

Maestría en Ingeniería Civil

Modelo Hidrológico Distribuido Basado en Procesos Hidrológicos TAC^{D2}

Aplicaciones a las cuencas de Brugga y de Coello

Nicolás Antonio López Rozo

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019



Modelo Hidrológico Distribuido Basado en Procesos Hidrológicos TAC^D2

Aplicaciones a las cuencas de Brugga y de Coello

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos
Hidráulicos y Medio Ambiente

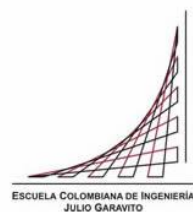
PhD. Germán Ricardo Santos Granados

Director

PhD. Gerald Augusto Corzo Pérez

Codirector

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019



La tesis de maestría titulada “Modelo Hidrológico Distribuido Basado en Procesos Hidrológicos TAC^{D2}. Aplicaciones a las cuencas de Brugga y de Coello”, presentada por Nicolás Antonio López Rozo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Germán Eduardo Acero Riveros

Jurado

Gerald Augusto Corzo Pérez

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019

Dedicatoria

A mi familia: Mi papá Víctor, mi mamá Mercedes, mi tía Flor y mi hermana Marcela. Sin su apoyo, paciencia, amor y ayuda desde que *tengo* memoria, nada de *mi* pasado, presente o futuro sería realidad, ¡mucho menos *este documento!*

(fue a propósito)

Agradecimientos

A mi familia, que vio todo el esfuerzo de este título y nunca dudaron en apoyarme, y quienes estarán siempre como lo más importante en mi vida.

A Mónica Vargas, Andrés Otálora, Ricardo Aguilar, Santiago Duarte, Ximena Lemaitre, Yesica Rodríguez y Alejandro Gómez, quienes acompañaron mi aprendizaje de la hidrología y apoyaron en algún momento el desarrollo de este trabajo, a veces sin notarlo.

Al doctor Germán Ricardo Santos Granados, mi director de trabajo de grado, profesor, guía, ejemplo y amigo, a quien le debo gran parte de lo que he logrado con este trabajo de grado.

A mis profesores Germán Eduardo Acero Riveros y Gerald Augusto Corzo Pérez, quienes revisaron este documento y fueron jurados del mismo, y cuyos aportes fueron importantes en el desarrollo de este trabajo.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que permitió mi desarrollo como profesor en paralelo al desarrollo de este trabajo y que me dio todas las bases y herramientas necesarias para alcanzar esta meta a través de los profesores de pregrado y posgrado que guiaron mi camino y de sus instalaciones.

A mis estudiantes, quienes me vieron crecer como persona y con quienes me disculpo por ocuparme en este trabajo en vez de entregar pronto las notas.

A todas aquellas personas que he conocido y que, sin ellas saberlo, me han llevado a ser lo que soy en este momento (el espacio no alcanza para mencionarlas a todas).

Resumen

Los procesos hidrológicos de una cuenca hidrográfica deben ser entendidos de manera adecuada como fase preliminar para la concepción y ejecución de planes, programas y proyectos enfocados a la óptima utilización del potencial hídrico y productivo de una cuenca. Para este fin, se suelen crear modelos hidrológicos que representen las principales variables de la cuenca mediante diferentes metodologías.

La modelación hidrológica, al tratar la tarea de predecir el comportamiento de una cuenca, debe afrontar varios retos, entre los cuales se encuentran: escoger el modelo que mejor representa los fenómenos ocurridos en una cuenca determinada; tener en cuenta la posible incertidumbre sobre los datos de entrada; escoger los valores adecuados para los parámetros del modelo; seleccionar una función objetivo adecuada para la calibración. En el presente trabajo se desarrolló un nuevo modelo hidrológico distribuido basado en procesos hidrológicos, con el fin de permitir una representación diferente de la hidrología de una cuenca que pueda ser útil para ciertas cuencas.

El modelo hidrológico TAC^D requirió ser actualizado mediante el Framework para Python de PCRaster. Posteriormente, se verificó la veracidad de esta nueva versión actualizada con la versión original, mediante estudio de la cuenca original, la cuenca de Brugga, en el suroeste de Alemania. Las pruebas de validación mostraron que la versión actualizada (TAC^{D2}) representa fielmente al modelo original (TAC^D), con diferencias mínimas. Luego se realizó la adaptación del modelo hidrológico distribuido TAC^{D2} a la información disponible en la cuenca del río Coello, sobre la cual se llevó a cabo un proceso de calibración.

Los resultados de la calibración fueron exitosos pues mostraron que, para la serie de caudales observados en la estación Payandé de la cuenca de Coello, el modelo representó aceptablemente el caudal observado conservando la tendencia de la serie. No obstante, el costo computacional del modelo no permitió validar diferentes métricas de bondad de ajuste o diferentes esquemas de calibración.

Abstract

Hydrological processes of a river basin should be properly understood as a preliminary phase for the design and execution of plans, programs and projects focused on the optimal utilization of the hydraulic and productive potential of a basin. To this end, hydrological models that represent the main variables of the basin are usually created using different methodologies.

Hydrological modelling has to deal with some challenges when trying to forecast the hydrological behavior of a watershed: selecting the model that best represents hydrological events on a specific basin; taking into consideration the possible input data uncertainty; choosing good values for the parameters of the model; selecting an appropriate calibration objective function. In this research a new distributed, process-based hydrological model was developed in order to offer a different approach to represent hydrological behavior of a watershed that might be useful for certain regions.

The hydrological model TAC^D required updating using the PCRaster Python Framework. Subsequently, correctness of this new version was verified with the original version, through the study of the original basin, the Brugga basin, in southwest Germany. The validation tests showed that the updated version (TAC^{D2}) faithfully represents the original model (TAC^D), with minimal differences. Later, the hydrological distributed model TAC^{D2} was adapted to the available information in the Coello river basin, where a calibration process was carried out.

The calibration results were successful as they showed that, for the observed waterflow series in Payandé Station in Coello basin, the model represented the given waterflow measurements acceptably while retaining the trend of the series. Different objective functions or calibration schemes were not carried out due to computational runtime requirements.

Keywords: hydrology, hydrological model, TAC^D, Python

Índice General

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Pregunta Problema a Resolver	1
1.3.	Antecedentes	2
1.4.	Objetivos.....	3
1.5.	Resumen del Documento	3
2.	Modelación Hidrológica	5
2.1.	Clasificación de Modelos Hidrológicos	6
2.2.	Calibración de un Modelo Hidrológico. Funciones Objetivo	8
2.3.	Software de Modelación Hidrológica	9
3.	Modelos TAC y TAC ^D originales	11
4.	Modelo TAC ^{D2}	20
4.1.	Estructura General del Modelo	21
4.2.	Cálculo de la Evapotranspiración Potencial	22
4.3.	Cálculo de Contenido de Nieve	23
4.4.	Cálculo de la Interceptación	24
4.5.	Escorrentía en Zonas Urbanas y Entrada Directa al Cauce	25
4.6.	Generación de Escorrentía en Zonas Saturadas	26
4.7.	Cálculo de la Filtración: Rutina de Suelo.....	26
4.8.	Cálculo de la Escorrentía	27
4.9.	Tránsito Hidráulico en la Corriente	31
4.10.	Parámetros de Inicialización del Modelo	32
5.	Metodología de Trabajo	34

5.1.	Áreas de Estudio: Cuenca del Río Brugga y Cuenca del Río Coello	34
5.2.	Información Recopilada	36
5.3.	Tratamiento de Datos.....	38
5.4.	Adaptación del Software TAC ^D a PCRaster 4.1 en Python: TAC ^{D2}	42
5.5.	Validación del Modelo TAC ^{D2} con la Cuenca de Brugga	48
5.6.	Adaptación y Calibración del Modelo TAC ^{D2} a la Cuenca del Río Coello	52
6.	Conclusiones y Recomendaciones	57
6.1.	Resultados y Conclusiones	57
6.2.	Recomendaciones y Posible Trabajo Futuro	66
	Bibliografía	67
	Anexo 1. Regionalización Hidrológica y Sectorización Hidráulica	71
1.	Fundamentos de Regionalización Hidrológica	71
2.	Metodologías para la Regionalización	71
3.	Fundamentos de Sectorización Hidráulica	73
4.	Metodología de la Sectorización Hidráulica	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados de comparación entre en modelo TAC ^D y el modelo TAC ^{D2}	48
Tabla 2. Información disponible en el IDEAM sobre las estaciones hidrológicas en la cuenca del río Coello.....	55
Tabla 3. Progreso de la calibración.....	55

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Esquema de la topografía de la cuenca del Río Coello. Fuente: Elaboración Propia.....	5
Ilustración 2. Concepto de tanques de la clasificación de regiones y sus relaciones de flujo en una pendiente idealizada. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)	12
Ilustración 3. Instrumentación en la cuenca de Brugga. Fuente: Uhlenbrook, S. (2001).....	13
Ilustración 4. Representación esquemática de la interpolación de la lluvia como combinación del algoritmo Inverse Distance Weighting y la modificación de la precipitación mediante una modificación por la altitud. Traducido y adaptado de (Roser, 2001)	14
Ilustración 5. Red de flujo local de la cuenca de Brugga y representación esquemática de las direcciones de flujo de una celda. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)	16
Ilustración 6. Representación de las dos fases para el flujo de una celda con canal. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)	17
Ilustración 7. Diagrama de flujo de los módulos del modelo TAC ^D con sus relaciones y parámetros (cursiva). Adaptado y traducido de: (Roser, 2001).....	19
Ilustración 8. Conceptualización del contenido de nieve en cada celda. Adaptado de: (Wissmeier, 2005).....	23
Ilustración 9. Conceptualización de la Interceptación de la Precipitación. Fuente: Elaboración Propia	24
Ilustración 10. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 1). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)	28
Ilustración 11. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 2). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)	29
Ilustración 12. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 3). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)	30
Ilustración 13. Cauces principales y modelo de terreno de la cuenca de estudio.....	38
Ilustración 14. Asentamientos poblados e información geológica de composición del suelo.	40
Ilustración 15. Promedio anual de horas de sol por día, en horas. Fuente: Elaboración Propia.	41
Ilustración 16. Estructura de carpetas del modelo TAC ^{D2} . Fuente: Elaboración Propia.	47
Ilustración 17. Gráfica para validación del modelo TAC ^{D2} : Serie SoilMoisture	51
Ilustración 18. Gráfica para validación del modelo TAC ^{D2} : Serie IntPrec	51
Ilustración 19. Gráfica para validación del modelo TAC ^{D2} : Serie ActET	52
Ilustración 20. Gráfica para validación del modelo TAC ^{D2} : Serie EndInterceptET.....	52
Ilustración 21. Ubicación de las estaciones hidrológicas de la zona de estudio. Fuente: Elaboración Propia	54
Ilustración 22. Comparación entre el caudal modelado y el observado en la estación Payandé.....	57
Ilustración 23. Serie de temperatura media de TAC ^{D2} : tsMeanTemp	58
Ilustración 24. Series de evapotranspiración y precipitación interceptada: tsInterceptionET y tsIntPrec	59
Ilustración 25. Evolución de la evapotranspiración efectiva acumulada, para t=12, 24, 47 y 365 días.....	60
Ilustración 26. Series de aporte al cauce de caudal urbano y directo: tsQ_DirectUrban y tsQDirectStream.....	61

Ilustración 27. Mapa de contenido humedad del suelo. Archivo SMMaps.....	62
Ilustración 28. Simplificación de resultados de la generación de escorrentía. Adaptado de: (Roser, 2001)	63
Ilustración 29. Contenido de humedad del suelo. Serie tsSoilMoisture.....	63
Ilustración 30. Flujo desde el tanque inferior. Serie tsQ_LS	64
Ilustración 31. Flujo subterráneo y de las zonas saturadas. Series tsQ_GW y tsQ_SOF	64
Ilustración 32. Entrada de flujo al cauce. Serie tsIntoStream	65

1. Introducción

1.1. Motivación

La necesidad de tomar decisiones respecto al manejo de los recursos hídricos depende en gran medida de la información que se tenga a la mano y de las herramientas disponibles para predicción. Una de estas herramientas es el uso de los modelos hidrológicos, en los cuales bajo ciertos datos de entrada y unos parámetros previamente calibrados, se puede realizar la estimación de los caudales o de los niveles de agua, y establecer el manejo de compuertas o los planes de evacuación pertinentes.

Por otra parte, en los ámbitos nacional e internacional se hace cada vez más importante el tema del cambio climático y la necesidad de la ejecución de políticas para la adaptación y mitigación de los riesgos asociados al cambio climático. Prueba de lo anterior en Colombia es el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Departamento Nacional de Planeación, 2012), el cual tiene el respaldo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo (UNGRD).

Con el objetivo de ejecutar proyectos efectivos para la mitigación y adaptación de los riesgos del Cambio Climático, es pertinente el conocimiento detallado de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo en la cuenca y de la influencia de la variedad espacial de la cuenca en su respuesta a los procesos climáticos. En este trabajo se desarrolla una herramienta de modelación hidrológica distribuida mediante el lenguaje de programación Python. Dicha herramienta es luego aplicada en 2 cuencas.

1.2. Pregunta Problema a Resolver

¿Cómo se puede aplicar un modelo hidrológico distribuido a las cuencas de Colombia?

1.3. Antecedentes

Entender el comportamiento hidrológico de la cuenca es muy importante para la planeación y la formulación de proyectos de manejo de los recursos hídricos. No obstante, instrumentar adecuadamente la cuenca hidrográfica mediante estaciones hidroclimáticas que permitan entender su comportamiento hidrológico es muy costoso.

Con la información disponible para la zona de estudio, se procede a construir un modelo del comportamiento hidrológico, con base en los procesos que ocurren en el ciclo del agua. Más adelante se explicará con mayor detalle algunos tipos de modelos utilizados para la representación del comportamiento hidrológico de una cuenca, pero se debe considerar el hecho de que muchos de estos modelos son agregados, es decir, no consideran explícitamente variaciones espaciales y simplifican geográficamente el comportamiento de una cuenca con base en parámetros sencillos como la pendiente media o el área total de la cuenca, así como la pendiente media o la longitud del cauce principal, entre otros. Dentro de la modelación agregada se utilizan principalmente modelos conceptuales basados en tanto métodos estadísticos (el método racional, modelos de autoregresión, etc.) como metodologías basadas en la inteligencia artificial (Chiang, Tsay, & Nix, 2002), modelos con base conceptual, o modelos basados en procesos. También es de destacar el hecho de que muchos modelos aplicados en la actualidad consisten en modelos híbridos, es decir, que combinan dos o más tipos de modelos diferentes, o incluso diferentes modelos de un mismo tipo, y cuyo ensamble requiere consideraciones adicionales (Corzo Perez, 2009).

Sin embargo, la precipitación y la escorrentía superficial son procesos distribuidos que dependen de muchos factores variables en el espacio, tales como el relieve, la cobertura vegetal, la humedad inicial y permeabilidad del suelo, entre otros. Los modelos hidrológicos que contemplen esta variabilidad serán claramente más complejos, pero permitirán una representación que puede ser más precisa en sus resultados y que permitirá analizar las variaciones espaciales de los procesos de la cuenca. No obstante, los modelos hidrológicos distribuidos requieren la determinación de más parámetros de calibración, algunos de los cuales pueden tener base física en la cuenca (Du, Link, Gravelle, & Hubbard, 2014). Adicionalmente, asociado a la modelación hidrológica distribuida deben ser considerados también los problemas de no linealidad (los sistemas hidrológicos se comportan de manera no lineal), de escala (la representación mínima debe ser adecuada), de unicidad (cada sitio de estudio puede

presentar comportamientos únicos), de equifinalidad (diferentes parámetros pueden dar resultados similares) y de incertidumbre de los datos de entrada del modelo (Beven, 2001).

1.4. Objetivos

El principal objetivo del trabajo es elaborar una metodología para la calibración de un modelo distribuido, específicamente el modelo hidrológico distribuido basado en procesos TAC^D . Este modelo y la metodología fueron aplicadas en la cuenca del Río Coello (Tolima, Colombia). Los objetivos específicos por alcanzar son:

- Hacer una búsqueda documental sobre el estado del arte de los modelos hidrológicos, con especial énfasis en el modelo hidrológico distribuido TAC^D .
- Realizar la adaptación del modelo hidrológico distribuido TAC^D a la versión más reciente de PCRaster (4.1) (para poder usar Python).
- Validar los resultados del modelo TAC^D adaptado con el estado del arte del modelo previo (Roser, 2001), mediante la cuenca de Brugga.
- Realizar la adaptación de la información recopilada al modelo hidrológico distribuido.
- Calibrar el modelo TAC^D adaptado (TAC^D2) a la cuenca del Río Coello (Tolima, Colombia).
- Validar la calibración realizada al ejecutar el modelo TAC^D2 en la cuenca del Río Coello para los registros históricos seleccionados.

1.5. Resumen del Documento

Este trabajo consta de 6 capítulos y 5 Anexos, los cuales se presentan de la siguiente forma:

- El capítulo 1 describe el contexto de la investigación, la pregunta de investigación, los antecedentes y los objetivos.
- El capítulo 2 presenta los conceptos básicos de la modelación hidrológica, sus principales clasificaciones y el software que suele utilizarse.
- El capítulo 3 introduce los modelos hidrológicos TAC y TAC^D , que son la base del presente trabajo.

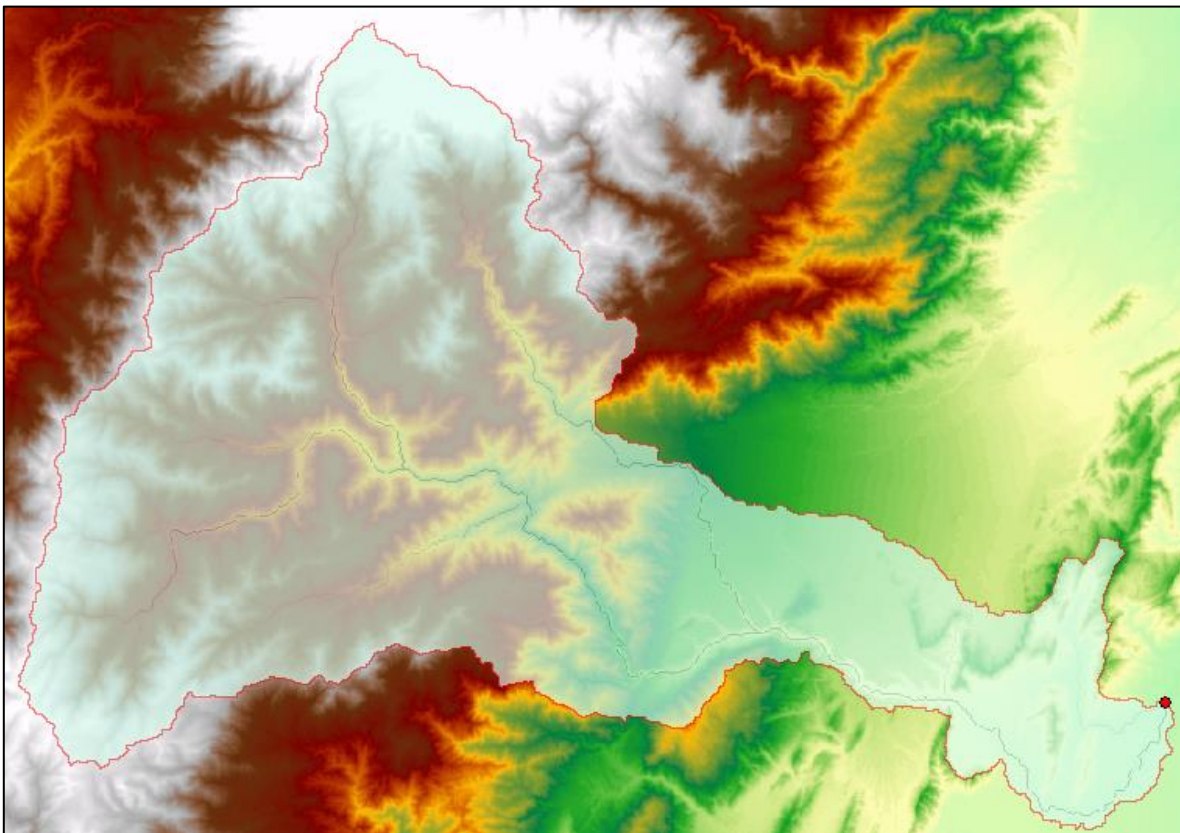
- El capítulo 4 describe de manera detallada en funcionamiento del modelo hidrológico distribuido TAC^{D2}.
- El capítulo 5 muestra la metodología de trabajo de los experimentos de calibración y la aplicación de dicha metodología.
- El capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.
- El Anexo 1 explica los fundamentos de la regionalización hidrológica y la sectorización hidráulica, con sus principales clasificaciones.
- El Anexo 2 corresponde al código fuente del modelo hidrológico distribuido TAC^{D2}.
- El Anexo 3 corresponde al código fuente que descarga la información satelital de precipitación y temperatura.
- Los anexos 4 y 5 corresponden a código fuente que transforma la información desde un formato ASCII GRID al formato PCRASTER MAP o a formato GeoTIFF. El primero transforma la información de algunos de los mapas base del modelo, mientras que el segundo transforma en serie los mapas de precipitación y temperatura.

2. Modelación Hidrológica

Un modelo hidrológico, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), es una representación simplificada de un sistema real complejo mediante una manera física o matemática. De manera matemática, el sistema real se representa a través de una expresión analítica.

En la hidrología, la unidad fundamental de análisis es la cuenca hidrográfica, en la cual se analiza cada uno de los componentes del ciclo hidrológico del agua. La cuenca hidrográfica se define a su vez como un área de terreno que drena todas sus corrientes de agua y la precipitación a un punto de descarga común, tal como la descarga de un embalse o algún punto en el canal de una corriente (United States Geological Survey, 2016). En la Ilustración 1 se muestra la cuenca de estudio del presente trabajo, correspondiente al Río Coello, en Tolima, Colombia.

Ilustración 1. Esquema de la topografía de la cuenca del Río Coello. Fuente: Elaboración Propia.



2.1. Clasificación de Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos pueden ser tan simples como una ecuación con 2 parámetros o tan complejos como modelos alimentados por extensas redes de monitoreo en tiempo real que permiten pronósticos de inundaciones y sequías. (Corzo Perez, 2009) sugiere una clasificación en 4 grupos, con base en los datos de entrada del modelo, la agregación espacial, sus funciones y objetivos, entre otros.

1. Modelos con base física (Physically-based models)

Los modelos con base física suelen representar el flujo en un punto mediante las ecuaciones de conservación (masa, momentum y energía), las cuales son discretizadas espacialmente mediante un esquema numérico que permite su solución aproximada. En el caso de la modelación de la cuenca de un río, la modelación con base física debe ser completamente distribuida, es decir, tener en cuenta las particularidades espaciales de la cuenca.

2. Modelos conceptuales

Cuando la modelación de un sistema se da mediante la correlación entre datos de entrada y datos de salida y la identificación de fronteras para la discretización, entonces se habla de un modelo conceptual. En hidrología, estos modelos corresponden a aquellos en los que se pretende simular, en mayor o menor medida, los mecanismos principales de respuesta de la cuenca a la precipitación: Intercepción, evapotranspiración, infiltración, tránsito hidrológico de crecientes, flujo subsuperficial, etc. Estos mecanismos hidrológicos se tienen en cuenta mediante relaciones matemáticas de naturaleza heurística empírica que son inspiradas en los procesos físicos naturales, aunque no tengan base física.

3. Modelos basados en procesos (Process based models)

Los modelos basados en procesos son relativamente nuevos, y surgen como una variante de los modelos conceptuales, pues tienen una estructura clara de los procesos hidrológicos. Corresponden al intermedio entre un modelo distribuido con base física y un modelo hidrológico agregado. Dichos modelos pueden ser semi-distribuidos, y considerar la variación espacial como la integración de muchas cuencas agregadas pequeñas. Ejemplos de estos modelos

corresponden a los modelos TAC (Uhlenbrook & Leibundgut, 2000) y TAC^D (Roser, 2001), los cuales serán especificados más adelante en este trabajo.

4. Modelos dirigidos por datos (Data-driven models)

Estos modelos tienen naturaleza empírica y se basan en la utilización de técnicas y algoritmos de inteligencia artificial (conocido en inglés como AI o Machine Learning), tales como las redes neuronales y algoritmos genéticos, entre otros (Obregón, Fragala, & Prada, 2017). En estos modelos, el aprendizaje del modelo es posible mediante la utilización de grandes cantidades de datos que representan la entrada y la salida esperada, los cuales no tienen en cuenta la naturaleza del fenómeno analizado, pero permiten calibrar los parámetros internos del algoritmo.

Dependiendo de la desagregación de las variables características de la cuenca, también se pueden clasificar los modelos hidrológicos como modelos agregados o modelos distribuidos (Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, & Ortiz, 2002).

Un modelo hidrológico agregado representa una cuenca con base en los principales parámetros que la representen, tales como el área de la cuenca, la pendiente y la longitud del cauce principal, entre otros. Pese a ser un modelo que compacta información de las características de la cuenca en un punto, como esto se realiza puede o no tener base científica. De aquí que los modelos puedan ser tan simples como una función del área total y la pendiente de la cuenca, o tan complejos como un modelo conceptual con procesos como infiltración, evapotranspiración, flujo subterráneo, etc.

Por otra parte, en un modelo hidrológico distribuido se realiza la discretización de una cuenca en muchas subcuencas pequeñas, de las cuales son conocidas sus variables características con mayor detalle. Un modelo de este tipo suele ser compatible con datos producidos por percepción remota y sistemas de información geográfica, los cuales se representan en formato de celda (Raster). A su vez, cada celda puede tener más de un dato superpuesto verticalmente (Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, & Ortiz, 2002).

