



# **Modelización hidrológica de la cuenca del rio Gachaneca (Paramo Rabanal) usando el modelo SWAT.**

## **The Gachaneca River watershed modeling of (Paramo Rabanal) using the SWAT model.**

### **MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D./D<sup>a</sup> Jorge Adrián Jerez Arias**

**Dirigido por:**

**Dr./Dra. D./D<sup>a</sup> David Andrés Rivas Tabares**

**Codirector por:**

**Dr./Dra. D./D<sup>a</sup> Francisco Carreño Conde**

**Alcalá de Henares, 14 de septiembre de 2023**

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios**, por ser mi guía constante, por moldear mi ser y bendecir cada paso que doy en la vida.

**A mi padre**, cuyo esfuerzo incansable y determinación me han enseñado el valor del trabajo duro. Gracias por brindarme la oportunidad de estudiar y por ser mi inspiración para perseguir mis sueños.

**A mi madre**, por su amor inquebrantable y apoyo constante. Su fortaleza y cariño han sido el bálsamo en los momentos difíciles, recordándome siempre que puedo superar cualquier obstáculo.

**A David Andrés Rivas Tabares**, mi director de TFM, por su invaluable apoyo en la realización de este proyecto. Agradezco profundamente sus enseñanzas y orientación, especialmente en la correcta utilización de los modelos SWAT. Su paciencia y dedicación han sido esenciales en mi formación académica.

**Al distrito de riego ASUSA**, por su colaboración y disposición al brindarme información vital y permitirme conocer de cerca sus actividades. Su cooperación ha sido fundamental para la culminación de este trabajo.

Finalmente, a todos aquellos que, de una forma u otra, han contribuido a mi formación y han sido parte de este viaje académico, mi más sincero agradecimiento.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS .....	11
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	11
3.1 ZONA DE ESTUDIO.....	11
3.1.1 RÍO GACHANECA .....	14
3.1.2 MASAS DE AGUA SUPERFICIALES .....	15
3.1.3 RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS .....	18
3.2 BASES DE DATOS .....	20
3.2.1 TABLAS DE BÚSQUEDA “LOOKUP-TABLES” .....	21
3.2.2 MAPA DE USOS Y COBERTURA DE LOS SUELOS.....	21
3.2.3 CLIMA .....	22
3.3 MODELO SWAT Y ENTORNO DE TRABAJO.....	22
3.4 PARÁMETROS PRELIMINARES .....	23
4. METODOLOGÍA DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN (DIAGRAMA DE FLUJO).....	24
4.1 ESTRUCTURA DE DATOS Y CONFIGURACIÓN .....	24
4.1.1 DELIMITACIÓN AUTOMÁTICA.....	25
4.1.2 DEFINICIÓN DE HRUS.....	26
4.1.3 DATOS DE CLIMA .....	29
4.1.4 GENERACIÓN DE TABLAS ( <i>SWAT Input Tables</i> ) .....	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
6. LA CALIBRACIÓN .....	43
7. LA VALIDACION.....	45
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	45
9. BIBLIOGRAFIA.....	46
10. ANEXOS.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Bases de datos usadas para la ejecución de SWAT. ....	21
<b>Tabla 2.</b> Tabla de búsqueda que vincula las coberturas y usos del suelo del mapa proporcionado por el Esquema de ordenamiento territorial de Samacá con los códigos de usos y cobertura de suelo del modelo SWAT. ....	22
<b>Tabla 3.</b> Parámetros generales para SWAT en la evaluación de la cuenca del río Gachaneca, Samacá, Boyacá, Colombia. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Ejemplo de rotación de cultivos para el año 1 (2002) y el año (2003), mostrando los porcentajes globales de variación en la zona agrícola del distrito ASUSA, Boyacá, Colombia. ....	27
<b>Tabla 5.</b> Configuración inicial del modelo SWAT en relación a la definición de las unidades de respuesta hidrológica HRUs totales en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia; con el modelo SWAT. ....	28
<b>Tabla 6.</b> Usos de suelo y su correspondencia en el modelo SWAT para la inicialización del modelo del río Gachaneca, Boyacá, Colombia. ....	35
<b>Tabla 7.</b> Valores tanto de volúmenes superficiales y subterráneos anual a lo largo del periodo de modelación en el modelo dinámico. ....	42
<b>Tabla 8.</b> Relación de parámetros iniciales de calibración para la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia. ....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Delimitación del área de estudio, cuenca del río Gachaneca y ubicación de embalses. Samacá, Boyacá, Colombia. ....	12
<b>Figura 2.</b> Área de influencia del páramo de Rabanal y su intersección en la zona de cabecera de la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia. ....	13
<b>Figura 3.</b> Localización del distrito de riego ASUSA dentro de la cuenca del río Gachaneca y distribución de canales de riego. ....	14
<b>Figura 4.</b> A) Dique Gachaneca I B) Espejo de agua Gachaneca I C) Válvulas de descarga Gachaneca I D) Salida Válvulas E). Imagen satelital Gachaneca I F) Localización dique y válvulas Gachaneca I. Fuente: Google Earth Pro (v7.3.2). (2021). Sámaca, Boyacá, Colombia. Google Earth. ....	16
<b>Figura 5.</b> A) Dique Gachaneca II B) Vertedero Gachaneca II C) Válvulas de descarga Gachaneca II D) Salida Válvulas E). Imagen satelital Gachaneca I F) Localización dique y válvulas Gachaneca I. Fuente: Google Earth Pro (v7.3.2). (2021). Sámaca, Boyacá, Colombia. Google Earth. ....	18
<b>Figura 6.</b> Cuenca de estudio Rio Gachaneca, Drenajes sencillos (quebradas). Fuente: Corpoboyacá. 19	
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo para la modelización con la herramienta <i>Soil Water and Assessment Tool</i> -SWAT. ....	25

<b>Figura 8.</b> Cuenca de estudio, reservorios y punto de descarga. ....	26
<b>Figura 9.</b> Subcuencas modelizadas con el modelo SWAT de la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.....	27
<b>Figura 10.</b> Estaciones Climáticas (6) empleadas para el ajuste de entrada de agua al sistema empleando el método de polígonos de Thiessen (6). Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).....	30
<b>Figura 11.</b> Representación gráfica interpolación de la precipitación para el 21/01/2000, a partir de tres estaciones climáticas reales en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia. ....	31
<b>Figura 12.</b> Clasificación de pendientes en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.....	34
<b>Figura 13.</b> Clasificación taxonómica de los suelos en la cuenca del río Gachaneca, Samacá, Boyacá.....	35
<b>Figura 14.</b> Clasificación de uso de suelos.....	37
<b>Figura 15.</b> Distribución de HRUs para la cuenca del Rio Gachaneca. ....	38
<b>Figura 16.</b> Modelo Hidrológico preliminar para la cuenca del rio Gachaneca para el periodo de 01/01/2000 y 31/03/2015. ....	39
<b>Figura 17.</b> Modelo dinámico Hidrológico preliminar para la cuenca del rio Gachaneca para el periodo de 01/01/2000 y 31/03/2015. ....	39
<b>Figura 18.</b> Comparación de caudales de salida modelo preliminar y Dinámico. ....	40
<b>Figura 19.</b> Comparación entre Caudales Observados y Simulados, Relación de Caudales con Coeficiente de Determinación.....	44
<b>Figura 20.</b> Comparación entre Caudales Observados y Simulados validados, Relación de Caudales con Coeficiente de Determinación luego de la validación. ....	45

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

**A: arcilla**

**Ar: Arena**

**ArcGIS: Environmental Systems Research Institute (ESRI), Geographic Information System.**

**ArcSWAT: Soil and Water Assessment Tool for ArcGIS**

**ARS: Agricultural Research Service**

**CHS: Contenido de humedad del suelo**

**ES: Escorrentía superficial**

**ET: Evapotranspiración**

**MDT: Modelo digital de terreno**

**MO: materia orgánica**

**PCP: Precipitación**

**SIG: Sistema de información geográfica**

**UTM: Universal Transverse Mercator coordinate system**

**HRU: Unidades de Respuesta Hidrológica**

**ASUSA: Asociación de Distrito de Riego de Samacá**

**SWAT: Soil and Water Assessment Tool**

**POT: Plan de Ordenamiento Territorial**

**GIS: Sistema de Información Geográfica**

**LUT: Tablas de Búsqueda "Lookup-Tables"**

**ALOS: Advanced Land Observing Satellite**

**EARTHDATA: Plataforma de Datos de la Tierra**

**RHS: Recursos Hídricos Superficiales**

**RHSu: Recursos Hídricos Subterráneos**

**Páramo: Ecosistema de montaña tropical**

**HRUs: Unidades de Respuesta Hidrológica**

**SWAT: Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua**

**ESRI: Environmental Systems Research Institute**

**GIS: Sistema de Información Geográfica**

## RESUMEN

El presente trabajo se centra en la modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca en Samacá, Boyacá, donde se encuentra la Asociación de Distrito de Riego de Samacá - ASUSA. Esta región, ubicada en la cordillera oeste de los Andes y en la parte oeste del departamento de Boyacá, Colombia, abarca un área catastral de 4.504,6 hectáreas, de las cuales 2.865,93 hectáreas son de influencia directa.

En primer lugar, se detalla la metodología utilizada para la evaluación hidrológica con el modelo SWAT en la cuenca del río Gachaneca. Se aborda la recopilación de datos, la configuración del modelo, su calibración y validación, y la interpretación de los resultados. El estudio se enfoca en la herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT), destacando el papel del Páramo de Rabanal en la provisión de agua para el distrito de riego de ASUSA.

El objetivo principal es desarrollar un modelo hidrológico detallado de la cuenca del río Gachaneca utilizando SWAT para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en relación con la demanda de agua para riego. Se configuran parámetros del modelo basados en datos de la cuenca, incluyendo el uso y tipo de suelo. Se calibra y valida el modelo con datos históricos para lograr una modelización óptima. Además, se integran usos de suelo dinámicos mediante rotaciones de cultivo históricas del distrito de riego ASUSA.

Finalmente, se presentan los resultados de dos tipos de modelización: una que incorpora una representación dinámica de los cultivos y otra que utiliza un tipo genérico de suelo agrícola. Se destaca el modelo que integra cultivos dinámicos, proporcionando una visión detallada de las interacciones entre usos del suelo y recursos hídricos. A través de este análisis, se generan recomendaciones para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Gachaneca.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un componente fundamental para el desarrollo social, económico y político de cualquier región, por lo que su gestión y administración son cruciales para asegurar un futuro sostenible, minimizando los impactos ambientales y protegiendo la vida humana y los ecosistemas.

Este estudio se desarrolla en la cuenca alta del río Gachaneca, ubicada en el Páramo Rabanal, en Samacá, Boyacá (Colombia), evaluando la respuesta hidrológica asociada al uso del suelo y las estrategias de gestión del agua en la agricultura, así como el papel de la regulación de las dos represas, Gachaneca 1 y 2 que son de gran importancia para el distrito de riego ASUSA - Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Samacá, que abastece con agua de riego a más de 2011 usuarios con una extensión de 2800 hectáreas.

En este contexto, es necesario contar con un modelo hidrológico validado para lograr con precisión evaluar el comportamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Gachaneca. De este modo, facilitar la planificación hidrológica de la cuenca al poder variar factores de gestión, regulaciones y usos del suelo. El uso de los modelos hidrológicos resultan ser una herramienta con gran utilidad para la gestión de recursos hídricos a diferentes escalas, especialmente en la regional, para el diseño de estrategias de gestión, y evaluación de medidas para enfrentar las presiones actuales y futuras que se presentan en la cuenca.

En relación con la gestión del recurso hídrico, se pretende evaluar su cantidad utilizando datos históricos para comprender los impactos derivados, como, por ejemplo, las inundaciones, las sequías, los efectos de las represas, que están relacionados con el uso de la superficie de la cuenca. De esta manera, se podrán determinar los futuros efectos frente a diferentes escenarios de cambio climático.

El desarrollo de un modelo hidrológico con un software conlleva a una revisión de estudios previos que permitan identificar los aspectos comunes con la cuenca del río Gachaneca. Partir de puntos comunes e identificar aquellos elementos únicos o de tratamiento especial requieren del diseño de una metodología de adaptación. Especialmente los tratamientos o ajustes se realizan sobre los datos de entrada del modelo. A continuación, se muestra una breve descripción de los estudios previos de referencia empleados para el desarrollo del presente trabajo.

### ESTUDIOS PREVIOS

La modelización hidrológica de cuencas utilizando la herramienta *Soil Water and Assessment Tool* - SWAT ha sido ampliamente desarrollada e implementada dentro de la investigación aplicada u teórica durante las últimas décadas. Varios estudios han aplicado este modelo en diferentes cuencas hidrográficas alrededor del mundo, proporcionando valiosos conocimientos y metodologías que pueden ser aplicados en el estudio de la cuenca del río Gachaneca. La siguiente revisión se realizó para identificar los estudios más relevantes con características similares a las del río Gachaneca, especialmente en cuencas andinas de montaña, y con usos y coberturas de suelo predominantemente agrícola.

1. 2004. Juan David Navarrete González publicaron un estudio titulado "Hidrología de páramos". Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Blanco, Colombia.
2. 2007, Gustavo Adolfo Agredo Cardona publicaron un estudio titulado "Planificación urbana sostenible modelo de unidad para la planificación territorial de ciudades intermedias de Colombia: Caso Biomanizales-Cuenca del río Chinchiná-Cuenca la Francia" en el que modelaron la cuenca del río Chinchiná mediante el modelo SWAT.
3. En 2010, Setegn et al. en "*Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model*" modelaron la cuenca del lago Tana en Etiopía, que abarca un área de 15,000 km<sup>2</sup>.



4. 2012, L. Palazón publicó un capítulo de libro titulado "Bases de datos de los suelos para la modelización de la erosión con el modelo SWAT a partir de diferentes fuentes de información" donde se discuten las bases de datos de suelos para la modelización de la erosión utilizando el modelo SWAT.
5. 2014, Vladimir Cossio, Agustí Pérez-Foguet, Alfredo Durán, Cristina Yacooub publicaron un estudio titulado "Sistemas de información e instrumentos técnicos para la gestión del agua" en el que se menciona la modelación SWAT de hidrología en cuencas agrícolas altamente intervenidas en Bolivia.
6. 2016, Quispe July, Rocio publicaron un estudio titulado "Aplicación del modelo (*Soil and water assessment tool*) para simular caudales con fines agrícolas en la cuenca del río Keka" en el que se utiliza el modelo SWAT para simular caudales en la cuenca del río Keka la Paz, Bolivia.
7. En 2016, Mafla, F., Paz, P., Realpe, D., y Cárdenas, G. publicaron un estudio titulado "Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano" en el que modelaron la cuenca San Juan de Pasto en Colombia en escenarios de sequía mediante un modelo SWAT.
8. 2018, Elgueta Rodríguez, Joaquín Ignacio publicaron un estudio titulado "Implementación del modelo hidrológico SWAT para cuenca del río Lonquén" en el que se discute la implementación del modelo SWAT para la cuenca del río Lonquén, Chile.
9. 2018, Franco Trivisonno, Margarita Portapila, Martín Romagnoli, Nahuel Caruso, y Javier Heredia publicaron un estudio titulado "Resultados preliminares de la modelación del flujo de agua subterránea en la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fé" en el que se menciona la simulación con SWAT en la cuenca.
10. Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., Willaarts, B., & De Miguel, Á. (2019). An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. *Agricultural Water Management*, 212, 211-225.
11. En 2020, Henry Garzón Sánchez publicaron un estudio titulado "Evaluación del efecto o relación entre algunas coberturas vegetales y usos de la tierra del contexto rural andino colombiano y el régimen de caudales mínimos y" en el que modelaron el contexto rural andino colombiano
12. 2021, Andrés Joaquín Jiménez Yanasupo, publicaron un estudio titulado "Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo" en el que modelaron la cuenca del río Tambo Lima, Perú.
13. Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., De Miguel, Á., Gobin, A., & Willaarts, B. (2022). Enhancing LULC scenarios impact assessment in hydrological dynamics using participatory mapping protocols in semiarid regions. *Science of the Total Environment*, 803, 149906.

Estos estudios proporcionan una base sólida y los principios del ejercicio de modelización para el estudio de la cuenca del río Gachaneca. Es importante resaltar que, a pesar de las similitudes, cada cuenca es única y requerirá su propia metodología para los procesos de calibración y validación. En los siguientes apartados, se describe en detalle la metodología desarrollada para la evaluación hidrológica con el modelo SWAT en la cuenca del río Gachaneca. En esta se detalla la recopilación de los datos, la configuración del modelo, la calibración y validación de este, y la interpretación de los resultados obtenidos.

El objetivo de este estudio se enfocó en la modelización hidrológica de este complejo y vital sistema utilizando la herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT), con un énfasis particular en el papel que desempeña el Páramo de Rabanal en la provisión de agua para el distrito de riego de

ASUSA.

## **2. OBJETIVOS**

Objetivo General:

- Desarrollar un modelo hidrológico detallado de la cuenca del río Gachaneca utilizando la herramienta de evaluación del suelo y agua – (SWAT), para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca en relación a la demanda de agua para riego.

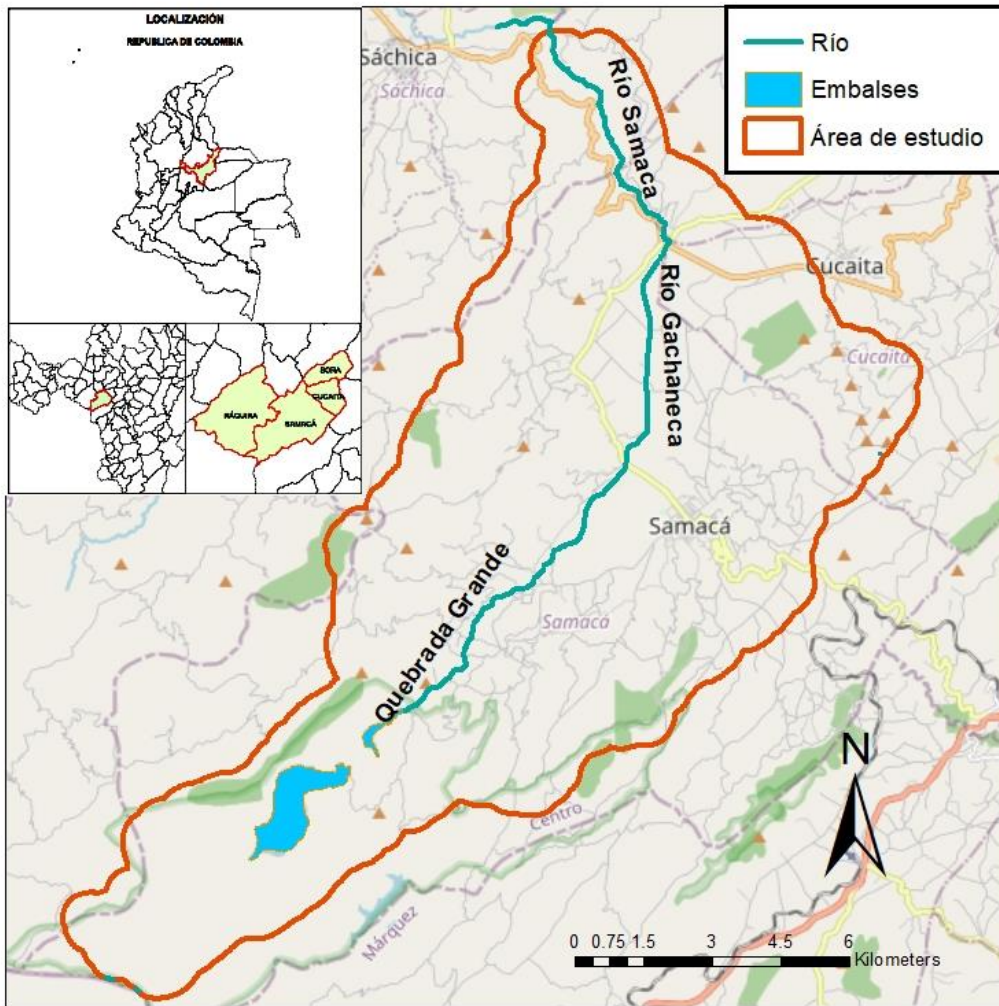
Objetivos Específicos:

- Configurar los parámetros del modelo SWAT en función de los datos disponibles de la cuenca del río Gachaneca, incluyendo el uso del suelo y el tipo de suelo.
- Calibrar y validar el modelo SWAT utilizando datos históricos para lograr la mejor modelización posible de la cuenca del río Gachaneca.
- Incluir usos del suelo dinámicos en el modelo SWAT mediante rotaciones de cultivo históricas de las parcelas del distrito de riego ASUSA.

## **3. METODOLOGÍA Y MATERIALES**

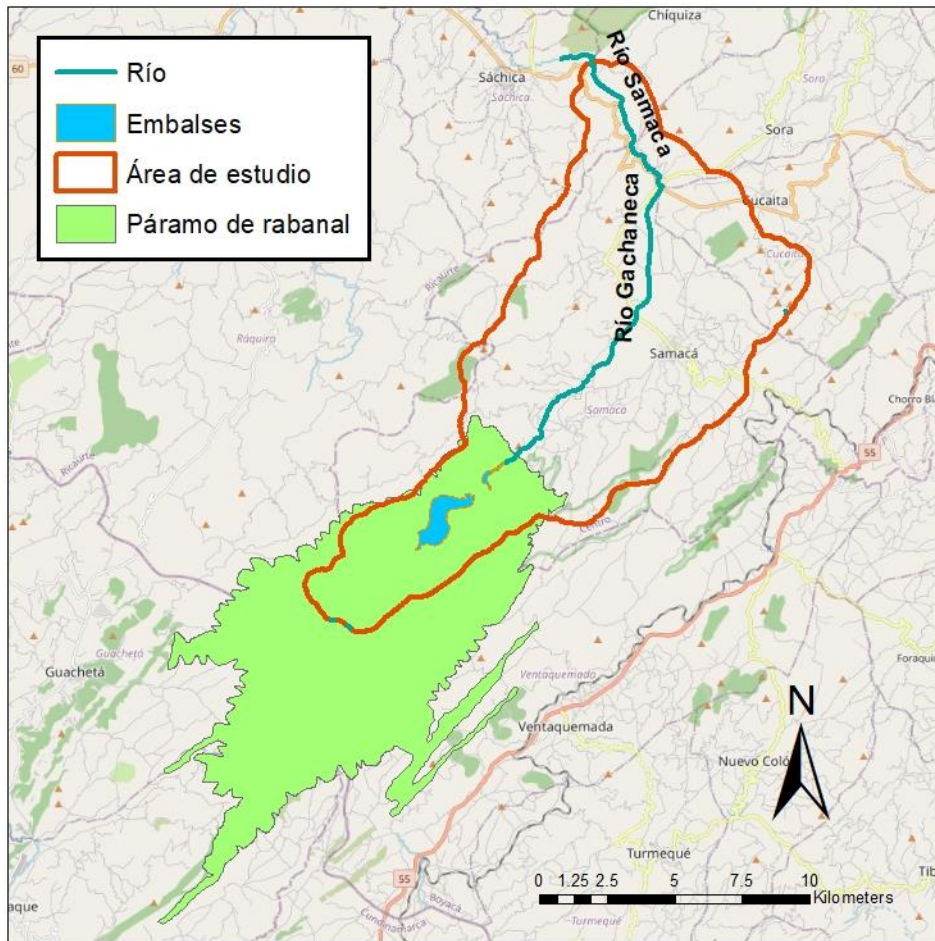
### **3.1 ZONA DE ESTUDIO**

El presente estudio se desarrolló en la cuenca del río Gachaneca en Samacá, Boyacá; en la que se circunscribe la Asociación de Distrito de Riego de Samacá - ASUSA, localizado en la cordillera oeste de los Andes, que a su vez corresponde a la parte oeste del departamento de Boyacá, Colombia. El área de influencia catastral de este distrito es de 4.504,6 hectáreas, de las cuales 2.865,93 hectáreas se benefician actualmente del sistema de riego del distrito. Dentro de esta zona de influencia, existe una región de valle de 1.957,06 hectáreas situada aproximadamente a 2.600m.s.n.m, incluida dentro de una región de ladera que abarca 899,9 hectáreas y alcanza una altitud máxima de 3.000 m.s.n.m. ASUSA en su equivalente, corresponde a una comunidad de regantes empleando aguas superficiales para beneficiar una extensión agrícola importante para el desarrollo rural y garantizar la seguridad alimentaria de los lugareños (Asociación de Distrito de Riego de Samacá ASUSA, 2019).



