

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

PRÁCTICA SUPERVISADA - Informe Técnico Final

Calibración preliminar del modelo hidrológico semi-distribuido
SWAT en la cuenca del río Carcarañá

AUTOR: MAGLIONE, LUCIANO

TUTOR INTERNO: Dr. Ing. ALONSO, FACUNDO

SUPERVISOR EXTERNO: MSc. Ing. ALVAREZ, JAVIER

AÑO 2019

AGRADECIMIENTOS

Este informe está dedicado a todas aquellas personas que hicieron posible que haya llegado a este punto, porque sin ellos no podría estar dando este último paso para ser Ingeniero.

A mi familia, por estar presentes en todo momento, brindándome su apoyo para poder llevar adelante esta carrera.

A mis amigos, con los que se comparten buenos momentos, pero así también brindan su apoyo en los momentos difíciles y permiten seguir adelante.

A mi tutor de prácticas supervisadas Dr. Ing. Alonso, Facundo por su predisposición y paciencia para orientarme en la búsqueda del tema a desarrollar en la práctica supervisada dentro del campo de la hidrología.

Al MSc. Ing. Civil Álvarez, Javier, supervisor externo por su dedicación y gran ayuda a lo largo del desarrollo de este trabajo, aportando su conocimiento en la materia y brindando las herramientas necesarias para llevar a cabo ésta práctica.

A todos los docentes que me acompañaron durante mi formación, brindándome sus conocimientos y preparándome para ser un buen profesional.

Por último, quiero agradecer al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba por brindar el lugar de trabajo y reuniones, así como también a todas aquellas personas que facilitaron el acceso a la información necesaria para el desarrollo del presente trabajo.



UNC



FCEFyN



CETA

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA



ÍNDICE DE CONTENIDOS

PRÓLOGO	11
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	13
1.1. MARCO REFERENCIAL.....	13
1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO	13
1.3. INTRODUCCIÓN	14
1.4. OBJETIVOS	15
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES	15
2. CAPÍTULO II: MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	17
2.1. INTRODUCCIÓN	17
2.2. AREA DE ESTUDIO.....	18
2.3. PROCESO DE MODELACIÓN	22
2.3.1. INTRODUCCIÓN.....	22
2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS SEGÚN SU REPRESENTACION ESPACIAL	23
2.3.3. MODELOS DE EVENTOS AISLADOS Y DE PROCESO CONTINUO.....	24
2.3.4. MODELOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU CONCEPCIÓN.....	25
2.3.5. VARIABLES Y PARÁMETROS	25
2.3.6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	27
2.4. OBTENCIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	28
2.5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA SEMI-DISTRIBUIDA CON SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL).....	33
2.5.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO SWAT.....	33
2.5.2. FUNDAMENTOS Y ECUACIONES DE SWAT	35



2.5.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ.....	37
2.6. CAUDALES OBSERVADOS EN LOS DIFERENTES PERÍODOS DE CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA.....	39
2.7. SÍNTESIS.....	40
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍAS Y PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA	41
3.1. INTRODUCCIÓN	41
3.2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE CALIBRACIÓN.....	42
3.2.1. PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN E INCERTIDUMBRE PARA SWAT (SWAT-CUP)	42
3.2.2. HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN EN PYTHON.....	42
3.3. PARÁMETROS	43
3.4. FUNCIONES OBJETIVO	45
3.4.1. MULTIPLICACIÓN (mult)	45
3.4.2. SUMATORIA (sum)	46
3.4.3. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)	46
3.4.4. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN MODIFICADO (bR^2).....	47
3.4.5. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI-CUADRADO (χ^2)	47
3.4.6. EFICIENCIA NASH-SUTCLIFFE (NS).....	48
3.4.7. EFICIENCIA NASH-SUTCLIFFE MODIFICADO (MNS).....	49
3.4.8. SUMA DE LOS CUADRADOS DE LOS RESIDUOS (SSQR)	49
3.4.9. PORCENTAJE DE SESGO (PBIAS).....	50
3.4.10. EFICIENCIA DE KLING-GUPTA	50
3.5. METODOS DE CALIBRACIÓN.....	51
3.5.1. AJUSTE DE INCERTIDUMBRE SECUENCIAL VERSION 2 (SUFI-2).....	51
3.5.2. OPTIMIZACIÓN DE NUBE DE PARTÍCULAS (PSO).....	52



3.5.3. PROBABILIDAD GENERALIZADA DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE (GLUE).....	53
3.5.4. ALGORITMO GENÉTICO (GA).....	54
3.6. SÍNTESIS.....	56
4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS	57
4.1. INTRODUCCIÓN	57
4.2. METODOLOGÍA	58
4.3. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN (Período 1997 – 2006).....	59
4.3.1. SUFI-2	59
4.3.2. PSO	60
4.3.3. GLUE.....	60
4.3.4. GA	61
4.4. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN (Período 2007 – 2016)	62
4.4.1. SUFI-2	63
4.4.2. PSO.....	63
4.4.3. GLUE.....	64
4.4.4. GA	65
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	66
4.6. SÍNTESIS.....	68
5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	69
5.1. CONCLUSIONES ACADÉMICAS.....	69
5.2. CONCLUSIONES PERSONALES	70
6. CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA.....	71
7. ANEXO I	77
7.1. ECUACIONES DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT	77
8. ANEXO II	87
8.1. MODELACIÓN EN ArcSWAT	87



UNC



FCEFyN



8.1.1. DATOS DE ENTRADA	87
8.1.2. USO DE LA INTERFAZ ArcSWAT	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudio delimitada por la cuenca del Carcarañá (en rojo) y principales cursos de agua, entre las Provincias de Santa Fe, Córdoba y San Luis.....	19
Figura 2 - Cuenca del río Carcarañá y sus principales subcuencas.....	21
Figura 3 - Modelos hidrológicos. Fuente: Chong-yu, 2002.....	24
Figura 4 - Caudales medios mensuales observados en la localidad de Pueblo Andino	28
Figura 5 - Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Carcarañá	30
Figura 6 - Modelo digital de elevación MDE-ar.....	31
Figura 7 - Usos de suelo de la cuenca del río Carcarañá (Fuente: INTA).....	32
Figura 8 - Tipos de suelo de la cuenca del río Carcarañá (Fuente: FAO)	33
Figura 9 - Representación ciclo hidrológico en SWAT	34
Figura 10 - Proceso de modelación con SWAT.....	37
Figura 11 - HRU de la cuenca del río Carcarañá	38
Figura 12 - Caudales observados en los diferentes períodos de calibración hidrológica.....	39
Figura 13 - Resultados calibración SUFI-2.....	59
Figura 14 - Resultados calibración PSO	60
Figura 15 - Resultados calibración GLUE	61
Figura 16 - Resultados calibración GA.....	62
Figura 17 - Resultados validación SUFI-2.....	63
Figura 18 - Resultados validación PSO.....	64
Figura 19 - Resultados validación GLUE	64
Figura 20 - Resultados validación GA.....	65
Figura 21 - Subestimación de picos	66
Figura 22 - Sobreestimación y subestimación de picos	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Estaciones de precipitación utilizadas en la cuenca de estudio	29
Tabla 2 - Parámetros de calibración seleccionados.....	44
Tabla 3 - Rangos de parámetros de calibración seleccionados.....	58



UNC



FCEFyN



PRÓLOGO

El presente trabajo tiene como finalidad principal describir los trabajos realizados por el alumno durante la ejecución de su práctica supervisada. La función principal de dicha práctica consta en trasladar los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera al desarrollo de la vida profesional. Puede considerarse como una primera aproximación al trabajo como Ingeniero Civil. Por esta razón, resulta de gran importancia la realización de la práctica supervisada para que el estudiante pueda comenzar a innovar en lo que será su actividad una vez finalizados sus estudios.

Uno de los obstáculos a superar al momento de realizar la práctica profesional supervisada es poder relacionar los distintos conceptos teóricos adquiridos en las diferentes asignaturas con la aplicación práctica de los mismos, lo cual no siempre es un trabajo fácil.

En el caso de la presente práctica, se orientó la misma en el campo de la investigación, siendo ésta una de las incumbencias del Ingeniero 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. Civil Alonso, Facundo y de la supervisión del MSc. Ing. Civil Álvarez, Javier.

Cabe destacar que los profesionales mencionados anteriormente brindaron las herramientas necesarias y compartieron sus conocimientos y experiencias en el área para que la práctica fuese llevada a cabo de la mejor manera. Por lo tanto, el presente informe es el resultado de un trabajo en equipo, que no hubiera sido factible sin la ayuda aportada por los ingenieros.



UNC



FCEFyN



1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO REFERENCIAL

Para abordar la temática propia del trabajo, resulta necesario hacer mención sobre los estudios realizados anteriormente. En primera medida 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" (2014). Esta tesis presenta una descripción exhaustiva de los procesos hidrológicos e hidráulicos dentro de la cuenca del río Carcarañá.

Por otra parte, la Ing. Carranza Josefina, en el marco de su práctica supervisada participó en el proyecto RELÁMPAGO en donde desarrolló el tema "MODELACIÓN HIDROLÓGICA SEMI-DISTRIBUÍDA EN LA CUENCA ALTA DE RÍO TERCERO (RÍO CTALAMOCHITA, CÓRDOBA) MEDIANTE EL MODELO SWAT" (2018).

Por último, la Universidad Nacional de Córdoba en conjunto con el Ministerio de Agua Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, desarrollaron el proyecto de "BASES DEL PLAN DIRECTOR DE LA CUENCA DEL CARCARAÑÁ" (2018). 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 hidrogeomorfología, entre otros.

Las descripciones realizadas en estos trabajos resultaron en un pilar fuerte para la ejecución de esta práctica supervisada.

1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Como se describió anteriormente, el presente trabajo se basa en estudios previos realizados sobre la cuenca del Río Carcarañá por el Laboratorio de Hidráulica y el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

El principal motivo de este trabajo de investigación es generar una herramienta numérica que permita representar los procesos hidrometeorológicos en la cuenca del río Carcarañá.

1.3. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes procedimientos para realizar una modelación hidrológica, para el análisis de la cuenca de estudio, se empleó el modelo hidrológico semi-distribuido de proceso continuo “Soil and Water Assessment Tool”, usualmente denominado por sus iniciales como “SWAT”.

Para que el modelo hidrológico SWAT sea representativo de la realidad, es necesario un proceso de calibración de los parámetros que intervienen en las ecuaciones de los procesos hidrológicos. Para esto, se parte de observaciones en diferentes puntos de control. En el caso del presente modelo, se utiliza como variable de calibración el escurrimiento superficial en un punto de control al cierre de la cuenca. Una vez, determinado el set de parámetros que mejor logra simular el caudal observado, se realiza el proceso de validación que implica evaluar la calidad de la simulación con respecto a la observación, pero en un período de tiempo distinto al de calibración, a partir de los parámetros determinados en aquella.

Los parámetros que pueden ser calibrados en el modelo SWAT abarcan una extensa lista, tal es así que existen alrededor de 26 parámetros sólo para escurrimiento superficial. Además, un mismo parámetro puede adquirir valores diferentes en el dominio de la cuenca en función de las características del terreno. Lo cual implica un desafío del presente trabajo el seleccionar aquellos parámetros de mayor sensibilidad y proceder a calibrarlos espacialmente.

Históricamente, para llevar a cabo el proceso de calibración y validación del modelo se aplicaban técnicas determinísticas como el método de prueba y error. Sin embargo, en las últimas décadas, distintos investigadores han desarrollado algoritmos estocásticos para calibrar y validar un modelo hidrológico (Alonso, 2018).

Algunos de los algoritmos más utilizados para estos propósitos son el ajuste de incertidumbre secuencial versión 2 (en inglés, SUFI-2), optimización de nube

de partículas (en inglés, PSO), probabilidad generalizada de estimación de incertidumbre (en inglés, GLUE) y algoritmos genéticos (en inglés, GA).

A partir del modelo hidrológico construido en la cuenca del Río Carcarañá con la herramienta SWAT, el objetivo de este trabajo es calibrar y validar a escala mensual dicho modelo para evaluar el proceso lluvia-caudal. Para esto se emplean los diferentes algoritmos de calibración mencionados, a fines de compararlos y determinar cuál resulta más conveniente para el caso de estudio.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Calibrar el modelo semi-distribuido de simulación hidrológica SWAT en la cuenca del río Carcarañá.

1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar una recopilación y análisis de antecedentes.
- Evaluar el desempeño de distintas funciones objetivo.
- Identificar los parámetros de calibración más significativos.
- Evaluar distintos métodos de calibración.



UNC



FCEFyN



CETA

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

2. CAPÍTULO II: MODELACIÓN HIDROLÓGICA

2.1. INTRODUCCIÓN

La base del estudio de la Hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y sub-superficiales, y esta comprensión implica “medir”. Si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones han evolucionado en el tiempo, también es cierto que otros componentes del ciclo hidrológico no tuvieron la misma suerte. La infiltración, la percolación profunda, el flujo sub-superficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico. Del mismo modo, los procesos hidrológicos presentes en el ciclo hidrológico de una cuenca se caracterizan por ser (Cabrera, 2013):

- No-lineales: Variaciones complejas en el espacio y en el tiempo.
- No-estacionarios: Procesos con periodicidad y tendencias.
- Variables en el espacio: Debido a características variables del suelo, de la cobertura vegetal y del clima en el dominio de la cuenca.

Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan (Cabrera, 2013):

- Como herramienta para la gestión y planeamiento.
- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, etc.

Cabe aclarar, que un modelo es una representación simplificada de un sistema real y se pueden clasificar básicamente en tres tipos. El *modelo físico*, el cual consiste en una maqueta a escala que se construye con el fin de representar físicamente un fenómeno o proceso. El *modelo analógico*, es la

representación de un sistema físico, denominado prototipo, por un sistema físico análogo de modo que su comportamiento simule de forma aproximada el del prototipo. Por último, está el *modelo matemático*, que consiste en un sistema de ecuaciones o formulaciones matemáticas que representan el sistema en estudio.

A partir de lo hasta aquí enunciado, resulta intuitivo asociar un modelo hidrológico con un modelo matemático, cuyo fin es representar una cuenca como un sistema físico de manera simplificada. Siendo su capacidad predictiva dependiente de cómo es construido y cómo es aplicado, y la calidad de las predicciones generalmente consistente con la calidad de la comprensión del sistema y del modelo que lo representa. Esto significa que no existe el modelo perfecto aplicable a cualquier cuenca del planeta, sino que cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc. que incrementan la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo.

Una vez entendida la cuenca como sistema, debemos comprender las interacciones que existen entre sus elementos; por ejemplo, la deforestación irracional de la cuenca alta puede conllevar a inundaciones en la época de lluvias en la parte baja. De esta manera necesitamos reconocer los procesos hidrológicos actuantes y los mecanismos físicos presentes. Es así como el presente capítulo intentará explicar el proceso de construcción del modelo de la cuenca en estudio.

2.2. AREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Carcarañá (Figura 1) se encuentra ubicada en la región central de la República Argentina con un área de aporte actual de 73.640 km² (resultado obtenido a partir de trabajos existentes). El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, por la confluencia de los ríos Tercero o Ctalamochita (del cual es directa continuación) y del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava). El río Saladillo a su vez recibe las aguas provenientes del canal Devoto que ingresa al río Saladillo aproximadamente 30 km aguas abajo de la localidad de La Carlota (Córdoba). Recibe además los aportes del arroyo Tortugas/canal San Antonio y de un sistema de depresiones endorreicas y alineadas que conforman el sistema de bajos de laguna Las Mojarras. Luego,

el río Carcarañá, ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que atraviesa de oeste a este, desembocando junto a la localidad de Gaboto en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná (Figura 1). El arroyo Tortugas/canal San Antonio constituye el límite entre las provincias de Córdoba y Santa Fe.

La cuenca del río Carcarañá abarca los territorios de las Provincias de Córdoba, Santa Fe y San Luis (El 89,5 % de la cuenca se encuentra en Córdoba, el 9,8 % en Santa Fe y el 0,7 % en San Luis), y representa una región un área estratégica de gran importancia socio-económica (aproximadamente 4,3 % del PBI).

Este sistema se convierte, evaluando sus efectos positivos, en una potencial fuente de agua para consumo y riego en la región. Por otro lado, en muchas zonas de la Cuenca se presentan problemas de inundaciones ribereñas sobre todo en época de crecidas, erosiones en las márgenes y fondo del lecho, sequías que dificultan las actividades que hacen utilización del río como lo es la potabilización del agua, entre otros.

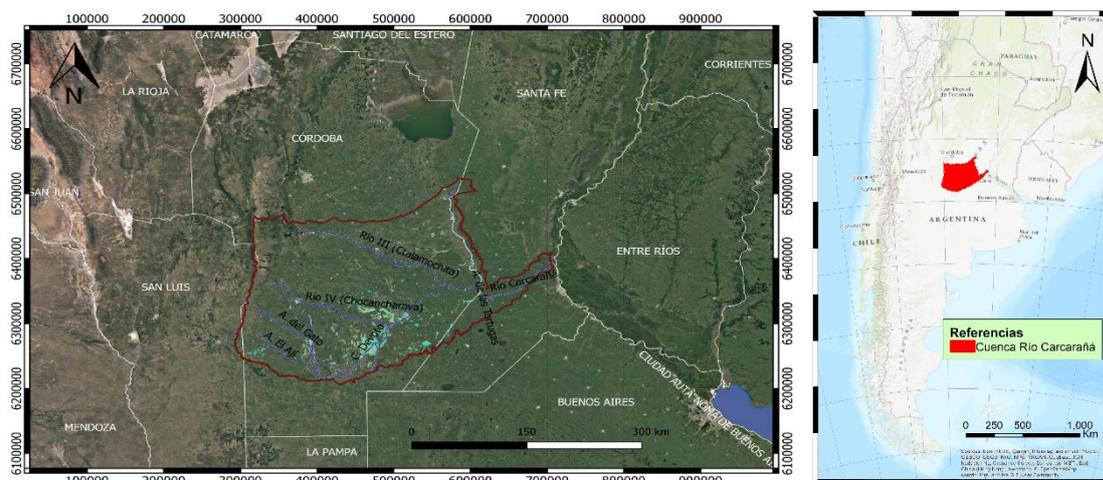


Figura 1 - Área de estudio delimitada por la cuenca del Carcarañá (en rojo) y principales cursos de agua, entre las Provincias de Santa Fe, Córdoba y San Luis.

Entre los principales tributarios de la cuenca se encuentran: el río Tercero (Citalamochita), el río Cuarto (o Chocancharava, de aquí en adelante río Cuarto), cuyo curso inferior se conoce como Saladillo, y el arroyo Tortugas (conocido también como canal San Antonio), este último es el límite interprovincial entre Córdoba y Santa Fe.

Esta cuenca a su vez posee tres sub-cuencas principales (Figura 2) (A) Cuenca del río Tercero (o Ctalamochita, de aquí en adelante río Tercero), (B) Cuenca del Río Cuarto – Saladillo, (C) Cuenca del Arroyo Tortugas (Canal San Antonio). La cuenca del río Tercero (9.700 km²) nace en las Sierras de Comechingones a alturas superiores a 2.000 msnm entre las latitudes 31° 57' S y 32° 35' S. Los escurrimientos superficiales de la parte alta de la cuenca son almacenados en una serie de 6 embalses: Cerro Pelado, Arroyo Corto, Río Tercero, Cassaffousth, Reolín, y Piedra Moras, a partir de este último la cuenca adopta características de llanura hasta la confluencia con el río Saladillo.

La cuenca del río Cuarto – Saladillo, es la sub-cuenca más grande (41.000 km² aproximadamente), dentro de la cuenca del río Carcarañá. Esta cuenca al igual que la del río Tercero, nace en las sierras de Comechingones y luego a pocos kilómetros aguas abajo de la ciudad de Río Cuarto toma características de cuenca de llanura. El río Cuarto desemboca en una serie de bañados conocidos como bañados del río Saladillo, de donde nace el río homónimo que posteriormente confluye con el río Tercero. La cuenca, además, recibe los escurrimientos de los arroyos de Tegua y Cabral provenientes de la parte central de la cuenca del Carcarañá. Además de los arroyos mencionados, el río Saladillo colecta las aguas del Canal Devoto que acarrea los escurrimientos de los arroyos Santa Catalina, el Gato, Chajan, Suco, entre otros que escurren por el sud-oeste provincial.

Por último, la cuenca del canal San Antonio-arroyo Tortugas se ubica en la zona limítrofe de las provincias de Córdoba y Santa Fe y la misma posee una extensión de 11.926 km², la cual su mayor parte se encuentra en territorio Cordobés (84 % del total). La cuenca se encuentra en zona de llanura y presenta características de una cuenca de este tipo. Ésta se extiende por el norte hasta la localidad de San Francisco (Córdoba), hacia el oeste se extiende hasta las cercanías de la localidad de Villa Ascasubi donde se encuentra el límite con la cuenca del Río Tercero, hacia el este la cuenca se extiende en una faja de norte a sur de aproximadamente 20 km de ancho dentro de territorio Santafesino y hacia el sur hasta las cercanías de la localidad de Cruz Alta donde se encuentra la desembocadura del arroyo en el río Carcarañá.

En lo que respecta a los principales tributarios (Figura 2), el río Tercero posee un módulo de 27 m³/s, y el arroyo Tortugas un módulo de 7 m³/s,

calculado a partir de los datos de la estación de Puente km 38,59 (Datos desde 1940 a 1954) provistos por la Base de Datos Hidrológica de SSRH.

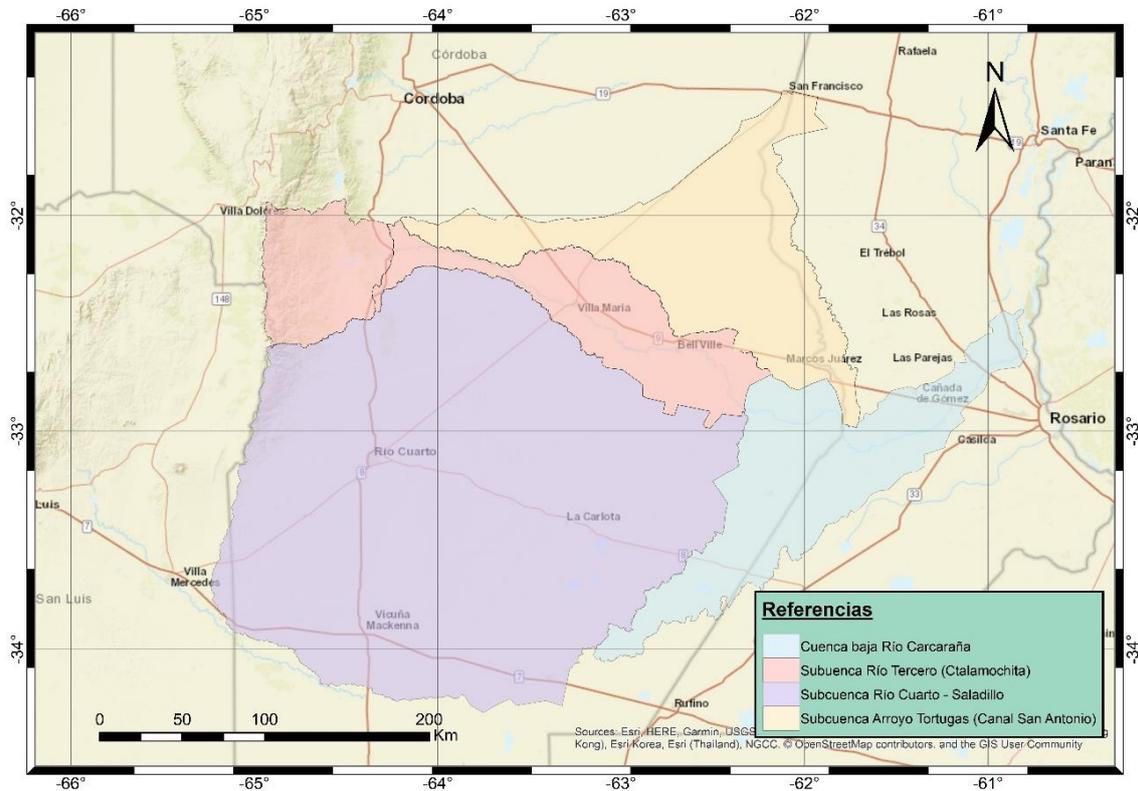


Figura 2 - Cuenca del río Carcaraña y sus principales subcuencas

La cuenca limita al oeste con las cumbres de las sierras de Comechingones en la Provincia de Córdoba (las cuales son el límite natural entre la Provincia de Córdoba y San Luis), siendo el punto más alto de la misma el Cerro Champaquí con 2.790 msnm. Más al sur, la cuenca abarca parte del territorio de la Provincia de San Luis (según el trazado de la cuenca realizado en este trabajo). El este de la cuenca se encuentra dentro de la llanura pampeana, la cual presenta pendientes de 0,1 %. Dicha parte de la cuenca se encuentra dentro del sector agrícola más productivo del país y uno de los más productivos del mundo. Entre los principales cultivos se encuentran soja, trigo y maíz (Romagnoli, 2016).

En relación con sus regiones naturales, en el sector dominado por las sierras predomina el “Bosque Serrano” (Cabido, 2003) formado principalmente por Molle, coco, orco quebracho y quebracho de las sierras (entre los 500 y 1.300 msnm). Entre los arbustos dominan las especies del género acacia como espinillos, aromitos, piquillín y manzano de campo. Dicha vegetación va variando según la altitud y las características del suelo. En la actualidad esta región está

fuertemente afectada por las actividades antrópicas, lo cual ha reducido notablemente la vegetación nativa existente.

En la cuenca se localizan importantes poblaciones, lo cual suma un total de 1,7 millones de habitantes (Romagnoli, 2016) y de su escurrimiento superficial se abastece de agua potable a aproximadamente 350.000 personas (Díaz Lozada, 2014). En la zona sureste la calidad del agua no es la adecuada para ser potabilizada, es por ello que la Cooperativa del Sudeste posee dos tomas de agua en el río Tercero: en los azudes San Marcos y Bell Ville, los cuales abastecen de agua potable a todo el sureste de la Provincia de Córdoba y algunas localidades de la Provincia de Santa Fe.

Además, en la región se utiliza este recurso para generación de energía hidroeléctrica (a través de un sistema de seis embalses ubicados en la cuenca alta del río Tercero entre los que se encuentra la central de turbinado y bombeo Río Grande), recreación (deportes náuticos, pesca, baño) y vertido de efluentes (cloacales, industriales y agroquímicos).

En lo que respecta al clima la temperatura media anual se encuentra en los 16°C y las precipitaciones anuales rondan los 700 mm registrándose mayores precipitaciones en el este de la cuenca (SSRH, 2010).

2.3. PROCESO DE MODELACIÓN

2.3.1. INTRODUCCIÓN

El primer paso de toda modelación hidrológica es establecer un “modelo perceptual”, es decir, decidir cuáles son los principales procesos y variables que intervienen en la generación de caudales.

Una vez reconocidos, se debe relacionar estos procesos y variables principales entre sí por medio de ecuaciones, obteniéndose un “modelo conceptual”. En esta etapa se incluyen coeficientes y parámetros a los cuales posteriormente se les deberá asignar valores adecuados mediante un proceso de calibración.

El proceso de calibración es la etapa en la cual se asignan valores a todos los parámetros del modelo de manera tal que “la salida del modelo se ajuste lo mejor posible a los datos históricos registrados”. Este “mejor ajuste” implica entidades matemáticas para cuantificar la diferencia entre valores simulados y

registrados, mediante procesos de optimización, que se conocen como funciones objetivo. Debido al papel protagónico que desempeñan las funciones objetivo en el proceso de calibración de modelos matemáticos, más adelante se presenta una sección dedicada a las mismas.

Finalmente, el modelo debe pasar a una etapa de validación, en la cual se evalúa su desempeño.

2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS SEGÚN SU REPRESENTACION ESPACIAL

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub-superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub superficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos agregados” o “concentrados”. En otras palabras, en estos modelos los parámetros no varían espacialmente dentro de la cuenca, y, por ende, sus valores son promedios representativos. El término agregado proviene de agregar información de una escala a otra. Por ello, la respuesta de la cuenca se evalúa sólo a la salida, sin tener en cuenta lo que sucede en sus sub-cuencas.

Las desventajas asociadas con los modelos agregados según Vieux (2001) incluyen:

- se ignoran o promedian las variaciones de las propiedades de las sub-cuencas y,
- resultan engorrosos para manejar los datos si se tiene un gran número de sub-cuencas.

A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de este tipo de modelo va perdiendo representatividad. A su vez, las respuestas de cada una de las sub-cuencas son utilizadas en la entrada de otra, aguas abajo, mediante un tránsito de flujo determinado. Es así que, a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o

superponer sus efectos. Éstos son los llamados modelos “semi-distribuidos”. A pesar que los modelos semi-distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aun así, representa una simplificación.

Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas”. Estos modelos son llamados “modelos distribuidos” y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes.

La siguiente figura (Figura 3) muestra un esquema de la representación espacial de cuenca bajo estos tres tipos de modelo.

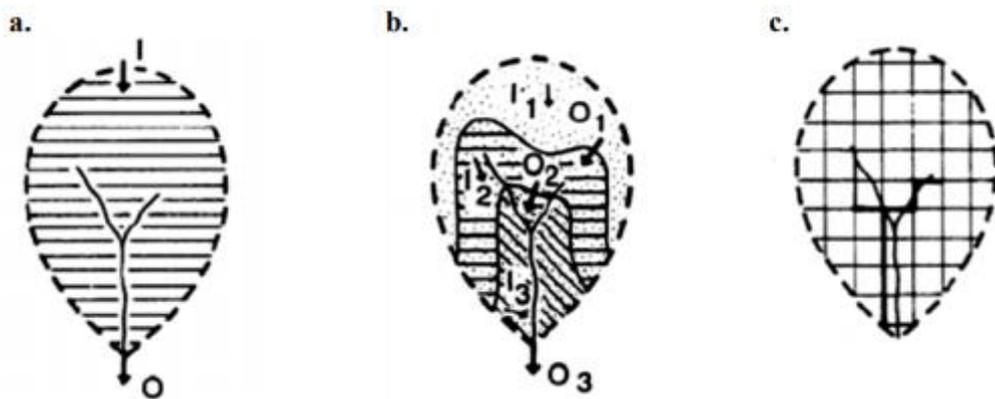


Figura 3 - Modelos hidrológicos. Fuente: Chong-yu, 2002.

