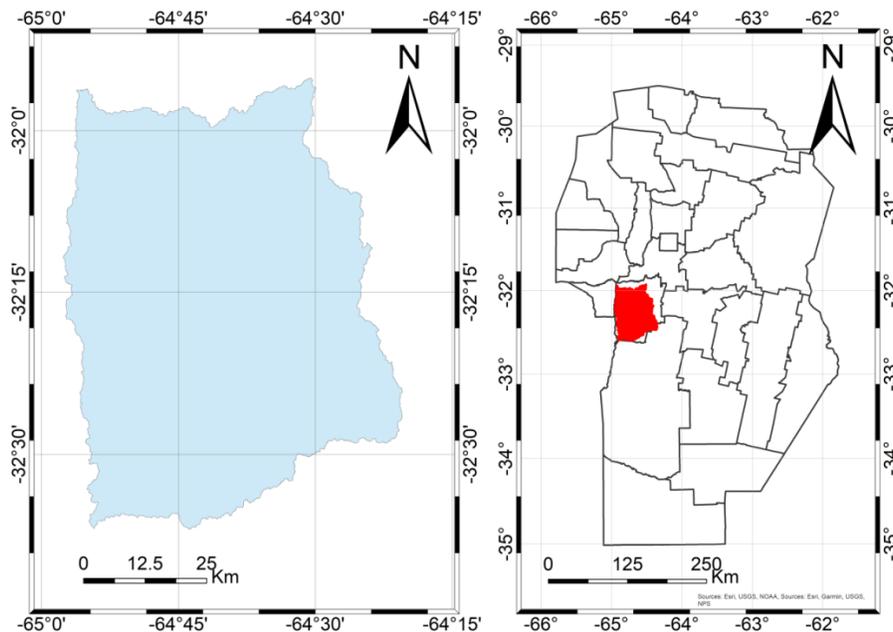


Imagen 2: Ubicación del área de estudio.

## **2.2. Obtención y sistematización de la información**

Para poder hacer un estudio completo y arribar a conclusiones más precisas, se realizará el análisis entre los años 1993 al 2017, para ello, en función de las necesidades del modelo, son precisos datos de:

1. Precipitación
2. Temperatura
3. Tipo de suelo
4. Uso de suelo
5. Topografía del Terreno

La información meteorológica disponible para el área de estudio proviene de la Base de Datos Hidrológica Integrada "BDHI" de la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda de la Nación Argentina (<https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rh-base.php>), que cuenta en la actualidad con estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca (Imagen 3). Las estaciones contienen distintos sensores que proveen datos sobre precipitación, temperatura y niveles del río.

En lo referido a las precipitaciones en la cuenca, los datos proporcionan una serie lo suficientemente completa y continua entre los años definidos para realizar el estudio. Por otra parte, no se disponen de registros de temperaturas de la cuenca y debieron ser estimados a partir de una base de datos climática mundial del ClimateForecastSystemReanalysis "CFSR", con 36 años de registros (del año 1979 al 2014).

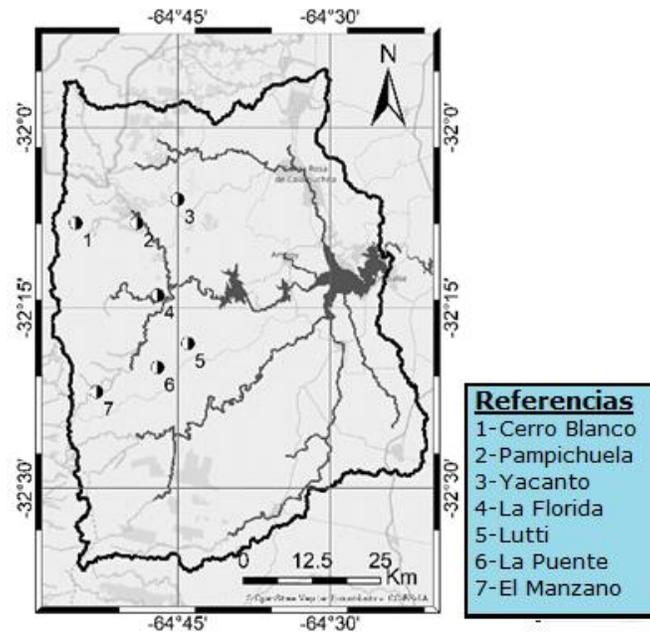


Imagen 3: Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Tercero

Por último, los diferentes usos de suelos y tipos de suelos presentes en la cuenca fueron extraídos de información que proporciona el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Esto resulta relevante debido a que es uno de los factores que determina la capacidad de infiltración del suelo, velocidad de escurrimiento del flujo, interceptación vegetal, entre otros, importante a la hora de estudiar la generación de escurrimientos superficiales de la cuenca (Imagen 4 y 5).

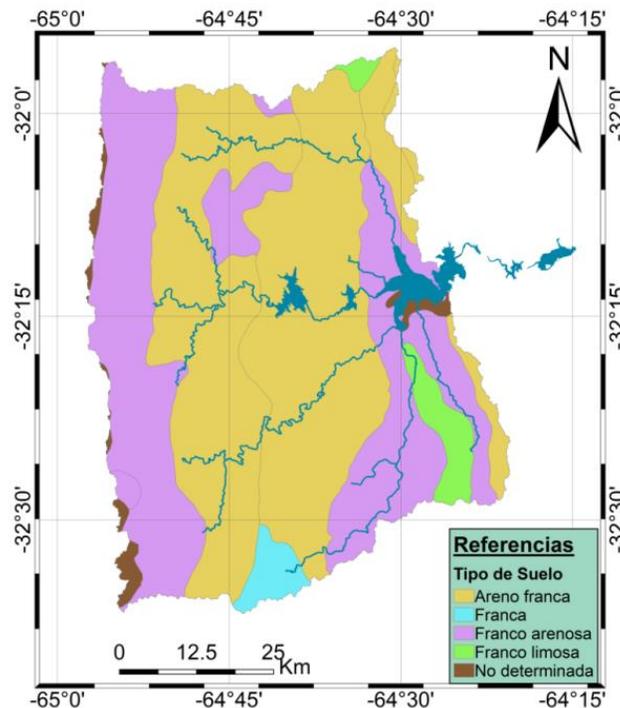


Imagen 4: Tipo de Suelo de la cuenca del río Tercero.

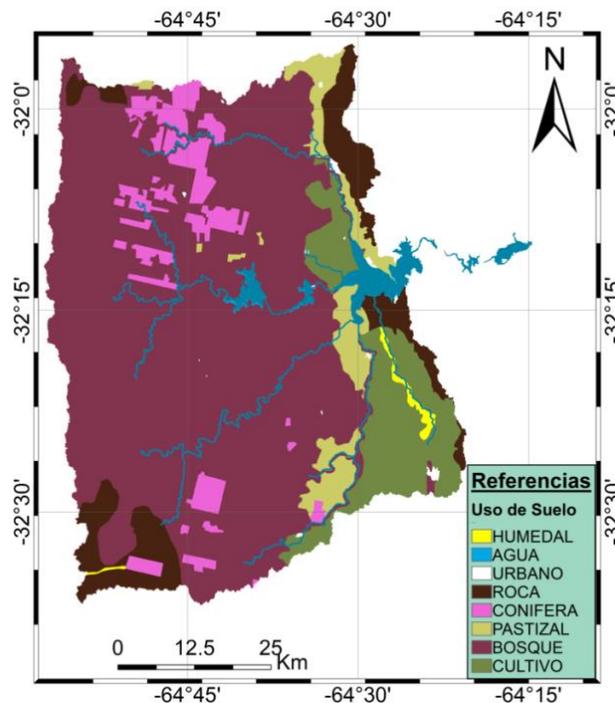


Imagen 5: Uso de Suelo de la cuenca del río Tercero.

Por último, la topografía de la cuenca fue determinada a partir del modelo digital de terreno (DEM por sus siglas en inglés) del Instituto Geográfico Nacional "IGN", construido a partir de complementar la información de la Shuttle Radar Topography Mission "SRTM" con mediciones in-situ de topografía. Este DEM posee resolución espacial de 30 metros por píxel y precisión vertical de 1 metro (imagen 6).

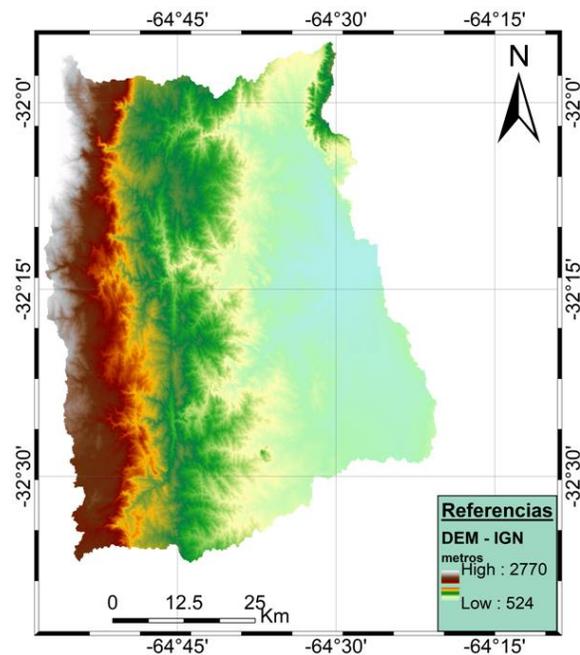


Imagen 6: DEM de la cuenca del río Tercero



Combinando los tipos de suelos, los usos de suelo y las pendientes del terreno, se delimitaron Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU según su denominación en inglés; Flügel, 1995). En el modelo se asume que las HRU están compuestas por un área que tiene un comportamiento hidrológico homogéneo y se las utiliza como unidades de modelación. El tamaño de estas unidades puede ser desde 1 pixel hasta varios pixeles dependiendo de la metodología usada en su construcción, siendo delineadas en este caso 156462 unidades de un tamaño mínimo de 0.5 km<sup>2</sup>.

## **2.3. Modelación Hidrológica semi-distribuida con SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

### **2.3.1. Introducción al modelo SWAT**

Soil and Water Assessment Tool "SWAT", se traduce en Castellano como Herramienta de Evaluación Suelo y Agua, el cual puede entenderse como una herramienta de evaluación del comportamiento del sistema suelo-agua. Este modelo a escala de cuencas hidrográficas fue desarrollado para cuantificar el impacto de las prácticas de gestión de la tierra cuando éstas son de gran extensión y complejas. SWAT es un modelo habilitado por software de dominio público desarrollado en Estados Unidos por la universidad de Texas junto con Agrilife Research y Agriculture Research Service, y apoyado activamente por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA en el Centro de Investigación y Extensión Blackland en Temple, Texas, EE. UU. A partir de julio de 2012, se han publicado más de 1000 artículos revisados por pares que documentan sus diversas aplicaciones (*Wikipedia, 2018*).

El propósito por el cual se desarrolló dicho software fue modelar la interacción del sistema suelo-agua como herramienta para la hidrología aplicada en el ámbito civil como al agropecuario, simulando los siguientes componentes: clima, escorrentía superficial, infiltración en el suelo, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en diques y lagunas, crecimiento e irrigación de cultivos, flujo de agua subterránea, tránsito de caudales, carga de nutrientes y plaguicidas, y transferencia de agua. Este modelo resulta muy usado en todo el mundo y está continuamente en desarrollo.

La implementación de dicho software está relacionada con las diversas ventajas que este presenta respecto a otros programas disponibles entre las cuales podemos mencionar:

- Se trata de un software de dominio público disponible en la web para su descarga (<https://swat.tamu.edu/>).
- Se encuentra muy documentado, tanto en trabajos científicos como profesionales.
- Presenta una interfaz intuitiva, simplificando su aplicación por el usuario.
- Se cuenta con la posibilidad de trabajar en entorno de Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés).
- Permite simular los procesos hidrológicos espacialmente de manera semi-distribuida.
- Permite simular procesos hidrológicos continuos y eventos.
- Este modelo puede ser acoplado a un modelo de flujo de agua subterránea y a modelos climáticos.



### 2.3.2. Fundamentos y ecuaciones SWAT

La modelación hidrológica es semi-distribuida lo cual se debe a la modelación de la cuenca que realiza el programa a través HRU (unidades de respuesta hidrológica). Estos HRU lo que hacen es agrupar distintas partes de la cuenca según características comunes por lo cual la cuenca en general queda dividida en cierto número de HRU con comportamiento hidrológico similar. Este tipo de modelación se encuentra en una posición intermedia a los otros tipos de modelación espaciales que se pueden realizar: modelación agregada o distribuida. La primera de ellas se trata en representar a toda la cuenca como un punto en el espacio lo que da como resultado un comportamiento hidrológico uniforme en la extensión de la misma. Por el contrario, la modelación distribuida se basa en dividir la cuenca en celdas, cada una representada del entrecruzamiento entre el DEM, el tipo de suelo, el uso de suelo y el esfuerzo computacional necesario; en este caso se simula el comportamiento hidrológico en cada celda de la cuenca.

En el caso de la modelación con SWAT se encuentra en un punto intermedio porque se representa a la cuenca en partes más pequeñas con características similares. En el caso del modelo de la cuenca del río Tercero, los HRU quedaron definidos por aquellas zonas que presentan similares características determinadas por el uso y tipo de suelo, y las pendientes de la cuenca. Este tipo de modelación brinda una buena representación del proceso hidrológico y simplifica el esfuerzo computacional con respecto a la modelación distribuida ya que en el agrupamiento de HRU disminuye el número de celdas de cálculo.

Por otra parte, se puede clasificar a la modelación respecto al período de tiempo modelado. Esto define dos situaciones: modelación por eventos o modelación continua. En la primera lo que se modela es un evento de precipitación particular y se obtiene el caudal para ese evento, situación comúnmente utilizada en la determinación de caudales de diseño para obras hidráulicas. En la segunda, se modela un período de tiempo de acuerdo a datos de una serie de datos hidro-meteorológicos, por lo cual se tiene como resultado una serie de caudales para todo el período de tiempo modelado. Este período puede ser diario, mensual o anual. Como resultado de esta modelación se pueden observar los periodos de sequía (estiaje) o excesos, así como también la variación del caudal anual. En el caso de la implementación del SWAT, puede realizarse cualquiera de las dos modelaciones mencionadas, pero en el caso de la tesis se aplicó sólo la modelación continua.