2.2. Calibración de un Modelo Hidrológico. Funciones Objetivo

Con el fin de ajustar un modelo hidrológico para que represente adecuadamente una cuenca definida, es necesario definir una medida de cuán diferente el resultado del modelo es, según la información disponible. Una vez definida esta métrica de qué tan cerca se está al valor óptimo de ajuste (también conocida como función objetivo o estadístico de bondad de ajuste), el procedimiento a seguir se conoce como calibración. La calibración consiste en la alteración de los parámetros del modelo hidrológico con el fin de que reproduzca el comportamiento de la cuenca. Algunos de los estadísticos de bondad de ajuste más utilizados son:

1. Error Absoluto Medio: Mean Absolute Error

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |Q_t^m - Q_t^o| \quad (1)$$

Donde:

Q_t^m : Variable modelada, en un tiempo t, en este caso el caudal

Q_t^o : Variable observada, en un tiempo t, en este caso el caudal

T : Tiempo total o cantidad de datos analizados en el tiempo

2. Error Cuadrático Medio: Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t^m - Q_t^o)^2} \quad (2)$$

3. Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe: Nash-Sutcliffe Efficiency

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t^m - Q_t^o)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t^m - \bar{Q}^o)^2} \quad (3)$$

Donde:

$\overline{Q^o}$: Promedio de la variable observada para la cantidad total de datos

El coeficiente de Nash-Sutcliffe puede variar en el rango $(-\infty, 1]$. Si la eficiencia es 1, entonces los datos modelados tienen coincidencia exacta con los datos observados. Una eficiencia de 0 indica que los datos modelados son tan precisos como la media de los datos observados. Por otra parte, una eficiencia menor a 0 indica que la media de los datos observados representa mejor a los datos observados que los datos modelados.

4. Error Cuadrático Medio Ponderado: Weighted Root Mean Square Error

$$WRMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T w_t (Q_t^m - Q_t^o)^2} \quad (4)$$

Donde:

w_t : Ponderación para el tiempo t

El error cuadrático medio ponderado puede ser importante en caso de que se quiera dar un mayor peso en el pronóstico a algunos eventos específicos. Esto puede ser de utilidad, por ejemplo, en un modelo que pretenda modelar de manera precisa los eventos extremos, pues se debe dar mayor peso en la calibración a los instantes de tiempo donde se observa un pico en el hidrograma.

5. Error en el Balance de Masa: Error in Water Balance

$$WB = \sum_{t=1}^T Q_t^m - \sum_{t=1}^T Q_t^o \quad (5)$$

2.3. Software de Modelación Hidrológica

Existen muchos modelos hidrológicos disponibles para la evaluación y calibración de un sistema en particular. Existen algunos modelos hidrológicos globales que permiten evaluar la escorrentía en toda la tierra, tales como LISFLOOD, PCR-GLOBWB, SWBM, W3RA, WaterGAP3, HBV-SIMREG, etc.

Por otra parte, algunos modelos permiten la evaluación de los procesos que suceden a escalas más pequeñas, en términos de cuencas hidrográficas, tales como HEC-HMS, HBV, SWAT, TAC^D, GSFLOW, HTESEL, JULES, ORCHIDEE, SURFEX, entre otros. Cada modelo puede ser agregado o distribuido, puede tener base física o ser conceptual y, por tanto, cada modelo considerará diferentes fenómenos y tendrá diferente número y tipo de parámetros a calibrar.

Muchos de los modelos previamente mencionados se trabajan mediante *scripts* programados en algún lenguaje de programación. Para esta tarea, los principales lenguajes utilizados son C, C++, Java, Python y Matlab.

Cabe resaltar que la razón de ser de esta variedad de modelos es la variabilidad que se encuentra en las cuencas naturales, que da lugar a que algunas conceptualizaciones funcionen mejor para representar ciertas zonas que otras.

3. Modelos TAC y TAC^D originales

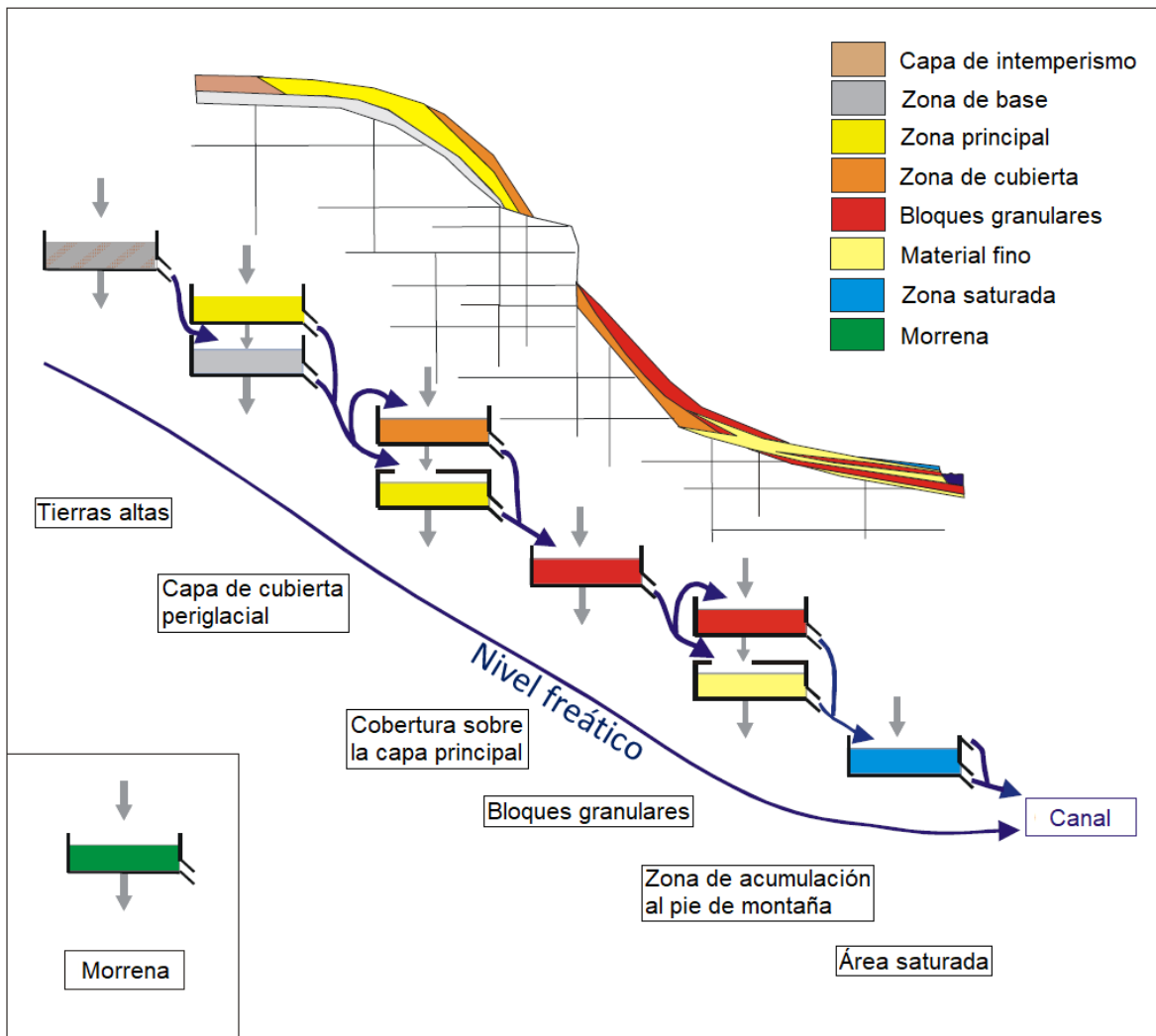
El presente trabajo se fundamenta en el modelo **TAC**. El modelo ayudado por trazadores, **TAC** (Tracer-Aided Catchment model) fue creado por Stefan Uhlenbrook en 1999 para la cuenca de Brugga, ubicada en la Selva Negra, en el suroeste de Alemania. El modelo **TAC** es un modelo semi-distribuido que se descompone en módulos individuales, los cuales fueron adaptados de otros modelos conceptuales. El módulo de generación del flujo, por el contrario, se basa en investigaciones experimentales realizadas con trazadores naturales en la cuenca de Brugga y permite reproducir complejos procesos hidrológicos mediante analogías de tanques relativamente sencillas (Uhlenbrook, 2001). Las clasificaciones de los procesos hidrológicos (nombre original en alemán entre paréntesis) en los modelos TAC y sus versiones posteriores son:

1. **Tierras altas (Hochlagen)**: Zonas altas y de cúspide, con pendiente de 0-6°; sustrato arenoso y capas del terciario expuestas a intemperie; largos tiempos de residencia del agua
2. **Capa de cubierta periglacial (Klassische periglaziale Deckschichten)**: Litofacies periglaciales poco profundas en pendientes entre 6-25°, con restos predominantemente arcillosos; buena conductividad hidráulica de la capa principal a través de flujo en macro poros; posible acumulación de agua en la capa base.
3. **Cobertura sobre la capa principal (Decklage auf Hauptlage)**: Substrato moderadamente estratificado con abundante capa de cobertura rica en granulares sobre una capa principal suelta; pendiente 25-34°; conductividad hidráulica de la capa superior o principal muy buena o buena.
4. **Bloques granulares (Blockschutt)**: Material granular por debajo de zonas de alta pendiente o acantilados, con pendiente superior a 34°, con un buen contenido de bloques y otro material granular grande; muy buena conductividad hidráulica debida al flujo en macro poros.
5. **Zona de acumulación al pie de montaña (Akkumulationsbereiche am Hangfuß)**: Áreas cercanas a los cauces en el pie de montaña, con pendiente de 0-25°; cambio de almacenamiento en el valle a partir de material depositado y material fino; muy buena conductividad hidráulica en capas ricas en material granular grueso; en material fino la conductividad es moderada.
6. **Áreas Saturadas (Sättigungsflächen)**: Zonas con saturación todo el año, a causa de manantiales, pantanos y escorrentía superficial.

7. **Zonas de Morrena (Moränengebiete):** Zonas con material y pendientes cambiantes, con estructura muy inestable, compuesta principalmente de arcilla y limo; permeabilidad hidráulica moderada, la cual suele generar zonas de anegamiento.

La Ilustración 2 muestra esquemáticamente como se interconectan las celdas con diferentes procesos hidrológicos en el modelo TAC y TAC^D.

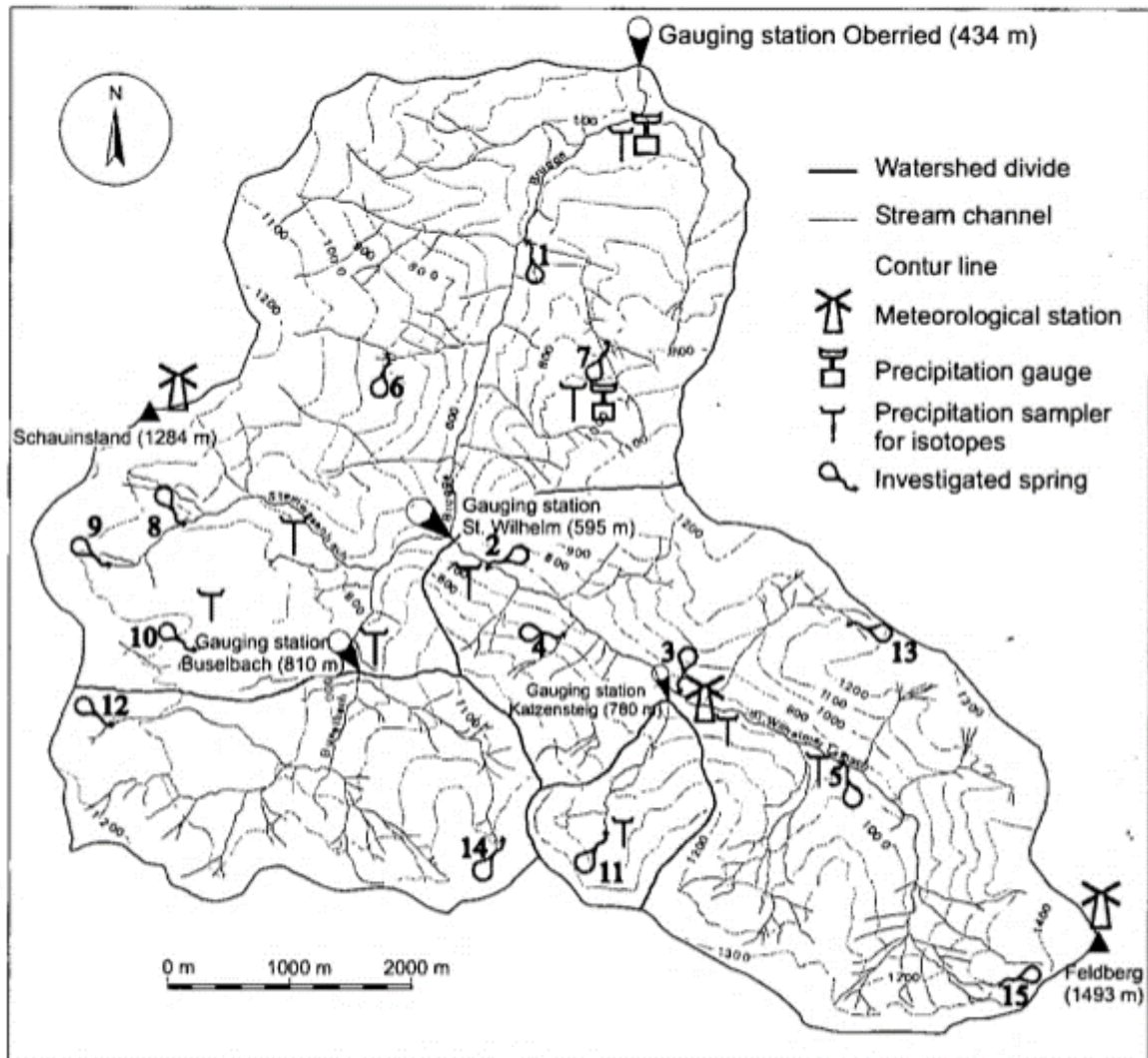
Ilustración 2. Concepto de tanques de la clasificación de regiones y sus relaciones de flujo en una pendiente idealizada. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)



La Ilustración 3 muestra la cuenca de Brugga y su respectiva instrumentación, la cual fue la base para la creación del modelo TAC. A partir éste, Stefan Roser continuó en 2001 el desarrollo del modelo TAC mediante la incorporación de un componente para operaciones geográficas mediante el Sistema

de Información Geográfica PCRaster versión 2. De esta manera, el modelo TAC ganó robustez en la metodología de cálculo espaciotemporal basada en los procesos hidrológicos de la cuenca y se transformó en el modelo TAC^D.

Ilustración 3. Instrumentación en la cuenca de Brugga. Fuente: Uhlenbrook, S. (2001)



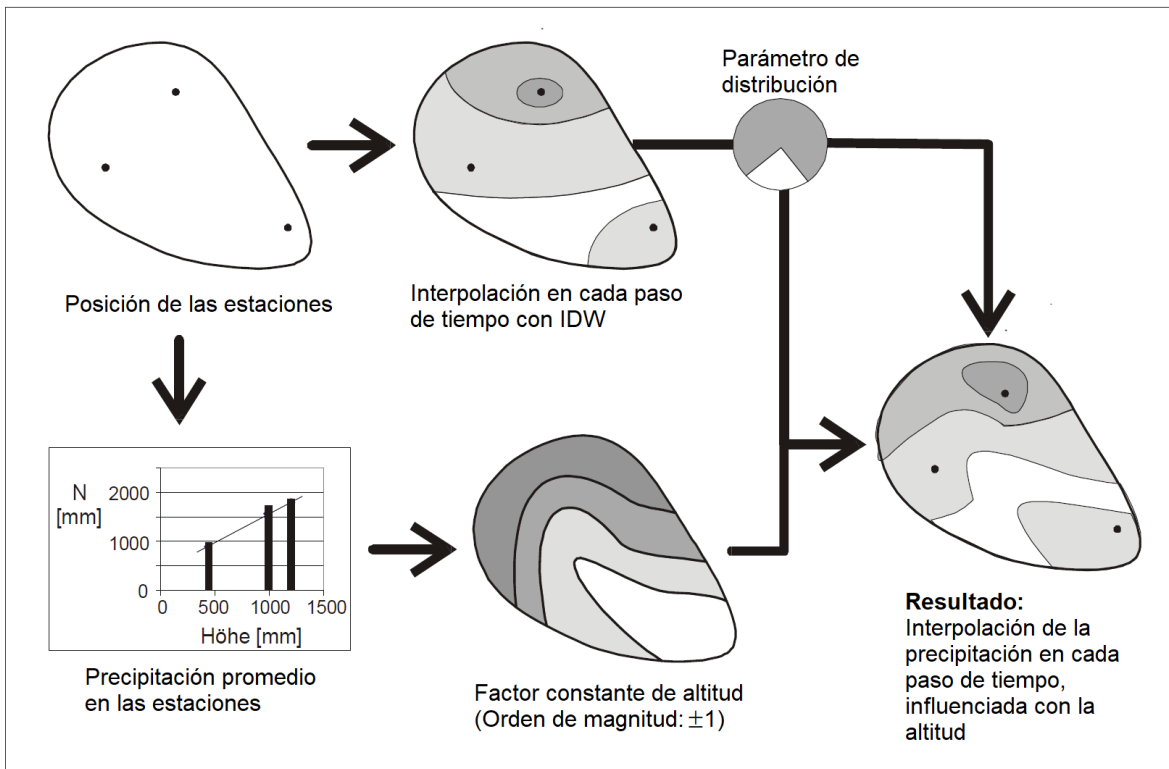
En el modelo TAC^D se consideraron los siguientes aspectos (Roser, 2001):

- **Discretización temporal:** El modelo TAC realiza la simulación del balance hidrológico en pasos de tiempo diarios. No obstante, en el modelo TAC^D se requiere modelar también el tránsito de la creciente producida por el escurrimiento del agua en el cauce principal, de tal manera

que para la discretización temporal del tránsito de la creciente fue necesario reducir el intervalo de cálculo numérico a nivel horario.

- **Discretización espacial:** La cuenca se subdivide en celdas de Raster de tamaño homogéneo que tengan en cuenta la resolución de los datos de entrada y el tamaño de la cuenca, pues esto determinará la capacidad de cálculo requerida y su respectivo tiempo. Si bien la topografía no se puede representar tan bien con un modelo de celdas de Raster como con un modelo de red de triángulos irregulares (TIN), cabe resaltar que los datos espaciales que se encuentran en formato Raster (modelo de elevación de terreno) pueden ser integrados al modelo de manera directa. Éste último tipo de información fue utilizada en el presente trabajo.

Ilustración 4. Representación esquemática de la interpolación de la lluvia como combinación del algoritmo Inverse Distance Weighting y la modificación de la precipitación mediante una modificación por la altitud. Traducido y adaptado de (Roser, 2001)



- **Precipitación:** Las mediciones de precipitación realizadas en estaciones hidroclimáticas presentan errores causados por la deformación del campo de velocidades de viento y los fenómenos asociados a la evaporación. A partir de ellas, el modelo TAC^D realiza un

procedimiento de distribución espacial de la precipitación mediante ponderación con el inverso de la distancia (en inglés Inverse Distance Weigthing o IDW) y una corrección por un factor por altitud. La Ilustración 4 muestra el proceso mediante el cual se utiliza la información de estaciones hidroclimáticas.

- **Temperatura del aire:** La temperatura del aire en el modelo TACD es interpolada mediante una regresión que depende de la altitud. Estos datos deben ser preprocesados mediante algún software externo y posteriormente ingresados en el modelo de manera directa.
- **Radiación solar:** Para determinar la evapotranspiración es necesario conocer la oferta de energía a través de la radiación solar. Para ello, se considera el modelo POTRAD incluido dentro del software PCRaster. Es de destacar que este modelo tiene en cuenta la influencia de la topografía en la magnitud de la radiación solar recibida, así como la variación durante el día y a lo largo del año de la posición del sol.
- **Evapotranspiración potencial y real:** Sería deseable la aplicación de ecuaciones con base física tales como la de Penman-Monteith, aunque ésta requiere mucha información que no se tiene con la resolución requerida para ello. En el modelo TAC^D se emplea la aproximación empírica de Turc-Wendling, la cual ha mostrado tener variaciones relativamente pequeñas respecto al procedimiento de Penman-Monteith. La evapotranspiración potencial calculada mediante este procedimiento se representa así:

$$ETP = \frac{(R_G + 93 f_K)(T + 22)}{150 (T + 123)} \quad (6)$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial diaria, según Turc-Wendling [mm/d]

R_G: Suma diaria de la radiación solar [J/cm²]

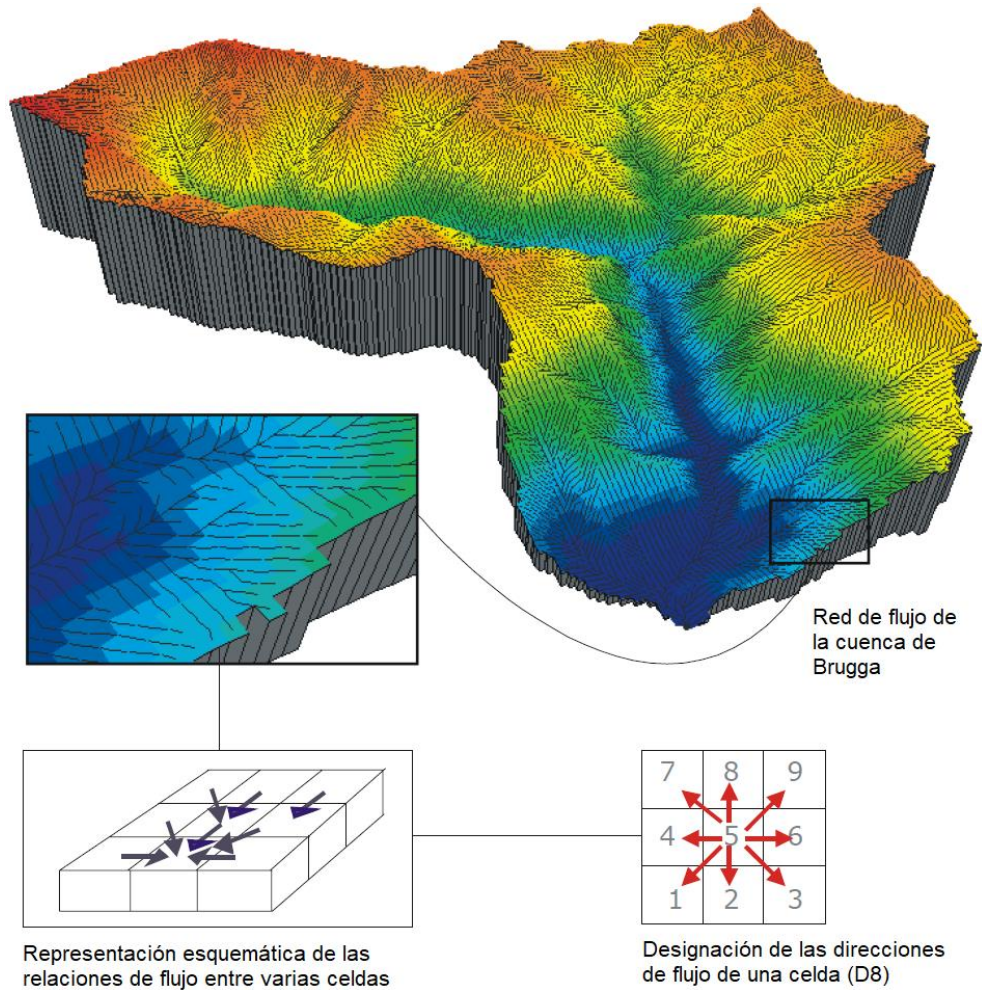
T: Temperatura promedio diaria del aire [°C]

f_K: Factor de costa, en zona interior es 1.0

Para discretizar temporalmente la evapotranspiración potencial se utiliza la distribución de la radiación solar a lo largo del día. No obstante, para el cálculo de la evapotranspiración real

se utiliza además el contenido de humedad de la celda o la sublimación de la nieve en caso de existir.

