

**ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VALORACIÓN DEL SERVICIO
ECOSISTÉMICO DE APROVISIONAMIENTO, CON ÉNFASIS EN LA CANTIDAD
DE AGUA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO SWAT
(SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)**

**JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS
CARLOS JAVIER LEANDRO HERNÁNDEZ MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VALORACIÓN DEL SERVICIO
ECOSISTÉMICO DE APROVISIONAMIENTO, CON ÉNFASIS EN LA CANTIDAD
DE AGUA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO SWAT
(SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)**

**JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS
CARLOS JAVIER LEANDRO HERNÁNDEZ MORENO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Directora
ISABEL CRISTINA DOMÍNGUEZ RIVERA
Ingeniera Sanitaria, MSc. PhD.**

**Co-Directora
SULLY GÓMEZ ISIDRO
Ingeniera Civil, MSc. PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

A mi familia, en especial a mi madre; a ella van dedicados mis triunfos.

A mis amigos.

A mis maestros, desde el primero al último, con algunas excepciones.

A quienes me hayan acompañado en este viaje lleno de enseñanzas, de miedos, de alegrías, de desveladas con cuadernos, de desveladas con copas, de amores y desamores, de entregas a última hora y de momentos que perdurarán por siempre en mi memoria. Con la admiración, la simpatía y el afecto de

JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS

A Dios por ser el ingeniero en mi proyecto de vida, por su amor, su misericordia, su rúaj y por ser el artífice de esta nueva bendición.

A la Santísima Virgen María, mi madre celestial, por su protección e intercesión en mi caminar.

A mis papás Ofelmina y Carlos Arturo por ser mi más grande motivación, por ser mi nido lleno de amor, por educarme, por su apoyo y sacrificio constante para lograr esta meta.

A mi mano derecha: mi hermana Lizeth Marcela, por acompañarme con amor y paciencia; a ella le dedico este trabajo para recordarle que cada sacrificio es recompensado.

A mi tía Rosmi, que su amor y educación brindada la convirtieron en mi otra mamá, y sus caricias y consejos en mi nonita.

A mis ángeles celestiales, especialmente mis nonitos Ofelia, Sara y Jesús, por brillar en el firmamento en las noches más oscuras.

A mi amada Rossio por ser mi compañía y apoyo a lo largo de esta travesía, por la felicidad que me transmite con su sonrisa... en fin, por amarme; a su familia por el aprecio y apoyo brindado.

A Toñita por su cariño y apoyo desde mi niñez.

A mi partner Alexis, por su trabajo en equipo, paciencia y amistad.

A Jaime, Cheo y Yolmer por ser grandes amigos, por sus valiosos consejos y apoyo.

A mi nonito Pedro y a todos y cada uno de mis primos, tíos, familiares, amigos y maestros que han sido parte fundamental en cada uno de los proyectos que decido emprender.

CAJALEHEMO.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos los agradecimientos a la directora y codirectora de este proyecto, Ingeniera Isabel Cristina Domínguez Rivera, PhD., e Ingeniera Sully Gómez Isidro, PhD., por su dedicación, asesoría, constante motivación y formación integral brindada durante el desarrollo de la metodología de investigación.

Estimamos el apoyo brindado por el Ingeniero Eymard Blanco Figueroa, por su disponibilidad para la solución de dudas en el desarrollo del proyecto.

Valoramos la asesoría de nuestra compañera y amiga Laura Ximena Galvis Durán en la recolección y procesamiento de la información.

Agradecemos a nuestros amigos por el apoyo y motivación constante. En general a todos los que hicieron posible la realización de este proyecto.

JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS

CARLOS JAVIER LEANDRO HERNÁNDEZ MORENO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. METODOLOGÍA	20
1.1 REVISIÓN DE LITERATURA	20
1.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO	21
1.3 SELECCIÓN DEL CASO ESTUDIO.....	21
1.3.1 Recolección y procesamiento de la información de entrada al modelo.	22
1.4 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.....	25
1.4.1 Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).....	25
1.4.2 Simulación.....	27
1.5 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LA HERRAMIENTA EN LA CUENCA SELECCIONADA	29
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
2.1 REVISIÓN DE LITERATURA	31
2.1.1 Estrategias para la valoración del SE.....	32
2.1.2 Variables de mayor influencia.....	33
2.1.3 Desempeño del modelo.....	33

2.1.4 Condiciones asociadas al estudio y limitaciones.....	34
2.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO	35
2.3 CASO DE ESTUDIO	38
2.3.1 Recolección y procesamiento de la información.....	39
2.4 APLICACIÓN DEL MODELO	47
2.4.1 Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)	47
2.4.2 Simulación.....	49
2.5 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LA HERRAMIENTA EN LA CUENCA SELECCIONADA	52
2.5.1 Disponibilidad y manejo de datos de entrada	53
2.5.2 Documentación y soporte técnico.....	55
2.5.3 Facilidad de uso.	55
2.5.4 Desempeño del modelo.....	55
3. CONCLUSIONES	57
4. RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	60
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología de trabajo utilizada por esta investigación.	20
Figura 2. Watershed Delineation – SWAT.	26
Figura 3. Land Use/Soils/Slope Definition – SWAT.	27
Figura 4. Weather Data Definition – SWAT.	28
Figura 5. Setup and Run SWAT Model Simulation – SWAT.....	29
Figura 6. Localización – CSRO.....	39
Figura 7. Modelo de elevación digital – CSRO.	40
Figura 8. Cobertura vegetal – CSRO.....	42
Figura 9. Tipos de suelo – CSRO.....	43
Figura 10. Mapa de pendientes – CSRO.....	45
Figura 11. Red de estaciones – CSRO.....	47
Figura 12. Subcuencas, red hídrica y puntos de salida generados en SWAT – CSRO.	48
Figura 13. HRU generadas en SWAT – CSRO.....	49

Figura 14. Valores de flujos simulados y flujos observados del 2010-02-28 al 2011-01-18.....51

Figura 15. Regresión lineal con valores de flujo observado y simulado en SWAT del 2010-09-01 al 2011-01-18.51

Figura 16. Balance hídrico – CSRO.....52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estadísticos de evaluación del modelo.	30
Tabla 2. Información básica para ejecutar el modelo SWAT.	36
Tabla 3. Propiedades físico-químicas asociadas al mapa de suelos requeridos en SWAT.	37
Tabla 4. Datos climatológicos requeridos en la base de datos de SWAT.	38
Tabla 5. Características generales de la cobertura presente en la CSRO.	41
Tabla 6. Características generales del tipo de suelo presente en la CSRO.	42
Tabla 7. Características físico-químicas de los suelos utilizados en la modelación hidrológica.	44
Tabla 8. Estaciones seleccionadas para la simulación hidrológica.	46
Tabla 9. Evaluación de la factibilidad.	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo de elevación digital (DEM) – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	69
Anexo B. Cobertura vegetal – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).	70
Anexo C. Tipos de suelo – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).	71
Anexo D. Granulometría y profundidades promedio usadas en la simulación, desarrolladas por Sierra y Velandia.	72
Anexo E. Software SPAW – Soil Water Characteristics desarrollado por Keith Saxton y Walter Rawls, para el cálculo de parámetros físico-químicos.	73
Anexo F. Factores de erodabilidad del suelo (K) asociados a la textura y al contenido de materia orgánica según Kirkby y Morgan. Los valores de K están expresados en (t/ha)/(Mj-mm-h).	74
Anexo G. Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura según Mannaerts.	75
Anexo H. Mapa de pendientes – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	76
Anexo I. Información bruta de las estaciones procesadas del IDEAM, CDMB y GPH.	77
Anexo J. Procesamiento de la información bruta de las estaciones del IDEAM, CDMB y GPH.	78

Anexo K. Procesamiento de la información horaria a diaria de la estación	79
Anexo L. Red de flujo definida a partir del DEM – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	80
Anexo M. Estructura de los archivos .txt para cargar los datos climatológicos.	81
Anexo N. Datos climatológicos en formato .txt usados en la simulación.	82
Anexo O. Clasificaciones de rendimiento generales de estadísticos recomendados para pasos de tiempo mensuales según Moriasi et. al.	89
Anexo P. Subcuencas, red hídrica y puntos de salida generados en SWAT – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	90
Anexo Q. Reporte de la generación de Unidades de respuesta hidrológica (HRU).	91
Anexo R. HRU generadas en SWAT – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).	92
Anexo S. Base de datos de salida de la simulación del modelo SWAT.	93
Anexo T. Estadística descriptiva de los valores generados de producción de agua (WYLD) en las subcuencas de la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	94
Anexo U. Caudales observados VS caudales simulados en SWAT.	95
Anexo V. Cálculo de los estadísticos planteados por Moriasi aplicados a la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	100
Anexo W. Resumen de usos de suelo de la herramienta SWAT Error Checker aplicados a la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).	101

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VALORACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE APROVISIONAMIENTO, CON ÉNFASIS EN LA CANTIDAD DE AGUA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)*

AUTORES: JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS
CARLOS JAVIER LEANDRO HERNÁNDEZ MORENO**

PALABRAS CLAVE: MODELO SWAT, SERVICIOS ECOSISTÉMICOS, APROVISIONAMIENTO DE AGUA, CANTIDAD DE AGUA, ESTUDIO EXPLORATORIO, FACTIBILIDAD.

DESCRIPCIÓN:

Los modelos hidrológicos son cada vez más utilizados para cuantificar los beneficios que los seres humanos reciben de los ecosistemas. Este trabajo presenta un estudio exploratorio para la valoración del servicio ecosistémico de aprovisionamiento de agua, con énfasis en la cantidad, aplicando el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) en Piedecuesta, Colombia. Se realizó una revisión de literatura donde se identificaron estrategias para la valoración del servicio de aprovisionamiento, variables de entrada de mayor influencia, desempeño del modelo y dificultades encontradas durante la aplicación del modelo. Los datos que alimentan el modelo se seleccionaron por disponibilidad de investigaciones previas realizadas en la zona de estudio. Se generaron las unidades de respuesta hidrológica (HRU) que relacionan el tipo de suelo, uso del suelo o cobertura vegetal y la pendiente del terreno para conocer la respuesta de la cuenca ante un evento hidrológico mediante la simulación de flujos con datos climatológicos. La simulación se realizó con información meteorológica de estaciones vecinas en el periodo del 28 de febrero de 2010 al 18 de enero de 2011. Se concluye que la factibilidad de evaluar el servicio ecosistémico en SWAT no está limitada por la facilidad de uso y documentación técnica de la herramienta, sino por las condiciones de la cuenca, el detalle y calidad de los datos suministrados. Esta investigación ofrece información para evaluar la factibilidad de la aplicación del modelo SWAT en cuencas hidrográficas con información limitada.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, MSc PhD. Co-Directora: Sully Gómez Isidro, Ingeniera Civil, MSc PhD.

ABSTRACT

TITLE: EXPLORATORY STUDY OF ECOSYSTEM SERVICE VALUATION OF PROVISION, WITH EMPHASIS ON THE WATER QUANTITY, BY APPLYING THE MODEL SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)*

AUTHORS: JONATHAN ALEXIS DUARTE CELIS
CARLOS JAVIER LEANDRO HERNÁNDEZ MORENO**

KEYWORDS: SWAT MODEL, ECOSYSTEM SERVICES, WATER PROVISION, WATER QUANTITY, EXPLORATORY STUDY, FEASIBILITY.

DESCRIPTION:

Hydrological models are increasingly used to quantify the benefits that humans receive from ecosystems. This work presents an exploratory study for the assessment of water supply ecosystem service, with emphasis on quantity, using the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in the upper basin of the Rio de Oro (CSRO) in Piedecuesta, Colombia. A literature review was carried out to identify strategies for provision service valuation, most influential input variables, model performance and difficulties encountered during the model application. The data supporting the model were selected based on availability from previous research conducted in the study area. Hydrological response units (HRU) that relate soil type, land use or vegetation cover and slope were generated to establish the basin replica to a hydrological event by simulating flows with climatological data. The simulation was performed using meteorological data from neighboring stations during the period from February 28th, 2010 to January 18th, 2011. It is concluded that the feasibility to assess the ecosystem service in SWAT is not limited by the ease of use and technical documentation of the tool, but on the basin conditions, and the detail and quality of the available data. This research provides information to evaluate the feasibility of applying SWAT in watersheds with limited information.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, MSc PhD. Co-Directora: Sully Gómez Isidro, Ingeniera Civil, MSc PhD.

INTRODUCCIÓN

Dados varios fenómenos climáticos como el efecto invernadero y el calentamiento global, así como el aumento de la demanda de agua debido al incremento de la población, el abastecimiento de agua en cantidad y calidad para consumo humano presenta un panorama desfavorable. Ante estos desafíos, comprender los ecosistemas desde la perspectiva de los seres humanos como beneficiarios tiene enorme potencial para la protección de los ecosistemas y los servicios que ofrecen [1].

Los servicios ecosistémicos (SE) de aprovisionamiento proveen bienes como comida, agua, madera y fibra para uso directo humano [1]. La producción de agua para fines como uso doméstico, irrigación, producción de electricidad, ganadería, entre otros, se ha convertido en la variable más comúnmente analizada para valorar estos servicios [2].

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [3], [4] sirve como un simulador del ciclo hidrológico espacialmente distribuido y de tiempo continuo a escala de cuenca, se ejecuta sobre una base diaria y se basa en la ecuación general de balance hídrico [5]. En los últimos años, SWAT ha sido propuesto como herramienta para evaluar múltiples SE de aprovisionamiento en las cuencas hidrográficas [6].

El uso de la herramienta SWAT en estudios para la valoración del SE de aprovisionamiento, con énfasis en la cantidad de agua, contribuye con la determinación de prioridades de conservación de las áreas con mayor impacto en la producción y retención de agua, y por tanto, a la toma de decisiones en la

planificación y el manejo de las cuencas hidrográficas, que podrían dar lugar a resultados de desarrollo sostenible [7].

La subcuenca del Río de Oro ofrece la mayor cantidad de recursos y SE para el área metropolitana de Bucaramanga, principalmente el abastecimiento de agua potable para los municipios de Piedecuesta y Floridablanca y la despensa de productos agrícolas y pecuarios del área metropolitana [8].

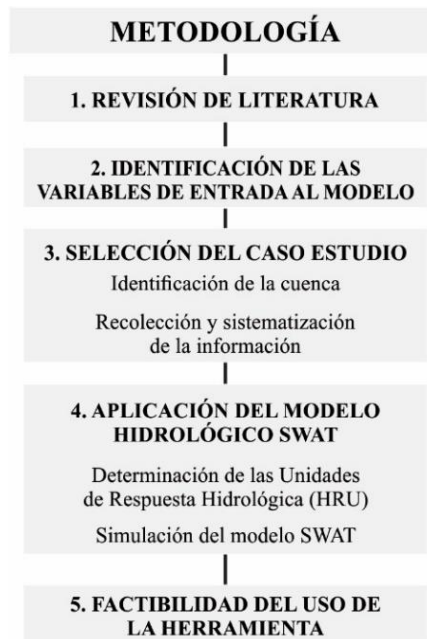
Con base en las consideraciones anteriores, este trabajo busca evaluar la factibilidad de aplicar el modelo SWAT utilizando la información disponible de la Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO), como herramienta para valorar el SE de aprovisionamiento de agua, con énfasis en la cantidad, a partir de la revisión de metodologías aplicadas en literatura especializada, identificación de variables asociadas a la modelación y la exploración de la herramienta.

El documento se organiza de la siguiente manera: la metodología expone el proceso adoptado para llevar a cabo la investigación; se muestran los resultados obtenidos en la revisión de literatura, selección del caso estudio y la aplicación y evaluación del modelo; luego se discute la evaluación de la factibilidad de usar SWAT en la CSRO; por último, se exponen las principales conclusiones para el estudio realizado y recomendaciones para trabajos futuros.

1. METODOLOGÍA

Para dar alcance a los objetivos propuestos en este trabajo, se desarrollaron las etapas que se muestran en la Figura 1, y que se describen a continuación.

Figura 1. Metodología de trabajo utilizada por esta investigación.



1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

Se realizó una búsqueda de información con énfasis en las metodologías adoptadas en la aplicación del modelo hidrológico SWAT para la valoración del SE de aprovisionamiento de agua, con énfasis en la cantidad.

La búsqueda se desarrolló en las bases de datos Scopus y Web of Science. Los términos de búsqueda fueron: SWAT, *ecosystem services*, *water provisioning* y

water quantity. Los resultados fueron refinados sólo a revisiones de literatura y a artículos. De los documentos recuperados se excluyeron aquellos que no han sido citados por la comunidad científica.

Para el análisis de los documentos, se buscó identificar las estrategias para la valoración del SE, variables de mayor influencia, desempeño del modelo, condiciones asociadas, y dificultades encontradas para cada caso de estudio durante la aplicación del modelo hidrológico SWAT.

1.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO

Para la identificación de las variables de entrada del modelo, se acudió a la base de datos de SWAT (swat.tamu.edu/documentation/) para examinar la documentación teórica y de archivos *input/output* de la herramienta. Posteriormente, se hizo un análisis de contenido a través de una búsqueda en la web, lo cual permitió revisar metodologías usadas por documentos latinoamericanos y específicamente colombianos que han aplicado el modelo hidrológico.

El análisis de los documentos se basó en destacar los datos de entrada, identificando su importancia en la modelación de la producción de agua.

1.3 SELECCIÓN DEL CASO ESTUDIO

El caso de estudio fue seleccionado con base en sugerencias realizadas por las directoras de esta investigación, sobre las cuencas con mayor posibilidad de contar con la información de entrada que requiere SWAT para la modelación del SE de aprovisionamiento con énfasis en la cantidad.

1.3.1 Recolección y procesamiento de la información de entrada al modelo.

Para alimentar el modelo hidrológico se usaron diferentes fuentes de información secundaria. Esta información abarcó tablas de atributos asociadas a la cartografía existente para conocer la composición del tipo y la cobertura del suelo y bases de datos climatológicas, datos espaciales de las características del modelo de elevación digital DEM, mapas de pendientes, de uso y cobertura del suelo, y del tipo de suelo para generar las unidades de respuesta hidrológica HRU.

La obtención de los datos implicó el procesamiento de información cartográfica existente, mediante el software ArcMap™ de la *suite* ArcGIS®. Para ello, se proyectó cada mapa a sistema de referencia MAGNA – Colombia – Bogotá, *Datum* oficial para la región de Santander, referida en el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia (MAGNA-SIRGAS) [9]. La información cartográfica existente que debió ser procesada se relaciona a continuación:

1.3.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM). El DEM utilizado se obtuvo de [10] en formato GRID a escala 1:25 000 (Anexo A).

1.3.1.2 Uso y cobertura del suelo. Se empleó la información de [10] en formato *Shapefile*, desarrollada en el 2009 como tesis de pregrado por [11] (Anexo B). La información sobre uso y cobertura obtenida de estos mapas fue clasificada de acuerdo con códigos de asignación de la base de datos SWAT con el fin de darle las características de entrada del modelo. La asignación de los códigos se hizo bajo criterio de los autores y con base en experiencias de estudios colombianos [12]–[15], relacionando las características definidas por la documentación técnica del software y las especificaciones dadas por [10] y [11].

1.3.1.3 Datos del suelo. La información en referencia a suelos fue sustraída de [16] en formato *Shapefile*, desarrollada en el 2016 como tesis de pregrado (Anexo C).

Con el fin de que las unidades de suelo tuvieran los parámetros de entrada que requiere SWAT, se utilizó la información de granulometría y profundidades promedio aportada por [16] (Anexo D). Debido a que no se tenía información de las características físico-químicas de las unidades de suelo presentes, se utilizó el aplicativo SPAW – (*Soil Water Characteristics*) [17], [18] en el que a partir de correlaciones estadísticas entre el porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica en el suelo se calculan variables como densidad aparente, disponibilidad de agua en el suelo y conductividad hidráulica (Anexo E).

Adicionalmente, para usar el aplicativo SPAW y completar los datos relacionados con el suelo, se buscó información de propiedades físico-químicas en investigaciones de pregrado y posgrado realizadas en el área de influencia (Piedecuesta), logrando valores promedio de materia orgánica y carbono orgánico.

El contenido promedio de materia orgánica usado fue tomado de [19]. Al mismo tiempo, el contenido de carbono orgánico presente en las unidades de suelo fue sustraído de [20].

Por otro lado, una búsqueda de literatura permitió obtener el valor del factor de erodabilidad (K) propio de la ecuación universal de pérdida del suelo, mediante una interpolación lineal asociada a la textura y el contenido de materia orgánica en el suelo, adoptada por [21] (Anexo F); de igual manera, la textura se asoció con el grupo hidrológico según la adopción dada por [22] (Anexo G).

Finalmente, debido a la limitante de los parámetros correspondientes a la zona urbana, se utilizó la información por defecto que tiene la base de datos de suelos de SWAT.

1.3.1.4 Mapa de pendientes. La clasificación de pendientes se llevó a cabo en la herramienta *Land Use/Soils/Slope Definition*, propio de la extensión ArcSWAT tomando como base el DEM y rangos bajo criterio de los autores de la siguiente manera: pendiente baja corresponde a valores entre 0 % y 30 %, una pendiente media a valores entre 30 % y 60 % y pendientes altas se encuentran con valores mayores a 60 %; esta clasificación con el fin de lograr una buena distribución de clases en la cuenca (Anexo H). A pesar de que en el departamento de Santander existen rangos de clasificación que han sido desarrollados por otros estudios [10], [23], no se acogieron debido a que las pendientes en la CSRO ocupan principalmente los rangos más altos y no hay una buena distribución a lo largo de la cuenca.

1.3.1.5 Datos climatológicos. Debido a la poca disponibilidad de estaciones dentro de la CSRO, se optó por utilizar estaciones vecinas de diferente tipo y administradas por diferentes entidades como el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander, la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

Se recopilaron datos históricos diarios de información climatológica de las estaciones: El Rasgón, Sevilla, Pajonal, Club Campestre, La Judía, Ciudadela y Florida, administradas por la CDMB. También se usaron datos cada diez minutos de la estación automática meteorológica El Rasgón del GPH. De la base de datos del IDEAM se obtuvieron precipitaciones diarias registradas por las estaciones: El Picacho, Granja Piedecuesta y Berlín Automática. Los datos de caudales se obtuvieron de la estación de aforo El Conquistador instalada por intermedio del convenio realizado entre el GPH y la Piedecuestana de Servicios (Anexo I).