**Figura 1.** Delimitación del área de estudio, cuenca del río Gachaneca y ubicación de embalses. Samacá, Boyacá, Colombia.

Un componente esencial de esta región es el Páramo de Rabanal. Este corresponde a un ecosistema de alta montaña, crucial para la sostenibilidad del paisaje por su biodiversidad y por sus funciones hidrológicas, es la principal fuente de agua superficial para el sistema de riego del distrito. Este páramo es la fuente de recarga de dos embalses artificiales, Gachaneca I y Gachaneca II, que están conectados por un canal artificial llamado Canal Gachaneca. Desde el embalse Gachaneca II, el agua se distribuye al río Gachaneca, que es la principal arteria para el riego y el drenaje en el distrito. Además, se desprenden de este río principal cuatro canales revestidos que facilitan la distribución predial del agua.

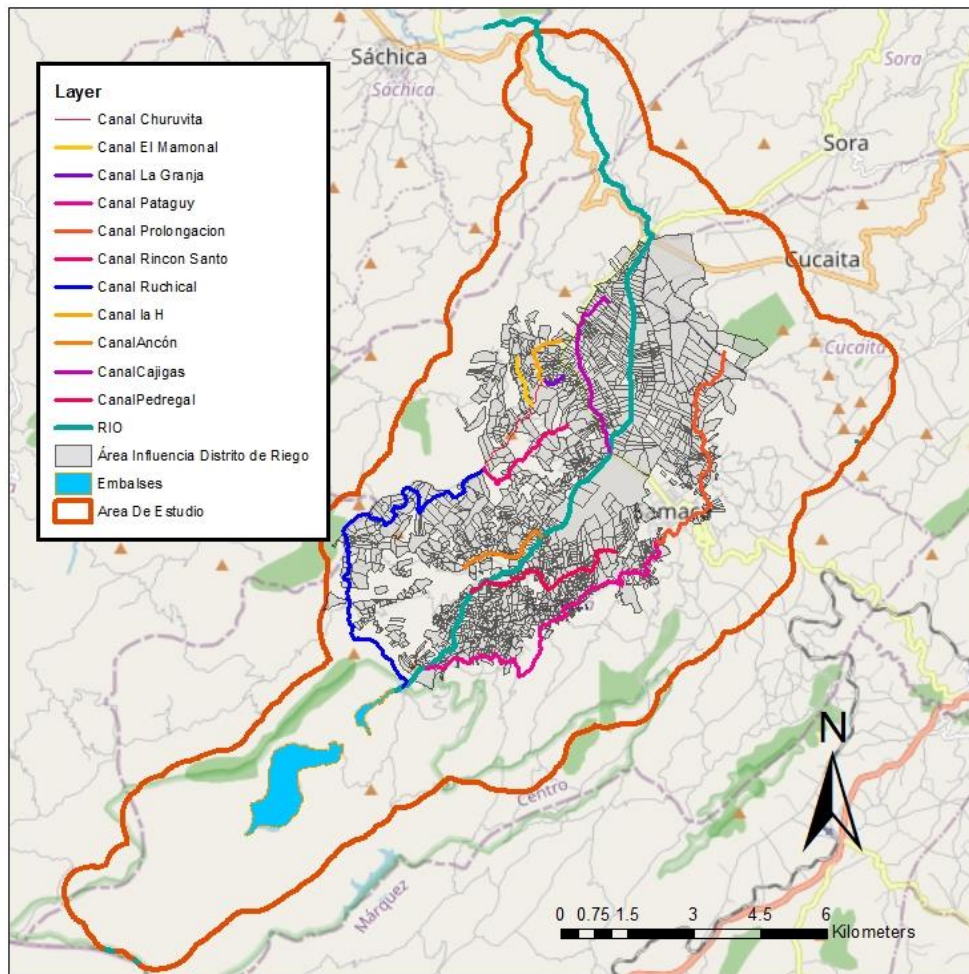


**Figura 2.** Área de influencia del páramo de Rabanal y su intersección en la zona de cabecera de la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

La composición del suelo en el área de influencia del distrito varía de arcillosa a franco arcillo arenosa, y es apta para una variedad de cultivos, entre los que se incluyen papa, cebada, hortalizas, arveja, trigo, maíz, pasto y frutales (Alcaldía de Samacá, 2015). Los cultivos que se encuentran actualmente en la región coinciden con este uso potencial del suelo, destacándose los cultivos de papa, cebolla y arveja (Asociación de Distrito de Riego de Samacá ASUSA, 2019).

La agricultura comercial predomina en la zona del valle, mientras que la agricultura rudimentaria y de subsistencia es común en las zonas de ladera. La agricultura de subsistencia está presente en las zonas limítrofes del distrito de riego. En la zona, la actividad agrícola es fundamental para la economía de la región, tanto por los ingresos generados por la comercialización de los productos como por el volumen de empleo que genera (Alcaldía de Samacá, 2015). La distribución predial de las áreas de cultivo del distrito de riego ASUSA, así como la distribución de los canales de riego se muestran en la Figura 3.





**Figura 3.** Localización del distrito de riego ASUSA dentro de la cuenca del río Gachaneca y distribución de canales de riego.

### 3.1.1 RÍO GACHANECA

El río Gachaneca, ubicado en el municipio de Samacá, Boyacá, Colombia, tiene una longitud aproximada de 16 km. Es un río de gran relevancia tanto ambiental como hidrológica para la región. Nace en la zona del Páramo de Rabanal, siendo una fuente vital de agua para la cuenca del río Magdalena. Este río abastece al distrito de riego de Samacá, siendo esencial para las actividades agrícolas y pecuarias de la zona. Además, la cuenca del río Gachaneca es reconocida por su riqueza en recursos hídricos, lo que refleja la importancia de conservar y proteger este ecosistema.

El río Gachaneca, a lo largo de su recorrido, recoge aguas de diferentes afluentes y arroyos de la región, contribuyendo al caudal y biodiversidad del río. Además, es un río regulado por diferentes embalses y represas, como las represas Gachanecas I y II, que tienen como objetivo principal el almacenamiento y distribución de agua para diferentes usos en la región.

La gestión y conservación del río Gachaneca es esencial para garantizar la calidad del agua y la sostenibilidad de los ecosistemas asociados. En los últimos años, se han realizado esfuerzos para monitorear y evaluar la calidad del agua, así como para identificar y mitigar posibles fuentes de contaminación (Beltrán García, 2018)..

Es importante destacar que el río Gachaneca es un componente esencial del sistema hidrológico del departamento de Boyacá (equivalente a la figura de provincia), y su conservación y manejo adecuado

son fundamentales para garantizar la disponibilidad y calidad del agua para las generaciones futuras. Especialmente la cuenca del río Gachaneca tiene una influencia de regulación hidrogeológica de flujo regional abasteciendo el sistema acuífero de Tunja que comprende 14 municipios de la Cuenca Alta del río Chicamocha. Sistema del cual se extraen volúmenes y garantías para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Tunja (capital de provincia) y otras cabeceras municipales.

### 3.1.2 MASAS DE AGUA SUPERFICIALES

#### **Embalse Gachaneca I**

Construido en el año de 1941, ubicado sobre el Río Gachaneca (K0+000) a 3356 m.s.n.m., consta de un dique en mampostería, con vertedero de excesos lateral.

La descarga se hace a través de dos compuertas metálicas deslizantes, operadas desde una caseta mediante un mecanismo de volante y tornillo, que entregan a un tramo de canal revestido. Su caudal máximo de evacuación se estima en 1.5 m<sup>3</sup>/s (Archivo Físico del Distrito de Riego ASUSA, 1985).

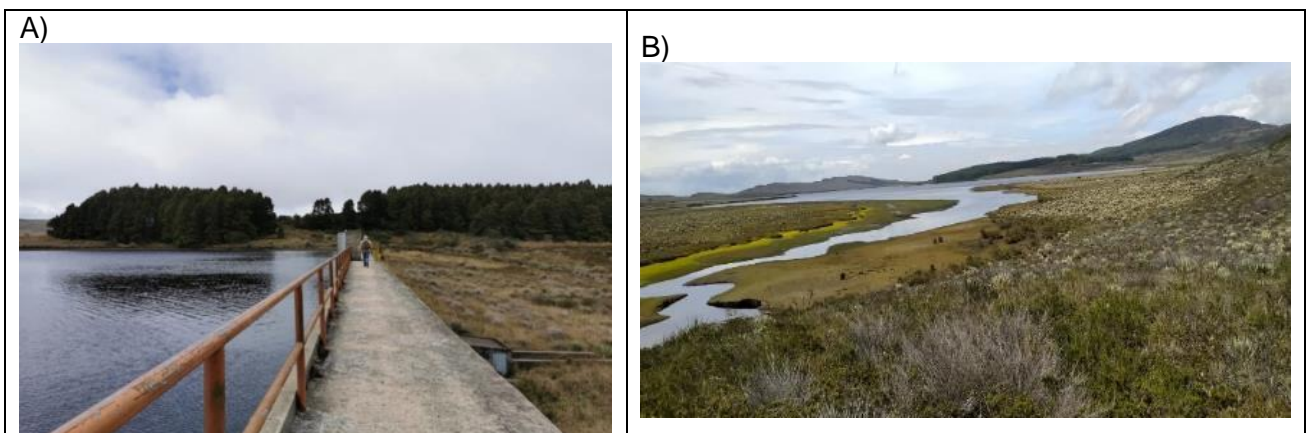
La cuenca aportante abarca un área de 1383.34 ha El área máxima de inundación es de 180.9 ha. Capacidad máxima de 4'940.000 m<sup>3</sup>.

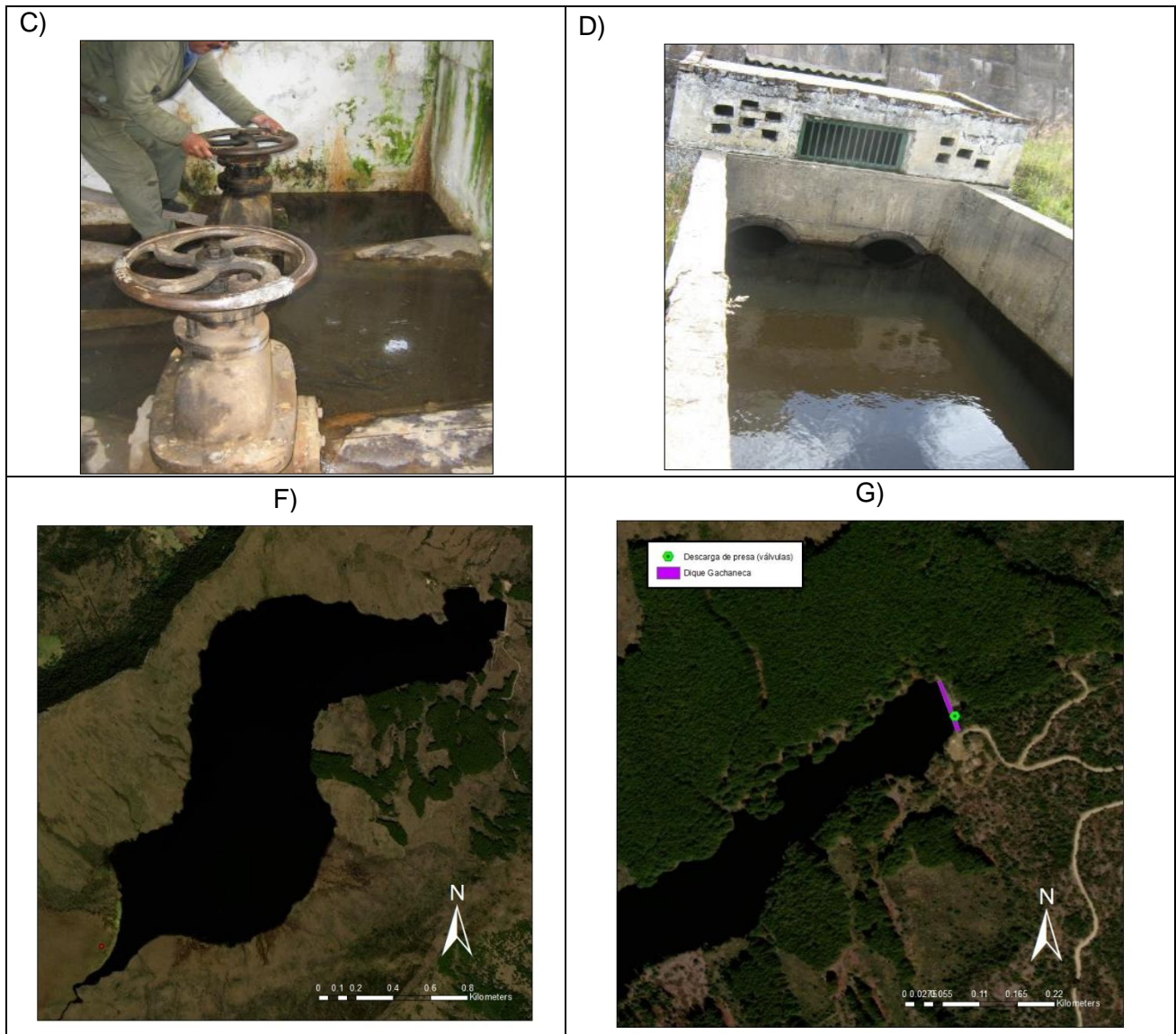
Cota corona de la represa: 3356 m.s.n.m.

Cota de la presa en si vertedero 3555.20 m.s.n.m.

Cota terreno natural 3347.77 m.s.n.m. Cota batea de descarga: 3347.77 m.s.n.m. Cota terreno: 3347.61 m.s.n.m.

Posteriormente en el año 1986, el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras-HIMAT-, contrató la rehabilitación y realce del dique en concreto ciclópeo quedando la estructura con 140 m de longitud y altura máxima de 11.3 m con vertedero de excesos lateral, para una capacidad de 4.940.000 m<sup>3</sup> (Archivo Físico del Distrito de Riego ASUSA, 1985). Algunas de las características descritas pueden verse en la Figura 4.





**Figura 4.** A) Dique Gachaneca I B) Espejo de agua Gachaneca I C) Válvulas de descarga Gachaneca I D) Salida Válvulas E). Imagen satelital Gachaneca I F) Localización dique y válvulas Gachaneca I. Fuente: Google Earth Pro (v7.3.2). (2021). Sámaca, Boyacá, Colombia. Google Earth.

## Embalse Gachaneca II

Construido en el año de 1985 por el Instituto **Colombiano** de Hidrología, Meteorología y. Adecuación de Tierras - HIMAT, ubicado sobre el Río Gachaneca, en el K2+362 y a 3.310 m.s.n.m., consta de un dique en concreto reforzado de 60 m de longitud y altura máxima de 14,5 m, con vertedero de excesos frontal, para una capacidad de 1.474.000 m<sup>3</sup> (Archivo Físico del Distrito de Riego ASUSA, 1985).

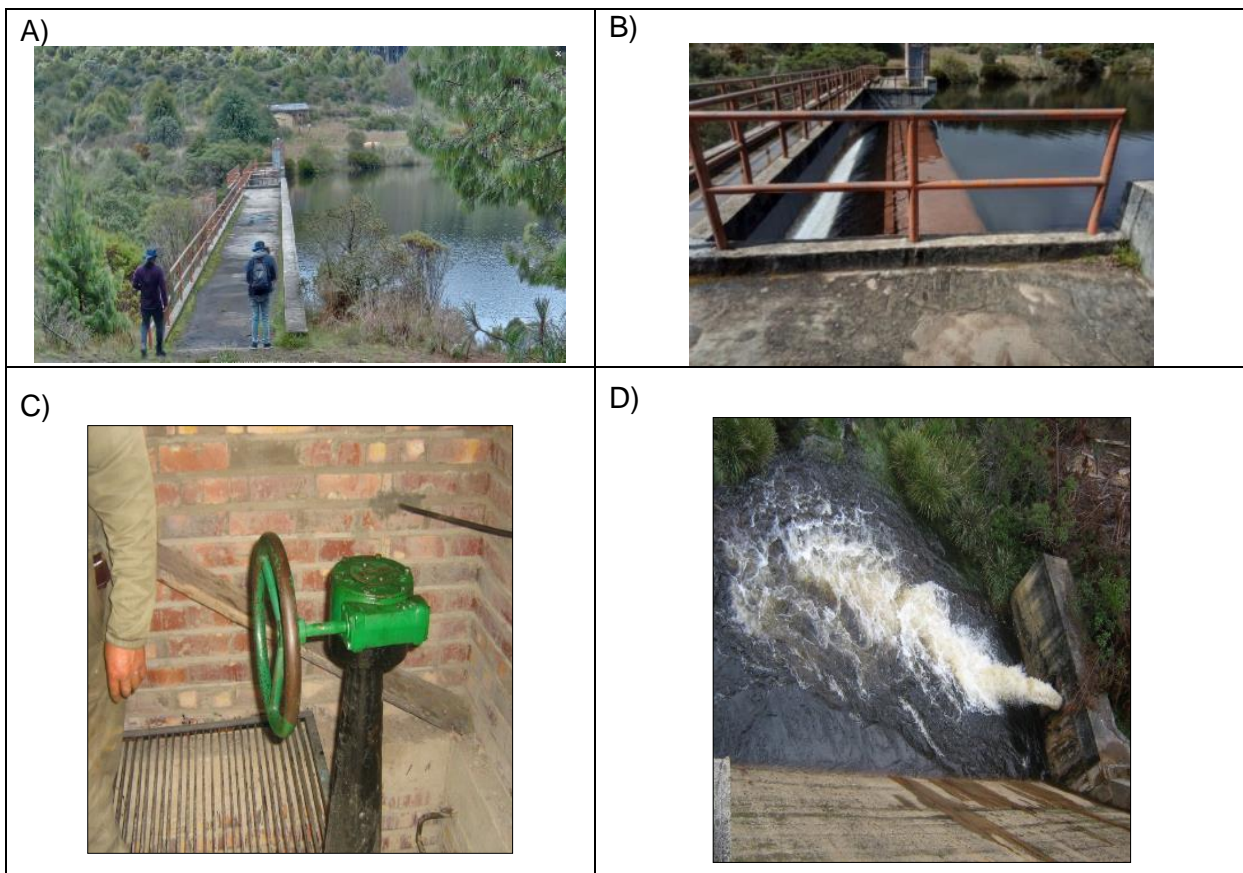
La descarga de este embalse se hace a través de dos válvulas de compuerta de 18", operadas desde una caseta, que entregan al colchón de amortiguación del vertedero. Su caudal máximo de evacuación se estima en 1.1 m<sup>3</sup>/s.

La cuenca aportante abarca un área de 1.819,3 ha. El área máxima de inundación es de 16,9 ha. cota corona de la represa: 3.310,1 m.s.n.m. Cota de la presa en vertedero 3.300,15 m.s.n.m. cota terreno natural 3.293,15 m.s.n.m. cota batea de descarga: 3.295,32 m.s.n.m. cota terreno: 3.347,61 m.s.n.m. capacidad máxima del embalse: 1.474.000 m<sup>3</sup>

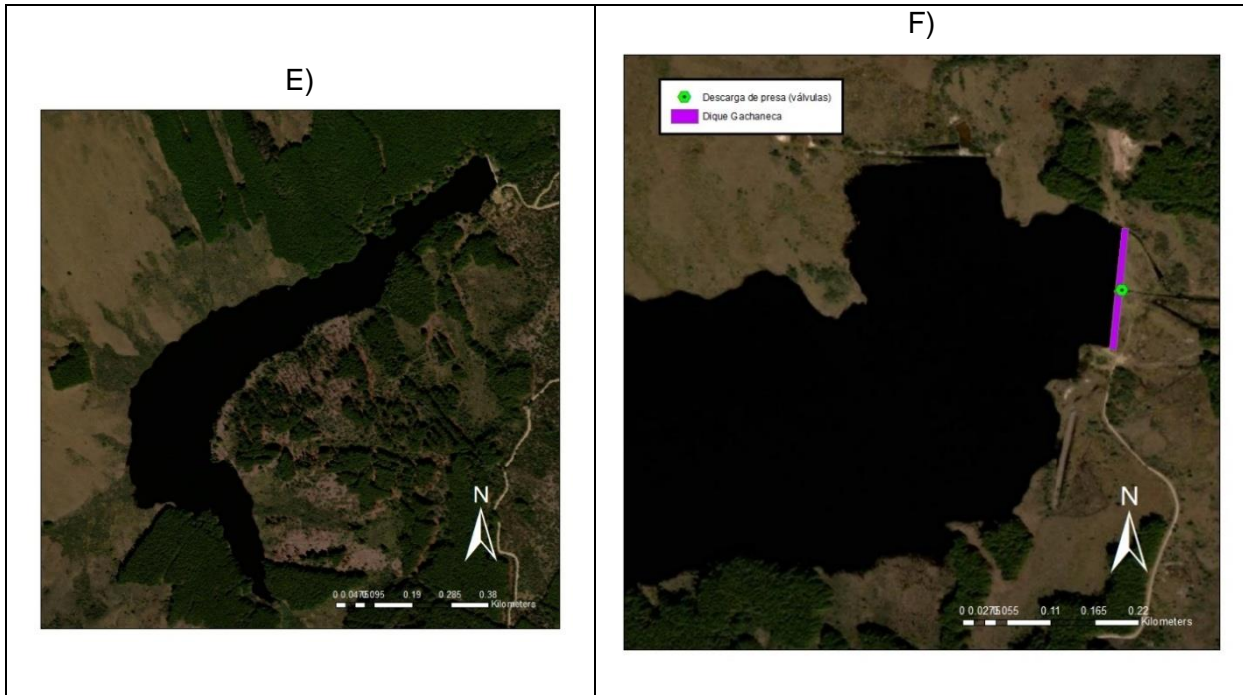


Los embalses Gachaneca I y Gachaneca II cumplen la función de “recolectores de agua”, no presentan cauces afluentes y durante las épocas de lluvias cumplen la función de regulación o amortiguación, y recolección de aguas lluvias por tránsito de avenidas de la cuenca aferente.

Aguas arriba de la captación no existe ningún tipo de intervención antrópica de importancia, no existen viviendas cercanas o algún tipo de actividad humana. La zona aledaña a los embalses se encuentra reforestado con pino canadiense de tipo maderable y desde hace unos años se encuentra en fase de aprovechamiento y extracción, la demás vegetación es en su mayoría arbustiva, siendo esta nativa de páramo con afectación mínima (Archivo Físico del Distrito de Riego ASUSA, 1985). Algunas de las características descritas pueden verse en la Figura 5.