Ilustración 5. Red de flujo local de la cuenca de Brugga y representación esquemática de las direcciones de flujo de una celda. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)

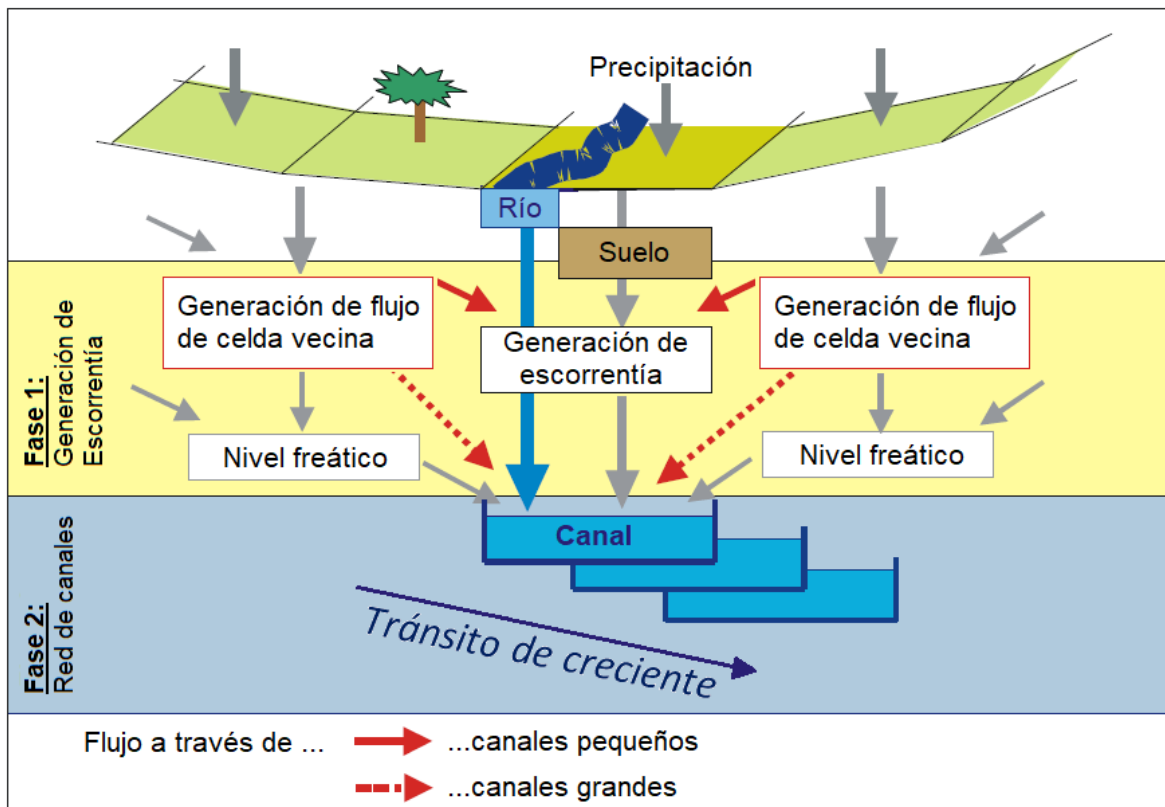


- Red de flujo:** Para modelar el flujo de agua en la cuenca, se aplica un procedimiento ya incluido en el software PCRaster, el cual tiene en cuenta la acumulación y el flujo de agua en la superficie causado principalmente por el relieve. La discretización permite definir un parámetro muy importante conocido como la dirección local de drenaje (LDD en inglés), la cual permite definir la dirección de flujo en la cuenca e incluso la cuenca misma a partir de la información de elevación de la zona. En la Ilustración 5 se observa un ejemplo de la red de drenaje hidrológico de la cuenca de Brugga. Se resalta el hecho de que adicional al drenaje

hidrológico, en los cauces principales de la cuenca se realiza también tránsito hidráulico mediante la función de onda cinemática, como se explicará más adelante para el modelo TAC^{D2}.

- **Generación de escorrentía:** Para la generación de la escorrentía, el modelo TAC^D se tiene en cuenta una analogía de tanques y una clasificación de regiones teniendo en cuenta los mecanismos de flujo superficial y subsuperficial dominantes, es decir, los procesos hidrológicos. Para realizar la simulación del flujo a través de la mencionada analogía de tanques, se tienen en cuenta 3 tipos de procesos que operan mediante la teoría del embalse lineal con un tanque o con dos, dependiendo de las clasificaciones mostradas. La Ilustración 2 muestra esquemáticamente cómo cada una de las celdas se correlaciona con las celdas vecinas, para los 7 procesos hidrológicos del modelo TAC.

Ilustración 6. Representación de las dos fases para el flujo de una celda con canal. Traducido y adaptado de: (Roser, 2001)

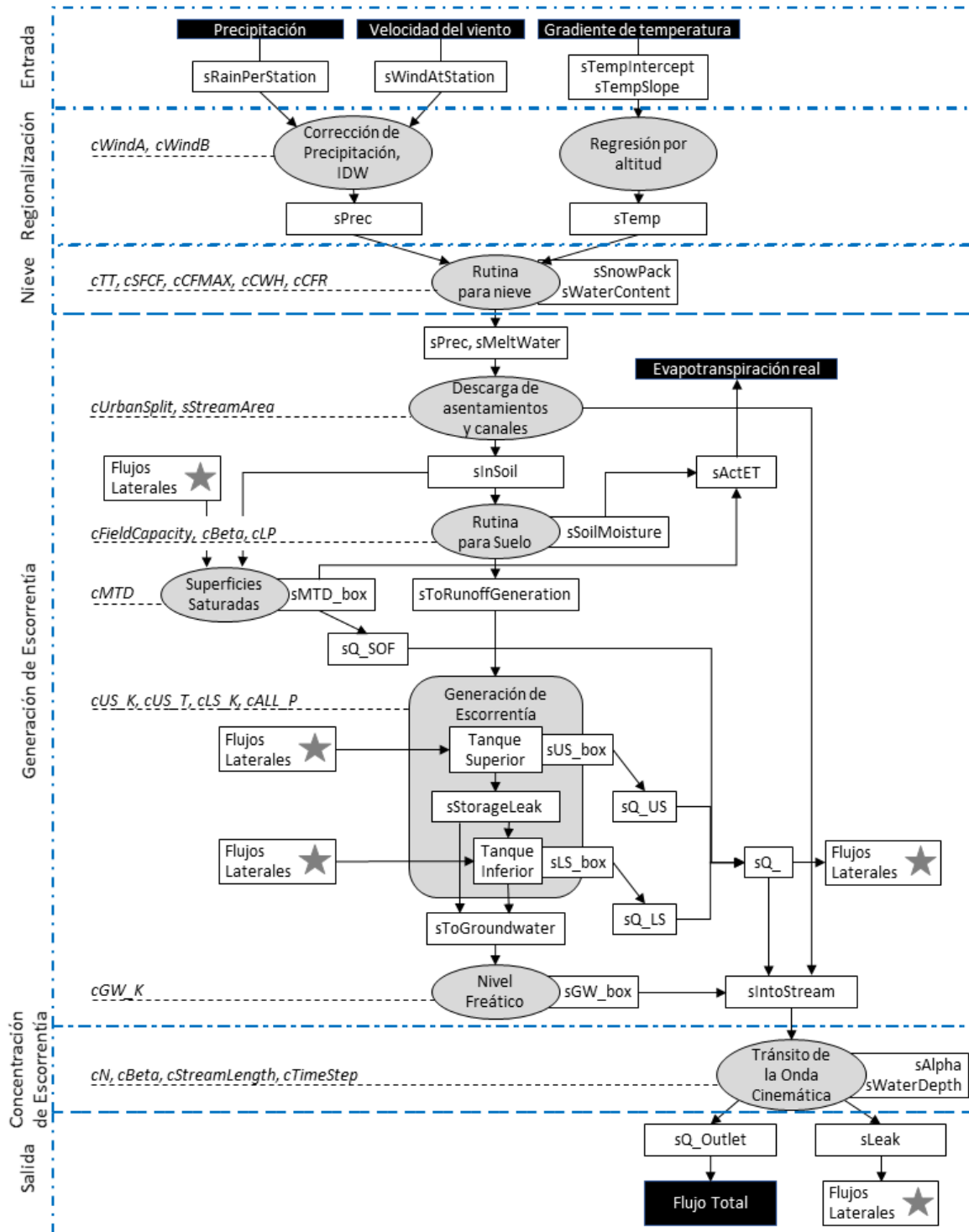


- **Concentración de la esorrentía y tránsito de crecientes:** Cuando se integra la red de flujo de una corriente de agua en un mapa en formato Raster, surge el problema de que el canal utiliza todo el ancho de la celda, si se considera el flujo a través de celdas. Para ello, el modelo TAC^D tiene un enfoque diferente para aquellas celdas que corresponden a la red de flujo, consistente en 2 etapas de cálculo: La precipitación en estas celdas se integra directamente en la corriente de manera proporcional con la relación entre el ancho del canal y de la celda. Mientras que la parte que cae en el canal circula inmediatamente en el tránsito hidráulico, la otra parte se integra al módulo de flujo superficial y subsuperficial como en cualquier otra celda. Posteriormente, este flujo se integrará en la corriente. Un esquema de este aspecto se muestra en la Ilustración 6. Dicho de manera simple, la red de flujo corresponde a un canal que recibe y transita el caudal recibido de las celdas vecinas.

Por otra parte, el tránsito de la creciente se realiza a través del software PCRaster, el cual integra el tránsito mediante la onda cinemática, mediante la función *kinematic*, la cual resuelve numéricamente las ecuaciones diferenciales de continuidad, momentum lineal y energía mediante diferencias finitas (Karszenberg, Schmitz, Salamon, de Jong, & Bierkens, 2010). Esta aproximación puede ser utilizada en el caso en que las fuerzas inerciales y de presión tienen un orden de magnitud inferior respecto a las fuerzas gravitacionales y de fricción (Chow, Maidment, & Ways, 1994). Para el correcto funcionamiento de esta discretización, es necesario que el intervalo en el cual se calcula la onda cinemática sea significativamente menor a 1 día, de tal manera que para esto se realiza el cálculo de la onda cinemática a intervalos horarios.

Para entender de manera global la manera en la que funciona el modelo TAC^D, se ha adaptado el diagrama de flujo mostrado por Roser (2001) en la Ilustración 7. Posteriormente, se mostrará el mismo esquema en el modelo TAC^{D2}, el cual es objetivo de estudio de este trabajo, así como en detalle la aplicación de ecuaciones y aspectos relacionados a la aplicación del modelo.

Ilustración 7. Diagrama de flujo de los módulos del modelo TAC^D con sus relaciones y parámetros (cursiva). Adaptado y traducido de: (Roser, 2001)



4. Modelo TAC^{D2}

Con base en el modelo TAC^D de Roser y dada la desactualización de la versión de PCRaster (2) respecto a la versión actual (4.1) y ante la incompatibilidad del script original a la nueva versión, se realizó la adaptación del modelo al PCRaster 4.1.0 Python Framework mediante Python 2.7.13. Para tener una mayor claridad sobre los módulos que le permiten funcionar al modelo TAC^{D2}, se detalla en este capítulo cada uno de los procedimientos realizados, teniendo en cuenta la información de entrada y los parámetros del modelo, así como los diferentes procesos hidrológicos simulados.

Es de resaltar que entre estas dos versiones de PCRaster ocurrieron cambios en la manera como se calculan algunos de sus módulos, como por ejemplo el de la onda cinemática (Karssenbergh, Schmitz, Salamon, de Jong, & Bierkens, 2010), de tal manera que no es posible lograr compatibilidad numérica exacta y completa entre el modelo antiguo TAC^D y el modelo nuevo TAC^{D2}. Más información al respecto se dará en la sección 5.4 Adaptación del Software TAC^D a PCRaster 4.1 en Python: TAC^{D2}.

El código completo se encuentra en el Anexo 2, pero en general se resaltan algunos aspectos de este:

- La instalación de PCRaster y de Python 2.7.13 con todas las librerías necesarias para la ejecución del modelo TAC^{D2} no es una tarea sencilla y da pie a muchos errores durante la ejecución del modelo. Se recomienda seguir de manera cuidadosa las instrucciones de instalación de PCRaster y Python de sus respectivas páginas oficiales.
- La principal funcionalidad que causa el problema de compatibilidad del modelo TAC^D de Roser con PCRaster 4.1.0 corresponde al uso de un diccionario de parámetros, directamente cargado desde un archivo de texto. Este mecanismo fue utilizado por Stefan Roser para realizar la calibración del modelo TAC^D. No obstante, esta funcionalidad no fue incluida en las versiones posteriores de PCRaster. La manera de reemplazar esta funcionalidad mediante Python 2.7.13 consiste en la lectura directa desde el archivo de texto, la cual es eficiente y no requiere ninguna librería adicional, pues es una función básica del lenguaje.
- PCRaster no permite la lectura y escritura desde Python de archivos con información o resultados al final de la modelación (ej. Volumen total descargado) o en pasos intermedios (ej. Precipitación), los cuales enumera y les pone extensión de archivo según el paso de

tiempo al que corresponden. Para la lectura y escritura de archivos de este último tipo mediante Python, se realizó un algoritmo especial para generar el nombre de archivo correcto según el paso de tiempo generado, a través de funciones especiales como *join* y *zfill*.

- La manera en la que se calcula la onda cinemática en la versión 2 de PCRaster difiere un poco con la versión actual 4.1. Esto causa leves diferencias en el tránsito de caudales en la red de canales modelada.
- Python es un lenguaje de programación orientado a objetos y como tal, permite la implementación de software que permite aplicar la abstracción, el encapsulamiento y el polimorfismo. En el desarrollo de TAC^D2 se utilizó el Framework para Python de PCRaster mediante el encapsulamiento de algunos procedimientos internos del modelo. Esto permite en mayor medida la reutilización del código en nuevas aplicaciones.
- La estructura del modelo TAC^D2 corresponde en gran medida a la estructura original de TAC^D de Roser. No obstante, algunas funcionalidades tuvieron que ser ajustadas a la nueva sintaxis de los comandos en Python y a la programación orientada a objetos.

4.1. Estructura General del Modelo

El modelo TAC^D2 representa una cuenca a través de celdas cuadradas con atributos definidos teniendo en cuenta diferentes factores como por ejemplo el tipo y uso del suelo. El tamaño de las celdas es altamente dependiente de la resolución de la información espacial que se tenga, tanto del modelo de elevación del terreno (DEM) como de la información de precipitación, evaporación, horas de exposición a radiación solar, entre otros. Las celdas tienen capas en vertical, que dependen principalmente de los procesos hidrológicos y de su clasificación. En esencia, cada capa de la celda representa un tipo de tanque o almacenamiento diferente, el cual está definido a través de parámetros como la capacidad (H) y la permeabilidad (k), permitiendo así el flujo vertical entre diferentes tanques de una misma celda (véase Ilustración 2 e Ilustración 6). Por otra parte, las celdas adyacentes están interconectadas a través de flujos laterales. Con el fin de independizar el cálculo del almacenamiento de agua en cada tanque, la capacidad del tanque H está dado en unidades de altura y la permeabilidad en unidades de altura por paso de tiempo.

La ecuación fundamental para modelar el flujo lateral es la conservación de la masa desde un punto de vista euleriano para un volumen de control fijo, o en términos más simples:

$$-\frac{dS}{dt} = \text{Salidas} - \text{Entradas} = k S = Q \quad (7)$$

Donde:

- Q : Caudal [mm/paso de tiempo]
- S : Nivel del tanque [mm]
- k : Coeficiente de almacenamiento [1/paso de tiempo]

Teniendo como condición inicial el contenido del tanque S_0 en el tiempo $t=0$, la solución de la ecuación es $S(t) = S_0 * e^{-k t}$.

En el caso de los flujos verticales dentro de una misma celda, la infiltración se representa mediante un caudal constante de infiltración K , el cual no cambia a menos que se desocupe el tanque.

4.2. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial es calculada mediante la fórmula de Turc-Wendling (véase Ec. 6). No obstante, para calcular la radiación solar global R_g requerida para esta fórmula, se utilizó el

```
# dr: relative inverse distance from sun to earth
self.dr = 1 + 0.033 * math.cos(2 * math.pi * self.sDay / numdays)
# solar declination [rad]
self.SolDec = 0.409 * math.sin(2 * math.pi * self.sDay / numdays - 1.39)
# ws: solar radiation angle at dawn [rad]
self.ws =acos(-tan(self.Lat * math.pi / 180.0) * tan(self.SolDec))
# Ra: radiation outter atmosphere [MJ/m^2]
self.Ra = 24 * 60 * 0.082 / math.pi * self.dr*sin(self.SolDec)* \
        (self.ws*sin(self.Lat*math.pi/180) + \
        cos(self.Lat*math.pi/180)*cos(self.SolDec)*math.sin(self.ws))

# Daylength [h]
self.daylength = 24 * self.ws / math.pi
# Rg: Global radiation [MJ/(d * m^2)]
self.Rg = (0.25 + 0.5 * self.SunHours / self.daylength) * self.Ra

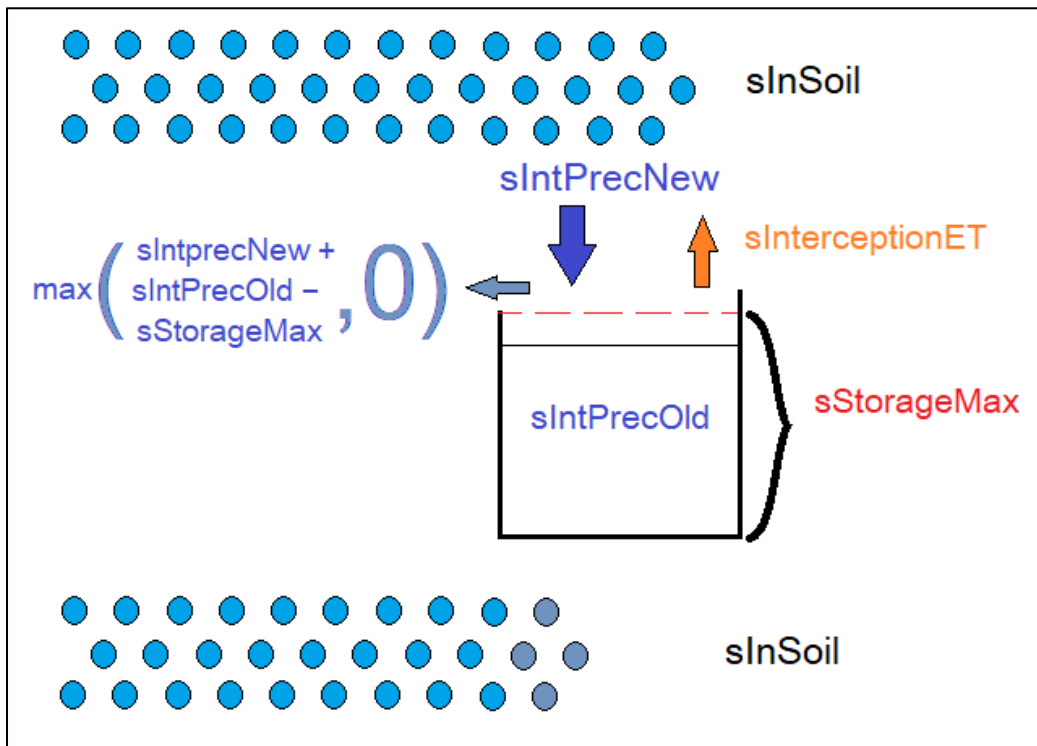
# now, calculating ETP
self.sPotET = ((self.Rg*100) + 93*self.fk)*(self.sTemp + scalar(22))/ \
        (150*(self.sTemp + scalar(123.0)))
```


Si la temperatura cae por debajo del parámetro de temperatura (cTT), entonces la precipitación ($sPrec$) se multiplica por el factor de corrección de caída de nieve ($cSFCE$) y se agrega al tanque de nieve ($sSnowPack$), para luego restar la evapotranspiración de la nieve ($sSnowET$). Si la temperatura del aire excede un límite de temperatura y hay cubierta de nieve, entonces ésta se derrite ($sMeltWater$) y es añadida al tanque de agua líquida ($sWaterContent$). Si, por el contrario, la temperatura cae por debajo del límite, ésta se solidifica ($sRefreeze$) y pasa al tanque de nieve. Si se supera la capacidad del tanque de agua líquida, el exceso de agua pasa a las siguientes subrutinas.

4.4. Cálculo de la Interceptación

El proceso de interceptación de la precipitación es altamente dependiente de la cobertura vegetal y del hábitat debido a la influencia que tiene en el área superficial. Por tanto, los mapas de cobertura vegetal ($sCoverage$) y de índice de área de hojas ($sLeafarea$) son utilizados para determinar que tanto es el volumen de agua que es interceptado ($sIntPrecNew$) y la capacidad del tanque modelado para esto ($sStorageMax$), según muestra la Ilustración 9.

Ilustración 9. Conceptualización de la Interceptación de la Precipitación. Fuente: Elaboración Propia



Del resultado del módulo anterior se obtiene el flujo que será interceptado ($sInSoil$), del cual una fracción es interceptado. En eventos grandes de precipitación, el nivel de interceptación se acercará al máximo posible ($sStorageMax$). En estos casos, se produce un flujo de exceso que se integra de nuevo al flujo que se infiltrará ($sInSoil$). La máxima capacidad de interceptación se calcula según la Ec. 8. Vale la pena mencionar que el índice de área de hojas es un número adimensional de la proporción entre el área que pueden cubrir las hojas de todas las plantas en esa zona y el área de estudio definida. La fracción de cobertura vegetal, de la misma forma, es adimensional y depende del uso del suelo. Se debe resaltar que el modelo supone que 0.3 mm corresponde al máximo grosor de la lámina de agua sobre las superficies mojadas.

$$sStorageMax = sCoverage * sLeafArea * 0.3 + (1 - sCoverage) * 0.3 \quad (8)$$

Por otra parte, el cálculo de la precipitación que es interceptada es:

$$sIntPrecNew = sStorageMax * \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{sCoverage * sInSoil}{sStorageMax}} \right) \quad (9)$$

En el caso que los niveles se mantengan por debajo del máximo, no se produce salida del flujo y, por tanto, la única forma en la que puede reducirse el nivel en el depósito es por evapotranspiración ($sInterceptionET$).

4.5. Escorrentía en Zonas Urbanas y Entrada Directa al Cauce

La precipitación que cae directamente sobre los cauces ($sDirectIntoStream$) se calcula con la precipitación después de la interceptación ($sInSoil$) y de manera proporcional a partir de la proporción de área cubierta ($sStreamLength*sStreamWidth$) por el cauce en cada celda ($CellArea$).

La justificación de utilizar el resultado de la interceptación es evidente en el caso de cauces pequeños, que en su mayoría están cubiertos por vegetación. En el caso de cauces grandes, se puede considerar como una compensación por el aumento de evaporación en zonas amplias de aguas abiertas.

En cuanto a la escorrentía en zonas urbanas ($sUrbanIntoStream$), se tiene en cuenta que gran parte de la superficie es poco permeable, de tal manera que se divide la precipitación de entrada ($sInSoil$)

mediante un parámetro (*sUrbanSplit*) en una parte que continúa hacia la generación de escorrentía estándar (*sInSoil*) y en otra parte que fluye directamente hasta la celda de río más próxima aguas abajo (*sUrbanFlux*).

El modelo TAC^{D2} asume que este último tipo de flujo tiene velocidades suficientes para alcanzar la celda de río más próxima antes de que termine el paso de tiempo, de tal manera que se debe garantizar que el paso de tiempo es grande en comparación con la extensión espacial de la zona urbana. De no ser así, tiene que usarse algún método para el tránsito de este flujo, por ejemplo, la onda cinemática.

4.6. Generación de Escorrentía en Zonas Saturadas

En las zonas saturadas, la capacidad de infiltración del suelo suele estar superada la mayoría del tiempo y por tanto, la mayoría escurre directamente por encima de la superficie. Por esta razón, este proceso se calcula de manera especial mediante un tanque de agua subterránea y otro para las depresiones microtopográficas (*sMTD*), el cual tiene una capacidad muy baja y por tanto un efecto de retención casi despreciable. Además, este tipo de celda no tiene procesos de percolación.

4.7. Cálculo de la Filtración: Rutina de Suelo

La rutina de filtración en el suelo del modelo TAC^{D2} está basada en el modelo HBV y representa la infiltración y la percolación mediante una ecuación empírica exponencial, así:

$$\frac{sToRunoffGeneration}{sInSoil} = \left(\frac{sSoilMoisture}{cFC} \right)^{cBETA} \quad (10)$$

Donde:

- sToRunoffGeneration***: Caudal resultante de la rutina [mm/paso de tiempo]
- sInSoil***: Caudal de entrada de la rutina [mm/paso de tiempo]
- sSoilMoisture***: Contenido de humedad de suelo [mm]

cFC: Capacidad de campo [mm]

sBETA: Parámetro empírico de percolación [mm]

Cuando el coeficiente cBETA es pequeño, la fracción de agua que pasa a la rutina de generación de escorrentía es relativamente grande, incluso si la humedad del suelo es baja en comparación con la capacidad de campo. Debido a la variabilidad en la representación espacial de la capacidad de campo y de los coeficientes cBETA, es posible representar diferentes tipos de suelos y diferentes comportamientos de infiltración.