- a) Modelo agregado
- b) Modelo semi-distribuido
- c) Modelo distribuido

2.3.3. MODELOS DE EVENTOS AISLADOS Y DE PROCESO CONTINUO

Los modelos de cuenca pueden ser de eventos aislados o proceso continuo. Como sus nombres lo implican, los modelos de eventos aislados son de corto plazo, diseñados para simular eventos individuales de lluvia-escorrimento. Su énfasis está en la filtración y en el escurrimiento de superficie, su objetivo es la evaluación del escurrimiento directo. Los modelos de evento son aplicables para el cálculo de flujo de inundación, particularmente en los casos donde el escurrimiento directo es el mayor contribuyente al escurrimiento total. Típicamente, los modelos de evento no tienen en cuenta la recuperación de humedad entre eventos de tormenta.

Distinto de los modelos de evento, los modelos de procesos continuos toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo el escurrimiento directo (flujo de superficie) y el escurrimiento indirecto (flujo subterráneo e interflujo). Los modelos de proceso continuo se focalizan en la evapotranspiración y en otras abstracciones hidrológicas de largo plazo responsables del valor de recuperación de humedad durante los períodos en que no hay precipitación. El objetivo de los modelos de proceso continuo es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca. Los modelos de proceso continuo se adaptan a la simulación de flujos diarios, mensuales o estacionales.

2.3.4. MODELOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE SU CONCEPCIÓN

Se denomina modelo con base física a aquel que ha sido formulado sobre la base de procesos físicos intervinientes. Por otro lado, los modelos empíricos o de “caja negra”, son aquellos que prescinden completamente en la base física, y sólo persiguen el objetivo de aproximar el caudal simulado al observado. La definición del modelo con base física es algo artificial pues la mayor parte de los modelos fuertemente sustentados en la física de los procesos simulados, involucran también formulaciones empíricas dentro de sus funciones (como, por ejemplo, las ecuaciones de Darcy o Horton). Este tipo intermedio de modelo, que relaciona las características del proceso, pero que mantiene un razonable empirismo en los parámetros de las ecuaciones involucradas, se denomina conceptual.

La clasificación anterior ha pretendido servir de marco conceptual para caracterizar los modelos hidrológicos desde el punto de vista de su concepción. Aunque hay modelos hidrológicos bien definidos, que se podrían identificar plenamente con uno de esos grupos, existen múltiples matices que incluyen formulaciones intermedias con componentes de varios de estos tipos (Alonso, 2018).

2.3.5. VARIABLES Y PARÁMETROS

Los modelos hidrológicos presentan una estructura, la cual involucra variables de entrada, representadas usualmente por la precipitación (P). Análogamente, se define como variable de salida el caudal (Q). Debe

destacarse, que el caudal puede considerarse también como una variable de entrada en el caso de un modelo de pronóstico hidrológico.

Adicionalmente, complementan al modelo las variables de estado, que son aquellas que permiten determinar en cada paso de tiempo de simulación, el “estado” del sistema, siendo las que establecen normalmente la cantidad de agua que conservan los reservorios en las funciones de producción y transferencia. Una variable de estado típica es, por ejemplo, la humedad del suelo, pudiendo ser también alguna otra variable que no tenga por ejemplo un sentido físico demasiado interpretable pero que representa el nivel de alguno de los reservorios del modelo.

El conjunto de cantidades fijas que caracteriza al sistema se denomina parámetros del sistema (Tucci, 2006). Los parámetros de un sistema, normalmente no pueden medirse, razón por la cual deben estimarse.

A los fines de ejemplificar los conceptos anteriores, bastaría considerar la cuenca hidrográfica como el sistema en el cual ocurre el proceso de transformación lluvia a caudal. Este proceso, a su vez, involucra principalmente los procesos de retención, infiltración, evaporación, escurrimiento superficial y flujo en canales. El modo de ocurrencia de cada uno de estos procesos estará gobernado por ciertos parámetros de la cuenca, como son el coeficiente de rugosidad, la permeabilidad del suelo, la pendiente de la cuenca, etc.

En consecuencia, el hidrograma generado a la salida de la cuenca (salida del sistema), depende de las variables de entrada a la cuenca (entrada al sistema), que es la precipitación, y de los parámetros que caracterizan al sistema. Por este motivo, todo modelo hidrológico debería involucrar en su estructura, al menos los principales parámetros que permitan caracterizar el sistema que representa.

La lluvia puede medirse, al igual que el caudal escurrido, aunque sea en forma aproximada. Sin embargo, los parámetros no pueden medirse en forma directa. Por lo tanto, los mismos se estiman en función de ciertas características observables. El gran desafío en la modelación matemática de un sistema se basa en la estimación de los parámetros que lo caracterizan (Alonso, 2018).

Estos parámetros estimados y las variables de entrada medidas, se agregan al modelo y se simula el proceso que ocurre en el sistema, obteniendo, como resultado, las variables de salida. Las variables simuladas de salida

deberían coincidir con las medidas, al menos dentro del rango de aplicación del modelo. En general, no se logra tal coincidencia, por lo cual es necesario modificar sensiblemente los valores de los parámetros hasta lograr un resultado aceptablemente cercano al buscado. Esta técnica de ajustar los parámetros del modelo recibe el nombre de calibración del modelo matemático (Bertoni, 2003). El éxito de un modelo hidrológico conceptual de transformación lluvia-caudal depende en gran medida de la bondad de su calibración (Duan et al., 1992).

2.3.6. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Modelar una cuenca implica establecer una relación entre variables de entrada; esta relación implica introducir parámetros (con significado físico o no) que permitan simular lo mejor posible la variable de salida. Ya que estos parámetros son inicialmente desconocidos, se requiere de un proceso de “calibración” para identificar sus valores. De esta manera podemos definir “calibración” como el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

Básicamente existen dos formas de calibrar un modelo hidrológico desde el punto de vista operativo: (a) ajuste manual mediante prueba y error, y (b) ajuste o calibración automática. La primera es la manera más clásica, que ha sido empleado por los hidrólogos desde el comienzo de la aplicación de las técnicas de calibración, este proceso resulta por lo general bastante lento y tedioso (Alonso, 2008). Además, esta técnica no brinda al usuario un criterio objetivo de parada (Sorooshian y Gupta, 1995) sino que generalmente, distintos usuarios obtienen diferentes grupos de parámetros con el mismo modelo, para la misma cuenca y período de tiempo (Beven y Binley, 1992). En Alonso (2008) se dan argumentos en pro y en contra de la calibración automática.

La calibración automática, por otro lado, permite llevar a cabo el proceso de ajuste de los parámetros. Esta técnica, surge como alternativa para reducir el grado de error en la calibración manual, acelerar el proceso de calibración y restarle subjetividad al mismo. De esta manera, la calibración automática, resulta una herramienta capaz de determinar el conjunto óptimo de los valores de los parámetros de un modelo hidrológico con la mínima interferencia del usuario. La experiencia del usuario se sustituye, de cierta forma, por una función objetivo

sometida a una técnica iterativa de ajuste. El objetivo de esta forma operativa de calibración es, por lo tanto, minimizar o maximizar el valor de una función objetivo que mide la calidad de ajuste de los resultados.

Dependiendo del uso que se le quiera dar al modelo, éste puede requerir pasar por un proceso de “validación”. La validación tiene por objetivo determinar la bondad del modelo para realizar predicciones en un lugar específico para períodos fuera del período de calibración.

2.4. OBTENCIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En el área de estudio se dispone de registros de caudal continuos en el punto de cierre de la cuenca (localidad de Pueblo Andino). Para complementar el análisis, se disponen de series de caudales continuos en la localidad de Pueblo Andino, muy próxima al cierre de la cuenca. Esta estación depende de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) y posee datos de caudal medio diarios con registros de más de veinte años (01/Abril/1980 a 31/Octubre/2017). En la siguiente figura (Figura 4) se muestran los caudales observados.

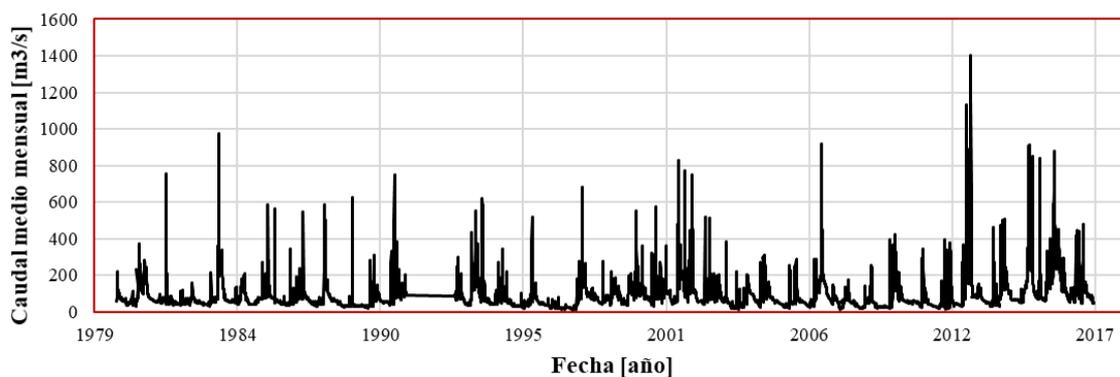


Figura 4 - Caudales medios mensuales observados en la localidad de Pueblo Andino

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, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria “INTA” y del Servicio Meteorológico Nacional. Estas estaciones seleccionadas sólo disponen de datos de precipitación acumulada diaria con longitudes de registros diferentes entre sí.

En lo referido a las precipitaciones en la cuenca, los datos proporcionan una serie lo suficientemente completa y continua en el período 01/Junio/1993 a 31/Octubre/2017 tomadas en diferentes estaciones distribuidas espacialmente en la cuenca, razón por la cual la definimos como el período de estudio el período 01/Enero/1994 al 31/Diciembre/2016 (Tabla 1). Por otra parte, al no disponerse de registros continuos de las restantes variables climáticas en la cuenca, éstas fueron estimadas a partir de la base de datos mundial del Climate Forecast System Reanalysis “CFSR”, con 39 años de registros (del año 1979 al 2017).

Tabla 1 - Estaciones de precipitación utilizadas en la cuenca de estudio

ID	INSTITUCION	NOMBRE
1	INTA	Marcos Juarez
2	INTA	Villa Mercedes
3	INTA	Rafaela
4	SMN	Laboulaye
5	SMN	Rio Cuarto
6	BDHI	La Florida
7	BDHI	Lutti
8	BDHI	La Puente
9	BDHI	Yacanto

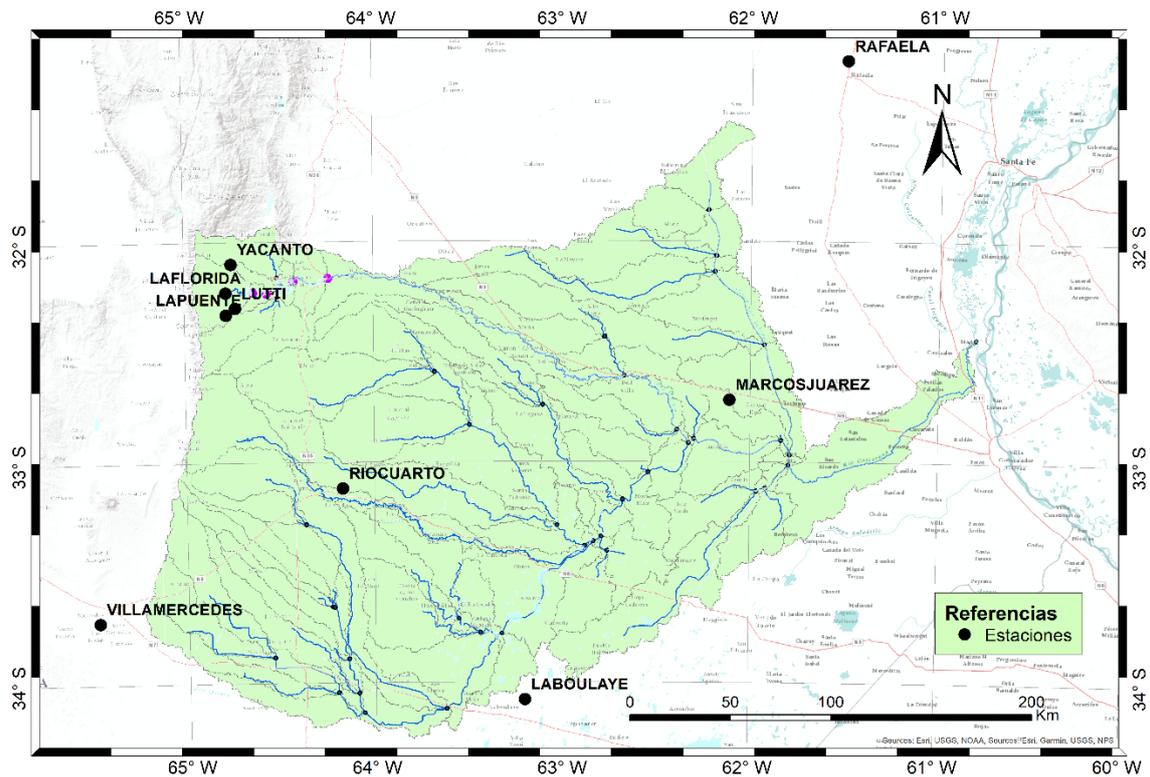


Figura 5 - Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Carcaraña

Para la delimitación de la cuenca se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Este modelo digital del terreno, conocido como MDE-Ar, está basado en datos SRTM (30m x 30m), el cual se le aplicó un relleno de vacíos, inclusión de datos de lagos, filtrado espacial y enmascarado de límites (IGN, 2016). Posteriormente IGN validó el modelo digital obtenido mediante la determinación del desvío estándar entre el valor obtenido por el modelo y el valor del punto altimétrico IGN. Este cálculo se realizó para 9.055 puntos altimétricos IGN en todo el territorio nacional obteniéndose un desvío estándar promedio de 3,05 m en todo el territorio nacional (IGN, 2016).

A partir del MDE obtenido, se procedió a delimitar la cuenca y luego, se comparó la misma con la cuenca proporcionada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba. La coincidencia entre ambos trazados fue buena. Posteriormente, se efectuaron, a la cuenca generada, las correcciones necesarias en función de la red de escurrimiento y las obras existentes, que en llanura muchas veces delimitan las cuencas. En la siguiente figura (Figura 6) se muestra el mapa topográfico que corresponde al STRM.

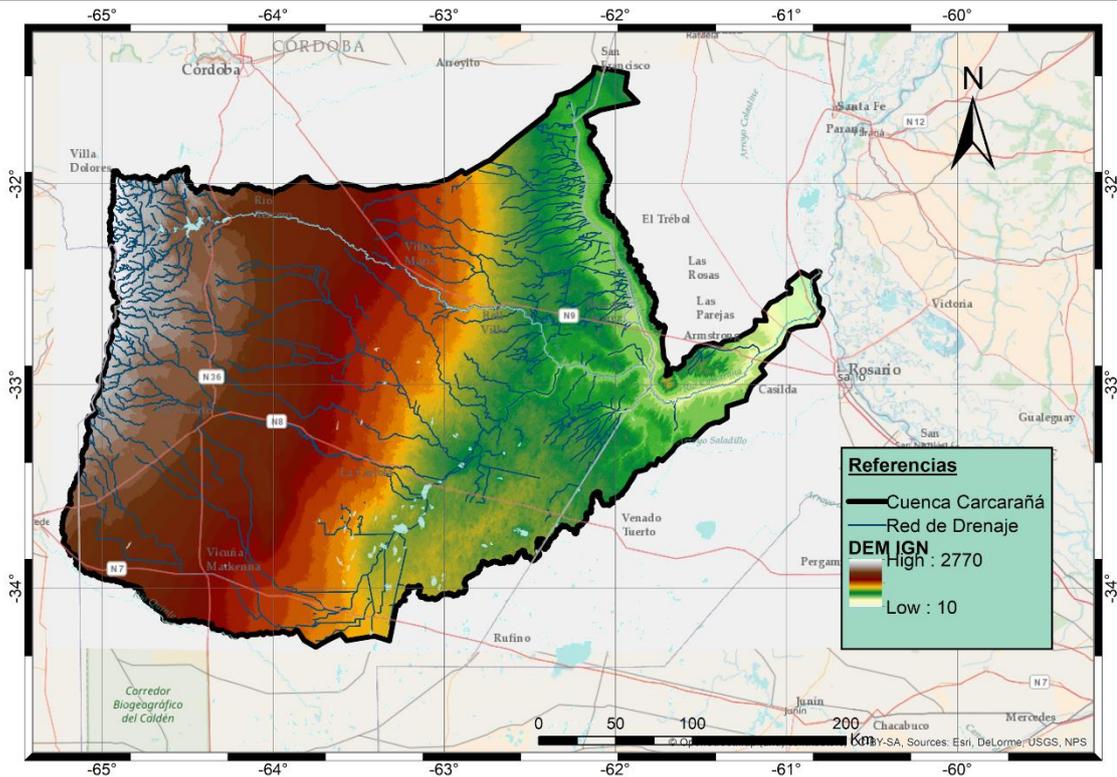


Figura 6 - Modelo digital de elevación MDE-ar

Con respecto a la red de escurrimiento, cabe destacar que la misma fue trazada mediante el procesamiento del MDE con un programa de manejo de Sistema de Información Geográfica (QGIS) y corregida mediante el procesamiento de imágenes satelitales (SPOT, IKONOS y Landsat) y observaciones in-situ. Posteriormente se complementó dicha red con la red proporcionada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

En cuanto a los diferentes usos de suelos presentes en la cuenca (Figura 7) fueron extraídos de información que proporciona el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) y los tipos de suelo (Figura 8) de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Estos resultan relevantes debido a que determinan 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.

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 una resolución espacial de 30 metros, pero fue ajustado para lograr una resolución espacial de 100 metros por pixel y precisión vertical de 1 metro.

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 657 unidades de un tamaño mínimo de 1 Hectárea.

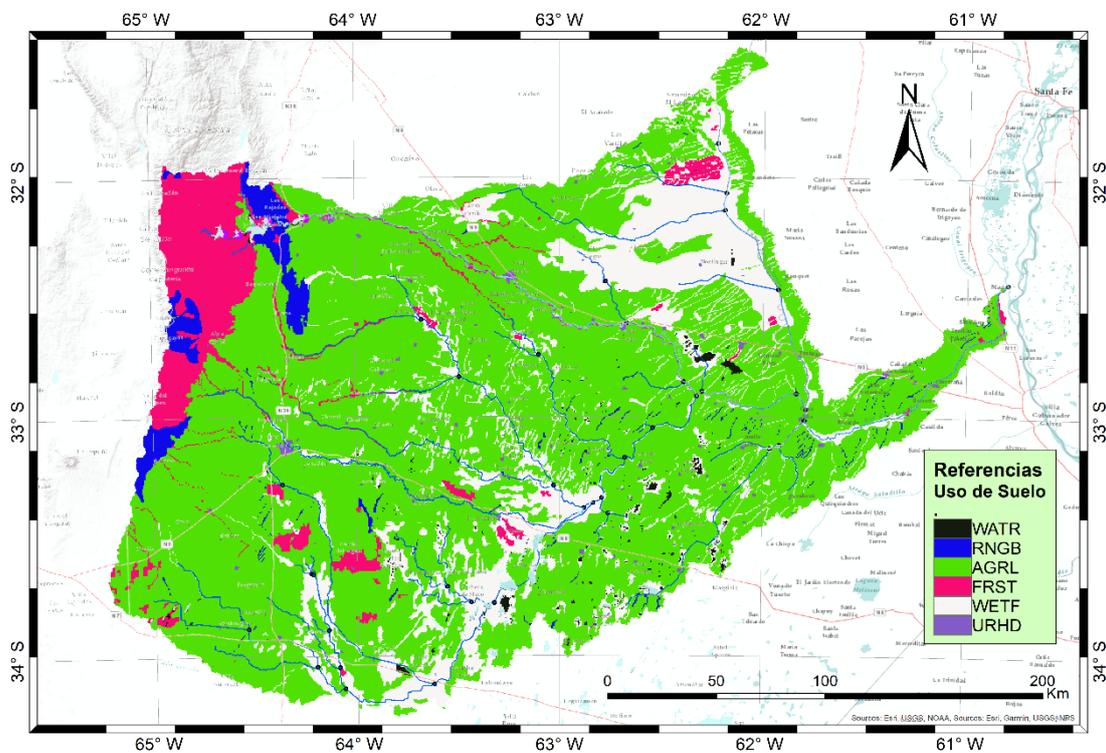


Figura 7 - Usos de suelo de la cuenca del río Carcarañá (Fuente: INTA)

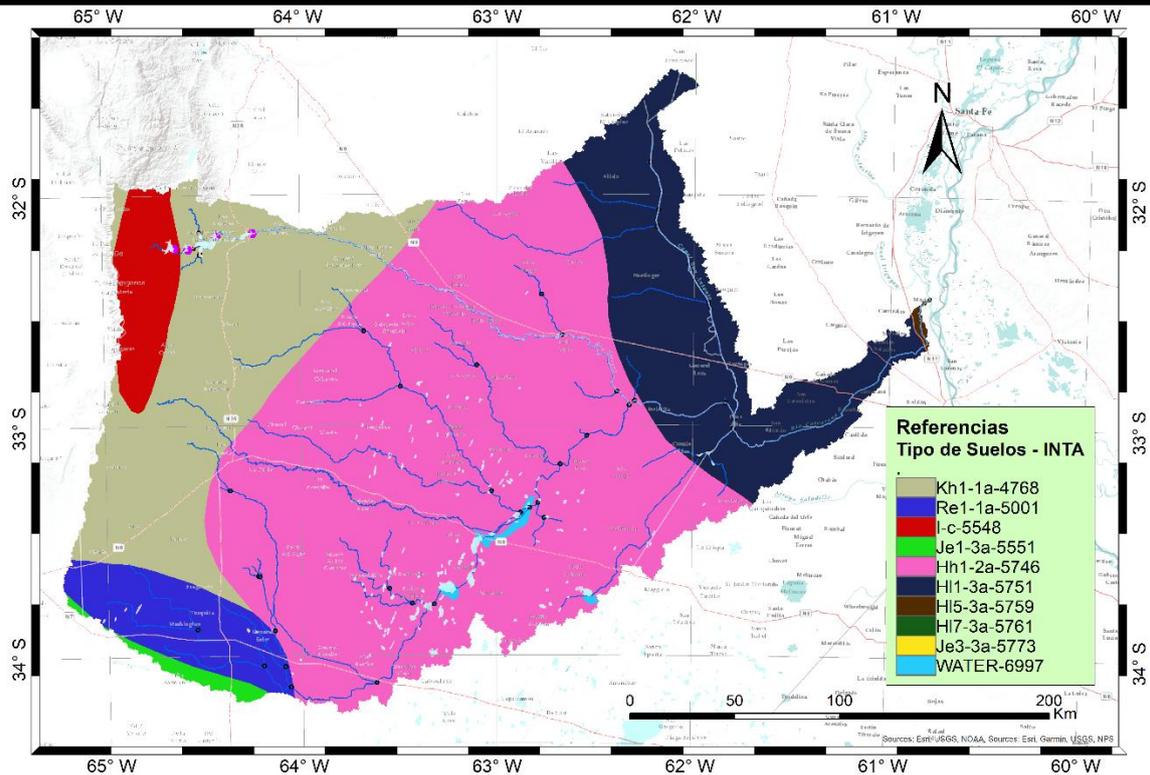


Figura 8 - Tipos de suelo de la cuenca del río Carcarañá (Fuente: FAO)

2.5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA SEMI-DISTRIBUIDA CON SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)

2.5.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO SWAT

Soil and Water Assessment Tool “SWAT”, se traduce en Castellano como Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua. 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, EEUU.

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. Esta herramienta resulta de principal utilidad para la hidrología aplicada tanto en el ámbito civil y ambiental como en el 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.

A continuación, se puede observar un esquema del ciclo hidrológico en SWAT (Figura 9).

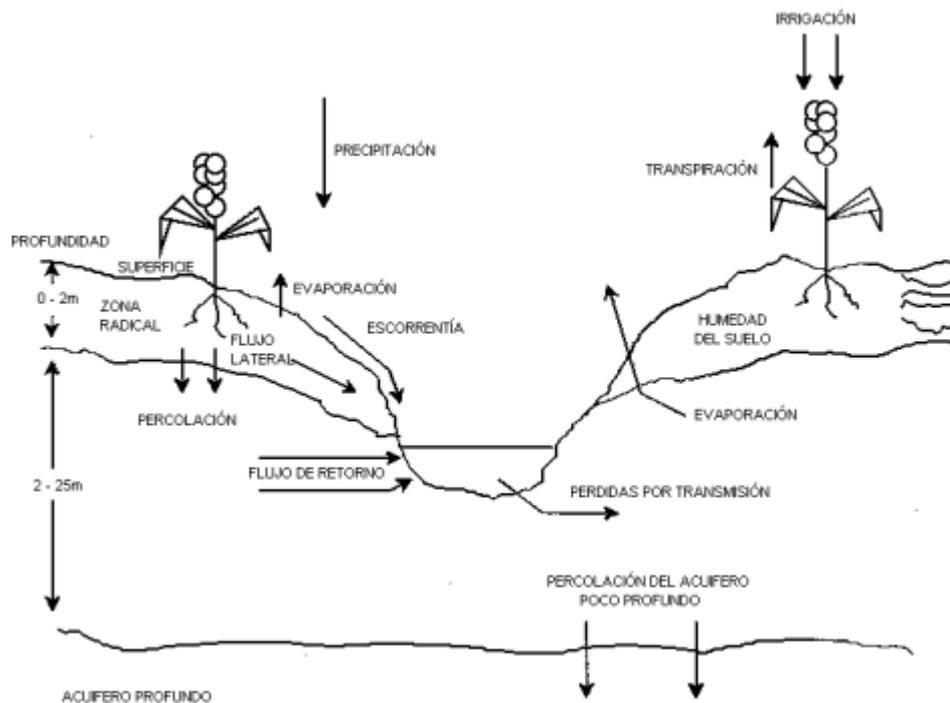


Figura 9 - Representación ciclo hidrológico en SWAT

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

- Software de dominio público disponible en la web para su descarga (<https://swat.tamu.edu/>).
- Bien documentado, tanto en trabajos científicos como profesionales.
- Interfaz simple para la aplicación del usuario.

- Cuenta con la posibilidad de trabajar en entorno de Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés).
- Simulación hidrológica espacialmente semi-distribuida.
- Permite simular procesos hidrológicos continuos y eventos.
- Este modelo puede ser acoplado a modelos de flujo de agua subterránea y a modelos climáticos.

2.5.2. FUNDAMENTOS Y ECUACIONES DE SWAT

La modelación hidrológica es semi-distribuida lo cual se debe a que la modelación de la cuenca se realiza a través de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés). Estas HRU agrupan 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. 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 Carcarañá, los HRU quedaron definidos por aquellas zonas que presentan similares características determinadas por el uso de suelo, el 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, como se explicó anteriormente puede clasificarse 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.

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 & Ampt el 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.

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, el ciclo hidrológico es simulado por SWAT a partir de la siguiente ecuación de balance de masa en cada unidad de respuesta hidrológica "HRU":

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O), t es el tiempo (días),

R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i ($mm H_2O$), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i ($mm H_2O$), E_a es la cantidad de evapotranspiración en día i ($mm H_2O$), W_{seep} es la cantidad de agua que entra la zona vadosa del perfil del suelo en un día i ($mm H_2O$), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i ($mm H_2O$).

Se pueden encontrar el desarrollo completo de las ecuaciones que fundamentan el modelo hidrológico SWAT en el Anexo I, al final del presente informe.

La subdivisión de cada cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRUs) permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son calculadas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para las cuencas. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua.

2.5.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO CARCARAÑÁ

A continuación, se realiza un esquema del proceso de modelación simplificado (Figura 10) y en el Anexo 2 se pueden encontrar los detalles de utilización del programa para obtener la modelación con SWAT.

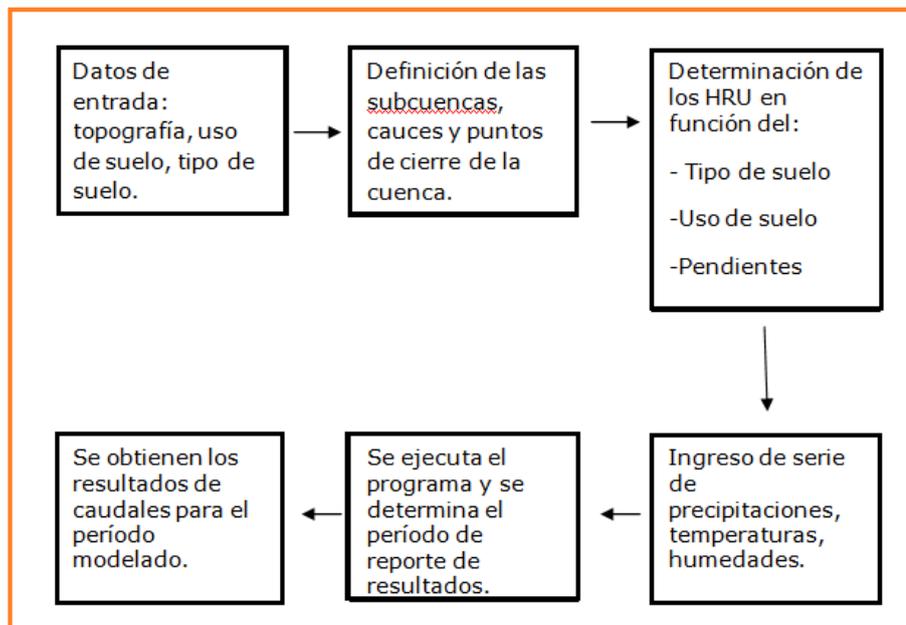


Figura 10 - Proceso de modelación con SWAT

En la figura anterior (Figura 10) se puede observar que el procedimiento de modelación resulta sencillo e intuitivo, siempre y cuando se cuente con la información adecuada. De lo contrario, los resultados obtenidos no serían representativos de la realidad.