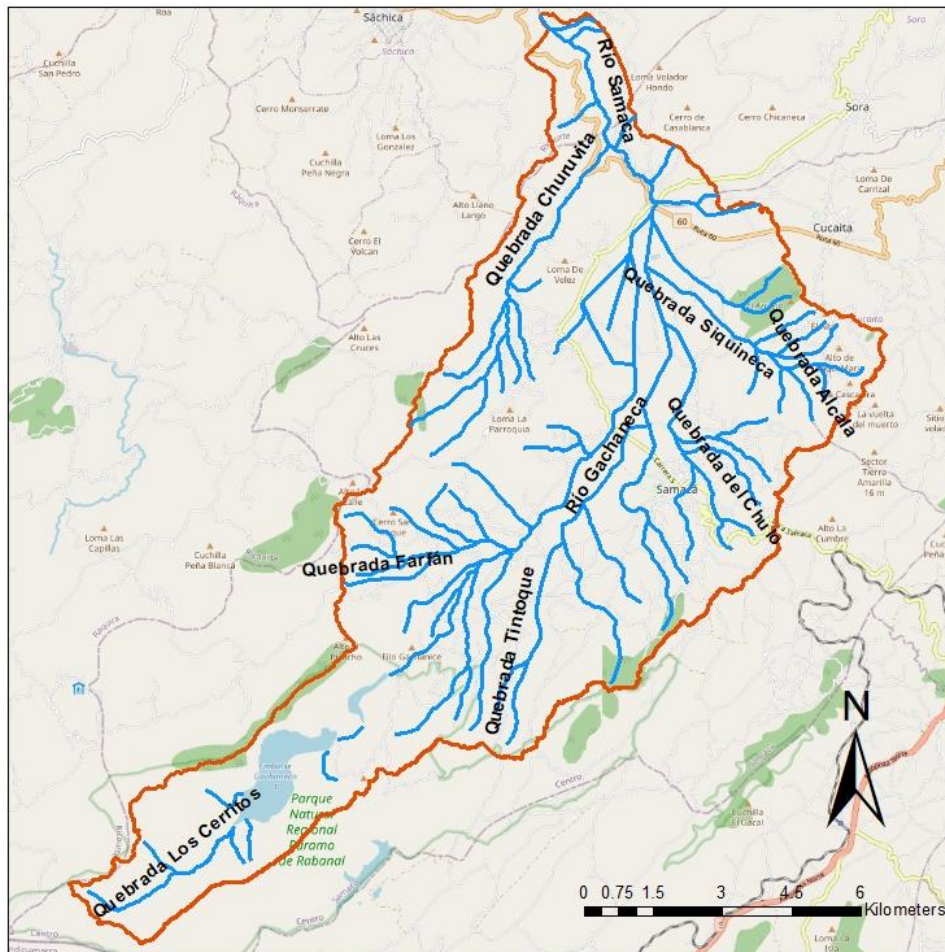


**Figura 5.** A) Dique Gachaneca II B) Vertedero Gachaneca II C) Válvulas de descarga Gachaneca II D) Salida Válvulas E). Imagen satelital Gachaneca I F) Localización dique y válvulas Gachaneca I. Fuente: Google Earth Pro (v7.3.2). (2021). Sámaca, Boyacá, Colombia. Google Earth..

### 3.1.3 RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS

Dentro de los recursos hídricos superficiales, el río Gachaneca se destaca como el principal cauce de la región de Samacá, Boyacá. Este río, que nace en el complejo de páramo Rabanal, presenta dinámicas hídricas que pueden ser complejas, especialmente cuando se analiza la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas. Aunque en este estudio no se profundizará en la relación hidrogeológica detallada, es esencial reconocer la importancia de esta interacción para un balance hídrico adecuado, al menos por diferencias para ajuste del mismo.

La subdivisión en subcuencas y la asignación de diversas HRUs permiten comprender las relaciones de los recursos hídricos superficiales con los subterráneos. A través de los HRUs, se establecen las relaciones de los flujos que describen el comportamiento del balance de masas del modelo.



**Figura 6.** Cuenca de estudio Rio Gachaneca, Drenajes sencillos (quebradas). Fuente: Corpoboyacá.

En la parte alta de la cuenca del río Gachaneca, se encuentran dos embalses que dan inicio al río, ubicados en el complejo de páramo Rabanal. Estas estructuras de regulación tienen un impacto significativo en las aportaciones hídricas a lo largo de la cuenca, alterando el balance hídrico general. Es esencial incluir la información de las aportaciones de estos embalses durante la calibración del modelo para garantizar una representación precisa de las dinámicas hídricas.

En cuanto a los recursos hídricos subterráneos, aunque no se utilizan directamente en la cuenca modelada, es fundamental considerarlos en el análisis. Aunque la cuenca del río Gachaneca no depende del agua subterránea para el riego agrícola o el consumo humano, es crucial reconocer la potencialidad de este recurso para futuras expansiones o en situaciones de escasez hídrica. No se dispone de una caracterización o delimitación de las masas de agua subterráneas en el área de estudio. Si bien se tiene conocimiento empírico sobre la recarga regional del páramo de Rabanal en relación a los flujos subterráneos, no se dispone de piezómetros, sondeos o información sobre los flujos para poder estimar o cuantificar las aportaciones subterráneas. El modelo SWAT, en este caso, atribuye los flujos subterráneos por diferencia aritmética entre los flujos superficiales y las aportaciones totales de entrada.

En Colombia, y específicamente en la región de Samacá, Boyacá, el uso agrícola es constante a lo largo del año, con posibilidad de dos o tres ciclos de cultivo. Tras el uso agrícola, se genera un volumen de descarga que puede interpretarse como recarga, flujo lateral o transferencia directa a la atmósfera. Estos flujos deben ser estimados e incorporados al modelo para definir con precisión el flujo de la red fluvial. La recarga en las zonas de cultivo es esencial, ya que tanto la cantidad como la calidad de la recarga pueden verse afectadas por estos flujos.

Es importante resaltar que para el desarrollo de una modelización adecuada de la cuenca del río

Gachaneca, es esencial considerar tanto los recursos hídricos superficiales como subterráneos, así como las dinámicas agrícolas y de consumo que afectan el balance hídrico de la región.

### 3.2 BASES DE DATOS

Para la elaboración del modelo hidrológico de la cuenca del río Gachaneca hasta la descarga en el río Sáchica, se utilizaron fuentes primarias y secundarias para lograr recuperar los datos de la más alta calidad y resolución posible. El modelo digital de elevación -DEM se obtuvo del satélite ALOS PALSAR (Alaska Satellite Facility, 2014)., con una resolución de 12,5m x 12,5m. Este DEM proporcionó información detallada sobre la topografía de la cuenca, lo que permitió lograr una representación superficial de las características del terreno en el modelo.

Por otra parte, el modelo requiere de información derivada de los mapas de suelos o edafológico y el mapa de usos y coberturas del suelo, que se obtuvieron del Esquema de Ordenamiento Territorial en formato vectorial (Alcaldía de Samacá, 2015). Estos mapas proporcionaron información sobre la distribución de los diferentes tipos de suelos. y de las propiedades hidro físicas de los mismos en la cuenca, así como sobre la dinámica de los diversos usos y coberturas del suelo. En las últimas incluyendo áreas de cultivo, pastizales y áreas urbanas con alta resolución espacial y temporal debido a la base de datos disponible de las parcelas agrícolas. Esta información fue crucial para estimar las respuestas hidrológicas de la cuenca y para modelizar los procesos de escorrentía y percolación con mayor precisión.

Respecto a las propiedades hidrofísicas y texturales de los suelos, estas se obtuvieron de la base de datos SoilGrids, <https://soilgrids.org/>. Con una resolución de 250m. Ya que el modelo SWAT es un modelo semidistribuido, es necesario atribuir un único valor de las propiedades hidrofísicas y texturales a cada unidad taxonómica de suelo. Para ello se empleó estadística zonal (*Zonal Statistics*) del ArcGIS para calcular la mediana de los valores de cada una de las propiedades del SoilGrids, cortando con cada una de las unidades taxonómicas del mapa de suelos. A partir de ello, se ha empleado las relaciones de pedotransferencia de Saxton et al, 2006, mediante el uso de la herramienta SPAW (*Soil Plant Atmosphere Water*) del *Agricultural Research Services - ARS* del departamento de agricultura de los Estados Unidos, disponible en: <https://www.ars.usda.gov/research/software/>. Así pues, las propiedades del suelo derivadas de las ecuaciones de pedotransferencia fueron incluidas en la base de datos de suelos definidas por el usuario. Las propiedades derivadas de las clases texturales fueron: punto de marchitez permanente, capacidad de campo, agua aprovechable (*Available Water Content*)-AWC, conductividad hidráulica, y densidad aparente. Un procedimiento equivalente, pero empleando muestras de suelo fue empleado en Rivas-Tabares et al, 2019, e la cuenca de los ríos Cega, Eresma y Adaja tributarios del río Duero en la península ibérica.

Respecto a los datos climáticos, estos incluyen información sobre la precipitación, la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, se obtuvieron de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM para el periodo 2000-2015 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, 2023). Estos datos fueron corroborados con información obtenida de la plataforma POWER | *Data Access Viewer* de la NASA (NASA POWER, 2023). Los datos climáticos son fundamentales para modelizar los procesos hidrológicos, ya que la precipitación es la principal entrada de agua en la cuenca, y la temperatura y la humedad influyen de forma determinante en la evapotranspiración que es la principal salida de agua a la atmósfera de la cuenca.

Así pues, la base de datos para la modelización de la cuenca del río Gachaneca se compone de información recopilada de la más alta calidad y resolución posible, la cual fue obtenida de diversas fuentes. La base de datos proporciona una representación detallada y precisa de las características físicas y climáticas de la cuenca, lo que permite una modelización hidrológica con mayor precisión. La Tabla 1, muestra la relación de los datos empleados para definir la base de datos en SWAT para la cuenca del río Gachaneca y la fuente de los mismos.

**Tabla 1.** Bases de datos usadas para la ejecución de SWAT.

<b>Tipo de Dato</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente</b>
<i>Modelo Digital del Terreno (DEM/MDT)</i>	Satélite ALOS con una resolución espacial de 12,5m.	Plataforma EARTHDATA
<i>Mapa de Suelos</i>	Mapa basado en el esquema de ordenamiento territorial de Samacá.	Alcaldía de Samacá
<i>Red de Ríos</i>	Fichero Shape que representa la red fluvial de la región.	Corpoboyacá
<i>Mapa de Municipios</i>	Mapa que identifica las áreas urbanas y rurales.	Agustín Codazzi
<i>Mapa de Cuencas</i>	Representación de las cuencas hidrográficas de la región.	Corpoboyacá
<i>Datos Climáticos</i>	Variables como precipitación, temperatura, humedad relativa y radiación solar.	IDEAM, NASA POWER   Data Access Viewer

### 3.2.1 TABLAS DE BÚSQUEDA "LOOKUP-TABLES"

Las tablas de búsqueda, conocidas como "*Lookup-Tables*", son esenciales para la modelización en SWAT. Estas tablas vinculan la información de cada sitio de estudio con respecto a los datos almacenados en la base de datos de SWAT. Estas a su vez permiten organizar y almacenan parámetros específicos que el modelo utiliza para realizar sus cálculos. Las tablas generadas automáticamente para desarrollar la modelización son esenciales para que SWAT lea cada uno de los parámetros que utilizan las rutinas y subrutinas en el cálculo del modelo hidrológico. Estas tablas incluyen ficheros de configuración de la cuenca, datos asociados a la cobertura y uso suelos, generador de datos climáticos, datos generales de las unidades de respuesta hidrológica - HRUs, parámetros hidrofísicos y químicos del suelo, entre otros. Es importante destacar que la correcta configuración y alimentación de estas tablas es crucial para obtener resultados precisos en la modelización. Por lo tanto, se recomienda revisar y validar cada entrada de datos para garantizar la calidad y precisión de la simulación.

Para el caso de la parametrización del modelo SWAT en la cuenca del río Gachaneca se contó con las siguientes fuentes de datos, que han sido incorporadas en las tablas de búsqueda:

### 3.2.2 MAPA DE USOS Y COBERTURA DE LOS SUELOS

El mapa de uso de suelo es una herramienta esencial para la modelización hidrológica, ya que proporciona información detallada de las características superficiales del terreno. A partir de estas, en el modelo es posible evaluar cómo estas pueden influir en la dinámica hídrica de la cuenca. Para nuestro estudio, se utilizó el mapa de uso y cobertura del suelo proporcionado por el Esquema de Ordenamiento Territorial de Samacá.

El mapa fue desarrollado con el propósito de guiar la ocupación del territorio municipal, clasifica el suelo en diferentes categorías, tales como suelo urbano, suelo rural y suelo de protección ecosistema. Estas categorías son esenciales para determinar las zonas de intervención humana, las áreas de conservación y las regiones de desarrollo agrícola o industrial. Además, el Esquema de Ordenamiento Territorial de Samacá destaca la importancia de las áreas de reserva para la conservación y protección del medio ambiente y los recursos naturales, identificando la Estructura Ecológica Principal. Esta estructura es crucial para nuestro estudio, ya que las zonas de conservación, como el Páramo de Rabanal, juegan un papel vital en la regulación hídrica natural de la cuenca.

El mapa de uso y cobertura del suelo inicial estaba en formato CAD y posteriormente adaptado a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su integración en SWAT en formato ráster. La correcta clasificación y codificación de las diferentes categorías de uso de suelo en las tablas de búsqueda garantiza que el modelo pueda interpretar y procesar adecuadamente la información, resultando en simulaciones más precisas y representativas de la realidad del terreno. Las asignaciones y



correspondencias se basaron en estudios previos con SWAT resultado de las modelizaciones de referencia de la revisión bibliográfica, (ver sección 1 Introducción, estudios previos). Además, de las recomendaciones de la experiencia con el modelo SWAT del director de tesis en diversos casos al rededor del mundo. Los códigos del modelo SWAT y las características fisiológicas se pueden consultar en detalle en el apéndice A de lo documentación de SWAT <https://swat.tamu.edu/media/69419/Appendix-A.pdf>.

**Tabla 2.** Tabla de búsqueda que vincula las coberturas y usos del suelo del mapa proporcionado por el Esquema de ordenamiento territorial de Samacá con los códigos de usos y cobertura de suelo del modelo SWAT.

<i>Etiqueta</i>	<b>Código (SWAT)</b>	Nomenclatura empleado en la cartografía del <i>Esquema de Ordenamiento Territorial de Samacá</i>
1	<i>Agricultural Land-Generic</i> AGRL	AREA AGROPECUARIA
2	<i>Southwestern US (Arid) Range</i> SWRN	AREA DE ESCOMBRERA
3	<i>Forest-Mixed</i> FRST	AREA FORESTAL PRODUCTORA
4	<i>Wetlands-Forested</i> WETF	ZONAS DE RONDA Y CONSERVACION DE CAUCES
5	<i>Residential-Low Density</i> URLD	AREA INDUSTRIAL SOSTENIBLE
6	<i>Range-Grasses</i> RNGE	AREAS DE RECUPERACION, REHABILITACION Y RESTAURACION MORFOLOGICA
7	<i>Forest-Evergreen</i> FRSE	AREAS DE BOSQUE PROTECTOR
8	<i>Residential</i> URBN	SUELO URBANO
9	<i>Transportation</i> UTRN	CORREDORES VIALES
11	<i>Hay</i> HAY	PARAMO
12	<i>Industrial</i> UIDU	AREA MINERO INDUSTRIAL

### 3.2.3 CLIMA

La descripción climática de una región es un componente esencial en la modelización hidrológica, ya que el clima tiene un papel directo en los procesos hidrológicos, tales como la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía. En el modelo SWAT, los datos climáticos de entrada son necesarios para simular estos procesos y predecir la respuesta hidrológica de la cuenca (SWAT - Climate Maps - Purdue University, 2005; Conceptos básicos y guía rápida para el usuario - SWAT model, 2005.)

La cuenca del río Gachaneca se caracteriza por su variabilidad climática. Esta variabilidad se debe a la compleja topografía de la región, que incluye valles, laderas y altas montañas, así como al Páramo de Rabanal, un ecosistema de alta montaña que juega un papel crucial en la regulación del ciclo del agua.

La región experimenta una estación de lluvias marcadas que generalmente se extiende desde el mes de abril y decrece hacia el mes de noviembre, y una estación seca de diciembre a marzo. Sin embargo, la distribución de la precipitación puede variar considerablemente de un año a otro y de un lugar a otro dentro de la cuenca, debido a la influencia de fenómenos climáticos a gran escala como El Niño y La Niña (Alcaldía de Samacá, 2015).

## 3.3 MODELO SWAT Y ENTORNO DE TRABAJO

Para el desarrollo del modelo se empleó el entorno ArcSWAT, que es una extensión e interfaz de ArcGIS-ArcView para SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*), disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/>. Esta herramienta está diseñada para integrarse con el sistema de información geográfica ArcGIS, permitiendo a los usuarios aprovechar todas las capacidades y funciones del SIG para la modelización hidrológica.

Para el estudio de la cuenca del río Gachaneca en Samacá, Boyacá, se utilizó la versión de ArcSWAT 2012.10.5.24, que es compatible con ArcGIS 10.5. Esta versión específica de ArcSWAT ha sido desarrollada y optimizada para funcionar con ArcGIS 10.5, garantizando una integración fluida y una operatividad eficiente.

Es importante mencionar que, aunque ArcSWAT es una herramienta ampliamente utilizada en la comunidad científica y de modelización, existen otras alternativas en el mundo de los SIG libres. Por ejemplo, QGIS ofrece una interfaz llamada QSWAT que, aunque fue introducida más recientemente (en 2015), proporciona funcionalidades similares para la modelización con SWAT. Ya que las diferencias no son significativas en términos de cálculo y que el ejecutable del modelo SWAT para ArcSWAT y QSWAT es el mismo se decidió trabajar con la extensión de SWAT en ArcGIS.

### 3.4 PARÁMETROS PRELIMINARES

La modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca requiere la definición de parámetros preliminares que describan las características físicas, hidrológicas y climáticas lo más próximas a la realidad. Estos parámetros son esenciales para la correcta simulación de los flujos de agua y los procesos asociados en la cuenca. La cuenca del río Gachaneca, con su complejidad topográfica y ecológica, presenta variaciones significativas en sus parámetros hidrológicos. La presencia del Páramo de Rabanal, los embalses Gachaneca I y Gachaneca II, y la diversidad de cultivos en la región, hacen que la definición de estos parámetros sea crucial para una modelización más precisa.

A continuación, se presenta una tabla con los parámetros preliminares que fueron considerados en el modelo SWAT para la cuenca del río Gachaneca:

Tabla 3. Parámetros generales para SWAT en la evaluación de la cuenca del río Gachaneca, Samacá, Boyacá, Colombia.

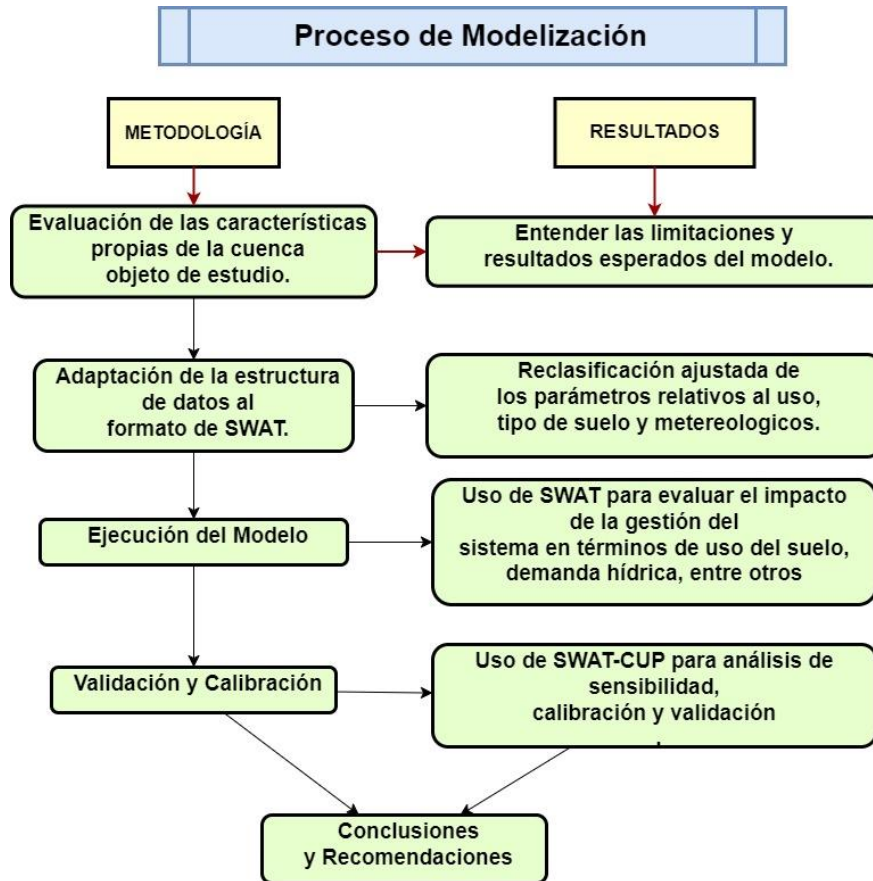
Parámetro	Valor
<b>Área aferente de la cuenca</b>	11769.60 ha
<b>Longitud de la red fluvial principal</b>	19.57 km
<b>Subcuencas</b>	25
<b>Tipos de Suelos (SWAT)</b>	<i>Agricultural Land-Generic</i> --> AGRL 6302.4406 Ha 53.55% <i>Forest-Evergreen</i> --> FRSE 109.6913 Ha 0.93% <i>Forest-Mixed</i> --> FRST 226.4232 Ha 1.92% <i>Hay</i> --> HAY 1294.3765 Ha 11.00% <i>Range-Grasses</i> --> RNGE 18.7121 Ha 0.16% <i>Southwestern US (Arid) Range</i> --> SWRN 1801.7165 Ha 15.31% <i>Industrial</i> --> UIDU 13.4239 Ha 0.11% <i>Residential</i> --> URBN 1.8775 Ha 0.02% <i>Residential-Low Density</i> --> URLD 284.2181 Ha 2.41% <i>Transportation</i> --> UTRN 1713.8665 Ha 14.56% <i>Wetlands-Forested</i> --> WETF 2.8631 Ha 0.02%
<b>Embalses</b>	Gachaneca I y Gachaneca II

<b>Pendientes</b>	Rangos (%)	Área (Ha)	Área (%)
	0-5	2023,54	17.19
	5-20	3937,04	33.45
	20-35	3258,78	27.69
	35-50	1784,04	15.16
	50-9999	766,21	6.51
<b>Periodo de simulación</b>	Total: de 01/01/2000 a 31/03/2015 Calentamiento "warm-up": de (01/01/2000 a 31/12/2001) Calibración: de (01/01/2002 a 31/12/2008) Validación: de (01/01/2009 a 31/03/2015)		
<b>Escala Temporal (<i>time step</i>)</b>	Diaria		

#### 4. METODOLOGÍA DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN (DIAGRAMA DE FLUJO)

##### 4.1 ESTRUCTURA DE DATOS Y CONFIGURACIÓN

Para llevar a cabo la simulación, se elaboró un diagrama de flujo que permitió ejecutar la simulación completa (2000 a 2015). En este proceso, se identificaron y configuraron los parámetros de la simulación, definiendo la estructura de datos y adaptándose al formato de SWAT. Se realizó una reclasificación ajustada de los parámetros relativos al uso y tipo de suelo para obtener un modelo consistente. SWAT permite realizar una evaluación del impacto de la gestión del sistema de explotación en términos del uso del suelo, la demanda hídrica, entre otros aspectos relevantes para la gestión de recursos hídricos. La Figura 7, muestra el flujo de trabajo que se siguió para el proceso de modelización con SWAT. En esta se muestra en el costado derecho los pasos metodológicos y en el costado izquierdo los resultados obtenidos una vez completada cada una de las etapas metodológicas.



**Figura 7.** Diagrama de flujo para la modelización con la herramienta *Soil Water and Assessment Tool- SWAT*.

#### 4.1.1 DELIMITACIÓN AUTOMÁTICA

La delimitación automática de la cuenca del río Gachaneca se llevó a cabo utilizando un modelo de elevación digital, por sus siglas en inglés *Digital Elevation model- DEM*. Este modelo proporciona una representación tridimensional de la superficie terrestre, permitiendo identificar las características topográficas y geomorfológicas de la cuenca en estudio.