En la rutina de suelo también se calcula la evapotranspiración mediante un parámetro empírico cLP. Se debe tener en cuenta que la evapotranspiración potencial total se compone, además de la evapotranspiración del suelo, la evapotranspiración de la capa de nieve (*sSnowET*) y la evapotranspiración por interceptación (*sInterceptionET*). Por lo anterior, se debe tener en cuenta únicamente la fracción correspondiente a este proceso para calcular la evapotranspiración efectiva *sActET*, la cual se calcula así:

$$\begin{aligned} \text{Si } sSoilMoisture &= cLP * cFC, & \text{ entonces } & sActET = sPotET \\ \text{Si } sSoilMoisture &< cLP * cFC, & \text{ entonces } & sActET = sPotET * (sSoilMoisture / (cLP * cFC)) \end{aligned} \quad (11)$$

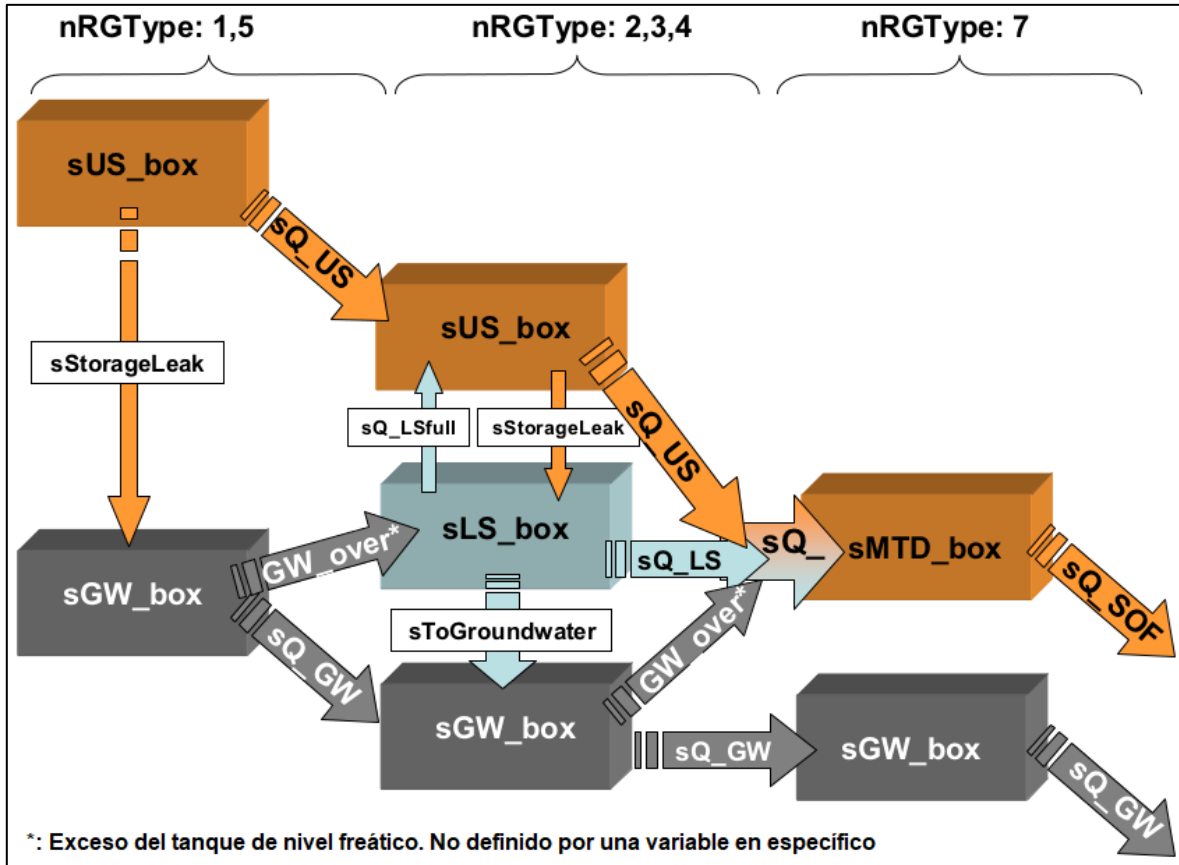
4.8. Cálculo de la Escorrentía

El cálculo de la escorrentía es el elemento más importante del modelo TAC^D2, pues cada una de las clasificaciones de los procesos hidrológicos tiene diferencias desde el punto de vista conceptual y en la implementación. Como se mencionó en el capítulo 3.3, el modelo distingue entre 7 tipos de clasificaciones y cada una de ellas puede tener 2 o 3 tanques para el tránsito hidrológico, según se puede apreciar en la Ilustración 2.

Las siguientes ilustraciones muestran los flujos laterales y verticales entre las diferentes clases (*nRGType*). Como se observa en la Ilustración 10, las clases 2, 3 y 4 comparten la misma estructura, aunque sus parámetros cambian para simular diferentes dinámicas de tránsito. Estas clases constan de un tanque superior (*sUS_box*), un tanque inferior (*sLS_box*) y un tanque para nivel freático (*sGW_box*). Los flujos laterales se dividen también en flujos para tanques superiores (*sQ_US*), para

tanques inferiores (sQ_{LS}) o para el nivel freático (sQ_{GW}). Si la celda aguas abajo pertenece a la misma clasificación de proceso hidrológico, entonces el flujo del tanque superior llega al siguiente tanque superior; si no, entonces se redirige al tanque inferior (sLS_box).

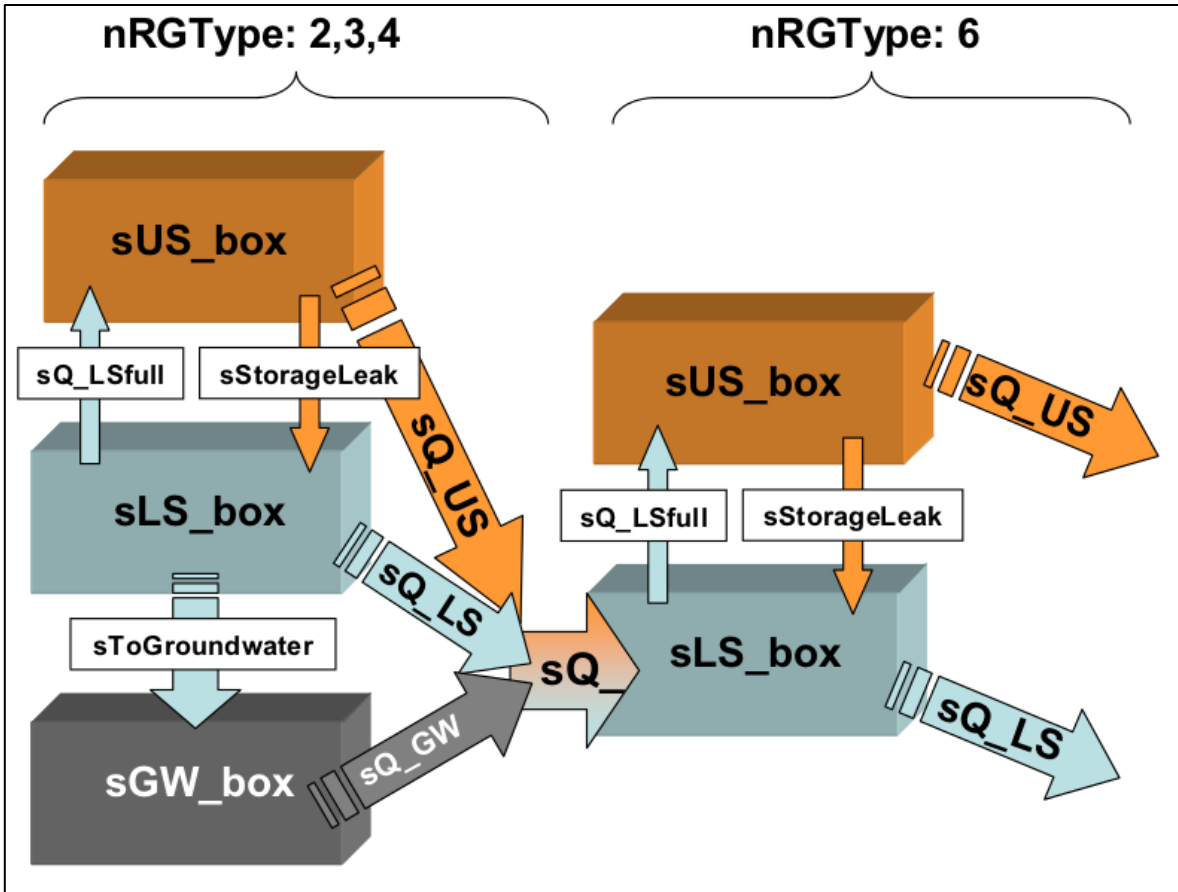
Ilustración 10. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 1). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)



Las clases 1 y 5 constan de dos tanques, de los cuales uno es el tanque superior (sUS_box) y el otro es el tanque de nivel freático (sGW_box). La clase 7 también consta de 2 depósitos ($sMTD_box$ y sGW_box), pero difiere en que estos dos tanques no están interconectados verticalmente.

La clase 6 permite conceptualizar flujos subterráneos en zonas de rellenos aluviales y acuíferos porosos, en los cuales la trayectoria del flujo no está definida por la topografía superficial. Para ello, es necesario definir un mapa de direcciones de drenaje diferente, en el cual estas nuevas trayectorias del flujo sean consideradas.

Ilustración 11. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 2). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)



Por otra parte, los flujos laterales entre los diferentes tanques son calculados, por ejemplo, para el tanque superior, mediante la siguiente expresión:

$$sQ_{US} = \min((sUS_{box} * cUS_K) * cSlopeFactor, sUS_{box}) \quad (12)$$

Donde:

sQ_US : Caudal lateral entre tanques [mm/paso de tiempo]

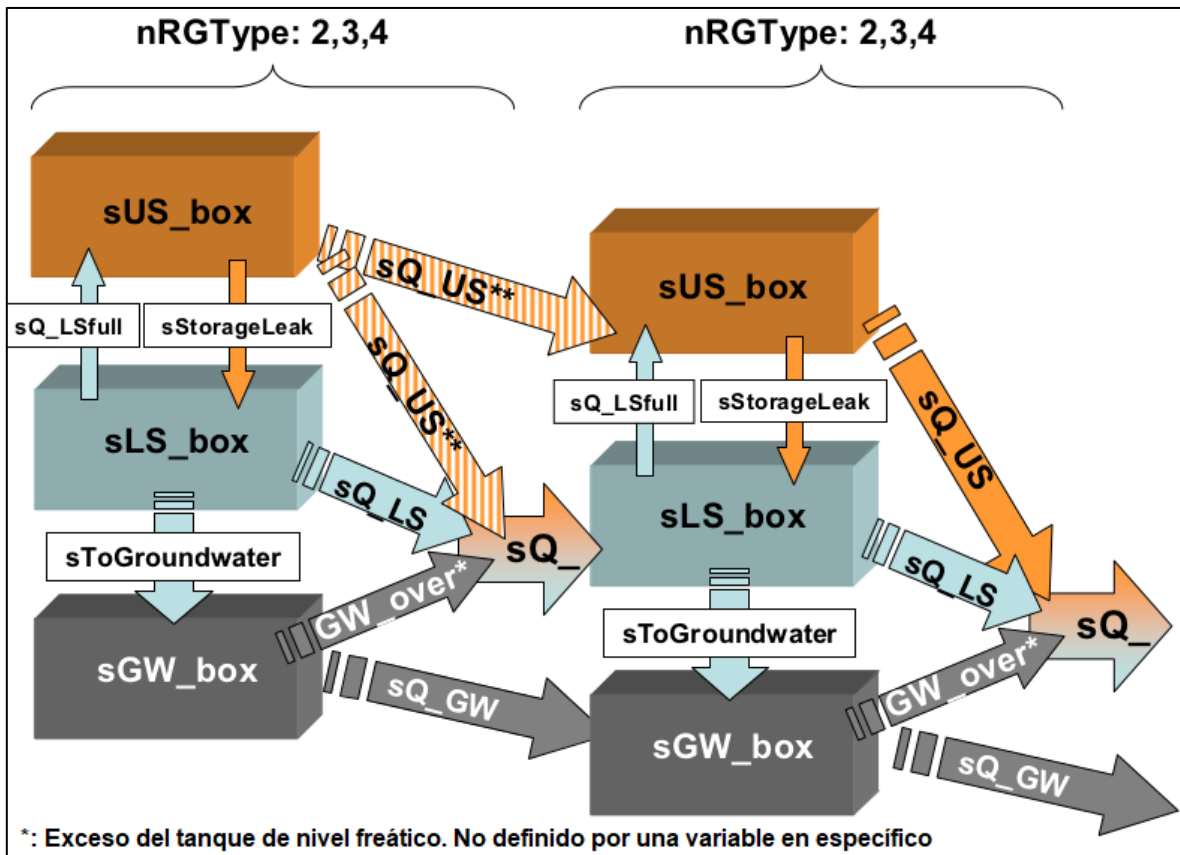
sUS_box : Nivel del Caudal [mm]

cUS_K : Coeficiente de filtración [1/paso de tiempo]

cSlopeFactor : Coeficiente por pendiente [adimensional]

Para el cálculo del coeficiente por pendiente, se realiza el cociente entre la pendiente de la celda y el promedio de pendiente de todas las celdas con la misma clasificación hidrológica. Este coeficiente está limitado con un mínimo de 0.3 para zonas con pendientes bajas, y con un máximo equivalente al contenido de agua del tanque desde donde sale. Como se observa en la configuración de los flujos laterales, éstos confluyen en una variable llamada sQ_{-} y luego son redistribuidos dependiendo de la clasificación hidrológica de la celda aguas abajo.

Ilustración 12. Configuración de los flujos verticales y laterales (Parte 3). Adaptado de: (Wissmeier, 2005)



La interacción entre el nivel freático y la corriente de agua sólo tiene lugar en las celdas con clasificación hidrológica 6 (parte baja del valle) y las celdas con corrientes al mismo tiempo. Esta interacción es representada mediante el flujo de infiltración de la corriente al acuífero (sQ_{inf}) y el flujo de exfiltración del acuífero a la corriente (sQ_{exf}). La dirección en la que está fluyendo el agua depende principalmente del nivel en el tanque superior, el cual, si supera un valor límite ($cThres$),

entonces genera flujo (sQ_{exf}) del tanque superior a la corriente de flujo ($sIntoStream$). La infiltración ocurre en los casos en los cuales el nivel en el tanque superior está por debajo de este límite.

4.9. Tránsito Hidráulico en la Corriente

El tránsito hidráulico se incluye dentro del modelo TAC^{D2} para tener en cuenta el desplazamiento longitudinal del agua en los segmentos de canal. El cálculo de dicha translación es realizado mediante la onda cinemática, combinando la conservación de la masa y del momentum y considerando el flujo lateral entrante así (Chow, Maidment, & Ways, 1994). En el modelo TAC^{D2}, la onda cinemática se utiliza mediante una función predefinida de PCRaster, llamada *kinematic*. Se debe tener presente que la ecuación diferencial que resuelve PCRaster es:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (13)$$

Donde:

Q : Caudal [m³/s]

A : Área mojada de la sección [m²]

q : Flujo entrante lateral [m³/m/s]

∂x, ∂t: Derivadas del espacio y del tiempo

La relación entre el área transversal y el caudal está dado por una ecuación potencial, así:

$$A = \left(\frac{n}{S^{0.5}} P^{\frac{2}{3}} Q \right)^{\beta} = \alpha Q^{\beta} \quad (14)$$

Donde:

β : Coeficiente (0.6)

P : Perímetro mojado de la sección [m]

n : Coeficiente de rugosidad de Manning [adimensional]

S : Seno del ángulo de pendiente

Si la Ec. 14 se deriva y se combina con la Ec. 13, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (15)$$

La función *kinematic* resuelve la Ec. 15 mediante un esquema implícito no lineal usando aproximaciones con el método de Newton-Raphson. Mediante este esquema implícito se asegura la estabilidad incondicional de la iteración, es decir, se puede tener números de Courant mayores a 1 sin problemas de estabilidad del método. No obstante, números de Courant altos pueden causar imprecisión numérica.

El flujo entrante lateral debe ser provisto en unidades de metros cúbicos por segundo por metro lineal de celda a la función *kinematic* y su resultado está dado en metros cúbicos por segundo. El nivel del agua en cada celda es entonces calculado en el modelo mediante la siguiente expresión:

$$sWaterDepth = sAlpha * (sQ_step ** cBeta) / sStreamWidth \quad (16)$$

Donde:

sWaterDepth : Profundidad de flujo [m]

sStreamWidth : Ancho del cauce [m]

sQ_Step : Caudal resultado de la función *kinematic* [m³/s]

sAlpha, cBeta : Parámetros de la función *kinematic* [adimensional]

4.10. Parámetros de Inicialización del Modelo

Con el fin de que la calibración comience con valores realistas de niveles en los tanques de cada celda, se debe llevar a cabo una ejecución de inicialización del modelo. Pruebas previas muestran que las simulaciones llevadas a cabo con el modelo TAC^D son altamente sensibles a sus condiciones iniciales (Sieber, 2003). Con el fin de lograr una estabilización de los niveles de los tanques, la inicialización puede comenzar con estimaciones de estos valores. Luego, se ejecuta la rutina de inicialización varias

veces, asegurándose de hacer que el estado final de una ejecución sea el estado inicial de la siguiente. Debido a que el modelo TAC^D2 tiene también parámetros de calibración, la inicialización debe repetirse para cada una de las calibraciones.

Para el modelo TAC^D2, los siguientes datos deben ser inicializados:

- El mapa de humedad inicial del suelo (*sSoilMoisture*)
- El mapa de contenido de humedad de depresiones micro topográficas (*sMTD_box*)
- El mapa de niveles del tanque superior de la celda (*sUS_box*)
- El mapa de niveles del tanque superior de la celda (*sLS_box*)
- El mapa de niveles freáticos (*sGW_box*)
- El mapa de contenido inicial para interceptación (*sIntPrecOld*)
- El valor inicial de caudal en el cauce (*sQ_step*)
- La altura inicial de flujo en el cauce (*sWaterDepth*)

Estos dos últimos parámetros producen imprecisiones bajas en comparación a los otros parámetros mencionados, los cuales son de carácter espacial.

5. Metodología de Trabajo

Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán 2 áreas de estudio diferentes, pues la adaptación del modelo TAC^D a la nueva versión de PCRaster requiere la validación del modelo en su condición previa y en su condición posterior a la adaptación, para condiciones y parámetros que hayan sido calibrados previamente. Por otra parte, se quiere estudiar el comportamiento hidrológico distribuido en la cuenca del Río Coello, razón por la cual se debe realizar un proceso de calibración de los parámetros del modelo TAC^{D2}. En este proceso de calibración, se presume el buen funcionamiento del modelo, el cual solo puede ser garantizado mediante la verificación de entradas y salidas a través de información y resultados con cierto grado de revisión.

5.1. Áreas de Estudio: Cuenca del Río Brugga y Cuenca del Río Coello

- **Cuenca del Río Brugga**

La cuenca del Río Brugga se encuentra ubicada en la zona sur de la Selva Negra (Schwarzwald), en el suroeste de Alemania y cuenta con un área de 39.9 km², lo cual la clasifica como una cuenca de mesoescala. El paisaje de la cuenca es muy pendiente (en promedio 19.5°), con valles profundos y taludes con altas inclinaciones. La parte alta de la cuenca, que desciende desde la cima de Feldberg (1493 msnm) muestra vestigios de relieve terciario, así como de procesos de glaciación parcial en la cuenca (ej. Morrenas y lenguas glaciares), cómo se evidencia en el valle en U del arroyo St. Wilhelmer. La mínima elevación de la cuenca se presenta en la estación limnográfica Oberried (893 msnm), en el punto de concentración de la cuenca.

La distribución de la precipitación en la cuenca del Río Brugga se ve fuertemente afectada por las cordilleras de la Selva Negra, las cuales producen fenómenos de lluvia orográfica, es decir, se elevan masas de aire húmedas, lo cual reduce su temperatura y las lleva a alcanzar el punto de saturación del vapor de agua. Este fenómeno se evidencia mediante los altos niveles de precipitación en la parte suroeste de la cuenca. Adicionalmente, se produce un régimen de precipitación con un pico entre los meses de junio y agosto, el cual se ve influenciado en las zonas altas de la cuenca por un régimen de máximos secundarios en enero y febrero, causado por el sistema de clima local de la Selva Negra. En

promedio, la precipitación en forma de nieve en las zonas altas corresponde a dos tercios del total de nieve. Además, la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración efectiva en la cuenca del río Brugga es relativamente baja, dado que en las zonas superficiales del suelo se encuentra disponible contenido de humedad.

En cuanto a la hidrogeología, en la cuenca del río Brugga se encuentran depósitos glaciales, cubiertas periglaciales o rellenos en el valle del Holoceno sobre la capa rocosa. Estas capas son las que presentan el mayor almacenamiento subsuperficial de agua en la cuenca.

La cobertura vegetal de la cuenca del río Brugga corresponde en un 75% a árboles de bosque, principalmente abeto rojo en las zonas altas y hayas y abetos comunes en las zonas bajas. 3.1% del área de la cuenca se compone de asentamientos urbanos, mientras que la agricultura no tiene lugar.

- **Cuenca del Río Coello**

Por otra parte, la cuenca del río Coello se encuentra ubicada en la zona central del departamento del Tolima, Colombia. El río Coello tiene su nacimiento en el páramo de Don Simón, a 3850 msnm, y fluye con una pendiente media de 3.2% a través de aproximadamente 121 km de este a oeste desde su nacimiento hasta su desembocadura en la margen izquierda en el río Magdalena, a una cota de 300 msnm (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA, 2016).

El río Coello tiene gran importancia para el desarrollo de la región, pues de éste se abastecen grandes asentamientos urbanos como Cajamarca, Ibagué, El Espinal y Flandes, entre otros. Adicionalmente, dentro de su área se encuentra el distrito de riego del río Coello, con una extensión de 71900 hectáreas, y además permite la generación eléctrica en la planta La Ventana, con una capacidad instalada de 80 MWh.

La cuenca del río Coello cuenta con una extensión de 1800 km², que corresponde aproximadamente al 7.8% del área total del departamento del Tolima. Los principales afluentes del río Coello son los ríos Toche, Bermellón, Cocora, Andes, Gallego y Combeima.

5.2. Información Recopilada

Con el fin de llevar a cabo la validación del modelo TAC^{D2} adaptado de PCRaster Versión 2 a PCRaster Versión 4.1 en Python, es necesario utilizar la locación original del río Brugga. De esta manera, se puede verificar la exactitud de la adaptación en términos parámetros hidrológicos de la cuenca, tales como el hidrograma de respuesta, la evapotranspiración promedio diaria, la infiltración, etc.

Para la validación de la adaptación del modelo, se utilizó la información original del modelo, la cual incluye los siguientes archivos:

- Topografía de la cuenca y las subcuencas: archivos *clone.map*, *subcatchment200.map* y *dem200.map*
- Dirección de flujo de la escorrentía: archivos *ldd200.map* y *lddmod200.map*
- Clasificación del suelo y sus procesos: archivos *rg200.map*, *urban200.map* y *forest200.map*. Se destaca el archivo *rg200.map*, el cual corresponde a la clasificación de los procesos de infiltración y escorrentía de la cuenca en 7 categorías, como se explica a partir de la página 8, en la generación de la escorrentía.
- Índice de área de hojas (LAI por sus siglas en inglés) y del índice de cobertura vegetal: archivos *lai_jan.map*, *lai_feb.map*, *lai_mar.map*, *lai_apr.map*, *lai_may.map*, *lai_jun.map*, *lai_jul.map*, *lai_aug.map*, *lai_sep.map*, *lai_oct.map*, *lai_nov.map*, *lai_dec.map*. *cov_jan.map*, *cov_feb.map*, *cov_mar.map*, *cov_apr.map*, *cov_may.map*, *cov_jun.map*, *cov_jul.map*, *cov_aug.map*, *cov_sep.map*, *cov_oct.map*, *cov_nov.map* y *cov_dec.map*.
- Cauces principales y su ancho: archivos *gerinne200.map* y *breite200.map*
- Coeficiente n de Manning para los cauces: archivo *manning200.map*
- Precipitación en la cuenca: archivos de la forma *P000x.xxx*, donde x.xxx va desde 0.001 hasta 4.380 y corresponden a la precipitación en cada uno de los días modelados, dado que el paso de cálculo es de 1 día.
- Temperatura en la cuenca: archivos de la forma *tempx.xxx*, donde x.xxx va desde 0.001 hasta 4.380 y corresponden a la temperatura en cada uno de los días modelados.
- Evapotranspiración en la cuenca: archivos de la forma *ET00x.xxx*, donde x.xxx va desde 0.001 hasta 4.380 y corresponden a la evapotranspiración potencial en cada uno de los días modelados.

- Estaciones de precipitación: archivo *runoffstat200.map*
- Puntos de salida y control de caudal: archivos *pit200.map* y *endpit200.map*
- Condiciones iniciales de humedad: archivos *sm_ini.map*, *MTD_ini.map*, *US_ini.map*, *LS_ini_mod.map*, *LS_ini_new.map* y *IntPreclni_new.map*
- Series de caudales y velocidades observados en el punto de descarga: archivos *runoff_out.tss*, *velocity.tss*, *MeanVelo.map* y *Q_IntoStream.map*

A continuación, se presenta la información utilizada para el modelo de la cuenca de Coello:

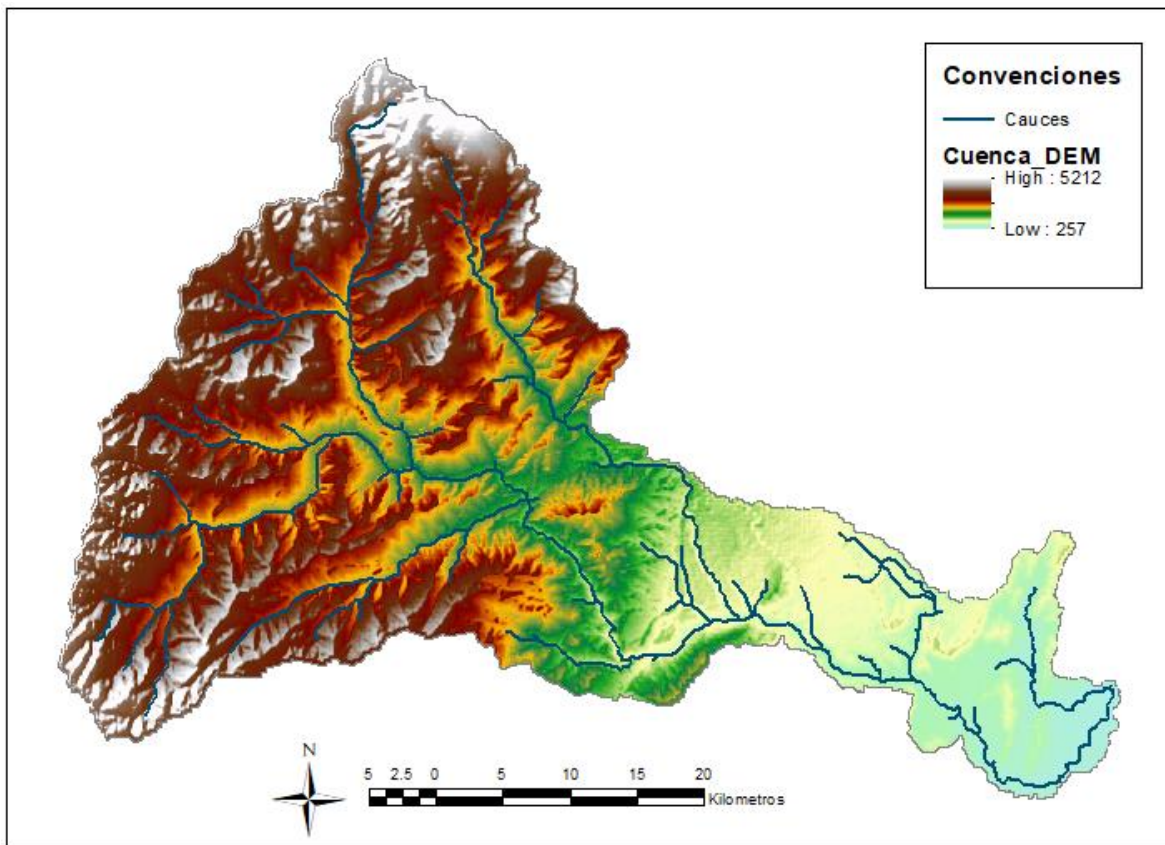
- Para los datos de modelo de terreno y delineamiento de la cuenca, se utilizó información en formato Raster .TIFF de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM en inglés), disponibles a través del Consorcio para la Información Espacial CGIAR-CSI. La resolución de esta información es de aproximadamente 92mx92m por pixel.
- A través de la biblioteca en línea de ArcGIS y de los servicios de mapas y entidades (WMS y WFS en inglés) del Instituto Geográfico Colombiano Agustín Codazzi (IGAC), se obtuvo información de los asentamientos urbanos dentro del área de interés de la cuenca mayor del río Coello.
- Mediante los servicios de entidades (WFS) del Servicio Geológico Colombiano fue posible la obtención de información geológica del área de interés.
- Para el cálculo de la precipitación interceptada, se obtuvo información de los servidores FTP del proyecto NASA Earth Observations sobre el índice de área de hojas (LAI en inglés) y del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). La resolución espacial de esta información es de 0.1°, equivalente aproximadamente a un pixel de 11km x 11km de tamaño.
- Se obtuvo información de caudal medio diario en metros cúbicos por segundo, y de nivel en metros de las estaciones hidrológicas Payandé, Puente Carretera, Puente La Bolívar, El Carmen, Puente Luisa, Bocatoma Ibagué y Yuldaima, de propiedad del IDEAM, mediante su página web Observatorio de Aguas Superficiales. Los registros no se encuentran completos, de tal manera que solo se tendrá en cuenta la información continua completa.