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 la localidad de Pueblo Andino. 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 sub-cuencas (Figura 11).

Finalmente, una vez realizado todo lo anterior, se procede a realizar las simulaciones 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.

El modelo físico de cuenca quedó constituido por un total de 84 subcuencas y 657 Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRUs).

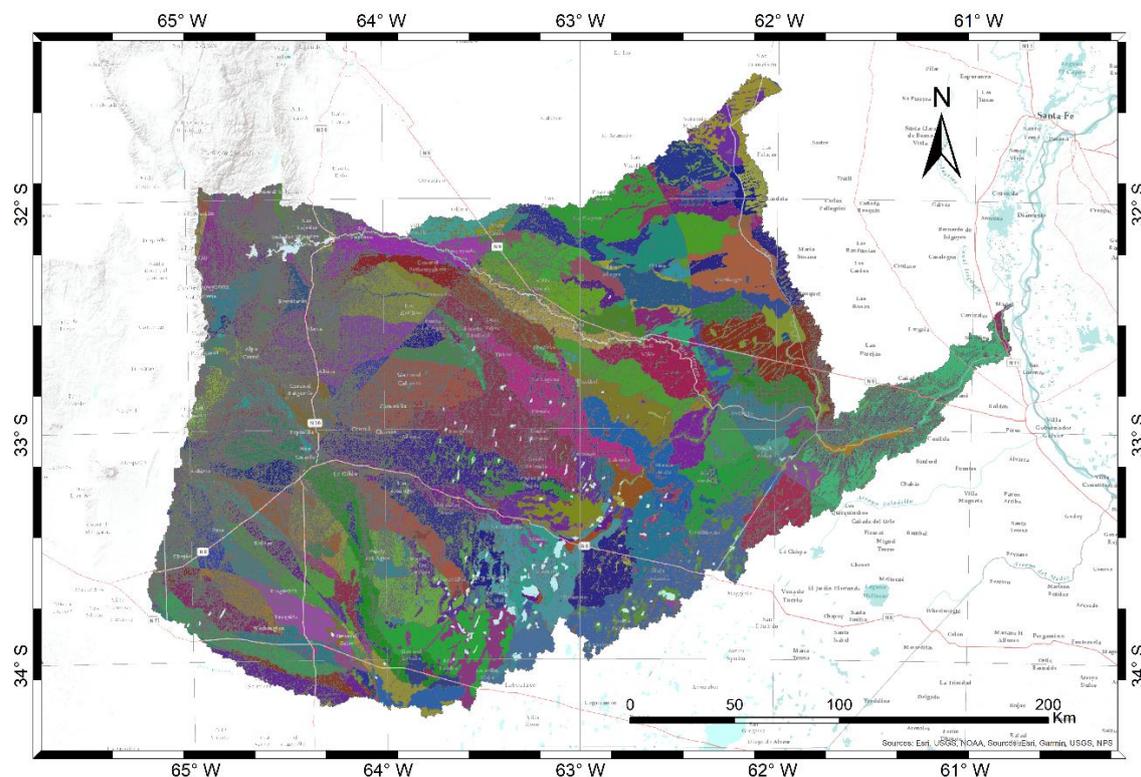


Figura 11 - HRU de la cuenca del río Carcarañá

2.6. CAUDALES OBSERVADOS EN LOS DIFERENTES PERÍODOS DE CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA

Como ya se observó en la Figura 4, los caudales medios mensuales observados son extensos (04/80-10/17) para la sub-cuenca de cierre de la cuenca del río Carcarañá en Pueblo Andino y oscilan entre 30 y 650 m³/s aproximadamente. A partir de los datos de lluvia disponibles, se optó por usar el período de simulación que coincide entre ambas series de observaciones (01/94-12/16).

Por otro lado, para la calibración y validación del modelo hidrológico a desarrollarse en los capítulos sucesivos, la Figura 12 muestra los tres períodos en los que la serie de caudales medios mensuales observados fue dividida, en conjunto con las simulaciones preliminares realizadas: Calentamiento (1994-1996), Calibración (1997-2006) y Validación (2007-2016).

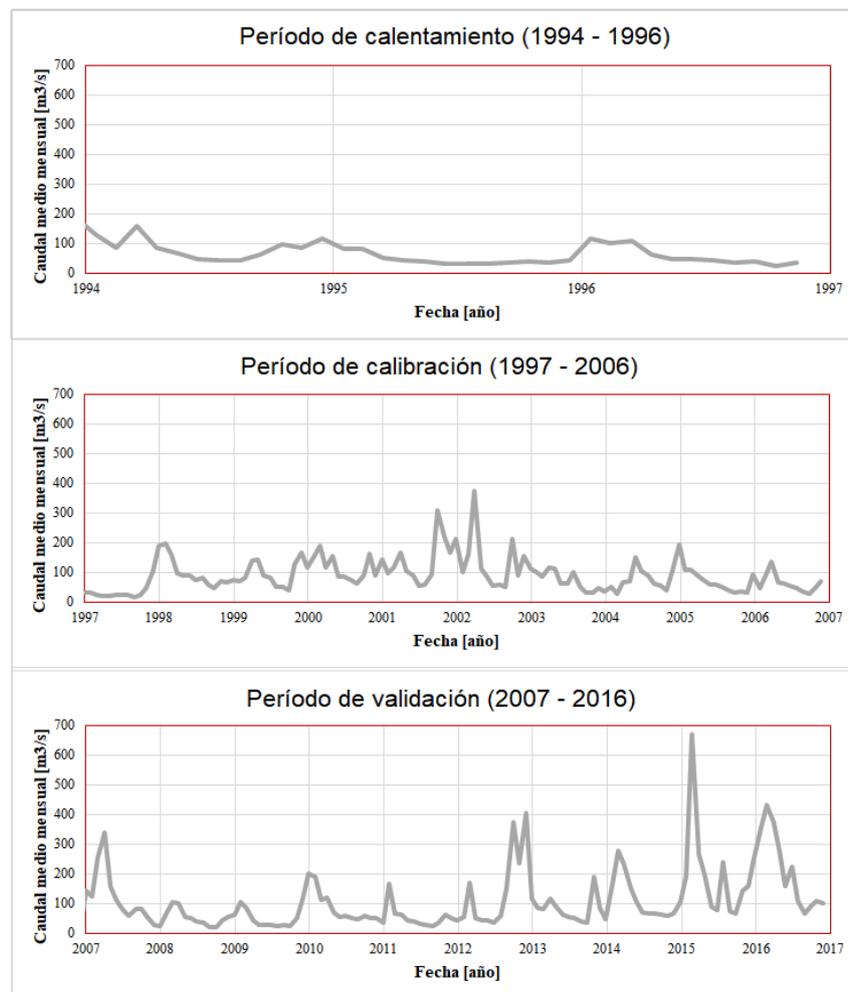


Figura 12 - Caudales observados en los diferentes períodos de calibración hidrológica.

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.

2.7. SÍNTESIS

En este capítulo se desarrollaron los fundamentos teóricos de la modelación con SWAT y se realizó la modelación hidrológica propia de la cuenca del río Carcarañá. 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 otra parte, resulta importante evaluar los parámetros del modelo hidrológico y que la simulación sea representativa de la realidad, tarea a desarrollarse en los sucesivos capítulos.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍAS Y PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA

3.1. INTRODUCCIÓN

El primer paso en el proceso de calibración y validación con SWAT es la determinación de los parámetros a emplear para una determinada cuenca o subcuenca. Dichos parámetros de entrada de SWAT deben ser mantenidos dentro de un rango de incertidumbre realista.

El segundo paso, es el proceso de calibración propiamente dicho. La calibración es un procedimiento que permite parametrizar mejor un modelo a un conjunto de condiciones locales, reduciendo de este modo la incertidumbre de predicción.

La calibración del modelo se realiza seleccionando valores para los parámetros de entrada (con sus respectivos rangos de incertidumbre) a partir de la comparación gráfica y analítica (estadísticos de evaluación) de la predicción del modelo para determinadas condiciones asumidas, con los datos observados para las mismas condiciones.

A continuación, se realiza la validación del modelo. Este proceso consiste en demostrar que un determinado modelo es capaz de realizar simulaciones “suficientemente precisas” (término que depende de los objetivos de cada proyecto).

La función objetivo consiste en una medida de bondad de ajuste. Las mismas se emplean para determinar analíticamente la calidad de ajuste de los resultados obtenidos. En la calibración, se busca optimizar la función objetivo seleccionada, ya sea maximizando el valor de la misma o minimizándolo.

Para la calibración y validación del modelo de la cuenca en estudio, se emplearon, como se dijo al comienzo del trabajo, distintos métodos, los cuales serán descritos en el presente capítulo.

3.2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE CALIBRACIÓN

3.2.1. PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN E INCERTIDUMBRE PARA SWAT (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 probaron diversas técnicas de calibración que el programa ofrece, tales como SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), PSO (Particle Swarm Optimization) y GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), los cuales serán explicados más adelante en el presente informe.

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. Estas funciones objetivo, también serán objeto de análisis más adelante en este trabajo.

3.2.2. HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN EN PYTHON

La principal herramienta de calibración de modelos SWAT es SWAT-CUP, el cual, como se dijo anteriormente, permite emplear diferentes algoritmos o

técnicas de calibración. Sin embargo, esta herramienta no permite implementar el algoritmo genético (GA), por lo que se decidió optar por una herramienta de calibración escrita en lenguaje de programación Python.

Esta herramienta fue desarrollada de acuerdo a la siguiente afirmación: *“Al calibrar un modelo SWAT con algoritmos genéticos, resulta más eficiente generar la población inicial utilizando el muestreo de tipo Latin Hypercube que empleando una población generada en forma aleatoria”* (Bekele y Nicklow, 2007).

Por lo tanto, el método de tipo Latin Hypercube fue incluido en esta herramienta. Una de las principales ventajas es que los archivos de entrada necesarios para la calibración son similares a los que se emplean en SWAT-CUP. Por lo tanto, resulta una estructura familiar para aquellos usuarios de SWAT-CUP, y además permite emplear el algoritmo genético utilizando para ello la interfaz del software SWAT-CUP.

El código de esta herramienta de calibración es libre y puede encontrarse en https://github.com/mehmetbercan/NSGA-II_Python_for_SWAT_model.

3.3. PARÁMETROS

En SWAT, el HRU es la unidad de desagregación espacial más pequeña. Como la cuenca se divide en HRUs a partir de la topografía, suelo y uso del suelo, un parámetro distribuido espacialmente como puede ser conductividad hidráulica, densidad aparente o CN2 puede ser definido para cada HRU. Por lo tanto, deberían relevarse o estimarse un gran número de parámetros de entrada, los cuales, usualmente son difíciles de obtener. Sin embargo, existe una forma alternativa de estimar los parámetros distribuidos que consiste en agruparlos de acuerdo al tipo de suelo, uso de suelo, ubicación, pendiente, o combinaciones.

De esta manera, estos parámetros, pueden ser calibrados utilizando un único término global que puede escalar la estimación inicial mediante un término multiplicativo o sumatorio. Esto lleva a los llamados identificadores de parámetros que se explicarán más adelante.

Los parámetros en SWAT se escriben de la siguiente manera:

`x_<parname>. <ext>`

En donde:

•x_ es el identificador que indica el tipo de cambio que se aplicará al parámetro, como se explicó anteriormente:

- v_ significa que el valor del parámetro existente será reemplazado por un valor dado.
- a_ significa que el valor dado se sumará al valor del parámetro existente.
- r_ significa que el valor del parámetro existente será multiplicado por (1+ un parámetro dado).

•<parname> es el nombre del parámetro tal como aparece en el manual de SWAT o en Absolute_SWAT_Values.txt

•<ext> es la extensión del archivo SWAT que contiene el parámetro, puede ser, por ejemplo, .sol., hru, .rte, etc.

Para la calibración se utilizaron 17 parámetros, los cuales fueron seleccionados basándose en trabajos anteriores realizados sobre la cuenca baja del río Carcarañá (Rogmanoli et al., 2017), en la siguiente tabla (Tabla 2), se muestran los parámetros mencionados:

Tabla 2 - Parámetros de calibración seleccionados.

Parámetro	Descripción
r_CN2.mgt	Curva Número del SCS
v_GW_DELAY.gw	Retardo de Agua Subterránea (días)
v_GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero superficial requerido para que ocurra el flujo de retorno (mm)
v_CH_N1.sub	Valor "n" de Manning para los canales tributarios
v_ESCO.hru	Factor de compensación para la evaporación del suelo
r_OV_N.hru	Valor "n" de Manning para el flujo en ladera
v_RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación en acuífero profundo
r_SOL_K.sol	Conductividad hidráulica saturada
v_SURLAG.bsn	Tiempo de "lag" del caudal superficial
v_CANMX.hru	Intercepción vegetal máxima
v_CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para los canales principales
v_EPCO.hru	Factor de compensación del consumo de la planta

v_GW_REVAP.gw	Coeficiente percolación de agua subterránea al acuífero profundo
v_REVAPMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero superficial requerido para que ocurra la percolación al acuífero profundo (mm)
v_ALPHA_BNK.rte	Factor alfa del flujo base para el almacenamiento en ladera
v_ALPHA_BF.gw	Factor alfa de flujo base (días)
r_SOL_AWC.sol	Capacidad de agua disponible en la capa de suelo

3.4. FUNCIONES OBJETIVO

Para iniciar el proceso de calibración es necesario definir previamente la “función objetivo”, la cual permitirá estimar la incertidumbre de la serie de caudales simulados respecto a los observados.

La función de ajuste es usualmente una medida de bondad de ajuste (coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, etc), pero también puede ser una combinación de estas, recibiendo el nombre de función “multiobjetivo”.

La utilización de las funciones objetivo nos proporciona un criterio analítico y objetivo para definir la calidad de ajuste del modelo; no obstante, este análisis debe complementarse con un análisis visual de los resultados.

La selección del tipo de función objetivo a emplear resulta un análisis subjetivo y optar por una u otra dependerá del tipo de problema a resolver.

El software empleado para la calibración, ofrece una amplia gama de funciones objetivos, las cuales se describen a continuación.

3.4.1. MULTIPLICACIÓN (mult)

Esta es la forma multiplicativa del error cuadrado, lo que busca es minimizar la siguiente función:

$$g = \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{n_Q} * \frac{\sum_i (S_m - S_s)_i^2}{n_S} * \frac{\sum_i (N_m - N_s)_i^2}{n_N} * \dots$$

En donde Q, N y S son variables (por ejemplo, descarga, nitratos y sedimentos), “n” es el número de observaciones y, “m” y “s” hace referencia a

lo medido y lo simulado. A veces suele dividirse el denominador por 1000 para mantener a “g” en valores pequeños.

3.4.2. SUMATORIA (sum)

Esta es la forma sumatoria del error cuadrado, busca minimizar la siguiente función:

$$g = w_1 \sum_{i=1}^{n_1} (Q_m - Q_s)_i^2 + w_2 \sum_{i=1}^{n_2} (S_m - S_s)_i^2 + w_3 \sum_{i=1}^{n_3} (N_m - N_s)_i^2 + \dots$$

En donde Q, N y S son variables (por ejemplo, descarga, nitratos y sedimentos), “n” es el número de datos, “m” y “s” hace referencia a lo medido y lo simulado y “w” son los pesos que pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$i) w_j = \frac{1}{n_j \sigma_j^2}$$

en donde σ_j^2 es la varianza de la variable medida “j”

$$ii) w_1 = 1, \quad w_2 = \frac{\bar{Q}_m}{\bar{S}_m}, \quad w_3 = \frac{\bar{Q}_m}{\bar{N}_m}$$

en donde las barras indican promedios

3.4.3. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R²)

Se define como el cuadrado del coeficiente de correlación de Bravais – Pearson. Se calcula como:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

Siendo “O” los valores observados y “P” los simulados.

También puede definirse como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Los valores de R² van entre 0 y 1 que indica qué porcentaje de los valores observados son explicados por el modelo. Un valor de 0 indica que no existe correlación, mientras que un valor de 1 indica la igualdad entre los datos simulados y observados.

El hecho de que solo la dispersión sea cuantificada es uno de los mayores inconvenientes del R² si se lo considera solo. Es decir que, un modelo que

sistemáticamente realiza sobre o sub predicciones todo el tiempo, tendrá un buen valor de R^2 cercano a 1 incluso si todas las predicciones estuvieran mal.

Si R^2 se utiliza para la validación del modelo es, por lo tanto, aconsejable tener en cuenta información adicional que puede hacerle frente a dicho problema. Tal como información proporcionada por el gradiente “b” y la intercepción “a” de la regresión en la cual el R^2 se basa.

Es recomendable, entonces, que la intercepción “a” sea cercana a 0, lo que indica que un escurrimiento de cero observado también de como resultado una predicción cercana a 0. Mientras que el gradiente “b” debe ser cercano a 1.

Para una evaluación adecuada del modelo, el gradiente “b” debe ser tenido en cuenta junto con el R^2 . Para hacer esto de una manera más operacional, los dos parámetros pueden combinarse para dar una versión ponderada (wR^2) del R^2 . Dicha ponderación puede hacerse como:

$$wR^2 = \begin{cases} |b| \cdot r^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot r^2 & \text{for } b > 1 \end{cases}$$

Ponderando R^2 , logramos que las sobre o sub predicciones sean cuantificadas en forma conjunta con la dinámica, que resulta en una forma más comprensiva de los resultados del modelo.

3.4.4. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN MODIFICADO (wR^2)

Es el coeficiente de determinación (R^2) multiplicado por la pendiente de la línea de regresión entre los datos simulados y los observados.

Permite considerar la discrepancia en la magnitud de dos señales (representadas por “b”), así como también su dinámica (representada por R^2).

3.4.5. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI-CUADRADO (χ^2)

Esta prueba puede utilizarse incluso con datos medibles en una escala nominal. La hipótesis nula de la prueba Chi-cuadrado postula una distribución de probabilidad totalmente especificada como el modelo matemático de la población que ha generado la muestra.

Para realizar este contraste se disponen los datos en una tabla de frecuencias. Para cada valor o intervalo de valores se indica la frecuencia absoluta observada o empírica (O_i). A continuación, y suponiendo que la hipótesis nula es cierta, se calculan para cada valor o intervalo de valores la

frecuencia absoluta que cabría esperar o frecuencia esperada ($E_i = n \cdot p_i$, donde n es el tamaño de la muestra y p_i la probabilidad del i -ésimo valor o intervalo de valores según la hipótesis nula). El estadístico de prueba se basa en las diferencias entre la O_i y E_i y se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Si existe concordancia perfecta entre las frecuencias observadas y las esperadas el estadístico tomará un valor igual a 0; por el contrario, si existe una gran discrepancia entre estas frecuencias el estadístico tomará un valor grande y, en consecuencia, se rechazará la hipótesis nula. Así pues, la región crítica estará situada en el extremo superior de la distribución Chi-cuadrado con $k-1$ grados de libertad.

3.4.6. EFICIENCIA NASH-SUTCLIFFE (NS)

La eficiencia NS (o E) propuesta por Nash y Sutcliffe se define como uno menos la suma del valor absoluto de las diferencias cuadradas entre los datos simulados y los observados, normalizados por la varianza de los datos observados durante el periodo bajo investigación. Se puede calcular como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

La normalización de la varianza de la serie de observación, resulta en valores relativamente altos de NS en cuencas (captaciones) de mayor dinámica, y en valores bajos de NS en cuencas (captaciones) de menor dinámica.

La eficiencia NS puede tomar valores entre 1 (ajuste perfecto) y $-\infty$. Una eficiencia menor a 0 indica que el valor medio de la serie observada hubiera sido un mejor predictor que el modelo.

La mayor desventaja de la eficiencia NS es el hecho de que la diferencia entre los valores observados y simulados se calculan como valores cuadrados. Como consecuencia, los valores más grandes de la serie son sobreestimados y los valores más bajos se subestiman.

Por lo dicho anteriormente, en la cuantificación de las predicciones de escorrentía, esto conduce a una sobreestimación del rendimiento del modelo durante el pico de flujos y una subestimación durante bajas condiciones de flujo.

Al igual que el R^2 , el NS no es muy sensible al modelo sistemático de sobre o sub predicción, especialmente durante periodos de bajo flujo.

3.4.7. EFICIENCIA NASH-SUTCLIFFE MODIFICADO (MNS)

Para reducir el problema de las diferencias cuadradas y la resultante sensibilidad a valores extremos, la eficiencia NS suele calcularse con valores logarítmicos de O (observado) y P (simulado). Mediante la transformación logarítmica de los valores de escorrentía, los picos son achatados y los flujos bajos son mantenidos más o menos en el mismo nivel.

Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo bajos aumenta en comparación con los picos de inundación, lo que resulta en un aumento de la sensibilidad de $\ln(NS)$ al modelo sistemático de sobre o sub predicción.

En otras palabras, la forma logarítmica de NS se utiliza para superar la hipersensibilidad a valores extremos, inducidos por el error cuadrado medio en la eficiencia NS; y para aumentar la sensibilidad a valores bajos.

3.4.8. SUMA DE LOS CUADRADOS DE LOS RESIDUOS (SSQR)

El método SSQR tiene como objetivo la adaptación de las distribuciones de frecuencia de las series observada y la simulada. El SSQR puede calcularse como:

$$SSQR = \sum_{j=1}^N [x_{j, sim} - x_{j, obs}]^2$$

En donde j representa la categoría (Rank).

El SSQR tiene como objetivo ajustar la distribución de los flujos, asegurando que todo el rango de flujos sea representado, pero sin considerar el tiempo. Esto puede ser una ventaja, por ejemplo, cuando los modelos diarios se aplican a cuencas pequeñas y donde los errores en el momento del pico pueden causar grandes residuos, mientras que los propios flujos pueden estar bien representados.

Este método puede ser de utilidad en un análisis estocástico, en donde el tiempo de ocurrencia no es tan importante como la frecuencia de ocurrencia.

3.4.9. PORCENTAJE DE SESGO (PBIAS)

El porcentaje BIAS (PBIAS) mide la tendencia promedio de datos simulados de ser mayores o menores que sus contrapartes observadas.

El valor óptimo de PBIAS es 0.00 con valores de baja magnitud indicando una simulación del modelo precisa. Valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo y valores negativos indican un sesgo de sobrestimación del modelo.

El PBIAS puede ser calculado como:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

Siendo PBIAS la desviación de los datos evaluados, expresada como porcentaje.

Una ventaja de PBIAS, es que tiene la capacidad de indicar claramente un pobre rendimiento del modelo. Sin embargo, los valores de PBIAS para flujo de corriente tienden a variar más, entre los distintos métodos de auto calibración, durante los años secos que durante los años húmedos. Esto debe ser considerado al intentar hacer una evaluación de muestra dividida (Split-sample evaluation), una para calibración y una para validación.

3.4.10. EFICIENCIA DE KLING-GUPTA

El coeficiente de eficiencia Kling-Gupta ofrece interesantes propiedades de diagnóstico sobre la performance del modelo debido a estar compuesto por términos de evaluación de correlación, sesgo y variabilidad.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Dónde:

- $r = \frac{Cov_{sim-obs}}{\sigma_{sim} \cdot \sigma_{obs}}$ Regresión lineal simple entre caudales observados y simulados.

- $\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$ Variabilidad relativa entre los caudales observados y simulados.

- $\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$ Representa el sesgo entre la media simulada y observada.

El rango de KGE se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y $-\infty$. En este caso, y del mismo modo que NS, una eficiencia inferior a cero indica que el valor medio de las series temporales observadas habría sido un reductor mejor que el modelo.

Este estadístico surge como una mejora al coeficiente de Nash-Sutcliffe al hacer la evaluación del ajuste de las simulaciones a los valores extremos de las series observadas (similar al coeficiente de regresión), evaluando al mismo tiempo la relación entre los caudales medios como Nash-Sutcliffe.

3.5. METODOS DE CALIBRACIÓN

3.5.1. AJUSTE DE INCERTIDUMBRE SECUENCIAL VERSION 2 (SUFI-2)

Este algoritmo analiza todas las incertidumbres en los parámetros (expresados como rangos o distribuciones uniformes) y trata de capturar la mayor parte de los datos medidos dentro del 95% de incertidumbre de predicción (95PPU) del modelo en un proceso iterativo. El 95PPU es calculado en los niveles 2,5% y 97,5% de la distribución acumulativa de una variable de salida obtenida a partir de un muestreo de tipo de tipo “Latin hypercube”. Para la bondad de ajuste, como estamos comparando dos bandas (95PPU para la simulación del modelo y la banda que representa los datos medidos más su error), utilizamos dos estadísticos: “P-factor” y “R-factor”. El P-factor es la fracción de datos medidos (más su error) encerrada por la banda 95PPU y varía entre 0 y 1, en donde 1 indica que el 100% de los datos medidos son encerrados dentro de la incertidumbre de la predicción del modelo. El error del modelo, entonces, puede expresarse como $(1 - \text{P-factor})$. Por otro lado, el R-factor es la proporción de la anchura promedio de la banda de 95PPU y la desviación estándar de la variable medida.

Estos dos índices son utilizados para juzgar los resultados de la calibración y de la validación. Un mayor P-factor se puede obtener a partir de un gran R-factor, por lo tanto, es deseable alcanzar un balance entre ambos. En la iteración final, en donde se alcancen valores aceptables de estos factores, los rangos de parámetros son tomados con los parámetros calibrados.

SUFI-2 permite utilizar diez funciones objetivo diferentes, tales como r^2 , NS, MSE, KGE, etc.

3.5.2. OPTIMIZACIÓN DE NUBE DE PARTÍCULAS (PSO)

PSO (Particle Swarm Optimization) se inicia con un grupo de partículas aleatorias (soluciones) y luego busca la óptima actualizando generaciones. En toda iteración, cada partícula se actualiza por los siguientes dos “mejores” valores. El primero, es la mejor solución (fitness) alcanzada hasta el momento. A este valor se lo llama *pbest*. El segundo “mejor” valor, es el mejor valor alcanzado hasta el momento por cualquier partícula dentro de la población. A este valor se lo denomina *gbest* (global best). Cuando una partícula forma parte de la población como sus vecinos topológicos, el mejor valor es un valor local y se lo llama *lbest* (local best).

Luego de encontrar los dos mejores valores, la partícula actualiza su velocidad y posición de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$v = v + c1 * rand() * (pbest - present) + c2 * rand() * (gbest - present)$$
$$present = present + v$$

En donde:

- v = velocidad de la partícula.
- *present* = es la partícula presente (solución).
- *pbes* y *gbest* son los mejores valores mencionados anteriormente.
- *rand* () es un número aleatorio entre 0 y 1.
- $c1$ y $c2$ son factores de aprendizaje, usualmente $c1=c2=2$.

Es importante destacar que PSO presenta varios puntos en común con el algoritmo genético (GA). Ambos, parten de un grupo de una población generada en forma aleatoria y tienen valores de ajuste para evaluar la población. Además, ambos algoritmos, actualizan la población y buscan el óptimo utilizando para ello, técnicas aleatorias.

Sin embargo, PSO no cuenta con operadores genéticos como cruzamiento y mutación. Las partículas se actualizan por sí solas con la “velocidad interna”.

Comparado con el algoritmo genético, el mecanismo de intercambio de información en PSO es completamente diferente. En GA, los cromosomas intercambian información entre ellos, por lo que toda la población se mueve como un grupo hasta llegar al óptimo. En PSO, en cambio, solamente el *gbest* entrega la información a los demás, se trata de un mecanismo de intercambio de información tipo “one-way”.

3.5.3. PROBABILIDAD GENERALIZADA DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE (GLUE)

GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) fue introducido en parte para permitir la posible no-singularidad de conjunto de parámetros durante la estimación de parámetros de modelo en aquellos modelos sobre parametrizados.

El procedimiento es simple, pero requiere algunas suposiciones. GLUE asume que, en caso de grandes modelos sobre parametrizados, no existe un único conjunto de parámetros que optimice el criterio de bondad de ajuste.

La técnica se basa en la estimación de los pesos o probabilidades asociadas a distintos conjuntos de parámetros, a partir de una medida subjetiva de probabilidad para luego derivar a una función de probabilidad, la cual es luego utilizada para llegar a la probabilidad predictiva de las variables de salida (outputs).

En Romanowicz, (1994) se desarrolla un equivalente de GLUE de manera más formal, en donde la función de probabilidad se deriva del error entre las salidas (outputs) observados y los simulados por el modelo. Esto es similar a una estimación estadística Bayesiana: requiere suposiciones sobre la estructura estadística de los errores.

Los únicos requerimientos de uso formales en un análisis de GLUE son que la medida de probabilidad debería incrementar monótonamente con el aumento del rendimiento y ser cero para modelos considerados inaceptables o no conductuales.

Un análisis GLUE, consiste básicamente en tres pasos:

- Luego de la definición de la “medida generalizada de probabilidad” $L(\theta)$, un gran número de conjuntos de parámetros son probados aleatoriamente desde la distribución previa y cada conjunto de parámetros es evaluado como conductual o no conductual a partir de la comparación de “la medida de probabilidad” con el valor límite o umbral dado.