Para este estudio, se utilizó un DEM con coordenadas planas *Magna\_Traverse\_Mercator*. Esta proyección es ampliamente utilizada en proyectos en Colombia debido a su precisión y adaptabilidad al territorio colombiano, permitiendo una representación más precisa de las áreas de estudio.

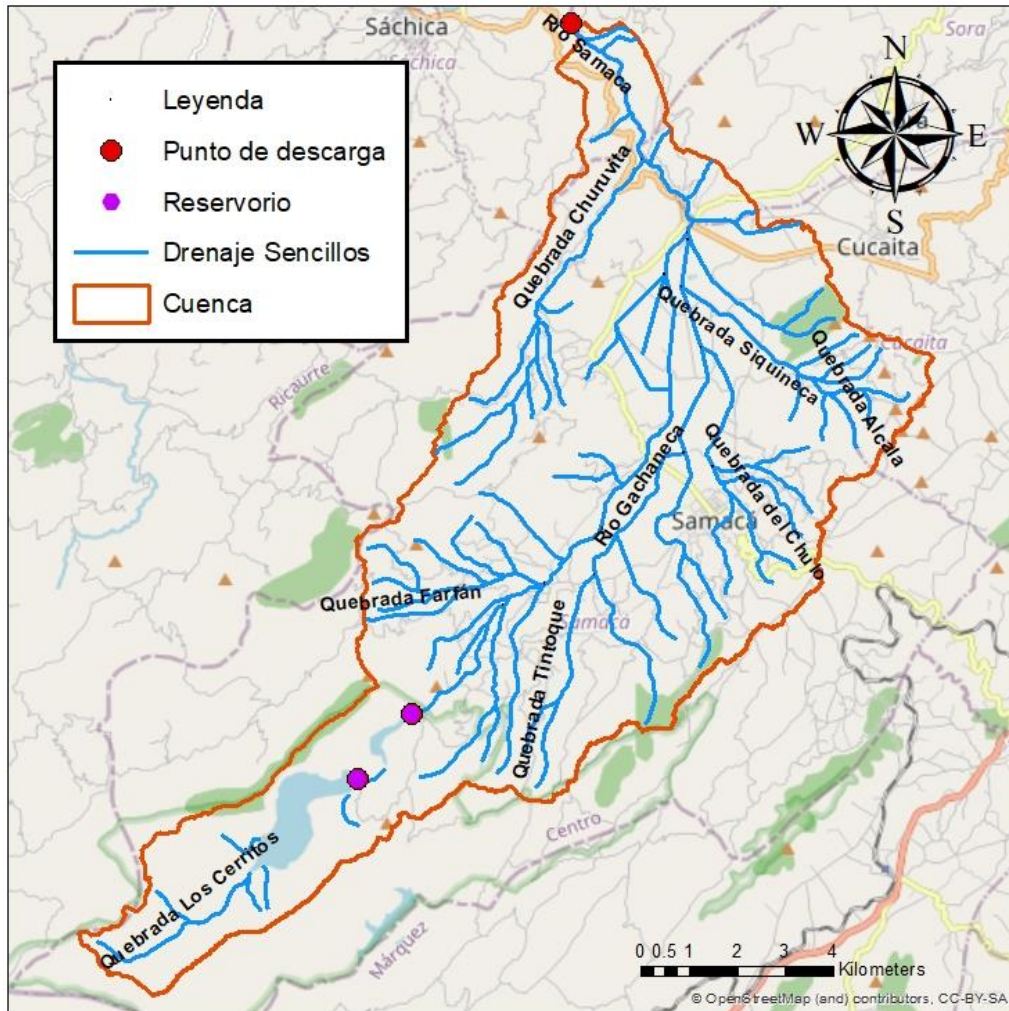
La definición de los ríos y drenajes en la cuenca, Figura 9, se ajustó utilizando un shapefile proporcionado por la Corporación Autónoma Regional *Corpoboyacá*, en colaboración con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Este shapefile contiene información detallada sobre ríos y drenajes sencillos en la región, lo que facilita la identificación y delimitación de las principales arterias hídricas en el modelo.

Para determinar los puntos de red de carga y descarga de ríos, se consideraron las quebradas más representativas de la región. Estas quebradas, que no son de tipo intermitente, juegan un papel crucial en la hidrología de la cuenca y son esenciales para la ejecución precisa de la representación de la cuenca del río Gachaneca con el modelo SWAT. A lo largo del curso del río Gachaneca, se determinaron puntos de intersección con las quebradas principales que conectan con el río, sirviendo estos puntos como referencias para definir las demás subcuencas.

Como última etapa de la delimitación de la cuenca, el punto de descarga del modelo se definió en base a la estación de medición de caudales ubicada en la parte baja de la cuenca. Esta estación, es gestionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), proporciona



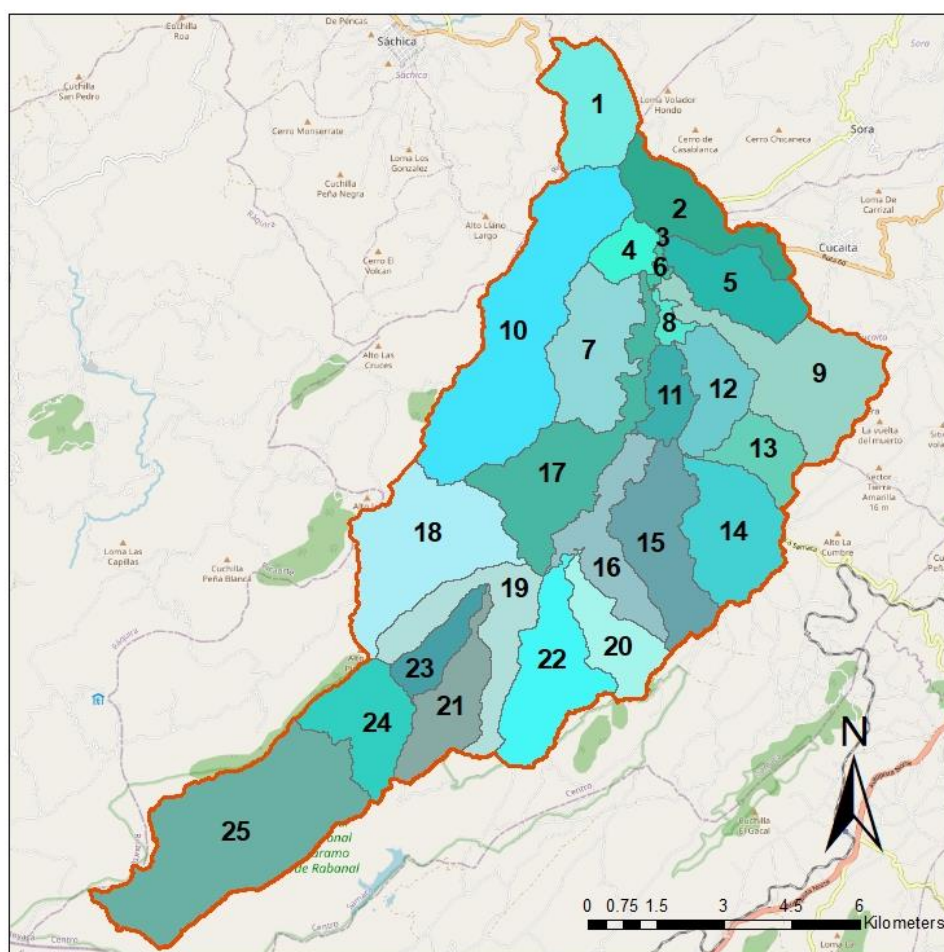
datos valiosos sobre los caudales y flujos de agua en la cuenca, asegurando que el modelo refleje con precisión las condiciones reales del río Gachaneca. El umbral utilizado para la delimitación general de la cuenca fue el valor generado por SWAT por defecto derivado del DEM. La red hídrica generada por el modelo fue verificada con respecto a la red de quebradas antes mencionada con una coincidencia muy similar a excepción de algunas curvas o rectificaciones hidráulicas de algunos tramos, con una longitud diferencial inferior a 2km.



**Figura 8.** Cuenca de estudio, reservorios y punto de descarga.

#### 4.1.2 DEFINICIÓN DE HRUS

La definición precisa de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) es un paso crucial en la modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca. Puesto que SWAT es un modelo semidistribuido en el que la unidad mínima de cálculo es el HRU. La definición de los HRUs implicó una subdivisión detallada de la cuenca en 25 subcuencas, identificando dos subcuencas principales en la parte alta que corresponden a los embalses Gachaneca I (subcuenca 25) y Gachaneca II (subcuenca 24), ver Figura 9.



**Figura 9.** Subcuencas modelizadas con el modelo SWAT de la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

La dinámica hidrológica resultante de cada HRU facilita la comprensión de las relaciones entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, permitiendo establecer la dirección, intermitencia y cuantificación de los flujos que describen el comportamiento del balance de masas del modelo. Estas unidades se generan integrando diversos factores como el tipo de suelo, la topografía y el uso del suelo, creando así una representación detallada y dinámica de la cuenca.

Una de las contribuciones más significativas en nuestro estudio, fue la mejora en la definición de los HRUs, integrando información detallada sobre la rotación agrícola del distrito de riego ASUSA. La estrategia que se siguió fue la siguiente: En un principio se definió un uso agrícola genérico, empleando el código de SWAT, AGRL. Una vez configurado el modelo en una fase inicial de configuración, se empleó la herramienta “land use update . lup” en la que se variaron los porcentajes de área y los tipos de cultivos presentes en cada subcuenca integrándolos en los HRUs finales de uso agrícola como se muestra en la Tabla 6. Para lograrlo era necesario incluir en el set-up inicial un porcentaje mínimo de cada uno de los cultivos para que estos fueran editables en la edición de bases de datos. Una vez disponibles para edición se editaron según los porcentajes de cada uno de los cultivos según la rotación de la Tabla 4.

**Tabla 4.** Ejemplo de rotación de cultivos para el año 1 (2002) y el año (2003), mostrando los porcentajes globales de variación en la zona agrícola del distrito ASUSA, Boyacá, Colombia.

2002														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	10.09	23.08	4.48	16.14	0.43	6.89	6.87	7.04	9.59	0.00	3.37	8.09	2.53	1.40
Feb	5.30	18.45	9.99	17.67	0.22	7.52	5.57	2.63	8.33	0.57	9.15	7.14	3.88	3.59
Mar	7.13	13.05	1.86	19.32	9.64	5.92	2.30	0.34	0.85	9.26	4.55	10.75	4.16	10.88
Abr	1.87	19.50	8.31	16.94	3.41	7.91	4.57	8.02	6.98	7.30	6.00	1.95	1.52	5.71
May	4.54	19.73	4.42	13.64	9.05	3.44	2.90	10.59	8.22	4.31	3.40	6.63	1.59	7.54
Jun	6.60	18.23	2.69	20.98	5.29	7.73	3.03	4.46	3.37	7.81	7.02	1.11	2.34	9.34
Jul	4.88	17.87	3.48	17.86	6.21	4.96	1.43	10.56	3.23	0.41	8.40	7.52	2.49	10.71
Ago	5.65	14.29	1.88	16.56	5.45	1.86	12.08	9.82	1.94	6.37	4.98	11.29	5.52	2.32
Sep	4.43	13.70	5.12	17.77	2.44	10.94	8.42	5.38	8.40	4.22	1.78	9.02	7.39	1.00
Oct	2.73	15.70	11.17	15.40	2.46	2.06	7.37	11.75	0.91	8.10	0.93	4.12	10.46	6.86
Nov	7.59	14.93	7.78	21.06	8.57	2.91	7.78	3.32	4.01	2.62	6.17	3.32	2.62	7.33
Dic	6.55	18.84	3.80	13.28	0.00	9.65	5.06	8.93	8.00	3.94	8.54	9.53	1.28	2.60

2003														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	3.48	15.51	3.44	15.85	5.76	4.75	7.08	4.05	7.35	2.09	12.74	6.74	8.70	2.47
Feb	4.60	16.79	10.33	14.95	8.42	7.99	3.73	2.01	1.83	9.37	6.08	5.66	4.58	3.67
Mar	7.55	15.20	9.28	19.81	8.83	8.74	8.08	0.12	1.58	8.76	0.45	1.86	0.03	9.73
Abr	10.30	20.48	2.70	15.33	1.43	0.58	3.47	1.35	2.50	9.10	7.43	9.09	8.68	7.56
May	2.90	20.93	7.78	14.39	3.88	8.88	10.36	0.58	2.64	9.02	3.73	4.77	2.86	7.28
Jun	4.94	16.92	6.82	22.13	3.95	1.17	7.39	6.75	7.77	2.03	7.21	2.65	5.25	5.02
Jul	4.83	16.22	7.44	19.39	0.08	8.11	7.76	6.96	4.21	2.89	3.09	4.30	8.73	5.98
Ago	4.60	18.24	3.57	15.41	6.64	7.79	6.46	7.98	6.03	5.61	3.20	8.78	1.16	4.54
Sep	4.84	20.28	8.48	14.57	6.73	5.09	9.44	2.28	8.15	1.64	3.48	7.71	2.54	4.76
Oct	9.77	18.24	1.85	13.34	6.30	8.74	1.34	3.78	8.59	9.30	5.46	4.25	5.10	3.96
Nov	7.16	14.50	7.54	17.12	5.73	6.35	8.64	7.50	6.67	5.42	3.71	3.76	0.25	5.66
Dic	6.24	18.02	4.05	16.29	2.32	6.83	0.00	4.21	8.05	9.79	10.47	2.86	0.45	10.44

La definición de los HRUs totales de la fase inicial de configuración fueron los que se muestran en la siguiente tabla, Tabla 5.

**Tabla 5.** Configuración inicial del modelo SWAT en relación a la definición de las unidades de respuesta hidrológica HRUs totales en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia; con el modelo SWAT.

Parámetro	Valor
Numero de HRUs Subcuencas simuladas	# total de HRUs: 6729 Subcuencas simuladas: 25

**Tipos de Uso de suelo SWAT  
agrupados como HRUs**

	Área (Ha)	%Área
<i>Spring Barley</i> --> BARL	3.15	0.03
<i>Corn</i> --> CORN	575.41	4.89
<i>Carrot</i> --> CRRT	5.67	0.05
<i>Forest-Evergreen</i> --> FRSE	109.69	0.93
<i>Head Lettuce</i> --> LETT	86.34	0.73
<i>Mung Beans</i> --> MUNG	121.01	1.03
<i>Oats</i> --> OATS	3.15	0.03
<i>Onion</i> --> ONIO	1216.37	10.33
<i>Orchard</i> --> ORCD	34.66	0.29
<i>Pasture</i> --> PAST	1092.84	9.29
<i>Garden or Canning Peas</i> --> PEAS	804.82	6.84
<i>Potato</i> --> POTA	2128.33	18.08
<i>Sugarbeet</i> --> SGBT	158.19	1.34
<i>Spring Wheat</i> --> SWHT	3.15	0.03
<i>Southwestern US (Arid) Range</i> --> SWRN	1801.71	15.31
<i>Tomato</i> --> TOMA	69.33	0.59
<i>Residential-Low Density</i> --> URLD	284.22	2.41
<i>Forest-Mixed</i> --> FRST	226.42	1.92
<i>Hay</i> --> HAY	1294.37	11
<i>Range-Grasses</i> --> RNGE	18.71	0.16
<i>Industrial</i> --> UIDU	13.42	0.11
<i>Residential</i> --> URBN	1.88	0.02
<i>Wetlands-Forested</i> --> WETF	2.86	0.02
<i>Transportation</i> --> UTRN	1713.87	14.56

Esto no solo permitió una representación más precisa del uso actual del suelo, sino que también facilitó la creación de un modelo dinámico que refleja los cambios en los porcentajes de áreas y tipos de cultivos a lo largo de un período de 15 años, (ver detalle de rotaciones anuales en el Anexo 4). Así pues, el modelo evaluado presenta dinámica en el uso de suelo agrícola anualmente. Una mejora considerable respecto a modelos con un único mapa de uso y cobertura de suelo.

Esta aproximación dinámica permite simular los posibles cambios en la cuenca a lo largo del tiempo, ofreciendo una herramienta valiosa para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos en la región. La integración de estos detalles en el modelo SWAT proporciona una base sólida para analizar y prever las respuestas hidrológicas de la cuenca ante diferentes escenarios de uso del suelo y cambio climático, contribuyendo significativamente a los esfuerzos de conservación y manejo sostenible de la cuenca del río Gachaneca.

#### 4.1.3 DATOS DE CLIMA

La precisión y confiabilidad de cualquier modelo hidrológico dependen en gran medida de la calidad y precisión de los datos climáticos utilizados. En el caso de la cuenca del río Gachaneca, se enfrentó el desafío de tener una cantidad limitada de estaciones meteorológicas disponibles. Para superar este desafío y mejorar la resolución espacial de los datos climáticos, se recurrió a técnicas avanzadas de interpolación.

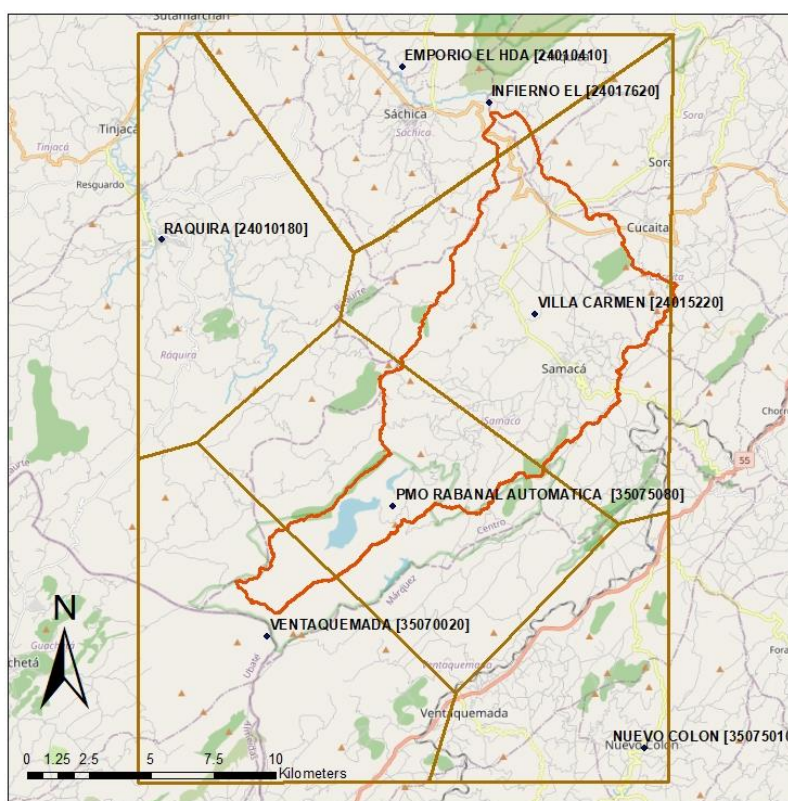
Para la modelización con SWAT, se requieren datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa siempre y cuando se desee desarrollar un modelo a escala diaria. La agregación mensual y anual también es posible en SWAT, pero para el presente trabajo se empleó la escala temporal diaria. Estos datos son necesarios para simular los procesos de balance de energía y agua en la superficie del suelo y en la atmósfera, que a su vez



afectan la escorrentía superficial, la infiltración, la evapotranspiración y otros subprocesos hidrológicos.

Para el presente estudio, los datos climáticos fueron obtenidos de seis estaciones meteorológicas activas administradas por el IDEAM de Colombia, Anexo 1. Tres de estas estaciones están ubicadas dentro de la cuenca para capturar la variabilidad espacial del clima en lugares de fácil acceso pero que capturan una buena representación de las características orográficas de la cuenca. Se usaron otras tres estaciones para ajustar las características limítrofes de la cuenca. Para ello se emplearon los polígonos de Thiessen y las subcuencas del modelo para transferir proporcionalmente los ingresos de agua a cada una de las subcuencas de acuerdo a los pesos aportados por cada uno de los polígonos de Thiessen, para profundizar en esta metodología referirse al estudio de Rivas-Tabares, et al, 2019.. Los datos de estas estaciones fueron verificados a escala mensual y anual antes de ser utilizados en el modelo.

A partir de las 6 estaciones meteorológicas se generaron 14 estaciones meteorológicas virtuales asociadas en puntos específicos, tal y como lo hace el modelo SWAT para los cálculos con datos de entrada climática. Los estadísticos necesarios para complementar la base de datos de SWAT se desarrollaron con la herramienta “WGN Excel macro” disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/>.



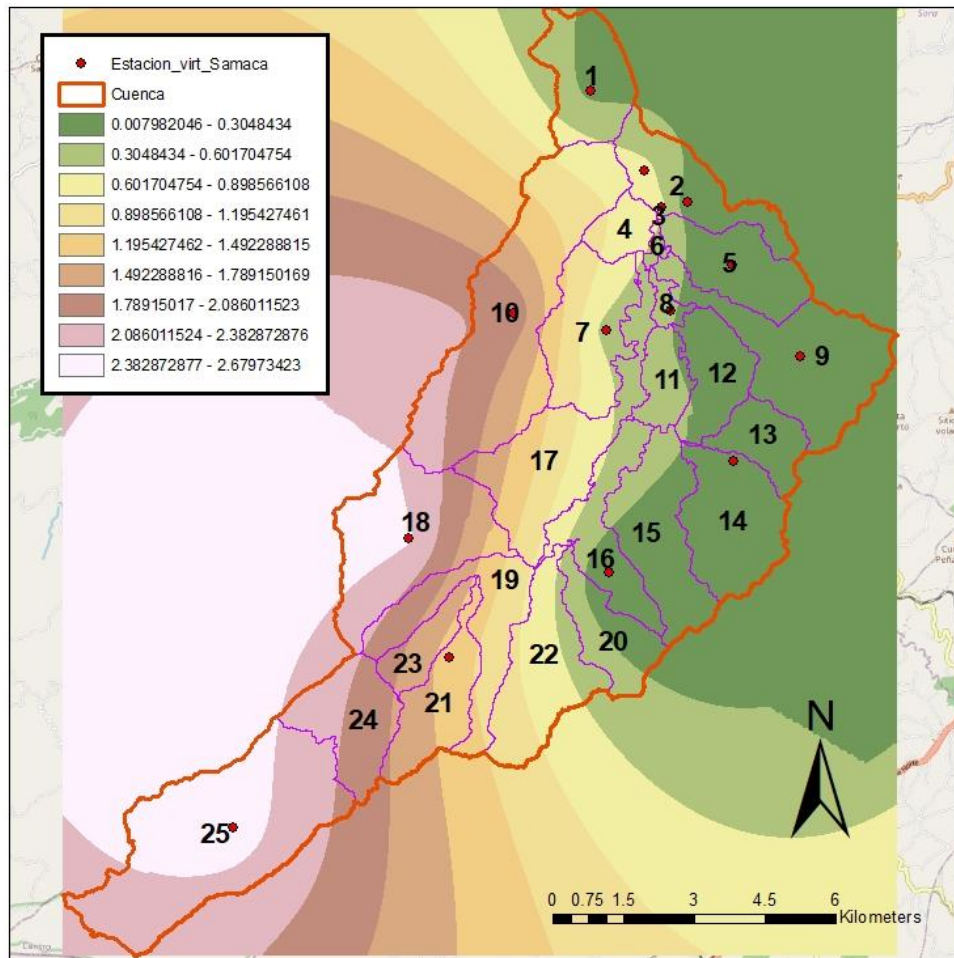
**Figura 10.** Estaciones Climáticas (6) empleadas para el ajuste de entrada de agua al sistema empleando el método de polígonos de Thiessen (6). Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

#### Interpolación mediante Kriging en *R Studio*:

El método de interpolación Kriging es una técnica estadística que permite estimar valores de una variable en ubicaciones no muestreadas a partir de observaciones en ubicaciones conocidas. Este método es especialmente útil cuando se trata de variables espaciales, como los datos climáticos, ya que considera la correlación espacial entre las observaciones.