Además, para la modelación hidrológica resulta necesario definir el modelo de infiltración que se va a utilizar debido a que si no se tiene en cuenta la infiltración que se produce los resultados de caudales no serán los reales. El programa usa el modelo de infiltración denominado Green&Amptel cual fue desarrollado con el objetivo de predecir la infiltración asumiendo el exceso de agua en la superficie en todo momento. La ecuación supone que el perfil del suelo es homogéneo y que la humedad previa es distribuida uniformemente en el perfil. A medida que el agua se infiltra en el suelo, el modelo asume que el suelo sobre el frente humedecido está completamente saturado y hay una fuerte ruptura en el contenido de humedad en el frente de mojado.

Mein y Larson (1973) desarrollaron una metodología para determinar tiempo de estancamiento con infiltración usando la ecuación de Green & Ampt. El método de exceso de lluvia de Mein-Larson se incorporó a SWAT para proporcionar una opción alternativa



para la determinación de la escorrentía superficial. Este método requiere datos de precipitación sub-diarios suministrados por el usuario. Las ecuaciones se desarrollan en el anexo.

Por otro lado, se puede usar el modelo de la Curva Número (CN) pero al tratarse de un modelo que considera solo un evento de lluvia no se tiene precisión en la infiltración en un período continuo.

Por último, se hace referencia a las ecuaciones que fundamentan el modelo hidrológico de SWAT de manera sintética. El desarrollo completo de las mismas podrá encontrarse en el anexo en la sección 6.1.2. Primero se determinan las ecuaciones utilizadas en el método de infiltración de Green y Ampt el cual define a la tasa de infiltración mediante la siguiente ecuación:

$$f_{inf,t} = K_e * \left(1 + \frac{\psi_{wf} * \Delta\theta_v}{F_{inf,t}}\right) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

$f_{inf,t}$  = tasa de infiltración para un tiempo t [mm/hr].

$K_e$  = conductividad hidráulica efectiva [mm/hr].

$\psi_{wf}$  = es el potencial matricial frontal de humectación [mm].

$\Delta\theta_v$  = es el cambio en el contenido de humedad volumétrica en el frente húmedo [mm/mm].

$F_{inf,t}$  = infiltración acumulada en el tiempo t [mm].

El valor de  $K_e$  se lo puede definir como:

$$K_e = \frac{56.82 * K_{sat}^{0.286}}{1 + (0.051 * e^{0.062 * CN})} - 2 \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

$K_{sat}$  = es la conductividad hidráulica saturada [mm/hr]

CN = número de Curva Número en función del uso del suelo, permeabilidad del mismo y condiciones hidrológicas.

Para continuar, se determina la ecuación que utiliza SWAT para realizar la transformación lluvia- caudal. El mismo utiliza el método racional modificado el cual se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$q_{peak} = \frac{\alpha * C * i * \text{Área}}{3.6} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

$q_{peak}$  = tasa máxima de escorrentía [m<sup>3</sup>/s].

C = coeficiente de escorrentía

i = intensidad de lluvia [mm/hr].

Área = área de la cuenca [km<sup>2</sup>].

$\alpha$  = significado de este coeficiente es determinar la fracción de lluvia diaria que ocurre durante el tiempo de concentración. El mismo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - e^{[2 * t_{con} * \ln(1 - \alpha_{0.5})]} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:



$\alpha_{0.5}$  = es la fracción de lluvia diaria que cae en la intensidad más alta de media hora de lluvia.

Este método se basa en la suposición de que si una lluvia de intensidad  $i$  comienza en el momento  $t=0$  y continúa indefinidamente, la tasa de escorrentía aumentará hasta el momento de la concentración, es decir, cuando  $t$  es igual al tiempo de concentración. Esto implica que toda el área de la subcuenca está contribuyendo al flujo en la salida.

Otro aspecto que considerar es el flujo subterráneo, el cual es abastecido principalmente por infiltración o percolación y, a su vez, es reducido por la descarga de los ríos o lagos. Se pueden definir de esta manera los acuíferos, los cuales son unidades geológicas que pueden almacenar suficiente agua y transmitirla a un ritmo lo suficientemente rápido como para ser hidrológicamente significativo. SWAT simula dos acuíferos en cada subcuenca. El acuífero poco profundo es un acuífero no confinado que contribuye a fluir en el canal principal o alcance de la subcuenca. El acuífero profundo es un acuífero confinado, el cual se supone que el agua que entra a las profundidades desde este contribuye a la corriente en algún lugar fuera de la cuenca hidrográfica (Arnold et al., 1993).

El balance de agua para el acuífero es:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-q} + W_{rcrh} + Q_{qw} + W_{revap} + W_{deep} + W_{pump,sh} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

$aq_{sh,i}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial el día  $i$  [mm].

$aq_{sh,i-q}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial el día  $i-1$  [mm].

$W_{rcrh}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$Q_{qw}$  = es el flujo de agua subterránea, o flujo de base, en el canal principal el día  $i$  [mm].

$W_{revap}$  = es la cantidad de agua que se mueve hacia la zona del suelo en respuesta al agua deficiencias en el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$W_{deep}$  = es la cantidad de agua que se filtra desde el acuífero poco profundo en el acuífero profundo el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$W_{pump,sh}$  = es la cantidad de agua extraída del acuífero superficial bombeando el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

Una función de ponderación de decaimiento exponencial propuesta por Venetis (1969) y utilizado por Sangrey et al. (1984) en un modelo de respuesta precipitación / agua subterránea es utilizado en SWAT para tener en cuenta el retraso de tiempo en la recarga del acuífero una vez que el agua sale del perfil del suelo. La función de retardo se adapta a situaciones donde la recarga desde la zona de suelo al acuífero no es instantánea, es decir, 1 día o menos. La recarga al acuífero en un día determinado se calcula:

$$W_{rchrg,i} = \left[ 1 - e^{\frac{-1}{\delta_{gw}}} \right] * W_{seep} + e^{\frac{-1}{\delta_{gw}}} * W_{rchrg,i-1} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

$W_{rchrg,i}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$\delta_{gw}$  = es el tiempo de retardo o tiempo de drenaje de las formaciones geológicas suprayacentes [días].



$w_{seep}$  = es la cantidad total de agua que sale de la parte inferior del perfil del suelo el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$W_{rchrq,i-1}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero en el día  $i-1$  [mm H<sub>2</sub>O].

El acuífero poco profundo contribuye con el flujo base al canal principal o al alcance dentro de la subcuenca. Se permite que el flujo base entre al alcance solo si la cantidad de el agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado por usuario,  $aq_{shthr,q}$ . La respuesta de estado estacionario del flujo de agua subterránea para recargar es (Hooghoudt, 1940):

$$Q_{gw} = \frac{800 * k_{sat}}{L_{gw}^2} * h_{wtbl} = 800 * \mu * \alpha_{gw} * h_{wtbl} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

$Q_w$  = el flujo de agua subterránea, o flujo base, en el canal principal el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$k_{sat}$  = la conductividad hidráulica del acuífero [mm / día]

$L_{gw}$  = es el distancia desde la cresta o subcuenca dividir para el sistema de agua subterránea a la principal canal [m].

$h_{wtbl}$  = la altura de la tabla de agua [m].

$\mu$  = es el rendimiento específico del acuífero superficial [m/m].

$\alpha_{gw}$  = es la constante de recesión de flujo base

### 2.3.3. Aplicación de la modelación hidrológica con SWAT en la cuenca del Río Tercero

Para poder realizar la modelación hidrológica con SWAT resulta necesario contar con cierta información antes de comenzar con la misma. Como información relevante se encuentra la imagen satelital (DEM), el tipo de suelo y el uso de suelo. El DEM se obtuvo de una imagen satelital SRTM. Por su parte para determinar los diferentes usos de suelo (Tabla 3, Imagen 4) presentes en la cuenca de estudio se accedió a las cartas del INTA que determinan el uso de suelo en las distintas zonas del país. En estas cartas se cuenta con la información necesaria para caracterizar el uso de suelo el cual resulta importante debido a que es uno de los factores que van a definir los distintos HRU. Por último, el tipo de suelo (Imagen 5) se extrajo de la base de datos del INTA y este también resulta importante porque define los HRU junto con el uso de suelo y la pendiente.

Una vez que se obtiene toda la información que será el input de nuestro modelo, se comienza a realizar la modelación hidrológica propiamente dicha. En primera medida se determinan las subcuencas, los cauces y el punto de cierre de la cuenca, coincidente en este caso con el embalse de río Tercero (Imagen 2). Luego, se definen los HRU lo cual consta en agrupar, de acuerdo con características similares de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente, las diferentes zonas de las subcuencas.

Otros datos necesarios para la modelación son las series de temperatura, precipitación, humedad para el período de tiempo modelado. En este caso se obtuvieron los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de Cerro Blanco, Pampichuela, Yacanto, La Florida, Lutti, La Puente y El Manzano, proporcionada por la Base de Datos

Hidrológica Integrada "BDHI para un período de tiempo que inicia en junio del 1993 y finaliza en octubre de 2017 (Imagen 3). Para la determinación de los otros factores se utilizó la base de datos mundial del ClimateForecastSystemReanalysis "CFSR", con 36 años de registros (del año 1979 al 2014).

Por último y ya realizado todo lo anterior, se procede a correr el programa para obtener los resultados de caudales del período modelado. En este paso es donde se define el período de reporte de los resultados y en este modelo se definió que el mismo sea mensual.

Se puede observar que el procedimiento de modelación resulta sencillo e intuitivo, pero puede complicarse cuando no se cuenta con la información mencionada lo cual hace que los resultados obtenidos se alejen de la realidad.

A continuación, se realiza un esquema del proceso de modelación simplificado (Imagen 7) y en el anexo se pueden encontrar los detalles de utilización del programa para obtener la modelación con SWAT.

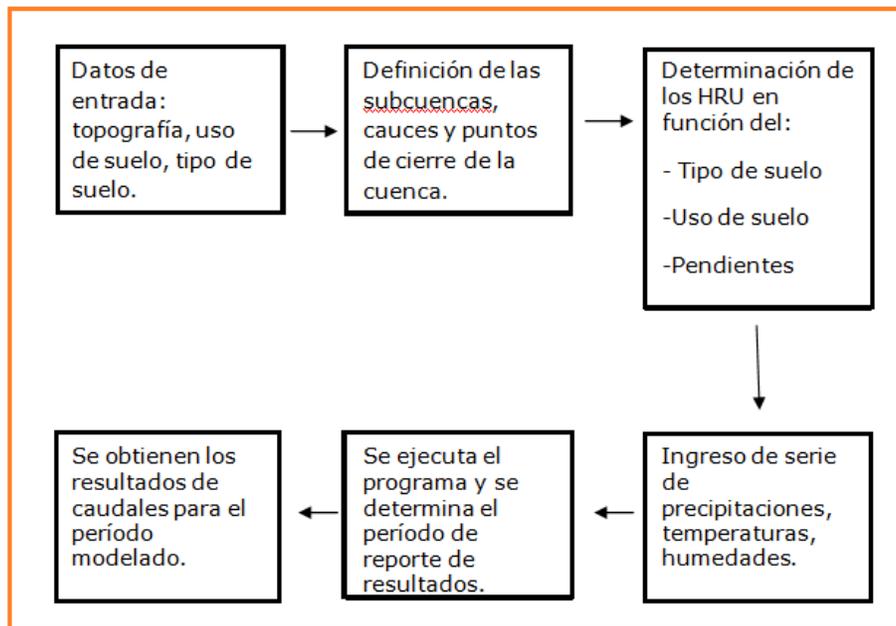


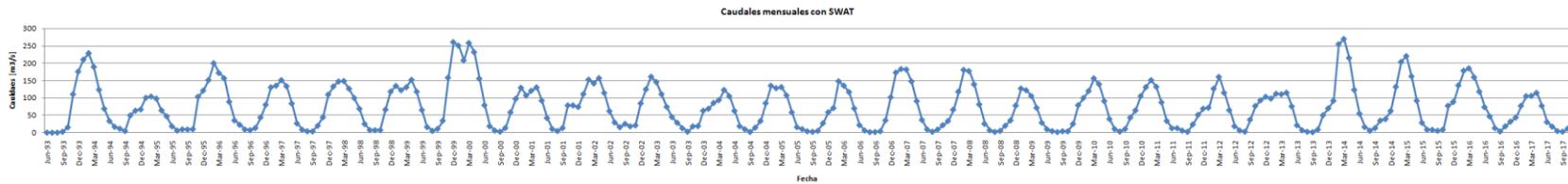
Imagen 7: Proceso de modelación con SWAT.

### 2.3.4. Análisis de datos hidrometeorológicos

A continuación, en la imagen 8 y en la Tabla 3 del Anexo, se muestran los caudales observados para el período modelado (06/93-10/17) para la subcuenca de cierre de la cuenca alta del río Tercero. Estos caudales son valores medios mensuales estimados a partir de las variaciones diarias de nivel del embalse FitzSimon y teniendo en cuenta las erogaciones medias diarias de la central hidroeléctrica.

Por último, para la calibración del modelo hidrológico en el próximo capítulo, la imagen 8 muestra los tres períodos en los que la serie de caudales observados fue dividida: Calentamiento (1993-1999), Calibración (2000-2010) y Validación (2011-2017).

Caudales medios mensuales observados en el punto de cierre de la cuenca:



Período de calentamiento (1993-1999):



Período de calibración(2000-2010)::



Período de validación (2011-2017):



Imagen 8:Caudales simulados vs. observados en SWAT.



Analizando los gráficos obtenidos, se puede observar que el período de caudales más altos se da entre Noviembre y Abril llegando a su pico, generalmente, entre los meses de Febrero y Marzo. Por el contrario, el período de estiaje se produce entre los meses de Mayo y Octubre, siendo el mes de Agosto el de menor caudal. Estos valores son importantes al momento de realizar la operación de los embalses para poder determinar si los excesos podrán satisfacer las sequías y la cuantificar el volumen de agua necesario para ello.

Estos caudales observados son caudales medios mensuales los cuales fueron estimados a partir de las variaciones en los niveles del Embalse de Río Tercero y teniendo en cuenta los caudales erogados por este dique.

### **2.3.5. Conclusiones**

En este capítulo se desarrollaron los fundamentos teóricos de la modelación con SWAT y se realizó la modelación hidrológica propia de la cuenca alta del río Tercero. Como puede observarse, resulta imprescindible contar con información acerca del uso y tipo de suelo debido a que los mismos condicionan el modelo de infiltración propuesto por el modelo SWAT. Esto es un aspecto a tener en cuenta en el momento de analizar los resultados de la modelación ya que puede ser que los mismos deban corregirse o ajustarse aún mejor para representar correctamente lo que sucede en la realidad.