El procesamiento de la información se llevó a cabo mediante la organización de los datos, de acuerdo a la serie de tiempo disponible (Anexo J). Los datos de la estación

automática El Rasgón (GPH) tuvieron un procesamiento especial, en donde se pasaron todos los parámetros a escala diaria (Anexo K). Para la selección del periodo simulado se tomó como referencia la serie de caudales disponibles medidos por la estación El Conquistador (GPH), comprendido desde el 2 de octubre de 2008 hasta el 31 de marzo de 2011. Así mismo, la elección de las estaciones usadas se hizo teniendo en cuenta la disponibilidad de datos en el mismo periodo de caudales medidos y la ausencia de datos faltantes en sus series.

Para el análisis de los datos de entrada mencionados previamente, se incorporaron las características físico-químicas del suelo y códigos de cobertura vegetal indispensables para llevar a cabo la modelación hidrológica, modificando la base de datos del programa. Este procedimiento también se puede realizar a través del menú *Edit SWAT Input* en el *Edit SWAT Databases*.

1.4 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

La aplicación del modelo hidrológico se realizó en dos etapas: i) determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU); y ii) simulación. Para ello, se seleccionaron los documentos técnicos encontrados en la base de datos de SWAT [5], [24], [25] y se siguieron los lineamientos que ellos presentan para la modelación en la extensión ArcSWAT.

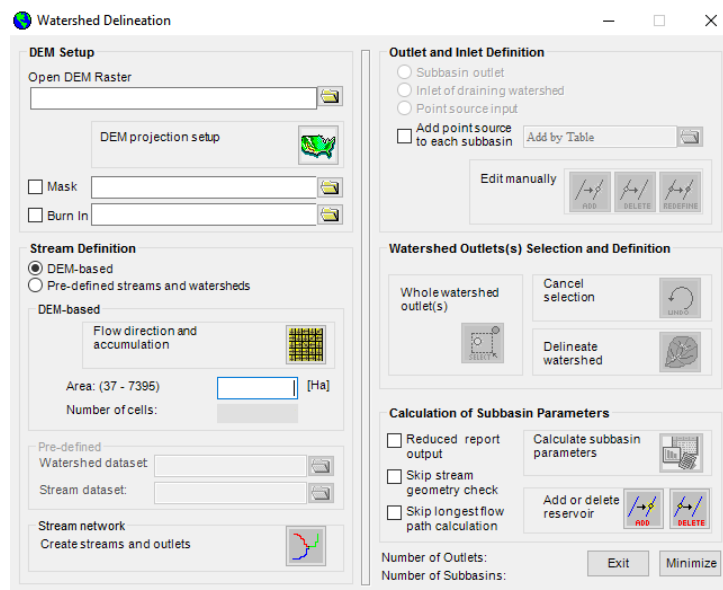
1.4.1 Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

La determinación de las HRU se hizo con base en las pautas dadas por [24]. Para ello, inicialmente se alimentó la herramienta *Watershed Delineation* (Figura 2) con el DEM y la red de flujo, determinada a partir de las elevaciones (Anexo L), con el fin de definir la delineación de las subcuencas, los puntos de desembocaduras y algunos parámetros de cada subcuenca como área, pendiente, camino más largo y

elevaciones; todos estos productos son propios del modelo hidrológico y corresponden a un paso preliminar a la consecución de las HRU.

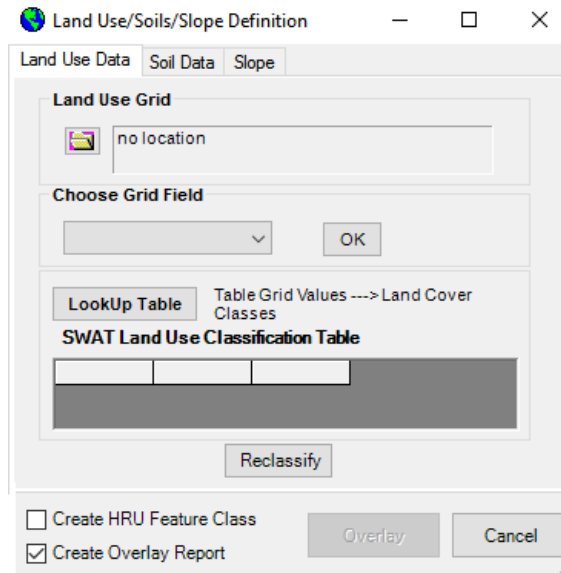
Posteriormente, se incluyeron los datos de pendientes, usos y tipo de suelo a la herramienta *Land Use/Soils/Slope Definition* (Figura 3) con el propósito de que el software divida y distribuya las subcuencas generadas previamente, de acuerdo a combinaciones únicas (HRU). Se delinearon las HRU para cada subcuenca usando un nivel mínimo de 10% del área de la subcuenca en la herramienta *HRU Definition*, es decir, los usos, suelos o pendientes que cubrían un porcentaje menor al 10 % en cada subcuenca fueron eliminados y el área restante repartida. Los umbrales están en función de las metas del proyecto y el nivel de detalle deseado para ser modelado, y a menudo tienen un efecto menor en simulaciones de rendimiento de agua y caudales, pero un efecto mayor en la simulación de sedimentos y carga de nutrientes [26].

Figura 2. Watershed Delineation – SWAT.



Tomado de: ARCSWAT, 2012.

Figura 3. Land Use/Soils/Slope Definition – SWAT.



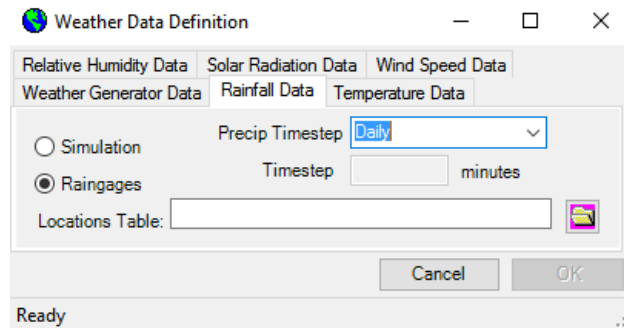
Tomado de: ARCSWAT, 2012.

1.4.2 Simulación.

Mediante archivos de texto *.txt, se incluyó la información preliminar agrupando cada variable (i.e. precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar) de las estaciones seleccionadas para la simulación. Cada archivo de entrada consta de un número de identificación (ID), el nombre (NAME), la latitud y longitud en grados decimales (LAT) (LONG) y la altura de las estaciones de referencia (ELEVATION) (Anexo M).

Posteriormente, la información preliminar se enlazó con la herramienta *Weather Stations* del menú *Write Input Tables* (Figura 4), con los correspondientes datos individuales de cada estación en formato *.txt, ordenados consecutivamente desde el 28 de febrero de 2010 (20100228) hasta el 18 de enero de 2011 (20110118) (Anexo N).

Figura 4. Weather Data Definition – SWAT.

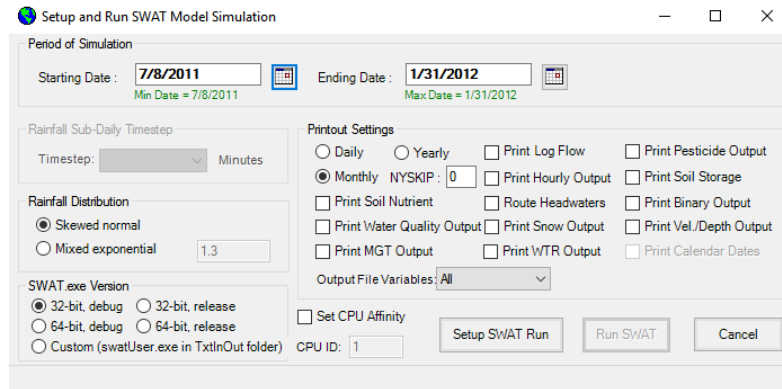


Tomado de: ARCSWAT, 2012.

El comando *Run SWAT* del menú *SWAT Simulation* (Figura 5) permitió establecer la base diaria, el periodo simulado y ejecutar la simulación. Los resultados se compararon con los datos de caudales observados por la estación El Conquistador, empleando técnicas gráficas como hidrogramas y recta de regresión de flujos simulados y observados. Además, se hizo un análisis descriptivo para los resultados de producción de agua en cada subcuenca y del caudal de salida de la cuenca. Con esta comparación se tuvieron elementos para evaluar de manera preliminar el desempeño de la herramienta en la etapa de simulación.

El periodo usado para la recta de regresión de caudales es de 4.7 meses correspondiente a los últimos 140 días simulados, desde el 1 de septiembre de 2010 hasta el 18 de enero de 2011; esto debido a que no existen valores de caudales observados en el mes de agosto de 2010.

Figura 5. Setup and Run SWAT Model Simulation – SWAT.



Tomado de: ARCSWAT, 2012.

1.5 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LA HERRAMIENTA EN LA CUENCA SELECCIONADA

La evaluación de la factibilidad del uso de la herramienta en la cuenca seleccionada se hizo de manera cualitativa, definiendo criterios y rangos de calificación con base en la experiencia durante la aplicación del modelo en el caso estudio de la CSRO. Los criterios de evaluación se basaron en: i) los planteados por [27], enfatizando en los aspectos generales de la herramienta y ii) el desempeño específico de SWAT como herramienta para predecir la influencia de los usos alternativos del suelo en la generación de agua en la CSRO.

En cuanto a los aspectos generales de la herramienta se consideró: la disponibilidad y el manejo de datos de entrada, documentación y soporte técnico para el uso de la herramienta; facilidad de uso y desempeño del modelo. También, se adoptaron pautas de [27], [28] y [6] que sirven como referencia para esta evaluación.

Para soportar la evaluación del desempeño del modelo aplicado al caso estudio, se adoptaron los criterios de evaluación del modelo según [28] especificados en la Tabla 1, donde O_i es el i-ésimo caudal observado, S_i el i-ésimo caudal simulado y

O_{prom} el caudal observado promedio, durante el periodo de n días; además, con base en los resultados obtenidos y a la revisión de literatura, se determinó si SWAT puede ser usado como herramienta para predecir la influencia de los usos/coberturas del suelo en la generación de agua.

Tabla 1. Estadísticos de evaluación del modelo.

Estadístico	Descripción
Pendiente ^a	Relación relativa entre los valores simulados y medidos.
Intercepto-Y ^a	Indica presencia de un retraso o adelanto entre las predicciones del modelo y los datos medidos.
Coeficiente de determinación (R^2)	Describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y medidos
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	Indica qué tan bien la gráfica* ajusta a la línea 1:1
	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{prom})^2} \right]$
Percent bias (PBIAS)	Mide la tendencia de los datos a ser mayores o menores que los valores observados.
	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i}$
Razón de desviación estándar-RMSE (RSR)	
	$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{prom})^2}}$

^a A partir de la línea de regresión de mejor ajuste del gráfico de $Q_{observado}$ vs $Q_{simulado}$

Adaptado de: [26]

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 REVISIÓN DE LITERATURA

En los últimos años, los modelos hidrológicos han sido cada vez más utilizados para comprender y gestionar las actividades naturales y humanas que afectan a los sistemas de cuencas hidrográficas [12]. En la modelación, la cuenca está conformada por múltiples sub-cuencas que posteriormente, producto de la caracterización de propiedades geomorfológicas e hidrológicas similares, se dividen en unidades de espacio homogéneas llamadas unidades de respuesta hidrológicas (HRU). La producción de agua predicha por SWAT se define como la cantidad neta de agua (superficial, lateral y subterránea en cada HRU) que sale de la subcuenca y que contribuye al caudal [7].

El número de estudios sobre SE y la aplicación de SWAT como herramienta de investigación ha aumentado rápidamente en el último par de décadas [2]. A pesar de ello, solamente el 1.5 % de publicaciones de SWAT y el 0.4 % de publicaciones relacionadas a SE, son estudios realizados para evaluar los servicios que pueden llegar a ofrecer los ecosistemas mediante el uso de SWAT. Esto se refleja en la búsqueda online realizada al 24 de septiembre de 2016 en las bases de datos Scopus y Web of Science, donde la exploración de artículos y revisiones con los términos SWAT, *ecosystem services* y *water provision* dio lugar a 14 publicaciones, 9 de ellas comunes en ambas bases de datos; y refinando al término *water quantity* se redujo a 4 documentos, de los cuales 3 son comunes en Scopus y Web of Science. Algunos aspectos clave relacionados con el uso de SWAT para valorar el SE de aprovisionamiento de agua en cantidad se sintetizan a continuación:

2.1.1 Estrategias para la valoración del SE.

Aunque no existe un marco estandarizado para la asociación del uso de SWAT con el análisis socio-económico, los investigadores hacen uso de herramientas adicionales, como algoritmos y marcos de referencia, que sirven para complementar y optimizar la determinación del consumo humano, monetario, o el proceso de toma de decisiones [29].

Algunas metodologías valoran el SE desde un enfoque social, es decir, tienen en cuenta las necesidades de los beneficiarios e/o inversionistas del SE, calculando la disponibilidad real de agua per cápita de acuerdo a polígonos de influencia [30]; o asignando indicadores para los usos del agua derivados de la combinación de la modelación y de datos socioeconómicos [31]. Mientras tanto, otras lo hacen apelando al factor económico teniendo en cuenta la relación entre el rendimiento de los cultivos y la evapotranspiración [32]; asociando un modelo de zonificación, clasificando prioridades de uso en función de indicadores de costos [7]; o usando modelos de iteración que involucran valores de mercado de los usos dados al agua [29]; todos ellos con el fin de priorizar espacial y temporalmente la producción disponible de agua, desde el punto de vista económico. Sin embargo, otras metodologías, en menor proporción, recurren a aspectos ecológicos, donde no enmarcan un enfoque socio-económico, sino que centran su análisis en la escasez y vulnerabilidad en los niveles de provisión de agua de acuerdo a sus usos [33] y en la calidad de la producción de agua [29], [34].

En síntesis, se identificó que la valoración del SE de aprovisionamiento se puede realizar de acuerdo al enfoque que más interese a las autoridades o de acuerdo a las circunstancias ligadas a la cuenca, cuantificando el SE dando prioridades sociales, económicas o ecológicas. Para lograr este alcance, es necesario acoplar herramientas de otras disciplinas al uso de SWAT.

2.1.2 Variables de mayor influencia.

Autores como [7], [35], y [36] coinciden en que la influencia de los parámetros de entrada se puede conocer una vez finalizada la etapa de calibración, en la que, por medio de un análisis de sensibilidad, se identifican aquellos que alteran, en mayor medida, los resultados del modelo. Por ejemplo, [36] afirma que el modelo es altamente sensible al flujo base; [7] considera que la caracterización espacial de todas las variables de entrada (Tabla 2) son factores que conducen a fuertes cambios en la producción de agua; sin embargo, estos dos últimos coinciden en considerar como parámetros de calibración principales: el número de curva inicial para condición húmeda (CN2), el factor de compensación de evaporación del suelo (ESCO), la constante de recesión del flujo base (ALPHA_BF) y el tiempo de retraso de flujo subterráneo (GW_DELAY).

Por otro lado, [35] infiere que la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es el factor más importante en los modelos hidrológicos. Además, concluye que los resultados del análisis de sensibilidad no pueden ser extrapolados a otras zonas, debido a que no presentan las mismas características particulares.

En consecuencia, las variables que más influyen en el modelo pueden estimarse mediante un análisis de sensibilidad finalizada la etapa de calibración y corresponden, en su mayoría, a parámetros hidrológicos y físico-químicos.

2.1.3 Desempeño del modelo.

A pesar de que SWAT inicialmente no fue diseñado para modelar SE, dadas sus capacidades, está siendo adaptado para permitir esta funcionalidad [6]. Investigaciones como [7], [27], [33], [34], [36] y [37] evalúan el desempeño del modelo basados en directrices que han sido fuertemente aceptadas por la comunidad internacional con cerca de 1900 citas, según la base de datos Scopus, planteadas por [28], tales como los estadísticos evidenciados en la Tabla 1 y técnicas gráficas como hidrogramas y recta de regresión de caudales observados

versus simulados. No obstante, agregan que el desempeño está asociado a las condiciones de cada zona de estudio.

Para ilustrar esto, en etapas de calibración y validación, y con base en las clasificaciones de rendimiento generales resumidas en el Anexo O, que evalúan el comportamiento de estadísticos recomendados por [28] (i.e. RSR, NSE y PBIAS), varios autores evalúan el desempeño del modelo, de acuerdo con categorías como: bueno, aceptable y pobre [34], [36], [37], [27]. Aunque en general el desempeño del modelo es satisfactorio, se evidenció que para varios autores, las fuentes de error más comunes fueron: la tendencia del modelo a subestimar los flujos pico [36], [37] y la lejanía de la HRU o la subcuenca con la zona donde se toman las mediciones de caudal empleadas en la calibración [27].

2.1.4 Condiciones asociadas al estudio y limitaciones.

Condiciones específicas como el clima, la presencia de población [30] e hidroeléctricas [7] en el área de influencia, conllevan a variaciones en la metodología para valorar el SE; por ejemplo, debido a su zona de estudio [7], [27] y [32] incluyen parámetros estacionales como el deshielo, mientras que [30], [31], [33], [35] y [36] desarrollan su investigación en climas tropicales, obligándose a un ajuste de los parámetros por defecto del modelo SWAT; [30] está influenciado por la variación temporal y espacial de modelos poblacionales, y el caso de estudio de [7] relaciona la presencia de hidroeléctricas a la evaluación de costos de energía y entradas adicionales de agua.

A diferencia de los estudios realizados en Norteamérica [27], [29], se hace mención de limitaciones en la baja disponibilidad de datos climáticos en cuencas tropicales [36], en algunos casos, debido a la pobre coordinación y mala administración de las autoridades [30].

Por lo tanto, las metodologías propuestas para la evaluación del SE con la aplicación del modelo hidrológico SWAT, las variables más representativas en la modelación y el desempeño dependen ampliamente de las condiciones de la zona, limitadas a sus inconvenientes, necesidades y atributos propios. A pesar de esto, SWAT es flexible en el proceso de modelación, incluso en condiciones de baja disponibilidad de datos, especialmente los datos meteorológicos.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO

En relación a la identificación de las variables fundamentales usadas para ejecutar el modelo SWAT, la Tabla 2 resume la información que, a partir de estudios y trabajo de campo previos, conducen a la obtención de resultados representativos con respecto a los componentes simulados del ciclo hidrológico [5], [30]. Los documentos colombianos contribuyeron significativamente a la identificación y selección de las variables de entrada en un contexto similar al caso de estudio seleccionado.

Por su parte, tomando como referencia [12], [14], [15], [24] se identificó que asociado al mapa de suelos, debe haber disponibilidad de las propiedades físico-químicas de cada capa que conforma el perfil para cada uno de los tipos de suelo. La Tabla 3 presenta los principales parámetros que se deben suministrar a la base de datos de suelos de SWAT de acuerdo a la capa del perfil del suelo que corresponda. Sin embargo, existen atributos que debido a la poca información disponible y al bajo impacto que tiene en los flujos simulados no tienen mucha relevancia, tales como: fracción de porosidad en la que se excluyen aniones (ANION_EXCL), volumen de grietas máximo o potencial (SOL_CRK), albedo de suelo húmedo (SOL_ALB), entre otros.

Tabla 2. Información básica para ejecutar el modelo SWAT.

Información básica	Descripción
Modelo digital de elevación (DEM) ^b	Formato ESRI GRID. La elevación y la resolución pueden estar en distintas unidades.
Mapa de cobertura y uso del suelo	Formato ESRI GRID, <i>Shapefile</i> o <i>feature class</i> . Clasificado dentro de las categorías que maneja SWAT.
Mapa de Suelos	Formato ESRI GRID, <i>Shapefile</i> o <i>feature class</i> . Clasificado de manera que se asocie a la base de datos de suelos definida por el usuario.
Datos climatológicos diarios	Base de datos con periodicidad diaria de precipitación, temperatura máxima/mínima del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Esta debe estar referenciada en una tabla de localización de las estaciones meteorológicas.

^b En caso de no poseer un DEM, se debe tener el tema de curvas de nivel con su respectiva altura.

Así mismo, los datos climatológicos deben ser ingresados como se indicó en la sección 2.4.2 con las unidades que se muestran en la Tabla 4. La información suministrada debe tener la misma fecha de inicio y contener igual cantidad de datos.

Tabla 3. Propiedades físico-químicas asociadas al mapa de suelos requeridos en SWAT.

Propiedad	Nombre del Campo ^c	Unidad
Nombre del suelo	SNAM	-
Factor de erodabilidad K	K(USLE) (top layer)	-
Grupo hidrológico	HYDGRP	-
Profundidad al fondo de la capa	SOL_Z (layer #)	mm
Densidad aparente	SOL_BD (layer #)	g/cm ³
Disponibilidad de agua en el suelo	SOL_AWC (layer #)	mm/mm
Conductividad hidráulica saturada	SOL_K (layer #)	mm/h
Contenido de Carbono orgánico	SOL_CBN (layer #)	% peso del suelo
Contenido de Arcilla	CLAY (layer #)	% peso del suelo
Contenido de Limo	SILT (layer #)	% peso del suelo
Contenido de Arena	SAND (layer #)	% peso del suelo

^c Nombre del Campo asociado a la base de datos de suelos de SWAT.

Tabla 4. Datos climatológicos requeridos en la base de datos de SWAT.