Para nuestro estudio, se utilizó R Studio, una herramienta poderosa para el análisis estadístico y la programación. A partir de las tres estaciones meteorológicas disponibles, se aplicó el método de Kriging para generar las nuevas estaciones virtuales, Ver Figura 10. En esta figura se presenta un ejemplo de un Kriging para el día 20/01/2000. Estas estaciones virtuales proporcionan una

representación más precisa de las variaciones climáticas en toda la cuenca al definir gradientes proporcionales para cada una de las subcuencas. Esto quiere decir que no todas las subcuencas tienen los mismos datos de entrada climáticos, aspecto que suele suceder si se dejasen las estaciones reales en el modelo. La asignación de los datos climáticos SWAT los hace por cercanía, en distancia euclidiana, al centroide de subcuenca más próximo.



**Figura 11.** Representación gráfica interpolación de la precipitación para el 21/01/2000, a partir de tres estaciones climáticas reales en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

A continuación, se listan algunos de los beneficios más importantes para el modelo SWAT al emplear el Kriging como técnica geoestadística para la asignación proporcional del dato climático, a cada una de las subcuencas definidas por el modelo.

Beneficios logrados para el Modelo:

- ✓ **Resolución Mejorada:** Al tener más puntos de datos distribuidos en toda la cuenca, el modelo puede capturar variaciones locales en el clima, lo que resulta en simulaciones de caudal más precisas.
- ✓ **Representación Espacial:** Las estaciones virtuales permiten una mejor representación de las zonas micro climáticas dentro de la cuenca, lo que es esencial para entender y modelar procesos como la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración.
- ✓ **Validación y Calibración:** Con más estaciones disponibles, se mejora la capacidad de validar y calibrar el modelo, lo que aumenta la confiabilidad de las simulaciones.

- ✓ **Flexibilidad:** La capacidad de generar estaciones virtuales proporciona flexibilidad en el análisis, permitiendo ajustes y refinamientos según sea necesario.

La interpolación mediante Kriging y la generación de estaciones virtuales han enriquecido la base de datos climáticos para nuestro estudio, mejorando significativamente la precisión y confiabilidad del modelo hidrológico para la cuenca del río Gachaneca. Sin embargo, es importante resaltar que no siempre esta técnica puede arrojar resultados positivos en el modelo, esto depende de la densidad de estaciones o datos disponibles, el tamaño de las subcuencas, el tamaño de la cuenca global, la distancia entre estaciones, y la variación topográfica local. Una vez se tienen los Kriging por cada fecha y por cada variable, lo que se hace es utilizar el promedio ponderado del Kriging cruzando los polígonos de Thiessen y las subcuencas. Para ampliar detalles de este procedimiento, se puede consultar en Rivas-Tabares et al, 2019.

#### 4.1.4 GENERACIÓN DE TABLAS (*SWAT Input Tables*)

La generación de tablas es un paso esencial en la modelización hidrológica con SWAT, ya que estas tablas contienen información detallada sobre diversos parámetros que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca. Estos parámetros se obtienen a partir de la configuración inicial y son esenciales para la posterior validación, calibración y ajuste del modelo.

Para nuestro estudio, que abarca el período de 2000 a 2015. El periodo de calentamiento se consideró de 2 años, el 2000 y 2001. Esta decisión se tomó para garantizar que el modelo estuviera bien adaptado a las condiciones iniciales de la cuenca antes de comenzar las simulaciones para el período de estudio principal. Sin embargo, se espera que los volúmenes de embalse puedan verse afectados en la simulación para los primeros años.

Las tablas generadas contienen información sobre:

- ✓ **Parámetros Climáticos:** Estos incluyen datos sobre precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación solar, entre otros. Estos datos son esenciales para entender cómo varían las condiciones climáticas a lo largo del tiempo y cómo estas variaciones afectan el comportamiento hidrológico de la cuenca.
- ✓ **Parámetros de Suelo:** Estos parámetros describen las características físicas y químicas del suelo, como la textura, capacidad de campo, punto de marchitez, profundidad, entre otros. Estos datos son cruciales para determinar cómo el agua se mueve a través del suelo y cómo se almacena en diferentes capas del suelo.
- ✓ **Parámetros de Uso del Suelo:** Estos parámetros describen cómo se utiliza la tierra en la cuenca, ya sea para agricultura, forestación, urbanización, entre otros. El uso del suelo puede influir significativamente en la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración.
- ✓ **Parámetros Hidrológicos:** Estos parámetros describen el comportamiento del agua en la cuenca, incluyendo la escorrentía superficial, el flujo subterráneo, la evapotranspiración, entre otros.

Las tablas generadas se adaptaron para reflejar las condiciones específicas de la cuenca del río Gachaneca. Estas tablas se utilizaron en etapas posteriores del estudio para la validación y calibración del modelo.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente apartado se dedica a la presentación y discusión de los resultados obtenidos a través de la modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca utilizando el modelo SWAT. Este proceso

implicó una serie de etapas meticulosamente ejecutadas, cada una contribuyendo a construir una representación detallada y precisa de la cuenca y sus dinámicas hidrológicas.

A lo largo de este apartado, se describirán los resultados obtenidos en cada una de las fases del proceso de modelización, desde la delimitación de la cuenca hasta la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Posteriormente, se presentarán los resultados de dos tipos de modelización: i) incorpora una representación dinámica de los cultivos y ii) utiliza un tipo genérico de suelo agrícola uniforme para todos los años.

El foco principal de la discusión se centra en la modelización que integra rotación de los cultivos, es decir de usos de suelo dinámicos, proporcionando una visión más realista y detallada de las interacciones entre los usos del suelo y los recursos hídricos en la cuenca. A través de este análisis, generamos recomendaciones para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río Gachaneca.

## **Resultados asociados a los datos Introducidos en el Modelo**

### **Clasificación de Pendientes**

A partir de un Modelo Digital de Elevación (MDT) o DEM por sus siglas en inglés, con una resolución de 12,5m x 12,5m, se llevó a cabo una clasificación de las pendientes presentes en la cuenca. Esta clasificación es esencial para comprender la topografía de la región y cómo puede influir en aspectos como la escorrentía, la erosión y la distribución de la vegetación.

Los resultados de la clasificación se presentan en cinco rangos de pendiente, y se detallan a continuación, Figura 13:

Pendientes del 0-5%: Estas áreas, que abarcan 2023.54 ha, representan las zonas más planas de la cuenca, ocupando el 17.19% del área total de la cuenca. Estas regiones suelen ser ideales para actividades agrícolas y asentamientos humanos debido a su topografía suave.

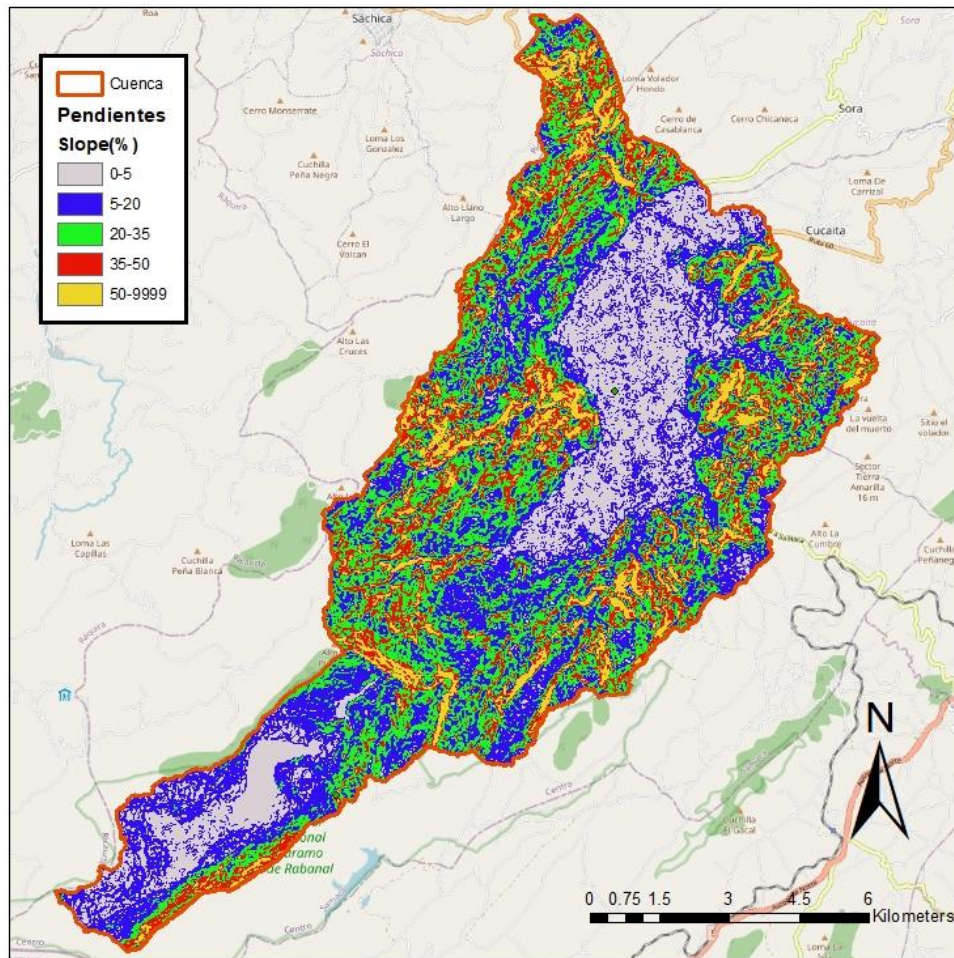
Pendientes del 5-20%: Con 3937.04 ha, estas áreas constituyen el 33.45% del área total de la cuenca. Estas pendientes moderadas son comunes en paisajes ondulados y pueden ser adecuadas para ciertos tipos de cultivos y pastoreo.

Pendientes del 20-35%: Estas zonas, que cubren 3258.78 ha, representan el 27.69% del área total. Las áreas con estas pendientes son más propensas a la erosión, especialmente si la vegetación no las protege adecuadamente.

Pendientes del 35-50%: Estas áreas más empinadas, que abarcan 1784.04 ha, constituyen el 15.16% del área total de la cuenca. Son menos adecuadas para la agricultura y requieren prácticas de manejo específicas para prevenir la erosión.

Pendientes superiores al 50%: Las zonas más empinadas, que cubren 766.21 ha, representan el 6.51% del área total. Estas áreas son las más propensas a la erosión y generalmente no son adecuadas para la agricultura o la construcción.





**Figura 12.** Clasificación de pendientes en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

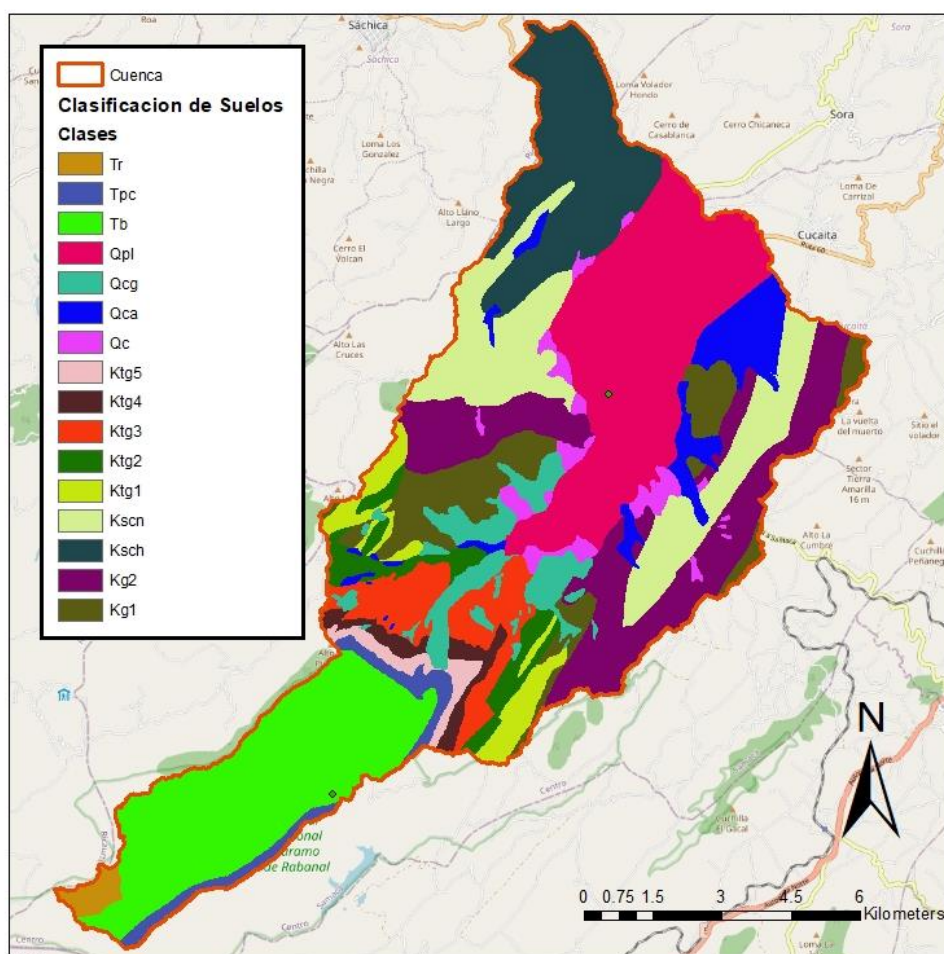
### Clasificación de los Suelos

La clasificación de suelos en la cuenca del río Gachaneca es un elemento fundamental para comprender y modelar adecuadamente los procesos hidrológicos que ocurren en la región. Cada tipo de suelo tiene propiedades únicas que afectan la manera en que el agua se infiltra, se retiene y fluye a través del paisaje.

A partir de los datos proporcionados por el Esquema de Ordenamiento Territorial de Samacá, en el ACUERDO MUNICIPAL No. 008 DE 2015 - EOT, se identificaron múltiples tipos de suelos en la cuenca, desde el Kg1, que abarca el 6.77% del área, hasta el Tr, que representa solo el 0.79%. Estos suelos varían en sus características, y su distribución espacial es esencial para entender las dinámicas de agua en la cuenca. La descripción de los suelos puede consultarse en el Anexo 3.

La representación gráfica de esta clasificación, mostrada en la Figura 14, ofrece una visión clara de la distribución geográfica de estos suelos. Es notable cómo ciertos suelos, como el Qpl, dominan amplias áreas de la cuenca, cubriendo el 17,26% del área total, mientras que otros, como el Tr, se encuentran en regiones más limitadas.

La transformación de estos datos de suelos, originalmente en formato poligonal con una resolución de 1:25.000, a un formato raster de 12,5m x 12,5m, garantiza una integración precisa con el modelo SWAT. Esta resolución permite capturar la variabilidad y heterogeneidad del paisaje, lo que es crucial para modelizar con mayor precisión los procesos hidrológicos.



**Figura 13.** Clasificación taxonómica de los suelos en la cuenca del río Gachaneca, Samacá, Boyacá.

Como resultado de aplicar las tablas de reclasificación de mapa de coberturas y usos del suelo proporcionado por el Esquema de ordenamiento territorial de Samacá con los códigos de usos y cobertura de suelo del modelo SWAT. Se dispone de la siguiente distribución de usos y cobertura del suelo que fue representada en promedio para la modelización del río Gachaneca en Samacá, Boyacá.

**Tabla 6.** Usos de suelo y su correspondencia en el modelo SWAT para la inicialización del modelo del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

<i>Uso de Suelo Original</i>	<b>Categoría SWAT</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (acres)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<i>Agricultura Genérica</i>	AGRL	6302,44	15573,64	53,55
<i>Bosque Siempreverde</i>	FRSE	109,69	271,05	0,93

<i>Bosque Mixto</i>	FRST	226,42	559,50	1,92
<i>Paramo</i>	HAY	1294,38	3198,47	11,00
<i>Pastizales</i>	RNGE	18,71	46,24	0,16
<i>Pastizales Áridos</i>	SWRN	1801,72	4452,13	15,31
<i>Industrial</i>	UIDU	13,42	33,1712	0,11
<i>Residencial</i>	URBN	1,88	4,64	0,02
<i>Residencial Baja Densidad</i>	URLD	284,22	702,32	2,41
<i>Transporte</i>	UTRN	1713,87	4235.05	14.56
<i>Áreas de conservación de causas</i>	WETF	2,86	7,07	0.02

### **Clasificación del Uso del Suelo**

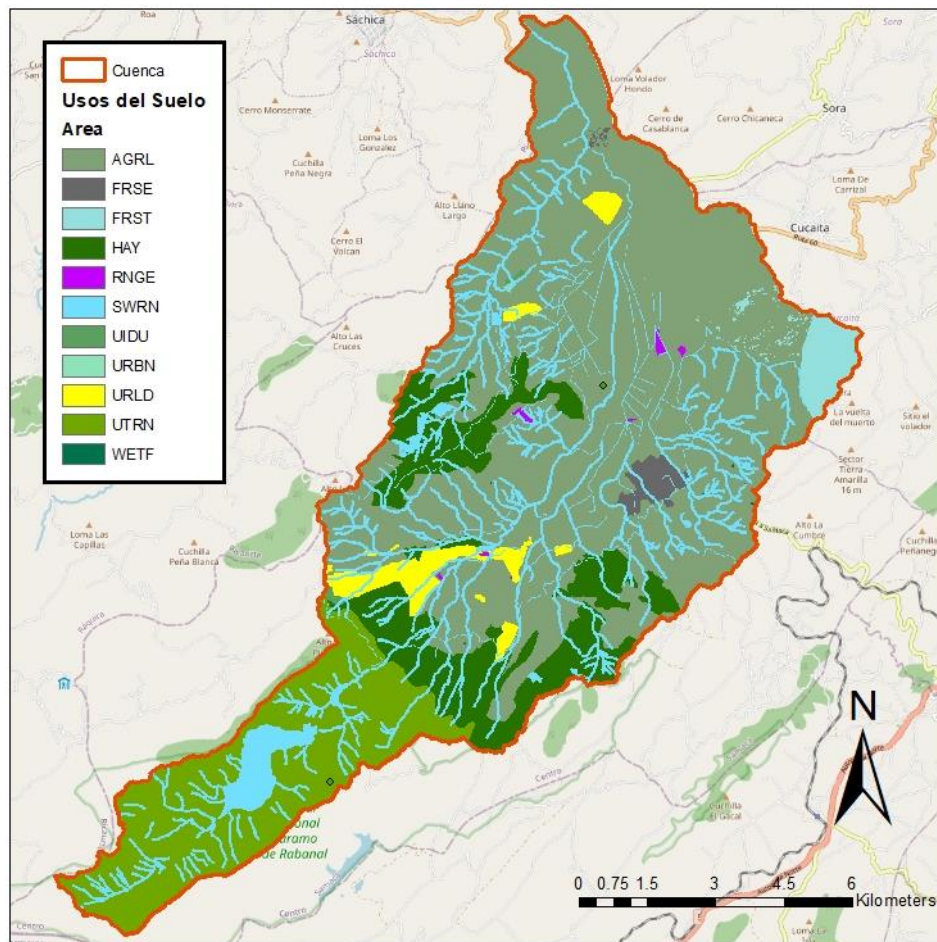
La determinación de los usos del suelo en la cuenca del río Gachaneca es esencial para entender las interacciones entre las actividades humanas, la vegetación y los procesos hidrológicos. Cada uso del suelo tiene un impacto distinto en la dinámica del agua, desde la cantidad de escorrentía generada hasta la tasa de infiltración y evapotranspiración.

A partir de la información proporcionada por el Esquema de Ordenamiento Territorial de SAMACÁ, se identificaron diversos usos del suelo en la cuenca. El uso predominante es el "Agricultural Land-Generico" (AGRL), que abarca el 53.55% del área total de la cuenca. Esto refleja la importancia de la



actividad agrícola en la región y su influencia en la dinámica hídrica. Otros usos significativos incluyen el "Southwestern US (Arid) Range" (SWRN) y "Transportation" (UTRN), que representan el 15.31% y 14.56% del área respectivamente. Los otros usos de suelo son diversos y en menor proporción, ver Tabla 6.

La Figura 14, que muestra la distribución geográfica de estos usos del suelo, es esencial para visualizar cómo se distribuyen estas actividades y vegetación a lo largo de la cuenca. Por ejemplo, áreas densamente pobladas con uso "Residential-Low Density" (URLD) pueden tener un impacto diferente en la escorrentía y la calidad del agua en comparación con áreas dominadas por "Forest-Evergreen" (FRSE). El pastizal del páramo de Rabanal estaría compuesto principalmente por HAY, valores fisiológicos similares a *bermudagrass*.



**Figura 14.** Clasificación de uso de suelos.

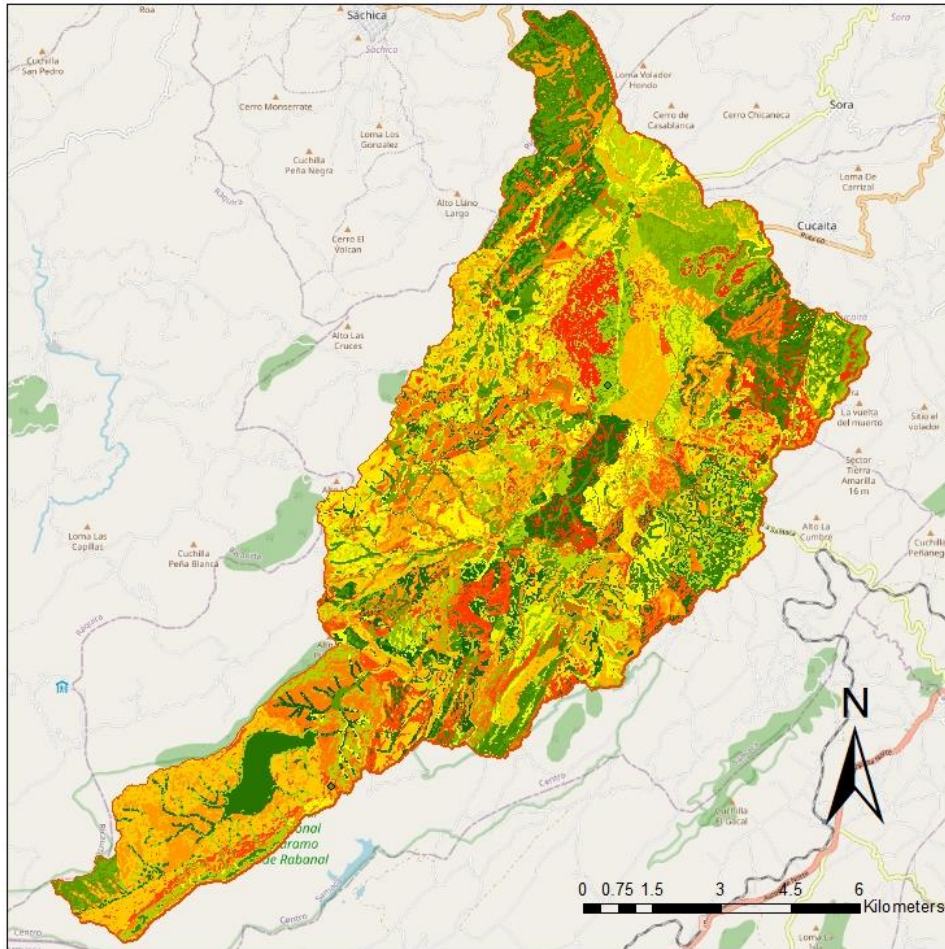
La conversión de estos datos de uso del suelo, originalmente en formato poligonal con una resolución de 1:25.000, a un formato ráster de 12,5m x 12,5m, asegura una representación detallada y precisa en el modelo SWAT. Esta resolución detallada permite capturar la variabilidad en los usos del suelo y su impacto en los procesos hidrológicos.