5.3. Tratamiento de Datos

A partir de la información del modelo de elevación digital (DEM) y utilizando el software ESRI ArcGIS 10.5, se realizó el cálculo de los mapas de dirección de flujo y de acumulación de la escorrentía mediante el módulo hidrológico del toolbox *Spatial Analyst Tools*.

Con esta información de acumulación de flujo y mediante álgebra de mapas fueron obtenidos los cauces principales, en los cuales se tendrá en cuenta el tránsito de crecientes (véase Ilustración 13).

Ilustración 13. Cauces principales y modelo de terreno de la cuenca de estudio.



La información sobre los asentamientos poblados obtenida originalmente como entidades tipo polígono en archivos shapefile debió convertirse primero a formato Raster TIFF para así poder ser utilizado en la modelación hidrológica.

Con base en la información geológica obtenida del Servicio Geológico Colombiano se realizó la clasificación del terreno de la cuenca en los 7 diferentes tipos de procesos, según requiere el modelo TAC^{D2}.

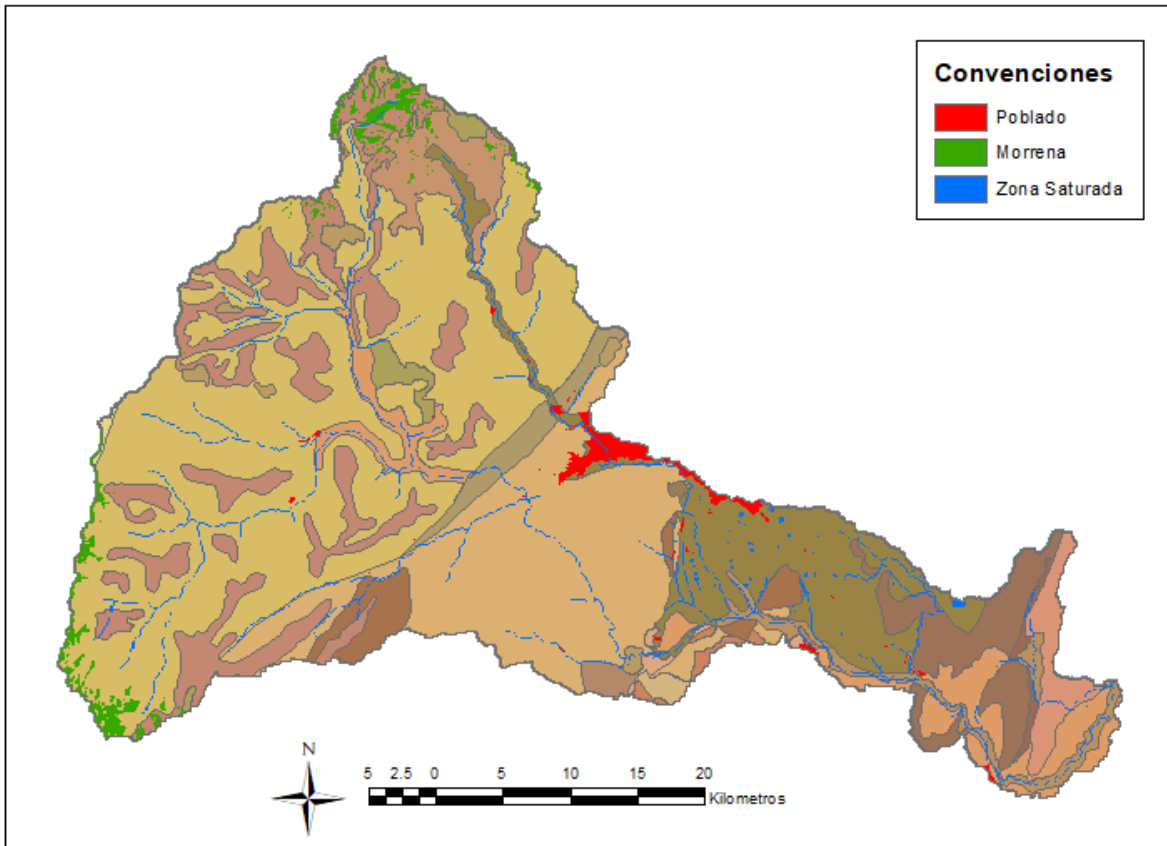
Un caso especial de la clasificación del terreno se realizó para la identificación de las morrenas, es decir, del terreno con depósitos irregulares de diferentes tamaños de roca producto de procesos erosivos glaciales. La principal característica topográfica de los depósitos morrénicos es la forma del valle en U, a diferencia de la erosión aluvial o causada por ríos, la cual forma un valle en V. Adicionalmente, los procesos erosivos glaciales se produjeron hace millones de años a altitudes por encima de 3500 msnm. Con esto en cuenta y mediante álgebra de mapas, se definió que aquellos terrenos con altitudes superiores a 3600 msnm y con una pendiente media menor a 12° correspondían a un depósito morrénico. Una inspección visual mediante visualización 3D del modelo de terreno verificó la forma del valle para las zonas encontradas anteriormente.

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta las zonas en donde el suelo está completamente saturado, correspondientes a las corrientes de agua, lagos, lagunas y embalses. Dicha información se digitalizó a partir de información satelital de OpenStreetMap, así como los cauces de flujo obtenidos anteriormente mediante la acumulación del flujo.

Los datos de caudal y nivel para el punto de descarga fueron obtenidos de información de estaciones meteorológicas del IDEAM. En particular, la estación hidrológica limnimétrica Payandé fue utilizada para los procesos de calibración y validación de la información de la cuenca, ya que era la que se encontraba más aguas abajo. No obstante, el modelo tiene en cuenta la ubicación de la estación a través del mapa *RunoffSt.map*, de tal forma que los resultados del modelo son comparables con los datos observados en Payandé.

La información obtenida sobre el índice de área de hojas (LAI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) fueron procesados para recortar únicamente la zona de estudio y para coincidir con el sistema de coordenadas y el tamaño de pixel del proyecto.

Ilustración 14. Asentamientos poblados e información geológica de composición del suelo.



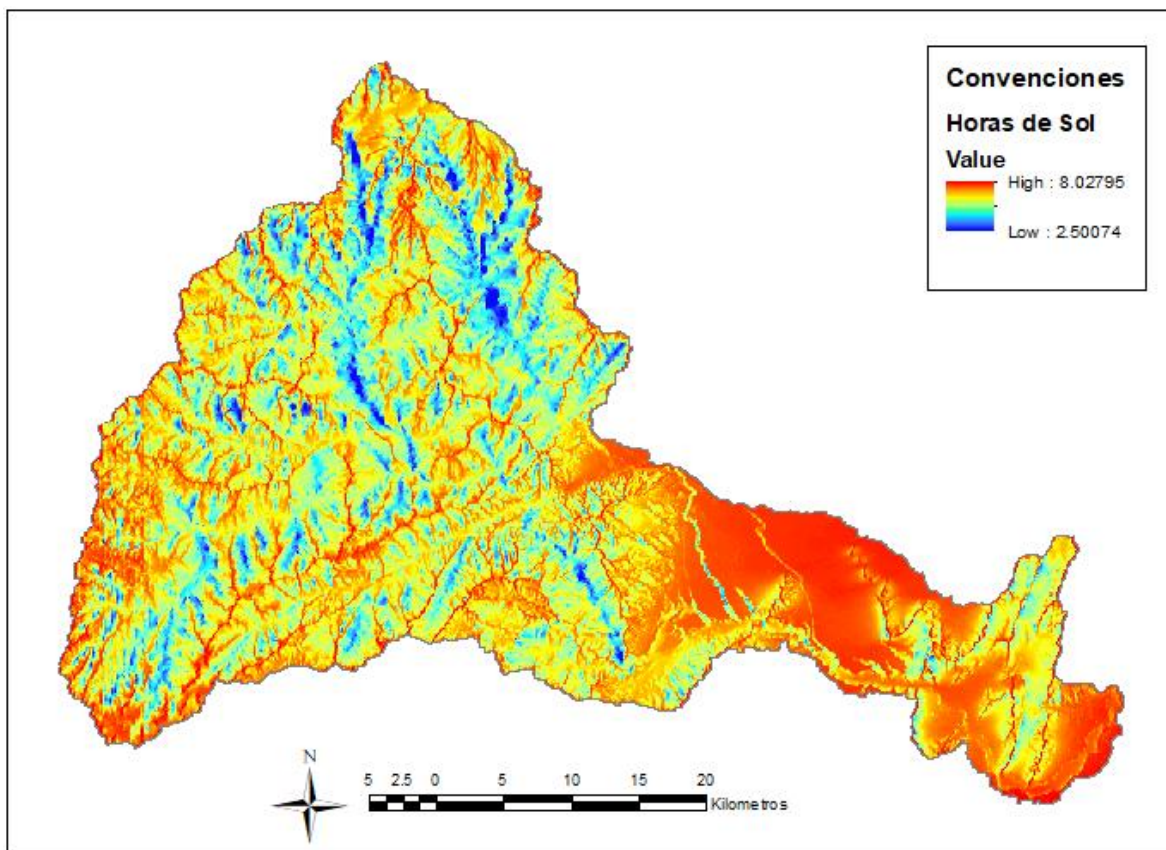
En cuanto a los datos de precipitación y temperatura, el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) pone a disposición académica e investigativa muchos *Datasets* de información satelital, por lo que para este proyecto se utilizó información de reanálisis de Modelos de Circulación Global (GCM en inglés). La información espacialmente distribuida de precipitación y de temperatura fue descargada del conjunto de datos ERA-Interim, del subconjunto de datos de superficie a nivel diario, con una resolución espacial de 0.125° (aproximadamente $13.8 \text{ km} \times 13.8 \text{ km}$ cada pixel) en formato NetCDF. Este proceso de descarga fue posible a través de un script propio en Python que utiliza la interfaz de usuario de ECMWF y que optimiza el proceso.

Con el fin de ejecutar los comandos espaciales de PCRaster, se necesita que para cada instante de tiempo se tenga un mapa en formato MAP. Por lo anterior, fue necesario crear un script en Python que extraiga y genere los mapas de Precipitación y de Temperatura en el formato requerido desde el archivo en formato NetCDF.

Para obtener los datos de evapotranspiración potencial, según lo mencionado previamente, se utilizó la fórmula de Turc-Wendling. Para aplicar esta fórmula, es necesario el dato de radiación solar, el cual fue calculado según el procedimiento sugerido por el informe FAO-56 “Evapotranspiración del cultivo”, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Para calcular la radiación solar se requiere el tiempo de exposición solar en un día para cada una de las celdas del Raster. Para el cálculo de este tiempo de exposición, se utilizó la herramienta “Area Solar Radiation” del software ArcGIS, la cual requiere como información de entrada el modelo digital de terreno (véase Ilustración 15).

Ilustración 15. Promedio anual de horas de sol por día, en horas. Fuente: Elaboración Propia.



5.4. Adaptación del Software TAC^D a PCRaster 4.1 en Python: TAC^D2

Durante la adaptación del software TAC^D (en PCRaster V2) al PCRaster 4.1.0 Python Framework, se destacan los siguientes puntos:

- **Obsolescencia del diccionario de parámetros:**

En PCRaster V2, se permitía utilizar una funcionalidad llamada diccionario de parámetros, mediante la cual un conjunto de parámetros se podía cargar desde un archivo de texto de la siguiente forma (archivo *para_ini.tbl*):

```
parameter pStartYear 2000
parameter pStartDay 1
parameter pStartPeriod 1
parameter pEndPeriod 3285
parameter pWindA 1.01
parameter pWindB 0.01
parameter pPrecRadius 15000
parameter pPrecIDWPart 0.8
parameter pTT_urban -0.1
...
```

Mediante PCRaster, el comando que carga este diccionario en la versión 2 es:

```
aParameter = [pStartYear, pStartDay, pStartPeriod, pEndPeriod, ...];
parameter[aParameter]= indexscalar(C:\archivos\para_ini.tbl);
```

Lamentablemente, esta funcionalidad se declaró obsoleta para versiones posteriores, por lo cual fue necesario reemplazar su funcionalidad. Para ello, se utilizó el acceso a archivos planos que tiene integrado Python 2.7.13, de la siguiente forma:

```
self.parameter=dict()
with open("para_ini.tbl", "r") as f:
    for line in f.readlines():
        data=[x for x in line.strip().split()]
        self.parameter[data[1]]=float(data[2])
```

- **Cálculo del día Juliano:**

Dentro del cálculo de los parámetros de exposición solar y radiación solar según el método FAO, el modelo TAC^D2 requiere que cada intervalo de tiempo, que está en días, se tenga en cuenta en el calendario juliano. Para la fuente de datos utilizada, se realizaron mejoras en el cálculo del día Juliano mediante la biblioteca para manejar operaciones con fechas, llamada *calendar*, que permite saber si un año es bisiesto en una línea de código: `isLeapYear = calendar.isleap(self.sYear)`.

- **Lectura de mapas y series de datos:**

Dependiendo de si la lectura de mapas se realiza en la inicialización de variables (*binding* o *initial*) o en la ejecución iterativa del modelo (*dynamic*), la manera de cargar los mapas en el modelo cambia. Para la lectura de mapas durante la inicialización, PCRaster permite mapas con extensión “.map” mediante la asignación directa de la ruta donde está almacenado el mapa. Para el módulo iterativo de ejecución, PCRaster lee y escribe los mapas a través de los comandos *timeinput* y *report* respectivamente, los cuales guardan mapas en archivos numerados según el paso de tiempo (*timestep*) en el cual fueron escritos. La lectura de archivos de series de tiempo se realiza con la asignación directa desde la ruta del archivo, mientras que su escritura se realiza utilizando el comando *timeoutput*. A continuación, un ejemplo de cada una de estas instrucciones:

```
binding:  
sCumPrec = TACD2\output_files\tac\CumRain.map;  
msPotET = TACD2\climatic_data\etp\ET;  
...  
dynamic:  
sPotET = timeinput(msPotET);  
...  
report tsPotET = timeoutput (1, sPotET);  
report (cReportMaps) sCumPrec = if (time() ge cStartPeriod, sCumPrec  
+ (if (sTemp <= cTT, sPrec * cSFCF, sPrec)), 0);
```

En el nuevo PCRaster Python Framework, la lectura y escritura de mapas debe realizarse mediante los comandos *readmap* y *report*. Para ello, la sintaxis cambió un poco, pues se debe enviar a la función *readmap* el nombre del archivo en cada una de las iteraciones.

Adicionalmente, para la escritura de archivos de series de datos, existe ahora una clase particular para esto llamada `TimeoutputTimeseries`. A continuación, se observa un ejemplo del mismo fragmento de código, pero ahora con el `PCRaster Python Framework`:

```
def initial(self):
    ...
    self.tsTemp = TimeoutputTimeseries("tsTemp", self, nominal(1),
        noHeader=False)

def dynamic(self):
    ...
    a = int(self.currentTimeStep())
    # parsing to the required name
    a2 = "".join([self.msPotET, str(a//1000).zfill(4), ".",
        str(a%1000).zfill(3)])
    self.sPotET = readmap(a2)
    self.tsPotET.sample(self.sPotET)
    self.sCumPrec = self.sCumPrec + ifthenelse(self.sTemp <=
        self.cTT, self.sPrec * self.cSFCF, self.sPrec)
    if self.cLengthPeriod + 1 == self.currentTimeStep():
        self.report(self.sCumPrec, "sCumPre")
```

- **Corrección de la implementación de la onda cinemática:**

Entre los muchos cambios y arreglos a los que tuvo lugar en `PCRaster` desde su versión 2 hasta la versión 4.1.0, se encuentra el arreglo de un bug en el cálculo de la onda cinemática con la ecuación de Manning a partir de la versión 4.0.1. Los programadores advierten en su página que se espera que los cálculos de tránsito de crecientes necesariamente van a cambiar debido a la corrección mencionada.

- **Cambio del paradigma de programación:**

El lenguaje de scripts de `PCRaster` fue creado en un principio bajo el paradigma de la programación imperativa, la cual usa instrucciones para cambiar el estado de un programa.

Por otra parte, Python es un lenguaje de programación orientado a objetos y como tal, permite la implementación de software que aplica la abstracción, el encapsulamiento y el polimorfismo.

En este sentido, el desarrollo de TAC^D2 tuvo en cuenta estas directrices para la adaptación del modelo anterior, al nuevo paradigma:

```
from pcraster import *
from pcraster.framework import *
from pcraster.collection import *
from copy import deepcopy

class TACD2(DynamicModel):

    def __init__(self, cloneMap):
        ...

    def initial(self):
        ...

    def dynamic(self):
        ...

def main():
    myModel = TACD2("../\gisdaten\catchment200")
    dynModelFw = DynamicFramework(myModel, lastTimeStep=3285,
firstTimestep=1)
    dynModelFw.setQuiet(quiet=False)
    dynModelFw.run()

main()
```

Esta nueva estructura permite reutilizar y extender de una manera más sencilla el modelo a nuevas aplicaciones en un futuro.

- **Definición de una nueva jerarquía de carpetas:**

Para el modelo TAC^D2 fue necesario definir una estructura jerárquica de carpetas y archivos, de tal modo que sea claro dónde se almacenan los estados iniciales, los mapas de entrada, los scripts y los resultados del modelo.

Para el modelo se tienen 4 carpetas:

Carpeta INI: Guarda los estados iniciales de nivel freático (GW_ini.map), tanque superior (US_ini.map), tanque inferior (LS_ini.map), humedad del suelo (SM_ini.map), almacenamiento por depresiones micro-topográficas (MTD_ini.map) y de precipitación

interceptada (IntPrec_ini.map). Adicionalmente, se guarda la información temporal de la estación de medición de caudal (tsQ_obs.tss) y los parámetros para ejecución del modelo (para_ini.tbl).

Carpeta MAPS: Guarda la información espacial necesaria para la ejecución del modelo. En la raíz de esta carpeta se almacenan los mapas que no varían a lo largo del tiempo, tales como el mapa de definición o “clone” (clone.map), el modelo de elevación del terreno (dem.map), la red de drenaje local (Idd01.map), el punto de descarga superficial de la cuenca (EndPit.map), el punto de descarga subterránea de la cuenca (nOut.map), la clasificación de los procesos hidrológicos (RG.map), las horas de sol diarias por celda (SunHours.map), los asentamientos urbanos (urban.map), los bosques (forest.map), los cauces de drenaje (Streams.map), el coeficiente de rugosidad del cauce (Manning.map) y su ancho (bWidth.map) y la ubicación de estaciones de muestreo de caudal (RunoffSt.map).

Para aquella información que varía espacial y temporalmente, como lo es la precipitación, la temperatura, el índice de área de hojas y la cobertura, se tiene una carpeta para cada una. En el caso de la cobertura vegetal (COV) y el índice de área de hojas (LAI), se tiene un mapa por cada mes del año, mientras que para la precipitación y la temperatura se tiene un mapa por cada día, numerados de la forma *P00000##.###*, donde los # corresponden al día en ejecución desde una fecha inicial definida.

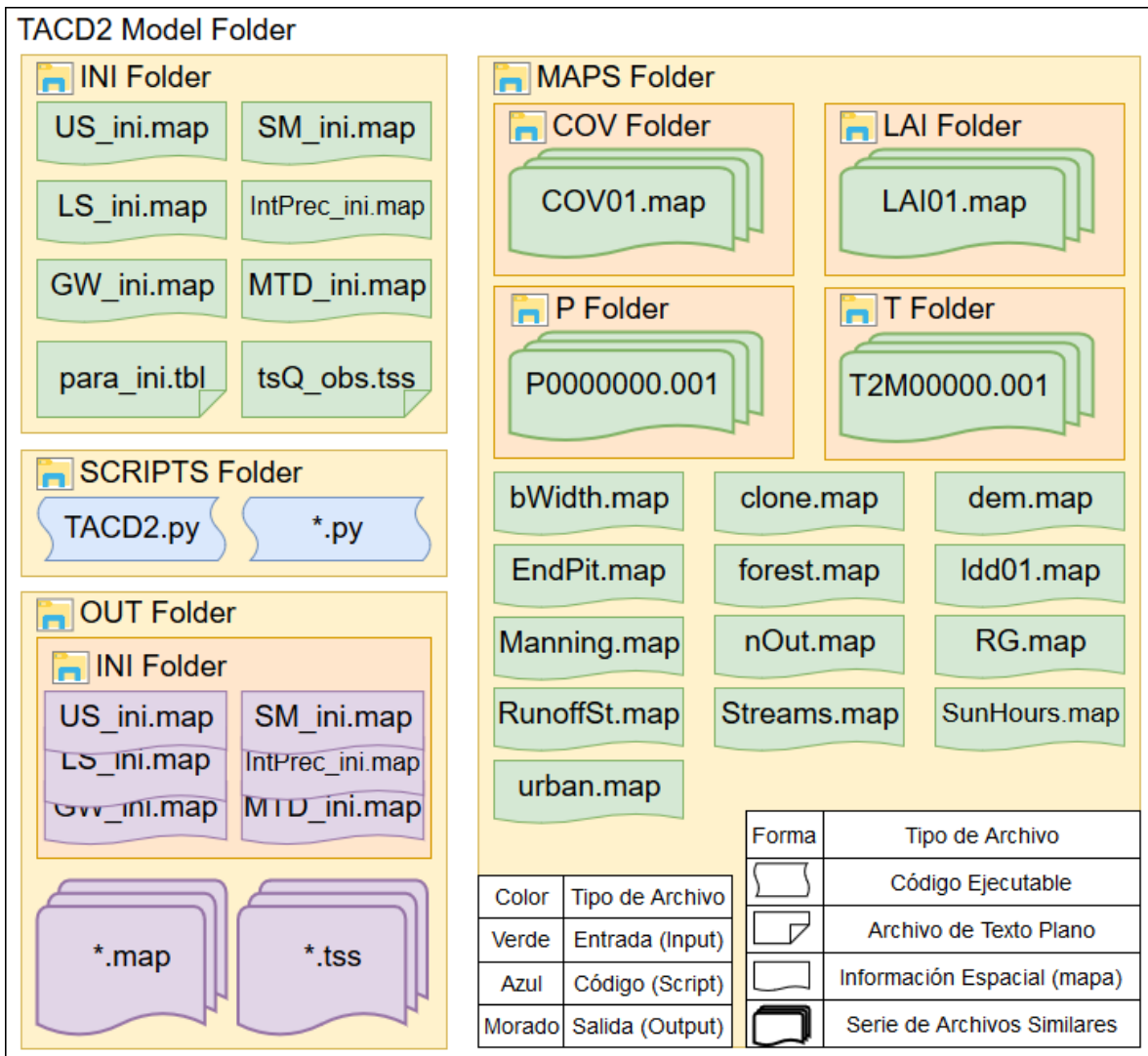
Carpeta OUT: Guarda los resultados de la modelación, según lo que se desee guardar. En general, los resultados pueden ser de tipo espacial o de tipo temporal. Para estos últimos, su almacenamiento se da en un archivo con extensión TSS que puede ser abierto con cualquier editor de textos o con el software de visualización de PCRaster (AGUILA). Para los datos espaciales, se almacenan con un formato similar al de la precipitación, cuyo número dependerá del último paso de tiempo ejecutado. Adicionalmente, dentro de este directorio aparece una nueva carpeta INI, donde se almacena el estado final del modelo, de la misma forma que se explicó anteriormente.

Carpeta SCRIPTS: Guarda los scripts en Python utilizados para los diferentes pasos intermedios, tales como el de descarga de información en formato NetCDF, el de

transformación de mapas de TIF a MAP y de NetCDF a MAP, el modelo TAC^D2 y la validación del archivo NETCDF.

En la Ilustración 16 se muestra esquemáticamente la jerarquía de carpetas mencionada previamente, destacando que ésta fue escogida teniendo en cuenta los tipos de archivos requeridos y previendo una organización simple para una persona que quiera utilizar el modelo y que no esté familiarizada con los requerimientos de este.