Por su parte, como conclusión de la simulación se observan valores de caudales mensuales con gran variación a lo largo del año por lo cual resulta importante evaluar tanto las épocas de estiaje como de excesos para lograr un equilibrio del volumen de agua durante el año. A su vez, resulta importante considerar la fluctuación de los caudales mensuales a lo largo de todo el período modelado para poder estimar el comportamiento hidrológico de los años siguientes y poder tomar decisiones basadas en dicho estudio. Como resultado de este análisis de los valores de caudales mensuales se puede realizar un eficiente manejo de embalse para poder satisfacer las necesidades para la generación hidroeléctrica y de turismo, la cuales son las principales funciones del embalse.

Por último, para poder utilizar los valores de caudales mensuales simulados resulta importante realizar la calibración de los parámetros del modelo para que la simulación sea representativa de la realidad. En la sección que sigue se describe dicho proceso.



## **CAPITULO 3: Calibración del modelo hidrológico con SWAT- Calibration and Uncertainty Procedures (SWAT-CUP)**

### **3.1. Fundamento de la calibración del modelo hidrológico**

El uso de modelos hidrológicos tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Sin embargo, a pesar de los avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración. Este es el fundamento por el cual se realizó la calibración del modelo en estudio.

### **3.2. Introducción al programa SWAT-CUP**

SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures- SWAT Procedimientos de calibración e incertidumbre) es un programa que se utiliza para la calibración de modelos realizados en SWAT con la posibilidad de trabajar en la misma interfaz. El programa posee una serie de ventajas entre las que podemos destacar:

- Programa con interfaz sencilla y bien documentado.
- Proporciona gráficos y tabulaciones con los resultados.
- Proceso de calibración utilizando la misma interfaz que el modelo hidrológico lo cual simplifica la misma.
- Acceso libre y gratuito en la web.

Para crear un proyecto, el programa guía al usuario a través de los archivos de entrada necesarios para ejecutar un programa de calibración. Cada proyecto SWAT-CUP contiene varios módulos de calibración diferentes y permite al usuario ejecutar el mismo módulo muchas veces hasta que se alcanza la convergencia de la función objetivo.

En el contexto de esta tesis se optó por el módulo de calibración SUFI-2 (ajuste de incertidumbre secuencial), el cual busca optimizar una función objetivo, seleccionada por el usuario entre 11 disponibles, a la vez que calcula las restantes para brindar los estadísticos de calibración.

Entre las funciones objetivo disponible se encuentran el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe (NS), Error Cuadrático Medio "MSE",  $CHI^2$ ,  $bR^2$ , PBIAS, SSQR, eficiencia de Kling-Gupta (KGE), RSR, modificación de NS (MNS), suma del error medio cuadrático (sum), multiplicación del error medio cuadrático (mult); donde, según el caso, la función busca la maximización o minimización del estadístico. En el caso de la calibración de la cuenca del río Tercero se utilizó como función objetivo el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Además, resulta importante que el estadístico NS de la simulación resulte próximo a la unidad, por esto, a continuación se explican estos los dos estadísticos:



- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ): Está relacionado con la regresión lineal y se determina como el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson:

$$R^2 = \frac{\sum[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2]}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

$Q_{obs}$  = caudal observado [ $m^3/s$ ].

$\overline{Q_{obs}}$  = media de los caudales observados [ $m^3/s$ ].

$Q_{sim}$  = caudal simulado [ $m^3/s$ ].

$\overline{Q_{sim}}$  = media de los caudales simulados [ $m^3/s$ ].

Este coeficiente varía entre 0 y 1, siendo su mejor valor 1. Este estadístico puede entenderse como el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. En el caso de la regresión lineal también puede entenderse como la dispersión de los valores respecto a la recta de ajuste de los resultados. Mientras  $R^2$  se acerca a 1, más cercanos son los valores a la de recta y la diferencia entre ellos es mínima por el cual mejor será el ajuste del modelo a sus datos. En nuestro proceso de calibración de 20 simulaciones, el valor de  $R^2$  que arrojó el programa fue de 0,88 por lo cual puede aceptarse la calibración realizada.

- Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe: el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe se utiliza para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. La eficiencia propuesta por N-S es definido como uno menos la suma de las diferencias cuadradas absolutas entre los valores pronosticados y observados normalizados por la varianza de los valores observados durante el período bajo investigación. Se calcula como muestra la siguiente ecuación:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

-  $Q_{obs}$  = es el valor observado [ $m^3/s$ ].

-  $\overline{Q_{obs}}$  = es la media de los caudales observados [ $m^3/s$ ].

-  $Q_{sim}$  = es el caudal simulado [ $m^3/s$ ].

El rango de NS se encuentra entre 1.0 (ajuste perfecto) y  $-\infty$ . Una eficiencia inferior a cero indica que el valor medio de las series temporales observadas habría sido un reductor mejor que el modelo.

La mayor desventaja de la eficacia de Nash-Sutcliffe es el hecho de que las diferencias entre lo observado y los valores pronosticados se calculan como valores al cuadrado. Como resultado, los valores más grandes en una serie temporal se sobreestiman fuertemente, mientras que los valores más bajos se descuidan (Legates y McCabe, 1999).



En la calibración del modelo de la cuenca del río Tercero se obtuvo un valor de NS igual a 0,88 cuando se realizaron 20 simulaciones por lo cual puede aceptarse la calibración del modelo.

### 3.3. Calibración del modelo de estudio con SWAT-CUP

Al momento de realizar la calibración, se debe tener en cuenta que el período de modelación no es el mismo que el que se usa para calibrar el programa. El período determinado en el modelo SWAT se puede dividir en tres partes:

1. Período warm-up o calentamiento;
2. Período de calibración;
3. Período de validación.

Esta división se hace en partes aproximadamente iguales por lo cual el período de calibración es el tercio central del período de modelación. Luego, una vez realizada la calibración, se realiza la validación de los resultados obtenidos en dicho procedimiento con el tercio final del período del modelo. Por lo tanto, en esta etapa de calibración con SWAT-CUP el período de tiempo considerado es del año 2000 al año 2010, quedando como calentamiento del año 1993 al 1999 y como período de validación del 2011 al 2017.

Una vez determinado lo anterior se procede a la calibración cargando en SWAT-CUP los caudales observados en el punto de cierre de la cuenca del río Tercero. Luego se determina la variable a calibrar, en este caso los caudales mensuales obtenidos con SWAT, y la cantidad de iteraciones que se quieren realizar. En cuanto a este último aspecto se realizó la calibración para diferentes números de iteraciones para ver la variación de los resultados. Para esto, se realizó la calibración con 1, 3, 10 y 20 iteraciones.

Esta calibración se realizó sobre 4 parámetros que intervienen en la modelación realizada con SWAT. Por lo tanto, lo que se busca con la función objetivo es que la variación entre cada parámetro sea la mínima para que los estadísticos (NS Y  $R^2$ ) converjan a la unidad o lo más próximo a ella posible. Estos parámetros son:

- CN-2 (CN): es el número de curva número del SCS. Si bien este parámetro pertenece a otra método de abstracción, es utilizado en el modelo de infiltración de Green y Ampt para estimar la conductividad hidráulica efectiva como puede observarse en la ecuación 2. Tener calibrado el CN, permite de esta manera realizar la simulación hidrológica de manera continua o por eventos.
- $\alpha_{BF}$  ( $\alpha_{gw}$ ): Constante de recesión de flujo de base (ecuación 7).
- Gw\_delay ( $\delta_{gw}$ ): es el tiempo de retardo o tiempo de drenaje de las formaciones geológicas suprayacentes [días] (ecuación 6).

- $Gwqnm (aq_{shthr,q})$ : Nivel del agua del umbral en el acuífero superficial para el flujo base [mm de H<sub>2</sub>O], especificado por el usuario.

### 3.4. Resultados de la calibración

Por último, los caudales observados y simulados resultantes de la calibración se muestran en la imagen 9. Por otra parte, la tabla de caudales observados y simulados puede observarse en los anexos(Tabla 5).

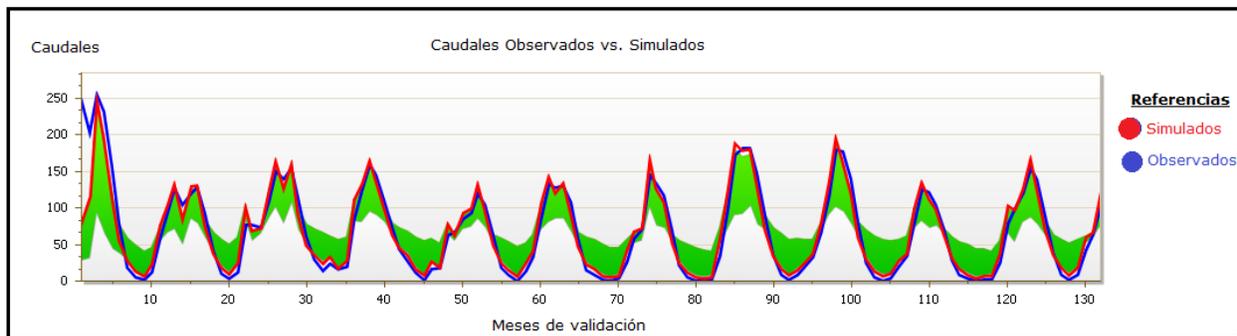


Imagen 9: Caudales observados vs. Caudales simulados.

Como se observa en la figura anterior, los caudales simulados con la parametrización resultante de la calibración reproducen adecuadamente los picos y valles medios mensuales observados, así como los ciclos en los que se desarrollan. A continuación, se muestran los valores estadísticos (Imagen 10) resultantes del proceso de calibración con 20 iteraciones. Estos últimos tienen un gran impacto ya que ayudan a determinar la calidad de la simulación del modelo con respecto a las observaciones, en términos de caudales.

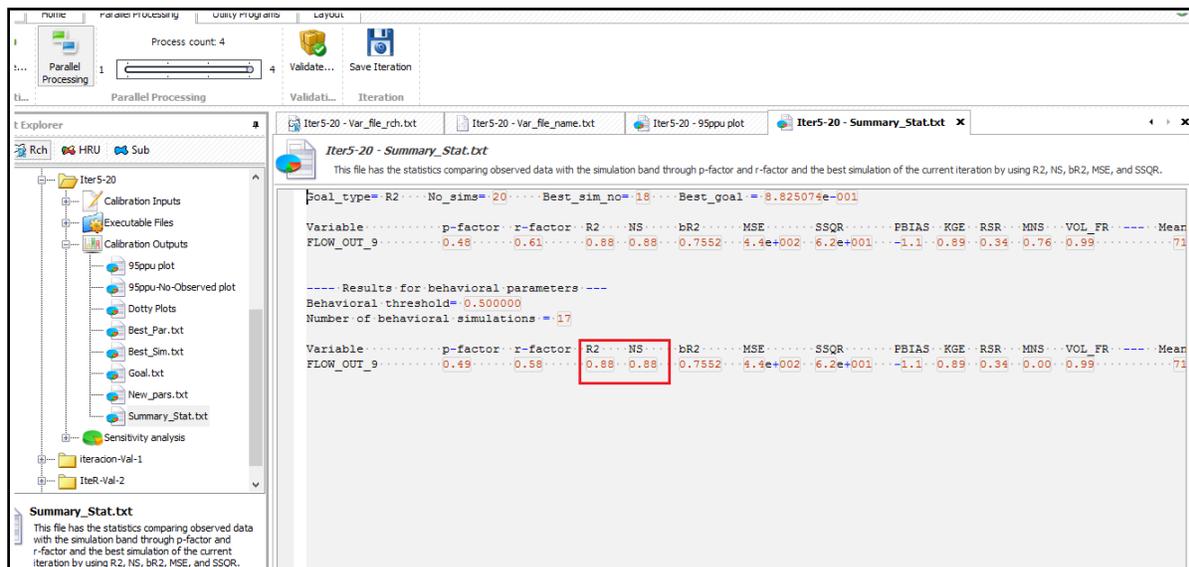


Imagen 10: Valores de R<sup>2</sup> y NS obtenidos en la calibración.

Como se observa en la tabla anterior, la regresión lineal se aproxima a la unidad, lo que indica que los caudales simulados y observados se corresponden generalmente entre sí. Además, el Nash-Sutcliffe es próximo a la unidad, lo que muestra que los caudales medios simulados y observados son muy similares.

Por último, se realizará la comparación de los valores de los estadísticos  $R^2$  y NS obtenidos para los diferentes números de simulaciones que se realizó. Esto se realiza con el objetivo de ver la variación de los mismos a medida de que se incrementa el número de simulaciones y observar como en los últimos dos casos (10 y 20 simulaciones) la variación de los mismos es despreciable por lo cual se terminó la calibración obteniendo como resultados finales los arrojados para 20 simulaciones y los que fueron presentados anteriormente. En el siguiente gráfico (imagen 11) se muestra lo mencionado anteriormente:

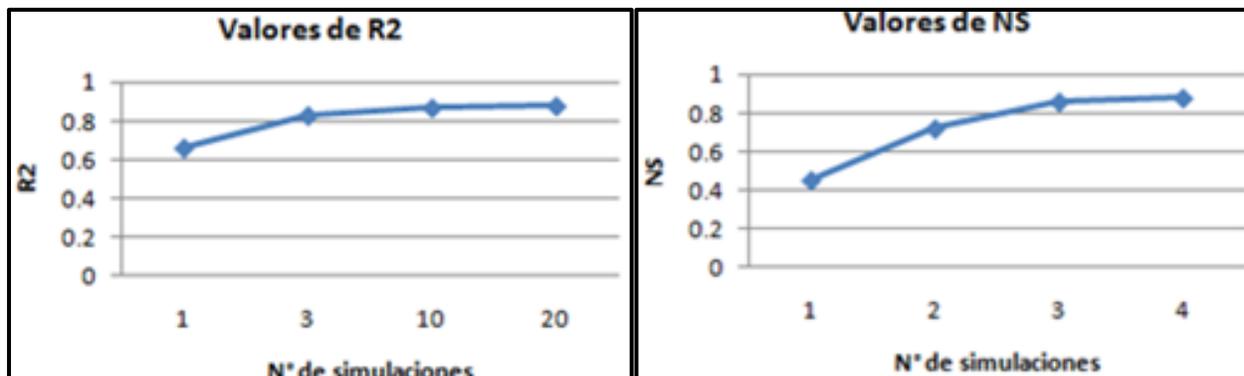


Imagen 11 : Valores de  $R^2$  y NS como resultado de la calibración del modelo.