- A cada parámetro conductual se le asigna un “peso de probabilidad” de acuerdo a lo siguiente:

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)}$$

Donde N es el número de conjuntos de parámetros conductuales.

-
- Finalmente, la incertidumbre de predicción es descripta como un cuantil de predicción de la distribución acumulada realizada a partir de los conjuntos de parámetros conductuales ponderados.

En la literatura, la medida de probabilidad más utilizada es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), la cual es también utilizada por el programa.

3.5.4. ALGORITMO GENÉTICO (GA)

Los algoritmos genéticos (AG o en inglés, GA) funcionan entre el conjunto de soluciones de un problema llamado fenotipo, y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en una cadena, generalmente binaria, llamada cromosoma. Los símbolos que forman la cadena son llamados genes. Cuando la representación de los cromosomas se hace con cadenas de dígitos binarios se lo conoce como genotipo. Los cromosomas evolucionan a través de iteraciones, llamadas generaciones. En cada generación, los cromosomas son evaluados usando alguna medida de aptitud. Las siguientes generaciones (nuevos cromosomas), son generados aplicando los operadores genéticos repetidamente, siendo estos los operadores de selección, cruzamiento, mutación y reemplazo.

La evolución suele partir de una población de individuos generados al azar, y es un proceso iterativo, con la población en cada iteración llamada generación. En cada generación, se evalúa la aptitud de cada individuo en la población. La aptitud suele ser el valor de la función objetivo en el problema de optimización que se está resolviendo. Los individuos más aptos son seleccionados estocásticamente de la población actual, y el genoma de cada individuo es modificado (recombinado y posiblemente mutado al azar) para formar una nueva generación. La nueva generación de soluciones candidatas se utiliza entonces en la siguiente iteración del algoritmo. Comúnmente, el algoritmo termina cuando se ha producido un número máximo de generaciones, o se ha alcanzado un nivel de aptitud satisfactorio para la población.

Un algoritmo genético puede presentar diversas variaciones, dependiendo de cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento, mutación), de cómo se realiza la selección y de cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población. En general, el pseudocódigo consiste de los siguientes pasos:

- **Inicialización:** Se genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema. En caso de no hacerlo aleatoriamente, es importante garantizar que dentro de la población inicial, se tenga la diversidad estructural de estas soluciones para tener una representación de la mayor parte de la población posible o al menos evitar la convergencia prematura.

- **Evaluación:** A cada uno de los cromosomas de esta población se aplicará la función de aptitud para saber cómo de "buena" es la solución que se está codificando.

- **Condición de término:** El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero esta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos criterios: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población. Mientras no se cumpla la condición de término se hace lo siguiente:

1. **Selección:** Después de saber la aptitud de cada cromosoma se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

2. **Recombinación o cruzamiento:** La recombinación es el principal operador genético, representa la reproducción sexual, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.

3. **Mutación:** Modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.

4. **Reemplazo:** Una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente.

Entre las limitaciones del método, podemos nombrar:

- Para problemas de alta complejidad la función de evaluación puede tornarse demasiado costosa en términos de tiempo y recursos.

- Puede haber casos en los cuales dependiendo los parámetros que se utilicen para la evaluación el algoritmo podría no llegar a converger en

una solución óptima o bien terminar en una convergencia prematura con resultados no satisfactorios.

- La "mejor" solución lo es solo en comparación a otras soluciones por lo que no se tiene demasiado claro un criterio de cuándo detenerse ya que no se cuenta con una solución específica.

3.6. SÍNTESIS

En este capítulo se desarrollaron los fundamentos teóricos de la calibración y las funciones objetivo a aplicarse al modelo hidrológico construido en el capítulo anterior con SWAT para la cuenca del río Carcarañá.

Dado que SWAT se trata de un modelo semi-distribuido con gran cantidad de parámetros calibrables, uno de los principales desafíos es el proceso de calibración. En otras palabras, el operador, selecciona sólo un grupo de parámetros, aunque podría seleccionar diferentes grupos, y así se llegaría a múltiples soluciones. Además, la calibración automática a partir de los algoritmos presentados, busca minimizar las subjetividades y el tiempo del operador en el momento de la calibración, lo que podría introducir errores en el resultado final del proceso.

Como puede observarse, el número de métodos de calibración es enorme y sólo representa una pequeña muestra dentro de la población de algoritmos existentes. A su vez, resulta imprescindible conocer el desempeño en la calibración de al menos los algoritmos más difundidos en la bibliografía internacional. Del mismo modo, las funciones objetivo a optimizar son numerosas y cabe resaltar que cada una busca evaluar propiedades diferentes de las series de caudales simuladas contra las observadas.

A partir de los algoritmos y funciones objetivo desarrollados en el presente capítulo, en el siguiente se aplicarán estos para evaluar su desempeño en el área de estudio del río Carcarañá.

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

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 diferentes orígenes. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración y validación.

La validación implica, simular utilizando los parámetros que fueron determinados durante el proceso de calibración, y comparar las predicciones del modelo con datos observados que no hayan sido utilizados durante la calibración.

La calibración y la validación, usualmente se realiza separando la serie de datos observados disponibles en tres períodos, uno de calentamiento, uno para la calibración y otro para la validación. Es importante para la calibración iniciar el modelo algunos años antes (conocido como calentamiento), para que los valores de las variables sean más realistas. El periodo de calentamiento se dedica a calibrar automáticamente las condiciones iniciales de humedad para obtener el mejor ajuste posible entre los caudales observados y simulados. Esto contribuye a disminuir las incertidumbres en la calibración.

Acorde a lo anteriormente dicho, se planteó una estrategia para calibrar el modelo SWAT a partir de la serie de caudales observados indicada en el primer capítulo de este trabajo. Dicha estrategia consistió en emplear un período de calentamiento de 3 años y luego dividir la serie de veinte años (Ene/1997 a Dic/2016) en dos períodos iguales, uno para la calibración propiamente dicha y el segundo se empleó para, una vez calibrado el modelo, realizar la validación del mismo.

Por las razones anteriores, en el presente capítulo se busca el rango de parámetros óptimos del modelo SWAT en la cuenca de estudio que permitan simular caudales lo más parecido posible a los caudales observados en la

localidad de Pueblo Andino (sub-cuenca número 40 del modelo SWAT), y se adopta este punto como cierre de la cuenca del río Carcarañá.

4.2. METODOLOGÍA

Para la calibración del modelo hidrológico se simuló a paso mensual los períodos Ene/1997 a Dic/2006, utilizándose para ello los métodos descritos en el capítulo anterior. Por otro lado, el período de validación seleccionado fue de Ene/2007 a Dic/2016. Estos períodos se seleccionaron en función de los datos disponibles.

De los parámetros enumerados en el capítulo anterior, se partió, en todos los casos, de los siguientes rangos que se muestran a continuación en la tabla (Tabla 3).

Tabla 3 - Rangos de parámetros de calibración seleccionados.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
CN2.mgt	-0.3	0.3
GW_DELAY.gw	0	1000
GWQMN.gw	0	5000
CH_N1.sub	0	1
ESCO.hru	0	1
OV_N.hru	-0.25	0.25
RCHRG_DP.gw	0	1
SOL_K.sol	-10	10
SURLAG.bsn	1	24
CANMX.hru	0	100
CH_N2.rte	0	1
EPCO.hru	0	1
GW_REVAP.gw	0.02	0.2
REVAPMN.gw	0	500
ALPHA_BNK.rte	0	1
ALPHA_BF.gw	0	1
SOL_AWC.sol	-1	1

Finalmente, se seleccionó como función objetivo el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe para así poder comparar los resultados de los distintos métodos de calibración empleados, ya que, por ejemplo, GLUE, utiliza esta función por defecto, y no es posible elegir las demás funciones objetivo como en los demás métodos.

4.3. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN (Período 1997 – 2006)

Se muestran los resultados del proceso de calibración del período 1997 a 2006. En las siguientes figuras se puede observar la comparación entre los datos medidos y simulados en la sección de Pueblo Andino, para cada uno de los métodos de calibración empleados.

4.3.1. SUFI-2

Se realizaron 7 iteraciones de 500 simulaciones cada una y se obtuvo el siguiente resultado (Figura 13):

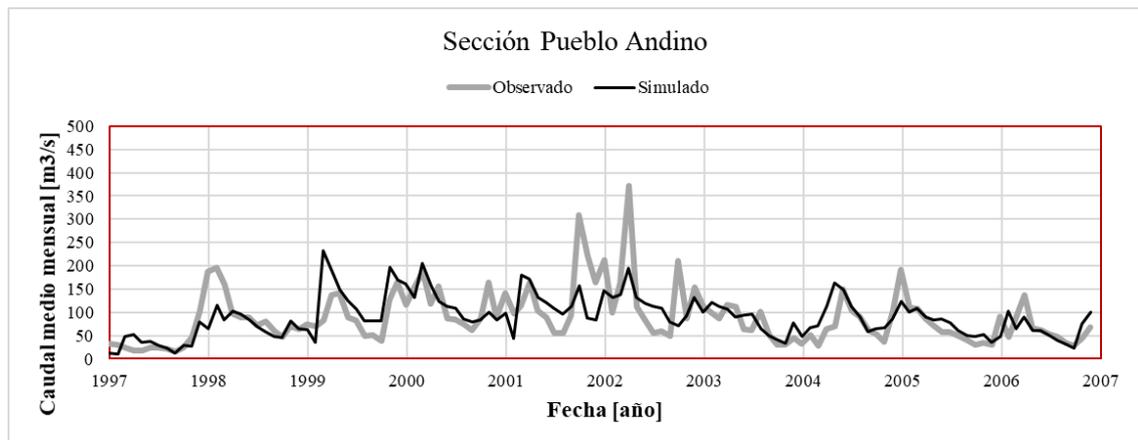


Figura 13 - Resultados calibración SUFI-2

En la figura anterior (Figura 13) podemos observar que la serie simulada, se asemeja, aproximadamente a la observada. Sin embargo, puede verse que los caudales picos se encuentran en algunos casos subestimados por el modelo, y en otros, sobreestimados.

A continuación, se muestra el valor del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe obtenido:

NS=	0.39
-----	------

El valor de la función objetivo, si bien no es cercano al valor deseable (NS=1), resulta aceptable, dadas las incertidumbres que se tienen en la cuenca de estudio.

4.3.2. PSO

Se realizaron 4 iteraciones de 500 simulaciones (50x10) cada una y se obtuvo (Figura 14):

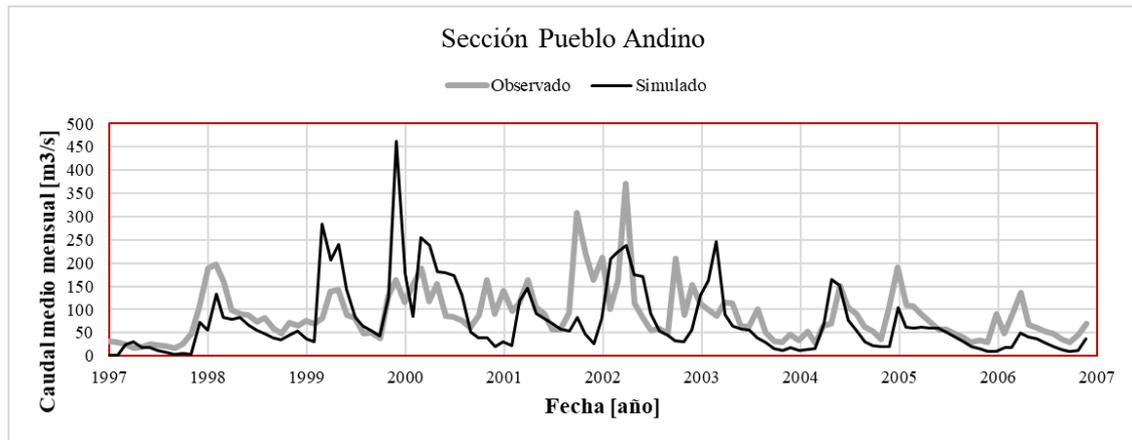


Figura 14 - Resultados calibración PSO

En la figura anterior (Figura 14), puede notarse que la serie simulada se aproxima a la observada. Si bien el momento en que se dan los picos coincide, sigue existiendo una subestimación y una sobrestimación de los mismos bastante grande por parte del modelo.

El valor del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe que se obtuvo es el que se muestra a continuación:

NS=	0.27
-----	------

El valor obtenido resulta menor que el obtenido anteriormente, lo que implica que las medias de las series observadas y simuladas difieren un poco más. Sin embargo, haciendo énfasis en el análisis visual de los resultados, los mismos se consideran aceptables.

4.3.3. GLUE

Se realizó una única iteración de 500 simulaciones y se obtuvo (Figura 15):

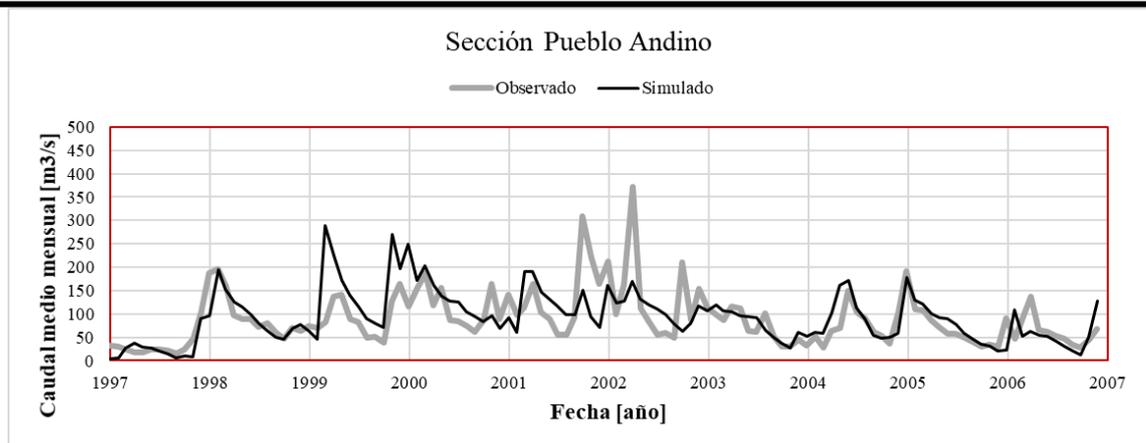


Figura 15 - Resultados calibración GLUE

Se puede observar que la serie simulada se asemeja mejor a la observada que en los casos anteriores; se ve una leve mejora en la representación de los caudales pico, sin embargo, siguen existiendo subestimaciones y sobrestimaciones.

Se obtuvo el siguiente valor del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe:

NS=	0.42
-----	------

El valor obtenido, si bien es más alto, no resulta significativamente mayor que el obtenido con el método de SUFI-2. De la misma forma, se considera un valor aceptable debido a las incertidumbres del modelo.

4.3.4. GA

Se realizó un total de 500 simulaciones (considerando una población de 40 con 50 generaciones cada una y 100 intervalos de muestreo tipo Latin Hypercube), y se obtuvo lo siguiente (Figura 16):

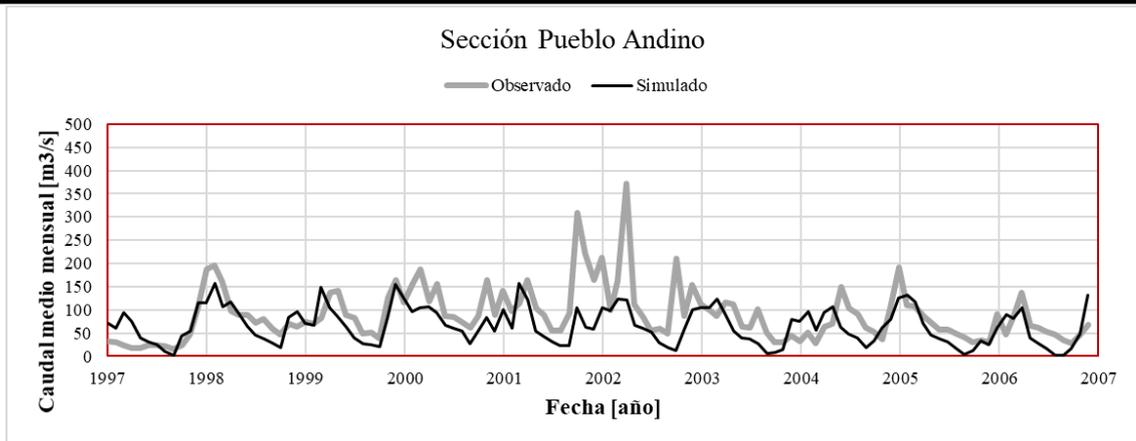


Figura 16 - Resultados calibración GA

Podemos observar, que la serie simulada intenta aproximarse a la serie observada, sin embargo, puede notarse que esta última es subestimada a lo largo de todo el período de calibración. Podemos decir que la correlación entre los datos de ambas series es pobre.

A continuación, se muestra el valor obtenido del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe:

NS=	0.13
-----	------

El coeficiente NS resulta un valor muy pequeño, esto quiere decir que el valor medio de la serie observada difiere bastante del valor medio de la serie simulada.

4.4. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN (Período 2007 – 2016)

Con los parámetros óptimos obtenidos en el proceso de calibración se realizó la optimización de la simulación en otro período (2007 a 2016). Cabe destacar que en ningún caso se obtendrá una correspondencia perfecta de los parámetros de calibración debido a que la situación de la cuenca siempre es diferente entre un período y otro con factores naturales que pueden ser muy variables (saturación, humedad, evapotranspiración, clima, etc.). En las figuras que se muestran a continuación se muestra la comparación entre los datos medidos y simulados en la sección de Pueblo Andino para cada uno de los métodos empleados.

4.4.1. SUFI-2

Se realizó una iteración de una sola simulación con los parámetros obtenidos en la calibración anterior, y se obtuvo el siguiente resultado (Figura 17):

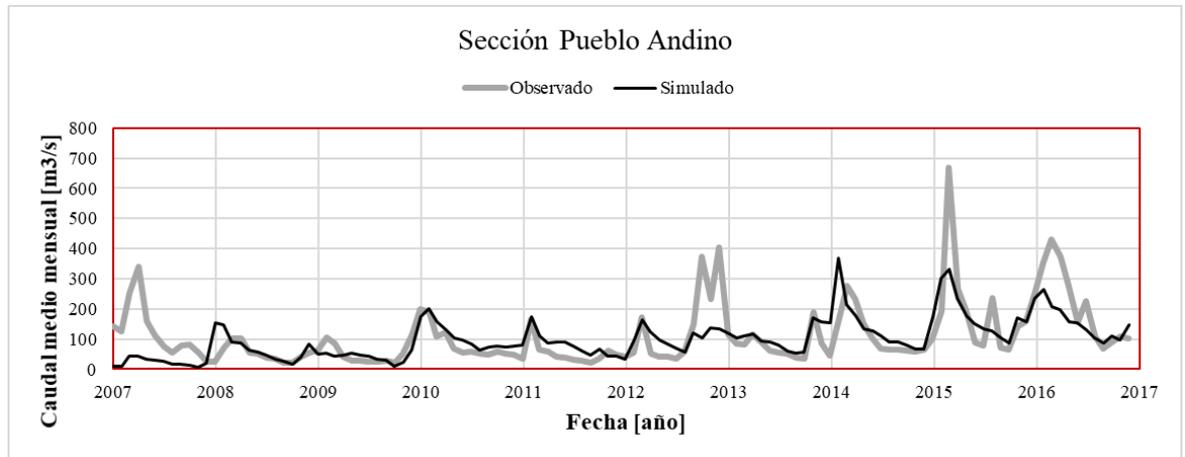


Figura 17 - Resultados validación SUFI-2

En la validación del modelo utilizando SUFI-2 puede verse que la mayor parte de caudales pico no son representados por el modelo.

A continuación, se muestra el valor del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe obtenido:

NS=	0.39
-----	------

El valor del estadístico obtenido, resulta satisfactorio, quiere decir que los caudales medios observados y simulados aproximadamente, se asemejan entre sí.

4.4.2. PSO

Con los parámetros obtenidos en el proceso de calibración se realizó la validación del modelo haciendo una única iteración con una simulación y se obtuvo (Figura 18):

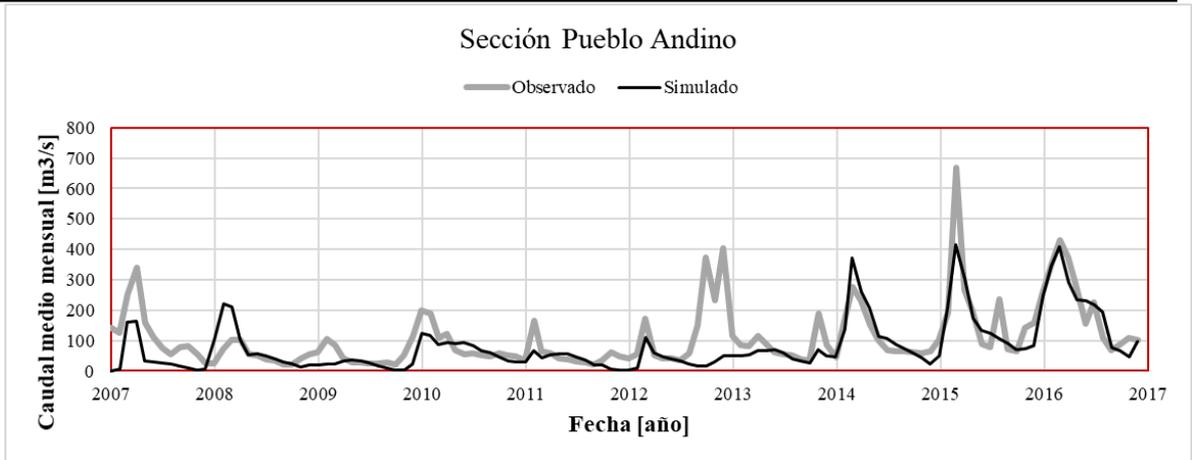


Figura 18 - Resultados validación PSO

Puede notarse, nuevamente, que la mayor parte de los caudales pico no son reproducidos por el modelo, el valor del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe que se obtuvo fue:

NS=	0.44
-----	------

A pesar de los resultados de la calibración con PSO, el valor obtenido en la validación resulta ser aceptable y nos indica que la media de la serie de caudales observados y simulados son aproximadamente similares.

4.4.3. GLUE

Se ejecutó nuevamente el programa, pero esta vez utilizando los parámetros obtenidos en la calibración. Para ello se realizó una única iteración y se obtuvo lo siguiente: (Figura 19)

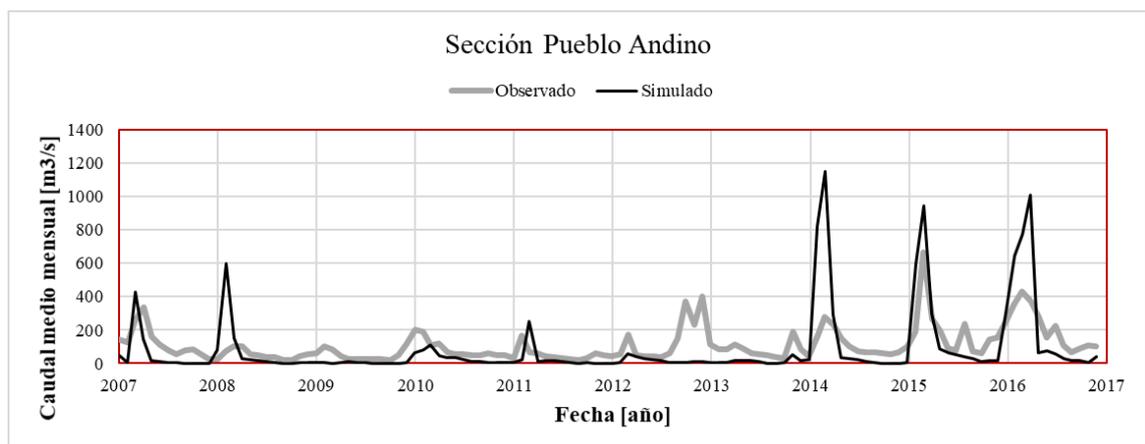


Figura 19 - Resultados validación GLUE

Al analizar visualmente los resultados, se observa que la validación con esta técnica no da buenos resultados, no se observa una correlación entre los datos simulados y los observados.

En cuanto a la función objetivo, se obtuvo el siguiente valor del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe:

NS=	-1.66
-----	-------

Este valor obtenido resulta ser negativo, esto quiere decir que el valor medio de la serie observada hubiera sido un mejor predictor que el modelo. No se considera aceptable, ya que se es significativamente inferior al valor óptimo (NS=1).

4.4.4. GA

Se realizó la validación del modelo realizando una única iteración con los parámetros obtenidos en la calibración y se obtuvo (Figura 20):

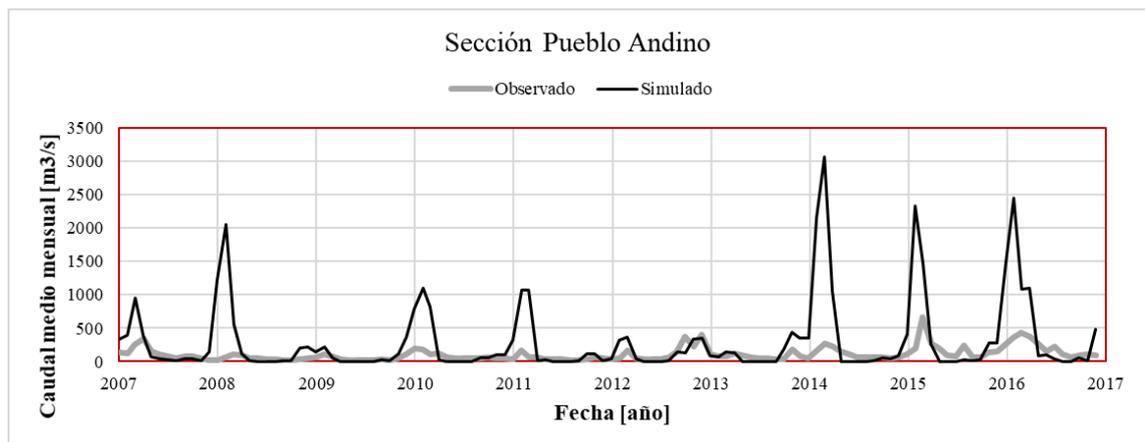


Figura 20 - Resultados validación GA

Analizando los resultados, se puede decir que no existe una correlación entre la serie simulada y la serie de caudales observada.

Por otro lado, el valor de la eficiencia Nash-Sutcliffe obtenido fue el siguiente:

NS=	-14.30
-----	--------

Este valor resulta muy negativo y muy alejado del valor óptimo de la función objetivo seleccionada (NS=1). No se considera como un valor aceptable.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados indicaron que el modelo fue incapaz de representar algunos picos de caudal a lo largo de la serie, en general subestimándolos (Figura 21). Se especula con que esto podría relacionarse con la incertidumbre asociada a la serie de caudales observados, así como también a la insuficiencia de datos de lluvia.

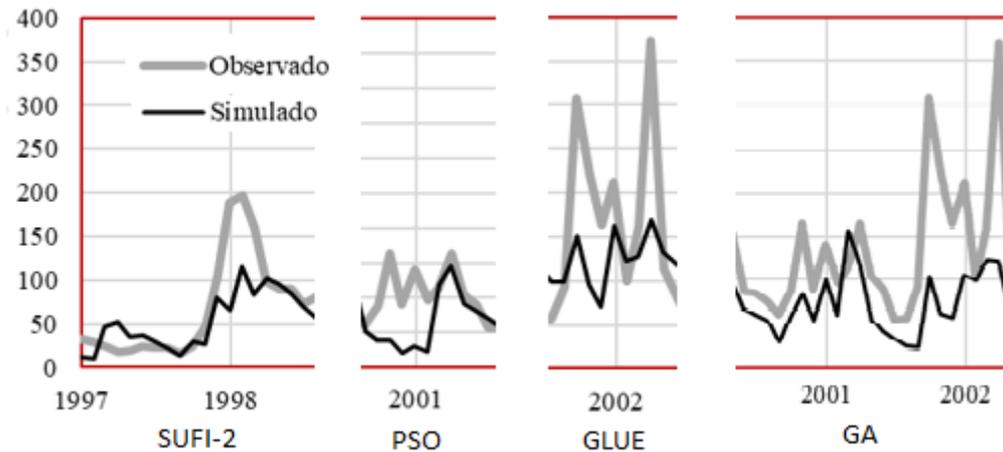


Figura 21 - Subestimación de picos

Por otra parte, también pudo observarse que en algunos casos el modelo sobreestima algunos picos y subestima el resto de las veces, lo cual puede deberse a un bajo flujo base o a una elevada escorrentía superficial (ver Figura 22).

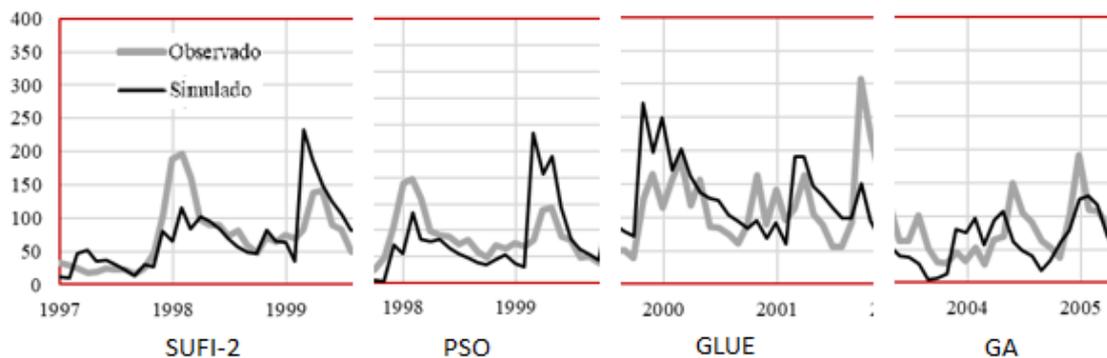


Figura 22 - Sobreestimación y subestimación de picos

El problema descrito previamente (Figura 22), es característico de la función objetivo elegida para la calibración del modelo, ya que se empleó en cada una de las técnicas de calibración el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe y, como se dijo en el capítulo número 3, la mayor desventaja que presenta dicha

función es que la diferencia entre los valores observados y simulados se calculan como valores cuadrados, lo que trae como consecuencia que los mayores valores de la serie sean sobreestimados y los menores, subestimados. Por lo tanto, se propone para trabajos futuros la elección de otra función objetivo para la calibración, tal como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado (MNS) o la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), lo que podría mejorar los resultados obtenidos.