Ilustración 16. Estructura de carpetas del modelo TAC^D2. Fuente: Elaboración Propia.



5.5. Validación del Modelo TAC^{D2} con la Cuenca de Brugga

Para la validación del modelo TAC^{D2}, se utilizará la información original con la que se obtuvo el modelo, es decir, la cuenca del río Brugga, en Alemania. Esta información de entrada del modelo corresponde a los archivos mencionados en la sección Información Recopilada.

Luego de ejecutar el modelo TAC^{D2} y el modelo original TAC^D, se compararon mediante los estadísticos de bondad de ajuste mencionados en la sección 2.2 *Calibración de un Modelo Hidrológico. Funciones Objetivo* los resultados a continuación en la Tabla 1. Se destaca el hecho de que, para esta comparación, fue necesario programar algunas subrutinas en lenguaje Python que leyeran los archivos a comparar y calcularan los estadísticos de bondad de ajuste. Cada una de las filas en esta tabla se refiere a una serie de resultado del modelo TAC^D según se mencionó en la sección y como tal, es necesario que sus valores correspondan a los obtenidos en el modelo adaptado TAC^{D2} (véase 4. Modelo TAC^{D2}), como por ejemplo el caudal en la estación de medición (Q_sim).

Adicionalmente, algunos de los archivos de resultados tienen más de una serie de datos almacenada pues almacenan las distintas clasificaciones hidrológicas pertinentes, como, por ejemplo, la humedad del suelo (SoilMoisture).

Tabla 1. Resultados de comparación entre en modelo TAC^D y el modelo TAC^{D2}

Archivo TAC ^D	Archivo TAC ^{D2}	# Serie	MAE	RSME	NSE
tsWaterContent	tsWaterContent.tss	1	0.00020333	0.00028125	1.00000000
tsMeltWater	tsMeltWater.tss	1	0.00001332	0.00021266	0.99989644
SoilMoisture.tss	tsSoilMoisture.tss	1	0.19480219	0.00859755	0.99999734
SoilMoisture.tss	tsSoilMoisture.tss	2	0.24830216	0.01031128	0.99999521
SoilMoisture.tss	tsSoilMoisture.tss	3	0.14530094	0.00782969	0.99999740
SoilMoisture.tss	tsSoilMoisture.tss	4	0.00264091	0.00139840	0.99999999
SoilMoisture.tss	tsSoilMoisture.tss	5	0.00544064	0.00151352	1.00000000
snowpack.tss	tsSnowPack.tss	1	0.00366431	0.00119487	1.00000000
Q_direct.tss	tsQdirectStream.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000
potET.tss	tsPotET.tss	1	0.00000001	0.00000488	1.00000000
MeanTemp.tss	tsMeanTemp.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000
MeanRain.tss	tsMeanPrec.tss	1	0.00000003	0.00001300	1.00000000
MeanRain.tss	tsMeanPrec.tss	2	0.00000005	0.00001413	1.00000000
IntPrec.tss	tsIntPrec.tss	1	0.00341840	0.00128071	0.97890642

Archivo TAC ^D	Archivo TAC ^{D2}	# Serie	MAE	RSME	NSE
InterceptET.tss	tsInterceptionET.tss	1	0.00335522	0.00126415	0.97980765
Waterdepth.tss	tsWaterDepth.tss	1	0.00007172	0.00020876	0.99998774
Velocity.tss	tsVelocity.tss	1	0.00086739	0.00072915	0.99998710
US_box.tss	tsUS_box.tss	1	0.02454822	0.00337106	0.99998489
US_box.tss	tsUS_box.tss	2	0.03373685	0.00434355	0.99999736
US_box.tss	tsUS_box.tss	3	0.01552894	0.00301162	0.99999074
US_box.tss	tsUS_box.tss	4	0.00741252	0.00228965	0.99999869
US_box.tss	tsUS_box.tss	5	0.00125934	0.00129561	0.99999835
TotIntoStream.tss	tsTotIntoStream.tss	1	0.00003819	0.00013854	0.99999385
ToRG.tss	tsToRunoffGeneration.tss	1	0.00054517	0.00057276	0.99999492
ToRG.tss	tsToRunoffGeneration.tss	2	0.00055524	0.00053538	0.99999498
ToRG.tss	tsToRunoffGeneration.tss	3	0.00058965	0.00055970	0.99999662
ToRG.tss	tsToRunoffGeneration.tss	4	0.00001501	0.00012877	0.99999999
ToRG.tss	tsToRunoffGeneration.tss	5	0.00001720	0.00012299	0.99999999
ToGW.tss	tsToGW.tss	1	0.00188307	0.00100927	0.99998443
ToGW.tss	tsToGW.tss	2	0.00084444	0.00064516	0.99998675
ToGW.tss	tsToGW.tss	3	0.00117523	0.00075404	0.99999153
ToGW.tss	tsToGW.tss	4	0.00027195	0.00044350	0.99999197
ToGW.tss	tsToGW.tss	5	0.00006407	0.00024028	0.99999994
SOF_IntoStream.tss	tsSOF_IntoStream.tss	1	1.58120274	0.03629462	0.99998779
Q_US.tss	tsQ_US.tss	1	0.01610256	0.00285555	0.99997846
Q_US.tss	tsQ_US.tss	2	0.00448054	0.00149179	0.99998904
Q_US.tss	tsQ_US.tss	3	0.00257936	0.00125122	0.99999044
Q_US.tss	tsQ_US.tss	4	0.00168033	0.00106297	0.99999462
Q_US.tss	tsQ_US.tss	5	0.00007634	0.00030169	0.99999998
Q_SOF.tss	tsQ_SOF.tss	1	0.00432834	0.00176493	0.99999277
Q_sim.tss	tsQ_sim.tss	1	0.00026530	0.00039936	0.99998934
Q_LS.tss	tsQ_LS.tss	2	0.00015173	0.00027221	0.99999248
Q_LS.tss	tsQ_LS.tss	3	0.00001999	0.00009485	0.99999550
Q_LS.tss	tsQ_LS.tss	4	0.00002430	0.00014849	0.99997589
Q_GW.tss	tsQ_GW.tss	1	0.00195040	0.00082614	0.99999215
Pump.tss	tsPump.tss	1	0.00180233	0.00087714	0.99999564
MTD_box.tss	tsMTD_box.tss	1	0.00259909	0.00112443	0.99999981
LS_box.tss	tsLS_box.tss	2	0.00214072	0.00096576	0.99999676
LS_box.tss	tsLS_box.tss	3	0.00033478	0.00062699	0.99998371
LS_box.tss	tsLS_box.tss	4	0.00163817	0.00128340	0.99976956
IntoStream.tss	tsIntoStream.tss	1	2.40527641	0.03808311	0.99998929

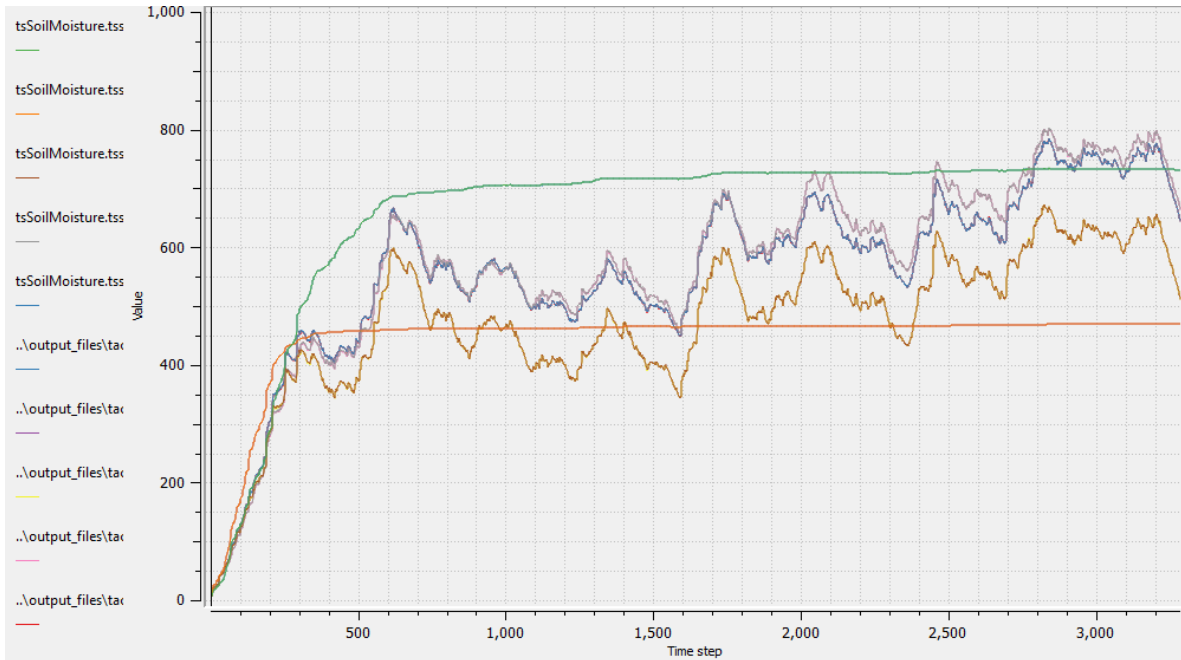
Archivo TAC ^D	Archivo TAC ^{D2}	# Serie	MAE	RSME	NSE
GW_IntoStream.tss	tsGW_IntoStream.tss	1	0.83270444	0.01811151	0.99998749
GW_box.tss	tsGW_box.tss	1	0.04979152	0.00417789	0.99999159
ActET.tss	tsActET.tss	1	0.00330038	0.00121659	0.99992259
Routing_P.tss	tsRoutingPercent.tss	1	0.17288919	0.00754088	0.99999357
EndStorage.tss	tsEndStorage.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000
EndPrec.tss	tsEndPrec.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000
EndIntoStream.tss	tsEndIntoStream.tss	1	4942.09592	1.34305781	0.99999851
EndInterceptET.tss	tsEndInterceptET.tss	1	88491.7473	5.45141332	0.99474804
EndActualET.tss	tsEndActualET.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000
CheckRouting.tss	tsBalanceRouting.tss	1	28435.9124	3.25354301	0.99999570
Check.tss	tsBalance.tss	1	0.00000000	0.00000000	1.00000000

De la tabla se destaca que todas las series tienen estadísticos de bondad de ajuste, en especial el Coeficiente de Nash-Sutcliffe, que preferiblemente debe ser cercano a 1, pues indicaría coincidencia exacta de los datos modelados con los datos observados.

A continuación, se muestran algunas de las series calculadas anteriormente. Cabe resaltar que la mayoría de ellas presentan coincidencia casi exacta y por tanto está la serie de resultados con el modelo TAC^D frente a la serie de resultados obtenidos con el modelo TAC^{D2}. La razón de esta comparación, para recordar al lector, corresponde a verificar que el modelo TAC^{D2} fue adaptado correctamente a partir de su versión original TAC^D y que por tanto sí permite representar el comportamiento original de la cuenca de Brugga. En la Ilustración 17 se muestra la serie de tiempo de contenido de humedad, dado que se puede observar la variación en el tiempo de la humedad promedio en cada conjunto de celdas con la misma clasificación hidrológica.

Se observa en la Ilustración 18 que son perceptibles diferencias entre la serie de precipitación interceptada del modelo TAC^D y del modelo adaptado TAC^{D2}. Esto puede tener como causa el cambio de lenguaje de programación, pues Python permite una precisión un poco mayor al script original del modelo TAC^D en PCRaster. En las demás ilustraciones, se puede observar que las series de los modelos TAC^D y TAC^{D2} se traslapan.

Ilustración 17. Gráfica para validación del modelo TAC^D2: Serie SoilMoisture



Cabe mencionar que estas ilustraciones fueron realizadas por medio del software por defecto de PCRaster para visualizar archivos espaciales (extensión map o series de mapas 000...999) o archivos con series de datos (extensión TSS). Este software se llama *aguila* y se ejecuta desde el símbolo del sistema en Windows (*cmd*) o desde la consola *Bash* en Linux.

Ilustración 18. Gráfica para validación del modelo TAC^D2: Serie IntPrec

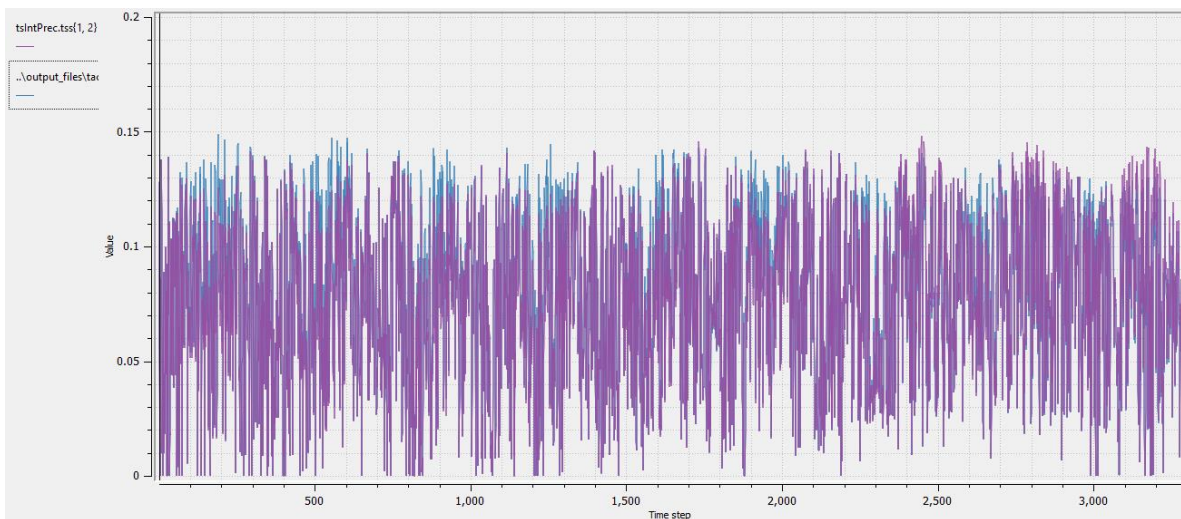


Ilustración 19. Gráfica para validación del modelo TAC^{D2}: Serie ActET

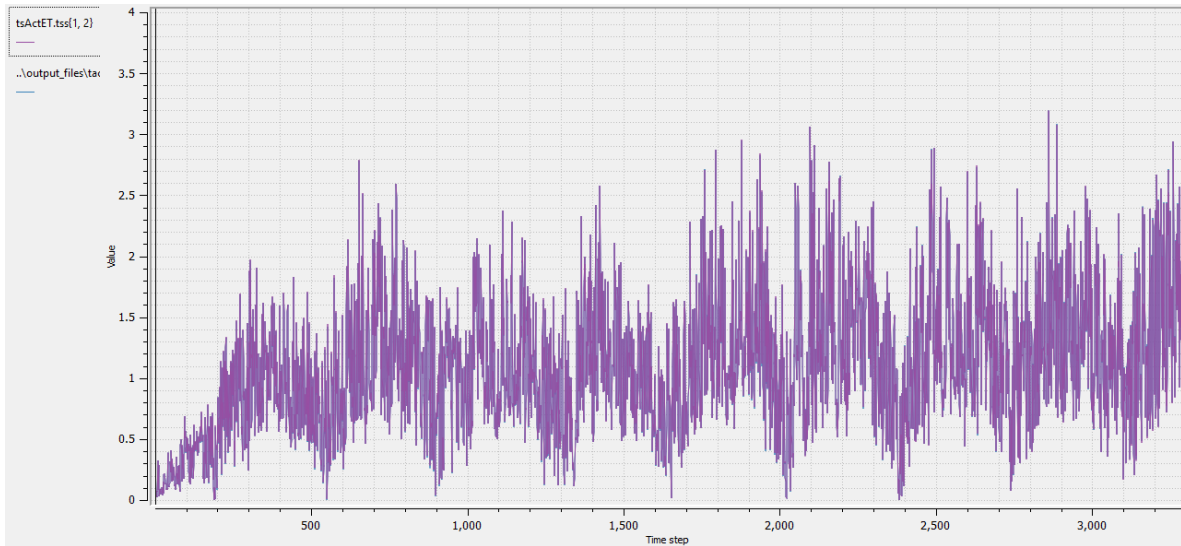
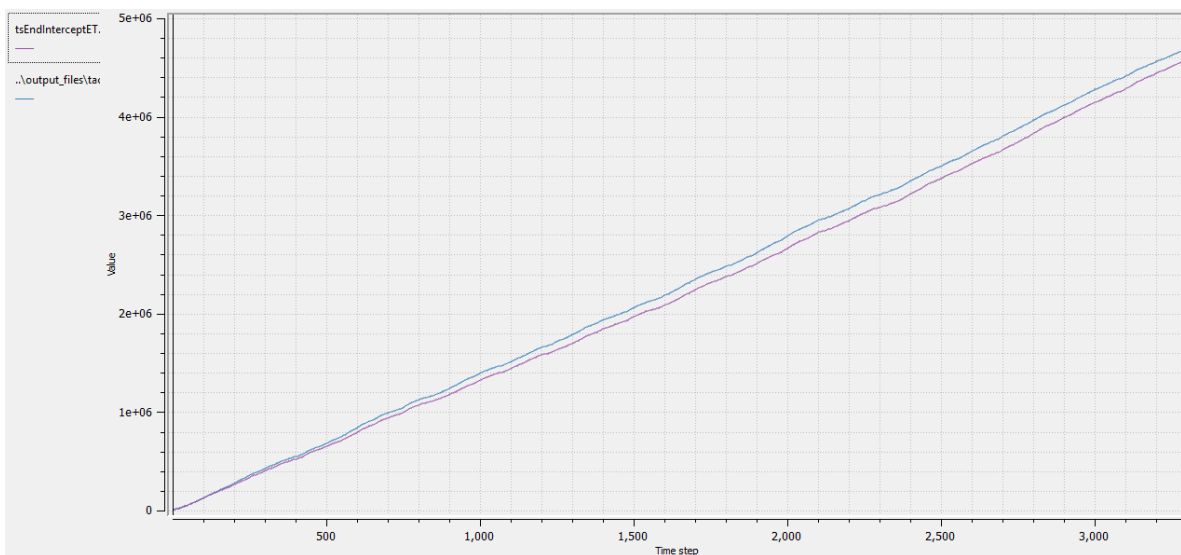


Ilustración 20. Gráfica para validación del modelo TAC^{D2}: Serie EndInterceptET



5.6. Adaptación y Calibración del Modelo TAC^{D2} a la Cuenca del Río Coello

Una vez preparados los archivos de entrada del modelo, se llevó a cabo el proceso de calibración. Para ello, se definió la función objetivo a calibrar como el error cuadrático medio entre el caudal observado en la estación limnimétrica y el caudal simulado por el modelo TAC^{D2}.

Ya teniendo definida la forma en la cual valorar la bondad de ajuste entre el modelo y los datos reales de la cuenca, se procedió a definir una metodología de calibración del modelo TACD2 que fuera efectiva. La efectividad de la calibración del modelo tuvo en cuenta principalmente el tiempo computacional de cálculo, ya que el tamaño de la cuenca y la cantidad de celdas (píxeles) es considerable y esto repercute en el tiempo que tarda un computador en calcular cada paso de tiempo del modelo. A manera de referencia se destaca que el tiempo de cómputo del modelo TAC^D2 es de aproximadamente 2 minutos ejecutando tres meses de modelación en la cuenca del río Coello con un computador cuyo procesador permite 4 hilos a 2GHz. Para ejecutar una vez todo el tiempo de modelación escogido, se requiere aproximadamente una hora con la máquina mencionada previamente.

Dado que para la calibración es necesario ejecutar *miles* de ejecuciones del modelo con el fin de llegar a parámetros adecuados, el tiempo de modelación es una variable muy importante y debe ser reducida al máximo. Para ello, se procede a utilizar la biblioteca científica de Python *scipy*, la cual cuenta, entre otras, con una función *minimize()*, que permitirá encontrar de una manera eficiente los parámetros del modelo que minimizan el error cuadrático medio. Un esquema conceptual del código utilizado para ello se muestra a continuación:

```
class TACD2(DynamicModel):
    ...(definición del modelo)...

def modelExec(Length):
    ...(crea la clase TACD2 y ejecuta 1 vez el modelo Length días)...

def calFunc(params):
    ...(cálculo del error entre caudal observado y modelado)...

def calibrate():
    for i in range(calibrationSteps):
        ...(preparar nuevos parámetros)...
        while not sol.success:
            sol = optimize.minimize(calFunc, params)
            ...(guardar patrones preparar nuevos parámetros)...

calibrate()
```

Con el fin de analizar diferentes esquemas de calibración, se plantearon 2 posibles aproximaciones para la calibración:

1. Utilizando los datos de caudal observado en la estación Payandé, se procede a calibrar la cuenca completa a partir parámetros iniciales.
2. Utilizando los datos de caudal observado de subcuencas del río Coello (estaciones Puente Carretera, Puente La Bolívar, El Carmen, Puente Luisa, Bocatoma Ibagué y Yuldaima), se procede a calibrar cada una de las subcuencas de manera descendente en altitud.

Se optó por ejecutar la primera aproximación, es decir, utilizar únicamente los datos de caudal observado en la estación Payandé. La Tabla 2 resume los principales parámetros de cada una de las estaciones indicadas, consignados en el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) del IDEAM, y la Ilustración 21 muestra la ubicación de cada estación en la cuenca del río Coello. La información no disponible en la plataforma del IDEAM en cada una de las estaciones fue marcada como dato nulo en la tabla (“-”). Se destaca el orden presentado en la tabla, el cual es ascendente en la altitud a la que se ubican las estaciones.

Ilustración 21. Ubicación de las estaciones hidrológicas de la zona de estudio. Fuente: Elaboración Propia

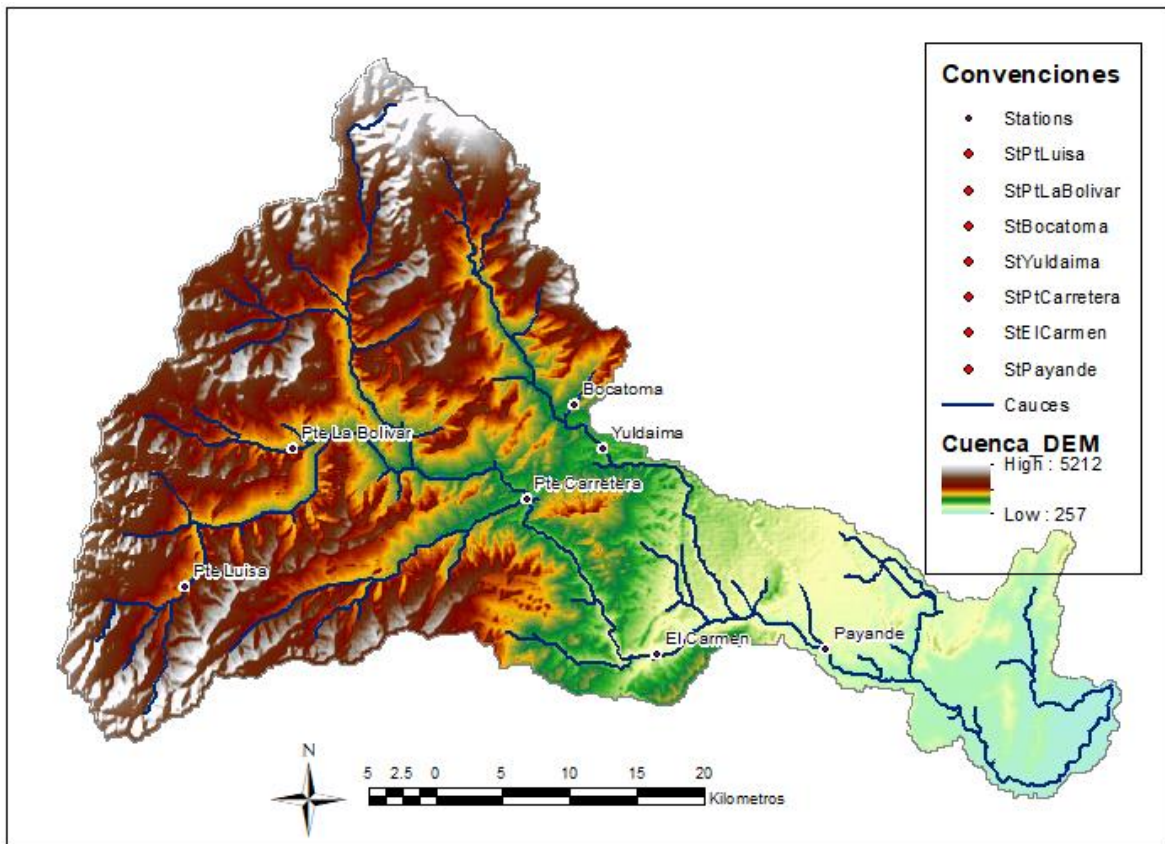


Tabla 2. Información disponible en el IDEAM sobre las estaciones hidrológicas en la cuenca del río Coello.

Nombre de Estación	Altitud de la Estación (msnm)	Código en el SIRH	Área de subcuenca (km ²)	Pendiente media de la cuenca (%)	Elevación media de la cuenca (msnm)
Payandé	560.0	21217070	1.528,97	47,08	2.415,4
El Carmen	821.0	21217200	1.096,83	48,57	2.622,86
Puente Carretera	1156.0	21217120	797,31	48,54	2.805,56
Yuldaima	1220.0	21217260	-	-	-
Bocatoma	1550.0	21217250	-	-	-
Puente La Bolívar	1907.0	21217280	81,17	48,59	2.840,46
Puente Luisa	2205.0	21217140	-	-	-

Durante el proceso de calibración de los parámetros, el tiempo de máquina necesario para realizar esta labor fue una gran limitante en el proceso. La Tabla 3 muestra el progreso en el error cuadrático medio del modelo en su etapa de calibración, a medida que se realizan las iteraciones del módulo *minimize*. Se resalta en negrita el mínimo error cuadrático medio encontrado en el modelo. Los resultados y su respectivo análisis serán discutidos en detalle en el Capítulo 6. En este proceso, se deben calibrar en total 67 parámetros, de los cuales la mayoría corresponden a constantes relacionadas con la generación de escorrentía, es decir, con el modelo de tanques (capacidad de tanque, percolación, infiltración y flujo lateral a los demás tanques).