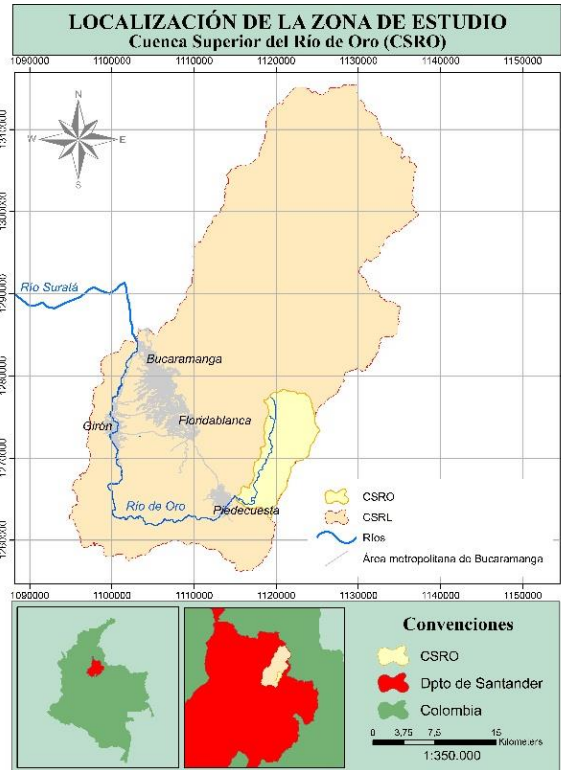
Parámetro	Unidad
Fecha	dd/mm/aaaa
Longitud	Grados decimales
Latitud	Grados decimales
Elevación	m.s.n.m.
Precipitación	mm
Máxima temperatura	°C
Mínima temperatura	°C
Velocidad del viento	m/s
Humedad relativa	%
Radiación solar	MJ/m ² /d

2.3 CASO DE ESTUDIO

Se seleccionó la Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) debido a la disponibilidad de información relacionada con las variables necesarias para la aplicación del modelo, obtenida en investigaciones previas [10], [11], [16].

La CSRO forma parte de la Cuenca del Río de Oro y se encuentra enmarcada hidrológicamente por la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) (Figura 6). La CSRO tiene un área aproximada de 80 km² y es considerada una reserva hídrica para el área metropolitana de Bucaramanga y en especial para el municipio de Piedecuesta [38]–[41], citado por [10].

Figura 6. Localización – CSRO.



Adaptado de: [10], [42], [43].

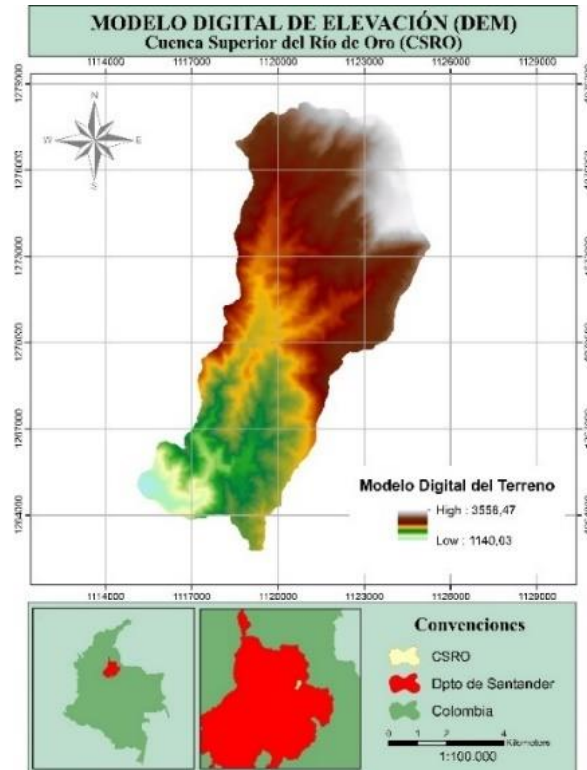
Se localiza en el extremo norte del departamento de Santander, referenciada entre las coordenadas 1,115,000E y 1,262,761N y las coordenadas 1,125,281E y 1,278,305N con origen en Bogotá. Posee alturas sobre el nivel del mar que van desde los 3500 m.s.n.m. en el alto el Picacho hasta los 1100 m.s.n.m. en la estación El Conquistador sobre el Río de Oro [40], [41], citado por [10].

2.3.1 Recolección y procesamiento de la información

En esta sección se presenta la información recolectada y procesada que se suministró al modelo. Así mismo, se muestran generalidades de los datos expuestos.

2.3.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM): La zona de estudio presenta una variación altitudinal entre 1140.03 y 3556.47 m.s.n.m. (Figura 7) y permitió definir la red de drenaje y realizar la clasificación de pendientes para la aplicación del modelo.

Figura 7. Modelo de elevación digital – CSRO.



Adaptado de: [10], [42].

2.3.1.2 Uso y cobertura del suelo: Según la clasificación adoptada por [10] y [11], la CSRO se caracteriza por estar distribuida principalmente por cultivos, pastos y rastrojos, seguido de bosques secundarios. Estos dos influyen aproximadamente en el 85 % del área de la cuenca y el 15 % restante está comprendido por pastos naturales, rastrojos, vegetación de páramo, cultivos

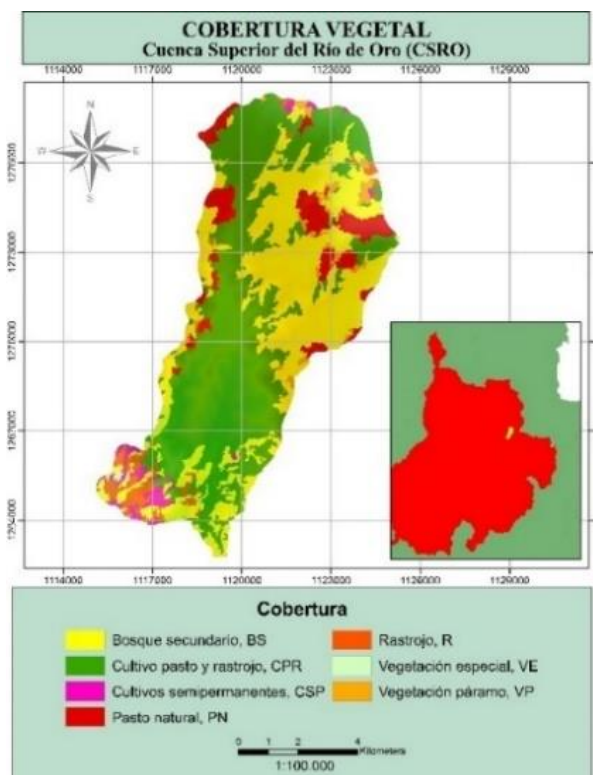
semipermanentes y vegetación especial (Figura 8). La Tabla 5 muestra la asignación de códigos de SWAT realizada a la vegetación presente en la CSRO.

Tabla 5. Características generales de la cobertura presente en la CSRO.

Vegetación presente	Código SWAT	Área (km²)	Área (%)
Bosque secundario (BS)	FRST	30.72	38.5
Cultivo, pasto y rastrojo (CPR)	RNGB	37.17	46.6
Cultivos semi-permanentes (CSP)	AGRC	1.65	2.1
Pasto natural (PN)	RYEG	5.75	7.2
Rastrojo (R)	MESQ	2.52	3.2
Vegetación especial (VE)	RNGE	0.18	0.2
Vegetación páramo (VP)	BROM	1.80	2.3
	Total	79.8	

2.3.1.3 Datos del suelo: El suelo de la CSRO, según la clasificación textural realizada por [16], se caracteriza por ser un suelo arcilloso (Ar) en cerca del 66 % del área total de la cuenca, seguido de una textura areno arcillosa (AAr) y un 18 % entre textura franco arcillo arenosa (FArA) y franco arenosa (FA), como lo indica la Figura 9 y la Tabla 6. Además, las zonas urbanas corresponden al 0.3 % del área de la cuenca en estudio, equivalente a 0.25 km².

Figura 8. Cobertura vegetal – CSRO.

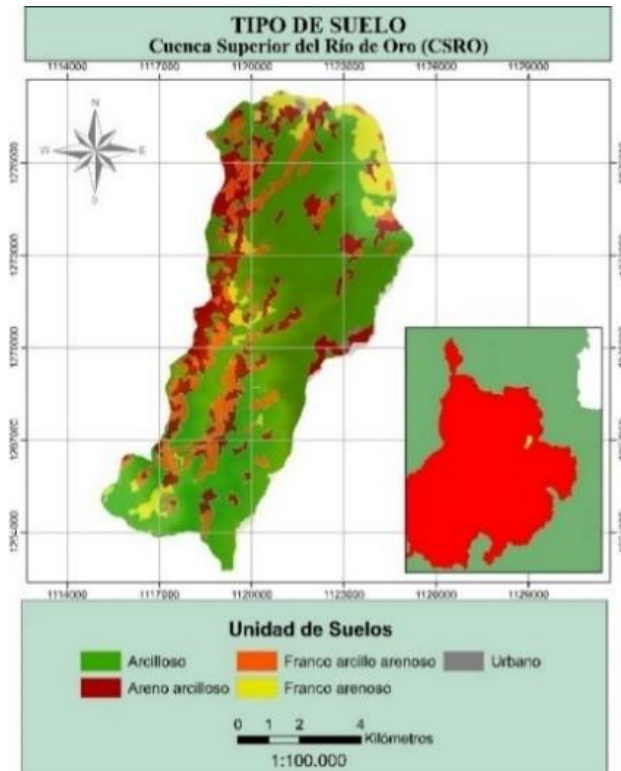


Adaptado de: [10], [42].

Tabla 6. Características generales del tipo de suelo presente en la CSRO.

Textura Suelo	Código SWAT	Área (km²)	Área (%)
Franco arenoso	FA	5.45	7.3
Franco arcillo arenoso	FArA	7.86	10.5
Arcilloso	Ar	49.18	65.7
Areno arcilloso	AAr	12.07	16.1
Urbana	URBAN LAND	0.25	0.3
	Total	74.81	

Figura 9. Tipos de suelo – CSRO.



Adaptado de: [16], [42].

En relación con las características físico-químicas de los suelos, los resultados utilizados para la modelación hidrológica corresponden a una única capa del perfil de cada tipo de suelo. Estos valores se detallan en la Tabla 7 y se sintetizan a continuación:

Las profundidades utilizadas son un promedio de los estudios empleados en el trabajo de [16] (Anexo D). Estas longitudes corresponden a la profundidad a la cual fue tomada la muestra y no necesariamente corresponde al perfil de cada tipo de suelo. Debido a la limitación de estudios detallados se optó por utilizar profundidades promedio (SOL_Z).

Como se evidencia en la Tabla 7, se adoptó un valor de 2.17 % de carbono orgánico promedio (SOL_CBN) en las muestras de suelo.

Además, los valores de densidad aparente, disponibilidad de agua en el suelo y conductividad hidráulica saturada resultantes de la aplicación de SPAW, se lograron con los valores de granulometría de [16] con presencia de un 3.8 % de materia orgánica para cada textura.

El Anexo F enmarca los valores del factor de erodabilidad K adoptados por [21] utilizados en la interpolación lineal realizada (K_USLE). Por su parte, el Anexo G evidencia la clasificación dada por [22] para la asignación del grupo hidrológico (HYDGRP) a las texturas del suelo.

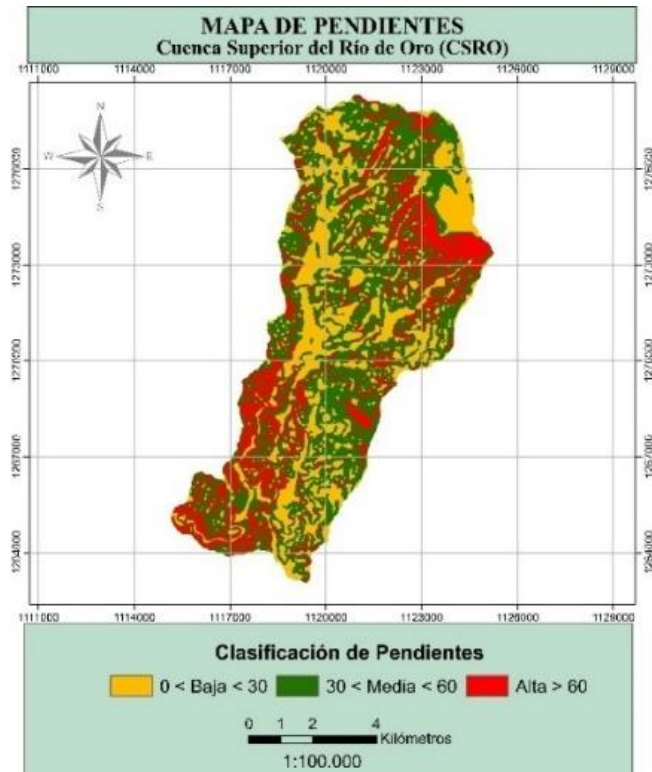
Tabla 7. Características físico-químicas de los suelos utilizados en la modelación hidrológica.

Textura	SNAM ^e	SOL_Z ^f (mm)	K_USLE ^g	HYDGRP ^h	SOL_BD ⁱ (g/cm ³)	SOL_AWC ^j (mm/mm)	SOL_K ^k (mm/h)	SOL_CBN ^l %	CLAY ^m %	SILT ⁿ %	SAND ^o %
Franco arenoso	FA	943.8	0.026	A	1.37	0.12	35.5	2.17	15.33	28	56.67
Franco arcillo arenoso	FArA	953	0.029	C	1.41	0.11	18.44	2.17	22	20	58
Arcilloso	Ar	961.9	0.018	D	1.28	0.11	0.82	2.17	63.16	17.5	19.31
Arcillo arenoso	ArA	954.3	0.016	D	1.45	0.11	1.06	2.17	42.5	7.5	50
Urbano	URBAN LAND	996.7	0.28 ^d	D ^d	1.50 ^d	0.10 ^d	500 ^d	0 ^d	15 ^d	30 ^d	55 ^d

^d Datos por defecto de la base de datos de suelos de SWAT; ^e SNAM: Nombre de suelo; ^f SOL_Z: Profundidad al fondo de la capa; ^g K_USLE: Factor de erodabilidad K; ^h HYDGRP: Grupo hidrológico; ⁱ SOL_BD: Densidad aparente; ^j SOL_AWC: Disponibilidad de agua en el suelo; ^k SOL_K: Conductividad hidráulica saturada; ^l SOL_CBN: Contenido de carbono orgánico; ^m CLAY: Contenido de arcilla; ⁿ SILT: Contenido de limo; ^o SAND: Contenido de arena.

2.3.1.4 Mapa de pendientes: El resultado de la aplicación de la herramienta *Land Use/Soils/Slope Definition* se aprecia en la Figura 10. Esta clasificación permitió una caracterización de las HRU más detallada en cada subcuenca, donde el 49.8 % de la CSRO corresponde a una pendiente media, el 28.6 % a pendiente baja y a pendiente alta un 21.6 %.

Figura 10. Mapa de pendientes – CSRO.



2.3.1.5 Datos climatológicos: La información diaria recolectada de las estaciones El Rasgón, Sevilla, Pajonal, Club Campestre, La Judía, Ciudadela, Florida, El Picacho, Granja Piedecuesta y Berlín Automática; los datos de caudales de la estación de aforo El Conquistador, así como los datos climatológicos procesados a escala diaria de la estación automática El Rasgón (GPH), se organizaron de acuerdo a la fecha de inicio de su serie de datos.

La confiabilidad de la información estuvo opacada por los datos faltantes y periodos no disponibles como se evidencia en el Anexo I y en la sección 3.5.1 de este documento.

El periodo de datos a simular estuvo limitado a partir del 31 de marzo de 2011, día en el que finalizan los aforos aportados por el GPH de la estación El Conquistador. Por este motivo, se excluyeron, inicialmente, las estaciones El Rasgón, Pajonal,

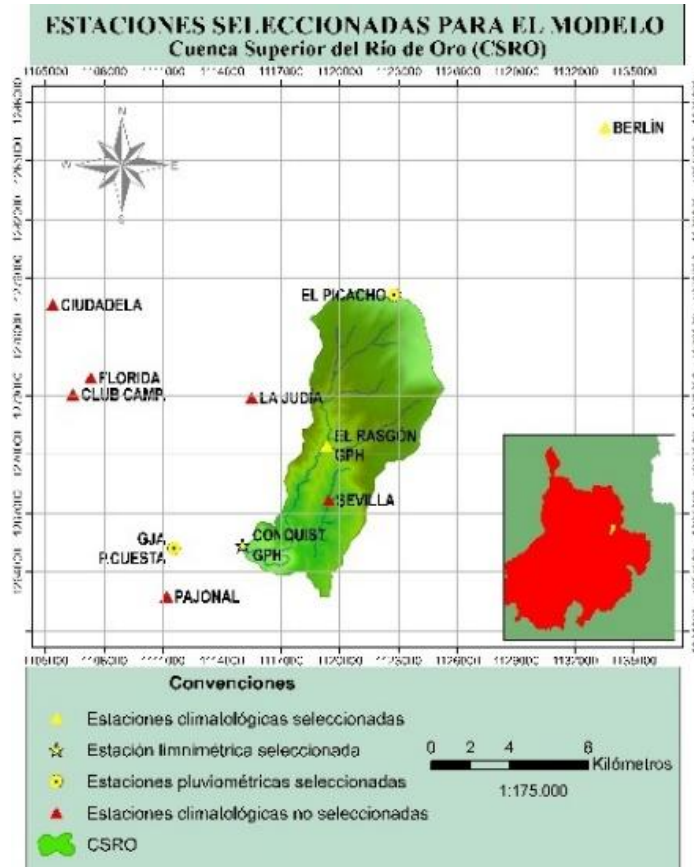
Ciudadela, Club Campestre y Florida ya que sus series de datos, en algunos casos, inician a partir del 2012; de igual manera, se excluyó la estación climatológica Sevilla puesto que únicamente cuenta con 67 días de valores disponibles en la misma serie de datos de caudales observados. De la estación climatológica Berlín Automática sólo se utilizaron datos de precipitación debido a que no cuenta con todos los parámetros de clima necesarios. La única estación climatológica que no fue excluida es El Rasgón (GPH) pero presenta serie incompleta en febrero de 2010 (del 9 al 27 de febrero) y la disponibilidad de sus datos abarca hasta el 18 de enero de 2011, por tanto, la selección del día de inicio y fin de la simulación, estuvo ligada a la información disponible de esta estación.

En consecuencia, el periodo seleccionado para la simulación es de 325 días correspondientes a 10.83 meses, desde el 28 de febrero de 2010 hasta el 18 de enero de 2011. Las estaciones usadas para el modelo cuentan con la misma cantidad de datos en el rango escogido. Las estaciones se muestran en la Tabla 8 y Figura 11.

Tabla 8. Estaciones seleccionadas para la simulación hidrológica.

Estación seleccionada	Elevación (m.s.n.m.)	Coordenadas	
		Longitud	Latitud
El Conquistador GPH (Limnimétrica)	1105	-73.0364	6.9948
Granja Piedecuesta (Pluviométrica)	1000	-73.068	6.9933
El Picacho (Pluviométrica)	3310	-72.966	7.11
El Rasgón GPH (Climatológica)	2148	-72.9974	7.0407
Berlín Automática (Climatológica)	3316	-72.8685	7.187

Figura 11. Red de estaciones – CSRO.



2.4 APLICACIÓN DEL MODELO

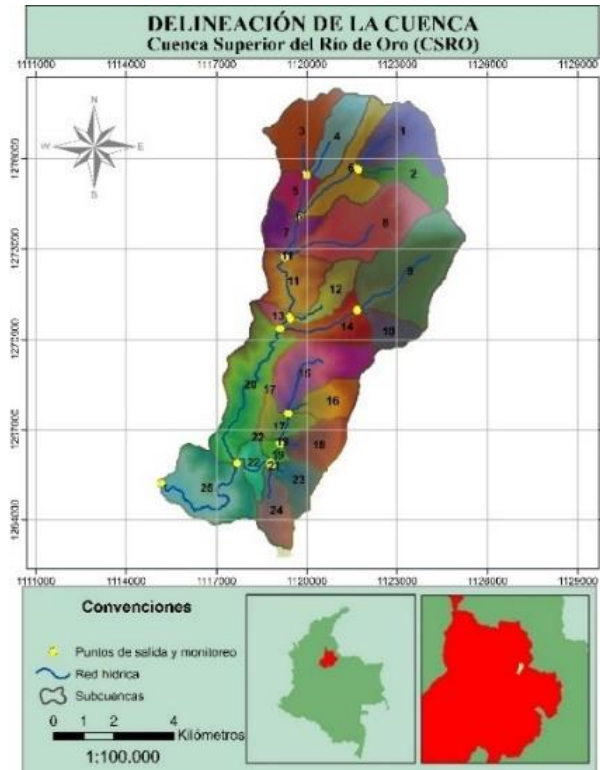
2.4.1 Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

Una vez realizada la delimitación de la CSRO con la aplicación *Watershed Delineation* de SWAT, se obtuvo un área de 73.94 km², comprendida por 25 subcuencas. La red hídrica definida a partir del DEM y los puntos de control o salida definidos por la herramienta, se observan en la Figura 12 (Anexo P).

Las HRU se definen como áreas homogéneas respecto a la respuesta hidrológica y características geo-climáticas. Las HRU están conformadas por áreas dispersas, desconectadas entre sí pero que mantienen propiedades hidrológicas comunes

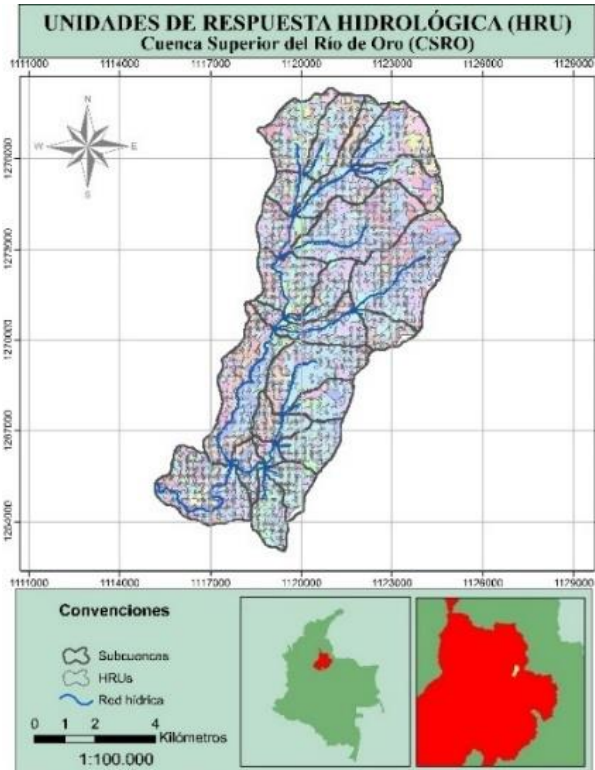
relacionando pendiente, tipo de suelo y uso de cobertura vegetal [44], citado por [15].