A partir del análisis de los resultados de la calibración obtenidos, los mejores valores fueron obtenidos con SUFI-2 y GLUE. De este modo, se puede decir que, para la sección de Pueblo Andino, la calibración que se obtuvo con dichos métodos, es aproximadamente el mismo resultado de la función objetivo, lo que indica que la media de la serie de los caudales simulados y la media de los caudales observados, en ambos métodos, presentan la misma relación. Del mismo modo, al complementarse con un análisis visual de las series de caudales, se evidencia que la calibración obtenida con ambas técnicas, resulta similar. A pesar de esto, en la validación puede notarse que el método SUFI-2, brinda mejores resultados, tanto visualmente, como analíticamente (a través de la función objetivo).

En cuanto a los métodos GLUE y GA, sus resultados no son aceptables debido a que las simulaciones no logran representar lo observado en la localidad Pueblo Andino. De hecho, al analizar el hidrograma obtenido con este último algoritmo, podemos decir que la calibración no logra representar el flujo de agua subterránea, ya que se observa un flujo base muy bajo. Además, los estadísticos de evaluación presentan valores muy pequeños o negativos en ambos casos.

Considerando el valor de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenido con PSO, podemos decir que se obtuvieron muy buenos resultados en la calibración, aunque no logran mejorar aquellos obtenidos con SUFI-2. Por otra parte, a pesar de que la eficiencia de la validación con la técnica PSO fue la mejor, el gráfico del caudal simulado no parece decir lo mismo. Esto se debe a que la función objetivo elegida, sólo compara las medias de las series observadas y simuladas, y como se dijo anteriormente, el análisis analítico de los resultados, debe considerarse en forma conjunta con el análisis del hidrograma continuo resultante.

Por otro lado, resulta de gran importancia mencionar que, para lograr los resultados obtenidos en los métodos SUFI-2 y GA el costo computacional fue mucho más grande que en el caso de PSO y GLUE. En otras palabras, para SUFI-2 se necesitaron 7 iteraciones de 500 simulaciones cada una, en el algoritmo genético, si bien se realizó una iteración de 500 simulaciones, el tiempo de procesamiento fue mucho más grande que los demás métodos. Mientras que en las técnicas de calibración PSO y GLUE fueron necesarias una menor cantidad de iteraciones, lo que permitió visualizar los resultados finales en forma más rápida.

4.6. SÍNTESIS

Los resultados indicaron que la calibración y validación de los parámetros hidrológicos pudo efectuarse de modo satisfactorio, presentando los hidrogramas simulados una representación aceptable de los hidrogramas observados. No obstante, se considera que dichos resultados podrían ser mejorados, aumentando la información relacionada con los procesos hidrológicos tales como infiltración en los campos, recarga de acuíferos, entre otros, que juegan un rol importante en el modelo SWAT para la representación de una cuenca como la del río Carcarañá.

Por último, a partir de lo analizado anteriormente, se concluye que la técnica de calibración SUFI-2, ofrece mejores resultados a partir de la información que se tiene disponible de la cuenca en estudio.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES ACADÉMICAS

Este trabajo consistió básicamente en la modelación hidrológica de la cuenca del río Carcarañá en la sección de Pueblo Andino, empleando como herramienta de simulación al modelo SWAT.

Dado que se trata de un modelo semi-distribuido con gran cantidad de parámetros calibrables, uno de los principales desafíos estuvo centrado en el proceso de calibración. En otras palabras, el operador, selecciona sólo un grupo de parámetros, aunque podría seleccionar diferentes grupos, y así se llegaría a múltiples soluciones. Además, la calibración se efectuó para un único punto, debido a la insuficiencia de información. Este hecho podría conducir a errores en los cálculos de los diferentes procesos hidrológicos de las demás subcuencas dentro de la cuenca de estudio.

De acuerdo con el objetivo general planteado al comienzo del presente trabajo, se puede concluir que el algoritmo de calibración Ajuste de Incertidumbre Secuencial o SUFI-2 por sus siglas en inglés, ofrece mejores resultados que las demás técnicas a partir de la información que se tiene disponible de la cuenca en estudio y de las simplificaciones propias del modelo hidrológico. Por lo tanto, si bien es uno de los métodos con mayor costo computacional, el mismo se justifica con la calidad de los resultados obtenidos.

A partir del análisis de los resultados obtenidos con cada método, se ha llegado a concluir que cada algoritmo de calibración converge a diferentes rangos de parámetros calibrados. Sin embargo, los resultados de las descargas resultan muy similares entre sí. Esto se debe, a que cada uno de los métodos llega a la optimización de forma muy diferente.

Por último, considerando el desempeño global del modelo, este estudio demostró que SWAT es una herramienta integradora que incluye y considera los diferentes componentes naturales del ciclo hidrológico, el uso y el manejo del suelo, el crecimiento de la cobertura vegetal, etc.

5.2. CONCLUSIONES PERSONALES

En cuanto a la experiencia personal de enfrentarme con la vida profesional del Ingeniero Civil debo mencionar que la misma fue muy positiva y productiva ya que sirvió para afianzar conceptos adquiridos a lo largo de la carrera y aplicarlos mediante métodos adecuados.

Por otro lado, la realización del presente trabajo me permitió adquirir experiencia en la utilización de programas que se utilizan en la vida profesional, como el SWAT-CUP, ArcGIS y ArcSWAT.

6. CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

ABBASPOUR, K. (2015). *Manual de uso de SWATCUP*.
https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf.

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

ABBASPOUR, K.C., VAGHEFI, S.A., SRINIVASAN, R. (2017). *A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 International SWAT Conference*. Water Open Access Journals.

ALONSO, F. (2008). *Tesis de maestría "CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE UN MODELO HIDROLÓGICO BASADA EN ALGORITMOS GENÉTICOS, APLICACIÓN A DOS CUENCAS TÍPICAS ARGENTINAS"*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

ALONSO, F. (2018). *Tesis de doctorado "OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO COMO HERRAMIENTA DE DECISIÓN FRENTE A DIVERSOS ESCENARIOS DE PRONÓSTICO HIDROLÓGICO"*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

ALVAREZ, J., DÍAZ LOZADA, J.M. (2018). *Bases del Plan Director de la Cuenca del Carcarañá*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

ARNOLD, J.G., MORIASI, D.N., GASSMAN, P.W., ABBASPOUR, K.C., WHITE, M.J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C., HARMEL, R.D., VAN GRIENSVEN, A., VAN LIEW, M.W., KANNAN, N., JHA, M.K. (2012). *SWAT: Model use, Calibration and Validation*. ASABE Technical Library.

CABRERA, J. (2013). *Calibración de modelos hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

CARO CAMARGO, C.A. (2015). *Tesis doctoral "MODELACION HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA BASADA EN ESQUEMAS DE VOLÚMENES FINITOS"*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

CARRANZA, J. (2018). *Práctica Supervisada "MODELACIÓN HIDROLÓGICA SEMI-DISTRIBUÍDA EN LA CUENCA ALTA DE RÍO TERCERO"*



MEDIANTE EL MODELO SWAT”. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

DÍAZ LOZADA, J.M. (2014). *Tesis de maestría “CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN EL SISTEMA DEL RÍO CARCARAÑÁ”*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

ERCAN, M.B, GOODALL, J.L. (2014). *A Python tool for Multi-Gage calibration of SWAT models using the NSGA-II algorithm*. 7th International Congress on Environmental Modelling and Software, San Diego, California, USA.

ERCAN, M.B., GOODALL, J.L. (2016). *Design and implementation software library for using NSGA-II with SWAT for multi-objective model calibration*. Environmental Modelling & Software journal.

GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., MARTINEZ, G.F. (2009). *Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications of improving hydrological modelling*. Journal of Hydrology, Elsevier.

HAVRYLENKO, S.B., BODOQUE DEL POZO J.M., ZUCARELLI, G.V., MERCURI, P.A. (2013). *Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una cuenca de la región pampeana*. Catena, Elsevier.

KRAUSE, P., BOYLE, D.P., BASE, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. Advances in Geoscience.

MARCZYK, A. (2004). *Algoritmos genéticos y computación evolutiva*. The TalkOrigins Archive.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. (1999). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. ASABE Technical Library.

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

PONCE, V.M. (1989). *Engineering Hydrology*. Ed. Prentice Hall.

ROMAGNOLI, M., PORTAPILA, M., RIGALLI, A., MAYDANA, G., BURGUÉS, M., GARCÍA, C.M. (2017). *Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina*. Science of the total Environment, Elsevier.

SHIVHARE, N., BIHARI, S. (2018). *A comparison of SWAT model calibration techniques for hydrological modelling in the Ganga River watershed*. Journal of Hydrology, Elsevier.

URIBE, N. (2010). *SWAT Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. <https://swat.tamu.edu/media/>.

VAN GRIENSVEN, A., BAUWENS, W. (2003). *Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models*. Water Resources Research.

WEISE, T. (2009). *Global optimization algorithms: Theory and application*. University of Science and Technology of China.



UNC



FCEFyN





UNC



FCEFyN



CETA

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

ANEXOS



UNC



FCEFyN



7. ANEXO I

7.1. 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].

ψ_{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 ψ_{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 [mmH₂O].

R_{day} = es la precipitación del día [mmH₂O].

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 (α) 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:

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

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:

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

Donde:

Q_{surf} = es la escorrentía superficial descargada al canal principal en un día determinado [mmH₂O].

Q'_{surf} = es la cantidad de escorrentía superficial generada en la subcuenca en un día determinado [mmH₂O].

$Q_{srtor,i-1}$ = es la escorrentía superficial almacenada o rezagada del día anterior [mmH₂O].

$surlag$ = 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 [$1/(m \cdot km)$]

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 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 la profundidad 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:

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

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 [mmH₂O].

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 [mmH₂O].

W_{deep} = es la cantidad de agua que se filtra desde el acuífero poco profundo en el acuífero profundo el día i [mmH₂O].

$W_{pump,sh}$ = es la cantidad de agua extraída del acuífero superficial bombeando el día i [mmH₂O].

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 las 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:

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

Donde:

$W_{rchr,g,i}$ = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día i [mm H₂O].

δ_{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 H₂O].

$W_{rchr,g,i-1}$ = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero en el día i-1 [mm H₂O].

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 H₂O]

$W_{perc,ly}$ = es la cantidad de agua que se filtra desde la más baja capa, n, en el perfil del suelo en el día i [mm H₂O].

$W_{crk,btm}$ = 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 H₂O].

El tiempo de retardo, δ_{gw} , no se puede medir directamente. Puede ser estimado por una simulación de la recarga del acuífero usando diferentes valores para δ_{gw} y comparando las 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 tenían valores similares para δ_{gw} , por lo que una vez que un valor de tiempo de retardo para un 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, $a_{q_{shtthr,q}}$. 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 H₂O].

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

L_{gw} = es la 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].

μ = es el rendimiento específico del acuífero superficial [m/m].

α_{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 de la 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 cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado por usuario, $aq_{shthr,rvp}$. 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 H₂O].

E_o = es la evapotranspiración potencial para el día [mm H₂O].

β_{rev} = el coeficiente de revapificación.

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

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

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

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

Donde:

W_{repav} = es la cantidad real de agua que se mueve hacia la zona del suelo en respuesta a Deficiencias de agua [mm H₂O].

$W_{repav,mx}$ = es la cantidad máxima de agua que se mueve en la zona del suelo en respuesta a las deficiencias de agua [mm H₂O].

aq_{sh} = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero poco profundo al comienzo del día i [mm H₂O].

$aq_{shthr,rvp}$ = es el nivel de agua umbral en el acuífero poco profundo para revap o percolación a un acuífero profundo [mm H₂O].

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:

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

Donde:

$W_{deep, mx}$ = es la cantidad máxima de agua que se mueve al acuífero profundo en día i [mm H₂O].

$w_{rchr g}$ = es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero el día i (mm H₂O)

β_{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:

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

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

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

Donde:

W_{deep} = w_{deep} es la cantidad real de agua que se mueve hacia el acuífero profundo el día i [mm H₂O].

$W_{deep, mx}$ = es la cantidad máxima de agua que se mueve hacia el acuífero profundo el día i [mm H₂O].

aq_{sh} = es la cantidad de agua almacenada en el acuífero poco profundo al comienzo del día i [mm H₂O].

$aq_{shthr, rvp}$ = es el nivel de agua umbral en el acuífero poco profundo para revap o percolación a un acuífero profundo [mm H₂O].

8. ANEXO II

8.1. MODELACIÓN EN ArcSWAT

La extensión ArcSWAT ArcGIS es la interfaz gráfica de usuario para el modelo SWAT2012, este es un paquete de análisis de datos geográficos diseñado para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando las características principales de ArcGIS.

Con la interfaz se puede:

- Crear archivos de entrada directamente desde las tablas y mapas raster de ArcGIS.
- Correr el modelo SWAT2012 sin salir de la interfaz.
- Mostrar resultados de SWAT usando los diferentes documentos de ArcGIS como tablas, gráficos y mapas.

8.1.1. DATOS DE ENTRADA

Para utilizar esta interfaz, se deben preparar los mapas y archivos de base de datos necesarios. A continuación, se describen los diferentes tipos de mapas y tablas necesarias para la entrada del modelo.

GRID- Modelo digital de elevaciones (DEM)

La interfaz permite valores enteros o reales para las elevaciones del DEM. La resolución del mapa debe estar definida en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas, grados decimales. La elevación debe estar definida en una de las siguientes unidades: metros, centímetros, yardas, pies, pulgadas.

GRID- Uso de suelo

Las categorías especificadas en el mapa de usos de suelo necesitan ser reclasificadas dentro de los tipos que SWAT maneja. El usuario tiene varias opciones para reclasificar las categorías, la más utilizada consiste en crear una tabla de equivalencias que identifique las cuatro letras del código SWAT para las diferentes categorías de uso de suelo en el mapa.

GRID- Tipo de suelo

Las categorías especificadas en el mapa de tipos de suelos necesitan ser asociadas a la base de datos de suelos (la interfaz incluye datos de suelos de Estados Unidos por defecto), para personalizar la base de datos de suelos el usuario tiene varias opciones, más adelante se explicará la más utilizada.

TABLAS- Tabla de localización

Esta tabla se utiliza para especificar la ubicación de: localizaciones de puntos para la recolección de datos de lluvia, clima, temperatura, o localización de estaciones meteorológicas.

Las tablas de localización de aforos de lluvia o temperatura deberán crearse cuando los datos medidos serán usados en la simulación.

La base de datos incluida en la interface tiene almacenadas 1112 estaciones alrededor de Estados Unidos. Los datos de las regiones diferentes a EE.UU. deberán ser introducidos a través de la interfaz en la base de datos de estaciones meteorológicas del usuario cuando se crea el proyecto.

TABLAS- Equivalencias de uso de suelo

Se utiliza para especificar el código del tipo de uso para ser modelado para cada categoría en el mapa raster de usos de suelo. La primera fila de la tabla debe contener los nombres de los campos o atributos, las filas siguientes tendrán los datos requeridos.

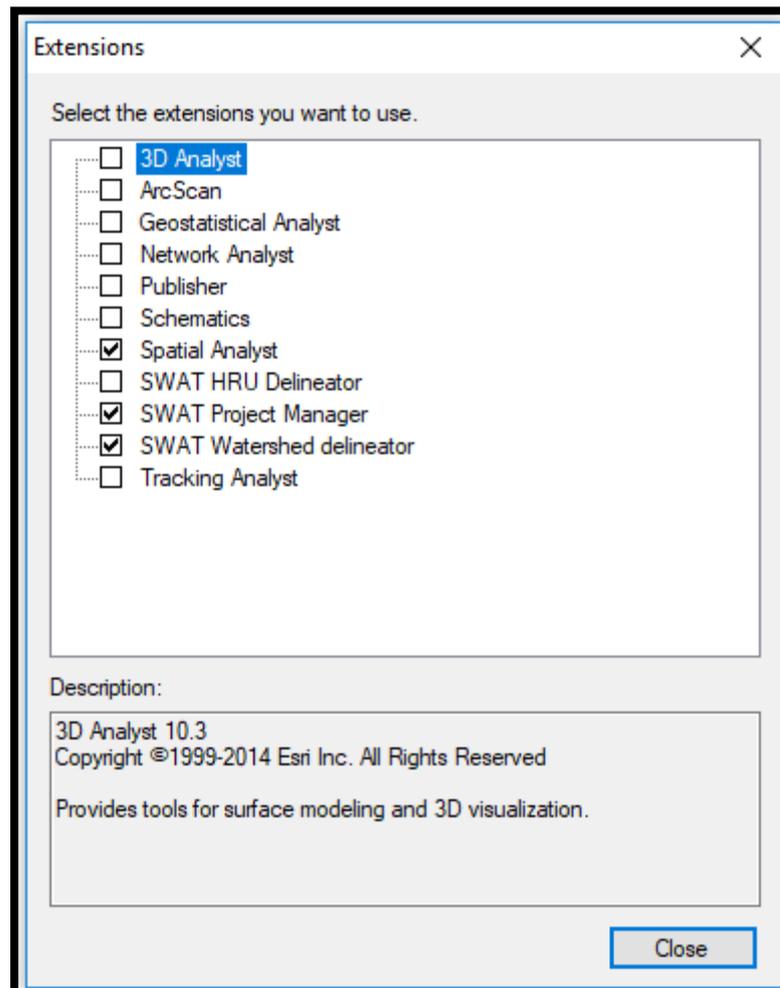
TABLAS- Datos de precipitación

Se utiliza para guardar la precipitación diaria de una estación meteorológica. Esta tabla es requerida si la opción *raingage* es seleccionada para la caída de lluvia en la ventana de datos de clima. Existe una tabla de datos de precipitación para cada localización listada en la tabla de ubicación de medidas de lluvia.

8.1.2. USO DE LA INTERFAZ ArcSWAT

Paso 1: Cargar la interfaz ArcSWAT desde ArcGIS

1. Ejecute ArcMap para un proyecto nuevo.
2. En el menú *Customize*, presione *Extensions*.
3. Observe las opciones disponibles hasta encontrar *Spatial Analyst*, *SWAT Project Manager*, *SWAT Watershed Delineator*.
4. Selecciónelas y cierre la ventana.



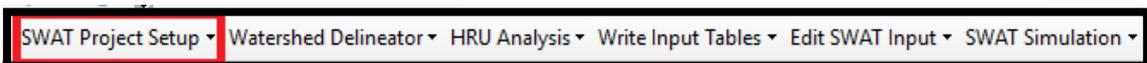
Luego en el menú *Customize*, seleccione *Toolbars* y escoja la correspondiente a ArcSWAT; entonces esta aparecerá en la pantalla de ArcMap.

SWAT Project Setup ▾ Watershed Delineator ▾ HRU Analysis ▾ Write Input Tables ▾ Edit SWAT Input ▾ SWAT Simulation ▾

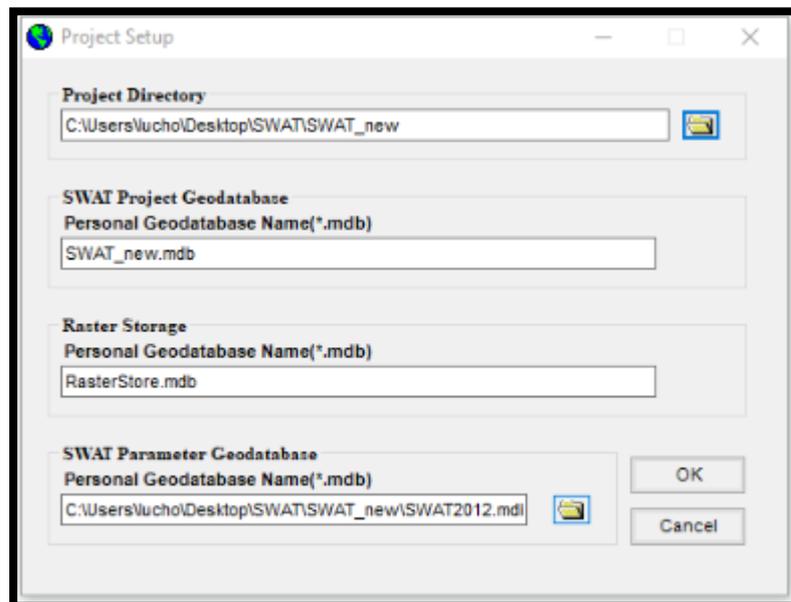
La barra de herramientas de la pantalla principal ofrece al usuario 6 opciones: SWAT Project Setup, Watershed Delineator, HRU Analysis, Write Input Tables, Edit SWAT Input, SWAT Simulation.

Los menús personalizados del ArcSWAT contienen los comandos necesarios para procesar los datos de la cuenca, generar archivos de entrada para SWAT, correr el modelo, y mostrar los resultados. Debido al número de diferentes pasos requeridos para procesar la información, la interface mantiene un registro del usuario y no permite que el usuario seleccione comandos hasta que los comandos prioritarios hayan sido ejecutados.

Paso 2: Crear nuevo proyecto



1. En la pestaña *SWAT Project Setup*, seleccione *New Project* y aparecerá el siguiente recuadro:

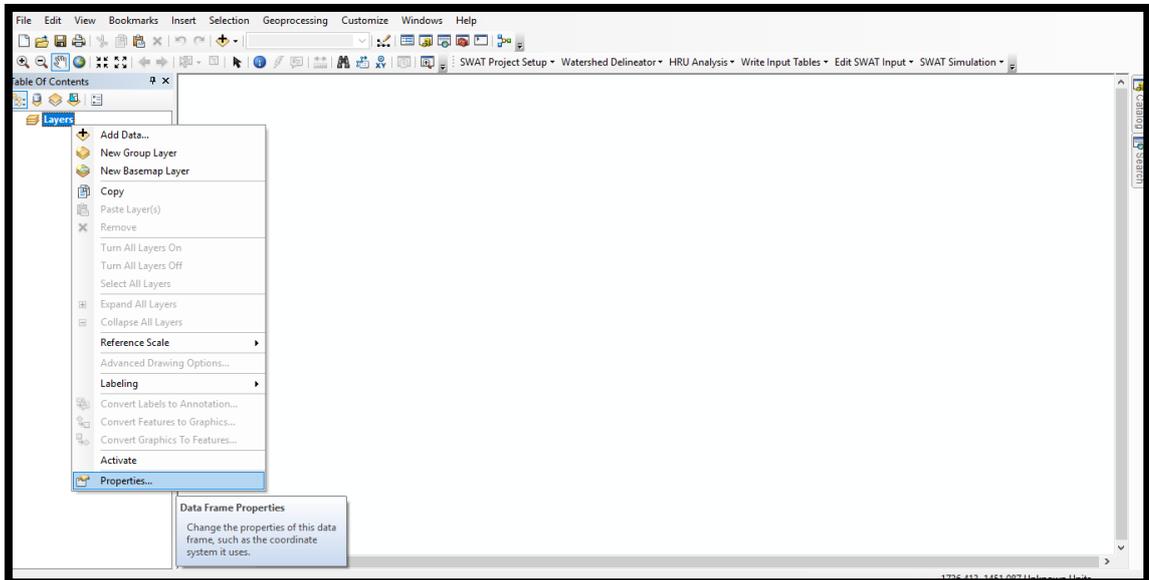


2. En *Project Directory* seleccione la carpeta en donde trabajará (ruta), luego se creará automáticamente las tres bases de datos que pueden verse.

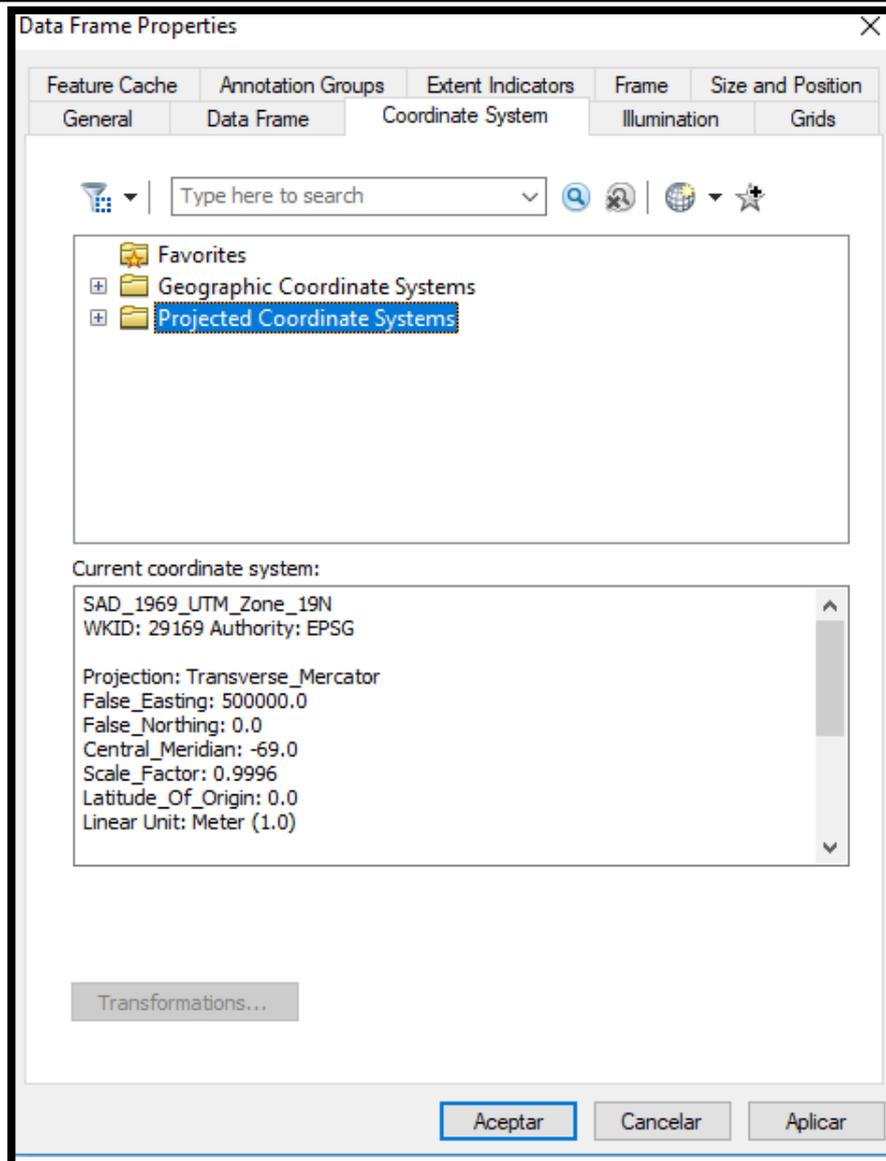
NOTA: una vez creado el proyecto, resulta conveniente guardar el mismo con la extensión “.mxd” de modo de que se pueda ingresar rápidamente a la carpeta de trabajo seleccionando “home”.

Paso 3: Cargar archivo “.shp” o “.tif” de la cuenca

1. Antes de cargar el archivo de la cuenca, debe configurar la zona en la que se encuentra la cuenca. Para ello, ingrese a las propiedades de *Layers*.

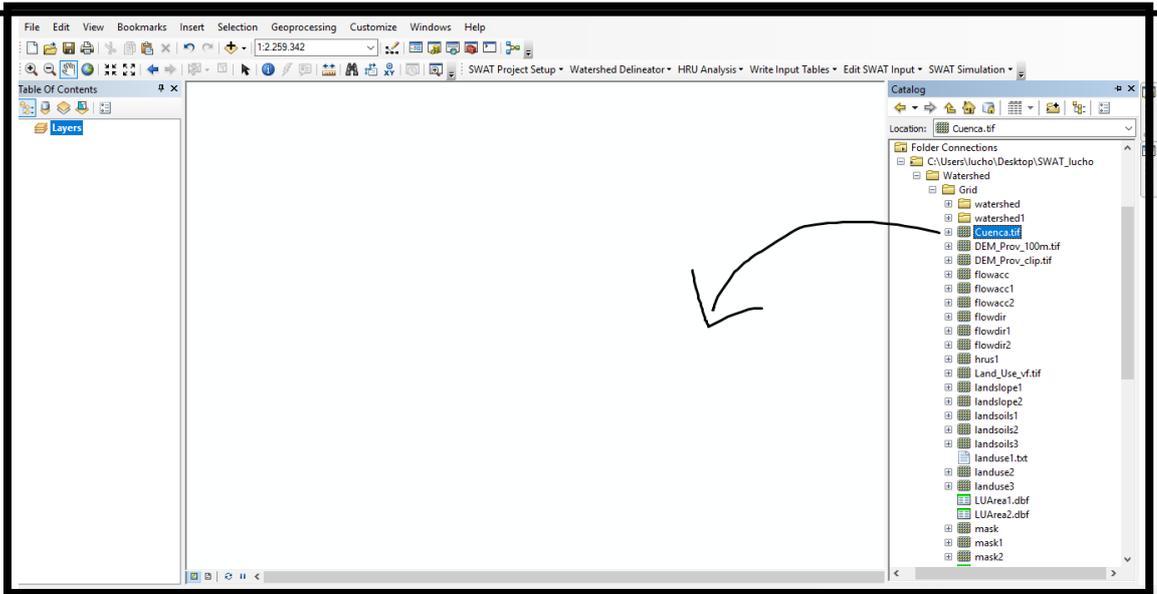


2. En el recuadro que aparecerá, busque la zona en donde se encuentra la cuenca en un sistema de coordenadas proyectadas.