Además, se muestran los valores en la siguiente tabla:

Nº de simulaciones	R <sup>2</sup>	NS
1	0.66	0.45
3	0.83	0.72
10	0.87	0.86
20	0.88	0.88

Tabla 1: Valores de  $R^2$  y NS.

Al observar que los estadísticos de las parametrizaciones obtenidas en 10 y 20 iteraciones resultan similares, se determina que la iteración converge en la solución óptima en  $NS=0.88$  y  $R^2=0.88$  en 20 iteraciones (Tabla 1, Gráfico 2).



### 3.5. Validación del modelo de estudio con SWAT-CUP

Por último, resulta necesario y de gran importancia realizar la validación de los resultados obtenidos en la calibración del modelo. Esto se debe a que el período de tiempo de la calibración es el tercio central del período de modelación, por lo tanto, hay que evaluar los resultados del resto del período.

Para realizar la validación de los resultados, como primera medida lo que se debe hacer es ejecutar nuevamente el modelo SWAT pero en esta instancia con los valores de los parámetros que se obtuvieron como resultado de la calibración con SWAT-CUP. Esto hace que los nuevos valores de caudales observados obtenidos con SWAT se ajusten de acuerdo a los parámetros calibrados.

En esta instancia, se ejecuta SWAT para el período considerado de validación que es del 2010 al 2017 y se obtienen los valores de caudales mensuales validados según los parámetros calibrados.

Luego de haber realizado la validación con el programa mencionado, se obtienen los resultados de los caudales observados comparándose con los validados. Además, se calculan los estadísticos que se determinaron como función objetivo y en este momento resultan los mismos que para la calibración. Estos estadísticos son  $R^2$  y NS. A continuación se presenta un gráfico de los caudales observados vs. los simulados (imagen 12).

Además, resulta imprescindible analizar los valores obtenidos en los estadísticos mencionados para poder determinar si la validación realizada resulta aceptable o no. Para ello, se calcula el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) con la ecuación 8. Es así que, para los caudales simulados en el período de validación, se obtiene:

$$R^2 = 0,98$$

Por otra parte, el Nash-Sutcliffe fue calculado en base a la ecuación 9 para los caudales simulados en el período de validación, obteniendo:

$$NS = 0,95$$

En la tabla 2 se muestran los valores de los caudales observados antes y después de la validación de los mismos. Aquí se puede observar, el valor de  $R^2$  o del coeficiente de determinación obtenido es 0,98 por lo cual es próximo a la unidad. Esto quiere decir que los valores de los caudales observados son similares a los simulados, es decir, que la variación entre ellos es pequeña.

Por otra parte, en cuanto al estadístico Nash-Sutcliffe (NS) resultó igual a 0,95. Se puede observar que el mismo se aproxima a la unidad por lo que los caudales medios observados se corresponden a los simulados y es aceptable la validación y, como consecuencia, la calibración.

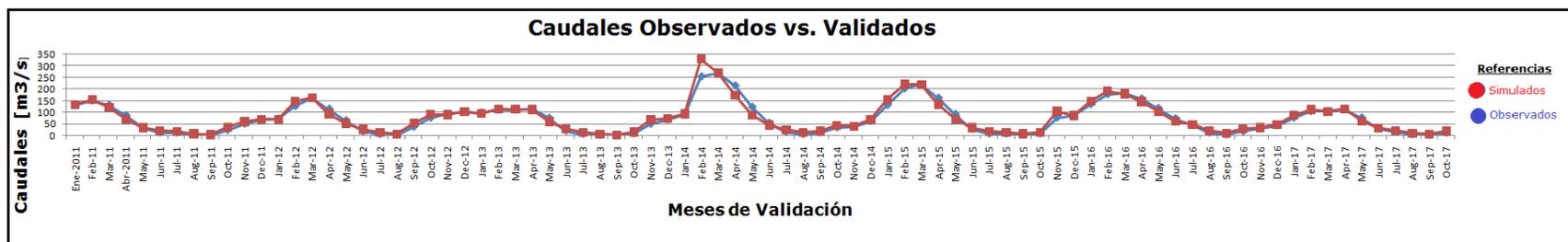


Imagen 12: Caudales observados vs. Caudales simulados en el período de validación.

Fecha	Caudal		Fecha	Caudal		Fecha	Caudal	
	Observado [m3/s]	Validado [m3/s]		Observado [m3/s]	Validado [m3/s]		Observado [m3/s]	Validado [m3/s]
Ene-2011	131.1	134.3	May-13	75.67	61.48	Aug-15	7.998	15.45
Feb-11	151.3	155.2	Jun-13	21.24	29.69	Sep-15	5.272	9.456
Mar-11	132.1	122.5	Jul-13	6.77	14.81	Oct-15	8.391	14.79
Abr-11	87.18	71.49	Aug-13	2.44	7.939	Nov-15	77.4	106
May-11	33.76	34.74	Sep-13	1.237	4.346	Dec-15	88.52	86.74
Jun-11	12.44	22.47	Oct-13	8.712	16.81	Jan-16	136.2	149.3
Jul-11	12.69	17.52	Nov-13	50.15	68.89	Feb-16	178.5	193.5
Aug-11	5.79	9.538	Dec-13	69.95	74.68	Mar-16	185.3	181
Sep-11	2.361	6.163	Jan-14	91.82	94.41	Apr-16	159.6	146.6
Oct-11	23.69	36.46	Feb-14	254.9	330.4	May-16	118.4	105.1
Nov-11	51.2	61.1	Mar-14	270.1	270	Jun-16	73.63	62.19
Dec-11	69.12	71.08	Apr-14	215.2	174.5	Jul-16	46.8	49.12
Jan-12	71.69	70.54	May-14	123.4	90.14	Aug-16	13.12	22.89
Feb-12	126.6	148.4	Jun-14	54.65	46.27	Sep-16	3.375	11.34
Mar-12	160.7	164.8	Jul-14	16.21	26.57	Oct-16	18.12	30.57
Apr-12	114.9	94.16	Aug-14	5.592	13.82	Nov-16	31.99	35.82
May-12	64.76	53.41	Sep-14	12.88	21.05	Dec-16	43.69	49.33
Jun-12	18.43	27.28	Oct-14	34.79	44.02	Jan-17	77.14	88.35
Jul-12	6.194	13.76	Nov-14	39	41.27	Feb-17	105.2	112.8
Aug-12	2.775	8.127	Dec-14	62.42	71.34	Mar-17	106	103.8
Sep-12	37.34	54.92	Jan-15	132.2	156.4	Apr-17	114.7	115.6
Oct-12	76.79	92.26	Feb-15	203.6	221.4	May-17	77.34	63.95
Nov-12	93.1	91.02	Mar-15	220.7	220	Jun-17	30.53	33.84
Dec-12	103.3	103.9	Apr-15	162.3	135.8	Jul-17	17.3	23.26
Jan-13	98.2	95.97	May-15	92.22	70.29	Aug-17	4.495	10.78
Feb-13	112.1	115.4	Jun-15	28.58	34.62	Sep-17	2.595	7.557
Mar-13	110.5	114.3	Jul-15	8.442	17.95	Oct-17	11.92	20.35
Apr-13	115.2	112.9						

Tabla 2: Caudales observados vs Caudales validados.



### **3.6. Conclusiones**

En este capítulo se desarrollaron los conceptos y fundamentos de la calibración del modelo con la implementación de SWATCUP. Como primera medida se realizó la calibración de los caudales mensuales obtenidos con el modelo de SWAT. En dicha etapa se calibraron los parámetros más relevantes de la modelación asociados al flujo subterráneo y a la transformación lluvia - caudal. Luego, se validaron los caudales mensuales en el período propio de la validación para poder determinar la calidad de la calibración.

Como conclusión en esta etapa se puede mencionar que los valores de los caudales obtenidos se corresponden a los simulados y a los validados debido a que los valores de los estadísticos se acercan a la unidad. Por este motivo se puede inferir que la modelación realizada y como consecuencia, los valores de los caudales mensuales obtenidos son representativos de la realidad.



## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES**

### **4.1. Modelación Hidrológica y calibración**

El modelo hidrológico de la cuenca alta del Río Tercero realizado con SWAT arrojó como resultado los valores de los caudales mensuales para el período simulado. De dicho resultado se puede obtener como información relevante los períodos de estiaje y de excesos los cuales resultan de gran importancia a la hora de planificar el volumen de agua necesario para satisfacer las demandas en las épocas de sequía. Como período de excesos se determina el conformado entre los meses de Noviembre y Abril, llegando a su pico entre los meses de Febrero y Marzo. Por su parte, el período de sequías queda comprendido entre los meses de Mayo y Octubre, obteniendo el menor valor de caudal mensual en el mes de Agosto. Este análisis, junto con el de las necesidades en los distintos meses del año, llevarán al mejor aprovechamiento y operación del embalse haciendo que la misma sea la más eficaz posible.

Para calibrar los principales parámetros que intervienen en el proceso de simulación hidrológica en SWAT se iteró 20 veces obteniendo un set de parámetros que hacen que los principales estadísticos de evaluación seleccionados converjan en valores próximos a los valores ideales. Sin embargo, para poder confirmar la verosimilitud de los valores de los caudales obtenidos en la simulación como en la calibración, resulta interesante realizar la validación de estos. Dicho procedimiento fue llevado a cabo y los resultados obtenidos fueron satisfactorios por lo que se puede inferir que los resultados de los caudales fueron validados y los valores arrojados en la simulación fueron correspondidos con los observados. Esto concluye en que la modelación semi-distribuida realizada con SWAT es representativa de la realidad.

### **4.2. Recomendaciones**

Por su parte, en cuanto a los resultados de los caudales recomiendo tener en cuenta las fluctuaciones de los mismos durante el año para poder realizar un manejo eficiente del embalse, además para que se logren cumplir las necesidades a lo largo del mismo.

Por último, en lo referido al modelo SWAT, recomiendo el uso del mismo cuando se cuente con todos los datos e información necesaria para realizar dicha modelación debido a que la misma realiza un análisis integral del sistema suelo-agua e incorpora otros parámetros y factores que hacen que la modelación sea lo más parecida a la realidad posible. Además, porque ofrece la posibilidad de trabajar con diferentes tipos de modelaciones (por evento o continuo) y modelos de infiltraciones (CN y Green y Ampt), entre otros.

La herramienta calibrada y validada permitiría en trabajos futuros analizar el impacto del cambio en el uso de suelo en el escurrimiento superficial. Además, se podría evaluar la utilización de fuentes de información complementaria como radar, datos satelitales de precipitación, modelos climáticos, etc. que permitan analizar diferentes escenarios hidro-



meteorológicos. Por último, se podría evaluar la aplicación de esta herramienta para analizar eventos puntuales mediante el método de infiltración de la curva número propuesto por el SoilConservationService de Estados Unidos (CN-SCS), ampliamente utilizado en la práctica de la ingeniería civil.

### **4.3. Reflexiones personales referidas a la experiencia de la Práctica**

Como conclusión final de la Práctica Profesional Supervisada en primera medida quiero destacar la gran oportunidad que me dieron el Ing. Alvarez Javier y el Dr. Ing. GarcíaRodríguez Carlos Marcelo de participar en un proyecto de gran envergadura como es el proyecto RELAMPAGO. Además, la predisposición de ambos para guiarme en la trabajo realizado y su aporte tanto en lo profesional como en lo personal para conmigo.

En cuanto a la experiencia personal de enfrentarme con la vida profesional del ingeniero civil debo mencionar que la misma fue muy positiva y me ayudó a insertarme en este nuevo mundo que comenzará a la brevedad.



## **CAPITULO 5: BIBLIOGRAFÍA**

ABBASPOUR, Karim(2015). *Manual de uso de SWATCUP*.[https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf).

ABBASPOUR, Karim (2007). *Software SWAT CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Procedures*. <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>.

ÁLVAREZ, DÍAZ LOZADA (2018). *Bases del plan director del río Carcarañá*.

BAS, L. (2016). *Trabajo de práctica profesional supervisada "MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA DURANTE EL EVENTO EXTRAORDINARIO DE FEBRERO-MARZO 2014"*.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA (2006). *Caracterización de los suelos en Argentina en "Los Suelos"*.

LÓPEZ, S. (2018). *Trabajo de práctica profesional supervisada "MODELACION HIDROLOGICA E HIDRAULICA REQUERIDAS PARA LA GESTION EFICIENTE DEL RECURSO HIDRICO SUPERFICIAL DURANTE EVENTOS EXTREMOS"*.

MGST. ING. DIAZ LOZADA, J.M. (2014). *Tesis de maestría "CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO CARCARAÑÁ"*.

S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS, K.W. KING (2002). *Documento teórico de los fundamentos y ecuaciones de SWAT en "Soil and WaterAssessmentTool theoreticaldocumentation"*.<https://swat.tamu.edu/media/1290/swat2000theory.pdf>.

S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS, K.W. KING (2002). *Software SWAT, Soil and Water Assessment Tool*. <https://swat.tamu.edu/software/arcswat/>.

URIBE, Natalia (2010). Adaptado de: S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS, K.W. KING, 2005. *Manual de uso de SWAT*. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>.