### Definición de HRUs

En nuestro estudio de la cuenca del río Gachaneca, se generaron un total de 6.729 HRUs. Esta cifra refleja la diversidad y variabilidad del paisaje dentro de la cuenca, y subraya la importancia de considerar esta heterogeneidad en la modelización. Cada HRU representa una combinación única de características del paisaje que tiene un comportamiento hidrológico específico.

Adicionalmente, se crearon 1386 polígonos, que representan áreas geográficas específicas dentro de la cuenca con características homogéneas en términos de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente.

Estos polígonos sirven como base para la generación de HRUs y aseguran que cada área de la cuenca esté adecuadamente representada en el modelo.



**Figura 15.** Distribución de HRUs para la cuenca del Río Gachaneca.

La Figura 15, hace una representación de los casi 7.000 HRUs con una rampa de color rojo, amarillo, verde, ya que su configuración es el resultado de una combinación de suelo, usos de suelo, y pendiente, que es única dentro de las 25 subcuencas. Por lo que esta figura es indicativa de la distribución espacial de los HRUs y no presenta leyenda alguna.

### **Modelización y Balance Hídrico**

Como se ha detallado en las secciones previas, el estudio se ha centrado en la construcción y desarrollo de un modelo hidrológico detallado para la cuenca del río Gachaneca. Este modelo, basado en la herramienta SWAT, ha sido alimentado con una amplia gama de datos de entrada, abarcando aspectos geográficos, climáticos, edafológicos y agronómicos de la región. El propósito principal de esta fase es evaluar la respuesta inicial que SWAT proporciona en términos de diversos parámetros hidrológicos, como evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo de retorno, flujo lateral, flujo capilar y recarga al acuífero.

Además de integrar un modelo dinámico que refleje los cambios temporales en los cultivos y en las prácticas agrícolas para capturar las variaciones y complejidades de la cuenca del río Gachaneca. Paralelamente, se ha evaluado un modelo basado en suelos agrícolas genéricos, una característica estándar de SWAT. Al comparar estos dos enfoques, el dinámico y el basado en suelos agrícolas genéricos, se obtiene una perspectiva valiosa sobre la relevancia e impacto de incorporar detalles específicos y temporales en la modelización hidrológica.

Como se muestra en las figuras 16 (modelo preliminar) y 17 (modelo dinámico), en donde se presentan

la distribución de flujos para el periodo de modelización de 01/01/2000 y 31/03/2015, de la cuenca del río Gachaneca.

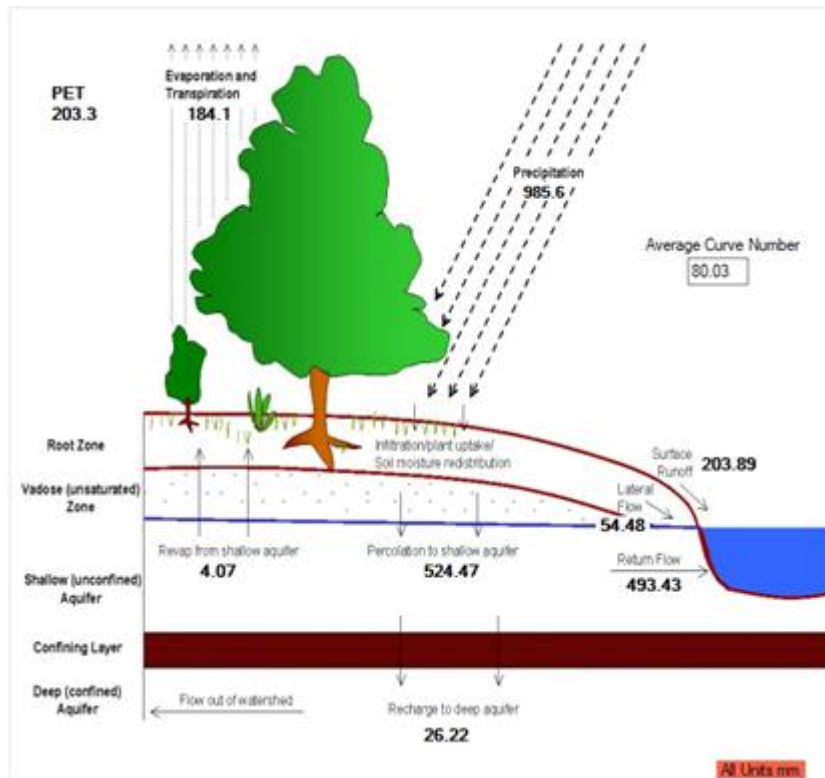


Figura 16. Modelo Hidrológico preliminar para la cuenca del río Gachaneca para el periodo de 01/01/2000 y 31/03/2015.

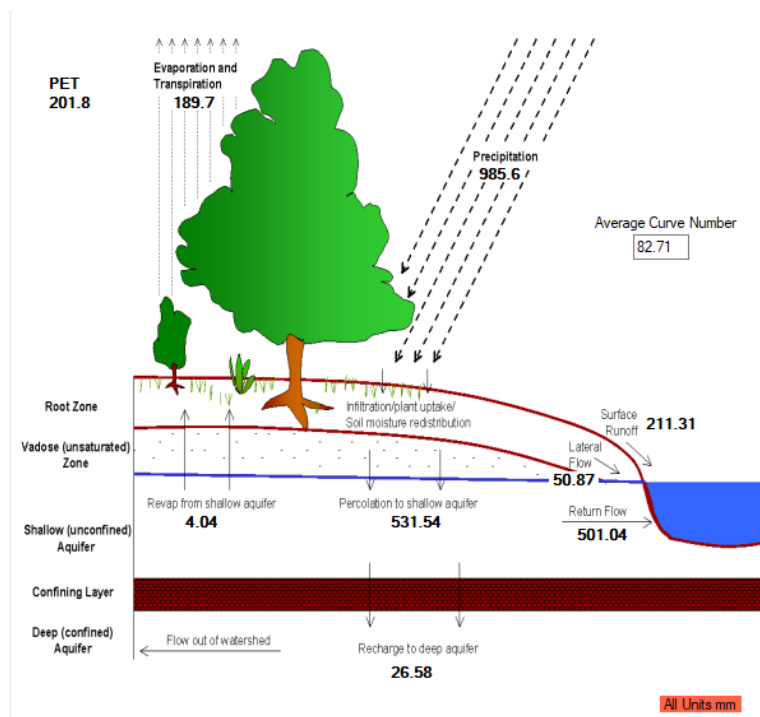


Figura 17. Modelo dinámico Hidrológico preliminar para la cuenca del río Gachaneca para el periodo de 01/01/2000 y 31/03/2015.

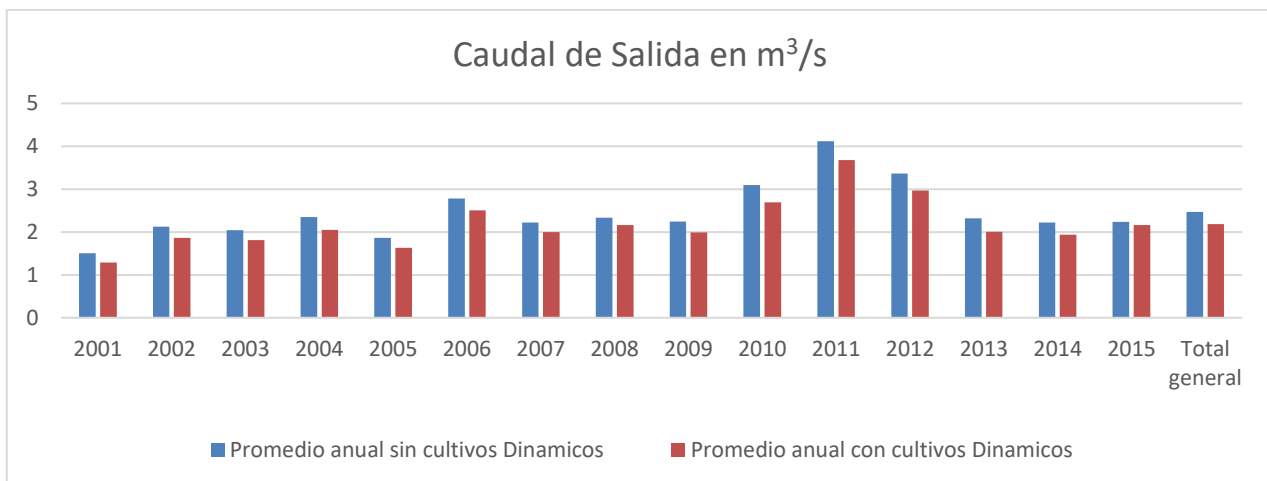


Tras analizar los resultados de la modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca para el periodo comprendido entre el 01/01/2000 y el 31/03/2015, se evidencia que Influencia la integración de un modelo dinámico que refleja los cambios temporales en los cultivos y prácticas agrícolas en la Figura 16 muestra una ligera reducción en la escorrentía superficial y un aumento en el flujo lateral en comparación con el modelo preliminar de SWAT. Esto sugiere que los cambios en los cultivos y prácticas agrícolas influyen en la distribución y movimiento del agua en la cuenca, especialmente en la configuración del caudal en el río principal.

Ambos modelos muestran valores similares en términos de recarga al acuífero profundo y percolación al acuífero superficial. Esto indica que, independientemente del enfoque de modelización, la recarga subterránea en la cuenca del río Gachaneca se mantiene relativamente constante. Esto puede atribuirse a las características de suelo introducidas en los dos modelos. Mayor investigación y datos son necesarios para verificar las recargas al acuífero para lograr estimaciones más precisas.

El número de curva promedio, que es un indicador de la respuesta de escorrentía de una cuenca, es ligeramente inferior en el modelo hidrológico preliminar. Esto podría atribuirse a las diferencias en la representación del uso del suelo y las prácticas agrícolas entre los dos modelos.

La comparación entre los dos modelos resalta la importancia de incorporar un enfoque dinámico en la modelización hidrológica. Aunque las diferencias entre los dos modelos no son drásticas, la integración de cambios temporales en los cultivos y prácticas agrícolas proporciona una representación más realista y detallada del comportamiento hidrológico de la cuenca como lo podemos ver en la siguiente figura en donde podemos ver los caudales de salida de los dos modelos. Si bien en términos absolutos existen diferencias aparentemente sutiles, estas diferencias a escala relativa, es decir, mensual o diaria son significativas. Sin embargo, este análisis, no se muestra en el documento ya que algunas de las diferencias son significativas debido a la operación de los embalses y podrían no reflejar las operaciones diarias reales. Por prudencia en el impacto de esta gestión, se recomienda profundizar y socializar a futuro estas diferencias junto con los actores y autoridades locales.



**Figura 18.** Comparación de caudales de salida modelo preliminar y Dinámico.

Como podemos ver en la Figura 18 se muestra claramente estas diferencias año tras año. En 2001, por ejemplo, el caudal promedio anual de salida en el modelo sin cultivos dinámicos fue aproximadamente un 14.19% mayor en comparación con el modelo que incorpora cultivos dinámicos. Esta tendencia se mantuvo en los años siguientes, aunque con variaciones en la magnitud del porcentaje. Por ejemplo, en 2008, la diferencia fue del 7,44%, que es la menor diferencia observada en el período de estudio, mientras que, en 2013, la diferencia alcanzó su punto máximo con un 13,75% más alto en el modelo sin cultivos dinámicos.

Estas diferencias en los caudales anuales pueden atribuirse a la influencia de la rotación de los cultivos en el ciclo hidrológico. Los cultivos en rotación cambian a lo largo del año en respuesta a las

condiciones climáticas y de suelo, pueden tener una mayor capacidad para retener agua, reducir la escorrentía superficial y promover la infiltración en comparación con los cultivos con representación estática. Esta modulación del flujo de agua puede resultar en caudales de salida más bajos en el modelo con cultivos dinámicos, ya que el uso consuntivo puede aumentar.

El año 2015 destaca particularmente, ya que la diferencia se redujo drásticamente a solo un 3.31%. Esto podría indicar un cambio en las condiciones climáticas, prácticas agrícolas o cualquier otro factor que haya influido en la dinámica del agua en ese año específico. La razón se debe a que la configuración de los cultivos vario levemente en términos de uso consuntivo del agua por los cultivos.

En resumen, la modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca ha proporcionado una visión detallada y valiosa del comportamiento del agua en la región. La comparación entre un modelo dinámico y uno basado en suelos agrícolas genéricos ha subrayado la importancia de considerar las variaciones temporales en los cultivos y prácticas agrícolas para obtener una representación más precisa y contextualizada del sistema hidrológico.

Es importante resaltar que la ET promedio de la cuenca evaluada, en términos relativos anuales pareciera muy baja, con una PET ligeramente por debajo de los 200mm/año, Esto se debe a las características de altitud de alrededor de los 2,600 m.s.n.m. y la baja tasa de ET de la vegetación a dicha altitud. Sin embargo, la hipótesis que se tiene es que la PET debería de ser mayor ya que estamos asociando ciertas coberturas a una altitud en la que los parámetros fisiológicos de los códigos de SWAT no han sido corregidos, este es el caso del pajonal del páramo. Sin embargo, sabemos que la PET podría ser mayor y podría corregirse este elemento en futuras investigaciones. Esto permitiría tener mayor precisión en los cálculos de la ET real con el modelo SWAT en zonas de páramo.

#### Análisis del modelo Dinámico:

La evaluación del balance hídrico es una herramienta esencial en el estudio hidrológico de cualquier cuenca. Los "*Water Balance Ratios*" o proporciones de balance hídrico de salida del modelo SWAT permiten obtener una representación cuantitativa de cómo el agua se distribuye y circula dentro de una cuenca, ofreciendo una visión detallada de los procesos hidrológicos clave (Arnold et al., 2012). Estas proporciones, que relacionan diferentes componentes del ciclo hidrológico con la precipitación total, son indicadores cruciales de la eficiencia del uso del agua, la recarga de acuíferos, la evapotranspiración y otros procesos relevantes. Dentro del análisis de la cuenca de río Gachaneca estos datos nos permite analizar la dinámica hídrica de la cuenca.

<i>Streamflow / Precip</i>	0,77
<i>Baseflow / Total Flow</i>	0,73
<i>Surface Runoff / Total Flow</i>	0,27
<i>Perc / Precip</i>	0,54
<i>Deep Recharge / Precip</i>	0,03
<i>ET / Precipitation</i>	0,19

**Relación Caudal/Precipitación (Streamflow/Precip):** El valor obtenido de 0,77 indica que el 77% de la precipitación total se convierte en caudal o flujo superficial. Este alto porcentaje sugiere que la cuenca tiene una respuesta rápida a los eventos de precipitación, lo que puede deberse a características del suelo, prácticas de manejo del terreno o la topografía de la cuenca. Una condición típica de cuencas de alta montaña.

**Relación Flujo Base/Caudal Total (Baseflow/Total Flow):** Un valor de 0,73 significa que el 73% del caudal total proviene del flujo base. Esto refleja la importancia de los suelos para la regulación y configuración de los flujos de las aguas subterráneas y en la alimentación de los cuerpos de agua superficiales en la cuenca. Esta alta proporción sugiere que la cuenca tiene una dinámica importante de agua subterránea que es significativa en términos volumétricos y que contribuye de manera constante a la configuración del caudal, incluso en períodos sin precipitaciones. Así definiendo



condiciones de río ganador en todo el transecto de cuenca.

**Relación Escorrentía Superficial/Caudal Total (Surface Runoff/Total Flow):** El 27% del caudal total proviene de la escorrentía superficial. Aunque es menor en comparación con el flujo base, sigue siendo un componente crucial, especialmente durante eventos de precipitación intensa.

**Relación Percolación/Precipitación (Perc/Precip):** Un valor de 0.54 indica que el 54% de la precipitación total percola hacia las capas más profundas del suelo. Esto sugiere que el suelo tiene una buena capacidad de infiltración, lo que puede ser beneficioso para recargar las aguas subterráneas.

**Relación Recarga Profunda/Precipitación (Deep Recharge/Precip):** El 3% de la precipitación total se dirige hacia la recarga profunda. Aunque este porcentaje es relativamente bajo, es esencial para mantener los niveles de agua subterránea y garantizar la sostenibilidad de las fuentes de agua en la cuenca a largo plazo.

**Relación Evapotranspiración/Precipitación (ET/Precipitation):** El 19% de la precipitación total se pierde por evapotranspiración. Este proceso es esencial para el ciclo hidrológico y juega un papel crucial en el balance de energía y agua de la cuenca.

En resumen, los resultados del Modelo SWAT para la cuenca del río Gachaneca reflejan la complejidad y la interacción entre los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos. La alta contribución del flujo base al caudal total y la significativa percolación sugieren que las prácticas de manejo del suelo y la conservación de las aguas subterráneas son esenciales para la sostenibilidad hídrica de la cuenca.

Dentro del análisis de la disponibilidad de agua en la cuenca hidrográfica del río Gachaneca, específicamente en la parte alta de la cuenca, es esencial para comprender las dinámicas hídricas que sustentan las actividades agrícolas de la región. Los datos presentados reflejan la cantidad de agua generada por las cuencas de los embalses Gachaneca I y II, que son vitales para el suministro de agua a las prácticas agrícolas de la cuenca en la tabla 6 encontramos los valores tanto de la disponibilidad hídrica superficial y subterránea anual a lo largo del periodo de modelación.

**Tabla 7.** Valores tanto de volúmenes superficiales y subterráneos anual a lo largo del periodo de modelación en el modelo dinámico.

Año	Volumen total. Superficial Cuenca Subcuenca 25 (hm <sup>3</sup> )	Volumen total Superficial Cuenca Subcuenca 24 [hm <sup>3</sup> ]	Volumen total. Superficial Agua Subcuenca 25 subcuenca 24 + [hm <sup>3</sup> ]	Volumen total agua subterránea Subcuenca 25 [hm <sup>3</sup> ]	Volumen total agua subterránea Subcuenca 24 [hm <sup>3</sup> ]	Volumen total. subterránea Anual Subcuenca 25. [hm <sup>3</sup> ]	Volumen total. Superficial y subterránea de Agua Subcuencas 24 + 25 [hm <sup>3</sup> ]
2000	19,44	6,25	25,69	11,99	3,44	15,43	41,12
2001	12,60	3,99	16,59	8,06	2,25	10,31	26,90
2002	15,02	4,72	19,74	9,08	2,48	11,56	31,30
2003	13,05	4,07	17,12	8,75	2,40	11,15	28,27
2004	16,92	5,35	22,27	8,99	2,37	11,36	33,63
2005	12,78	3,97	16,76	8,25	2,22	10,47	27,23
2006	13,14	3,99	17,13	8,37	2,17	10,54	27,67
2007	12,71	3,90	16,62	7,93	2,10	10,03	26,65
2008	7,00	1,94	8,94	4,42	0,96	5,39	14,33
2009	14,27	4,46	18,74	9,05	2,46	11,51	30,24

2010	24,54	8,08	32,62	14,82	4,25	19,07	51,69
2011	26,10	8,43	34,53	14,87	4,19	19,06	53,59
2012	21,51	6,82	28,33	12,70	3,53	16,23	44,56
2013	21,08	6,92	28,00	12,63	3,59	16,22	44,22
2014	17,71	5,70	23,41	10,92	3,08	14,00	37,41
2015	3,23	1,00	4,24	1,77	0,47	2,24	6,48

Desde el año 2000 hasta el 2015, se observa una variabilidad significativa en la disponibilidad superficial y subterránea de agua en ambas cuencas. Por ejemplo, en el año 2008, la disponibilidad superficial en la cuenca Gachaneca I fue de 7,00 hm<sup>3</sup>, la más baja en el período de 15 años, mientras que, en 2011, alcanzó su punto máximo con 26,10 hm<sup>3</sup>. Esta variabilidad puede atribuirse a factores climáticos, patrones de lluvia y prácticas de manejo del agua en la región.

La disponibilidad subterránea, que refleja el potencial de recarga del acuífero, también muestra fluctuaciones a lo largo de los años. En 2008, la disponibilidad subterránea en la cuenca Gachaneca I fue de 4,42 hm<sup>3</sup>, mientras que, en 2011, alcanzó 14,87 hm<sup>3</sup>. Estos datos subrayan la importancia de los acuíferos como fuentes de almacenamiento y suministro de agua, especialmente durante períodos de estiaje.

El Páramo de Rabanal, un ecosistema de alta montaña, juega un papel crucial en la sostenibilidad hídrica de la región. Su capacidad para almacenar y liberar agua de manera gradual lo convierte en una fuente esencial de recarga para los embalses y el acuífero subyacente. La gestión adecuada de este ecosistema es, por lo tanto, fundamental para garantizar la disponibilidad continua de agua para las actividades agrícolas y otros usos en la cuenca del río Gachaneca.

## 6. LA CALIBRACIÓN

El proceso de calibración consiste en ajustar un conjunto de parámetros que intervienen en el enrutamiento de ecuaciones que representan los procesos hidrológicos del modelo y varían a través de un conjunto de simulaciones dentro de una iteración configurada por el usuario. En este proceso los parámetros varían sus valores en un rango dado por el usuario, manteniéndose dentro de un valor mínimo y máximo determinado por el usuario y por el rango del valor establecido en el set-up del modelo. Una vez se realiza las variaciones de parámetros, uno a uno o en conjunto, el resultado de la simulación se compara con los datos medidos en el punto de aforo. Este ajuste se hace con el propósito de poder obtener un modelo que sea capaz de describir el sistema hidrológico lo más próximo a la realidad.

Los ajustes se realizan con el fin de aportar un nivel de fiabilidad y consistencia a los resultados obtenidos del modelo. En ese orden de ideas, se debe realizar los siguientes ajustes en la cuenca del río Gachaneca, con el fin de obtener un modelo que permita describir la respuesta hidrológica de la cuenca a los eventos meteorológicos más cercanos a la realidad en un periodo determinado.

La calibración se realiza empleando un conjunto de valores diarios en el punto de aforo. Para este caso se tomó como intervalo de calibración las observaciones de caudal desde el 01/01/2002 hasta el 31/12/2008.

Los parámetros de referencia para la calibración se obtuvieron mediante un análisis de sensibilidad respecto a un conjunto de parámetros obtenidos de los casos de la revisión inicial. (ver sección 1 Introducción, Estudios previos).

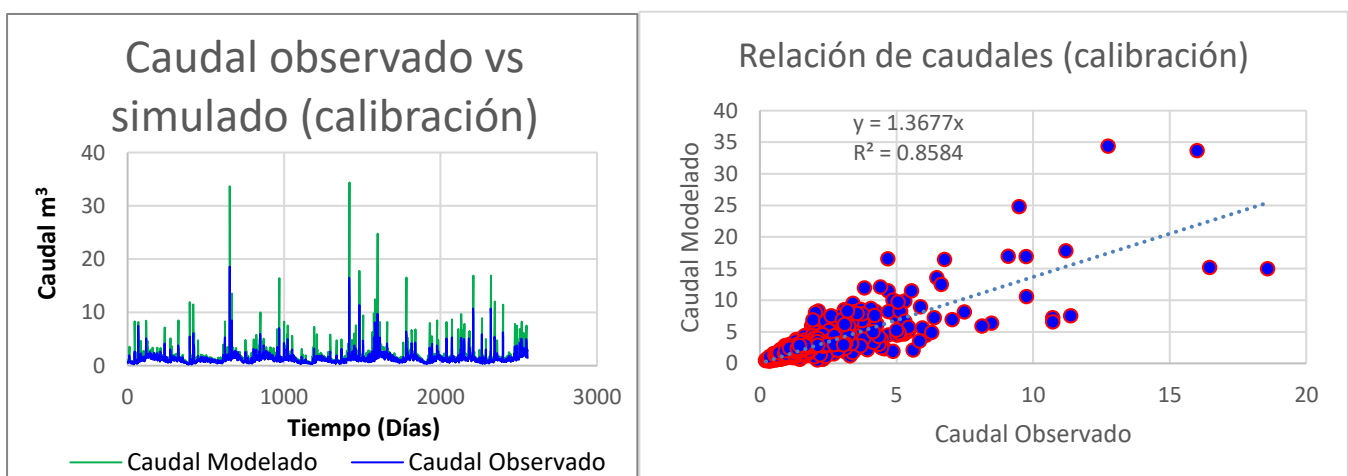
**Tabla 8.** Relación de parámetros iniciales de calibración para la cuenca del río Gachaneca, Boyacá, Colombia.