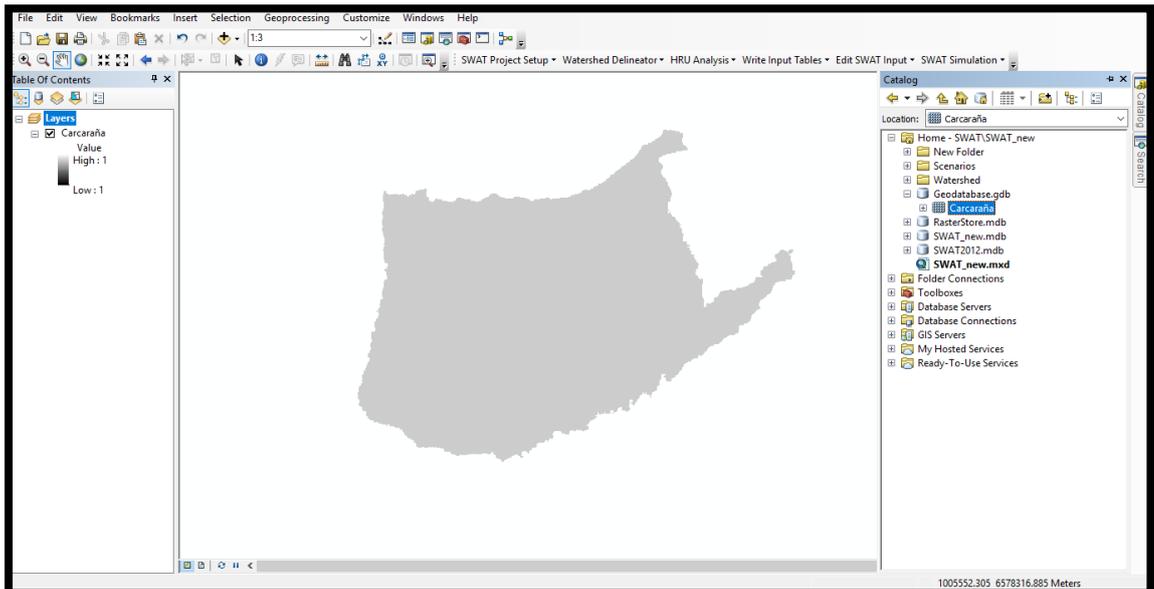
En este caso, la cuenca del río Carcarañá se encuentra en las coordenadas WGS – UTM20S.

3. Finalmente, busque el archivo “.tif” o “.shp” de la cuenca en el disco y arrástrelo al espacio de trabajo de ArcMap.



NOTA: es recomendable, guardar el archivo en un “geodatabase.gdb” en la carpeta, con el objetivo de tener todos los mapas y archivos “.shp” o “.tif” en un mismo directorio. Para esto, seleccione la capa (layer) del archivo “.shp” y expórtelo al “geodatabase.gdb”.

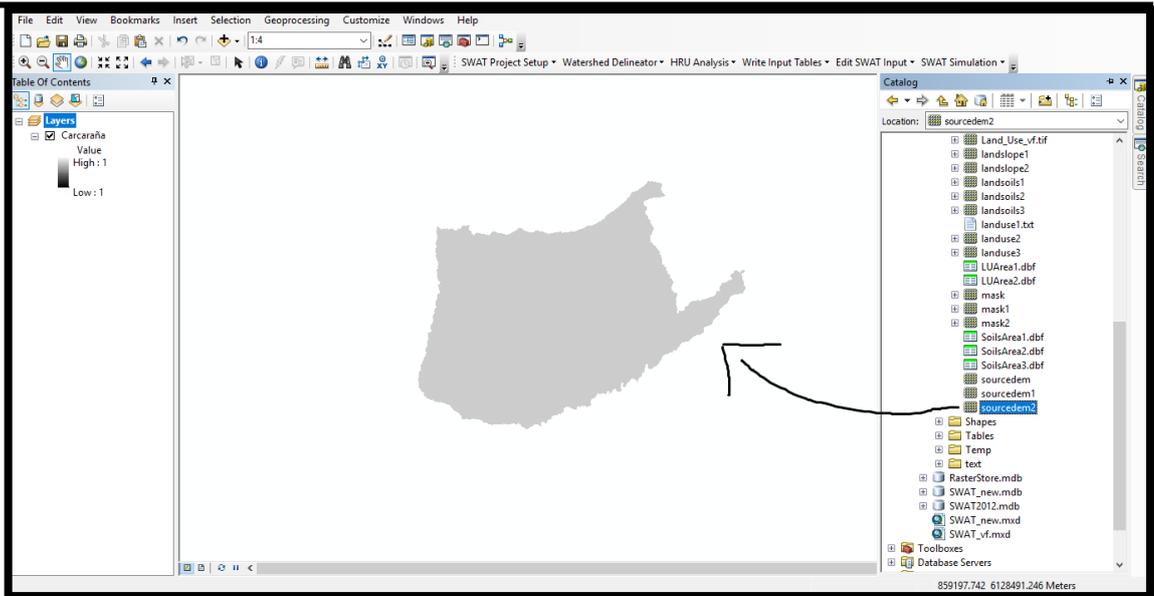
Al finalizar este paso, debería quedar lo siguiente:



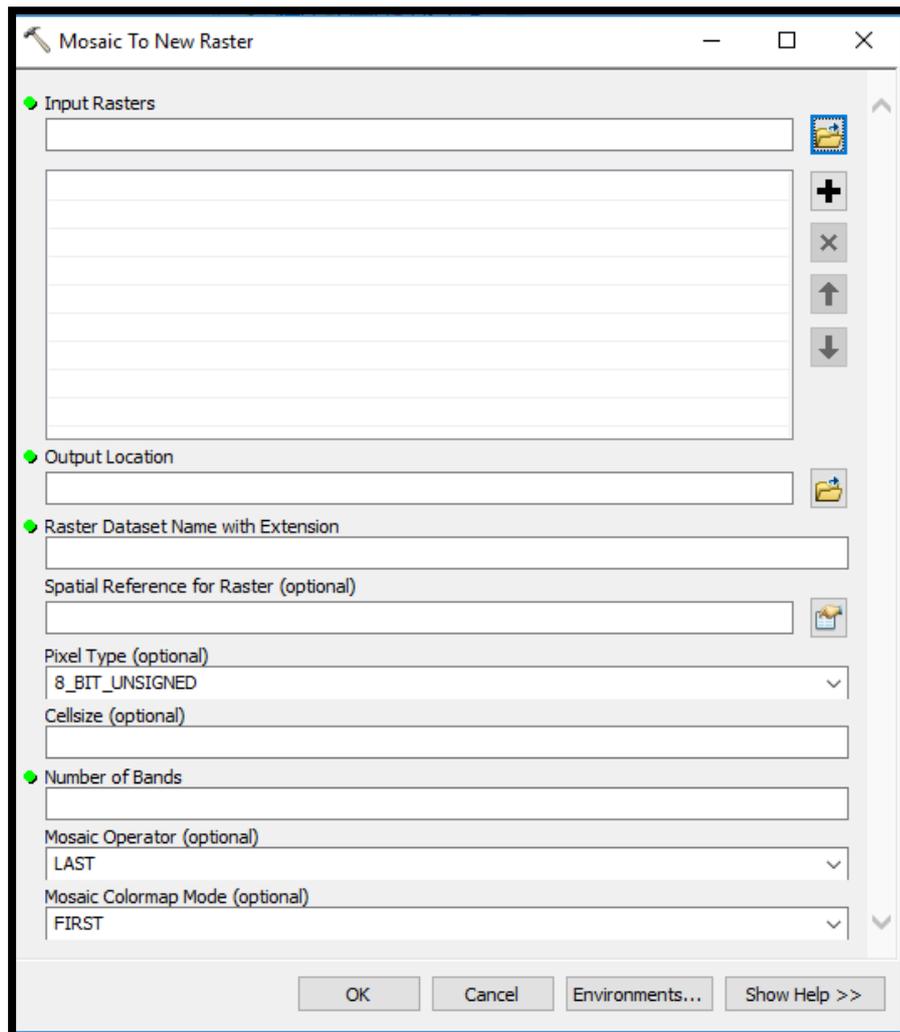
Paso 4: Cargar modelo digital de elevaciones (DEM)

El programa pide que el DEM sea un único raster y que se encuentre en coordenadas UTM proyectadas.

1. Para cargar el DEM, arrastre el archivo “.tif” al espacio de trabajo.



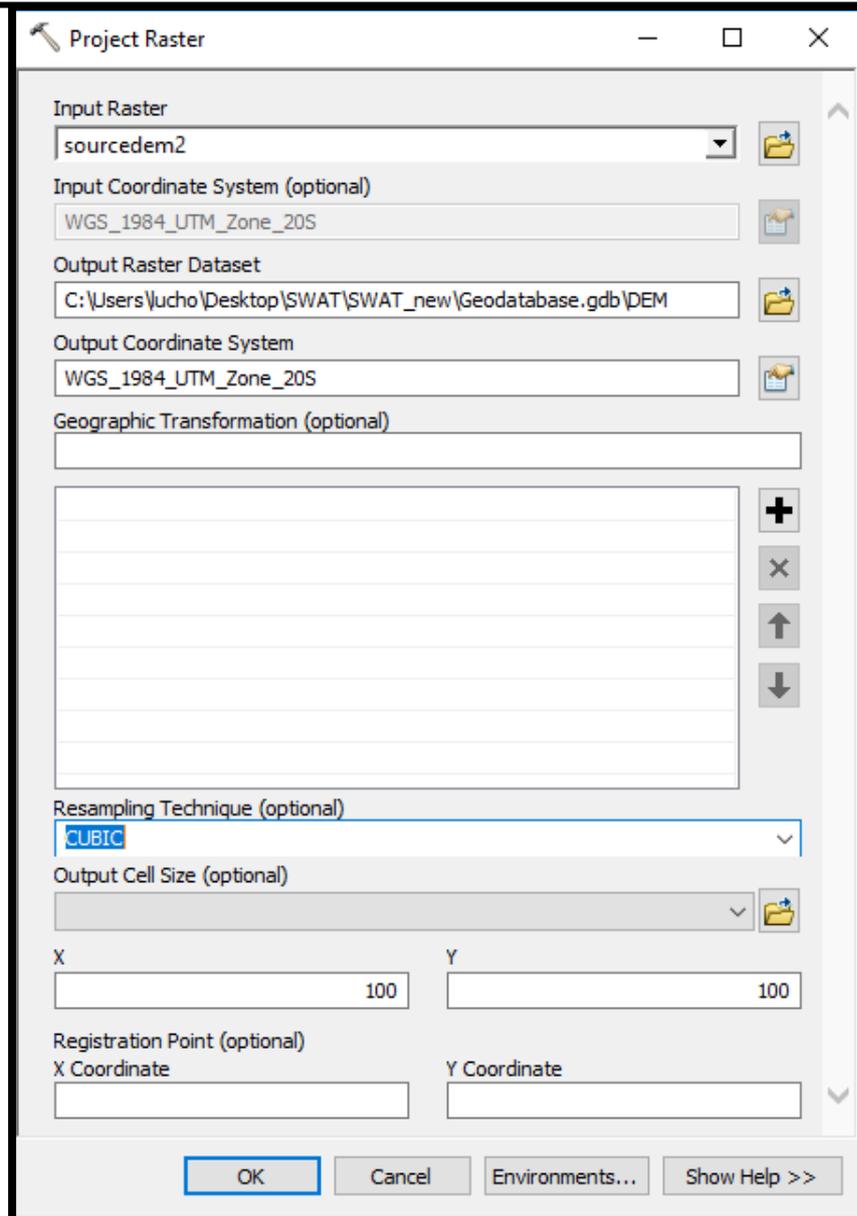
2. Para hacer un único raster a partir de varios, se utiliza la herramienta “*Mosaic to new raster*”.



- a) Aquí debe seleccionar los rasters a unir como *input rasters*.

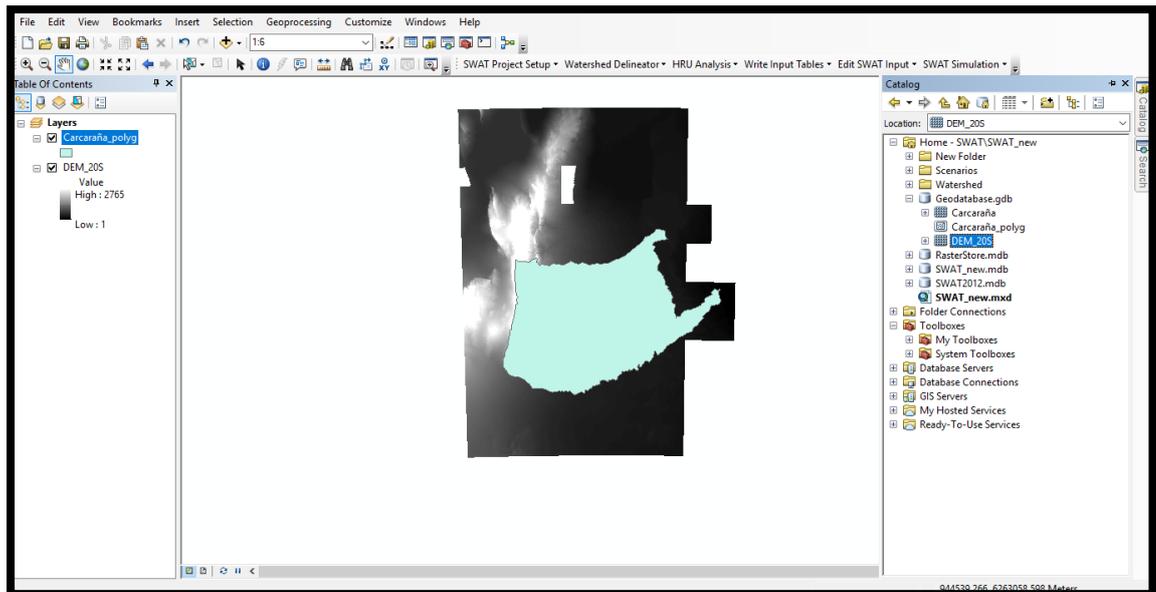


-
- b) Seleccione el archivo “geodatabase.gdb” como *output location*.
 - c) Asigne un nombre a nuestro nuevo raster de salida (*Raster Dataset Name with Extension*).
 - d) En la casilla *Pixel Type*, se recomienda seleccionar el de 16 bit, la opción *SIGNED* o *UNSIGNED* dependerá de si en el modelo digital de elevaciones, se tienen signos de elevación todos positivos o no (para más detalle seleccionar *Show Help >>*).
 - e) Por último, es conveniente asignar un número de bandas igual a 1.
-
3. Para pasar el raster a coordenadas UTM proyectadas se utiliza la herramienta “*Project raster*”.

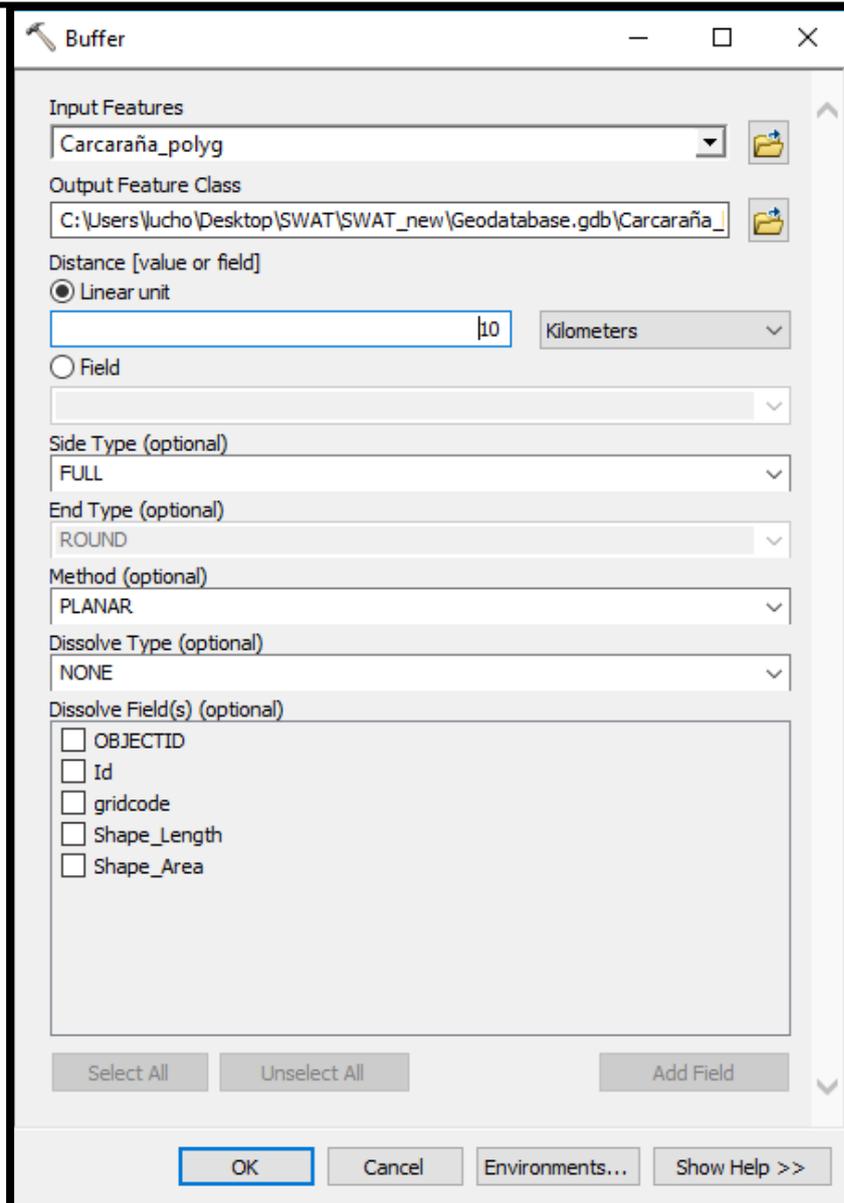


- a) Coloque el raster de entrada con su sistema de referencia como *Input Raster*.
- b) Seleccione el archivo “geodatabase.gdb” como *Output Raster Dataset*.
- c) En el campo *Output Coordinate System* elija el sistema de coordenadas proyectadas UTM20S.
- d) Finalmente, se selecciona el método (*Resampling Technique*), en donde deberá elegir *CUBIC* para elevaciones (datos continuos) y *NEAREST* para uso y tipo de suelo (datos categorizados), para mayor información de esto último ver *Show Help >>*.

Una vez finalizado, debería quedar de la siguiente forma:



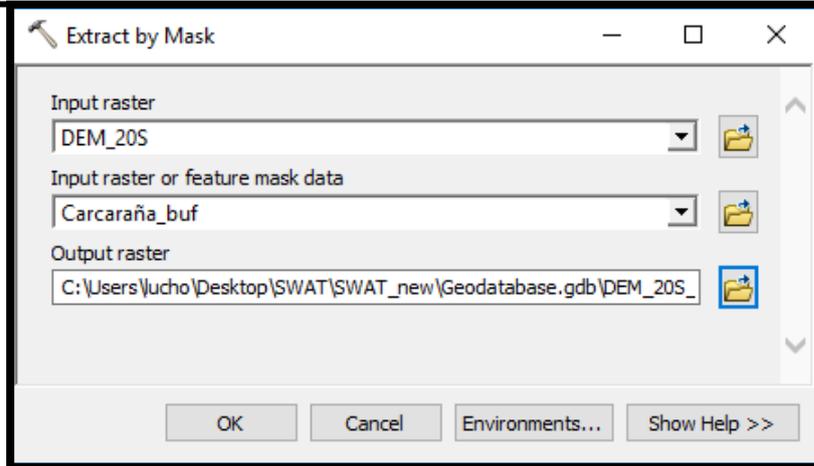
4. Una vez que se tenga el raster del DEM proyectado, conviene recortarlo al tamaño de la cuenca para ahorrar tiempo de procesamiento al calcular la red de flujo. Para ello, deberá asignarle un contorno al archivo “.shp” o “.tif” de la cuenca de aproximadamente 10 kilómetros para salvar los posibles errores en la delimitación de la cuenca. Esto se hace con la herramienta “*Buffer*”.



- a) En *Input Features* coloque el archivo “.shp” de la cuenca.
- b) Guarde la salida en el archivo “geodatabase.gdb” desde *Output Feature Class*.
- c) Por último, elija un contorno de 10 kilómetros en *Distance Linear Unit*.

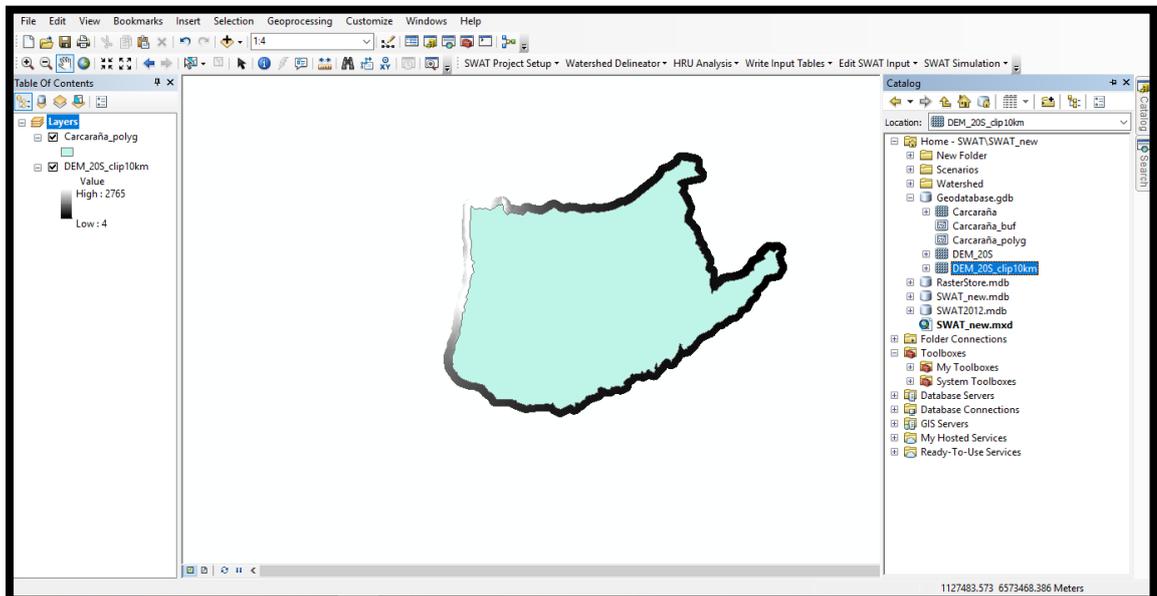
NOTA: En este caso, al tener la cuenca como raster (archivo “.tif”) tuvo que convertirse a polígono (archivo “.shp”) con la herramienta “*Raster to polygon*”.

5. Una vez finalizado el contorno, proceda a recortar el DEM con la herramienta “*Extract by mask*”.



- a) Coloque como *Input raster* al DEM en coordenadas proyectadas.
- b) Seleccione el contorno para el recorte en *Input raster or feature mask data*
- c) Finalmente, guarde la salida en el archivo “geodatabase.gdb” desde *Output raster*.

Al finalizar este paso, debería quedar lo siguiente:



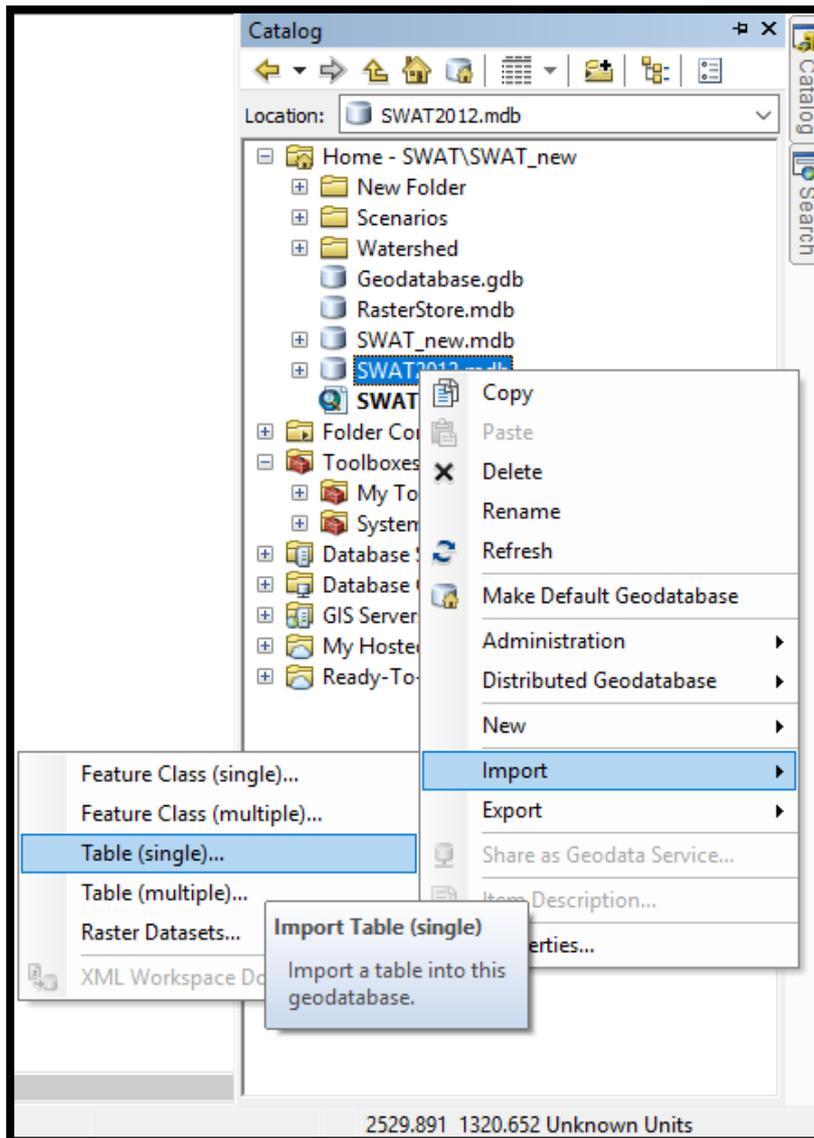
En la imagen se puede ver el polígono de la cuenca (archivo “.shp”) por encima del DEM recortado.

Paso 5: Cargar tipo de suelo y uso de suelo

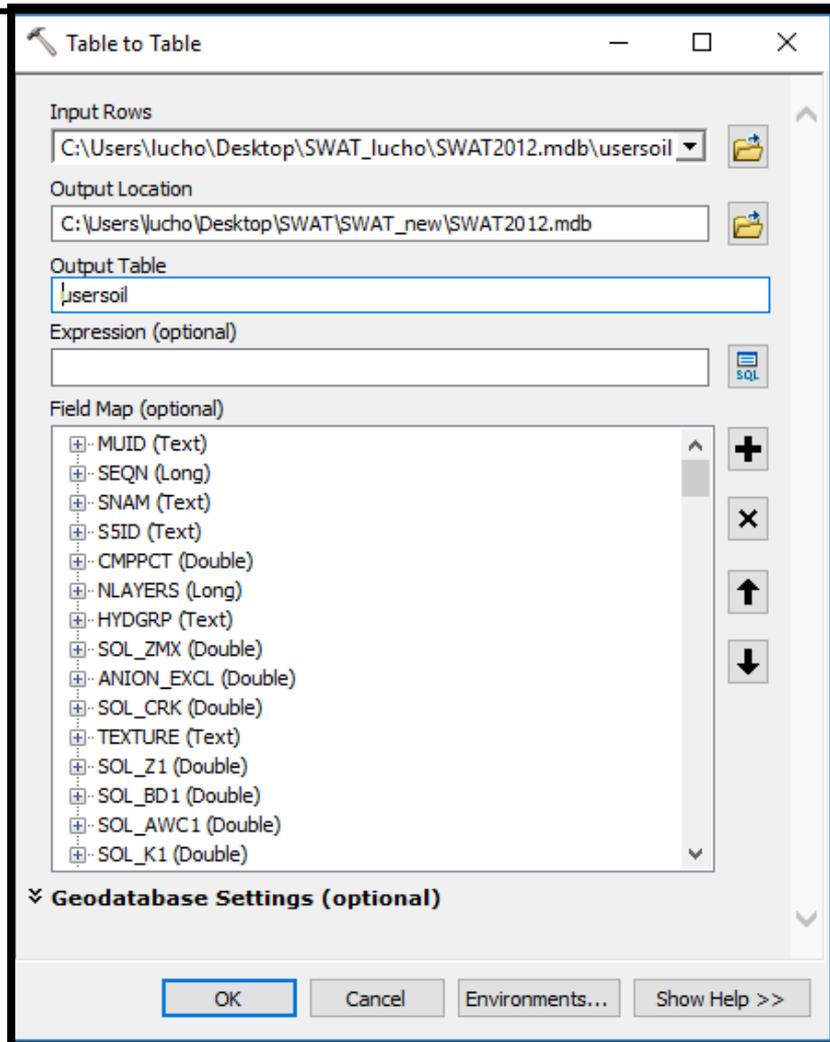
A) Tipo de suelo

En la base de datos “SWAT2012.mdb” creada al crear el proyecto, existe una base de datos se suelos (“usersoil”). Sin embargo, la misma corresponde a tipos de suelo en Estados Unidos, por lo tanto, debe crearse una nueva.