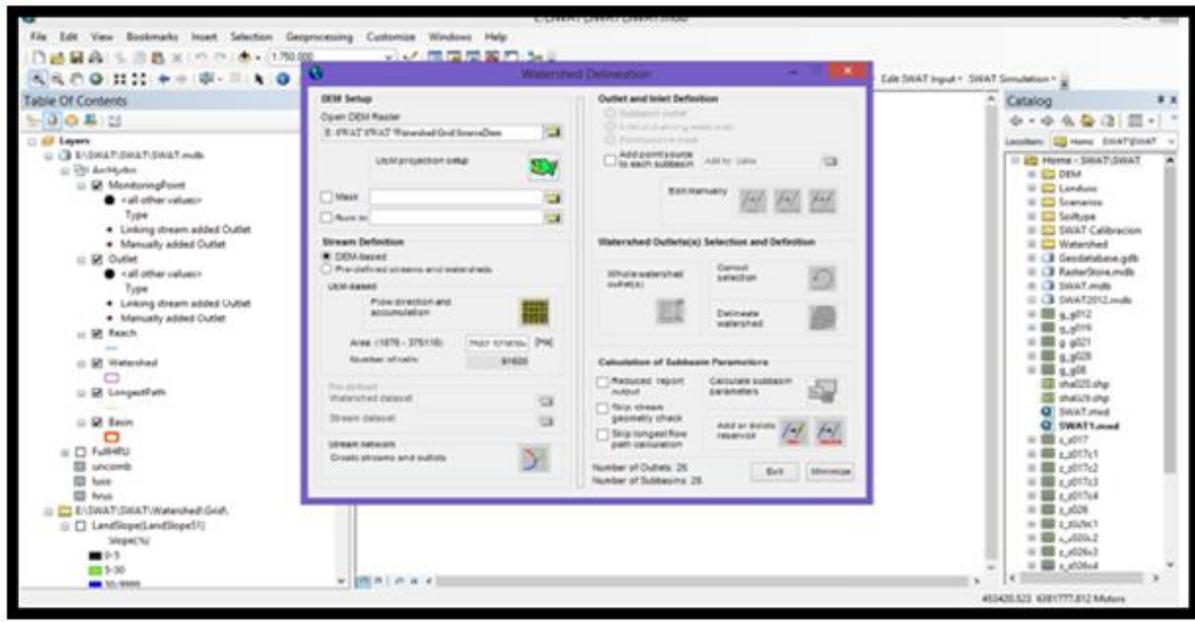
# **ANEXOS**

## **CAPITULO 6: ANEXOS**

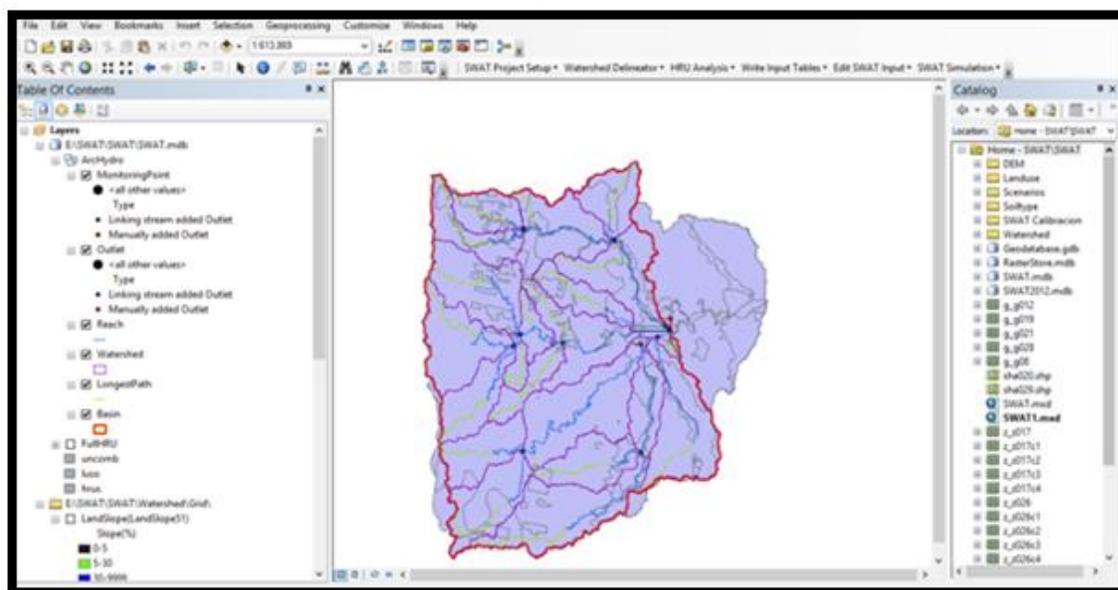
## 6.1. Pasos a seguir para modelar en Arc-SWAT

A continuación se muestran los ingresos de datos y determinación de parámetros ingresados al software para poder realizar la modelación hidrológica.

**Paso 1:** Lo primero que se realiza es la delimitación de las subcuencas, cauces y punto de cierre de la cuenca

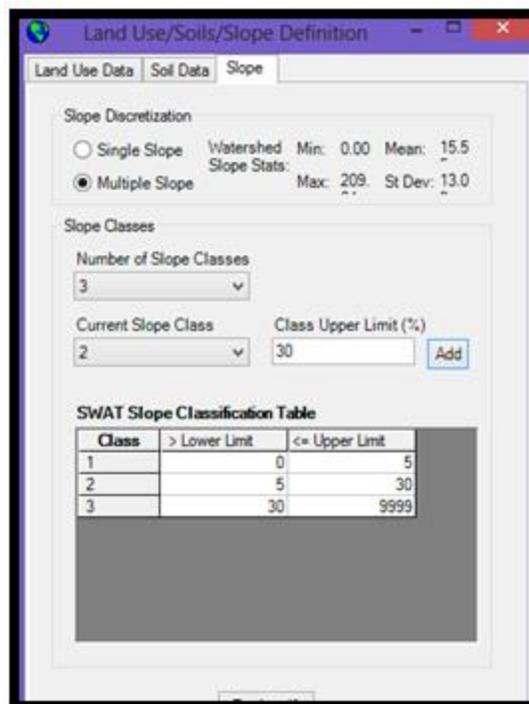
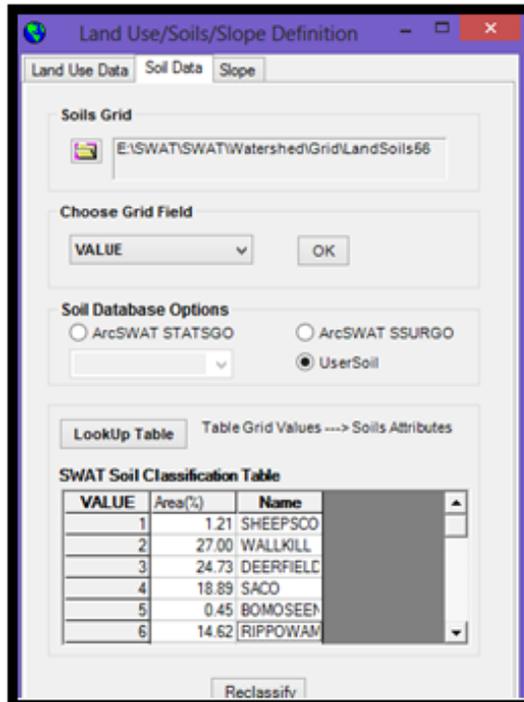
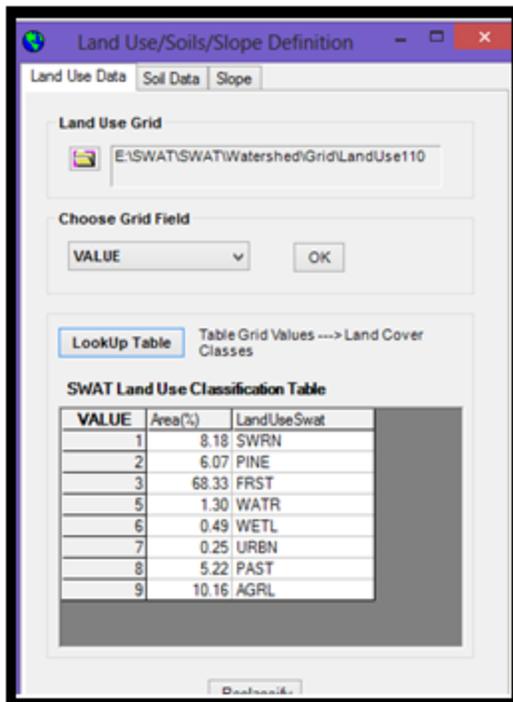


Los resultados obtenidos en este paso son:





**Paso 2:** Se determina el tipo de suelo, uso de suelo y pendientes para luego poder definir los HRU.



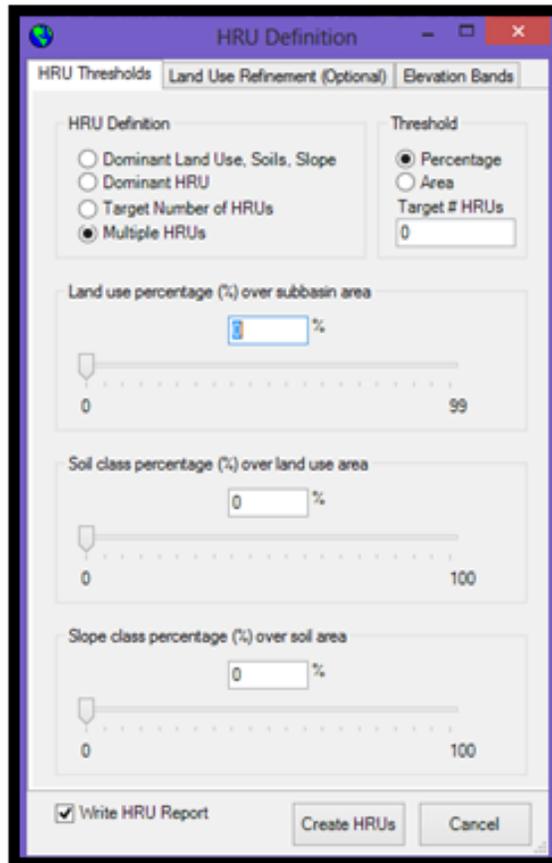


En esta sección se muestra la tabla de los distintos usos de suelo considerados en la modelación:

USEID	USE	CMPCT	NLAYERS	WPROP	SOIL_ZN	ANONW_ECL	SOIL_CRM	TEXTURE	SOIL_CL	SOIL_SLS	SOIL_WPCS	W_43(mm/h)	SOIL_CRM2	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOIL_ABS	USID_K1
5137			1	A	100	0.5	0.5	SILT_LOAM	100.00	1.50	0.10	8.90	2.40	1.00	75.00	25.00	0.00	0.07	0.015
5138			2	A	200	0.5	0.5	SANDY_LOAM	75.00	1.40	0.10	18.80	2.40	1.00	20.00	77.00	0.00	0.07	0.015
5139			1	A	50	0.5	0.5	LOAMY_SAND	50.00	1.55	0.10	10.90	2.40	40.00	28.00	11.00	0.00	0.07	0.015
5140			2	A	175	0.5	0.5	SANDY_LOAM	75.00	1.40	0.10	18.80	2.40	1.00	15.00	78.00	0.00	0.07	0.015
5141			4	A	300	0.5	0.5	SANDY_LOAM	50.00	1.40	0.10	18.80	2.40	1.00	15.00	78.00	0.00	0.07	0.015
5142			1	A	75	0.5	0.5	SANDY_LOAM	75.00	1.40	0.10	18.80	2.40	1.00	15.00	78.00	0.00	0.07	0.015
5143			1	D	25.4	0.5	0.5	WATER	25.00	0.00	0.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.000
5144			2	A	150	0.5	0.5	LOAMY_SAND	100.00	1.55	0.10	21.80	2.40	12.00	28.00	60.00	0.00	0.07	0.015
5145			2	B	100	0.5	0.5	LOAM	50.00	1.55	0.10	20.00	2.40	20.00	25.00	55.00	0.00	0.07	0.015
5146			2	A	75	0.5	0.5	LOAMY_SAND	25.00	1.40	0.10	21.80	2.40	5.00	30.00	65.00	0.00	0.07	0.015
5147			2	A	100	0.5	0.5	LOAMY_SAND	50.00	1.45	0.10	20.00	2.40	5.00	30.00	65.00	0.00	0.07	0.015
5148			3	D	225	0.5	0.5	SILTY_CLAY	100.00	1.50	0.10	8.80	2.40	15.00	28.00	57.00	0.00	0.07	0.015
5149			2	D	200	0.5	0.5	SILTY_CLAY	100.00	1.65	0.10	3.00	2.40	15.00	28.00	57.00	0.00	0.07	0.015
5150			2	D	200	0.5	0.5	SILTY_CLAY	100.00	1.65	0.10	21.80	2.40	18.00	55.00	29.00	0.00	0.07	0.015
5151			1	A	100	0.5	0.5	LOAMY_SAND	100.00	1.45	0.10	20.00	2.40	20.00	25.00	55.00	0.00	0.07	0.015
5152			1	D	151.4	0.5	0.5	WATER	151.40	0.00	0.00	99.00	0.00	1.00	15.00	78.00	18.00	0.13	0.010

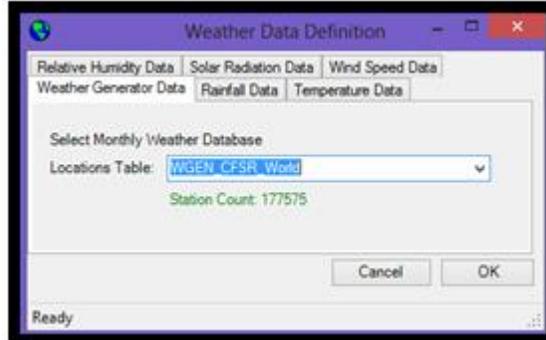
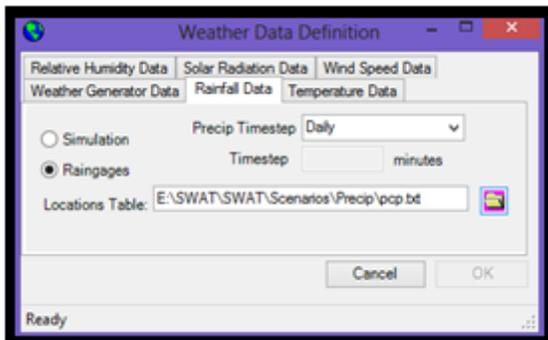
Tabla 3: Tipos de suelo de la cuenca del Río Tercero.

**Paso 3:** Se definen las Unidades de Respuesta Hidrológica "HRU"

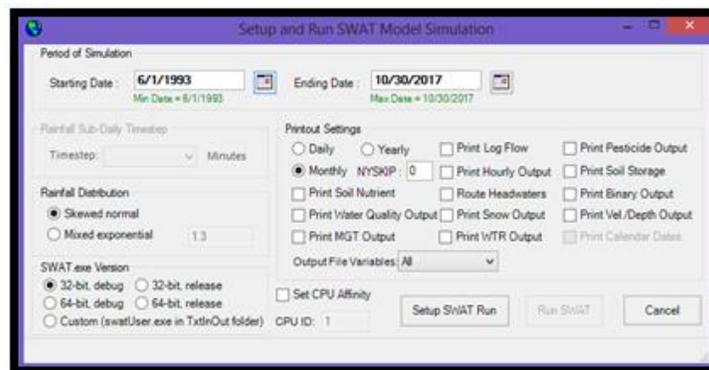




**Paso 4:** Se define la serie de precipitación y demás parámetros necesarios. Las precipitaciones provienen de estaciones meteorológicas de la CIRSA y los otros parámetros de la base de datos mundial que brinda SWAT.