Figura 12. Subcuencas, red hídrica y puntos de salida generados en SWAT – CSRO.



Al sobreponer la pendiente, tipo de suelo y uso de cobertura vegetal, se generaron 287 HRU consignadas en el Anexo Q. Así mismo, sumado al reporte, la herramienta permitió visualizar espacialmente la distribución de las HRU en la CSRO, como lo muestra la Figura 13 (Anexo R).

Figura 13. HRU generadas en SWAT – CSRO.



2.4.2 Simulación.

La simulación dio como resultado la respuesta que tienen las HRU ante un evento meteorológico. Para ello, el Anexo S muestra el reporte generado, en donde se cuantifican diferentes variables asociadas a la aplicación del modelo hidrológico para cada HRU en cada paso de tiempo, tales como: precipitación total cayendo (PRECIP), evapotranspiración potencial y actual (PET) (ET), escorrentía superficial (SURQ_CNT), entre otros; y procesos del suelo como: producción de sedimentos (SYLD), producción de nitrógeno y fósforo orgánico (ORGN) (ORGP), cantidad de nitratos transportados (NSURQ) (NLATQ), entre otros. La variable más importante en el enfoque de esta investigación es la producción de agua, definida como cantidad total de agua que sale de cada HRU y entra en el canal principal durante el paso de tiempo (WYLD) que es calculada mediante la suma de las contribuciones

al flujo de la escorrentía superficial, el flujo lateral, y el flujo subterráneo menos las pérdidas de transmisión y las abstracciones de estanque [25].

Para ilustrar esto, en el periodo simulado (28-02-2010 al 18-01-2011) las 25 subcuencas aportaron un total de 277,295.95 mm de agua al canal principal; el promedio de estos aportes fue de 11,091.84 mm de agua; la subcuenca que hizo mayor aporte fue la 25 (Figura 12) con 25,538.90 mm y la subcuenca 21 con 2,800.50 mm fue la que menor aporte realizó (Anexo T).

Otra variable importante en los resultados fue el promedio diario de caudales simulado en el cierre de la cuenca durante el intervalo de tiempo, donde se evidenciaron caudales máximos de 22.66 m³/s en mayo y de 18 m³/s en noviembre; el caudal promedio en los dos semestres es de 2.50 m³/s.

Los resultados se compararon con los caudales observados de la estación El Conquistador GPH (Figura 14 y Anexo U) dejando ver que en la etapa inicial el modelo tiene una precisión deficiente; esto coincide con la recomendación de usar al menos un año de *warmup* para que el modelo se equilibre [25]. Sin embargo, a medida que el periodo transcurre los flujos se equilibran, pero presentan una sobreestimación en los valores máximos. Para la recta de regresión, se obtuvo una pendiente de 0.935 y un coeficiente de determinación R² de 0.499 (Figura 15). Estos valores son clave para la evaluación de factibilidad en la sección 3.5.4 de este documento.

Además, como resultado de la simulación, se obtuvo el balance hídrico del caso estudio (Figura 16). Para ilustrar esto, el modelo presenta una precipitación acumulada anual de 2,181.3 mm, una evapotranspiración real de 1,000.2 mm, la evapotranspiración potencial de 1,323.1 mm, una escorrentía superficial de 491.12 mm y una recarga para los acuíferos profundos de 26.12 mm para el periodo de simulación seleccionado. Finalmente, la razón promedio anual caudal/precipitación es de 0.48.

Figura 14. Valores de flujos simulados y flujos observados del 2010-02-28 al 2011-01-18.

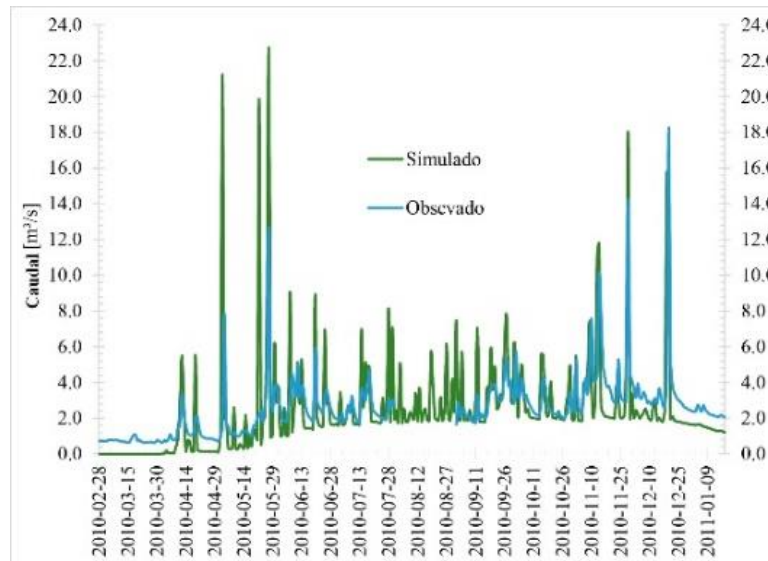


Figura 15. Regresión lineal con valores de flujo observado y simulado en SWAT del 2010-09-01 al 2011-01-18.

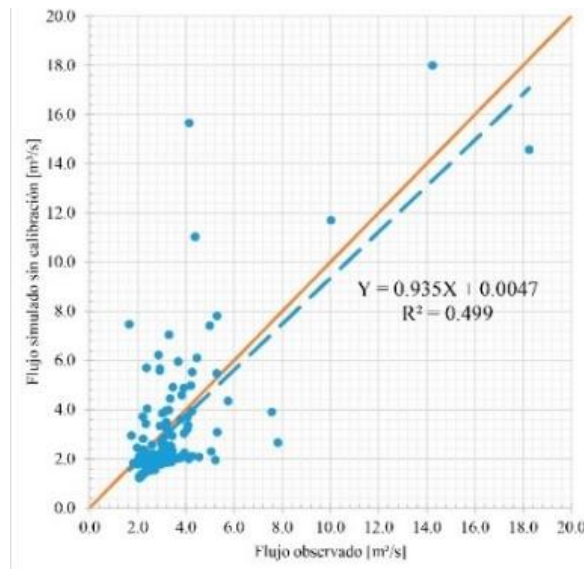
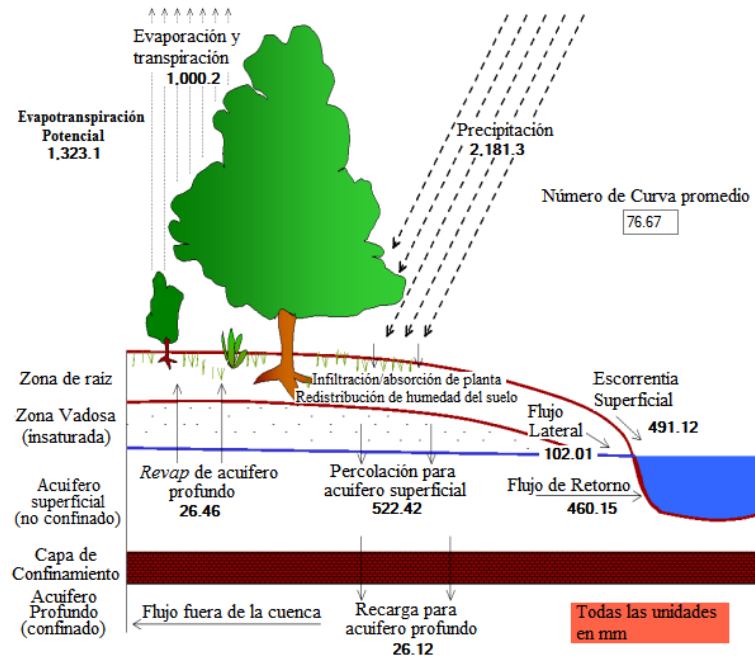


Figura 16. Balance hídrico – CSRO.



Modificado de: ARCSWAT, 2012.

2.5 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LA HERRAMIENTA EN LA CUENCA SELECCIONADA

En general, se encontró que la factibilidad de SWAT no está limitada por la facilidad de uso y documentación técnica, sino que, la recolección, el procesamiento y la calidad de la información hace que se restrinja una mejor calificación al modelo como herramienta de valoración del SE de aprovisionamiento de agua, con énfasis en la cantidad para este caso de estudio.

Los rangos de calificación, en orden creciente, se dividen en: Muy Pobre, Pobre, Aceptable, Bueno y Muy Bueno. Las calificaciones dadas a cada parámetro se muestran en la Tabla 9 y las causas de su valoración se describen a continuación.

Tabla 9. Evaluación de la factibilidad.

Criterio evaluado	Calificación
3.5.1 Disponibilidad y manejo de datos de entrada	
<i>Datos cartográficos</i>	Aceptable
<i>Datos meteorológicos</i>	Pobre
3.5.2 Documentación y soporte técnico	Muy Bueno
3.5.3 Facilidad de uso	Bueno
3.5.4 Desempeño del modelo	
<i>Exactitud de la simulación</i>	Bueno
<i>Predecir la influencia de usos/coberturas del suelo</i>	Muy Bueno

2.5.1 Disponibilidad y manejo de datos de entrada

La confiabilidad de las fuentes para alimentar las bases de datos SWAT es esencial para obtener una modelación precisa. Esta tarea demanda la mayor parte de tiempo que debería estar destinada al trabajo de investigación. Es por ello que la disponibilidad y calidad de esta información es de suma importancia para lograr avances significativos en el área de la modelación hidrológica, evitando la innecesaria replicación de datos, optimizando el tiempo y los recursos invertidos en la investigación [45].

La disponibilidad y manejo de datos de entrada (cartográficos y meteorológicos) usados en esta investigación son evaluados individualmente, puesto que su recolección y procesamiento difieren significativamente.

En cuanto a la información cartográfica, existen limitaciones con estudios de suelos que asocien información detallada de perfiles con granulometría y características físico-químicas.

Debido a esta ausencia, se debió identificar un estudio que presentara granulometría, y con base en estos valores, estimar variables mediante el uso del aplicativo SPAW. Es importante recalcar que los parámetros físico-químicos son limitados en estudios de suelos, ya que, no abarcan la clasificación textural acogida, ni el grupo taxonómico de tipos de suelo presentes en la CSRO; por tanto, la metodología adoptada corresponde únicamente para lograr la exploración de la herramienta con una capa de suelo. Sin embargo, para investigaciones futuras, los datos de entrada al modelo deben tener presente los parámetros físico-químicos de todas las capas para cada tipo de suelo. Sumado a esto, los códigos de SWAT son representativos para Norteamérica; sin embargo, un estudio de los parámetros en la base de datos de cobertura vegetal del software, permitiría modificar atributos para una mejor representación de la región. Por este motivo, se evidencia la necesidad de esfuerzos para obtener mayor detalle en los estudios relacionados a tipos y usos del suelo.

Por su parte, las variables climatológicas son objeto de seguimiento de autoridades como el IDEAM y la CDMB. La presencia de datos faltantes aleatorios en las series, incluso hasta bloques de semestres sin valores, variables climatológicas y períodos de medición no disponibles, fueron limitantes para seleccionar el periodo de simulación y la red de estaciones. Dadas estas circunstancias, la confiabilidad de la información de las estaciones analizadas es aceptable.

SWAT requiere que las estaciones seleccionadas cuenten con la misma cantidad de datos y que sus series inicien el mismo día, y recomienda que se utilice al menos un año de datos (preferiblemente de 2 a 5 años) para el “*model warmup*” o equilibrio del modelo. Por esta razón, los datos seleccionados no logran el nivel de detalle que sugiere la herramienta, por lo que se requiere mayor atención e interés en el procesamiento de la información de las estaciones a cargo de estas entidades y de esta manera lograr mejor confiabilidad en la calidad de la información.

2.5.2 Documentación y soporte técnico.

La disponibilidad y calidad de documentación técnica juega un papel importante en el éxito del desarrollo del modelo. Como una herramienta de fuente abierta, el modelo está bien documentado y su aplicación en todo el mundo demuestra su aprobación y difusión rápida [6].

En consecuencia, la herramienta posee gran cantidad de literatura en su base de datos (swat.tamu.edu/documentation/) que permitió la identificación de variables clave y el uso adecuado de la herramienta. Además, la existencia de grupos *online* y vídeos tutoriales, en donde investigadores en el tema responden inquietudes y comparten su conocimiento, le dan el suficiente respaldo a la herramienta.

2.5.3 Facilidad de uso.

La calidad de la documentación, el soporte técnico, las advertencias en la interfaz de la extensión, entre otros, hacen de SWAT una herramienta universal y amigable. Sin embargo, la facilidad de uso también depende de la destreza del usuario en el manejo del software ArcMap™ de la suite ArcGIS®, de sus conocimientos en sistemas de información geográfica y de su pericia en hidrología.

2.5.4 Desempeño del modelo.

El desempeño del modelo es analizado como un indicador propio de cada cuenca en la que se utiliza SWAT.

En cuanto a los estadísticos de evaluación del modelo SWAT en la CSRO, para este caso en particular: la pendiente obtenida fue de 0.935 y el intercepto de 0.0047, siendo 1 y 0, respectivamente, indicadores de que el modelo reproduce perfectamente las magnitudes de los caudales; valores de R^2 mayores que 0.5 son normalmente considerados aceptables, en el caso del presente estudio, R^2 es igual a 0.499; El valor de NSE obtenido (0.105) encaja entre 0 y 1, rango que es generalmente visto como aceptable en términos de desempeño del modelo, su valor

óptimo es 1. El PBIAS óptimo es 0, y el modelo arrojó un valor de -12.179 en etapa previa de modelación, cuando en la etapa de calibración el rango de entre $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ indica un desempeño Bueno. Este modelo presentó una tendencia a sobreestimar los caudales ($PBIAS < 0$). Por último, la razón RSR obtenida fue de 0.946 que se aleja del valor óptimo de 0, como referencia para pasos de tiempo mensuales un valor de RSR mayor que 0.7 es calificado como Insatisfactorio. Los cálculos realizados para la obtención de los estadísticos se evidencian en el Anexo V.

Es evidente que por tratarse de un estudio exploratorio, enfocado en la etapa sin calibración del modelo, su desempeño podría considerarse insatisfactorio a la luz de los criterios establecidos por [28], que han sido planteados para modelos calibrados y validados. No obstante, a pesar de que en este estudio exploratorio no se llegó a las fases de calibración y validación, algunos de los estadísticos (i.e. pendiente, intercepto y PBIAS) arrojaron resultados satisfactorios de ajuste, por lo cual, para esta etapa sin calibración, se puede considerar que el desempeño del modelo, aplicado a la CSRO es satisfactorio, por lo tanto, el criterio de factibilidad se calificó como Bueno. En cualquier caso, es importante continuar avanzando no solo en desarrollar los estudios necesarios que permitan mejorar la disponibilidad de la información de entrada, sino también en estudios orientados a la calibración y validación del modelo.

Finalmente, mediante herramientas como el *Land Use Summary* del *SWAT Error Checker* (Anexo W), los resultados de la modelación categorizados por HRU (Anexo S) y con análisis de variaciones de patrones de usos/cobertura de suelos como los realizados por [27] o [34], SWAT demuestra ser una herramienta útil para la prueba de escenarios de prácticas de manejo de cultivo y de estrategias de mejores prácticas de manejo del suelo (BMPs) de manera simple y mecánica, permitiendo la entrada de capas GIS de distintos usos del suelo con variación anual. Una característica que lo destaca de entre otros modelos hidrológicos ampliamente empleados (i.e. *DLBRM model*, *HSPF model*) [27].

3. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio exploratorio para la valoración del servicio ecosistémico de aprovisionamiento de agua, con énfasis en la cantidad, analizando: metodologías empleadas en investigaciones previas, variables clave para la simulación de flujos y criterios de factibilidad empleando el modelo hidrológico SWAT en la CSRO, donde se concluye que:

Las limitaciones y atributos de la zona asociados a cada caso de estudio, condicionan el enfoque en la metodología, las variables de mayor influencia y el análisis de desempeño de la herramienta para valorar el SE de aprovisionamiento de agua. Es por esto que, obtener la cantidad de agua que produce la CSRO es el paso inicial para la valoración del SE y se hace necesario trabajar con otras disciplinas y acoplar otras herramientas a SWAT para que la cuantificación del aprovisionamiento permita el desarrollo de procesos de planificación, manejo y toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo en la CSRO.

Como datos de entrada SWAT requiere información cartográfica de elevaciones, uso/cobertura del suelo, tipos de suelo con información físico-química de sus capas; información climatológica diaria con variables de precipitación, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, radiación solar y velocidad del viento. Es recomendable que el periodo de simulación seleccionado sea de a lo menos un año, de modo que la etapa de *warmup* permita la estabilización del modelo. De acuerdo a esto, la calidad y el detalle de la información de la red de estaciones, de investigaciones cartográficas y características físico-químicas, conllevarían a un mayor grado de confiabilidad en los resultados.

De la exploración de la herramienta, se ha podido demostrar que, aunque existen limitantes en cuanto a información cartográfica y físico-química detallada y series meteorológicas completas e históricas, el modelo responde satisfactoriamente a los

datos suministrados para una capa de tipo de suelo, logrando un avance importante en su etapa sin calibración: la generación de 287 unidades de respuesta hidrológica para la CSRO y la simulación del caudal de salida de la cuenca para un periodo de 325 días, arrojando resultados aceptables desde el cuarto mes simulado. Esto debido a que la variable climatológica que mejor está descrita es la precipitación debido a la presencia de estaciones en la parte alta, media y baja de la cuenca.

La factibilidad del uso de SWAT para evaluar el SE de aprovisionamiento de agua, en función de la cantidad, no está limitada por la facilidad de uso y documentación técnica de la herramienta, sino por las condiciones de la cuenca, el detalle y la calidad de los datos suministrados. SWAT mostró ser una herramienta útil para predecir la influencia de los usos alternativos del suelo en la generación de agua; sin embargo, es indispensable la calibración y validación del modelo para que la evaluación de su desempeño tenga mejor aceptación. En último lugar, los resultados del desempeño del modelo aplicado a esta investigación, no se pueden extrapolar a otras cuencas porque poseen características específicas diferentes, por lo que la metodología utilizada sirve como guía para la aplicación de SWAT en cuencas hidrográficas bajo condiciones de información limitada.

4. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios de usos y tipos de suelos más detallados para lograr una caracterización físico-química adecuada de las capas para cada tipo de suelo, con el fin de variar alternativas de manejo de la cuenca en estudio. Además, debido a la importancia que tiene la información meteorológica, es necesario ampliar la red y de ser posible completar datos faltantes para obtener un periodo *warmup*, de simulación y calibración mayor.

Se sugiere calibrar y validar este modelo para representar con mayor confianza los procesos hidrológicos llevados a cabo en la CSRO. Una vez realizada la calibración, el valor obtenido de producción de agua en cada HRU (WYLD), puede ser analizado para lograr una priorización en el manejo del SE de aprovisionamiento de agua en la cuenca.

Dado a que el análisis realizado obedece principalmente a flujo superficial, en caso de querer modelar flujos subterráneos, se recomienda un mayor nivel de detalle de los parámetros de los perfiles de suelo.

REFERENCIAS

- [1] BRAUMAN, K. A., et al. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2007, vol. 32, n.º 1, pp. 67-98.
- [2] FRANCESCONI, W., et al. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model Ecosystem Services: A Systematic Review. *J. Hydrol.* 2016, vol. 535, pp. 625-636.
- [3] ARNOLD, J. G. y FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hidrol. Process.* 2005, vol. 19 (3), p. 56.
- [4] ARNOLD, J. G., et al. Large area hydrologic modeling and assesment: part I. Model development. *Water Resour. Assoc.* 1998, vol. 34 (1), pp. 73-89.
- [5] URIBE RIVERA, N. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. [s. l.]: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010. pp. 1-47.
- [6] VIGERSTOL, K. L. y AUKEMA, J. E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *J. Environ. Manage.* 2011, vol. 92, n.º 10, pp. 2403-2409.
- [7] FAN, M. y SHIBATA, H. Spatial and temporal analysis of hydrological provision ecosystem services for watershed conservation planning of water resources. *Water Resour. Manag.* 2014, vol. 28, n.º 11, pp. 3619-3636.
- [8] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB). Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca Río de Oro. Bucaramanga: CDMB, 2003.
- [9] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como Datum Oficial de Colombia. Bogotá D.C.: IGAC, 2004.
- [10] FORERO SARMIENTO, Juan Carlos. Modelo hidrológico distribuido de la

- Cuenca Superior del Río de Oro. Tesis de maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2012. 130 p.
- [11] SALAZAR MESA, J. L. y QUITIAN ROJAS, D. O. Elaboración de un modelo digital de elevaciones y delimitación del tipo de vegetación presente en la Cuenca Superior Del Río De Oro. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2009. 125 p.
- [12] URIBE RIVERA, N. y VALENCIA GÓMEZ, J. Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso Cuenca del Río Tunjuelo – Cundinamarca. Santiago de Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Junio de 2010.
- [13] URIBE RIVERA, N.; ESTRADA, R. D. y JARVIS, A. Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: el caso de las cuencas Tuluá-Morales, Guabas, Sabaletas, Amaime, Nima, Bolo, Fraile, Desbaratado y Palo. Santiago de Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Julio de 2009.
- [14] BARBUDO CADENA, L.; OCHOA DAZA, J. M. y VERBEL ACOSTA, E. Y. Aplicación del modelo SWAT en el estudio hidrosedimentológico de la Cuenca Quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, departamento del Cesar. Tesis de Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Manizales: Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2016. 62 p.
- [15] HERNÁNDEZ GUERRA, D. A. Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la Cuenca del Río Ráquira departamento de Boyacá a través del programa SWAT. Tesis de Especialización en Recursos Hídricos. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2015. 71 p.
- [16] SIERRA ESPARZA, A. T. y VELANDIA UBATÉ, A. A. Estimación de la capacidad de campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de

- pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2016. 55 p.
- [17] SAXTON, K. y RAWLS, W. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006, vol. 70. pp. 1569-1578.
- [18] SAXTON, K. E. y WILLEY, P. H. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. En: SINGH, V. P. y FREVERT, D. *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. Florida, USA: Eds. Boca Raton CRC Press LLC, 2006, pp. 401-435.
- [19] ARENAS ESTEVEZ, M. F. Establecimiento de las características químicas de suelos cafeteros de Santander. Tesis de Especialización en Química Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2005. 163 p.
- [20] PEREZ BERNAL, L. J. Evaluación microbiológica de la calidad del suelo en cultivos de tabaco (*Nicotiana tabacum*) en los municipios de Girón y Piedecuesta (Santander) utilizando como indicadores los grupos funcionales de microorganismos. Tesis de pregrado Biólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2008. 83 p.
- [21] KIRKBY, M. J. y MORGAN, R. P. C. Soil erosion. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd., 1980. 312 p.
- [22] MANNAERTS, C. Factores de erosión. Curso de postgrado en levantamiento de recursos hídricos. Cochabamba, Bolivia: [s. n.], 1999.
- [23] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC); CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER (CAS) y CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB). Estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Santander. [s. l.]: IGAC, 2003.
- [24] WINCHELL, M., et al. ArcSWAT Interface for SWAT2012: User's Guide. Temple, Texas: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station and Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA

- Agricultural Research Service, Marzo de 2013. 464 p.
- [25] ARNOLD, J. G., et al. Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. Version 2012. Texas, USA: Texas Water Resources Institute, 2013. 650 p.
- [26] HER, Y., et al. Threshold Effects in HRU Definition of the Soil and Water Assessment Tool. *Trans. ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2015, vol. 58, n.º 2, pp. 367 – 378.
- [27] GEBREMARIAM, S. Y., et al. A comprehensive approach to evaluating watershed models for predicting river flow regimes critical to downstream ecosystem services. *Environ. Model. Softw.* 2014, vol. 61, pp. 121-134.
- [28] MORIASI, D. N., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2007, vol. 50, n.º 3, pp. 885-900.
- [29] BEKELE, E. G., et al. The evolution and empirical estimation of ecological-economic production possibilities frontiers. *Ecological Economics*. 2013, vol. 90, pp. 1-9.
- [30] JUJNOVSKY, J., et al. Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in southwestern Mexico city. *Environ. Manage.* 2012, vol. 49, n.º 3, pp. 690-702.
- [31] NOTTER, B., et. al. Modelling water provision as an ecosystem service in a large East African river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012, vol. 16, n.º 1, pp. 69-86.
- [32] ANDERSSON, J. C. M., et al. Water availability, water demand, and reliability of in situ water harvesting in smallholder rain-fed agriculture in the Thukela River Basin, South Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009, vol. 6, n.º 4, pp. 4919-4959.
- [33] RODRIGUES, D. B. B.; GUPTA, H. V. y MENDIONDO, E. M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resour. Res.* 2014, vol. 50, pp. 7187-7205.