Tabla 3. Progreso de la calibración.

Iteración	Tiempo acumulado (h)	Error RSME (m ³ /s)
1	5.2	4.89523
2	10.4	4.89523
3	15.6	4.44219
4	20.8	4.43283
5	26.0	5.11258
6	31.2	4.45158
7	36.4	4.43398
8	41.6	4.43284
9	46.8	4.43281
10	52.0	4.43282

11	57.2	4.43282
12	62.4	4.43282
13	67.6	4.43537
14	72.8	4.43313
15	78.0	4.43282
16	83.2	4.43282
17	88.4	4.43282
18	93.6	4.43285
19	98.8	4.43285
20	104.0	4.43285
21	109.2	4.98308
22	114.4	4.45436
23	119.6	4.43370
24	124.8	4.43283

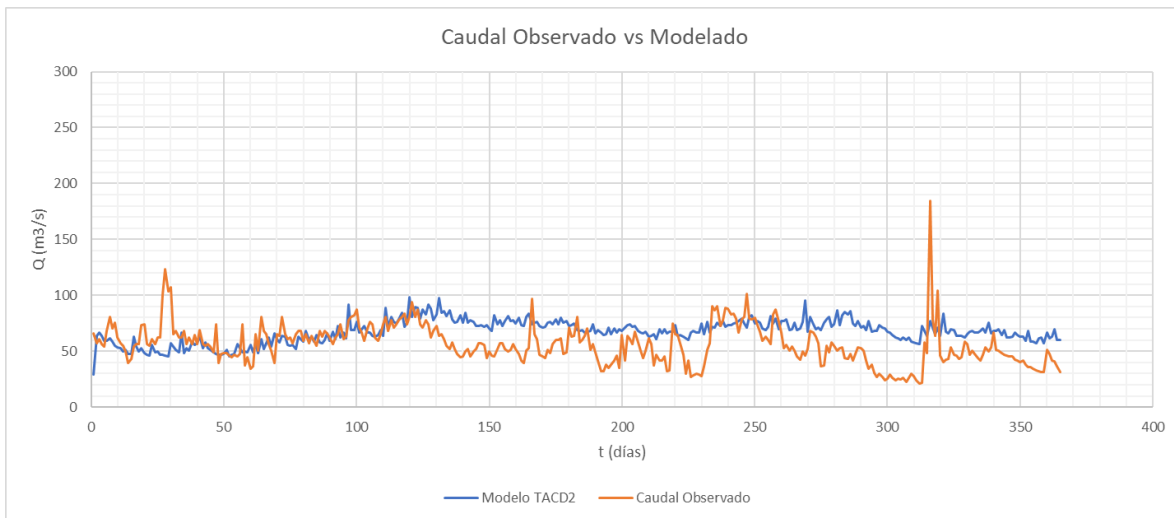
6. Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos luego del experimento de calibración, en el orden en el cual se detallaron los respectivos procesos hidrológicos y como se están representando en el modelo TAC^D2.

6.1. Resultados y Conclusiones

Como paso principal se encuentra verificar el resultado de caudal calculado en la estación Payandé en comparación con el caudal observado en la estación Payandé. Para ello, se utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe NSE, el cual da como resultado un valor de -0.57296. No obstante, se observa en la Ilustración 22 que la tendencia central de la curva corresponde a la tendencia media de la gráfica, aunque la variabilidad de las dos series es muy diferente. Se requiere un proceso de calibración más extenso para asegurar un mejor ajuste.

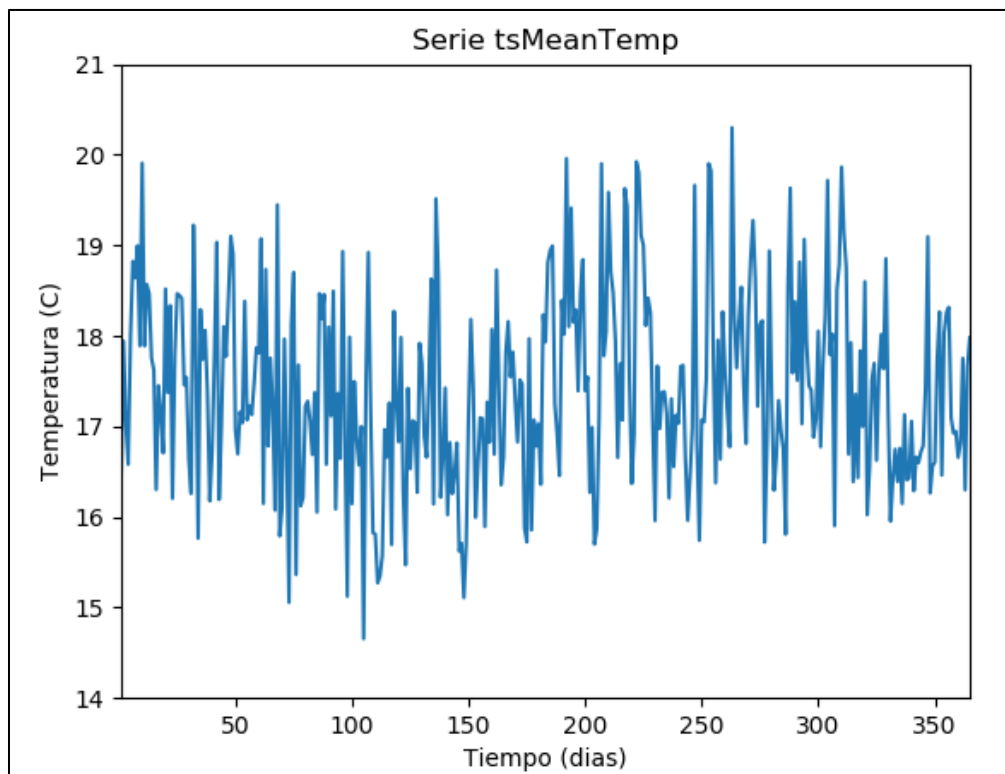
Ilustración 22. Comparación entre el caudal modelado y el observado en la estación Payandé.



Posteriormente, se procede a verificar los principales aspectos del modelo, en relación con los componentes mostrados en el capítulo 4.

Debido a que la temperatura media de la región presenta un régimen de temperaturas tropical, se esperaba que el módulo de nieve de modelo no tuviese efecto. Lo anterior se comprobó al validar que la serie de nivel promedio de nieve (*tsSnowPack.tss*) se encuentra en ceros durante todo el tiempo de modelación. También se puede validar que no se presentó congelamiento en la cuenca al verificar la serie de temperatura promedio, la cual se muestra en la Ilustración 23 y está en todo momento por encima de los 14°C.

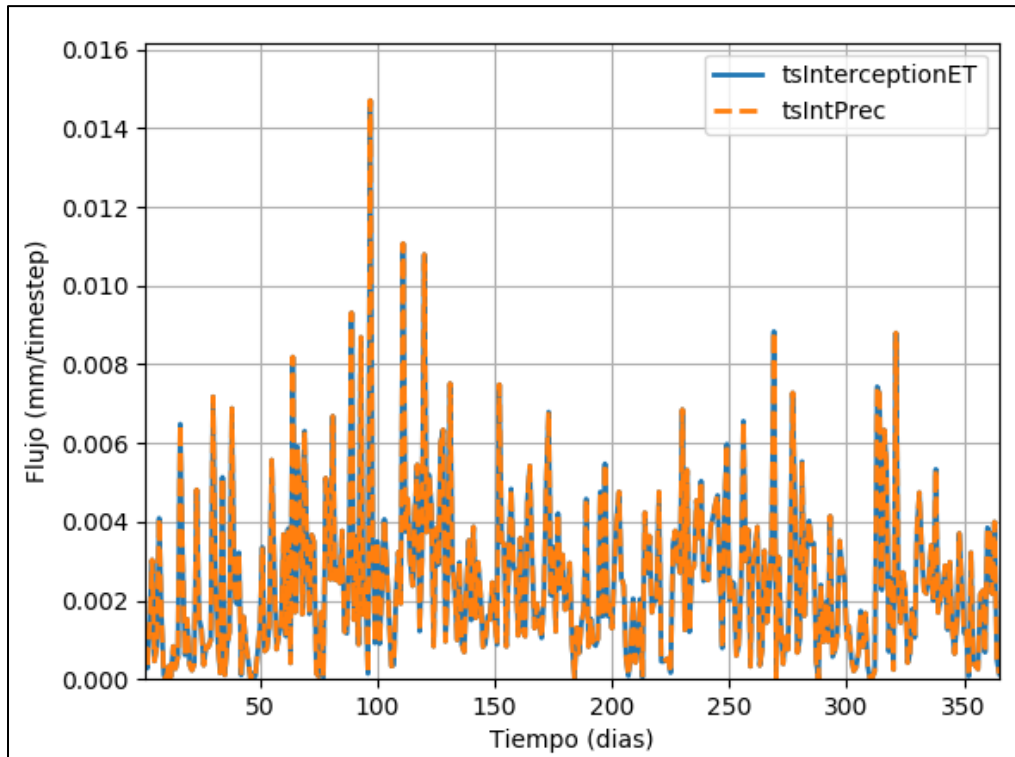
Ilustración 23. Serie de temperatura media de TAC^{D2}: *tsMeanTemp*



Ahora bien, analizando el siguiente proceso en la secuencia, que corresponde a la interceptación del flujo, la Ilustración 24 muestra la serie *tsInterceptionET*, que corresponde a la evapotranspiración ocurrida por efecto de la interceptación. Por otra parte, se puede observar en la misma ilustración la serie *tsIntPrec*, que corresponde a la suma de la precipitación “nueva” que llega al tanque de interceptación (*sIntPrecNew*) y la precipitación remanente del proceso anterior (*sIntPrecOld*). Se puede observar que ambas son exactamente la misma serie, es decir, todo lo que se intercepta se evapora. Lo anterior puede ser interpretado de dos formas: la primera es que toda la precipitación

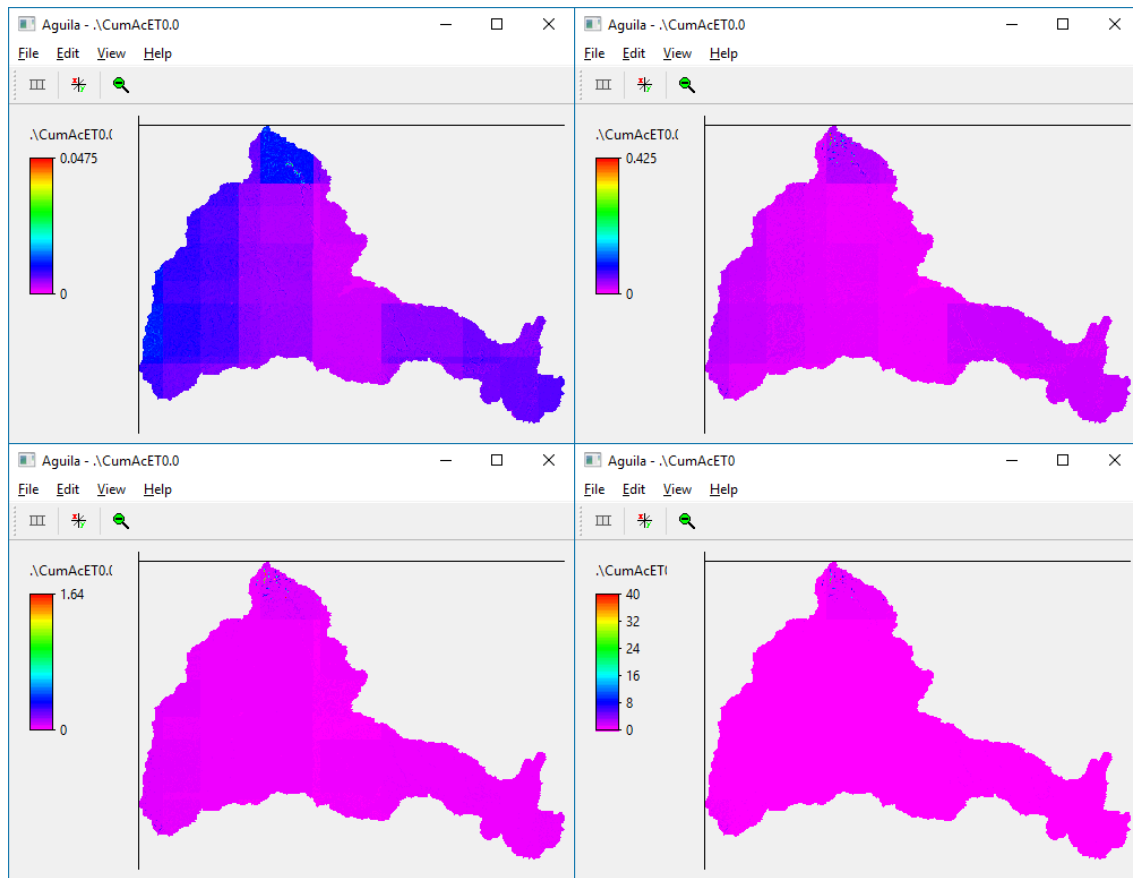
interceptada se evapora, y la segunda es que el máximo almacenamiento puede ser demasiado grande para ser llenado y desbordar.

Ilustración 24. Series de evapotranspiración y precipitación interceptada: tsInterceptionET y tsIntPrec



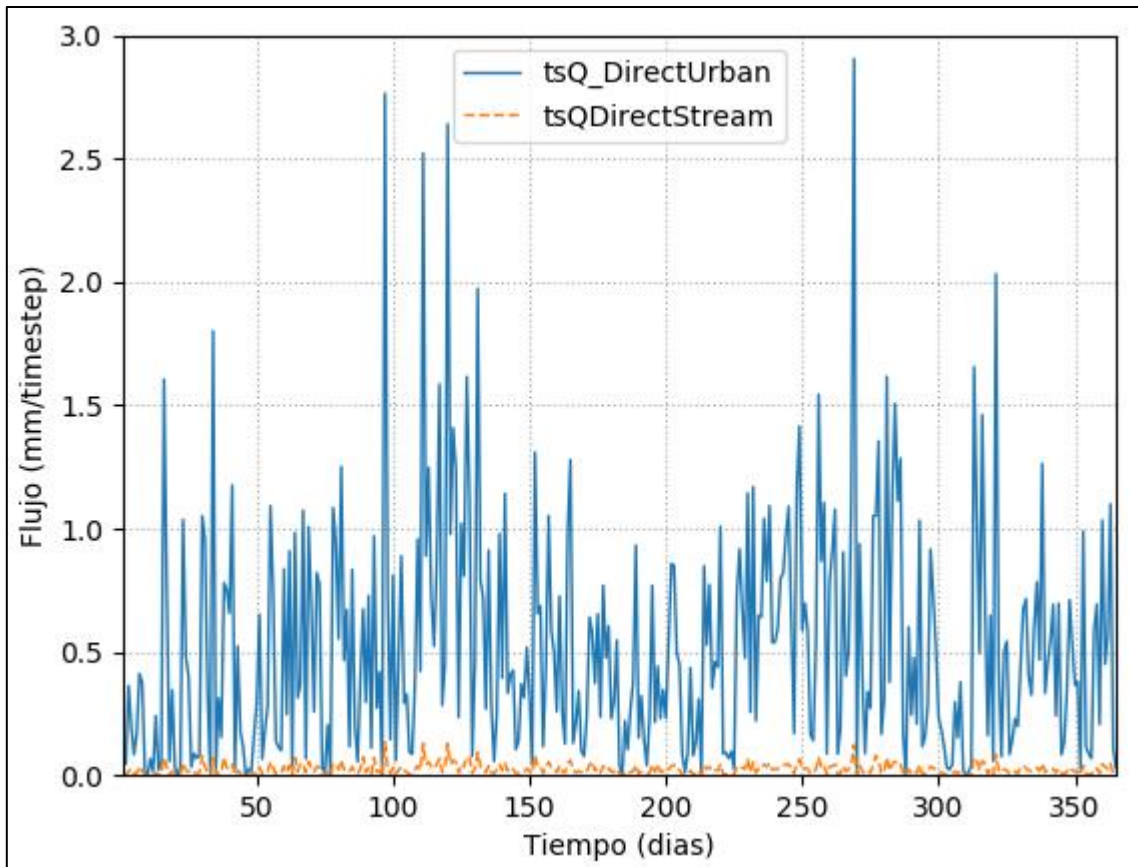
En cuanto al procedimiento utilizado en el modelo TAC^{D2} para calcular la evapotranspiración en el suelo, se debe tener presente que los datos de entrada de este procedimiento, además de los parámetros de ubicación de la cuenca, es el mapa de la temperatura media diaria. Dado que la resolución tanto de los mapas de temperatura como los de precipitación era considerablemente gruesa en comparación con el modelo de elevación, se presentó distorsión en los valores de evapotranspiración, como se puede observar en la Ilustración 25. Se puede observar también que la distorsión antes mencionada es menos visible a medida que avanza el tiempo de modelación.

Ilustración 25. Evolución de la evapotranspiración efectiva acumulada, para t=12, 24, 47 y 365 días.



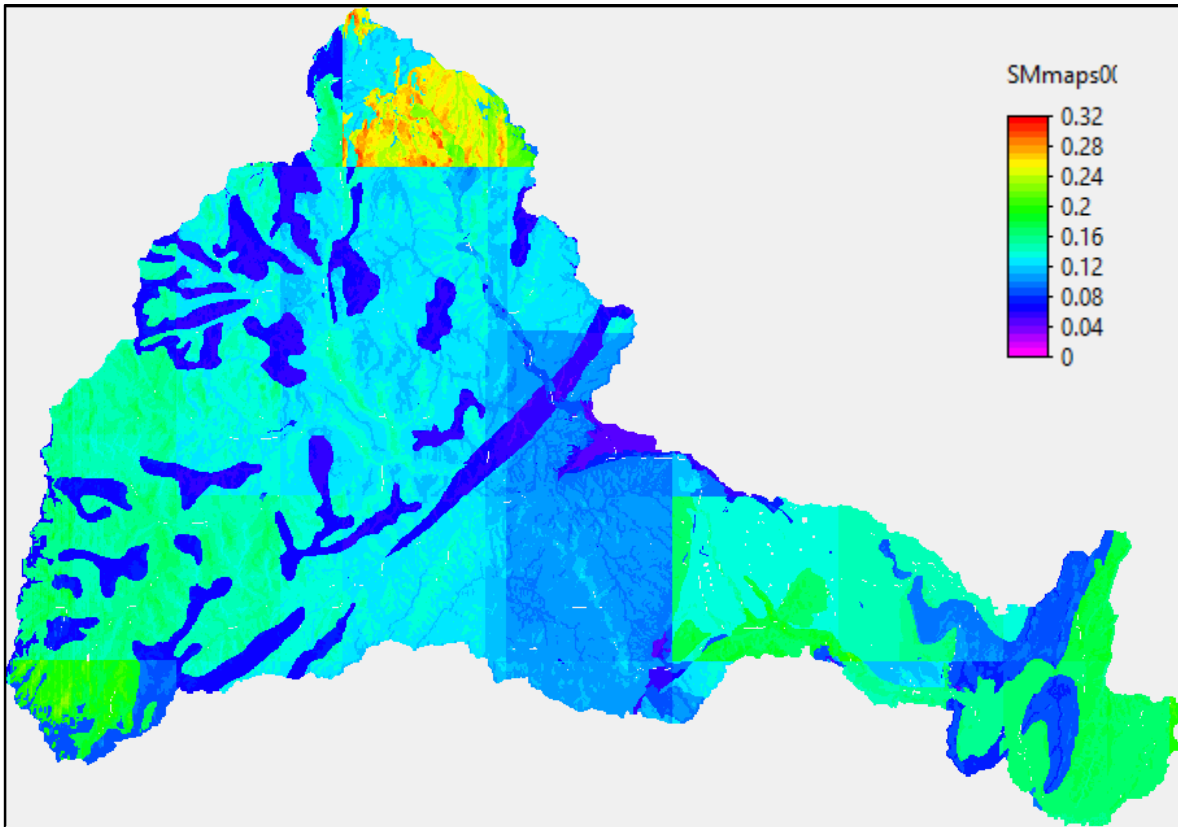
Teniendo en cuenta la escorrentía que ocurre en zonas urbanas y aquella precipitación que llega directamente al cauce, se muestra en la Ilustración 26 el acumulado de este tipo de flujo en la estación Payandé, a lo largo del tiempo de modelación. Se puede observar en dicha ilustración que a pesar de que la forma de las dos series presentadas es la misma, la escala vertical del flujo proveniente de las zonas urbanas (*tsQ_DirectUrban*) es, en promedio, 19.8 veces mayor que la precipitación que cae directamente sobre el cauce (*tsQDirectStream*). Este resultado es esperado pues el área transversal del río es mucho menor al área urbana.

Ilustración 26. Series de aporte al cauce de caudal urbano y directo: tsQ_DirectUrban y tsQDirectStream



En cuanto a la rutina de suelo, previa a la generación de escorrentía, la Ilustración 27 muestra el contenido de humedad para el final de la ejecución del modelo TAC^D2. Se puede observar que al igual que en la evapotranspiración efectiva, en la humedad del suelo se presenta distorsión debida a la resolución de la información de temperatura, la cual alcanza a ser visible en este mapa. Adicionalmente, se observa el gran contraste en el parte superior causado únicamente por diferencias en el valor de temperatura entre las dos celdas. Se aprecia también que las clasificaciones hidrológicas (véase Ilustración 14) juegan un papel fundamental en esta etapa de cálculo, pues algunas de las clases hidrológicas hacen que ciertas zonas resalten por su diferencia de humedad respecto a sus celdas aledañas.

Ilustración 27. Mapa de contenido humedad del suelo. Archivo SMMaps



Al analizar los procesos de generación de escorrentía en el modelo TAC^D2, se debe realizar un análisis de cada uno de los tanques que lo conforman, por lo cual se realiza a continuación un esquema general de las interconexiones en el modelo (véase Ilustración 28). Las clasificaciones 1 y 5 son representadas con un modelo de un tanque, el cual, para efectos prácticos, será el tanque superior. Las clasificaciones 2, 3, 4 y 6 son conceptualizadas mediante dos tanques independientes. La clasificación 1 también es conceptualizada mediante un solo tanque, con la diferencia de que no se genera percolación al tanque inferior. La Ilustración 29 muestra series de valores promedio del contenido de humedad del suelo para las clasificaciones 1 a 6 (color verde, rojo, rosado, amarillo, morado y azul, respectivamente). La Ilustración 30 muestra el flujo promedio saliente del tanque inferior de todos los tanques. Se debe destacar el hecho de que por el tanque superior no se está presentando flujo, lo cual indica que la capacidad asignada al tanque inferior del modelo puede ser alta en comparación con el flujo entrante. Por último, la Ilustración 31 muestra el flujo subterráneo y de las zonas saturadas.