**Paso 5:** Se determina el período de reporte de los resultados y el período de tiempo a modelar



Luego, se muestran los resultados obtenidos mediante una tabulación de los mismos:



Fecha	Caudal Observado	Fecha	Caudal Observado	Fecha	Caudal Observado
Jun-93	0	Jun-97	26.63	Jun-01	42.35
Jul-93	0	Jul-97	8.55	Jul-01	10.7
Aug-93	0	Aug-97	3.907	Aug-01	4.638
Sep-93	2.474	Sep-97	3.477	Sep-01	13.2
Oct-93	15.38	Oct-97	19.75	Oct-01	78.47
Nov-93	110.5	Nov-97	44.28	Nov-01	78.57
Dec-93	175.8	Dec-97	109.6	Dec-01	73.87
Jan-94	210.4	Jan-98	133.1	Jan-02	111.1
Feb-94	228.9	Feb-98	147.5	Feb-02	152.7
Mar-94	189.7	Mar-98	148.7	Mar-02	141.8
Apr-94	123.5	Apr-98	126.6	Apr-02	157.1
May-94	68.94	May-98	99.82	May-02	114.4
Jun-94	33.6	Jun-98	68.76	Jun-02	62.03
Jul-94	16.64	Jul-98	25.05	Jul-02	29.49
Aug-94	11.48	Aug-98	7.239	Aug-02	15.7
Sep-94	4.567	Sep-98	6.913	Sep-02	25.32
Oct-94	49.7	Oct-98	7.127	Oct-02	18.06
Nov-94	63.36	Nov-98	66.37	Nov-02	20.84
Dec-94	66.81	Dec-98	118.3	Dec-02	84.32
Jan-95	100.4	Jan-99	134.7	Jan-03	124.7
Feb-95	104.1	Feb-99	122.3	Feb-03	161.2
Mar-95	97.99	Mar-99	130.8	Mar-03	145.6
Apr-95	64.19	Apr-99	152.1	Apr-03	110.9
May-95	47.03	May-99	118	May-03	74.31
Jun-95	18.13	Jun-99	65.09	Jun-03	44.96
Jul-95	5.946	Jul-99	15.97	Jul-03	28.55
Aug-95	9.357	Aug-99	4.853	Aug-03	12.67
Sep-95	8.917	Sep-99	10.77	Sep-03	2.604
Oct-95	9.765	Oct-99	34.51	Oct-03	17.99
Nov-95	103.5	Nov-99	158.3	Nov-03	18.74
Dec-95	121.2	Dec-99	260.9	Dec-03	63.02
Jan-96	151.3	Jan-00	250.8	Jan-04	68.76
Feb-96	200.1	Feb-00	208.2	Feb-04	85.62
Mar-96	172.1	Mar-00	258.3	Mar-04	93.79
Apr-96	156.7	Apr-00	232.1	Apr-04	123
May-96	89.01	May-00	155.8	May-04	105
Jun-96	35.15	Jun-00	79.07	Jun-04	62.78
Jul-96	22.46	Jul-00	18.5	Jul-04	18.51
Aug-96	9.015	Aug-00	5.918	Aug-04	9.683
Sep-96	6.934	Sep-00	2.774	Sep-04	1.924
Oct-96	13.17	Oct-00	13.34	Oct-04	14.42
Nov-96	43.86	Nov-00	58.56	Nov-04	33.48
Dec-96	80.41	Dec-00	97.56	Dec-04	84.93
Jan-97	130.6	Jan-01	129.5	Jan-05	135.3
Feb-97	135.4	Feb-01	107.1	Feb-05	128.2



Fecha	Caudal Observado	Fecha	Caudal Observado	Fecha	Caudal Observado
Jun-05	15.78	Aug-09	1.587	Oct-13	8.712
Jul-05	10.21	Sep-09	3.951	Nov-13	50.15
Aug-05	3.827	Oct-09	3.754	Dec-13	69.95
Sep-05	2.299	Nov-09	25.14	Jan-14	91.82
Oct-05	4.912	Dec-09	79.07	Feb-14	254.9
Nov-05	27.07	Jan-10	99.87	Mar-14	270.1
Dec-05	58.74	Feb-10	120.1	Apr-14	215.2
Jan-06	70.89	Mar-10	156.5	May-14	123.4
Feb-06	148.1	Apr-10	139.7	Jun-14	54.65
Mar-06	135.3	May-10	90.86	Jul-14	16.21
Apr-06	117	Jun-10	39.48	Aug-14	5.592
May-06	69.85	Jul-10	10.31	Sep-14	12.88
Jun-06	21.62	Aug-10	3.106	Oct-14	34.79
Jul-06	6.115	Sep-10	10.25	Nov-14	39
Aug-06	1.457	Oct-10	43.23	Dec-14	62.42
Sep-06	1.677	Nov-10	64.07	Jan-15	132.2
Oct-06	3.883	Dec-10	105.3	Feb-15	203.6
Nov-06	35.58	Jan-11	131.1	Mar-15	220.7
Dec-06	102	Feb-11	151.3	Apr-15	162.3
Jan-07	173.3	Mar-11	132.1	May-15	92.22
Feb-07	183.3	Apr-11	87.18	Jun-15	28.58
Mar-07	182	May-11	33.76	Jul-15	8.442
Apr-07	147.7	Jun-11	12.44	Aug-15	7.998
May-07	90.81	Jul-11	12.69	Sep-15	5.272
Jun-07	36.76	Aug-11	5.79	Oct-15	8.391
Jul-07	9.343	Sep-11	2.361	Nov-15	77.4
Aug-07	2.493	Oct-11	23.69	Dec-15	88.52
Sep-07	8.991	Nov-11	51.2	Jan-16	136.2
Oct-07	21.49	Dec-11	69.12	Feb-16	178.5
Nov-07	33.46	Jan-12	71.69	Mar-16	185.3
Dec-07	66.02	Feb-12	126.6	Apr-16	159.6
Jan-08	118.2	Mar-12	160.7	May-16	118.4
Feb-08	180.9	Apr-12	114.9	Jun-16	73.63
Mar-08	177.6	May-12	64.76	Jul-16	46.8
Apr-08	139.3	Jun-12	18.43	Aug-16	13.12
May-08	81.51	Jul-12	6.194	Sep-16	3.375
Jun-08	25.5	Aug-12	2.775	Oct-16	18.12
Jul-08	6.757	Sep-12	37.34	Nov-16	31.99
Aug-08	2.033	Oct-12	76.79	Dec-16	43.69
Sep-08	4.871	Nov-12	93.1	Jan-17	77.14
Oct-08	19.87	Dec-12	103.3	Feb-17	105.2
Nov-08	35.31	Jan-13	98.2	Mar-17	106
Dec-08	78	Feb-13	112.1	Apr-17	114.7
Jan-09	127.3	Mar-13	110.5	May-17	77.34
Feb-09	122.2	Apr-13	115.2	Jun-17	30.53
Mar-09	105.4	May-13	75.67	Jul-17	17.3
Apr-09	71.64	Jun-13	21.24	Aug-17	4.495
May-09	28.73	Jul-13	6.77	Sep-17	2.595
Jun-09	9.633	Aug-13	2.44	Oct-17	11.92
Jul-09	4.335	Sep-13	1.237		

Tabla 4: Resultados de los caudales mensuales obtenidos con SWAT.

## **6.2. Ecuaciones del Modelo Hidrológico SWAT:**

Para comenzar a describir las ecuaciones que fundamentan el modelo realizado por SWAT haremos referencia a las referidas al modelo de infiltración usado (Green and Ampt). Como se mencionó, Mein y Larson determinaron la tasa de infiltración de la siguiente manera:

$$f_{inf,t} = K_e * \left(1 + \frac{\psi_{wf} * \Delta\theta_v}{F_{inf,t}}\right) \text{ [Ecuación 8]}$$

Donde:

$f_{inf,t}$  = tasa de infiltración para un tiempo t [mm/hr].

$K_e$  = conductividad hidráulica efectiva [mm/hr].

$\psi_{wf}$  = es el potencial matricial frontal de humectación [mm].

$\Delta\theta_v$  = es el cambio en el contenido de humedad volumétrica en el frente húmedo [mm/mm].

$F_{inf,t}$  = infiltración acumulada en el tiempo t [mm].

El valor de  $K_e$  se lo puede definir como:

$$K_e = \frac{56.82 * K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 * e^{0.062 * CN}} - 2 \text{ [Ecuación 9]}$$

Donde:

$K_{sat}$  = es la conductividad hidráulica saturada [mm/hr]

CN = número de Curva Número en función del uso del suelo, permeabilidad del mismo y condiciones hidrológicas.

Por su parte, el valor de  $\psi_{wf}$  es calculado en función de la porosidad y del porcentaje de arena y arcilla.

Luego, y haciendo énfasis en los fundamentos hidrológicos del modelo referidos a valores de caudales o escorrentías, se define que el método usado por SWAT para calcular la tasa máxima de escorrentía es el Método Racional Simplificado. Este método se basa en la suposición de que si una lluvia de intensidad  $i$  comienza en el momento  $t=0$  y continúa indefinidamente, la tasa de escorrentía aumentará hasta el momento de la concentración, es decir, cuando  $t$  es igual al tiempo de concentración. Esto implica que toda el área de la subcuenca está contribuyendo al flujo en la salida. La fórmula racional es:

$$q_{peak} = \frac{C * i * \text{Área}}{3.6} \text{ [Ecuación 10]}$$

Donde:

$q_{peak}$  = tasa máxima de escorrentía [ $m^3/s$ ].

C = coeficiente de escorrentía

$i$  = intensidad de lluvia [mm/hr].

Área = área de la cuenca [ $km^2$ ].

El tiempo de concentración es la cantidad de tiempo desde el comienzo de un evento de lluvia hasta que toda el área de la subcuenca esté contribuyendo al flujo en la salida. En otras palabras, el tiempo de concentración es el tiempo para que fluya una gota de agua desde el punto más alejado en la subcuenca a la salida de la misma. El momento de la concentración se calcula sumando el tiempo de flujo terrestre (el tiempo que toma para el



flujo desde el punto más remoto en la subcuenca para llegar a la salida) y el tiempo de flujo del canal (el tiempo que tarda el flujo en los canales ascendentes para alcanzar la salida):

$$t_{con} = t_{ov} + t_{ch}$$

Donde:

$t_{con}$  = tiempo de concentración [hr].

$t_{ov}$  = tiempo para el flujo terrestre [hr].

$t_{ch}$  = tiempo de flujo de canal [hr].

Para determinar el  $t_{ov}$  se utiliza la ecuación de manning siendo esta:

$$t_{ov} = \frac{L^{0.6}n^{0.6}}{18*s^{0.3}}[\text{Ecuación 11}]$$

Donde:

L = longitud del cauce principal.

n = número de manning en función del material y geometría del cauce.

s = pendiente del cauce principal.

Para determinar el  $t_{ch}$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6*v_c}[\text{Ecuación 12}]$$

Donde:

$L_c$  = es la longitud promedio del cauce principal de la cuenca.

$v_c$  = es la velocidad promedio del cauce principal de la cuenca, estimada a partir de la ecuación de manning:

$$v_c = \frac{0.317*A^{0.125}*s^{0.375}}{n^{0.75}}[\text{Ecuación 13}]$$

Resultando la ecuación para el  $t_{ch}$  igual a:

$$t_{ch} = \frac{0.62*L*n^{0.75}}{A^{0.125}*s^{0.375}}[\text{Ecuación 14}]$$

Otro parámetro a determinar es el coeficiente de escorrentía que se define como la relación de la tasa de entrada ( $i$ \*área) y el pico de la tasa de descarga ( $q_{peak}$ ). Dicho coeficiente variará de tormenta a tormenta y es calculado con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}}[\text{Ecuación 15}]$$

Donde:

$Q_{surf}$  = es la escorrentía superficial [mmH<sub>2</sub>O].

$R_{day}$  = es la precipitación del día [mmH<sub>2</sub>O].



Por otra parte, es necesario determinar la intensidad de la lluvia la cual es la tasa promedio de lluvia durante el tiempo de concentración. Según esto, se la puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{con}} \text{ [Ecuación 16]}$$

Donde:

$i$  = es la intensidad de lluvia [mm/hr].

$R_{tc}$  = es la precipitación diaria [mm]

$t_{con}$  = tiempo de concentración [hr].

Por último, como se mencionó se trata de un modelo racional modificado por lo tanto a la ecuación 1 se la debe modificar con la implementación de un coeficiente ( $\alpha$ ) resultando la misma:

$$q_{peak} = \frac{\alpha * C * i * \text{Área}}{3.6} \text{ [Ecuación 17]}$$

El significado de este coeficiente es determinar la fracción de lluvia diaria que ocurre durante el tiempo de concentración. El mismo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - e^{[2 * t_{con} * \ln(1 - \alpha_{0.5})]} \text{ [Ecuación 18]}$$

Donde:

$\alpha_{0.5}$  = es la fracción de lluvia diaria que cae en la intensidad más alta de media hora de lluvia.

En grandes subcuencas con un tiempo de concentración mayor a 1 día, solo una parte de la escorrentía superficial alcanzará el canal principal el día que llueve. SWAT incorpora una función de almacenamiento de escorrentía superficial para retrasar una parte de la descarga de la escorrentía superficial al canal principal.

Una vez que la escorrentía superficial se calcula con el número de curva o el método de Green & Ampt, la cantidad de escorrentía superficial liberada al canal principal se calcula:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{srtor,i-1}) * [1 - e^{\frac{-surlag}{t_{con}}}] \text{ [Ecuación 19]}$$

Donde:

$Q_{surf}$  = es la escorrentía superficial descargada al canal principal en un día determinado [mmH<sub>2</sub>O].

$Q'_{surf}$  = es la cantidad de escorrentía superficial generada en el subcuena en un día determinado [mmH<sub>2</sub>O].

$Q_{srtor,i-1}$  = es la escorrentía superficial almacenada o rezagada del día anterior [mmH<sub>2</sub>O].

$surlag$  = es el coeficiente de demora en la escorrentía superficial

$t_{con}$  = es el tiempo de concentración de la cuenca [hr].