- [34] LOGSDON, R. A. y CHAUBEY, I. A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecol. Modell.* 2013, vol. 257, pp. 57-65.
- [35] CRESPO, P., et al. Efecto de la escala de la información sobre el desempeño del modelo SWAT en una microcuenca de montaña. En: X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo (22-24, noviembre: Guayaquil, Ecuador). Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo (SecSuelo). 2006, 48 p.
- [36] FUKUNAGA, D. C., et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena.* 2015, vol. 125, pp. 206-213.
- [37] SALMORAL, G., et al. Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. *Sci. Total Environ.* 2015, vol. 504, pp. 258-268.
- [38] CASTELLANOS SANDOVAL, R. L. y TORRES HERRERA, D. A. Elaboración de un modelo digital de elevaciones y subdivisión del tipo de suelos de la Cuenca del Río de Oro parte alta. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2009. 128 p.
- [39] GÓMEZ BORRERO, E. y LÓPEZ MELO, C. A. Estimación de la recarga mensual en la parte alta de la Cuenca del Río Frío por medio de un modelo hidrológico distribuido. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2005. 129 p.
- [40] SERRANO SANTIAGO, A. M. y BALAGUERA PADILLA, G. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2006. 73 p.
- [41] LÓPEZ, W. G. y OSORIO AMAYA, R. M. Modelo Digital de Elevación para la Cuenca del Río de Oro. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2005. 126 p.
- [42] GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Mapas de los departamentos de Colombia en software

- ArcGIS. Escala 1: 25.000. Bucaramanga: [s. n.], [s. f.].
- [43] GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Mapa del área metropolitana de Bucaramanga en software ArcGIS. Escala 1: 25.000. Bucaramanga: [s. n.], [s. f.].
- [44] CABRERA, J. Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U) [en línea]. 2012, 02 13. [Citado el 07 de octubre de 2016]. Disponible en: IMEFEN - Instituto para la Mitigación de los efectos del Fenómeno el Niño: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf
- [45] ESPÍNDOLA, A., et al. Generación de bases de datos de suelos para modelos hidrológicos a escalas regionales. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (5-9, mayo: Bahía Blanca, Argentina). AACCS. 2014, 10 p.

BIBLIOGRAFÍA

ARNOLD, J. G. y FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hidrol. Process.* 2005, vol. 19 (3), p. 56.

ARNOLD, J. G., et al. Large area hydrologic modeling and assesment: part I. Model development. *Water Resour. Assoc.* 1998, vol. 34 (1), pp. 73-89.

ARNOLD, J. G., et al. Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. Version 2012. Texas, USA: Texas Water Resources Institute, 2013. 650 p.

CRESCO, P., et al. Efecto de la escala de la información sobre el desempeño del modelo SWAT en una microcuenca de montaña. En: X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo (22-24, noviembre: Guayaquil, Ecuador). Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo (SecSuelo). 2006, 48 p.

FORERO SARMIENTO, Juan Carlos. Modelo hidrológico distribuido de la Cuenca Superior del Río de Oro. Tesis de maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2012. 130 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM (Colombia). Solicitud de información. [Base de datos en línea]. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Usuarios&lTipo=usuarios&lFuncion=login> el 30 de julio de 2016.

SAXTON, K. E., et al. SPAW - Soil Water Characteristics [calculadora de propiedades hidráulicas]. Última versión: 6.02.75. Fecha de lanzamiento : 25 de abril

2007. Disponible para la descarga en <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/SPAW/SPAWDownload.html>.

SAXTON, K. E. y RAWLS, W. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006, vol. 70. pp. 1569-1578.

SAXTON, K. E. y WILLEY, P. H. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. En: SINGH, V. P. y FREVERT, D. *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. Florida, USA: Eds. Boca Raton CRC Press LLC, 2006, pp. 401-435.

SIERRA ESPARZA, A. T. y VELANDIA UBATÉ, A. A. Estimación de la capacidad de campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2016. 55 p.

URIBE RIVERA, N. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. [s. l.]: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010. pp. 1-47.

USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE (USDA-ARS), TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH y TEXAS A&M UNIVERSITY. SWAT Soil & Water Assessment Tool [Base de datos en línea]. Recuperado de <http://swat.tamu.edu/> el 1 de junio de 2016.

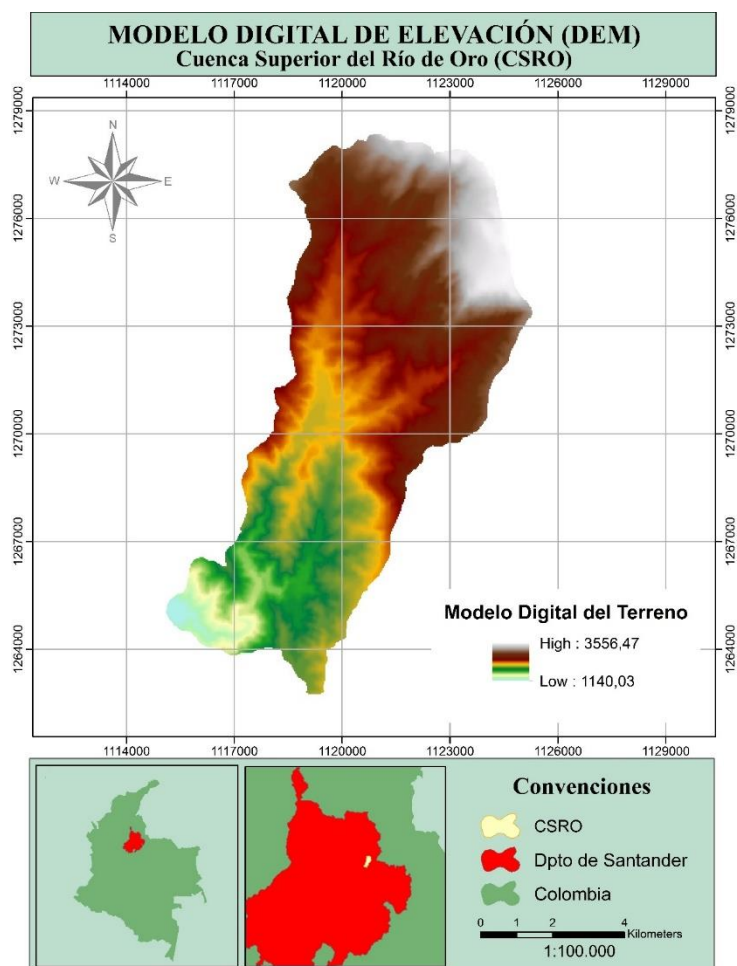
USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE (USDA-ARS); TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH y TEXAS A&M UNIVERSITY. ARCSWAT 2012 [extensión de ArcGIS-ArcView e interfaz gráfica de entrada de usuario para SWAT]. Última

versión: 2012.10_1.18. Fecha de lanzamiento : 9 de septiembre 2015. Requerimientos del sistema: Sistema operativo Microsoft Windows (por ejemplo, XP, Windows 7, Server 2008) con el parche más reciente del kernel. Microsoft .Net Framework 3.5. ArcGIS: ArcView 10.0 con Service Pack 5 (Build 4400) o ArcView (Basic) 10.1. Disponible para la descarga en <http://swat.tamu.edu/software/arcswat/>.

WINCHELL, M., et al. ArcSWAT Interface for SWAT2012: User's Guide. Temple, Texas: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station and Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Marzo de 2013. 464 p.

ANEXOS

Anexo A. Modelo de elevación digital (DEM) – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).



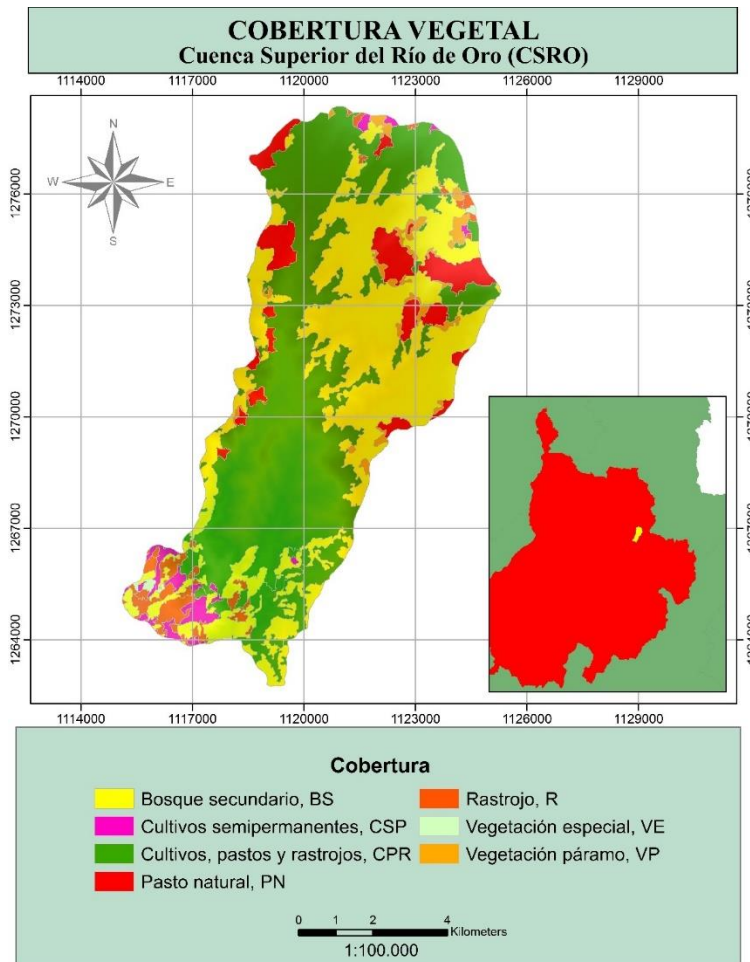
Adaptado de: ¹ (Cartografía de Colombia y el departamento de Santander suministrados por ²).

Nota: Se adjunta en el archivo digital el DEM utilizado, en formato GRID, bajo el nombre Anexo A.

¹ FORERO SARMIENTO, Juan Carlos. Modelo hidrológico distribuido de la Cuenca Superior del Río de Oro. Tesis de maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, 2012. 130 p.

² GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Mapas de los departamentos de Colombia en software ArcGIS. Escala 1: 25.000. Bucaramanga: [s. n.], [s. f.].

Anexo B. Cobertura vegetal – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).



Adaptado de: ³ y ⁴ (Cartografía del departamento de Santander suministrados por ⁵).

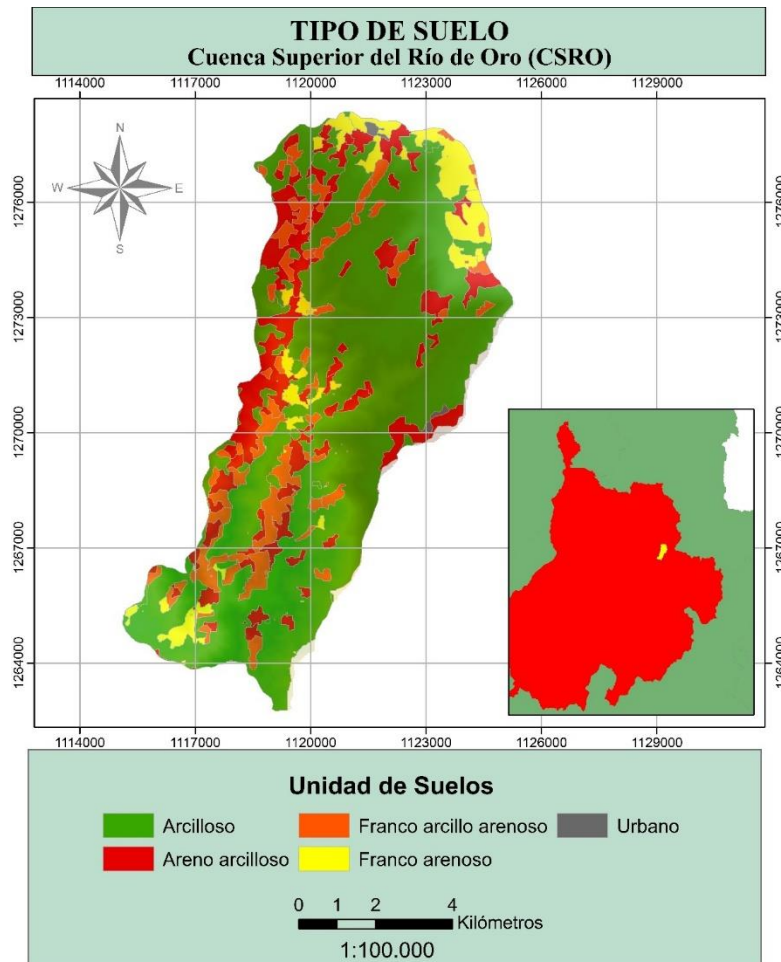
Nota: Se adjunta en el archivo digital el mapa de cobertura vegetal utilizado, en formato Shapefile, bajo el nombre Anexo B.

³ FORERO SARMIENTO. Op. cit.

⁴ SALAZAR MESA, J. L. y QUITIAN ROJAS, D. O. Elaboración de un modelo digital de elevaciones y delimitación del tipo de vegetación presente en la Cuenca Superior Del Río De Oro. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2009. 125 p.

⁵ GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit.

Anexo C. Tipos de suelo – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).



Adaptado de: ⁶ (Cartografía del departamento de Santander suministrados por ⁷).
Nota: Se adjunta en el archivo digital el mapa de tipos de suelo utilizado, en formato Shapefile, bajo el nombre Anexo C.

⁶ SIERRA ESPARZA, A. T. y VELANDIA UBATÉ, A. A. Estimación de la capacidad de campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de pregrado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2016. 55 p.

⁷ GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit.

Anexo D. Granulometría y profundidades promedio usadas en la simulación, desarrolladas por Sierra y Velandia.

Textura	Nombre de la capa	Profundidad (mm)	% Arcilla	% Limo	% Arena
Franco arenoso	FA	943.8	15.33	28.00	56.67
Franco arcillo arenoso	FArA	953.0	22.00	20.00	58.00
Arcilloso	Ar	961.9	63.16	17.51	19.31
Arcillo arenoso	ArA	954.3	42.50	7.50	50.00
Urbano	URBAN LAND	996.7	15*	30*	55*

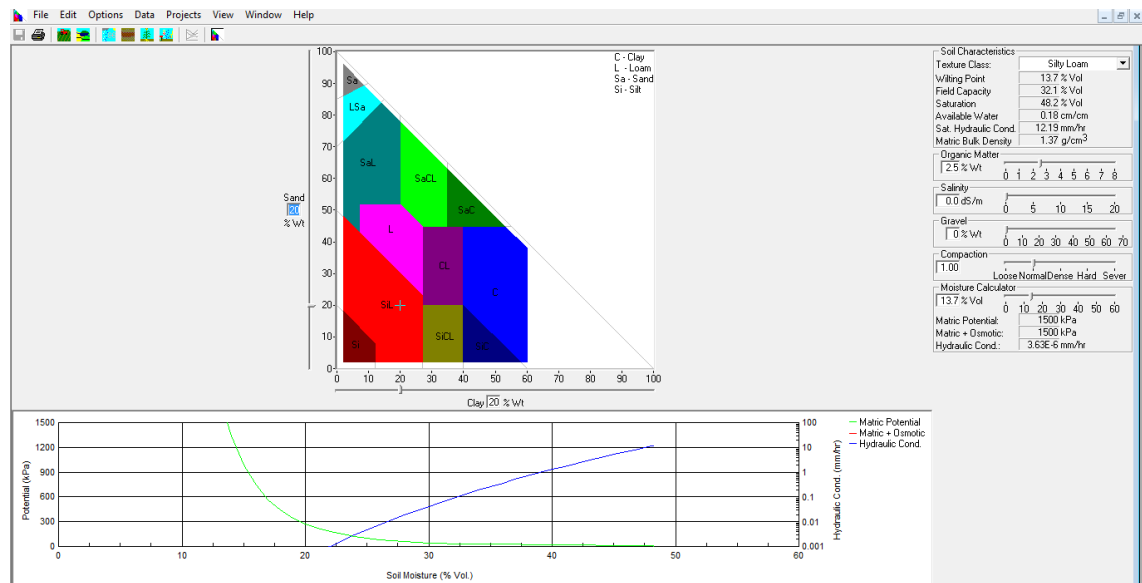
*Datos por defecto de la base de datos de suelos de SWAT.

Adaptado de: ⁸.

Nota: El archivo desarrollado para el cálculo de las profundidades promedio se encuentra en formato .xlsx en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo D.

⁸ SIERRA ESPARZA, A. T. y VELANDIA UBATÉ, A. A. Op. cit.

Anexo E. Software SPAW – Soil Water Characteristics desarrollado por Keith Saxton y Walter Rawls, para el cálculo de parámetros físico-químicos.



Nota: El ejecutable del aplicativo SPAW – Soil Water Characteristics se encuentra en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo E.

Anexo F. Factores de erodabilidad del suelo (K) asociados a la textura y al contenido de materia orgánica según Kirkby y Morgan. Los valores de K están expresados en (t/ha)/(Mj-mm-h).

Textura	Valores de K			
	Contenido de materia orgánica			
	< 0.5 %	2 %	4 %	Interpolación 3.8 %
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025	0.026
Franco arcillo arenoso	0.036	0.033	0.028	0.029
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016	0.016
Arcilla	0.017 – 0.038			0.018

Adaptado de: ⁹, citado por ¹⁰ y ¹¹.

⁹ KIRKBY, M. J. y MORGAN, R. P. C. Soil erosion. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd., 1980. 312 p.

¹⁰ ROJAS, R. Métodos de estimación de la erosión y sedimentos [en línea]. [s. f.], [Citado el 23 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/cap5y6.pdf>.

¹¹ CUÉLLAR, R. R., et al. Ecuación universal de pérdida de suelo. Bogotá D.C.: [s. n.], 2013.

Anexo G. Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura según Mannaerts.

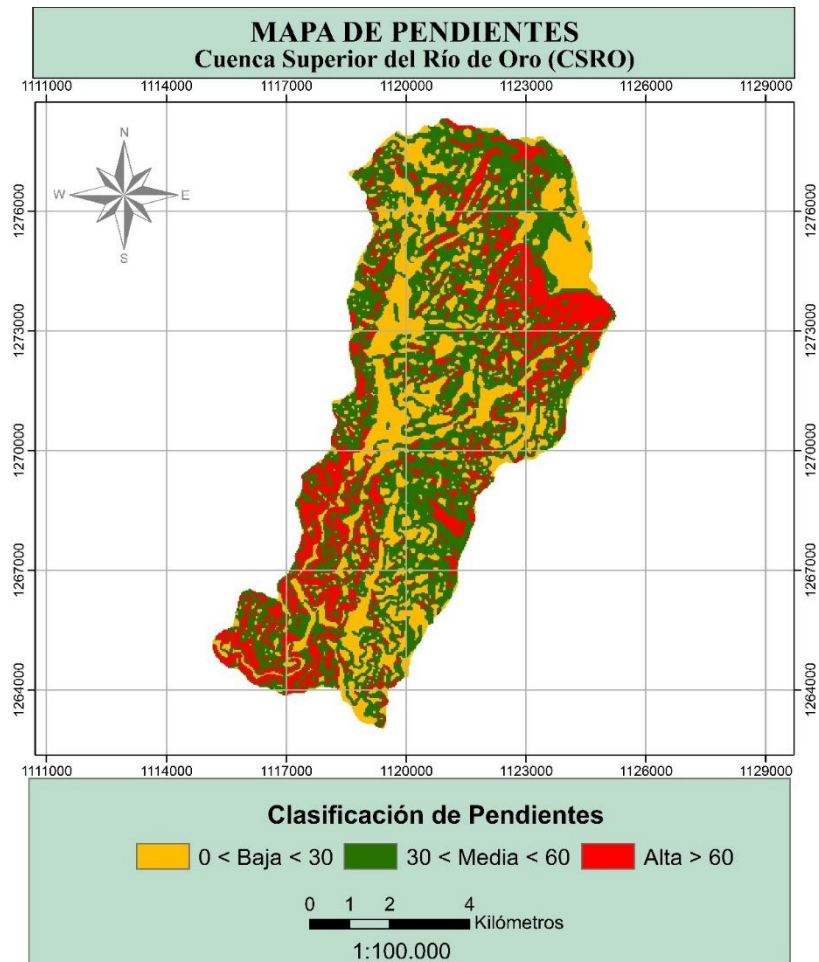
Textura Clase	Permeabilidad código	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	SCS Grupo Hidrológico de suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	< 1	D
Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	5	1 – 2	C – D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2 – 5	C
Areno francoso, franco arenoso	2	10 -60	A

Adaptado de: ¹², citado por ¹³.