<b>Parámetro</b>
------------------

CN2
GWQMN
REVAP
SOL_AWC
ESCO
HRU_SLP
OV_N
SLSUBBSN
ALPHA_BF
EPCO
LAT_TIME
GW_DELAY
CANMX

Los valores de ajuste finales tras realizar el análisis de sensibilidad y después de más de 15 rondas/iteraciones de calibración con SWAT-CUP y el algoritmo SUFI2, se realizaron para los siguientes parámetros: CN2, REVAP, SOL\_AWC, ALPHABF, LAT\_TIME, OV\_N y ESCO. Se ajustaron de forma relativa con un  $-0.2$  y  $+0.2$  de variación con 1300 simulaciones.

En la Figura 20, se presenta una comparación entre el caudal observado (línea azul) y el caudal simulado (línea verde) por el modelo. Esta figura es esencial para visualizar la precisión del modelo en replicar las condiciones observadas. Una correspondencia cercana entre las dos series de datos indica que el modelo está calibrado satisfactoriamente según los valores de referencia propuestos por Daniel Moriasi et al, 2015 y puede ser utilizado con confianza para simulaciones futuras. En la Figura 19 podemos observar que durante el periodo de calibración el modelo sobreestima los caudales, especialmente por los picos de alto caudal. Esto puede ser debido a algunas diferencias entre la capacidad de regulación de los embalses y la información introducida en el modelo. Ya se presentan algunos problemas de sedimentación y pérdida de bancos de los embalses, por lo que los volúmenes y dinámica de la laminación pueden verse afectados y estar influyendo en la representación de los picos de flujo. Esta afirmación permite manifestar la importancia de documentar y medir las variaciones de capacidad real de los embalses. Especialmente de los volúmenes muertos y sedimentos de fondo.



**Figura 19.** Comparación entre Caudales Observados y Simulados, Relación de Caudales con Coeficiente de Determinación.

La relación entre los caudales observados y simulados con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.86, indica que el modelo es capaz de explicar en aproximadamente el 86% la variabilidad en los

caudales observados. Esta relación cuantitativa proporciona una medida adicional de la precisión y confiabilidad del modelo obtenido. La función objetivo fue el coeficiente *Nash-Sutcliffe Efficiency* obteniendo un valor de 0,82 en la fase de calibración y un PBIAS de 6,48%.

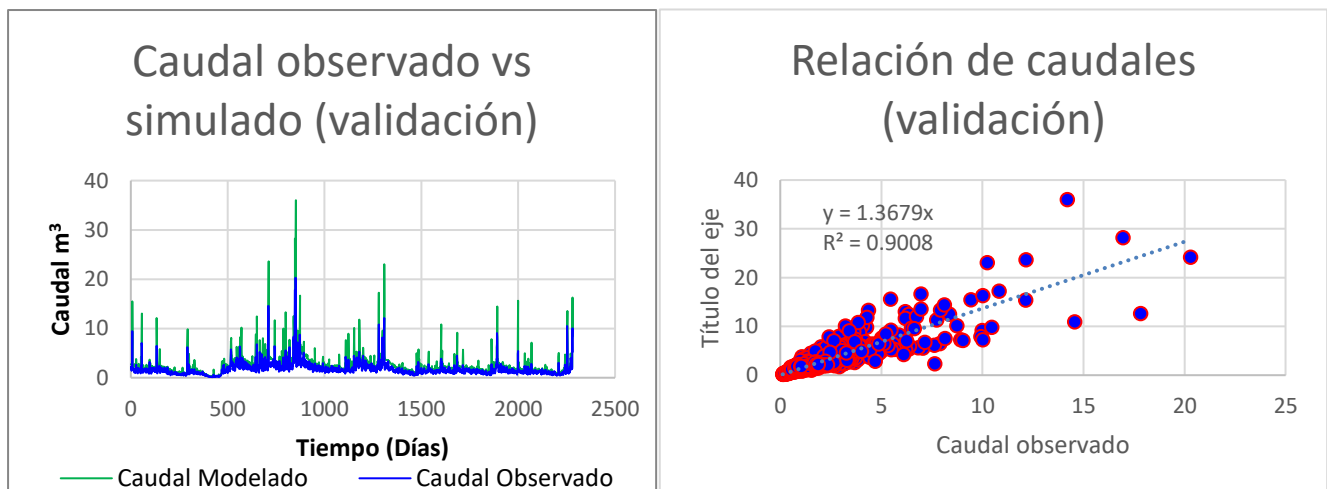
## 7. LA VALIDACION

La validación es un paso crucial tras la calibración, ya que permite verificar la capacidad del modelo para replicar condiciones hidrológicas en un conjunto de datos diferente al utilizado para la calibración. Este proceso garantiza que el modelo no solo se ajuste a un conjunto específico de datos, sino que también tenga la capacidad de predecir con precisión bajo diferentes escenarios o periodos de tiempo (Moriasi et al., 2007).

En la Figura 20 muestra la relación entre los caudales observados y simulados durante la validación. Un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9008 indica una excelente correspondencia entre los datos observados y simulados, ya que el modelo puede explicar el 90,08% de la variabilidad en los caudales observados. Esta alta correlación sugiere que el modelo, después de ser calibrado y validado, es una herramienta robusta y confiable para simular las condiciones hidrológicas en la cuenca del río Gachaneca (Arnold et al., 2012).

Además, se presenta una comparación directa entre el caudal observado y el caudal simulado durante el periodo de validación. Una correspondencia cercana entre estas dos series de datos reafirma la precisión del modelo y su capacidad para replicar condiciones hidrológicas observadas en diferentes periodos (Gassman et al., 2007).

Para la fase de validación, se emplearon los valores de ajuste resultantes de la validación, el mismo número de simulaciones, la misma función objetivo, resultando un un valor de 0,87 en la fase de calibración y un PBIAS de 4,21%.



**Figura 20.** Comparación entre Caudales Observados y Simulados validados, Relación de Caudales con Coeficiente de Determinación luego de la validación.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La modelización hidrológica de la cuenca del río Gachaneca en Samacá, Boyacá, utilizando el modelo SWAT, es de suma importancia para comprender y prever la dinámica de los recursos hídricos en la cuenca. La presente modelización no solo proporciona una visión detallada de cómo los diferentes factores, como el uso del suelo, las prácticas agrícolas y los cambios climáticos, afectan la calidad y

cantidad del agua, sino que también permite diseñar estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos. Además, de proporcionar algunos aspectos claves para mejorar las estimaciones respecto a los datos de embalses e información edáfica. La información generada es esencial para los tomadores de decisiones locales, agricultores, organizaciones de conservación y otros interesados en la gestión y conservación del agua. El modelo desarrollado II proporcionar estimaciones precisas se convierte en una herramienta valiosa para garantizar que las futuras generaciones en Samacá, Boyacá, tengan acceso a fuentes de agua limpias y sostenibles.

El modelo de SWAT en la cuenca del río Gachaneca revela la importancia de la recarga hídrica al acuífero profundo. Si bien se tenía una idea de su importancia, la presente evaluación del modelo de SWAT ha permitido, de alguna manera, hacer una estimación por diferencia superficial, de los posibles volúmenes de recarga. Un dato que desconocían las autoridades y que limitaba el entendimiento del sistema hidrológico del sistema acuífero de Tunja.

Se destaca el trabajo e importancia de la etapa final del trabajo (análisis de sensibilidad, calibración y validación), el apoyo sobre estudios previos y estudio a detalle de los procesos hidrológicos en esta etapa es fundamental para evitar la pérdida de tiempo al intentar procedimientos de ensayo y error. La adecuada comprensión de la representación que hace el modelo en relación a los valores observados es clave para lograr procesos de calibración eficientes.

Se recomienda hacer un estudio más detallado de los factores fisiológicos de la vegetación de páramo para ser integrados en el modelo SWAT. Además, incluir algún tipo de operaciones de gestión permitiría simular las afectaciones climáticas sobre esta vegetación y así conseguir adecuados valores de ET real en las zonas de páramo. El modelo SWAT es un modelo superficial en el que las estimaciones subterráneas se logran por diferencia y parte del error, para mejorar las estimaciones superficiales, puede estar ligado a I desconocimiento de los flujos subterráneos. De este modo, se recomienda realizar una simulación conjunta con otros modelos que permitan acoplar simulaciones superficiales y subterráneas como el MODFLOW. Por último, se recomienda ahondar en las condiciones reales de los embalses Gachaneca I y Gachaneca II para que los efectos de la laminación y/o salidas de los embalses puedan estar más ajustadas a la realidad que lo que reproduce el modelo desarrollado en el presente trabajo.

## 9. BIBLIOGRAFIA

*Asociación de Distrito de Riego de Samacá ASUSA. (2019). Informe anual sobre el sistema de riego en Samacá. Samacá: ASUSA Publications.*

*Alcaldía de Samacá. (2015). Acuerdo Municipal No. 008 - Eot.*

*Corpoboyacá. (2020). Parque Natural Regional Rabanal - Sistema Regional de Áreas Protegidas.*

*Archivo Físico del Distrito de Riego ASUSA. (1985). Documento Generado por el HIMAT.*

*Alaska Satellite Facility. (2014). ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction. Recuperado de ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction*

*Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. (2023). Atlas Climatológico de Colombia. Recuperado de Atlas Climatológico –*

## IDEAM

NASA POWER. (2023). *Data Access Viewer*. Recuperado de *Data Access Viewer - NASA POWER*

SWAT - Climate Maps - Purdue University. (2005). Recuperado de *SWAT - Climate Maps - Purdue University*

*Conceptos básicos y guía rápida para el usuario - SWAT model*. (2005).

Recuperado de *SWAT model* Mafla, F., Paz, P., Realpe, D., y Cárdenas, G. (2016). *Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano*.

Elgueta Rodríguez, J. I. (2018). *Implementación del modelo hidrológico SWAT para cuenca del río Lonquén*.

Palazón, L. (2012). *Bases de datos de los suelos para la modelización de la erosión con el modelo SWAT a partir de diferentes fuentes de información*.

Garzón Sánchez, H. (2020). *Evaluación del efecto o relación entre algunas coberturas vegetales y usos de la tierra del contexto rural andino colombiano y el régimen de caudales mínimos y*.

Mafla, F., Paz, P., Realpe, D., & Cárdenas, G. (2016). *Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano*.

NAVARRETE GONZALEZ, J. D. (2004). *Hidrología de páramos. Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Blanco, Colombia*.

Agredo Cardona, G. A. (2006). *Planificación urbana sostenible modelo de unidad para la planificación territorial de ciudades intermedias de Colombia: Caso Biomanizales-Cuenca del río Chinchiná-Cuenca la*.

Setegn, S. G., Rayner, D., Melesse, A. M., Dargahi, B., & Srinivasan, R. (2010). *Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model*.

Jiménez Yanasupo, A. J. (2021). *Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo*.

Cossio, V., Pérez-Foguet, A., Durán, A., & Yacooub, C. (2014). *Sistemas de información e instrumentos técnicos para la gestión del agua*.

Trivisonno, F., Portapila, M., Romagnoli, M., Caruso, N., & Heredia, J. (2018). *Resultados preliminares de la modelación del flujo de agua subterránea en la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe.*

Quispe July, R. (2016). *Aplicación del modelo (Soil and water assessment tool) para simular caudales con fines agrícolas en la cuenca del rio keka.*

Beltrán García, L. E. (2018). *Efectos de las variables climáticas y de uso del suelo sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Gachaneca (Boyacá - Colombia): Como escenario para la gestión integral del recurso hídrico. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Navarrete González, J. D. (2004). Hidrología de páramos. Modelación hidrológica de la cuenca alta del rio Blanco, Colombia.*

Agredo Cardona, G. A. (2007). *Planificación urbana sostenible modelo de unidad para la planificación territorial de ciudades intermedias de Colombia: Caso Biomanizales-Cuenca del río Chinchiná-Cuenca la Francia.*

Setegn, S. G., Rayner, D., Melesse, A. M., Dargahi, B., & Srinivasan, R. (2010). *Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model.*

Palazón, L. (2012). *Bases de datos de los suelos para la modelización de la erosión con el modelo SWAT a partir de diferentes fuentes de información.*

Cossio, V., Pérez-Foguet, A., Durán, A., & Yacooub, C. (2014). *Sistemas de información e instrumentos técnicos para la gestión del agua.*

Quispe July, R. (2016). *Aplicación del modelo (Soil and water assessment tool) para simular caudales con fines agrícolas en la cuenca del rio Keka, La Paz, Bolivia.*

Igueta Rodríguez, J. I. (2018). *Implementación del modelo hidrológico SWAT para cuenca del río Lonquén.*

Trivisonno, F., Portapila, M., Romagnoli, M., Caruso, N., & Heredia, J. (2018). *Resultados preliminares de la modelación del flujo de agua subterránea en la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe.*

Jiménez Yanasupo, A. J. (2021). *Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo, Lima, Perú.*

Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., Willaarts, B., & De Miguel, Á. (2019). *An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. Agricultural Water Management, 212, 211-225.*

Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., De Miguel, Á., Gobin, A., & Willaarts, B. (2022). *Enhancing LULC scenarios impact assessment in hydrological dynamics using participatory mapping protocols in semiarid regions. Science of the Total Environment, 803, 149906.*

Garzón Sánchez, H. (2020). *Evaluación del efecto o relación entre algunas coberturas vegetales y usos de la tierra del contexto rural andino colombiano y el régimen de caudales mínimos y. Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Van Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491-1508.*



Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions*. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Oeurng, C., Sauvage, S., & Sánchez-Pérez, J. M. (2011). *Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model*. *Journal of Hydrology*, 401(3-4), 145-153

## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Estaciones Meteorológicas.

Estaciones meteorológicas y código IDEAM	Latitud	Longitud	Elevación
RAQUIRA [24010180]	5,54	-73,63	2.290
VILLA CARMEN [24015220]	5,51	-73,50	2.600
GACHANECA [24015290]	5,43	-73,55	3.400
EMPORIO EL HDA [24010410]	5,60	-73,54	2.120
NUEVO COLON [35075010]	5,35	-73,46	2.438
VENTAQUEMADA [35070020]	5,37	-73,52	2.630

### Anexo 2. Estaciones meteorológicas Virtuales generadas

Estaciones meteorológicas	Latitud	Longitud	Elevación
GACHANECA	5.43	-73.55	2.630
VENTAQUEMADA	5.36	-73.51	3.400
VILLA_CARMEN	5.51	-73.49	2.600
Vitual_station1	5.42	-73.57	3.372
Vitual_station2	5.48	-73.53	2.981
Vitual_station3	5.46	-73.53	2.992
Vitual_station4	5.52	-73.51	2.657
Vitual_station5	5.56	-73.50	2.490
Vitual_station6	5.52	-73.50	2.605
Vitual_station7	5.47	-73.49	2.727
Vitual_station8	5.55	-73.49	2.606
Vitual_station9	5.54	-73.48	2.608
Vitual_station10	5.52	-73.48	2.605
Vitual_station11	5.54	-73.48	2.611
Vitual_station12	5.53	-73.47	2.721
Vitual_station13	5.49	-73.47	2.702
Vitual_station14	5.51	-73.46	2.691

**Anexo 3.** Datos Esquema de Ordenamiento Territorial de Samacá, en el ACUERDO MUNICIPAL No. 008 DE 2015 - EOT, tipos de suelos.

<b>FORMACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>FORMACIÓN CHURUVITA (KSCH)</b>	Compuesta por arenisca basal cuarzosa potente, alternancia de arcillolitas, areniscas, shales grises y niveles calcáreos
<b>FORMACIÓN CONEJO (Kscn)</b>	Esta unidad geológica está compuesta por shales de color oscuro con intercalaciones arenosas y arcillolitas grises y amarillentas con nódulos calcáreos.
<b>Formación Labor y tierna (KG1)</b>	Arenisca de color blanco amarillento hacia el techo, shales con intercalaciones de arenisca.
<b>Formación Plaeners (Kg2)</b>	Capas delgadas de liditas, porcelanitas, liditas y sherts con intercalaciones arcillosas y esporádicas capas de arenisca. Intercalados con liditas y arcillolitas, se encuentran tres mantos de roca fosfórica con espesores máximos de 1 m.
<b>FORMACIÓN GUADUAS Miembro 1 (Ktg 1)</b>	Arcillolitas laminares de color gris pardo con presencia de lentes limolíticos a arenosos, en algunos sectores presenta láminas de materia orgánica, dispuesta paralelamente a la estratificación.
<b>FORMACIÓN GUADUAS Miembro 2 (Ktg 2)</b>	Arenisca la Guía. Es el nivel más importante de la formación por contener el mayor número de mantos de carbón y de la mejor calidad: de techo a base consta de alternancia de lodolitas y arenitas, arenitas de grano fino con intercalaciones de limolitas lodosas. Incluye entre 11 y 17 mantos de carbón.
<b>FORMACIÓN GUADUAS Miembro 3 (Ktg 3)</b>	Lodolitas y limolitas lodosas de color gris pardo con láminas arcillolíticas lenticulares ricas en materia orgánica, hay presencia de lentes areníticos. Este nivel contiene cinco a seis mantos de carbón.
<b>FORMACIÓN GUADUAS Miembro 4 (Ktg 4)</b>	Arenisca lajosa: niveles areníticos blanco-amarillentos de grano fino, arenitas limosas pardo-verdosas y limolitas color gris claro y oscuro.
<b>FORMACIÓN GUADUAS Miembro 5 (Ktg 5)</b>	Arcollitas varicoloreadas que alternan con limolitas lodosas y niveles de areniscas líticas.

<b>FORMACIÓN CACHO (TPC)</b>	Conglomerados finos y areniscas de cuarzo lechoso rosado y amarillento en matriz arenosas.
<b>FORMACIÓN BOGOTÁ (TB)</b>	Arcillolitas varicoloreadas, amarillentas, blancuzcas, rojizas y violáceas con intercalaciones de limolitas y areniscas limosas.
<b>FORMACIÓN REGADERA (TR)</b>	Conglomerados y areniscas conglomeráticas cuarzosas duras.
<b>DEPOSITO FLUVIO LACUSTRE (QPL)</b>	Depósitos heterogéneos conformados por sedimentos coluvioaluviales, aluviales y orgánicos.
<b>DEPOSITO COLUVIO-ALUVIAL (QCA)</b>	Cantos de arena de tamaño variado, redondeados a subredondeados dentro de matriz limo arenosa y arena arcillosa.
<b>DEPOSITO COLUVIAL (QC)</b>	Bloques y guijos angulares en matriz arcillo arenosa.
<b>DEPOSITO COLUVIO-GLACIAL (QCG)</b>	Grandes bloques angulosas inmersos en matriz arcillo-arenosa y arena-arcillosa.

**Anexo 4.** Porcentajes de área sembrada a lo largo del periodo de simulación datos tomados por el Distrito de riego ASUA.

	2000													
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	10,22	16,75	3,48	17,45	7,73	2,19	2,47	6,14	6,11	7,70	4,66	1,07	8,27	5,74
Feb	1,82	18,63	6,69	13,01	2,20	11,38	11,21	2,61	2,10	4,78	6,87	0,39	6,74	11,57
Mar	1,83	17,61	5,99	14,86	6,20	8,99	10,08	1,65	4,92	10,07	0,00	3,05	7,83	6,94
Abr	1,52	20,04	7,22	18,38	2,69	2,08	4,73	4,38	5,18	5,17	7,75	0,73	11,51	8,61
May	0,48	15,91	10,76	18,30	1,11	2,24	4,81	8,44	9,49	3,89	9,54	1,17	6,31	7,57
Jun	0,98	16,17	2,40	16,24	8,61	0,04	3,29	0,32	8,74	4,26	9,37	9,64	10,23	9,71
Jul	5,63	17,88	2,77	14,74	8,67	5,45	2,37	9,89	6,88	1,39	4,08	6,44	6,21	7,60
Ago	1,89	15,52	7,64	23,12	10,36	2,07	0,17	8,37	0,64	0,46	5,56	8,76	5,61	9,83
Sep	4,79	18,87	8,30	19,48	6,67	0,00	6,67	4,34	5,47	8,36	6,12	6,81	0,59	3,53
Oct	8,14	14,85	10,16	17,21	6,34	0,67	0,00	4,41	2,91	2,98	7,02	7,20	9,74	8,38
Nov	4,49	18,48	3,80	17,79	5,76	8,48	8,69	4,04	0,00	4,64	3,66	6,54	4,63	9,00
Dic	4,11	14,73	0,54	21,93	4,75	1,63	7,44	8,38	7,03	0,85	9,04	1,53	13,55	4,49

	2001													
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	13,45	16,29	7,39	14,85	5,22	0,71	1,69	0,23	0,00	18,22	5,31	10,27	0,81	5,56
Feb	0,11	15,47	7,37	14,75	0,73	7,32	7,34	4,61	8,73	7,36	4,15	8,64	7,49	5,93

Mar	4,23	15,54	11,14	21,77	4,67	3,89	0,00	8,02	9,57	1,41	0,56	5,49	2,82	10,89
Abr	11,46	20,39	7,47	17,42	8,08	0,16	2,76	6,57	1,28	7,02	4,77	0,97	7,93	3,70
May	7,95	16,56	12,47	19,67	2,69	0,02	12,33	7,49	3,15	3,08	1,54	10,35	0,68	2,01
Jun	2,76	20,18	9,14	16,56	1,87	2,51	10,92	3,31	1,35	10,66	3,81	1,34	3,80	11,81
Jul	7,14	17,76	3,75	13,31	0,19	8,00	6,84	11,06	10,93	0,66	4,89	4,24	7,90	3,32
Ago	4,59	17,16	5,57	15,88	8,86	6,70	5,35	5,58	8,24	5,24	2,20	4,40	1,58	8,64
Sep	10,41	20,17	11,10	16,68	0,40	7,32	5,44	1,07	8,15	0,20	0,61	6,54	3,83	8,07
Oct	7,76	14,55	3,68	18,22	8,89	6,70	0,00	7,59	6,82	2,57	4,22	6,70	6,24	6,07
Nov	1,44	22,76	10,30	15,88	4,60	5,70	1,22	9,03	5,14	5,78	4,12	3,99	1,73	8,31
Dic	8,80	18,19	0,71	16,06	8,25	11,37	7,05	0,73	2,00	4,58	1,75	4,49	3,46	12,57