Muchas cuencas hidrológicas poseen grandes cantidades de flujo de corriente. Esto trae aparejado la necesidad de contabilizar las pérdidas y determinar la transmisión de las mismas ya que hace que el volumen de escorrentía disminuya a medida que la ola de inundación se desplaza aguas abajo.

En el manual de Hidrología SCS (Lane, 1983) se describe un procedimiento para estimar pérdidas de transmisión para este tipo de corrientes. Este método fue desarrollado para estimar pérdidas de transmisión en ausencia de los datos de entrada y salida de flujo observados y no asume entrada lateral que constituya contribuciones al flujo a la escorrentía. Por lo tanto, la ecuación de la máxima escorrentía después de las pérdidas por transmisión resulta la siguiente:

$$q_{peak,f} = \frac{1}{3600 * dur_{flw}} * [a_x - (1 - b_x) * vol_{qsurf,i}] + b_x * q_{peak,i} \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde:

$q_{peak,f}$  = es la tasa máxima después de las pérdidas de transmisión [ $m^3/s$ ].

$dur_{flw}$  = la duración de flujo [hr].

$a_x$  = es la intercepción de regresión para un canal de longitud L y ancho W [ $m^3$ ].

$b_x$  = es la pendiente de regresión para un canal de longitud L y ancho W.

$vol_{qsurf,i}$  = es el volumen de escorrentía antes de las pérdidas de transmisión [ $m^3$ ].

$q_{peak,i}$  = es la tasa máxima antes de tomar en cuenta las pérdidas de transmisión [ $m^3/s$ ].

Para calcular la duración del flujo, es decir,  $dur_{flw}$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$dur_{flw} = \frac{Q_{surf} * \text{área}}{3.6 * q_{peak}} \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Para determinar los valores de  $a_x$  y  $b_x$  se utilizan las siguientes ecuaciones las cuales resultan de un desarrollo para un canal unitario en primera medida y luego se determina para cualquier canal:

$$a_x = \frac{a_r}{1 - b_r} * (1 - b_x) \quad \text{[Ecuación 22]}$$

$$b_x = e^{-k_r * L * W} \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Donde:

$a_r$  = es la unidad de regresión del canal unitario [ $m^3$ ].

$b_r$  = es la unidad de regresión de pendiente de un canal unitario.

$k_r$  = es la decadencia del factor [ $1/(m * km)$ ]

Se supone que las pérdidas de transmisión de la escorrentía superficial se infiltran en el acuífero poco profundo.

Otro aspecto a considerar es el flujo subterráneo, el cual es abastecido principalmente por infiltración o percolación y, a su vez, es reducido por la descarga de los ríos o lagos. Se pueden definir de esta manera los acuíferos, los cuales son unidades geológicas que pueden almacenar suficiente agua y transmitirla a un ritmo lo suficientemente rápido como para ser hidrológicamente significativo. SWAT simula dos

acuíferos en cada subcuenca. El acuífero poco profundo es unacuífero no confinado que contribuye a fluir en el canal principal o alcance de lasubcuenca. El acuífero profundo es un acuífero confinado, el cual se supone que el agua que entra a las profundidades desde este contribuye a la corriente en algún lugar fuera delcuenca hidrográfica (Arnold *et al.*, 1993).

El balance de agua para el acuífero es:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-q} + W_{rcrh} + Q_{qw} + W_{revap} + W_{deep} + W_{pump,sh} \text{ [Ecuación 24]}$$

Donde:

$aq_{sh,i}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial el día  $i$  [mm].

$aq_{sh,i-q}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial el día  $i-1$  [mm].

$W_{rcrh}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$Q_{qw}$  = es el flujo de agua subterránea, o flujo de base, en el canal principal el día  $i$  [mm].

$W_{revap}$  = es la cantidad de agua que se mueve hacia la zona del suelo en respuesta al agua deficiencias en el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$W_{deep}$  = es la cantidad de agua que se filtra desde el acuífero poco profundo en el acuífero profundo el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

$W_{pump,sh}$  = es la cantidad de agua extraída del acuífero superficial bombeando el día  $i$  [mmH<sub>2</sub>O].

El retraso entre el momento en que el agua sale del perfil del suelo y entra en el acuífero poco profundo dependerá de la profundidad de la capa freática y la propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en las aguas vadasas y subterráneas zonas. Una función de ponderación de decaimiento exponencial propuesta por Venetis (1969) y utilizado por Sangrey *et al.* (1984) en un modelo de respuesta precipitación / agua subterránea es utilizado en SWAT para tener en cuenta el retraso de tiempo en la recarga del acuífero una vez que el agua sale del perfil del suelo. La función de retardo se adapta a situaciones donde la recarga desde la zona de suelo al acuífero no es instantánea, es decir, 1 día o menos. La recarga al acuífero en un día determinado se calcula:

$$W_{rchrg,i} = \left[ 1 - e^{-\frac{1}{\delta_{gw}}} \right] * w_{seep} + e^{-\frac{1}{\delta_{gw}}} * W_{rchrg,i-1} \text{ [Ecuación 25]}$$

Donde:

$W_{rchrg,i}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$\delta_{gw}$  = es el tiempo de retardo o tiempo de drenaje de las formaciones geológicas suprayacentes [días].

$w_{seep}$  = es la cantidad total de agua que sale de la parte inferior del perfil del suelo el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$W_{rchrg,i-1}$  = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero en el día  $i-1$  [mm H<sub>2</sub>O].

La cantidad total de agua que sale de la parte inferior del perfil del suelo el día  $i$  se calcula:

$$W_{seep} = W_{perc,ly} + W_{crk,btm} \text{ [Ecuación 26]}$$



Donde:

$W_{seep}$  = es la cantidad total de agua que sale de la parte inferior del perfil del suelo en día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O]

$W_{perc,ly}$  = es la cantidad de agua que se filtra desde la más baja capa,  $n$ , en el perfil del suelo en el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$W_{crk,btm}$  = es la cantidad de agua fluir más allá del límite inferior del perfil del suelo debido al flujo de derivación en el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

El tiempo de retardo,  $\delta_{gw}$ , no se puede medir directamente. Puede ser estimado por una simulación de la recarga del acuífero usando diferentes valores para  $\delta_{gw}$  y comparando el variaciones simuladas en el nivel freático con los valores observados. Johnson (1977) desarrolló un programa simple para probar iterativamente y evaluar estadísticamente diferentes tiempos de demora para una cuenca hidrográfica. Sangrey et al. (1984) observaron que los pozos de monitoreo en la misma área tenía valores similares para  $\delta_{gw}$ , por lo que una vez que un valor de tiempo de retrardo para una área geomorfológica se define, se pueden utilizar estos para cuencas hidrográficas dentro de la misma provincia geomorfológica.

El acuífero poco profundo contribuye con el flujo base al canal principal o al alcance dentro de la subcuenca. Se permite que el flujo base entre al alcance solo si la cantidad de el agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado por usuario,  $aq_{shthr,q}$ . La respuesta de estado estacionario del flujo de agua subterránea para recargar es (Hooghoudt, 1940):

$$Q_{gw} = \frac{800 * k_{sat}}{L_{gw}^2} * h_{wtbl} = 800 * \mu * \alpha_{gw} * h_{wtbl} \text{ [Ecuación 27]}$$

Donde:

$Q_w$  = el flujo de agua subterránea, o flujo base, en el canal principal el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$k_{sat}$  = la conductividad hidráulica del acuífero [mm / día]

$L_{gw}$  = es el distancia desde la cresta o subcuenca dividir para el sistema de agua subterránea a la principal canal [m].

$h_{wtbl}$  = la altura de la tabla de agua [m].

$\mu$  = es el rendimiento específico del acuífero superficial [m/m].

$\alpha_{gw}$  = es la constante de recesión de flujo base

SWAT modela el movimiento del agua en capas suprayacentes no saturadas como una función de la demanda de agua para la evapotranspiración. Para evitar confusiones con la evaporación y transpiración del suelo, este proceso se ha denominado "revap". Este proceso es significativo en las cuencas hidrográficas donde la zona saturada no está muy por debajo del superficie o donde las plantas de raíces profundas están creciendo. Debido a que el tipo de cubierta vegetal afectará la importancia de revap en el balance de agua, los parámetros que gobiernan revap usualmente varía según el uso de la tierra. Revap solo se permite si la cantidadde agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado porusuario,  $aq_{shthr,rvp}$ . La cantidad máxima de agua que se eliminará del acuífero a través de 'Revap' en un día determinado es:

$$W_{revap,mx} = E_o * \beta_{rev} \text{ [Ecuación 28]}$$



Donde:

$W_{revap,mx}$  = es la cantidad máxima de agua que se mueve hacia la zona del suelo en respuesta a las deficiencias de agua [mm H<sub>2</sub>O].

$E_o$  = es la evapotranspiración potencial para el día [mm H<sub>2</sub>O].

$\beta_{rev}$  = el coeficiente de revapificación.

La cantidad real de revap que ocurrirá en un día determinado se calcula:

$$W_{repav} = 0 \quad si, aq_{sh} < aq_{shthr,rvp}$$

$$W_{repav} = W_{repav,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad si, aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + W_{repav,mx})$$

$$W_{repav} = W_{repav,mx} \quad si, aq_{sh} > (aq_{shthr,rvp} + W_{repav,mx})$$

Donde:

$W_{repav}$  = es la cantidad real de agua que se mueve hacia la zona del suelo en respuesta a Deficiencias de agua [mm H<sub>2</sub>O].

$W_{repav,mx}$  = es la cantidad máxima de agua que se mueve en la zona del suelo en respuesta a las deficiencias de agua [mm H<sub>2</sub>O].

$aq_{sh}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero poco profundo al comienzo del día i [mm H<sub>2</sub>O].

$aq_{shthr,rvp}$  = es el nivel de agua umbral en el acuífero poco profundo para revap o percolación a un acuífero profundo [mm H<sub>2</sub>O].

La percolación al acuífero profundo solo se permite si la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado por el usuario,  $aq_{shthr,rvp}$ . La cantidad máxima de agua que se eliminará de la superficie el acuífero a través de la filtración hacia el acuífero profundo en un día determinado es:

$$W_{deep,mx} = w_{rchr} * \beta_{deep} \text{ [Ecuación 29]}$$

Donde:

$W_{deep,mx}$  = es la cantidad máxima de agua que se mueve al acuífero profundo en día i [mm H<sub>2</sub>O].

$w_{rchr}$  = es el cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día i (mm H<sub>2</sub>O)

$\beta_{deep}$  = es el coeficiente de percolación del acuífero.

La cantidad real de la percolación al acuífero profundo que ocurrirá en un día determinado se calcula:

$$W_{deep} = 0 \quad si, aq_{sh} < aq_{shthr,rvp}$$



$$W_{deep} = W_{deep,mx} - aq_{shthr,rvp} si, aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + W_{deep,mx})$$

$$W_{deep} = W_{deep,mx} si, aq_{sh} > (aq_{shthr,rvp} + W_{deep,mx})$$

Donde:

$W_{deep}$  =  $w_{deep}$  es la cantidad real de agua que se mueve hacia el acuífero profundo el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$W_{deep,mx}$  = es la cantidad máxima de agua que se mueve hacia el acuífero profundo el día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

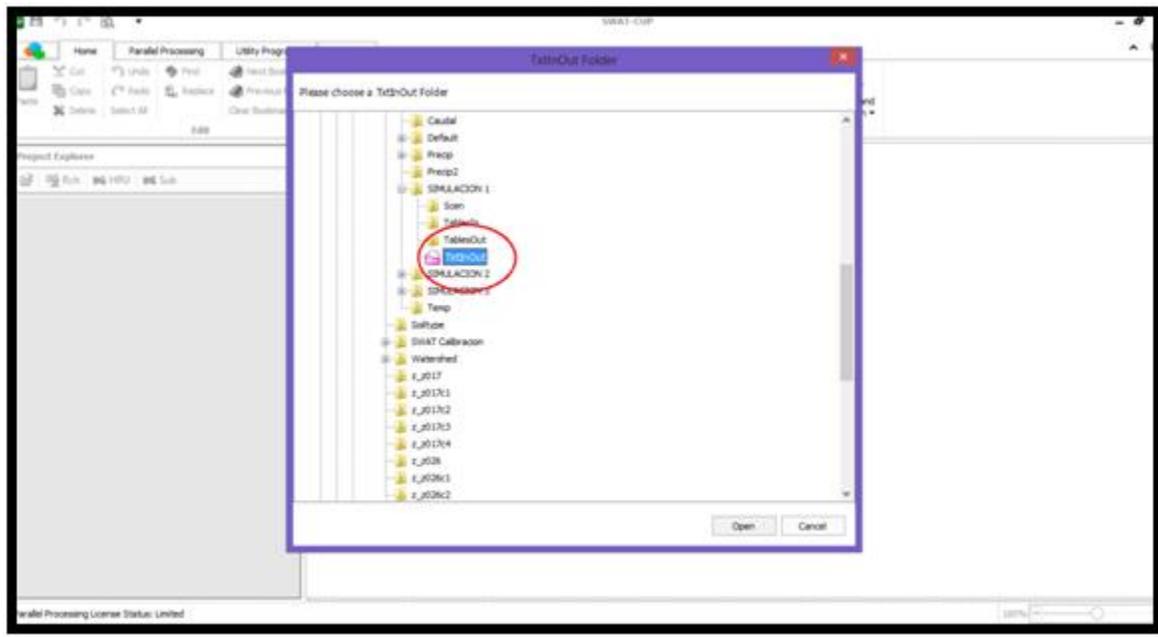
$aq_{sh}$  = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero poco profundo al comienzo del día  $i$  [mm H<sub>2</sub>O].

$aq_{shthr,rvp}$  = es el nivel de agua umbral en el acuífero poco profundo para revap o percolación a un acuífero profundo [mm H<sub>2</sub>O].