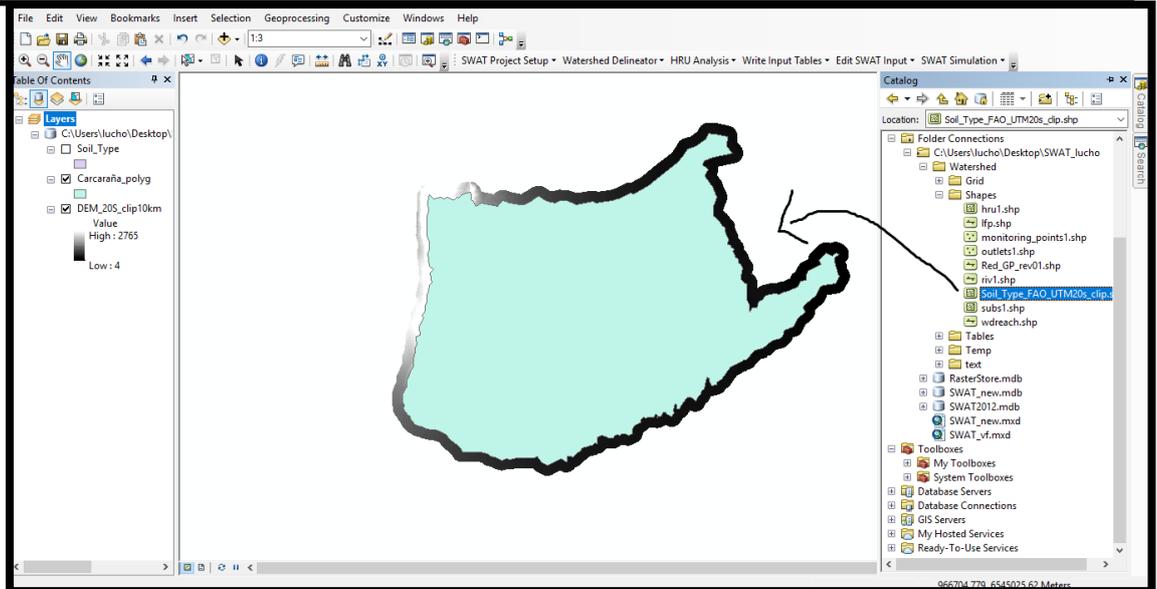
1. Para esto, desde la pestaña *Catalog*, en la base de datos “SWAT2012.mdb”, seleccione *Import* y elija la opción *Table (single)*.



Se abrirá el siguiente recuadro:



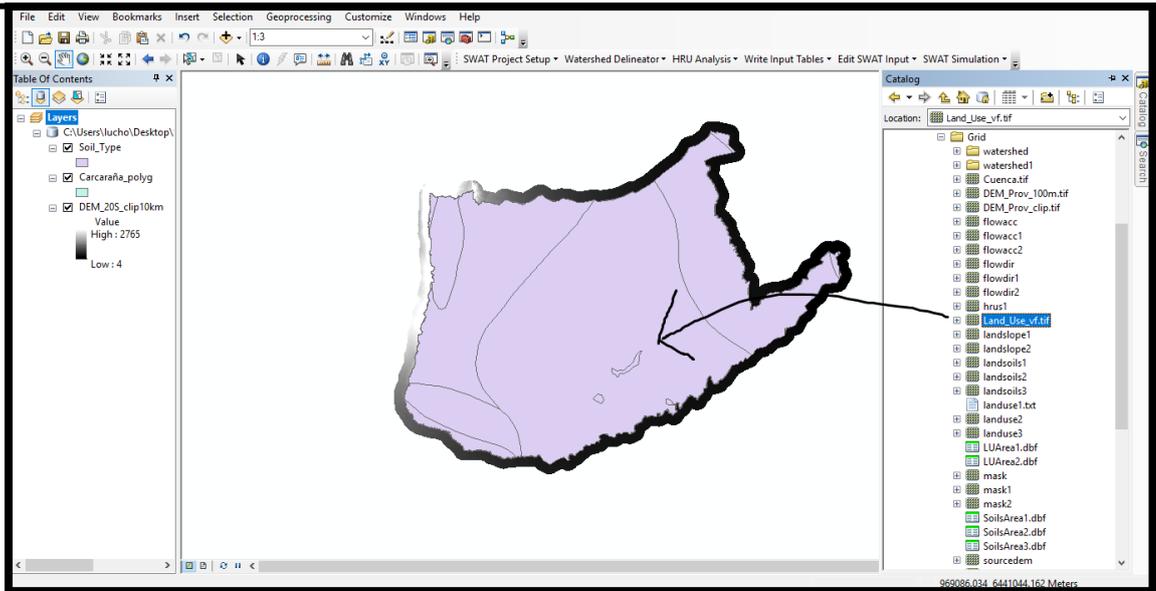
- a) En *Input Rows* coloque el archivo “.mdb” con los tipos de suelo proporcionados por FAO.
 - b) Guarde la salida en la base de datos “SWAT2012.mdb” con el nombre “usersoil”.
2. Luego, cargue al espacio de trabajo en ArcMap, el raster (archivo “.tif”) con los distintos tipos de suelo proporcionados por FAO.



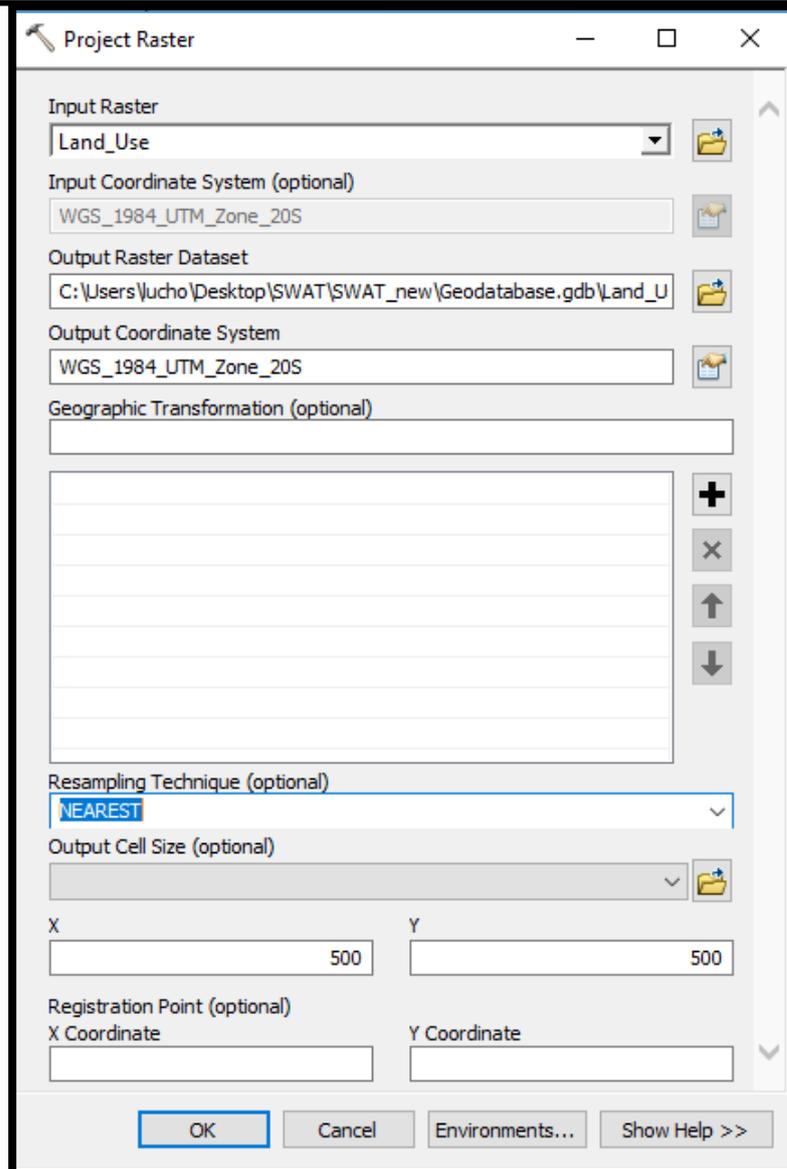
3. En este caso, ya se tenía recortado a la forma de la cuenca, de no ser así puede recortarse de la misma forma que se hizo con el DEM, utilizando la herramienta “*Extract by mask*” y el contorno de la cuenca creado con la herramienta “*Buffer*”.
4. Al igual que el DEM, el mapa de tipos de suelos debe estar en el sistema de coordenadas proyectadas UTM-20S, se hace de igual forma con la herramienta “*Project raster*”. En este caso, ya se lo tenía proyectado, por lo que no fue necesario.

B) Uso de suelo

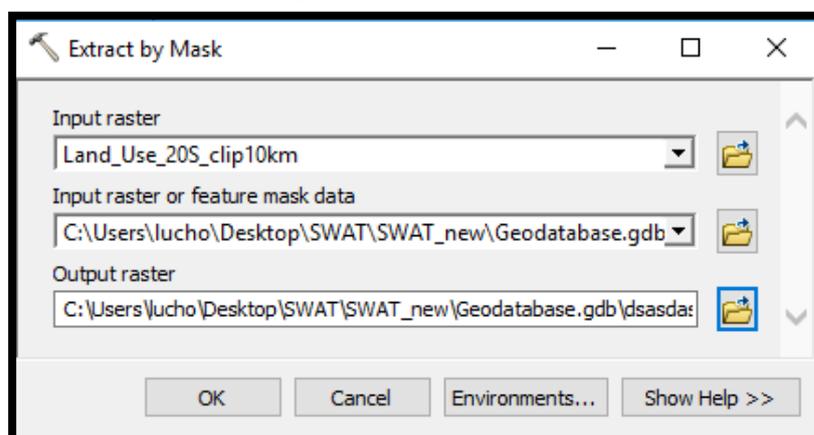
1. En primer lugar, debe cargar el archivo de uso de suelo proporcionado por INTA al espacio de trabajo.



2. Al igual que el DEM, el mapa de uso de suelo debe pasarse a coordenadas proyectadas UTM-20S con la herramienta “*Project raster*”.

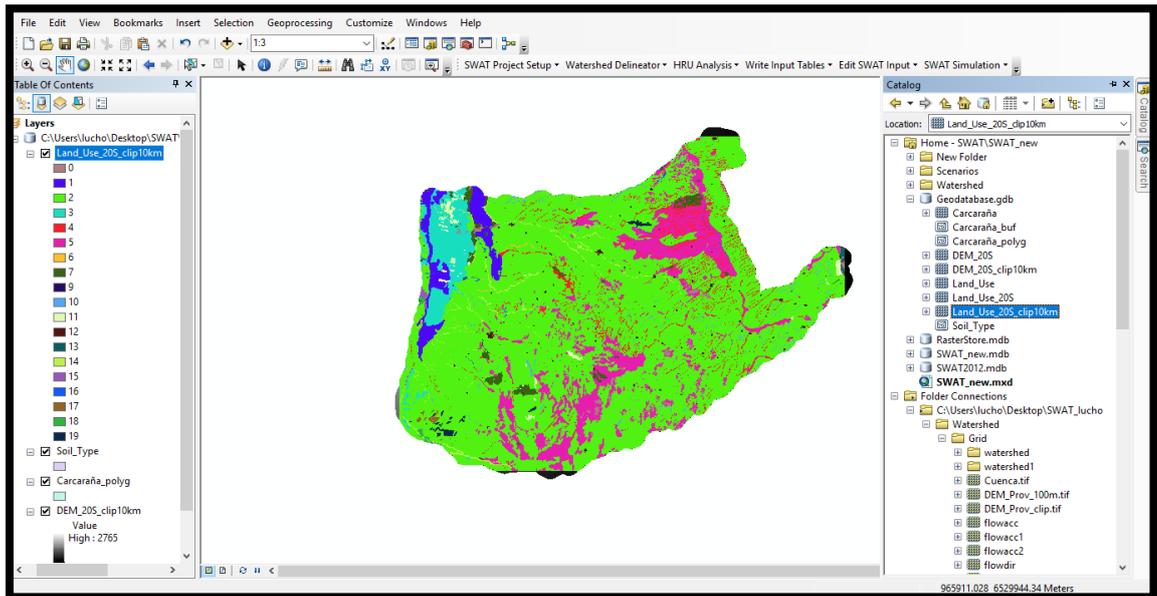


3. Para mayor comodidad, se puede recortar el mapa de uso de suelo con el contorno (*buffer*) realizado previamente. Esto se hace con la herramienta “*Extract by mask*” de la forma descrita anteriormente.



NOTA: Recordar guardar todos los mapas en el archivo “geodatabase.gdb”.

Al finalizar este proceso quedaría lo siguiente:

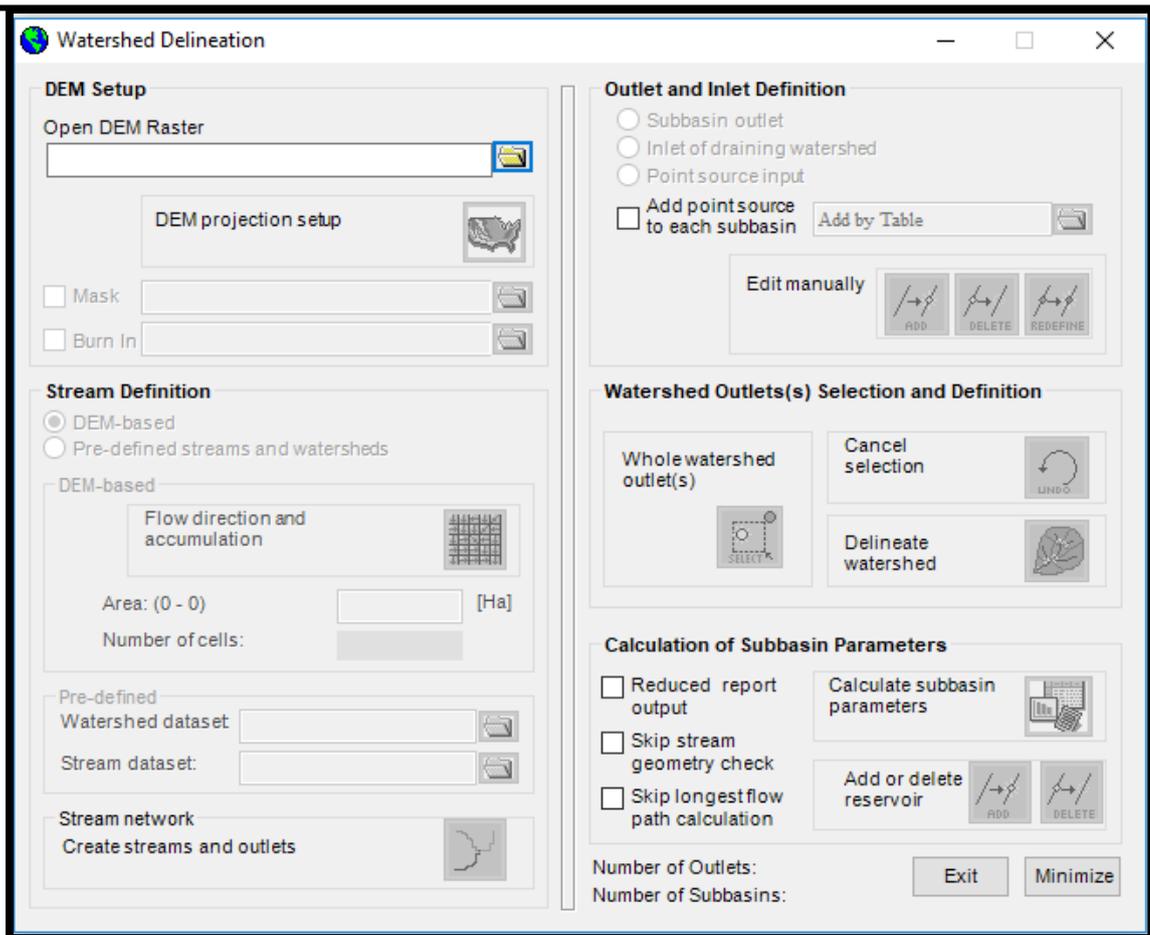


En la imagen anterior puede verse el mapa de usos de suelo en coordenadas proyectadas, recortado según el contorno de 10km de la cuenca.

Paso 6: Delimitación de la cuenca



En la pestaña *Watershed Delineator* de la barra de herramientas de ArcSWAT, seleccione la opción *Watershed Automatic Delineation* y aparecerá la siguiente ventana:



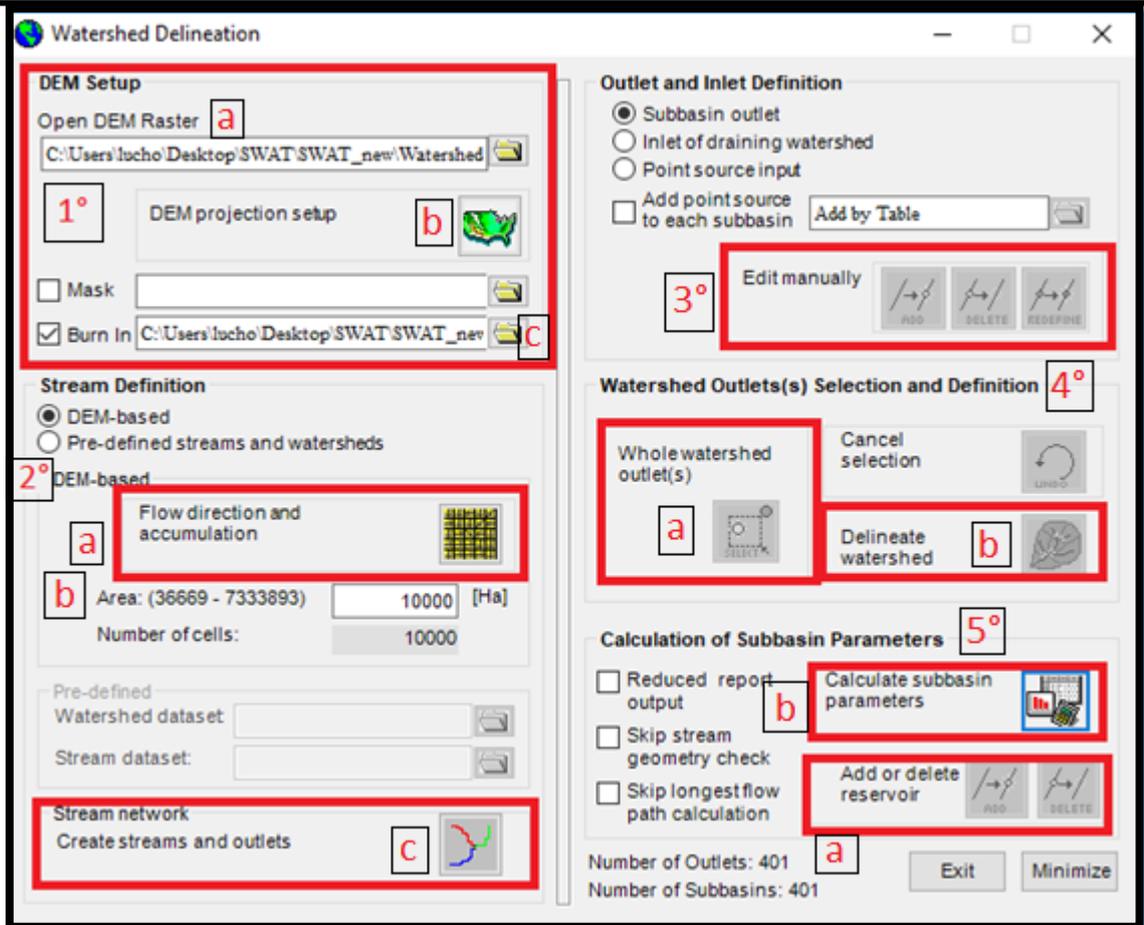
1. Configuración del DEM (*Dem Setup*):

- Aquí cargue el raster del modelo digital de elevaciones.
- Seleccione las unidades en X, Y, Z desde *DEM projection setup*.
- En el caso de contar con un archivo “.shp” con los ríos principales de la cuenca, agréguelo en la sección *Burn In* para que el programa lo considere al momento de calcular la red de drenaje.

2. Definición de corriente (*Stream Definition*):

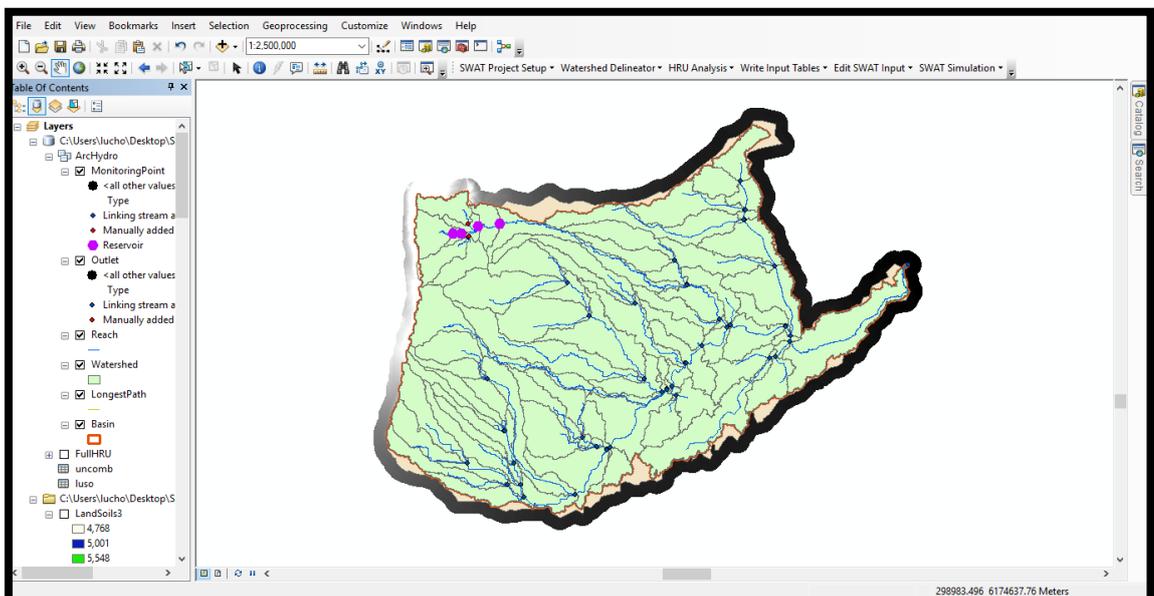
- Luego de almacenado el DEM, presione el botón junto a *Flow direction and accumulation* para que el programa realice los comandos “fill sink”, “flow direction” y “flow accumulation”.
- Una vez que estos comandos se ejecuten correctamente, se activará la caja de texto *Area* y digite en ella el área en hectáreas mínima para cada subcuenca. Mientras mayor sea este número, menor será la cantidad de subcuencas y viceversa.

-
- c) Finalmente, presione el botón al lado de *Create streams and outlets* para calcular los ríos.
 3. Definición de entrada y salida (*Outlet and Inlet Definition*): en esta sección podrá agregar, eliminar o redefinir los puntos de entrada y drenaje. En el caso de que el punto de captación de la cuenca no se haya cargado correctamente, podemos asignarlo manualmente desde la opción *Edit Manually – Add*. Luego nos permitirá seleccionar el punto de captación a partir del DEM.
 4. Definición y selección de salidas de la cuenca (*Watershed Outlets Selection and Definition*):
 - a) Aquí podrá seleccionar el punto de salida de toda la cuenca y
 - b) delimitar la cuenca hidrográfica presionando el botón al lado de *Delineate watershed*.
 5. Cálculo de parámetros de subcuenca (*Calculation of subbasin parameters*): esta sección contiene funciones para el cálculo de las características geomorfológicas de las subcuencas y para definir la ubicación de embalses en la cuenca.
 - a) Desde la opción *Add or delete reservoir*, podrá agregar la ubicación de los distintos embalses.
 - b) Luego, proceda a calcular los parámetros geomorfológicos de cada subcuenca y el tramo de río principal.



Al finalizar este proceso, puede verse el archivo de texto con los parámetros de la configuración geomorfológica de la cuenca desde la opción *Watershed report* en la pestaña *Watershed delineator*. Aquí podrá tener acceso al reporte topográfico de cada una de las subcuencas.

Una vez concluido este paso se tendría lo siguiente:



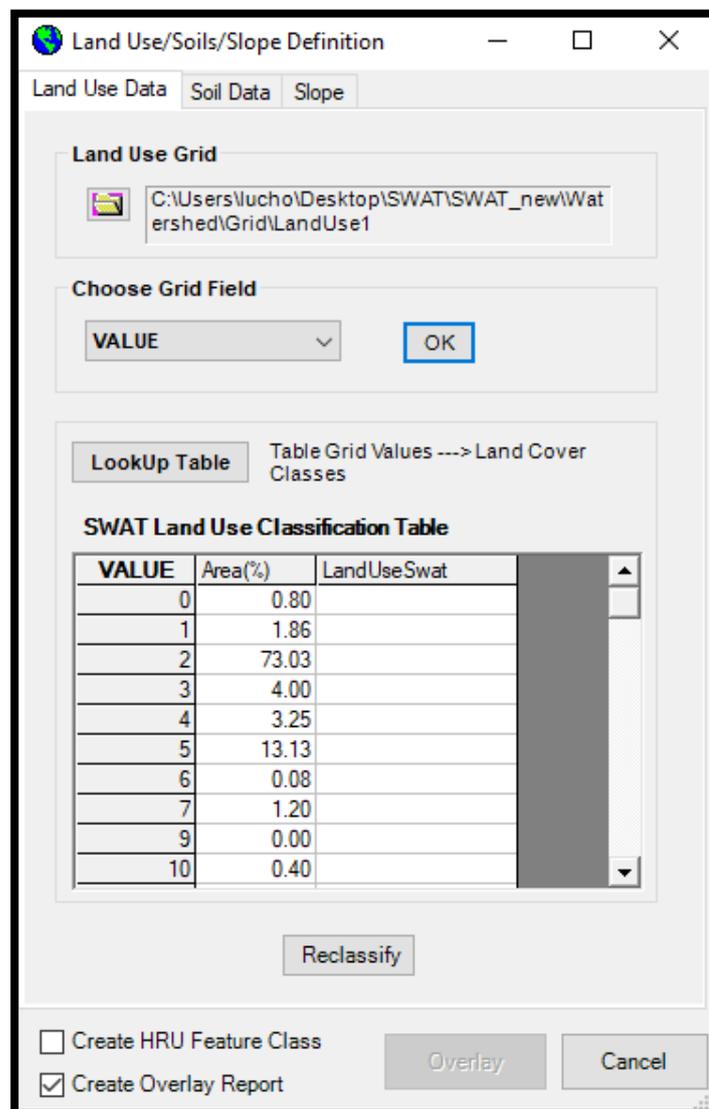
En la imagen previa puede verse la cuenca delimitada por el programa con sus respectivas subcuencas y red de drenaje.

Paso 7: Análisis de HRU

SWAT Project Setup ▾ Watershed Delineator ▾ **HRU Analysis ▾** Write Input Tables ▾ Edit SWAT Input ▾ SWAT Simulation ▾

Desde la pestaña *HRU Analysis* podemos definir el uso de suelo, tipo de suelo, pendiente y las unidades de respuesta hidrológica (HRUs).

1. Definición de uso de suelo (*Land Use Definition*):



- a) En la sección *Land Use Grid* deberá agregar el raster de uso de suelo cargado previamente.