Ilustración 28. Simplificación de resultados de la generación de escorrentía. Adaptado de: (Roser, 2001)

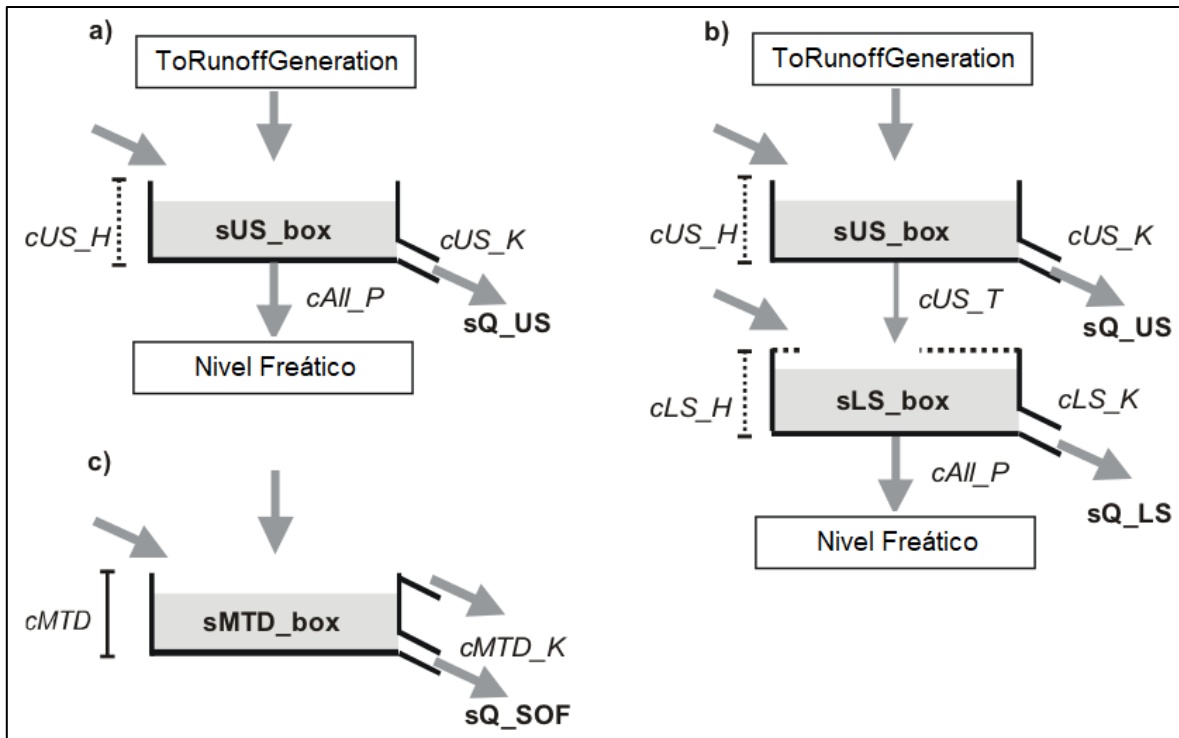


Ilustración 29. Contenido de humedad del suelo. Serie tsSoilMoisture

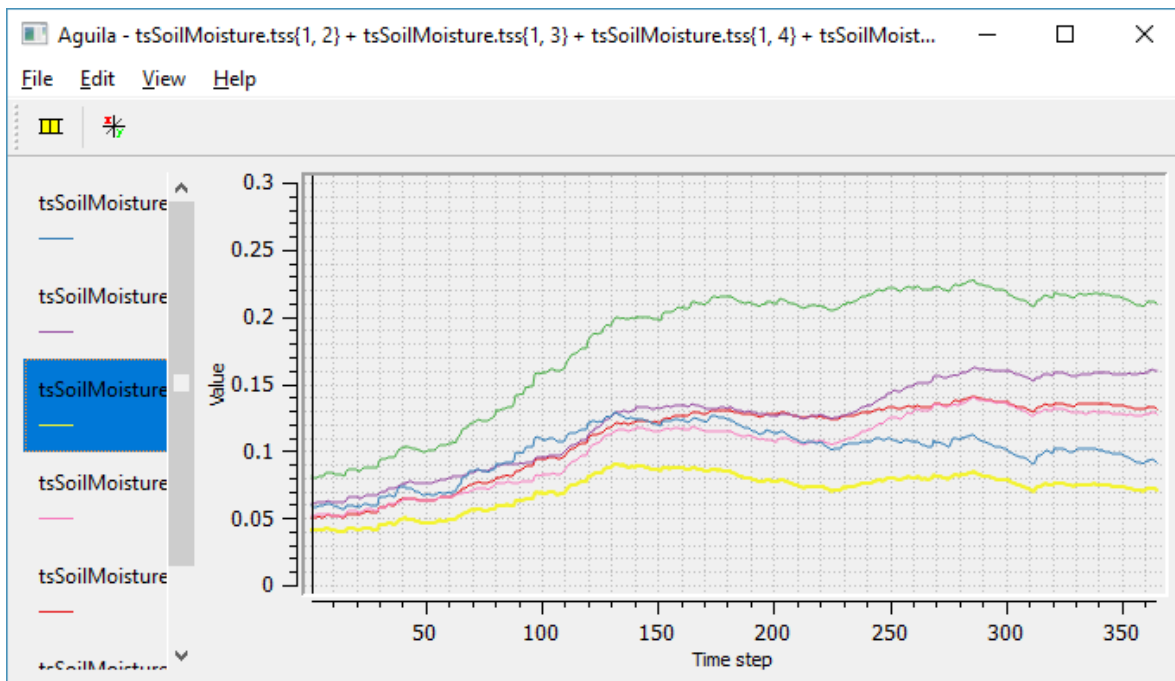


Ilustración 30. Flujo desde el tanque inferior. Serie tsQ_LS

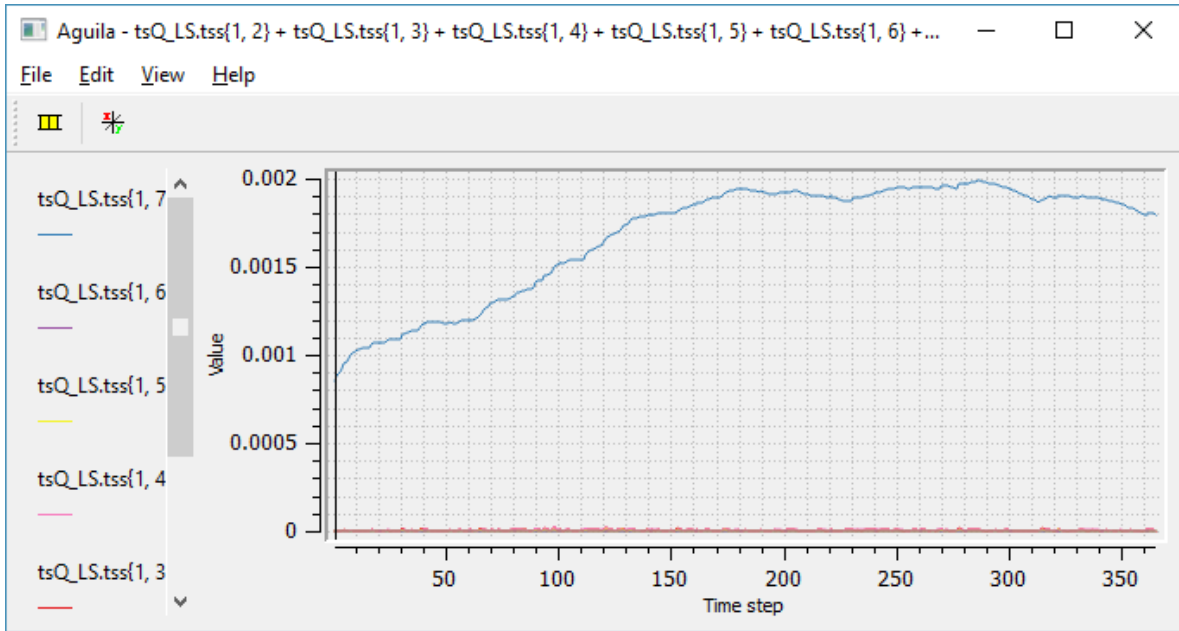
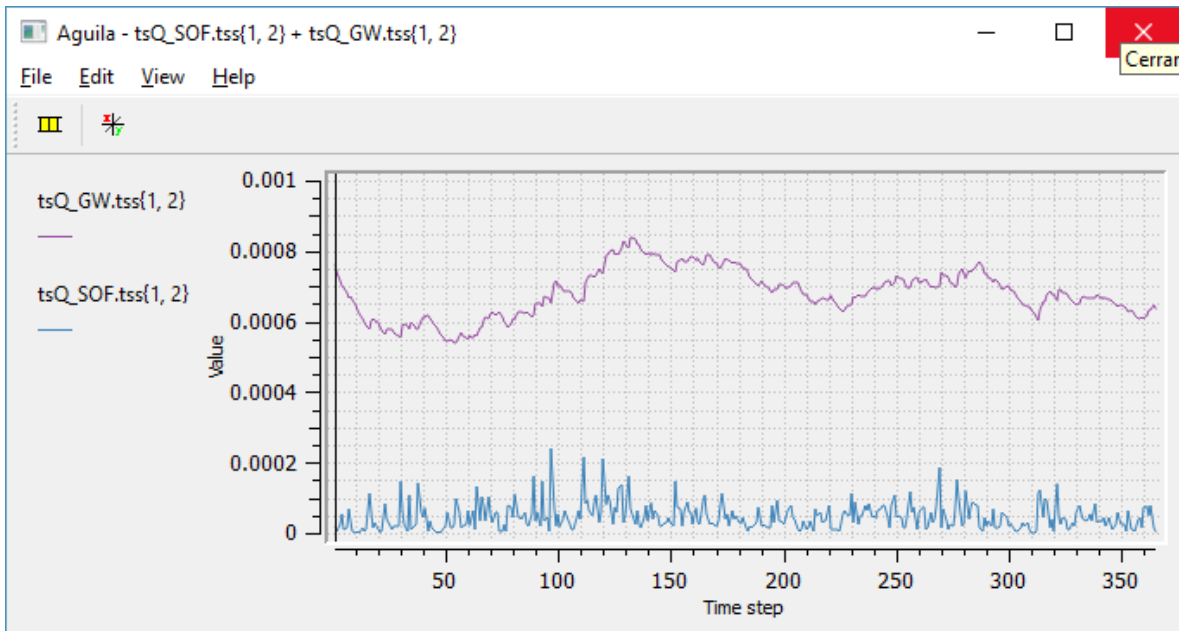


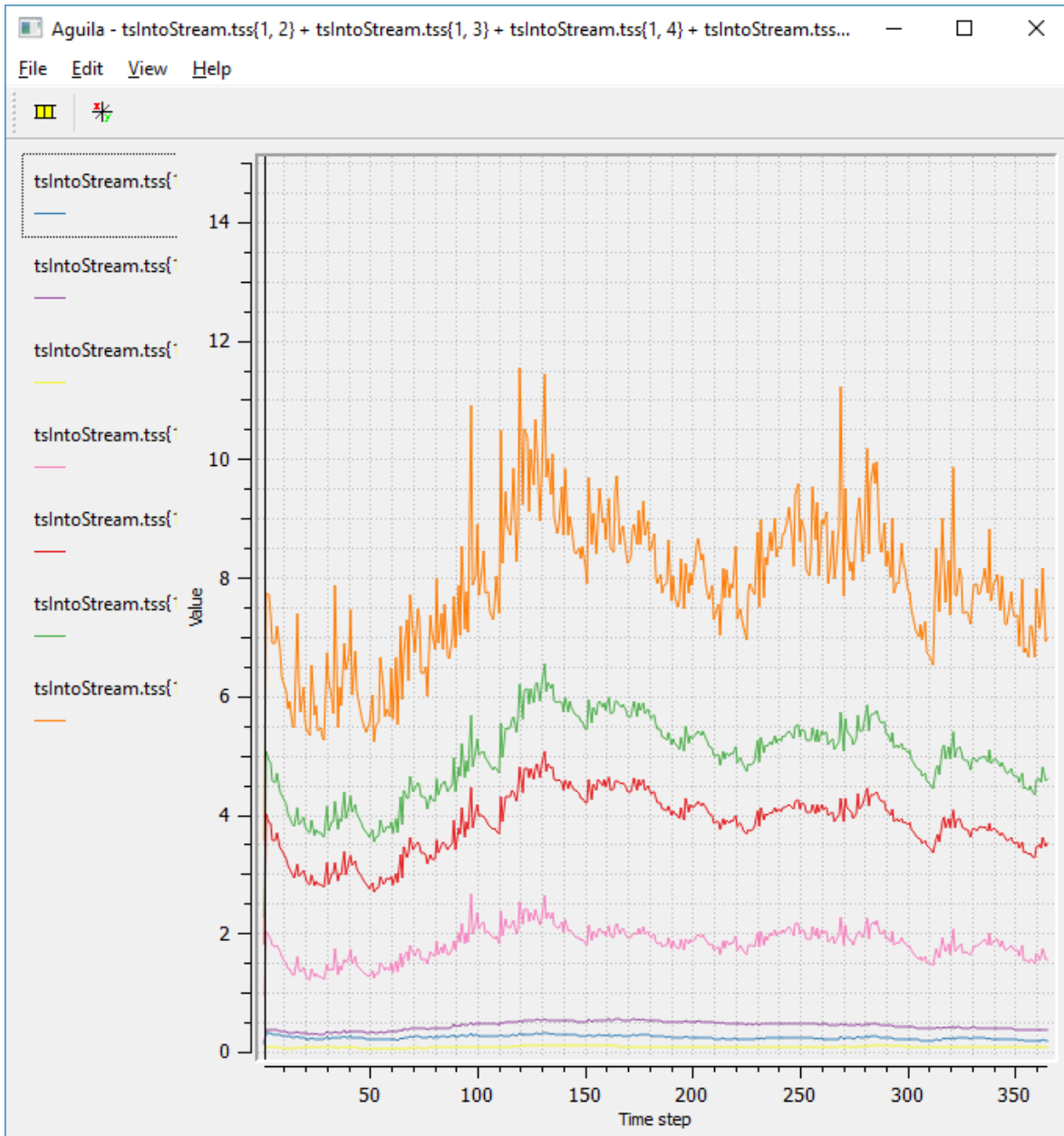
Ilustración 31. Flujo subterráneo y de las zonas saturadas. Series tsQ_GW y tsQ_SOF



Se destaca de esta última ilustración como el nivel freático tiene cambios más suaves que las demás series.

Por último, se analizará la entrada del flujo al cauce y su tránsito a lo largo del canal. La Ilustración 32 indica el flujo entrante en el canal por celdas de cada clasificación hidrológica. Se observa que la tendencia de todas las series es muy similar entre sí, cambiando solamente la escala entre una y otra.

Ilustración 32. Entrada de flujo al cauce. Serie tsIntoStream



Se llevaron a cabo pruebas para verificar el cálculo de la onda cinemática mediante la función *kinematic*, las cuales validaron la estabilidad del tránsito hidráulico.

6.2. Recomendaciones y Posible Trabajo Futuro

Durante el desarrollo del presente trabajo se observaron posibles oportunidades para avanzar en el desarrollo del modelo o de las técnicas utilizadas, por lo cual queda abierta la posibilidad a seguir trabajando en los siguientes temas:

- Creación de una interfaz gráfica para el uso del modelo TAC^{D2}
- Adaptación del modelo TAC^{D2} a la versión con cómputo en paralelo de PCRaster
- Adaptación del modelo TAC^{D2} a software de código abierto (FOSS, por sus siglas en inglés) que trabaje con formatos de archivo estándar (GeoTIFF, ASCII Grid, etc.), como por ejemplo GRASS GIS
- Aplicación de metodología para la calibración de un modelo hidrológico distribuido de costo computacional alto teniendo en cuenta múltiples estaciones de validación
- Mejora de la resolución espacial de la información de cobertura vegetal (Coverage index), de índice de área de hojas (Leaf Area Index), de precipitación y de temperatura, en la cuenca del río Coello
- Análisis de sensibilidad del modelo TAC^{D2} a los datos de entrada
- Análisis de sensibilidad del modelo TAC^{D2} a los parámetros del modelo
- Análisis de incertidumbre del modelo TAC^{D2}
- Uso de información de estaciones hidrometeorológicas para complementar o refinar la información espaciotemporal de temperatura y de precipitación usada en el modelo TAC^{D2}

Bibliografía

- Beven, K. J. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.
- Castillo Mora, C., & Ortiz Campos, N. (2015). *REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ POR MEDIO DEL MÉTODO ESTADÍSTICO ÍNDICE DE CRECIENTE*. Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás.
- Chiang, S.-M., Tsay, T.-K., & Nix, S. (2002). Hydrologic Regionalization of Watersheds. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT*, 3-20.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Wags, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA. (2016). *II Fase Diagnostico - Río Coello | CORTOLIMA*. Retrieved 12 22, 2017, from Corporación Autónoma Regional del Tolima: <https://www.cortolima.gov.co/contenido/ii-fase-diagnostico-r%C3%ADo-coello-0>
- Corzo Perez, G. A. (2009). *Hybrid models for hydrological forecasting: Integration of data-driven and conceptual modelling techniques*. Leiden: Taylor & Francis Group.
- Departamento Nacional de Planeación. (2012). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2014). Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 620-629.
- Du, E., Link, T. E., Gravelle, J. A., & Hubbart, J. A. (2014). Validation and sensitivity test of the distributed hydrology soil-vegetation model (DHSVM) in a forested mountain watershed. *Hydrological Processes*, 28(26), 6196-6210. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10110>
- Española, R. A. (2016, 12 30). *Diccionario de la lengua española*. Retrieved from <http://dle.rae.es/?id=LDxc1BE>

- Farsadnia, F., Rostami Karood, M., Moghaddam Nia, A., Modarres, R., Bray, M. T., Han, D., & Sadatinejad, J. (2014). Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps. *Journal of Hydrology*, 387-397.
- Fragoso Sandoval, L., Ruiz y Zurvia-Flores, J. R., & Toxky López, G. (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, XXXVII(2), 29-43.
- G. Cacuci, D., Ionescu-Bujor, M., & Navon, I. M. (2005). *Sensitivity and uncertainty analysis. Applications to large-scale systems*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Gallego Arias, S., & Carvajal Serna, L. F. (2017). REGIONALIZACIÓN DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA-COLOMBIA. *Revista EIA*, 21-30.
- Gómez Martínez, P., Cubillos González, F., & Martín Carrasco, F. J. (2017). Metodología para caracterizar la eficiencia de una red de distribución sectorizada (0470NS). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 57-77.
- Hall, J., & Solomatine, D. (2008). A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions. *International Journal of River Basin Management*, 6: 2, 85-98.
- Karszenberg, D., Schmitz, O., Salamon, P., de Jong, K., & Bierkens, M. F. (2010). A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*, 25(4), 489-502.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.004>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. A. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*(47), 36-58.
- Mesa Sánchez, O. J., Vélez Upegui, J. I., Giraldo Osorio, J. D., & Quevedo Tejada, D. I. (2003). REGIONALIZACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MEDIAS DE LA CUENCA CON APLICACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS. *Meteorología Colombiana*(7), 141-147.

- Neuman, S. (2003). Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17:291., 291-305.
- Obregón, N., Fragala, F., & Prada, L. F. (2017). REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN HIDROINFORMÁTICA. *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*.
- Roser, S. (2001). *Flächendetaillierte Weiterentwicklung des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells TAC und Visualisierung der Modellergebnisse in einem dynamischen GIS*. Freiburg i. Br.: Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität.
- Sieber, A. (2003). *Parameterstudien und Unsicherheitsanalysen mit dem Einzugsgebietsmodell TACD*. Freiburg i. Br.: Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität.
- Solomatine, D., & Wagener, T. (2011). Hydrological Modeling. In P. W. (ed.), *Treatise on Water Science*, vol. 2 (pp. 435-437). Oxford: Elsevier Ltd.
- Uhlenbrook, S. (2001). Using tracers techniques to investigate hydrosystems and to improve rainfall-runoff modelling. *Stromingen*, 7(4), 5-13.
- Uhlenbrook, S., & Leibundgut, C. (2000). Natural tracers for Investigating residence times, runoff components and validation of a rainfall-runoff model. *Tracers and Modelling in Hydrogeology*, 262.
- United States Geological Survey. (2016, 12 09). *Watersheds and drainage basins, USGS Water Science School*. Retrieved 11 17, 2017, from The USGS Water Science School: <https://water.usgs.gov/edu/watershed.html>
- Vargas, R., & Diaz-Granados, M. A. (1997). *Curvas sintéticas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.
- Wissmeier, L. (2005). *Implementation of distributed solute transport into the catchment model TACd and event based simulations using oxygen-18*. Freiburg i. Br.: Institut Für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität.

Zhang, C., Chu, J., & Fu, G. (2013). Sobol's sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun River Basin, China. *Journal of Hydrology*, Vol 480, 58-68.

Anexo 1. Regionalización Hidrológica y Sectorización Hidráulica

Para el desarrollo de este trabajo, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre los conceptos asociados a la regionalización hidrológica y a la sectorización hidráulica. A pesar de no estar relacionados explícitamente con el trabajo realizado, sí pueden servir como guía para trabajo posterior que involucre el modelo TAC^{D2}.

1. Fundamentos de Regionalización Hidrológica

La regionalización hidrológica consiste en la clasificación de cuencas instrumentadas en regiones según criterios predefinidos. Lo anterior se realiza con el fin de poder extender la información de dichas cuencas a cuencas que no estén instrumentadas (Chiang, Tsay, & Nix, 2002).

La calidad de un modelo de regionalización hidrológica se evalúa con la correlación entre las propiedades del flujo y variables de la cuenca hidrográfica. Si esta correlación es buena, entonces el modelo matemático encontrado se puede utilizar en cuencas no instrumentadas con características similares, con el fin de encontrar datos como caudales medios, mínimos o máximos, los cuales son parámetros de entrada para el diseño e implementación de proyectos y planes para el manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos.

En Colombia se presenta alta variabilidad en los componentes morfométricos, de relieve, vegetación, tipo de suelos y climatología, entre otros. Adicionalmente, es común encontrar cauces que cruzan una o más regiones con variaciones importantes en sus características (Mesa Sánchez, Vélez Upegui, Giraldo Osorio, & Quevedo Tejada, 2003).

2. Metodologías para la Regionalización

Con el fin de realizar una regionalización representativa, se presentan a continuación las siguientes preguntas que deben ser tenidas en cuenta en el proceso (Chiang, Tsay, & Nix, 2002):

- ¿Cómo clasificar las cuencas en regiones?

- ¿Cuáles son los criterios utilizados para la regionalización?
- ¿Cómo construir las relaciones entre las variables del flujo y las características de la cuenca?
- ¿Cómo aplicar los resultados de la regionalización a cuencas no instrumentadas?
- ¿Cómo se puede validar la técnica de regionalización hidrológica?

En Colombia, los autores Vargas y Díaz-Granados (1997) han llevado a cabo metodologías de regionalización para producir curvas sintéticas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de todo el territorio nacional. Se encuentran más resultados de regionalización tales como aquellos realizados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) para las curvas IDF de cuencas del departamento del Valle del Cauca, los resultados de Castillo y Ortiz (2015) para los caudales máximos en la cuenca del Río Sinú, la regionalización de Gallego y Carvajal (2017) para las curvas de duración de caudales en el departamento de Antioquia, entre otras.

En esencia, la regionalización busca representar parámetros del flujo, por ejemplo, el caudal de descarga de la cuenca, a través de otras características de la cuenca. Para ello, se utilizan expresiones de la forma:

$$Q = K A_1^{b_1} A_2^{b_2} \dots A_i^{b_i} \dots A_n^{b_n} \quad (17)$$

Donde:

- Q : Variable a estimar, en este caso el caudal
- A_i : Variables y características de la cuenca
- K, b_i : Constantes determinadas empíricamente

Algunas de las metodologías de regionalización utilizadas suelen seguir la siguiente secuencia metodológica (Gallego Arias & Carvajal Serna, 2017):

1. Seleccionar las cuencas cuyas estaciones tengan registros completos durante un periodo de tiempo suficientemente largo. Este tiempo es definido con base en la seguridad que se quiera tener en la regionalización y la cantidad y calidad de registros disponibles.
2. Definir zonas que puedan tener un comportamiento hidrológico similar. En últimos años, este proceso se realiza mediante algún tipo de algoritmo de inteligencia artificial (Machine

Learning), tales como agrupamiento difuso (Fuzzy C-Means), K-Means, Redes Neuronales, etc. (Farsadnia, y otros, 2014). En el trabajo de Vargas y Diaz-Granados, esta clasificación se dio con base en la topografía y las principales cuencas del territorio colombiano.

3. Se escogen las variables características de la cuenca que se quiere representar y el modelo matemático a utilizar. Este paso es fundamental y dependiendo de la calidad del ajuste, puede ser repetido varias veces hasta encontrar un modelo matemático satisfactorio.
4. Calcular para cada uno de los modelos la bondad de ajuste para cada uno de los modelos

En últimos años, se ha extendido la utilización de modelos que tengan en cuenta no sólo variables puntuales de la cuenca, sino que también utilicen parámetros espacialmente distribuidos.

3. Fundamentos de Sectorización Hidráulica

La sectorización hidráulica se define como la división de una red de suministro en zonas monitoreadas y aisladas mediante válvulas frontera (Gómez Martínez, Cubillos González, & Martín Carrasco, 2017). Otra definición se refiere a la sectorización como la formación de zonas de suministro autónomas, más no independientes, dentro de una red de distribución, las cuales se dividen con el fin de facilitar su operación (Fragoso Sandoval, Ruiz y Zurvia-Flores, & Toxky López, 2016).

La sectorización hidráulica permite controlar de una manera más sencilla los caudales de entrada, las presiones internas de las tuberías, la demanda y las pérdidas de agua por fugas o en conexiones erradas.

Dicha sectorización es posible a través de válvulas de seccionamiento instrumentadas, de tal manera que se pueda llevar a cabo el control sobre el caudal y la presión de entrada de la red.

La sectorización hidráulica se vuelve más necesaria entre mayor sea el tamaño de la red, dado que la operación se vuelve más compleja. Adicionalmente, en las redes grandes se observan diferentes niveles de presión a lo largo de la red y suelen estar fuertemente malladas, es decir, presentan gran cantidad de subcircuitos cerrados (Fragoso Sandoval, Ruiz y Zurvia-Flores, & Toxky López, 2016).

4. Metodología de la Sectorización Hidráulica

Con el fin de que se lleve a cabo un proceso de sectorización hidráulica, es necesario contar con una gran cantidad de información y para ello se sugiere el siguiente procedimiento:

1. Realizar un levantamiento de información de catastro del sistema de distribución de agua potable en su estado actual
2. Definir un anteproyecto del sistema, en el cual se tengan en cuenta los posibles puntos de alimentación y las posibles interconexiones controladas.
3. Diseñar e implementar un sector piloto, en el cual se pongan las válvulas de seccionamiento necesarias, los instrumentos de aforo de caudal y presión pertinentes, y en lo posible registrar la variación diaria de la demanda, si ésta puede determinarse o suponerse con los datos medidos.
4. Calibrar un modelo de simulación hidráulica con base en los registros obtenidos previamente sobre el sector piloto.
5. Ajustar el sector piloto con base en la modelación, para controlar las presiones y medir los caudales, evaluando la relación entre presión y fugas.
6. Implementar dos o tres sectores más, con base en la experiencia obtenida en el sector piloto.
7. Evaluar, con base en las mediciones realizadas en todos esos sectores piloto, la viabilidad y el costo del proyecto integral.

Es de resaltar que la realización del sector piloto permite una muy buena aproximación sobre el costo y los beneficios globales del proyecto de sectorización. Por otra parte, es necesario tener en cuenta la implementación de proyectos para la detección y reparación de las fugas de la red, así como programas para la supervisión, mantenimiento y verificación del funcionamiento de los elementos del sistema, en particular de las válvulas de seccionamiento.

Es necesaria la eficaz y rápida comunicación con los operadores de las válvulas, los cuales deben conocer y entender el funcionamiento del sistema como un todo.

De la misma manera que con la regionalización, la sectorización hidráulica recientemente se ha apalancado a través de algoritmos de inteligencia artificial, los cuales permiten optimizar la

sectorización y por ende la operación de las redes de distribución (Di Nardo, Di Natale, Santonastaso, Tzatchkov, & Alcocer-Yamanaka, 2014).