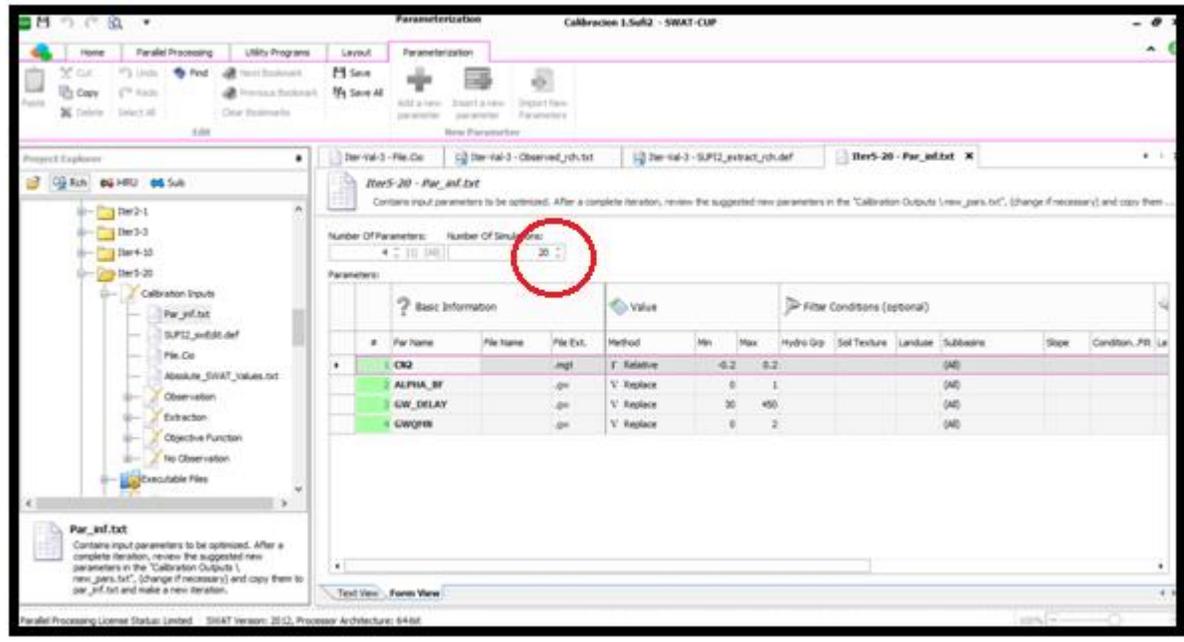
### **6.3.Pasos a seguir para calibrar en SWAT-CUP**

A continuación se muestran los ingresos de datos y determinación de parámetros ingresados al software para poder realizar la modelación hidrológica.

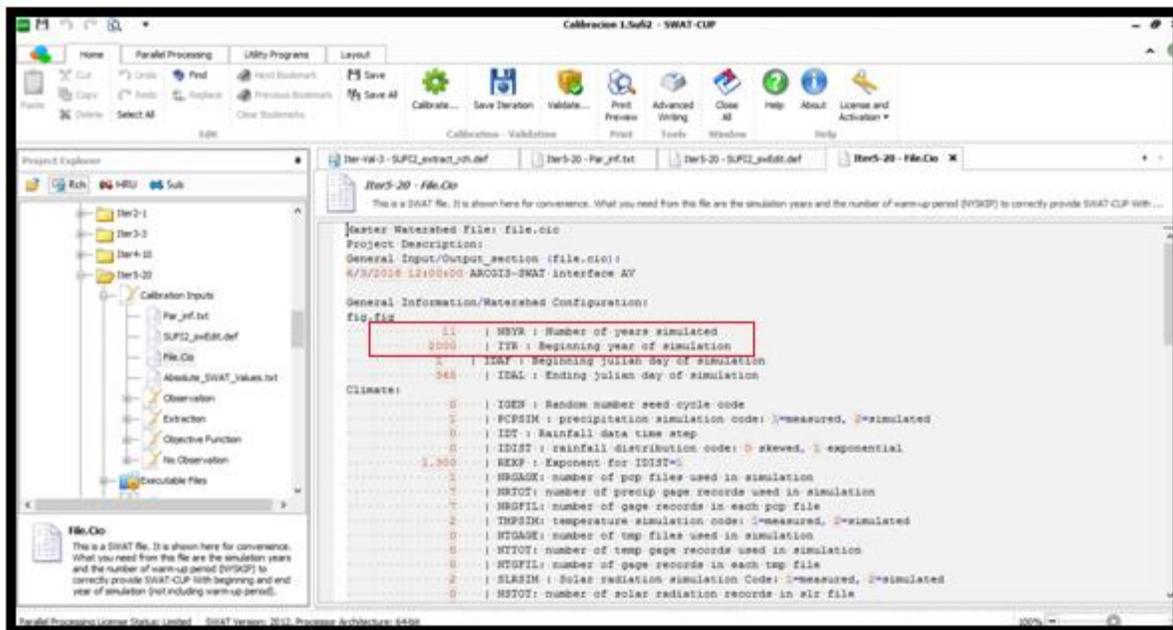
**Paso 1:** Lo primero que se realiza es crear un nuevo proyecto vinculándolo con los resultados obtenidos en SWAT.



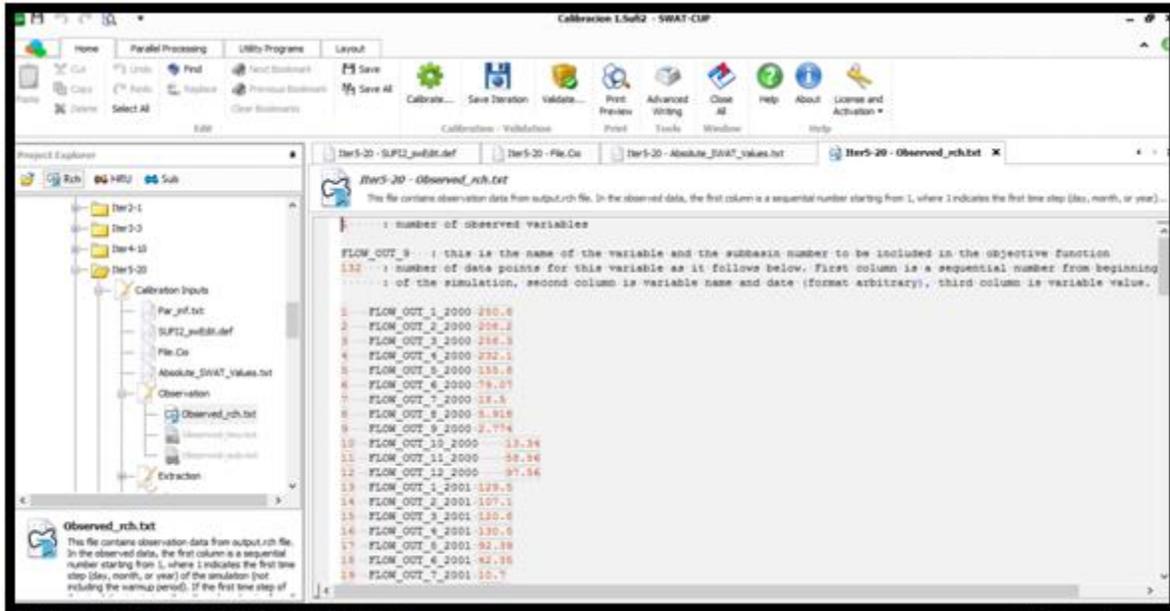
**Paso 2:** En este momento se determina el número de iteraciones que quiero que se hagan durante el proceso de calibración.



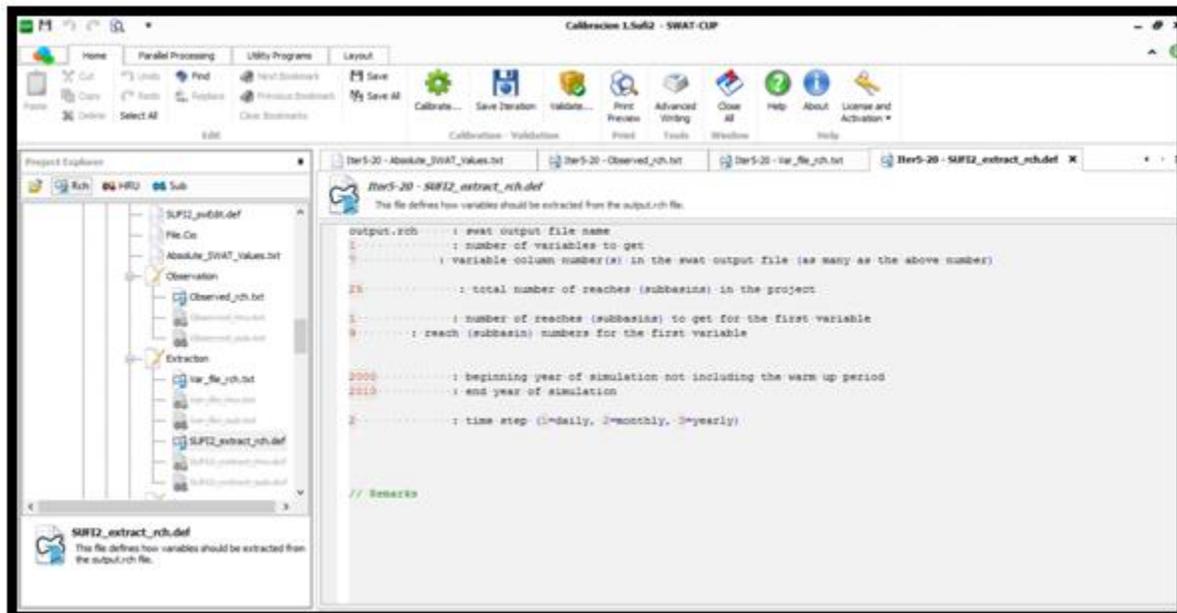
**Paso 3:** En este paso se determinan los años de calibración y el año de inicio del mismo.



**Paso 4:** Luego, se copian los valores de los caudales medios obtenidos con SWAT del período de calibración antes mencionado.



**Paso 5:** Por último, se define año de inicio y fin de calibración, número de subcuenca de cierre de la cuenca en donde se quiere obtener los valores de los caudales calibrados y cantidad de variables a calibrar (en este ejemplo es una sola: caudales mensuales). Además, se elige el período de reporte de los resultados siendo este coincidente con el de SWAT, mensuales.



**Paso 6:** Luego de correr el programa, se obtienen los resultados a través de gráficos (expuesto en el desarrollo del presente trabajo), tablas y estadísticos. Los resultados fueron mostrados en el trabajo, acá se colocan las tablas.

Fecha	Observado	Simulado	Fecha	Observado	Simulado	Fecha	Observado	Simulado
Ene-00	250.8	83.23	Sep-03	2.6	8.87	May-07	90.81	69.82
Feb-00	208.2	115.2	Oct-03	17.99	28.2	Jun-07	36.76	34.44
Mar-00	258.3	255.7	Nov-03	18.74	19.95	Jul-07	9.34	17.98
Apr-00	232.1	194	Dec-03	63.02	80.76	Aug-07	2.5	8.81
May-00	155.8	112.4	Jan-04	68.76	35.29	Sep-07	8.99	16.38
Jun-00	79.07	55.1	Feb-04	85.62	93.01	Oct-07	21.49	27.04
Jul-00	18.5	27.81	Mar-04	93.79	99.985	Nov-07	33.46	38.11
Aug-00	5.918	13.71	Apr-04	123	136.4	Dec-07	66.02	78.67
Sep-00	2.774	7.37	May-04	105	94.85	Jan-08	118.2	137.1
Oct-00	13.34	23.16	Jun-04	62.78	49.8	Feb-08	180.9	200.7
Nov-00	58.56	75.6	Jul-04	18.51	26.09	Mar-08	177.6	162.3
Dec-00	97.56	106.5	Aug-04	9.68	16.6	Apr-08	139.3	118.9
Jan-01	129.5	136.3	Sep-04	1.93	7.42	May-08	81.51	60.23
Feb-01	107.1	89.44	Oct-04	14.42	25.65	Jun-08	25.5	30.27
Mar-01	120.8	130.6	Nov-04	33.48	40.94	Jul-08	6.75	15.06
Apr-01	130.5	131.7	Dec-04	84.93	106	Aug-08	2.03	7.67
May-01	92.39	75.05	Jan-05	135.3	146.7	Sep-08	4.87	10.56
Jun-01	42.35	38.7	Feb-05	128.2	122	Oct-08	19.87	27.93
Jul-01	10.7	19.38	Mar-05	131.3	136	Nov-08	35.31	38.5
Aug-01	4.64	11.04	Apr-05	107.3	91.26	Dec-08	78	97.94
Sep-01	13.2	25.12	May-05	58.8	47.25	Jan-09	127.3	138.6
Oct-01	78.47	106.8	Jun-05	15.78	24.29	Feb-09	122.2	112.2
Nov-01	78.57	70.46	Jul-05	10.21	16.91	Mar-09	105.4	99.03
Dec-01	73.87	72.45	Aug-05	3.83	8.82	Apr-09	71.64	63.34
Jan-02	111.1	125.6	Sep-05	2.3	5.82	May-09	28.73	31.7
Feb-02	152.7	168.9	Oct-05	4.91	8.61	Jun-09	9.63	16.89
Mar-02	141.8	103.1	Nov-05	27.07	42.65	Jul-09	4.33	9.92
Apr-02	157.1	165.7	Dec-05	58.74	68.05	Aug-09	1.59	5.27
May-02	114.4	89.96	Jan-06	70.89	72.27	Sep-09	3.95	8.1
Jun-02	62.03	49.64	Feb-06	148.1	173.1	Oct-09	3.75	8.52
Jul-02	29.49	36.11	Mar-06	135.3	126.1	Nov-09	25.14	38.72
Aug-02	15.7	25.86	Apr-06	117	107.8	Dec-09	79.07	104.3
Sep-02	25.32	34.17	May-06	69.85	52.13	Jan-10	99.87	98.5
Oct-02	18.06	18.44	Jun-06	21.62	16.12	Feb-10	120.11	126.5
Nov-02	20.84	28.62	Jul-06	6.11	12.93	Mar-10	156.5	170.8
Dec-02	84.32	110.4	Aug-06	1.457	6.19	Apr-10	139.7	125.8
Jan-03	127.7	133.9	Sep-06	1.67	4.79	May-10	90.86	71.93
Feb-03	161.2	167.6	Oct-06	3.88	7.04	Jun-10	39.48	36.23
Mar-03	145.6	136.6	Nov-06	35.58	59.51	Jul-10	10.31	18.52
Apr-03	110.9	99.5	Dec-06	102	127.4	Aug-10	3.1	9.61
May-03	74.31	62.82	Jan-07	173.3	190.7	Sep-10	10.25	18.73
Jun-03	44.96	45.47	Feb-07	183.3	178.8	Oct-10	43.23	59.56
Jul-03	28.55	36.54	Mar-07	182	180.8	Nov-10	64.07	66.1
Aug-03	12.67	17.2	Apr-07	147.7	129.7	Dec-10	105.3	121.9

Tabla 5: Resultados de los caudales mensuales obtenidos con SWATCUP.