- b) En el campo *Choose Grid Field* seleccione la opción *VALUE* (este es el campo que tiene valores).
- c) Finalmente debe cargar la tabla de equivalencias de uso de suelo. Para ello oprimimos el botón *LookUp Table*, luego vaya a *User table* y busque el archivo de texto en el disco con las equivalencias. Este archivo debe verse de la siguiente manera:

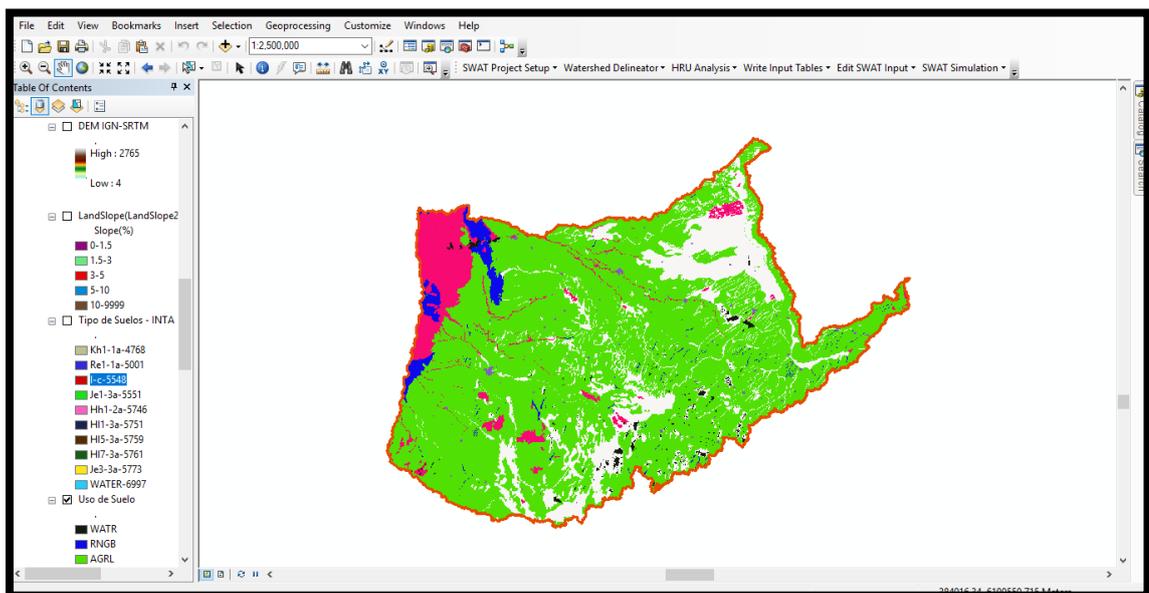
```

"Value", "landuse"
0,WATR
1,RNGB
2,AGRL
3,FRST
4,WETF
5,WETF
6,AGRL
7,FRST
8,RNGB
9,AGRL
10,RNGB
11,FRST
12,URHD
13,AGRL
14,FRST
15,AGRL

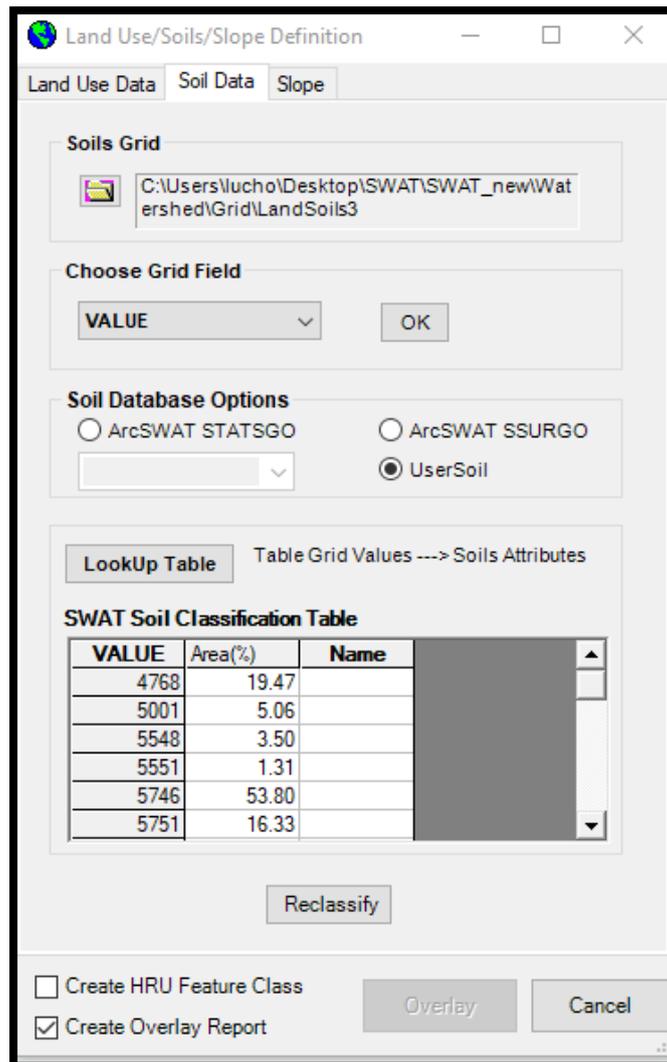
```

- d) Una vez cargada la tabla de equivalencias, reclasifique los usos de suelo con el botón *Reclassify*.

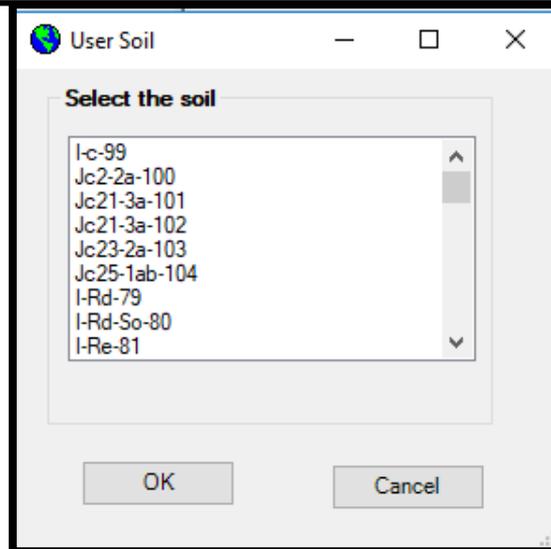
Finalizado este proceso, podremos observar los distintos usos de suelo dentro de la cuenca en forma gráfica:



2. Definición de tipo de suelo (*Soil Definition*):

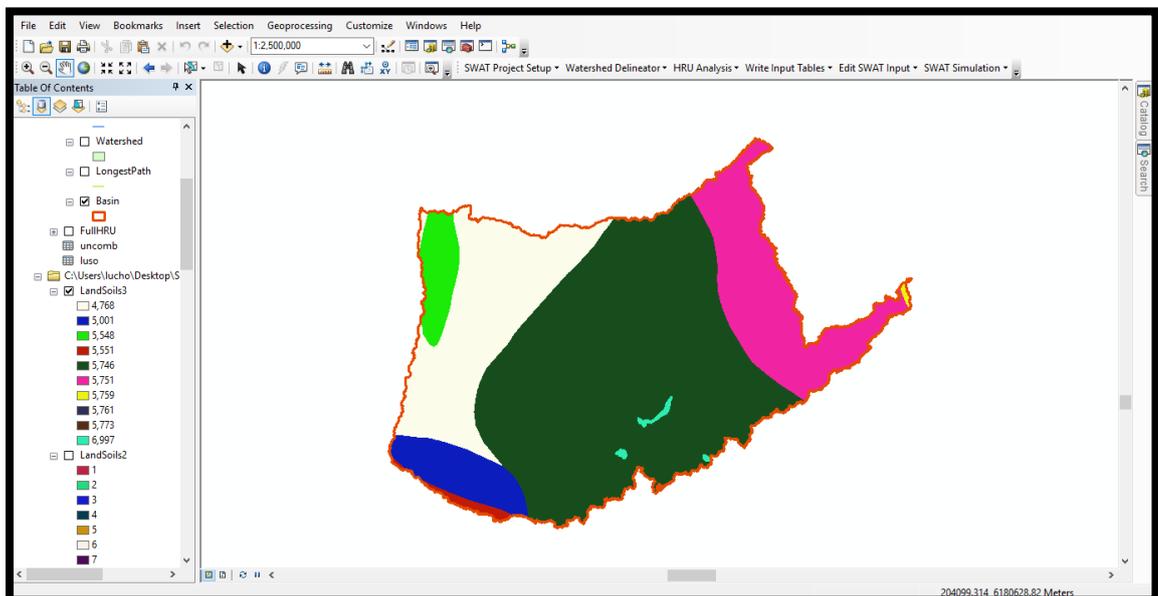


- Agregue en el campo *Soils Grid*, el raster de tipos de suelos previamente cargado.
- En la caja de texto *Choose Grid Field* seleccione nuevamente *VALUE*.
- En *Soil Database Options* seleccione la base de datos cargada anteriormente como "usersoil".
- Finalmente, le deberá asignar el tipo de suelo que corresponde a cada valor en forma manual. Para esto, clickee en cada uno de los campos de la columna "*Name*" y aparecerá la siguiente ventana:

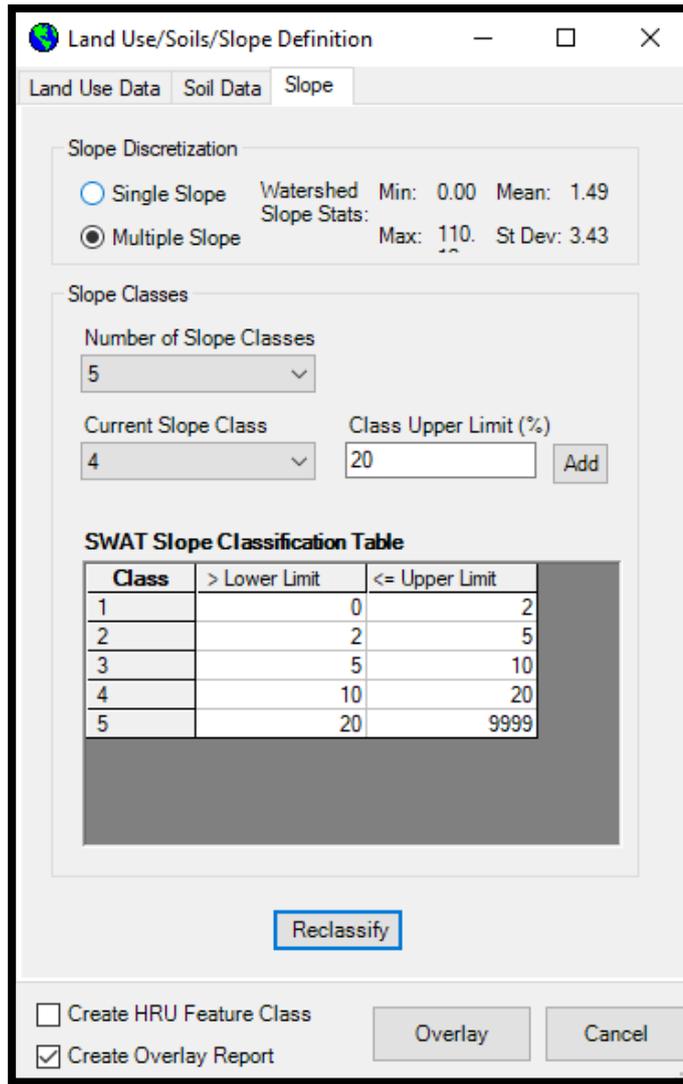


- e) A continuación, el procedimiento consiste en hacer coincidir el último número (de 4 cifras en este caso) de cada tipo de suelo con los números de la columna “VALUE”.
- f) Al finalizar, reclasifique los tipos de suelo apretando el botón “Reclassify”.

Concluida esta etapa, podrá visualizar en el área de trabajo la cuenca con los distintos tipos de suelo.



3. Definición de pendiente (*Slope Definition*):

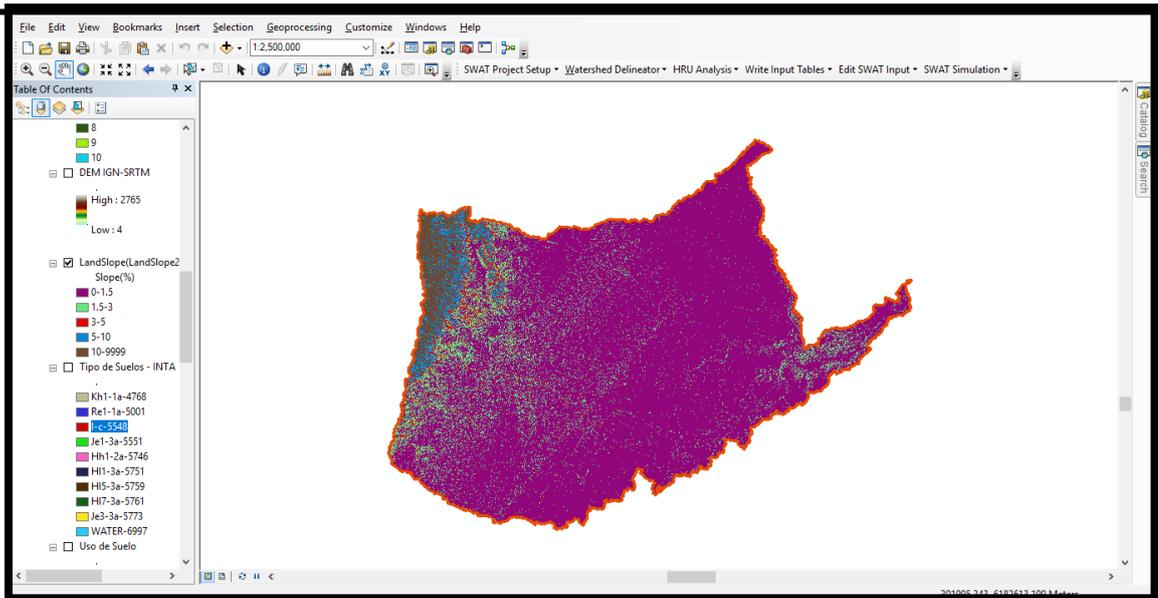


SWAT Slope Classification Table

Class	> Lower Limit	<= Upper Limit
1	0	2
2	2	5
3	5	10
4	10	20
5	20	9999

- El programa calcula automáticamente las pendientes, escoja la opción *Multiple* dentro de *Slope Discretization*.
- Especifique la cantidad de categorías deseadas (máximo 5) en el cuadro *Slope Classes*.
- Asigne los límites entre los cuales variará cada categoría o clase en la tabla de clasificación (*SWAT Slope Classification Table*).

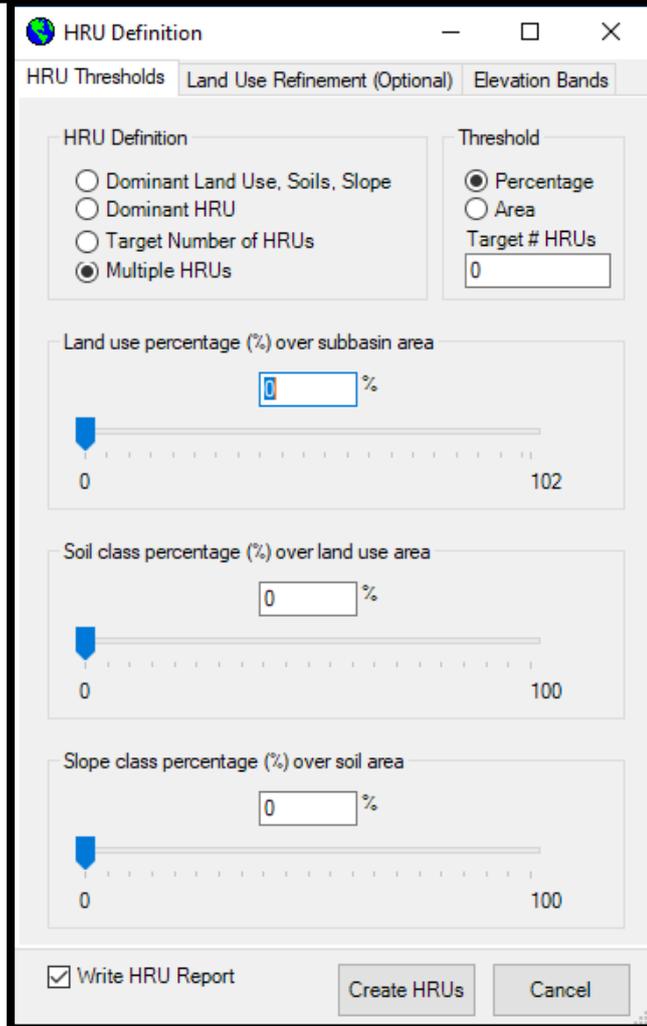
Al finalizar, se podrán ver las distintas clases de pendientes distribuidas en toda la cuenca:



4. Para crear los HRU, tilde la opción *Create HRU Feature Class* y luego apriete *Overlay*.

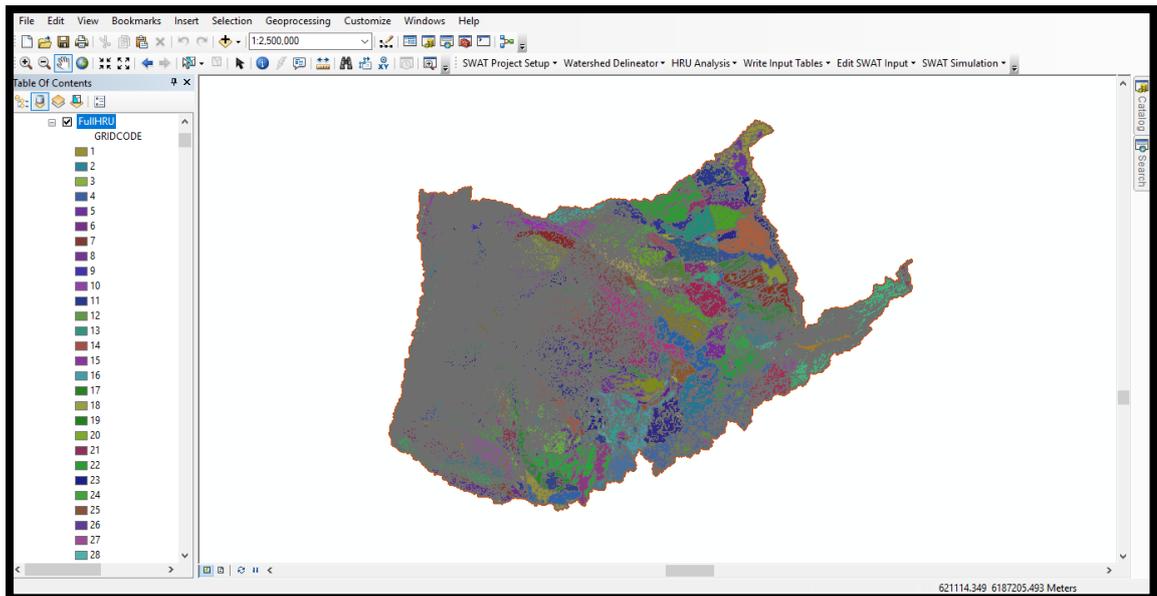


5. Hasta aquí se han creado las unidades de respuesta hidrológica pero no han sido definidas, proceda a definir las en la opción *HRU Definition* dentro de la pestaña *HRU Analysis*.



- a) Aquí seleccione la opción *Múltiples HRU's*.
 - b) Es posible establecer prioridades para definir los HRU's si así lo desea, en este caso, se dejó por defecto, sin asignar prioridades.
6. Dentro de la pestaña *HRU Analysis* de la barra de herramientas de ArcSWAT, también puede obtener el reporte de unidades de respuesta hidrológica (*HRU Analysis Report*) en donde encontrará información acerca de la distribución de los distintos usos de suelo, tipos de suelo y pendientes en toda la cuenca.

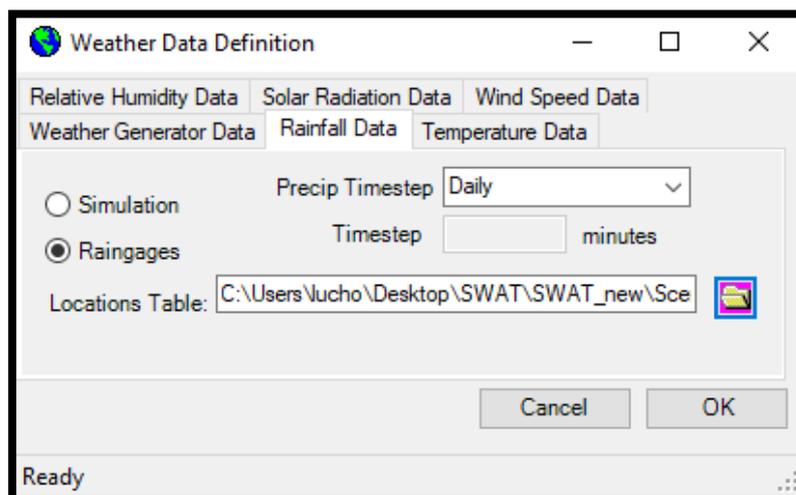
Al finalizar este paso, podrá ver la cuenca con todas las unidades de respuesta hidrológicas calculadas:



Paso 8: Cargar estaciones y datos de precipitación



1. Ingrese a la opción *Weather Stations* dentro de la pestaña *Write Input Tables*. Le aparecerá la siguiente ventana:

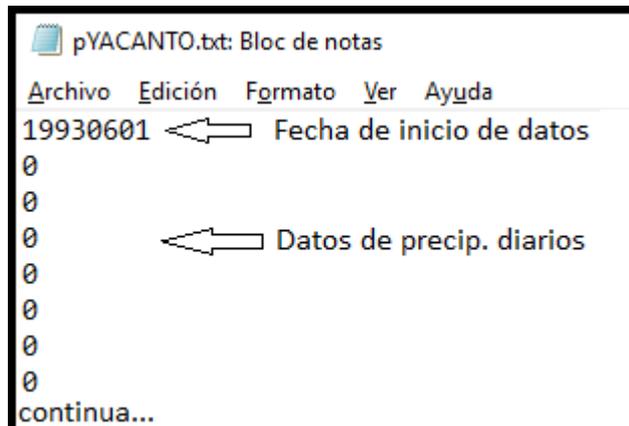


2. En la pestaña *Weather Generator Data*, elija el motor meteorológico de generación de datos.

3. Ingrese a *Rainfall Data* y cargue la tabla con las localizaciones de las estaciones de medición de precipitación. Esta tabla deberá tener el siguiente aspecto:

```
ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, pCERROBLANCO, -32.13, -64.92, 2127
2, pPAMPICHUELA, -32.14, -64.82, 1185
3, pYACANTO, -32.10, -64.75, 1135
4, pLAFLOIDA, -32.23, -64.78, 1090
5, pLUTTI, -32.30, -64.73, 1055
6, pLAPUENTE, -32.33, -64.78, 1270
7, pELMANZANO, -32.37, -64.88, 1800
8, pLABOULAYE, -34.08, -63.20, 137
9, pMARCOSJUAREZ, -32.72, -62.11, 110
10, pRAFAELA, -31.18, -61.50, 100
11, pRIOCUARTO, -33.12, -64.17, 379
12, pVILLAMERCEDES, -33.72, -65.48, 515
```

En la carpeta en donde guarde la tabla anterior, deberá tener un archivo “.txt” (ejemplo: pYACANTO.txt) para cada una de las estaciones con los datos de precipitación observados. Al haber seleccionado un paso de tiempo diario, dichos archivos serán de la siguiente forma:



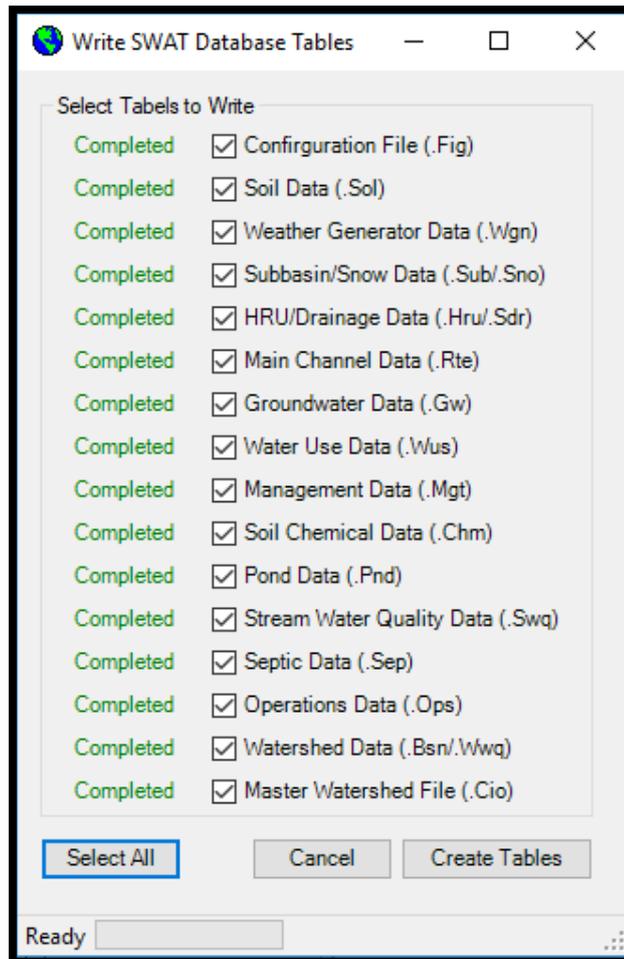
```
pYACANTO.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
19930601 ← Fecha de inicio de datos
0
0
0 ← Datos de precip. diarios
0
0
0
0
continua...
```

4. En el caso que disponga información de temperatura, radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento; puede cargar las correspondientes tablas. En caso contrario deje la opción *Simulation* activada, para que el programa se encargue de simular dichos datos.

Paso 9: Escribir base de datos



1. Ingrese a la opción *Write SWAT Input Tables* dentro de la pestaña *Write Input Tables*. Se abrirá la siguiente ventana:

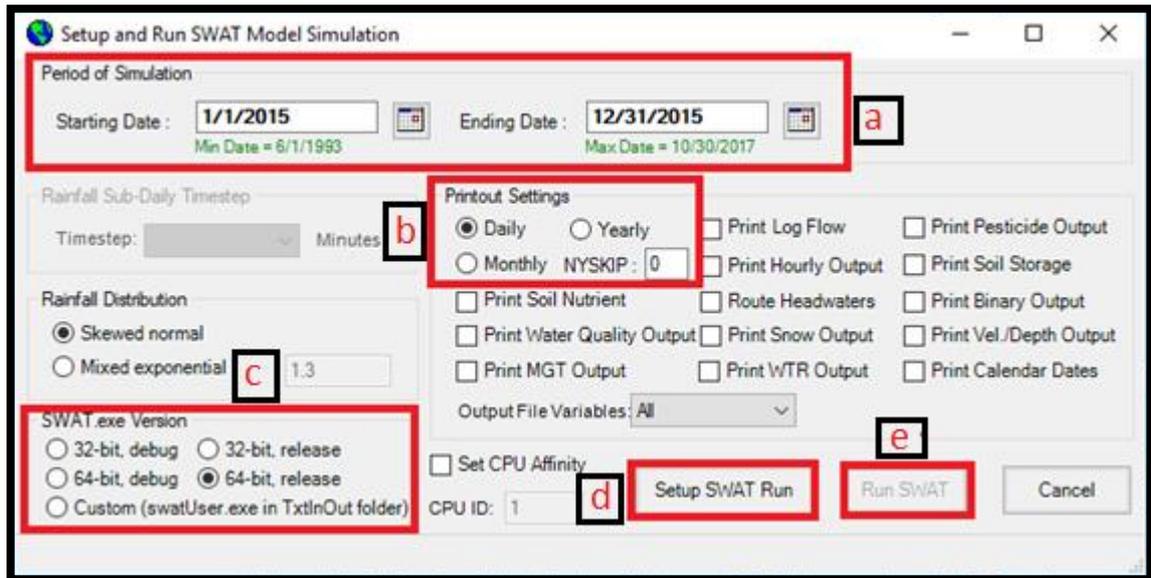


2. Seleccione todas las tablas a escribir.
3. Cree las tablas oprimiendo el botón *Create Tables*. Al finaliza el proceso, podrá visualizar la leyenda *Completed* al lado de cada una de las tablas seleccionadas.

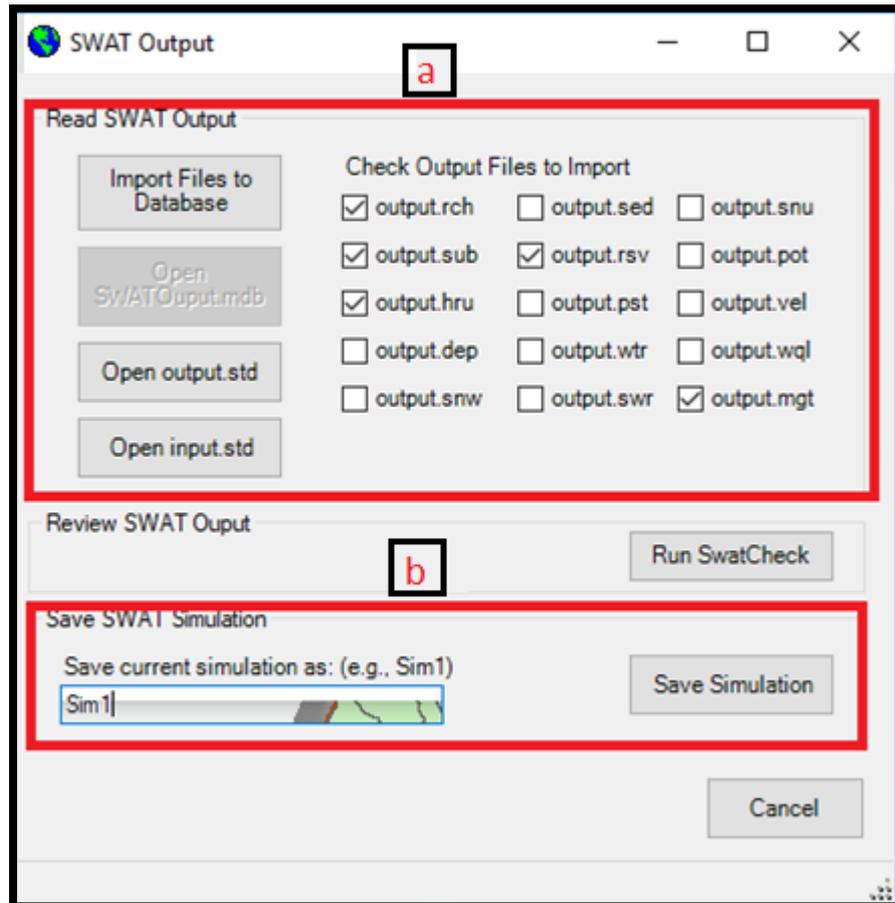
Paso 10: Correr modelo SWAT y guardar simulación

SWAT Project Setup ▾ Watershed Delineator ▾ HRU Analysis ▾ Write Input Tables ▾ Edit SWAT Input ▾ **SWAT Simulation ▾**

1. Dentro de la pestaña *SWAT Simulation*, seleccione *Run SWAT*. Aparecerá la siguiente ventana:



- a) Seleccione el período de simulación y verifique que dentro del mismo se tengan datos de precipitación.
 - b) Seleccione el paso de tiempo para los datos de salida (Diario, Mensual o Anual). Establezca el número de años a emplear como periodo de calentamiento en *NYSKIP*.
 - c) Elija la versión de *SWAT.exe* que dispone en su computadora.
 - d) Oprima el botón *Setup SWAT Run* para guardar los cambios realizados.
 - e) Una vez configurado lo anterior, se activará el botón *Run SWAT*, oprímalo para correr el modelo en SWAT.
2. Finalizada la simulación, puede guardarla entrando a la opción *Read SWAT Output*, desde la pestaña *SWAT Simulation*. Se abrirá la siguiente ventana:



- a) Seleccione los archivos de salida que desea importar a la base de datos, luego oprima el botón *Import Files to Database*.
- b) Al finalizar la importación guarde la simulación realizada.

NOTA: el programa generará una carpeta llamada *Scenarios* dentro de la carpeta de trabajo. Allí encontrará la simulación guardada.