¹² MANNAERTS, C. Factores de erosión. Curso de postgrado en levantamiento de recursos hídricos. Cochabamba, Bolivia: [s. n.], 1999.

¹³ CUÉLLAR, R. R., et al. Op. cit.

Anexo H. Mapa de pendientes – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).



Nota: Se adjunta en el archivo digital el mapa de pendientes utilizado, en formato GRID, bajo el nombre Anexo H.

Anexo I. Información bruta de las estaciones procesadas del IDEAM, CDMB y GPH.

Estación	Tipo	Entidad	Datos obtenidos	Periodicidad	Archivo
El Rasgón	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	La información bruta de cada estación se encuentra en la carpeta CDMB del Anexo 9.
Sevilla	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
Pajonal	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
Club Campestre	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
La Judía	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
Ciudadela	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
Florida	Climatológica	CDMB	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	
El Rasgón GPH	Climatológica	GPH	Precipitación, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Horaria	La información bruta de cada estación se encuentra en la carpeta GPH del Anexo 9.
El Conquistador GPH	Limnimétrica	GPH	Aforo de caudales	Diaria	
El Picacho	Pluviométrica	IDEAM	Precipitación	Diaria	La información bruta de cada estación se encuentra en la carpeta IDEAM del Anexo 9.
Granja Piedecuesta	Pluviométrica	IDEAM	Precipitación	Diaria	
Berlín Automática	Climatológica	IDEAM	Precipitación, humedad relativa, temperatura mínima y máxima.	Diaria	

Nota: Los archivos completos con la información bruta de cada estación se encuentran en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo I.

Anexo J. Procesamiento de la información bruta de las estaciones del IDEAM, CDMB y GPH.

REVISIÓN DE ESTACIONES CERCANAS A LA CUENCA RIO DE ORO ALTO CON CIERRE EN EL CONQUISTADOR							
Autores: Duarte Cels, Jonathan Alexis - Hernández Moreno, Carlos Javier Leandro							
N°	Nombre Estación	Tipo	Serie de Tiempo Disponible	Coordenadas		Altitud (msnm)	Entidad
				Longitud	Latitud		
1	El Rasgón	Climatológica	De Oct/2013 a Jul/2016	-72.997431	7.040678	2148	CDMB
2	Sevilla	Climatológica	De Ene/2011 a Sept/2013	-72.996675	7.015417	1907	CDMB
3	La Judía	Climatológica	De Sept/2013 a Jun/2016	-73.031996	7.062745	2165	CDMB
4	Pajonal	Climatológica	De Abr/2012 a Mar/2015	-73.071425	6.971093	896	CDMB
5	Florida	Climatológica	De Ene/2013 a Jun/2016	-73.106168	7.072019	861	CDMB
6	Ciudadela	Climatológica	De Ene/2013 a Jul/2016	-73.123710	7.105760	938	CDMB
7	Club campestre	Climatológica	De Feb/2011 a Feb/2016	-73.114474	7.064514	940	CDMB
8	Acapulco	Climatológica	De Ago/2013 a Abr/2016	-73.147297	6.997459	1001	CDMB
9	Granja Piedecuesta	Pluviométrica	De Jul/1970 a Ene/2016	-73.070000	6.989444	1000	IDEAM
10	El Picacho	Pluviométrica	De Ene/1967 a Abr/2016	-72.970000	7.110000	3310	IDEAM
11	Piedecuesta	Pluviométrica	De Ene/1969 a Sep/1971	-73.050000	6.993333	1000	IDEAM
12	Berlín	Climatológica	De Oct/1969 a Jul/2016	-72.868500	7.187000	3316	IDEAM
13	Conquistador GPH	Limnométrica (Piedecuestana de servicios)	Oct 2/2008 a Mar 31/2011	-73.036364	6.994822	1105	GPH
14	Berlín GPH	Climatológica	Jul/2009 a Ene18/2011	-72.997431	7.040678	2148	GPH

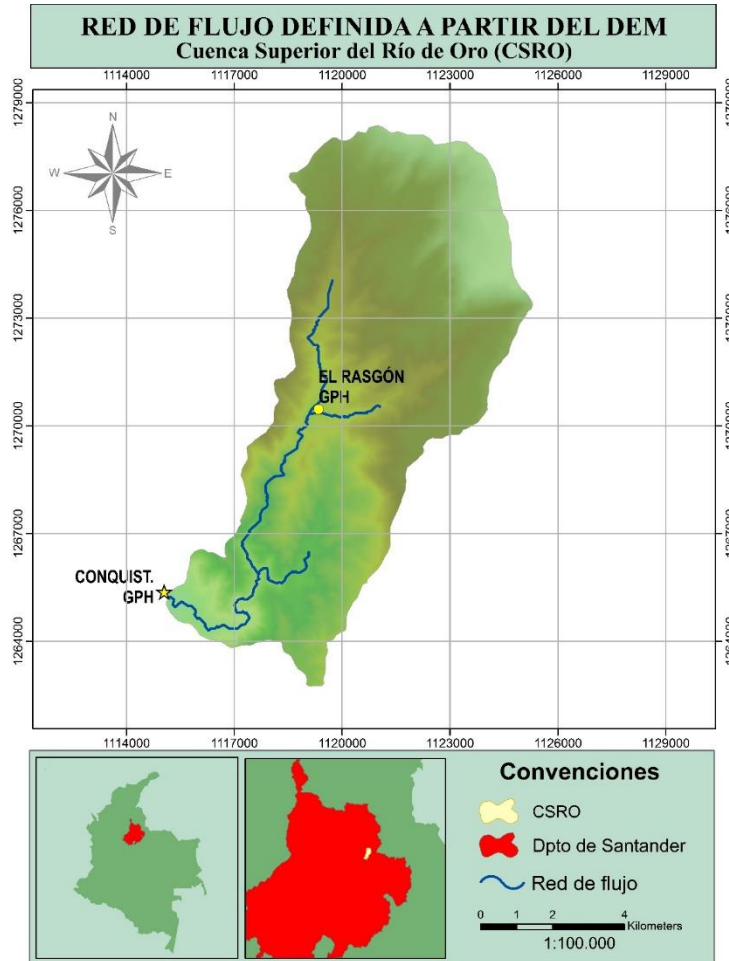
Nota: El archivo completo se encuentra en formato .xlsx en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo J.

Anexo K. Procesamiento de la información horaria a diaria de la estación

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	De los valores de cada 10 minutos se realiza la programación correspondiente (color amarillo), con el fin, de que los datos de las 12:00:00a.m. tengan los valores respectivos del día en mención. (La															
2	programación se hace de acuerdo a los valores que pide SWAT. (Máxima temperatura, mínima temperatura, precipitación total y promedio de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento)															
3	Date	Hour	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Wind Speed	Rain	Solar Rad.	Max Temp	Min Temp	Humedad	Velocidad	Rain	Solar		
4	01/01/2010	12:00 a. m.	9.2	9.1	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.2222222	1.34652778	0.2	496.084507		
5	01/01/2010	12:10 a. m.	9.2	9.1	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.2361111	1.34375	0.2	496.084507		
6	01/01/2010	12:20 a. m.	9.1	9.1	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.25	1.34375	0.2	496.084507		
7	01/01/2010	12:30 a. m.	9.1	9	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.2638889	1.34097222	0.2	496.084507		
8	01/01/2010	12:40 a. m.	9.1	8.9	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.2777778	1.33819444	0.2	496.084507		
9	01/01/2010	12:50 a. m.	9	8.9	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.2986111	1.33819444	0.2	496.084507		
10	01/01/2010	1:00 a. m.	8.9	8.7	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3125	1.33541667	0.2	496.084507		
11	01/01/2010	1:10 a. m.	8.8	8.7	92	1.8	0	0	20.8	7.6	81.3194444	1.33263889	0.2	496.084507		
12	01/01/2010	1:20 a. m.	8.8	8.8	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3263889	1.32916667	0.2	496.084507		
13	01/01/2010	1:30 a. m.	8.8	8.6	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3402778	1.32916667	0.2	496.084507		
14	01/01/2010	1:40 a. m.	8.7	8.6	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3472222	1.32916667	0.2	496.084507		
15	01/01/2010	1:50 a. m.	8.7	8.6	91	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3611111	1.32916667	0.2	496.084507		
16	01/01/2010	2:00 a. m.	8.7	8.6	91	1.8	0	0	20.8	7.6	81.375	1.32916667	0.4	496.084507		
17	01/01/2010	2:10 a. m.	8.6	8.3	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3888889	1.32291667	0.4	496.084507		
18	01/01/2010	2:20 a. m.	8.3	8.3	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.3958333	1.32291667	0.4	496.084507		
19	01/01/2010	2:30 a. m.	8.3	8.2	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.4027778	1.32291667	0.4	496.084507		
20	01/01/2010	2:40 a. m.	8.2	8.1	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.4097222	1.32291667	0.4	496.084507		
21	01/01/2010	2:50 a. m.	8.1	7.9	92	1.3	0	0	20.8	7.6	81.4166667	1.32291667	0.4	496.084507		
	Del 01-01-2010 al 24-06-2010			Del 21-06-2010 al 18-01-2011				Valores diarios								

Nota: El archivo completo se encuentra en formato .xlsx en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo K.

Anexo L. Red de flujo definida a partir del DEM – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).



Nota: Se adjunta en el archivo digital el mapa generado de la red de drenaje de la cuenca, en formato Shapefile, bajo el nombre Anexo L.

Anexo M. Estructura de los archivos .txt para cargar los datos climatológicos.

PRECIPITACIÓN: gages_P.txt

ID¹⁴, NAME¹⁵, LAT¹⁶, LONG¹⁷, ELEVATION¹⁸
1, P1, 7.040678, -72.997431, 2148
2, P2, 7.187, -72.8685, 3316
3, P3, 6.993333, -73.068, 1000
4, P4, 7.11, -72.966, 3310

HUMEDAD RELATIVA: gages_RH.txt

ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, RH1, 7.040678, -72.997431, 2148

RADIACIÓN SOLAR: gages_SR.txt

ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, SR1, 7.040678, -72.997431, 2148

TEMPERATURA: gages_T.txt

ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, T1, 7.040678, -72.997431, 2148

VELOCIDAD DEL VIENTO: gages_WS.txt

ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, WS1, 7.040678, -72.997431, 2148

Nota: Los archivos se encuentran en formato .txt en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo M.

¹⁴ Número de identificación.

¹⁵ Nombre asignado a la estación seleccionada para cada variable.

¹⁶ Latitud, en grados decimales.

¹⁷ Longitud, en grados decimales.

¹⁸ Altura a la que se encuentra la estación en referencia, en m.s.n.m.

Anexo N. Datos climatológicos en formato .txt usados en la simulación.

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
20100228	20100228	20100228	20100228	20100228	20100228	20100228	20100228
0.2	0	0	0	86.94444	30.33600	20.8,10.7	1.03264
0	0	0	0.1	81.51389	42.20760	22.7,10	1.31597
1.6	0	0	0	86.56250	22.10866	20.9,11.1	0.80694
0	0	0	0.8	89.31944	15.76680	19.4,12.6	0.66597
0.4	1.5	0.4	2.2	89.27778	18.61607	19.4,11.1	0.66806
3.6	0	2	4.6	90.86111	20.46803	21.8,11.7	0.73264
1.4	7.7	0	0.9	89.59722	23.30160	20.2,11.7	0.66181
0.4	0.6	0	0.6	89.47917	18.71108	19.9,12.7	0.64514
0.2	1.3	0	2.5	90.45833	17.81400	19.7,12.6	0.74167
0.2	0	0	0	89.84028	21.80687	20.8,13.1	0.79236
8.4	0	0	0	88.00000	28.59840	23.4,12	0.86250
0	0	0	0	86.53472	27.30960	21.7,12.8	1.04931
0	0	0	0	85.93750	29.41320	21.8,11.3	1.06111
0	0	0	0	85.81250	32.34674	21.4,11.5	1.16319
0.2	0	0	0	85.00000	30.18792	20.8,10.7	1.34097
0	0	0	0	83.93750	28.59960	21.1,10	1.16806
0	0	0	3.3	84.52778	29.05440	21.9,11.3	0.89861
0	0	4	5.1	86.58333	39.01109	22,9.8	1.05486
0	0	2.5	1.2	87.54871	37.47250	21.4,11.3	1.23968
0.2	0.2	0	0	85.54666	33.65252	20.4,9.6	1.30958
0	0.4	0.1	0	90.64824	34.16051	21.8,11.5	1.08940
0	0	0.9	0	85.31685	41.50724	22.4,10	1.12490
0	0	0	0	82.31944	48.23250	22,9.8	1.50347
0	0	0	0	82.15278	42.99451	23.1,9.7	1.25417
0.2	0	0	4.2	82.72917	40.68000	23.4,11.2	1.11597
0	0	0.9	0	83.77083	34.22160	21.8,11.1	1.33681
2.6	0	0	0	86.18750	31.15608	20.9,10.9	1.00347
0.4	0	0	0	88.35417	30.81641	21.2,10.3	1.04861
0	0	0	2.5	85.64583	39.28048	21.3,11.2	1.14167
0.2	0	0.1	3	87.15972	22.76400	21,11.8	0.84931
1.8	3.7	5.2	0	90.72222	11.82840	19.1,12.2	0.52014
0.2	0	0	0	89.15278	25.20158	20.9,11.1	1.02708
0	0	0	6	85.38889	29.48725	21,10.6	1.15903
0	7.1	12.4	4.9	85.60417	27.57328	21.6,11.5	0.92500
7.4	5.9	4.8	0.6	89.97917	30.19287	20.8,12.6	0.82569
0.2	0.8	2	19.1	87.37500	24.45830	20.6,10.9	0.93264
6.4	10.4	1.2	3.2	89.75694	22.38855	19.9,13.3	0.59722

¹⁹ Valores de precipitación de la estación El Rasgón GPH utilizados en la simulación.

²⁰ Valores de precipitación de la estación Berlín Automática utilizados en la simulación.

²¹ Valores de precipitación de la estación Granja Piedecuesta utilizados en la simulación.

²² Valores de precipitación de la estación El Picacho utilizados en la simulación.

²³ Valores de humedad relativa de la estación El Rasgón GPH utilizados en la simulación.

²⁴ Valores de radiación solar de la estación El Rasgón GPH utilizados en la simulación.

²⁵ Valores de temperatura máxima y mínima de la estación El Rasgón GPH utilizados en la simulación.

²⁶ Valores de velocidad del viento de la estación El Rasgón GPH utilizados en la simulación.

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
0.8	7.3	0	4.7	90.32639	16.98811	19.3,13.2	0.57917
1.6	2.6	0	3.9	89.53472	21.99768	20.7,11.9	0.69097
0	1.6	0	9.5	88.62500	27.12842	21.4,12.5	0.85972
5.4	8.4	12.8	15.8	89.45833	20.99040	20.4,13.6	0.58333
5.4	3	0.3	18.9	91.00694	16.41363	19.1,13.8	0.37500
0.4	2.9	0	32.2	91.56250	13.65120	17.9,13.1	0.66806
37	17.6	42.6	11.1	89.83333	14.79960	20.1,12.8	0.60625
21.6	11.6	3.6	4	89.66667	33.05760	21,12.7	0.73333
4.2	2.2	6.7	0	91.08333	21.73544	19,13.7	0.43819
0	0	0	14.8	87.31944	30.84125	20.9,13.1	0.60556
7.4	5.4	3.7	12.8	87.29167	33.92890	21.6,11.3	0.86250
2.2	0	0	0	85.64583	28.27965	20.2,11.7	1.15208
1	3.4	0.2	1.1	88.70833	26.31886	20.7,11.2	0.76389
25.4	0.4	6.5	17.8	90.66667	18.43871	20.1,13.2	0.71250
4.2	0.4	0	6.7	90.06944	28.88956	20.4,11.2	0.90139
0.4	0	0	0	87.04861	28.59240	22.3,11.2	0.95556
0	0	0	0	85.55556	43.39410	22.2,11.8	1.22986
0	0.9	0	0	84.27083	34.89100	22.7,11.7	0.92500
0	0	0	0	86.55556	23.92807	21.2,12.6	0.81250
1.8	2.3	4.5	0.7	88.45139	22.84813	22.1,12.2	0.70000
0	1.1	0.9	0	90.74306	15.77880	19.4,12.9	0.65486
0	0	1.1	0	87.50694	26.19340	20.6,12.1	0.77917
0.4	1.2	0	0	90.18750	15.65544	19.8,13.3	0.51111
0	0	10.3	0	86.38889	33.88748	20.5,11.2	1.04792
0.2	0	0	0	86.09722	33.00000	20.7,10.2	1.00903
0	0	3.4	0	85.44444	32.38848	21.3,11	0.94583
4	0.5	36.1	21	89.35417	20.34606	19.6,12.6	0.64514
64.2	10.2	47	27.8	89.89583	19.45920	19.1,11.6	0.60000
14.6	1	0.5	5.5	88.92361	29.65505	20.2,12.2	0.75833
5.4	0	1.6	23.5	90.30556	21.95655	20.7,12	0.68472
2	0	0	0	89.64583	25.42349	20.4,10.9	0.59722
2	0	0	1.3	87.68056	39.80121	21.3,11.2	1.00000
2.2	4.1	8.8	3.4	88.17361	27.84038	21.5,12	0.67292
18	0	1.8	0	88.50694	25.69116	20.8,12.9	0.78611
0.2	0	3.7	0	88.35417	27.89640	21.5,13.3	0.78750
1	1.1	3.8	1.7	88.14583	21.14551	20.5,14.1	0.47222
8.6	0.1	8.9	3.5	88.28472	26.32281	21.4,13.8	0.71389
4	1	12.6	6.8	90.11806	22.26785	21.1,13.2	0.44653
1.4	2.6	0	0.5	90.19444	15.62112	20.2,13.1	0.53056
16	0.1	4.9	1	86.90278	29.07126	22.4,13.7	0.78958
0.4	0	0	3.9	86.56250	26.57823	21.8,12.6	0.58403
11.4	0	0.8	0	88.10417	24.49267	21.3,12.5	0.58056
6	0.6	1.5	3.9	87.33333	29.13480	21.9,12.4	0.90833
11	0	1.4	6.3	88.31944	30.53352	21.9,13	0.69236
11	1.3	11.8	4	91.22917	15.82777	20,13.2	0.33958
3.8	0	0.4	16	92.56250	13.98863	18.6,12.6	0.26111
41.6	19	68.5	35.8	91.83333	20.12862	20.6,14.3	0.34306
0.8	14.4	0.4	3	86.78472	38.40883	21.8,11.8	0.85208
10.4	10.6	5	12.3	88.87500	22.31605	19.7,13.4	0.68958
4.6	2	0.7	22.5	89.27778	24.67844	19.8,13.4	0.37222

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
7.2	3.9	95	29	91.26389	18.05280	20,14.1	0.37222
49.2	17.2	12	38	92.99306	13.87187	18.1,11.8	0.32708
0.6	3	0.5	1.5	89.25000	24.90450	19.6,11.3	0.86667
1.2	0.5	0.3	8.4	87.52778	22.13338	21.2,12.8	0.54722
13.8	14	12.8	35.6	91.86111	18.32030	19.2,12.2	0.43542
14	11.1	3.7	3.4	93.22222	9.37790	17.6,12.2	0.32083
13.8	1.8	0.1	13	89.86111	22.76936	20.1,11.1	0.58056
0	0.2	0.8	0	88.60417	25.39343	20.6,12.2	0.58542
0	0	0	0	87.36111	29.25504	19.4,10.8	0.87083
4.6	0.5	46.3	0	89.12500	21.42835	19.5,11.4	0.56736
2	0	2.7	0	86.46528	28.70554	21.8,11.3	0.65556
4.8	0.5	0.1	2.8	86.79167	24.33979	21.5,12.4	0.62222
25.8	11.4	6.8	35.6	89.81944	22.06330	19.5,11.6	0.53194
3.6	9.7	3.8	8.7	90.47222	24.06941	19.8,11.8	0.36597
11.8	0.5	1.2	6.9	91.82639	15.58242	18.3,12.5	0.38542
5.8	0.3	53.5	9.5	89.48611	21.11829	19.2,12.7	0.40486
17.4	1.2	0	9	87.04167	28.97626	21.2,12.8	0.65694
8.6	13.7	2.6	17.4	91.00000	17.69332	18,13	0.30972
17	4.6	5.4	15.3	89.38889	21.78840	19.4,11.9	0.40972
3.4	0.5	7.5	8.2	91.43056	15.32691	19,10.9	0.38125
0.2	0.7	3	0.6	89.74306	18.33692	18.9,11.6	0.35417
0.4	0	7.3	0	90.47917	19.89769	19.5,12.6	0.52292
4.6	2.4	0	0	89.43056	20.36966	19.3,11.3	0.46736
0.4	2	2.1	0.5	88.40972	22.05850	21.2,12.7	0.40486
0.6	0	3.6	0	88.59722	21.58132	19.1,10.7	0.47083
28.2	9.7	19.5	23.5	93.84028	7.38603	15.1,12.1	0.29306
2.4	1.9	18.7	8.3	88.30556	26.15935	19.3,11.8	0.54097
6	0	1.9	0	89.65278	19.94458	19.7,11.8	0.48264
1.4	1.3	1.6	4.8	89.01389	23.40272	20.1,11.3	0.56250
1.4	2	1.5	0.9	89.57639	21.64787	20,13	0.41528
20.8	6.3	6.2	28.6	90.27778	18.08229	20,13.3	0.41875
0.6	4.1	2	19.4	88.90278	22.39862	20.6,11.1	0.66806
12.6	0	0.1	1.8	92.27083	16.64280	18.1,12.6	0.28333
2	0.2	0	3.6	89.24306	25.06417	20.2,11.2	0.42500
0.2	0	0	0	88.05556	25.73338	19.7,11.5	0.66250
0	0	0.2	0	89.47222	23.19960	19.9,11.7	0.58333
7.2	0.5	2.7	0	90.45139	18.17903	18.8,11	0.43681
0.6	2	0	0.7	90.52083	18.05059	18.3,11.1	0.40139
11.8	3.9	5.1	22.7	90.03472	19.18800	19.8,11.4	0.40417
1.2	0.2	0	0.4	88.81250	24.81337	19.7,12.3	0.58194
2.6	0	1.5	0	90.81250	15.89526	17.5,11.2	0.44306
8	6.5	6.5	9.7	91.27778	18.86205	18.8,11.7	0.29514
12	0.5	3	5.6	91.80556	11.55308	16.9,12.5	0.12569
1	0.4	35.4	0.2	91.67361	18.23162	19.1,10.2	0.40417
8	4	1.9	17.2	90.97917	20.88895	19.8,11.2	0.44097
0.4	4.2	0.7	0.4	88.45833	28.36255	20.4,10.9	0.73472
5.8	13.5	4.7	3.9	92.28472	13.95360	16.4,12.2	0.41319
0	0	0	0	89.84722	23.43542	19.1,10.4	0.60208
0.2	0	0	6	88.65972	24.08371	19.2,9.9	0.61111
22.8	0	33	15.6	89.79167	22.42628	20.2,11.1	0.75347