2002														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	10,09	23,08	4,48	16,14	0,43	6,89	6,87	7,04	9,59	0,00	3,37	8,09	2,53	1,40
Feb	5,30	18,45	9,99	17,67	0,22	7,52	5,57	2,63	8,33	0,57	9,15	7,14	3,88	3,59
Mar	7,13	13,05	1,86	19,32	9,64	5,92	2,30	0,34	0,85	9,26	4,55	10,75	4,16	10,88
Abr	1,87	19,50	8,31	16,94	3,41	7,91	4,57	8,02	6,98	7,30	6,00	1,95	1,52	5,71
May	4,54	19,73	4,42	13,64	9,05	3,44	2,90	10,59	8,22	4,31	3,40	6,63	1,59	7,54
Jun	6,60	18,23	2,69	20,98	5,29	7,73	3,03	4,46	3,37	7,81	7,02	1,11	2,34	9,34
Jul	4,88	17,87	3,48	17,86	6,21	4,96	1,43	10,56	3,23	0,41	8,40	7,52	2,49	10,71
Ago	5,65	14,29	1,88	16,56	5,45	1,86	12,08	9,82	1,94	6,37	4,98	11,29	5,52	2,32
Sep	4,43	13,70	5,12	17,77	2,44	10,94	8,42	5,38	8,40	4,22	1,78	9,02	7,39	1,00
Oct	2,73	15,70	11,17	15,40	2,46	2,06	7,37	11,75	0,91	8,10	0,93	4,12	10,46	6,86
Nov	7,59	14,93	7,78	21,06	8,57	2,91	7,78	3,32	4,01	2,62	6,17	3,32	2,62	7,33
Dic	6,55	18,84	3,80	13,28	0,00	9,65	5,06	8,93	8,00	3,94	8,54	9,53	1,28	2,60

2003														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	3,48	15,51	3,44	15,85	5,76	4,75	7,08	4,05	7,35	2,09	12,74	6,74	8,70	2,47
Feb	4,60	16,79	10,33	14,95	8,42	7,99	3,73	2,01	1,83	9,37	6,08	5,66	4,58	3,67
Mar	7,55	15,20	9,28	19,81	8,83	8,74	8,08	0,12	1,58	8,76	0,45	1,86	0,03	9,73
Abr	10,30	20,48	2,70	15,33	1,43	0,58	3,47	1,35	2,50	9,10	7,43	9,09	8,68	7,56
May	2,90	20,93	7,78	14,39	3,88	8,88	10,36	0,58	2,64	9,02	3,73	4,77	2,86	7,28
Jun	4,94	16,92	6,82	22,13	3,95	1,17	7,39	6,75	7,77	2,03	7,21	2,65	5,25	5,02
Jul	4,83	16,22	7,44	19,39	0,08	8,11	7,76	6,96	4,21	2,89	3,09	4,30	8,73	5,98
Ago	4,60	18,24	3,57	15,41	6,64	7,79	6,46	7,98	6,03	5,61	3,20	8,78	1,16	4,54
Sep	4,84	20,28	8,48	14,57	6,73	5,09	9,44	2,28	8,15	1,64	3,48	7,71	2,54	4,76
Oct	9,77	18,24	1,85	13,34	6,30	8,74	1,34	3,78	8,59	9,30	5,46	4,25	5,10	3,96
Nov	7,16	14,50	7,54	17,12	5,73	6,35	8,64	7,50	6,67	5,42	3,71	3,76	0,25	5,66
Dic	6,24	18,02	4,05	16,29	2,32	6,83	0,00	4,21	8,05	9,79	10,47	2,86	0,45	10,44

2004														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	7,75	19,50	7,30	19,09	1,23	3,90	4,19	6,65	6,02	5,04	5,47	5,16	6,11	2,59
Feb	9,11	15,98	6,24	14,88	8,00	7,82	3,30	5,72	8,49	8,35	4,55	4,67	0,39	2,49
Mar	9,25	14,60	4,36	18,29	7,46	6,80	6,13	4,22	2,06	1,71	3,42	4,34	8,88	8,47
Abr	0,24	15,09	12,39	15,92	11,18	1,17	9,32	2,31	7,21	6,00	9,97	3,51	0,74	4,95

May	9,52	17,51	2,66	20,14	4,11	8,53	3,27	10,33	0,40	1,33	7,00	8,00	4,78	2,41
Jun	6,05	18,81	6,82	14,58	8,23	7,52	2,22	3,01	5,14	1,62	5,76	7,38	7,78	5,09
Jul	6,94	13,49	8,53	16,74	3,94	2,87	8,07	7,11	0,19	0,44	8,93	8,38	6,51	7,86
Ago	2,26	16,41	6,67	16,56	1,21	10,00	0,00	0,16	0,75	8,64	13,20	5,82	6,29	12,02
Sep	7,28	17,18	1,33	16,21	8,37	4,69	7,48	0,11	5,63	7,68	3,10	9,15	2,62	9,17
Oct	9,25	16,67	6,20	20,67	9,83	0,59	4,56	2,68	2,64	1,17	4,99	9,51	7,55	3,70
Nov	5,61	22,82	5,87	15,32	0,89	6,48	7,30	6,41	2,70	7,39	7,05	0,16	6,07	5,94
Dic	8,53	19,76	1,81	18,44	1,33	10,96	3,10	9,23	4,91	0,31	6,34	3,78	3,17	8,33

2005														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	7,03	19,90	0,65	16,06	5,75	3,88	7,03	9,79	5,51	1,93	10,23	3,71	3,73	4,78
Feb	2,76	22,35	4,49	16,60	7,95	0,04	5,94	8,49	0,17	8,48	8,99	1,45	1,62	10,67
Mar	12,54	16,34	3,87	21,67	1,72	3,79	2,36	0,75	5,59	0,04	10,34	7,51	10,13	3,35
Abr	1,28	21,27	2,65	15,59	9,13	3,12	1,98	7,12	8,74	0,79	5,76	1,83	9,58	11,15
May	10,09	20,15	7,20	14,40	6,11	0,00	11,36	0,00	3,05	8,04	2,88	3,89	0,83	11,99
Jun	1,24	20,89	2,25	17,52	8,95	4,51	7,41	2,92	6,13	1,59	13,31	3,77	8,19	1,32
Jul	1,31	19,20	11,81	19,59	3,50	6,71	8,89	0,89	1,07	2,27	8,62	9,18	1,45	5,51
Ago	7,04	20,51	6,10	13,74	6,99	7,38	5,62	3,72	6,00	3,65	6,36	2,46	8,73	1,69
Sep	5,59	17,79	10,95	13,66	7,15	5,17	8,64	2,00	8,02	6,66	0,85	2,45	6,06	5,00
Oct	8,08	18,55	1,01	14,30	4,20	0,73	0,37	10,48	11,22	4,54	8,09	8,81	3,65	5,95
Nov	3,38	17,72	6,17	16,54	5,77	2,71	6,87	7,80	3,86	3,13	5,49	2,58	6,16	11,81
Dic	9,65	14,46	2,52	20,03	0,00	12,45	11,35	2,56	0,31	9,86	12,76	0,35	0,02	3,67

2006														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	8,67	18,49	8,88	13,05	3,14	5,98	1,95	4,80	5,65	7,54	7,79	4,44	3,47	6,15
Feb	1,04	22,43	5,28	15,77	1,17	9,00	7,57	4,20	9,12	1,15	7,18	9,33	0,21	6,55
Mar	3,63	15,55	8,60	19,83	1,68	1,39	8,75	6,45	4,72	8,97	2,27	9,09	0,00	9,08
Abr	9,15	16,64	2,54	16,46	3,15	4,71	9,31	7,14	5,70	2,38	4,50	6,81	7,18	4,33
May	1,14	17,17	6,16	17,15	7,43	4,98	1,48	7,14	7,64	5,78	1,91	6,11	7,77	8,14
Jun	10,89	16,82	2,68	20,96	4,18	2,20	3,99	3,49	8,23	1,27	2,64	2,78	8,71	11,18
Jul	1,93	21,19	3,29	18,26	4,18	3,06	2,73	7,59	7,30	8,69	4,56	8,27	2,96	5,99
Ago	0,37	20,33	8,22	14,69	9,26	4,05	7,02	8,56	3,24	8,05	0,06	2,01	7,81	6,32
Sep	8,91	21,81	0,34	16,71	6,19	1,85	0,59	5,79	5,06	5,96	7,35	5,61	4,29	9,54
Oct	7,35	21,97	7,63	16,81	8,22	4,10	7,42	6,66	0,01	8,34	3,03	1,90	3,64	2,93
Nov	8,10	17,72	8,38	16,45	6,63	4,47	3,09	4,57	7,55	3,13	2,11	5,10	5,81	6,89
Dic	7,39	21,81	9,56	18,03	6,80	2,37	1,09	0,23	0,00	6,62	9,24	0,00	8,52	8,35

2007														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	7,45	21,08	5,91	14,79	2,43	5,49	6,66	6,07	7,39	2,07	6,66	3,41	3,77	6,82
Feb	4,59	20,85	9,31	15,80	1,04	0,75	5,40	4,36	6,72	8,10	6,11	4,01	7,75	5,21
Mar	4,66	20,23	7,30	14,89	8,93	5,72	5,02	0,37	3,51	5,44	9,53	1,86	4,29	8,24
Abr	7,81	19,05	2,37	18,06	11,32	3,74	0,00	2,12	11,22	0,03	9,07	9,96	3,51	1,73
May	5,02	17,62	5,06	14,62	16,24	1,30	7,74	0,63	8,33	2,10	4,43	7,79	0,21	8,90
Jun	5,44	17,34	0,59	12,90	8,35	2,10	5,32	7,90	3,03	5,79	9,61	9,63	4,41	7,61

Jul	2,95	22,91	9,33	15,29	3,59	0,93	1,53	2,36	7,90	2,75	5,50	7,91	9,85	7,18
Ago	8,57	20,56	7,85	18,13	2,20	7,11	8,08	5,37	0,92	2,55	1,83	4,37	7,58	4,89
Sep	6,21	14,98	5,22	15,78	4,46	9,62	8,73	2,79	10,40	1,50	5,55	6,20	0,40	8,16
Oct	1,40	15,92	8,42	21,65	0,00	4,05	9,15	7,09	5,34	2,10	3,12	6,93	6,75	8,08
Nov	7,44	17,80	3,37	16,84	2,47	7,98	4,75	8,66	5,94	2,14	9,46	5,78	4,02	3,34
Dic	9,28	18,82	5,63	13,04	9,24	0,25	0,00	0,00	5,86	6,78	7,78	2,38	7,75	13,21

2008														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORAN	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	9,69	17,72	7,28	18,78	9,18	4,04	10,00	2,91	2,51	0,02	0,46	2,17	7,73	7,51
Feb	7,83	14,00	5,57	20,56	2,50	6,39	3,49	5,43	4,14	5,34	5,85	7,63	2,95	8,34
Mar	6,10	17,48	8,01	19,72	6,66	2,25	6,95	3,78	3,60	0,05	3,26	7,15	7,84	7,16
Abr	5,97	18,69	11,36	21,29	1,74	0,30	3,17	4,52	6,53	5,61	4,55	4,13	0,29	11,87
May	11,28	14,67	7,94	20,73	10,88	5,96	0,01	9,13	0,00	6,42	1,78	1,99	8,56	0,67
Jun	6,50	17,02	4,23	15,51	9,28	0,00	7,38	6,02	7,19	1,59	5,63	4,04	5,84	9,79
Jul	5,49	15,63	9,60	19,55	4,12	4,60	0,00	5,57	2,68	5,62	6,23	4,60	6,82	9,48
Ago	2,69	14,63	3,30	19,61	9,85	7,37	0,23	7,94	4,83	5,56	8,61	3,96	7,24	4,17
Sep	0,14	21,90	3,56	15,13	4,73	5,32	5,51	7,42	9,83	1,20	7,53	3,96	1,89	11,89
Oct	8,82	15,98	5,36	18,29	6,21	8,47	10,63	4,57	0,68	3,63	0,75	7,67	5,16	3,79
Nov	5,29	22,95	2,02	16,29	1,69	5,63	3,94	6,39	4,56	8,98	6,56	2,77	4,68	8,25
Dic	3,28	18,40	10,15	15,98	5,58	4,12	7,93	3,79	9,90	2,46	2,53	7,82	1,71	6,34

2009														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	7,47	16,95	3,51	14,97	5,62	7,66	3,20	1,62	5,11	5,14	5,80	8,75	7,08	7,11
Feb	6,37	14,80	7,94	15,84	8,51	1,68	3,76	0,87	7,47	0,99	8,18	9,04	7,12	7,42
Mar	2,17	17,98	4,73	16,78	8,35	8,57	6,06	4,15	5,99	6,55	3,20	8,28	0,93	6,25
Abr	12,50	15,41	6,49	15,40	4,75	2,90	0,00	13,51	5,15	8,06	0,58	0,00	12,49	2,75
May	7,20	16,1	10,76	22,22	5,68	7,54	7,89	4,51	0,28	4,31	0,00	8,71	2,97	1,90
Jun	10,29	19,82	8,15	13,67	3,75	0,00	5,76	0,95	3,24	10,83	9,29	2,75	9,84	1,65
Jul	3,88	19,30	7,66	17,88	3,70	6,21	4,14	2,88	7,14	6,55	2,49	3,57	6,86	7,74
Ago	8,36	19,10	11,92	14,89	0,18	4,18	2,32	3,68	9,40	11,37	1,67	5,53	4,30	3,10
Sep	4,47	17,62	4,28	22,27	4,57	7,14	5,00	1,26	0,52	5,69	7,49	7,58	5,92	6,20
Oct	6,17	20,04	3,50	18,24	7,97	1,88	6,26	9,49	8,32	4,82	4,14	0,14	7,61	1,42
Nov	5,38	15,47	2,22	15,44	2,30	11,90	8,04	3,07	5,28	4,58	0,43	10,01	7,31	8,55
Dic	5,31	14,77	1,85	20,98	1,97	1,06	5,77	6,89	8,98	5,64	8,21	8,50	0,00	10,08

2010														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	2,84	16,23	1,21	15,96	11,50	4,76	5,77	10,50	0,41	3,61	7,58	8,47	2,44	8,73
Feb	0,49	14,96	4,68	19,27	8,14	9,29	7,99	3,61	7,10	6,85	5,90	4,52	1,79	5,40
Mar	2,96	16,18	1,23	20,78	3,46	4,80	5,62	6,02	3,59	7,01	7,43	3,85	8,54	8,53
Abr	6,18	16,19	6,05	19,36	3,05	5,40	8,95	4,46	8,93	7,11	1,37	2,48	4,56	5,91
May	1,36	16,31	11,02	15,59	4,58	0,00	0,63	7,41	2,71	9,23	10,89	9,69	6,46	4,11
Jun	5,80	15,15	7,30	16,66	5,91	9,24	6,80	5,41	8,31	6,69	6,97	0,36	4,69	0,72
Jul	3,94	19,79	3,42	16,75	3,18	5,30	2,40	7,95	7,07	5,94	3,37	6,23	7,15	7,52
Ago	0,69	21,90	2,84	15,16	9,79	9,26	1,31	3,59	0,53	13,30	1,22	9,98	4,40	6,02

Sep	5,12	16,08	3,53	23,04	4,29	3,21	6,29	3,39	1,91	3,49	7,67	7,91	6,42	7,63
Oct	8,35	15,28	0,80	16,02	10,69	7,55	0,72	4,80	6,04	7,64	5,95	9,26	1,45	5,46
Nov	6,94	23,57	6,94	16,08	6,68	4,56	6,98	4,72	3,08	0,00	4,35	5,47	2,43	8,20
Dic	7,32	21,94	5,23	15,23	8,08	3,82	4,67	1,48	2,70	8,12	1,88	4,91	6,55	8,06

2011														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	3,77	20,94	3,05	17,82	1,87	8,12	4,49	2,49	6,44	7,85	8,08	0,00	5,27	9,81
Feb	3,30	16,18	2,75	16,13	2,98	6,46	1,35	0,00	2,88	4,75	5,47	8,06	13,19	16,49
Mar	4,56	22,38	9,11	15,91	7,44	6,17	1,70	0,06	4,94	8,43	5,96	2,70	3,28	7,38
Abr	6,29	19,28	7,40	18,96	3,53	4,19	5,37	6,24	5,39	6,02	7,11	7,76	1,04	1,43
May	6,32	17,49	3,23	17,41	5,69	7,02	6,70	7,15	6,36	7,22	3,05	2,80	4,67	4,89
Jun	4,44	19,56	1,20	16,57	10,69	8,78	1,14	6,77	3,37	2,72	10,36	5,84	0,07	8,48
Jul	5,49	21,25	3,38	18,41	1,40	5,49	2,07	7,42	9,07	9,21	1,72	4,72	6,44	3,94
Ago	6,27	16,78	5,46	22,89	6,11	3,62	0,42	5,62	4,49	0,04	8,25	2,98	9,47	7,60
Sep	1,06	17,55	9,85	17,01	8,39	9,50	11,29	2,05	4,12	5,32	5,28	1,75	0,17	6,68
Oct	4,57	20,53	1,26	19,41	6,10	1,98	2,92	3,42	4,42	8,48	8,25	8,60	1,76	8,30
Nov	3,14	20,57	0,58	19,22	0,00	10,15	5,41	11,93	5,83	1,72	1,66	0,37	6,70	12,73
Dic	9,04	15,53	5,91	18,48	3,04	2,76	3,45	5,77	9,45	9,80	10,23	2,35	0,92	3,28

2012														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	2,91	21,69	0,84	15,60	10,65	2,45	6,69	0,85	10,46	6,74	2,60	8,76	2,61	7,17
Feb	8,42	12,72	1,02	17,99	0,30	5,60	4,56	8,26	7,33	7,25	4,10	6,53	8,57	7,36
Mar	2,62	18,50	6,70	12,87	6,94	9,43	2,14	4,18	1,76	6,99	8,22	1,04	7,00	11,61
Abr	11,66	13,95	7,66	16,49	0,62	9,35	6,39	7,77	0,21	2,88	6,25	7,26	1,80	7,73
May	4,42	18,22	9,07	15,66	5,20	0,09	9,40	4,68	2,27	4,19	7,47	1,78	8,62	8,94
Jun	6,60	14,97	11,68	21,87	1,34	2,72	0,63	10,27	0,82	3,09	3,04	2,34	11,51	9,12
Jul	2,88	16,16	2,57	22,92	4,03	10,69	4,26	8,97	5,52	0,25	2,58	3,62	11,14	4,41
Ago	5,99	14,90	0,58	18,96	5,03	5,94	3,02	4,18	12,38	4,45	5,93	6,06	3,02	9,55
Sep	4,40	18,47	2,47	16,18	8,36	6,42	1,13	4,79	7,33	1,00	7,97	6,95	5,73	8,79
Oct	5,89	16,53	10,02	23,15	0,19	2,88	2,52	2,49	7,65	5,95	5,66	2,85	6,66	7,56
Nov	2,61	15,96	3,66	14,59	7,37	11,57	0,31	0,75	5,41	10,79	4,92	9,56	1,52	10,98
Dic	5,17	13,52	5,95	19,18	2,54	9,72	4,69	11,47	1,53	6,28	0,12	3,66	10,16	6,01

2013														
	CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene	3,26	18,07	10,12	12,64	10,00	4,83	5,57	3,05	5,40	9,01	7,07	3,88	4,81	2,30
Feb	7,83	18,04	9,21	14,91	6,99	8,03	5,92	7,15	2,81	7,57	3,12	6,23	0,51	1,68
Mar	6,31	15,91	1,23	16,84	9,47	11,06	2,79	3,27	9,67	3,83	2,62	6,35	2,63	8,02
Abr	3,09	15,23	7,22	19,42	9,57	3,41	0,00	8,63	0,00	3,47	7,91	8,71	6,26	7,07
May	2,40	19,73	9,69	17,60	6,66	8,94	0,22	3,82	6,18	5,63	3,18	4,05	9,08	2,81
Jun	5,49	19,47	9,44	16,95	0,54	1,14	4,96	10,49	7,03	0,00	7,29	6,34	4,98	5,88
Jul	7,87	19,23	2,10	17,62	5,11	7,91	8,79	7,88	8,16	9,34	0,00	1,48	0,14	4,39
Ago	6,14	19,19	8,75	15,00	0,00	7,27	0,16	4,72	5,35	5,46	7,74	8,14	7,23	4,84
Sep	5,38	20,75	7,52	18,65	6,04	4,66	6,41	2,55	0,67	7,45	6,82	0,00	5,16	7,94
Oct	1,57	16,55	7,51	20,81	1,69	4,05	11,01	5,90	1,86	6,12	6,21	0,99	2,62	13,12



Nov	2,11	14,80	10,87	16,31	2,87	7,13	9,29	9,54	1,18	4,88	5,03	9,00	5,72	1,27
Dic	0,38	19,71	6,00	19,25	11,17	2,91	0,93	5,03	7,93	0,50	8,07	1,12	8,86	8,12

		2014													
		CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene		5,43	18,37	5,85	20,70	2,75	5,59	6,66	2,45	7,01	6,42	4,65	5,23	1,70	7,19
Feb		7,43	15,78	3,76	19,49	0,70	2,56	6,77	8,83	10,81	11,82	0,77	3,46	4,32	3,49
Mar		6,42	15,26	8,16	18,68	1,89	3,29	6,83	9,89	4,97	3,08	5,00	1,50	5,01	10,00
Abr		8,85	18,37	6,69	14,59	2,52	3,86	7,57	9,57	2,02	1,47	8,43	1,58	6,43	8,06
May		2,45	15,68	1,33	14,36	9,18	8,23	6,00	8,06	2,93	8,94	6,78	3,21	9,53	3,31
Jun		7,72	17,66	6,01	18,60	3,89	4,48	5,35	4,53	2,31	6,96	7,53	6,72	1,81	6,43
Jul		6,88	20,29	1,14	17,49	3,91	5,81	0,00	3,69	1,64	10,13	0,20	13,18	6,53	9,11
Ago		7,71	19,90	0,83	14,15	5,94	4,27	3,55	9,20	5,12	9,38	9,22	1,63	7,00	2,09
Sep		7,96	17,54	1,34	14,54	8,24	4,44	8,87	6,25	3,23	1,28	6,51	7,74	3,48	8,58
Oct		0,48	20,23	9,62	17,02	1,40	3,41	9,14	6,32	7,12	1,96	7,71	1,90	4,73	8,96
Nov		4,92	14,21	10,37	17,74	4,37	6,63	5,82	9,89	7,82	5,95	1,73	1,19	2,90	6,48
Dic		1,57	17,72	3,90	14,28	0,19	0,27	2,46	5,78	8,54	15,01	10,99	8,79	2,43	8,08

		2015													
		CORN	POTA	PEAS	ONIO	MUNG	BARL	SWHT	OATS	ORCD	SGBT	TOMA	LETT	CRRT	PAST
Ene		3,28	20,94	8,30	16,64	2,80	5,05	6,19	0,03	8,10	6,11	6,83	3,32	4,31	8,08
Feb		9,36	17,54	9,50	21,90	1,30	0,13	7,51	0,73	4,55	10,03	8,98	4,22	2,39	1,85
Mar		7,53	15,61	6,29	22,15	7,58	8,04	5,09	1,12	3,10	4,48	0,00	4,58	6,78	7,64
Abr		3,20	23,25	9,19	16,37	4,24	1,34	6,47	0,09	9,05	3,07	4,24	4,59	6,29	8,61
May		7,25	17,38	2,18	19,47	5,96	6,56	5,08	3,53	3,36	9,34	9,13	3,21	1,35	6,19
Jun		2,42	16,77	6,71	16,49	10,99	3,48	9,33	5,69	0,76	9,70	2,69	2,65	0,08	12,25
Jul		2,77	16,35	1,77	22,65	2,80	4,96	8,88	4,91	7,67	8,37	7,29	0,79	1,24	9,55
Ago		10,57	18,37	4,92	18,26	3,72	2,23	7,09	7,30	1,31	3,41	2,46	11,86	4,46	4,03
Sep		5,08	18,41	6,78	21,36	8,11	5,57	5,59	4,54	3,13	5,92	2,96	4,55	0,36	7,66
Oct		10,20	19,83	10,34	15,40	0,36	0,38	2,25	1,45	1,09	4,63	7,96	6,85	10,40	8,86
Nov		9,49	18,69	1,18	13,77	2,11	8,08	9,48	6,25	4,28	0,00	9,09	2,74	10,84	3,99
Dic		11,51	15,13	4,55	17,08	2,50	7,62	2,34	10,34	2,03	10,07	5,42	1,74	2,09	7,58