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
10.8	8.7	5.4	6.8	91.23611	23.41085	18.9,11.7	0.52431
14.4	27.6	18.5	18.7	92.54167	12.26758	16.3,12.4	0.21806
7.8	24.5	30.7	15	90.58333	21.01271	18.8,11.4	0.38958
11.4	1.4	3.4	23.1	92.77083	10.84498	17.1,12.3	0.27014
1	0.2	0.6	0	89.60417	25.38409	19.8,12.4	0.57361
0.2	0	1.2	0	88.18056	27.20316	19.3,10.7	0.67222
3.4	0.5	0.3	6.5	89.15278	18.57370	19.2,10.8	0.50625
3.2	14.4	3.1	4.8	88.43056	25.59629	20.3,11.1	0.55972
4.8	0.2	0	1	89.46528	26.46960	20.2,11.8	0.56389
0.4	0.4	0.2	0.7	87.89583	24.85786	21.1,11.7	0.48333
14.6	0.4	10.2	0.9	89.72917	23.35680	19.5,10.5	0.58125
7.2	0.6	2.4	0.1	92.41667	14.75665	18.8,11.9	0.25903
8.4	0	1.8	2	91.07639	23.20018	18.7,13.6	0.29375
26	0	1.1	10.3	92.24306	15.71779	18.2,11.9	0.27569
0.8	2.6	0	0.8	91.63889	15.57068	17.8,11.2	0.27778
23	0	7.7	0.2	89.88194	22.71136	18.7,10.2	0.50278
2.4	6.3	0.7	11.3	92.46528	15.93311	18.4,13.1	0.19931
9	0.8	1.4	2.7	91.25000	20.62858	18.7,13.2	0.33611
0.4	0	0.2	0	90.20833	23.80320	19.9,11.7	0.41528
18.8	1.4	3.9	7	91.31250	16.00560	18.7,12.6	0.22222
0.8	30.7	2.5	3.4	87.71528	34.20389	21.3,12.3	0.51250
10.2	0.4	9.4	1.1	90.31944	22.50779	20.6,12.7	0.44375
2.2	0.5	0.2	0.2	90.68750	20.44061	19.2,11.2	0.35625
2.6	0.3	0.5	0.1	92.00000	15.09782	17.3,12.4	0.32292
9.8	0	3.8	4.7	91.73611	15.72007	18.2,11.8	0.29444
7.8	0	3	3.4	92.61111	13.67105	17.8,12.5	0.23403
6.2	0	0.2	1.7	90.41667	21.00804	19.4,12	0.35556
13.2	1.9	0.3	1.4	91.84722	15.91511	18.8,10.6	0.45625
3.6	1.2	3.1	0.9	91.89583	15.61828	18.2,12.2	0.30417
12.8	8	1	14.8	91.87500	18.59235	17.7,11.3	0.34722
2.2	0.5	4.6	3.7	90.79167	20.11800	18.5,10.2	0.41944
8.4	0.2	0.6	0	89.12500	28.30800	19.8,11.3	0.58750
7	3	0.2	15.5	89.94444	24.11033	19.5,11.2	0.33889
4.6	0.9	5.2	6	90.11806	20.68866	18.1,11.2	0.39861
0.2	1.3	0	0	90.04861	19.47077	19.5,11.4	0.38681
2.8	0.2	7.1	42.3	90.99306	17.29420	17.8,11.4	0.26042
2.6	16.2	0.1	24.4	90.39583	19.52179	19.6,11.3	0.49653
5	0	1	6.3	91.34028	14.24416	17.9,11.8	0.33472
1	0.4	0.6	0	89.99306	20.44644	19.9,11.5	0.42569
3.6	0	0.4	4.1	88.59028	28.06800	19.4,10.7	0.64097
8.6	0	40.5	0	89.81944	24.44303	20.2,12.2	0.47778
0.2	0	0	0	89.67361	23.10431	19.9,12.2	0.37431
8.8	1.3	9.4	13	91.32639	20.00219	18.4,11.7	0.32639
18.8	2.3	9.5	21.7	92.86806	17.01133	17.7,13.7	0.20625
5.4	0.2	0	0	90.51389	22.77173	18.9,12.2	0.20000
1.8	0	0	0	89.37500	29.14330	19.8,11.3	0.56181
14	0.6	0	18.2	89.52778	25.87557	20.3,11.2	0.61042
7	21.1	9.7	10.7	89.61111	27.84802	19.7,11.2	0.64375
24.4	1.4	5.5	1.5	91.22222	24.65807	19,11.9	0.34931
0.2	0.3	0.1	0	90.54167	20.75375	18.6,11.9	0.34861

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
0	0.1	0	0	89.87500	22.63562	18.3,11.5	0.56528
18.6	0.4	29.6	10.6	89.97917	20.82003	18.5,11.4	0.47917
0.4	0.5	0.1	0.4	91.15972	22.62141	19.2,12.4	0.51319
0.8	6.6	2.3	11.5	89.72222	19.73352	18.4,11.9	0.38403
3	0.1	0.2	0	90.70833	23.26629	18.3,11.6	0.52014
7.4	2.4	7.5	14.3	88.92361	23.09520	19.4,10.3	0.56736
0.2	17	0.1	0	83.36806	44.38238	22.3,11.9	0.65972
0	0	0	0	85.80556	37.30320	20.8,11.7	0.88333
0	4.8	8.1	23	84.69444	45.78016	21.1,9.6	0.85000
29.6	2.4	0	2	85.91667	41.28145	21.7,11.7	0.71944
1.2	6.3	4.1	6.8	86.72222	34.44074	21.8,12.3	0.73542
0.4	0	0	0.7	86.50000	24.69872	20.1,12.3	0.45069
0.6	0	0	2.9	88.42361	22.46400	19.4,10.8	0.49514
6.4	15.4	2.5	7.2	90.56944	18.11640	17.8,12.9	0.29028
9	22.1	21.3	24.7	89.54167	23.33400	19.3,11.7	0.36181
11	14.7	11.4	15.5	90.34028	27.13330	19.2,12.9	0.36528
16.2	4.5	25.2	20.9	90.92361	17.86602	18.6,12.6	0.16944
10.4	0.5	0.7	15.7	91.43056	15.87120	18,12.4	0.23542
7.8	13.5	9.5	27.9	90.01389	22.73050	18.7,10.9	0.43264
0.8	5.8	22.8	3.5	89.84028	26.89680	19.4,10.2	0.44444
3	5.3	18.6	9.6	93.28472	16.69328	18.1,12.8	0.14861
2	7.1	0.5	20.8	90.50000	27.69984	19.3,12.5	0.47153
11.4	7.1	16.8	10.1	91.28472	19.58640	18.6,11.6	0.24722
16.8	12.5	10.5	21.3	90.82639	24.84370	18.9,11.4	0.33542
21.4	12.9	1.8	18.6	91.72222	15.46440	17.1,12.1	0.28681
6	12.8	57.3	4.2	88.24306	40.26240	20.8,11.4	0.71319
5.2	13.5	3.1	22.8	87.75694	33.45480	20.6,11.9	0.64653
6.2	1.2	15.7	12.3	89.65278	25.85952	20.1,10.8	0.61597
3.2	4.1	42.2	29.2	88.62500	36.45350	20.2,11.2	0.63403
16.6	1.4	0	1	90.28472	23.53560	18.8,12.2	0.39583
0.2	4.9	0.8	3.7	90.11806	19.37017	18,10.5	0.38611
7.2	19.2	3.1	25	92.14583	16.61719	17.7,12.6	0.33194
17.8	2.9	2	3	90.63889	32.79184	20.3,12.3	0.36111
11.2	1.3	10.6	10.5	88.38889	37.36739	20.4,11.7	0.51042
3.6	1.1	16.2	1	89.62500	35.50320	20.1,12.6	0.39792
9.2	0.5	2.3	0	88.20139	48.13221	21.7,11.7	0.54722
6	3.5	0.2	3	90.25694	19.33778	19.9,11	0.39931
0.2	6.8	0	1	90.25000	18.56366	20.1,10.8	0.51944
0.2	0.6	0	0	87.72222	27.93480	21.5,11.6	0.54236
1.4	0	5.3	0	88.96528	27.56160	19.8,11.8	0.44028
3.4	0	0	0	88.18056	26.49925	19.8,11.1	0.51528
4.8	2.1	0	0	88.17361	35.08448	20.8,12.1	0.49097
20.2	0.9	11	25.4	90.18056	25.27017	19.1,12.3	0.40833
9.8	19.8	4.6	37.9	92.00694	17.44786	18.2,12.1	0.22292
10.6	7	3.6	8.1	91.95139	16.96279	19.1,12.4	0.24375
4.6	9	0	4.7	90.85417	25.30680	18.2,11	0.46875
4.2	5.1	0	8.9	90.92361	21.88719	18.1,10.7	0.49514
15	0.5	3.5	1.3	93.97917	9.03621	15.7,12.6	0.14861
0.2	0	0.6	0	90.56944	22.68669	18.7,11.1	0.38889
0	0	0.2	2.5	92.61806	15.53381	17.5,10.3	0.23333

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
0	0	0	0	93.23913	16.03996	17.2,12.6	0.13547
9.6	0	3.6	1.1	92.09722	17.60160	17.4,10.4	0.41667
0.6	0	0.2	0	91.03472	18.42754	18.1,10.7	0.43542
2	0	0.1	0.5	90.32639	23.13600	18.4,9.3	0.56875
0.2	0	0.2	0	89.74306	23.79812	19.5,10.1	0.52292
7.4	1.6	34	8.9	89.98611	26.86917	19.2,11.8	0.56736
1.4	11	36.6	14.5	91.49306	19.85640	18.2,11.4	0.16528
20	0	2.5	1	92.96528	15.94769	17.9,13.4	0.24306
0.4	0	0	2.3	92.96528	17.83346	18.6,12.2	0.00000
2.2	0	0.4	0.5	92.44444	16.20669	18.2,12.6	0.00000
18.2	5.1	6.6	19.5	92.22222	15.70290	19.1,11.7	0.24028
1	0.6	0.8	0	89.77083	27.97291	20.3,12.2	0.57153
0.2	0	2.7	0	88.69444	36.46323	20.4,11.9	0.57014
1	1.2	1	2	88.85417	34.72550	20.7,12.4	0.41528
11.8	17.1	17.2	24.6	93.77778	11.43485	16.8,13.5	0.16250
12.2	18.2	9.4	18.1	92.48611	14.87685	17.3,12.5	0.15000
15.4	16.2	0.8	10.1	94.11111	12.60188	16.6,12.8	0.10556
17.4	13.2	43.3	13.4	91.95139	22.31797	18.3,11.7	0.38333
11.8	0.5	0.3	10.6	93.23611	14.54319	16.7,10.9	0.21042
0.8	0	0.1	0.7	91.60417	18.99705	18,10.6	0.29236
11.2	1	9.5	2	92.20139	13.19666	17.4,11.7	0.24792
11	16.1	75	43.6	91.84722	18.95246	17.8,11.5	0.19306
25	30	25.3	25.5	92.43056	21.01001	17.5,12.4	0.33333
6.2	6.5	5.5	7.5	93.57639	18.54595	17.3,12.7	0.21111
5.4	3.7	4.3	3.7	94.18750	11.27643	15.6,11.9	0.12917
1.2	0.3	0.7	0	94.21528	14.90527	16.3,9.5	0.34861
3.2	0.9	1.7	0	91.42361	18.85989	16.6,8.8	0.33542
0.8	0	0	0	92.43750	15.36315	16.1,9.9	0.29028
0.4	0	1	0	90.73611	20.12268	18.1,11.2	0.39444
0.2	0	0	0	90.78472	19.25115	17.3,9.9	0.50069
0.2	0	0	0	89.88889	22.12205	18.1,9.4	0.55208
6.8	0	49.4	9.5	91.42361	18.68462	18,9.6	0.35833
12.8	0	0.1	1.2	92.34028	20.37065	17.9,10.7	0.35903
0.2	0	0	0	90.38194	23.11748	17.8,9.3	0.37153
0	0	0	0	89.44444	21.36149	18.2,9.4	0.42361
7.8	1.6	6.6	4.3	91.29861	17.85518	19,10	0.30486
0.8	2.1	82.4	6.2	91.23611	27.06323	20,11.4	0.35972
49	6.8	9.5	10.8	91.54861	22.43561	21,12.9	0.41667
2.6	0	1.5	0.5	90.81944	31.14783	20,10.9	0.30417
12.6	0	1.8	1.5	91.97222	19.06184	18.7,12.8	0.31319
0.6	7.7	0	0	91.06250	24.85728	18.9,10.9	0.45972
0.2	5.6	20.7	4.7	91.80556	21.31075	17.7,11.6	0.37222
7.8	8.1	3.6	8.3	93.66667	14.98299	16.7,11.1	0.18125
0.2	0.7	0	0	91.08333	29.95735	18.6,9.8	0.46458
7.6	0	5.3	0	91.66667	17.22075	18,10.7	0.35694
0.8	0	0.2	14.5	91.56250	20.83968	18.9,10.1	0.42569
10.4	2.1	0	0	90.77083	30.65719	20.4,10.5	0.57569
0.2	0	16.2	0	92.74306	24.10128	19.2,10.4	0.23611
2.6	0	0.7	2	91.38194	15.84329	18.1,10	0.30139
0.8	0	0	0	91.47917	22.63304	18.4,9.7	0.28889

P1.txt ¹⁹	P2.txt ²⁰	P3.txt ²¹	P4.txt ²²	RH1.txt ²³	SR1.txt ²⁴	T1.txt ²⁵	WS1.txt ²⁶
12.2	0.2	1.2	5.9	92.05556	20.36536	18.4,10.1	0.48056
6.2	2.6	32.2	6	91.72222	20.25463	19.9,10.2	0.47222
0	0	0	0	91.75694	25.12759	18.1,9.1	0.36736
4.2	0.8	11.5	5.4	93.45833	14.39054	18,11.3	0.27083
1.6	0	0.1	0	92.88194	15.50817	17.3,10.2	0.35556
0.2	0	0	0	90.92361	26.15451	18.8,9.2	0.38264
0.2	0	28.9	0	91.14583	15.41176	17.3,9.4	0.34653
35	3.1	91.5	20.9	93.87500	14.80696	17.1,10.8	0.22431
37.8	1.1	17.4	3.2	95.27083	9.60056	14.7,12.4	0.20278
3	0	0.1	0	94.65972	10.50871	15,10.2	0.15069
0.2	0	11.8	0	89.71528	25.45961	18,9.6	0.44931
2	0	0	0.2	92.70139	14.33632	16.9,10.2	0.27500
0.6	0	0	0	92.30556	15.68097	17.3,10.1	0.26042
0.8	0.2	0	0	91.02778	22.09865	18.3,9.9	0.44306
1	0.6	0.6	0	91.00000	16.83461	18.3,11.1	0.26806
0.2	0	0.2	0	89.64583	26.46030	18.2,9.6	0.62292
0.2	0.3	0	0	88.66667	35.33513	19.7,8.8	0.81875
0.2	0	0	0	90.13889	23.98958	18.9,10.1	0.59097
0.2	0	0	0	85.87500	38.48379	20.4,7.9	1.06806
0	0	0	0	86.45833	30.81271	18.6,8.9	0.90139
0.2	0	0	0	88.72917	21.84686	18.4,8.3	0.66389
0	0	0	0	88.57639	21.98510	18.8,8.6	0.62500
3.6	0	1.2	0	91.86806	12.87360	16.4,9.1	0.40208
6.6	1.2	0.5	8.9	92.50000	18.37111	17.4,9.8	0.32639
0.4	2.7	0	9.8	91.20139	19.50571	17.6,9	0.45139
0.2	0	0	3.2	89.91667	22.61733	18.6,9.1	0.55417
0.2	2.1	2.2	2.4	91.57639	16.36216	18.3,10.1	0.40069
0.2	4.2	3.5	1.4	89.72222	24.68448	18.6,9.4	0.42917
0.2	3	0.2	0	90.74306	19.35110	18.7,10.2	0.50347
0	0.5	1.1	0	88.98611	22.75282	19.1,9.1	0.57778
0.2	0	0	0	88.85417	26.55442	20,9.5	0.68889
0	0	0	0	89.14583	26.02709	19.2,9.9	0.65694
0.2	0	0	0	88.07639	37.59777	20.7,10.6	0.63333
0	0	0	1.6	88.98611	29.75739	19.7,9.8	0.57708
0	2.4	0	6.2	87.55556	32.40365	20.6,10.7	0.62917
0	0	0	8.3	90.61806	17.69225	18.4,10.3	0.51389
0	0	0	0	88.98611	25.66932	18.9,9.1	0.51597
0	0	0	0	89.07639	24.50839	18.8,9.2	0.62639

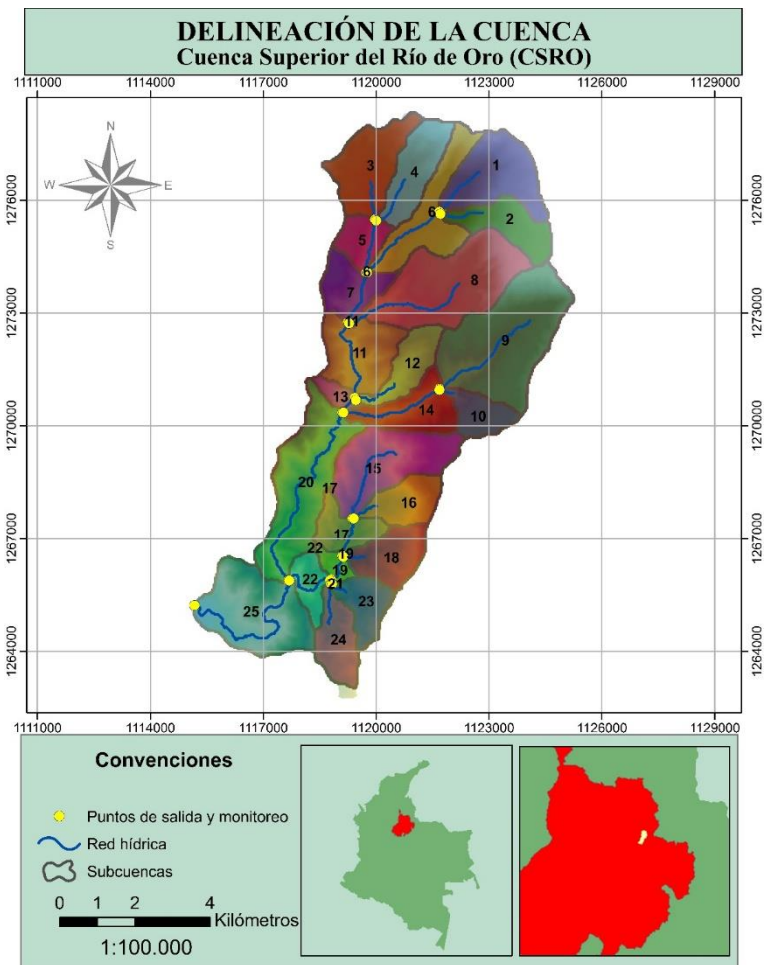
Anexo O. Clasificaciones de rendimiento generales de estadísticos recomendados para pasos de tiempo mensuales según Moriasi et. al.

Clasificación de desempeño	RSR	NSE	PBIAS (%) para caudales
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq 25$

Adaptado de: ²⁷.

²⁷ MORIASI, D. N., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2007, vol. 50, n.º 3, pp. 885-900.

Anexo P. Subcuencas, red hídrica y puntos de salida generados en SWAT – Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).



(Cartografía de Colombia y el departamento de Santander suministrados por ²⁸).
Nota: Se adjuntan en el archivo digital los mapas generados en la etapa de delimitación de la cuenca, en formato Shapefile, bajo el nombre Anexo P.

²⁸ GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit.

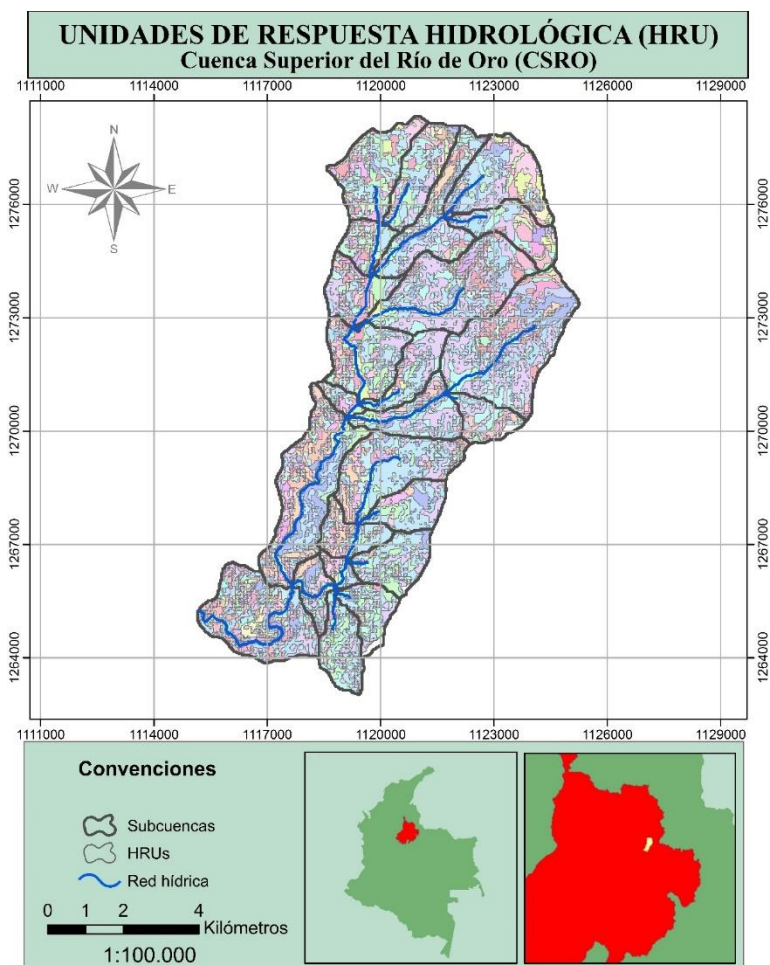
Anexo Q. Reporte de la generación de Unidades de respuesta hidrológica (HRU).

SWAT model simulation Date: 10/10/2016 12:00:00 AM Time: 00:00:00
 MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION THRESHOLDS : 10 / 10 / 10 [%]
 Number of HRUs: 287
 Number of Subbasins: 25

	Area [ha]	Area[acres]			
Watershed	7394.9400	18273.2665			
<hr/>					
	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area		
LANDUSE:					
Forest-Mixed --> FRST	2779.4422	6868.1407	37.59		
Range-Brush --> RINGB	3801.8742	9394.6213	51.41		
Meadow Bromegrass --> BROM	32.5988	80.5533	0.44		
Italian (Annual) Ryegrass --> RYEG	451.1101	1114.7157	6.10		
Honey Mesquite --> MESQ	202.0720	499.3300	2.73		
Agricultural Land-Close-grown --> AGRC	127.8426	315.9056	1.73		
SOILS:					
Ar	5318.3249	13141.8466	71.92		
FA	453.5069	1120.6381	6.13		
ArA	937.7498	2317.2267	12.68		
FArA	685.3584	1693.5550	9.27		
SLOPE:					
0-30	2135.0414	5275.7940	28.87		
30-60	3759.2948	9289.4055	50.84		
60-9999	1500.6038	3708.0670	20.29		

Nota: El archivo completo se encuentra en formato .txt en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo Q.

Anexo R. HRU generadas en SWAT – Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO).



Fuente: Autores. (Cartografía de Colombia y el departamento de Santander suministrados por ²⁹).

Nota: Se adjuntan en el archivo digital el mapa generado en la etapa de generación de HRU, en formato Shapefile, bajo el nombre Anexo R.

²⁹ GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Op. cit.

Anexo S. Base de datos de salida de la simulación del modelo SWAT.

LULC	HRU	HRUGIS	SUB	YEAR	MON	AREAKm2	PRECIPmm	SNOWFALL	SNOWMEL	IRRmm	PETmm	ET
FRST	1	000010001	1	2010	59	0.14538	0	0	0	0	0	4.758
FRST	2	000010002	1	2010	59	0.49215	0	0	0	0	0	4.758
FRST	3	000010003	1	2010	59	0.10554	0	0	0	0	0	4.758
FRST	4	000010004	1	2010	59	0.22344	0	0	0	0	0	4.758
FRST	5	000010005	1	2010	59	0.13732	0	0	0	0	0	4.758
RNGB	6	000010006	1	2010	59	0.18469	0	0	0	0	0	4.758
RNGB	7	000010007	1	2010	59	0.37693	0	0	0	0	0	4.758
RNGB	8	000010008	1	2010	59	1.0325	0	0	0	0	0	4.758
RNGB	9	000010009	1	2010	59	0.50132	0	0	0	0	0	4.758
RNGB	10	000010010	1	2010	59	0.74072	0	0	0	0	0	4.758
FRST	11	000020001	2	2010	59	0.54121	0	0	0	0	0	4.774
FRST	12	000020002	2	2010	59	0.26705	0	0	0	0	0	4.774
FRST	13	000020003	2	2010	59	0.35437	0	0	0	0	0	4.774
FRST	14	000020004	2	2010	59	0.39804	0	0	0	0	0	4.774
FRST	15	000020005	2	2010	59	0.099509	0	0	0	0	0	4.774
RNGB	16	000020006	2	2010	59	0.19339	0	0	0	0	0	4.774
RNGB	17	000020007	2	2010	59	0.12126	0	0	0	0	0	4.774
RNGB	18	000020008	2	2010	59	0.054319	0	0	0	0	0	4.774
RNGB	19	000020009	2	2010	59	0.078917	0	0	0	0	0	4.774
BROM	20	000020010	2	2010	59	0.14999	0	0	0	0	0	4.774
BROM	21	000020011	2	2010	59	0.024999	0	0	0	0	0	4.774
BROM	22	000020012	2	2010	59	0.15099	0	0	0	0	0	4.774
RNGB	23	000030001	3	2010	59	0.78848	0	0	0	0	0	4.688

Nota: El archivo completo se encuentra en formato .mdb en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo S.

Anexo T. Estadística descriptiva de los valores generados de producción de agua (WYLD) en las subcuencas de la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Subcuenca	WYLD_Qr		Total [mm]	277295.95								
1	9792.242		Promedio [mm]	11091.84								
2	11959.909		Máximo [mm]	25538.90								
3	17230.221		Mínimo [mm]	2800.50								
4	12890.792											
5	13311.217											
6	12053.312											
7	15819.592											
8	9411.703											
9	11246.548											
10	4650.465											
11	11839.875											
12	9982.454											
13	9086.667											
14	10981.512											
15	10938.194											
16	7323.389											
17	7287.505											
18	6386.967											
19	9462.779											
20	13029.103											

Nota: El archivo completo se encuentra en formato .xlsx en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo T.

Anexo U. Caudales observados VS caudales simulados en SWAT.

Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)	Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
28/02/2010	0.7295	0.0000	10/08/2010	-	1.9400
01/03/2010	0.7168	0.0000	11/08/2010	-	3.4030
02/03/2010	0.7089	0.0000	12/08/2010	-	1.8260
03/03/2010	0.7322	0.0000	13/08/2010	-	3.6940
04/03/2010	0.7173	0.0000	14/08/2010	-	1.8570
05/03/2010	0.7725	0.0024	15/08/2010	-	2.2740
06/03/2010	0.7876	0.0023	16/08/2010	-	2.5140
07/03/2010	0.7775	0.0012	17/08/2010	-	1.8950
08/03/2010	0.7543	0.0023	18/08/2010	-	1.8460
09/03/2010	0.7793	0.0003	19/08/2010	-	5.7150
10/03/2010	0.7555	0.0050	20/08/2010	-	3.7840
11/03/2010	0.7223	0.0028	21/08/2010	-	2.0310
12/03/2010	0.6870	0.0009	22/08/2010	-	1.9050
13/03/2010	0.6789	0.0000	23/08/2010	-	1.8770
14/03/2010	0.6745	0.0000	24/08/2010	-	3.1660
15/03/2010	0.6479	0.0000	25/08/2010	-	1.8540
16/03/2010	0.6766	0.0000	26/08/2010	-	2.4530
17/03/2010	0.8674	0.0005	27/08/2010	-	6.1660
18/03/2010	1.0582	0.0002	28/08/2010	-	1.9770
19/03/2010	1.0635	0.0000	29/08/2010	-	1.8790
20/03/2010	0.7510	0.0000	30/08/2010	-	4.1850
21/03/2010	0.7660	0.0000	31/08/2010	-	2.4180
22/03/2010	0.6879	0.0000	01/09/2010	1.6508	7.4770
23/03/2010	0.6523	0.0000	02/09/2010	2.9003	1.9200
24/03/2010	0.6466	0.0000	03/09/2010	2.1006	1.8860
25/03/2010	0.6453	0.0000	04/09/2010	2.3698	5.7070
26/03/2010	0.6668	0.0000	05/09/2010	2.5463	1.9060
27/03/2010	0.6666	0.0000	06/09/2010	2.0668	2.1040
28/03/2010	0.6430	0.0000	07/09/2010	2.0997	1.8710
29/03/2010	0.6398	0.0000	08/09/2010	1.9801	2.4530
30/03/2010	0.7515	0.0041	09/09/2010	2.1014	1.8510
31/03/2010	0.7462	0.0012	10/09/2010	1.8235	1.8270
01/04/2010	0.6649	0.0054	11/09/2010	1.7422	2.9430
02/04/2010	0.6384	0.0217	12/09/2010	3.2955	7.0460
03/04/2010	0.7626	0.0214	13/09/2010	1.9766	1.8560
04/04/2010	0.6888	0.1781	14/09/2010	2.2271	1.8100
05/04/2010	0.8293	0.0517	15/09/2010	2.0333	1.7830

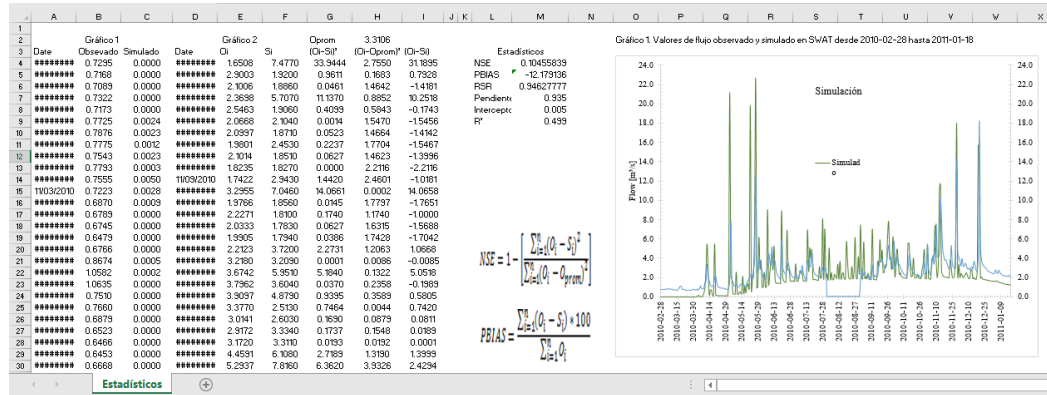
Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)	Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
06/04/2010	1.0970	0.0477	16/09/2010	1.9905	1.7940
07/04/2010	0.8061	0.0400	17/09/2010	2.2123	3.7200
08/04/2010	0.7810	0.0601	18/09/2010	3.2180	3.2090
09/04/2010	0.8342	0.4181	19/09/2010	3.6742	5.9510
10/04/2010	1.4383	0.8936	20/09/2010	3.7962	3.6040
11/04/2010	1.5680	2.8390	21/09/2010	3.9097	4.8790
12/04/2010	3.3296	5.4970	22/09/2010	3.3770	2.5130
13/04/2010	2.1204	2.9050	23/09/2010	3.0141	2.6030
14/04/2010	1.6387	0.1937	24/09/2010	2.9172	3.3340
15/04/2010	1.1835	0.7457	25/09/2010	3.1720	3.3110
16/04/2010	1.0541	0.7091	26/09/2010	4.4591	6.1080
17/04/2010	1.0452	0.1544	27/09/2010	5.2937	7.8160
18/04/2010	1.1790	0.1297	28/09/2010	3.8276	4.5900
19/04/2010	2.0016	5.5270	29/09/2010	4.0746	3.7190
20/04/2010	2.0984	0.2470	30/09/2010	3.4304	2.9350
21/04/2010	1.4069	0.1686	01/10/2010	2.8568	6.2240
22/04/2010	1.0589	0.1429	02/10/2010	5.7409	4.3520
23/04/2010	0.9425	0.1336	03/10/2010	3.1853	2.0450
24/04/2010	0.8966	0.1303	04/10/2010	3.2912	3.9780
25/04/2010	0.8617	0.1280	05/10/2010	4.2048	4.9820
26/04/2010	0.8797	0.1268	06/10/2010	3.1811	3.4920
27/04/2010	0.8289	0.1183	07/10/2010	3.3304	2.3340
28/04/2010	0.8391	0.1213	08/10/2010	3.0112	2.5030
29/04/2010	0.7819	0.1289	09/10/2010	2.7370	2.0960
30/04/2010	0.7502	0.1157	10/10/2010	2.5506	2.0240
01/05/2010	0.7283	0.1157	11/10/2010	2.3482	1.9970
02/05/2010	0.9253	1.3290	12/10/2010	2.2352	1.9850
03/05/2010	1.7127	21.2000	13/10/2010	2.1810	1.9700
04/05/2010	7.8413	2.1160	14/10/2010	2.1493	1.9540
05/05/2010	1.8346	1.8330	15/10/2010	2.9096	5.5860
06/05/2010	1.5123	0.3241	16/10/2010	4.2556	5.5250
07/05/2010	1.1296	0.2855	17/10/2010	3.9123	3.0350
08/05/2010	1.0608	0.3082	18/10/2010	3.0471	2.1020
09/05/2010	1.2511	2.5940	19/10/2010	2.6145	2.2150
10/05/2010	1.0602	0.2817	20/10/2010	2.3982	4.0370
11/05/2010	0.9950	0.2767	21/10/2010	2.2900	2.0370
12/05/2010	1.0097	0.5405	22/10/2010	2.2360	2.0130
13/05/2010	1.2632	0.4390	23/10/2010	2.1819	1.9860
14/05/2010	1.2805	0.3081	24/10/2010	2.2511	2.3770

Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)	Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
15/05/2010	1.2654	2.1540	25/10/2010	2.1578	1.9570
16/05/2010	1.2143	0.3342	26/10/2010	2.0427	1.9360
17/05/2010	1.0690	1.0980	27/10/2010	1.9812	1.9130
18/05/2010	1.0002	0.4223	28/10/2010	2.2218	2.8200
19/05/2010	1.5595	1.1950	29/10/2010	2.3346	3.4370
20/05/2010	1.5941	1.3820	30/10/2010	3.4653	4.9170
21/05/2010	1.9789	0.8188	31/10/2010	2.4893	1.9380
22/05/2010	2.1713	19.8600	01/11/2010	2.3579	1.9040
23/05/2010	2.3636	0.6352	02/11/2010	5.2850	5.4790
24/05/2010	1.8026	1.8160	03/11/2010	2.9106	1.9190
25/05/2010	2.8667	2.1630	04/11/2010	2.4089	1.8780
26/05/2010	3.6313	7.7700	05/11/2010	2.2352	1.8470
27/05/2010	12.6771	22.6600	06/11/2010	3.1785	3.9580
28/05/2010	3.6644	0.9324	07/11/2010	4.2396	3.9280
29/05/2010	2.3594	1.0730	08/11/2010	3.3494	4.4540
30/05/2010	3.7917	6.1850	09/11/2010	4.9865	7.4170
31/05/2010	3.8423	2.9360	10/11/2010	7.5643	3.9080
01/06/2010	2.9448	3.7420	11/11/2010	4.1210	2.0000
02/06/2010	2.6088	1.0230	12/11/2010	4.0542	3.2000
03/06/2010	1.9642	1.0040	13/11/2010	4.3822	11.0300
04/06/2010	1.8763	2.5690	14/11/2010	10.0214	11.7000
05/06/2010	1.7783	1.0340	15/11/2010	7.8116	2.6630
06/06/2010	2.5555	1.0400	16/11/2010	5.0491	2.3010
07/06/2010	3.0487	9.0680	17/11/2010	4.2531	2.1140
08/06/2010	4.4509	1.3190	18/11/2010	3.7643	2.0800
09/06/2010	3.7572	2.3500	19/11/2010	3.7957	2.0530
10/06/2010	3.2257	3.5370	20/11/2010	3.4662	2.0290
11/06/2010	5.1506	4.4710	21/11/2010	3.0307	2.0120
12/06/2010	3.1874	2.8150	22/11/2010	2.8582	1.9950
13/06/2010	3.8111	5.2890	23/11/2010	3.0242	3.8480
14/06/2010	3.6493	1.6480	24/11/2010	5.2969	3.0840
15/06/2010	2.6631	1.4250	25/11/2010	3.3297	2.0210
16/06/2010	2.2803	1.4460	26/11/2010	3.0262	1.9980
17/06/2010	2.0497	1.4160	27/11/2010	2.9722	2.1540
18/06/2010	1.9300	1.4110	28/11/2010	2.9201	5.6700
19/06/2010	1.7905	1.4120	29/11/2010	14.2374	18.0000
20/06/2010	5.9150	8.9320	30/11/2010	4.5491	2.0800
21/06/2010	2.9926	2.0770	01/12/2010	4.0876	3.3690
22/06/2010	2.6261	1.6260	02/12/2010	3.6803	2.0340

Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)	Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
23/06/2010	2.4535	1.5450	03/12/2010	3.1437	2.4370
24/06/2010	2.2725	1.5320	04/12/2010	3.9414	2.2480
25/06/2010	3.1658	6.9520	05/12/2010	3.2044	1.9910
26/06/2010	3.5490	2.7960	06/12/2010	3.0887	2.1300
27/06/2010	3.0150	2.8370	07/12/2010	3.4515	2.3110
28/06/2010	2.5561	1.6570	08/12/2010	3.2365	2.5150
29/06/2010	2.2586	1.6350	09/12/2010	2.8558	2.1800
30/06/2010	2.0214	1.6190	10/12/2010	2.9321	1.9360
01/07/2010	1.9760	1.6910	11/12/2010	2.7666	1.9040
02/07/2010	1.8830	1.6080	12/12/2010	2.9667	2.6790
03/07/2010	1.9859	3.4460	13/12/2010	3.0869	2.8530
04/07/2010	2.2511	1.6410	14/12/2010	2.8301	1.8950
05/07/2010	1.8366	1.6280	15/12/2010	3.6506	2.0100
06/07/2010	1.9485	1.9360	16/12/2010	3.2584	1.8570
07/07/2010	2.7122	2.6650	17/12/2010	2.7160	1.8200
08/07/2010	2.3117	2.5970	18/12/2010	2.5920	2.5770
09/07/2010	3.2296	2.6770	19/12/2010	4.1317	15.6600
10/07/2010	2.5250	1.6790	20/12/2010	18.2471	14.5700
11/07/2010	2.0714	1.7010	21/12/2010	5.2225	1.9530
12/07/2010	1.8282	1.6440	22/12/2010	3.7850	2.0880
13/07/2010	1.7208	1.6370	23/12/2010	3.4036	1.8660
14/07/2010	3.6417	6.9740	24/12/2010	3.1675	1.8300
15/07/2010	3.3485	2.6420	25/12/2010	3.0048	1.7980
16/07/2010	2.9842	5.0920	26/12/2010	2.9397	1.7760
17/07/2010	3.5913	3.9880	27/12/2010	2.7886	1.7490
18/07/2010	4.6690	4.8760	28/12/2010	2.6374	1.7230
19/07/2010	3.2896	1.8450	29/12/2010	2.5833	1.7080
20/07/2010	2.4598	1.7990	30/12/2010	2.4930	1.6820
21/07/2010	2.3111	1.8170	31/12/2010	2.4656	1.6650
22/07/2010	2.1944	1.7690	01/01/2011	2.3968	1.6490
23/07/2010	2.1238	1.7480	02/01/2011	2.3613	1.6290
24/07/2010	2.0252	1.7260	03/01/2011	2.3926	1.6160
25/07/2010	2.0032	3.1390	04/01/2011	2.7376	1.6410
26/07/2010	1.9835	1.9020	05/01/2011	2.5347	1.6720
27/07/2010	1.9455	2.1140	06/01/2011	2.3798	1.5750
28/07/2010	2.9822	8.1320	07/01/2011	2.7154	1.5460
29/07/2010	2.5086	1.7860	08/01/2011	2.4781	1.5040
30/07/2010	3.0129	7.0730	09/01/2011	2.3504	1.4690
31/07/2010	2.7434	1.9680	10/01/2011	2.2366	1.4380

Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)	Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal simulado (m ³ /s)
01/08/2010	-	2.4280	11/01/2011	2.1918	1.4020
02/08/2010	-	1.7970	12/01/2011	2.1481	1.3650
03/08/2010	-	5.0860	13/01/2011	2.1276	1.3220
04/08/2010	-	1.8140	14/01/2011	2.0722	1.3050
05/08/2010	-	2.5250	15/01/2011	2.0995	1.2850
06/08/2010	-	1.8070	16/01/2011	2.1787	1.3130
07/08/2010	-	1.7940	17/01/2011	2.1132	1.2500
08/08/2010	-	2.3370	18/01/2011	2.0623	1.2240
09/08/2010	-	2.1120			

Anexo V. Cálculo de los estadísticos planteados por Moriasi aplicados a la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).



Nota: El archivo completo se encuentra en formato .xlsx en la carpeta de archivos adjuntos, bajo el nombre Anexo V.

Anexo W. Resumen de usos de suelo de la herramienta SWAT Error Checker aplicados a la Cuenca Superior Río de Oro (CSRO).

Uso o cobertura del suelo (LULC)	Área km ²	CN	Capacidad de agua disponible (AWC) mm	Factor topográfico en ecuación USLE (USLE_LS)	Precipitación (PREC) mm	Caudal de escorrentía superficial (SURQ) mm	Caudal de flujo subterráneo (GWQ) mm	Evapotranspiración (ET) mm
AGRC	1.28	80.55	99.63	10.56	2,294.22	912.09	447.89	806.92
BROM	0.33	58.62	104.1	2.58	2,224.48	333.16	815.48	931.69
FRST	27.79	77.21	97.84	7.74	2,175.45	498.27	566.84	971.31
MESQ	2.02	74.24	100.33	10.61	2,284.61	768.98	520.46	870
RNGB	38.03	76.26	99.91	7.17	2,176.89	461.21	553.01	1,045.12
RYEG	4.51	78.06	99.82	10.86	2,173.26	467.02	642.89	917.81