

**MODELO DE UN BALANCE HÍDRICO Y ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA  
UTILIZANDO HERRAMIENTAS SIG**

**AUTOR, JORGE HENRY CARMONA ALZATE**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2018**

**MODELO DE UN BALANCE HÍDRICO Y ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA  
UTILIZANDO HERRAMIENTAS SIG**

**AUTOR, JORGE HENRY CARMONA ALZATE**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar  
al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

Luz Stella Galindo Duque, amada esposa, amiga y compañera de mil batallas, por su apoyo incondicional y confianza a prueba de todo, porque nunca ha perdido su fe.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	11
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. JUSTIFICACIÓN .....	15
4. MARCO TEÓRICO.....	16
4.1. BALANCE HÍDRICO .....	16
4.2. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE.....	17
4.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	18
4.4. ANTECEDENTES .....	20
5. METODOLOGÍA.....	29
5.1. TIPO DE TRABAJO .....	29
5.2. PROCEDIMIENTO.....	29
5.2.1. Fase 1. Selección del Modelo y Datos Básicos. ....	29
5.2.2. Fase 2. Implementación.....	35
6. RESULTADOS .....	84
7. CONCLUSIONES.....	92
8. RECOMENDACIONES .....	93
9. BIBLIOGRAFÍA .....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Árbol de ArcCatalog con los datos básicos para la modelación .....	35
Figura 2: Mapa con los datos básicos para la modelación .....	36
Figura 3: Tablas con datos de Temperatura (°C).....	37
Figura 4: Tabla con datos de Precipitación.....	37
Figura 5: Herramienta "BalClima" con las rutinas para obtener los insumos para el modelo del Balance Hídrico. ....	39
Figura 6: Establecimiento del Área de Trabajo .....	39
Figura 7: Establecimiento del tamaño de pixel.....	40
Figura 8: Ventana del Script 1. MDT y mapa ráster del Modelo Digital del Terreno .....	41
Figura 9: Ventana del Script 2. Temperatura_Isabellina .....	42
Figura 10: Mapas de temperatura (°C) mensual generados con la fórmula de Isabellina.....	42
Figura 11: Ventana del Sript 3. Interpolar_Datos .....	49
Figura 12: Mapas de Temperatura Mensual generados a partir de datos IDEAM, con el Script 3. Interpolar_Datos.....	49
Figura 13: Mapas de Precipitación Mensual generados a partir de datos IDEAM, con el Script 3. Interpolar_Datos.....	56
Figura 14: Ventana del Script 4. ET_Thornthwaite .....	62
Figura 15: Mapas de Evapotranspiración Potencial generados con el Script 4. ET_Thornthwaite.....	63
Figura 16: Mapa de Capacidad de Campo .....	69
Figura 17: Menú del Balance Hídrico .....	70
Figura 18: Ventana del Script 5. Balance_Hidrico_Directo .....	70
Figura 19: Mapas de Exceso de agua mensual.....	71
Figura 20: Mapas de Déficit de agua mensual.....	78
Figura 21: Menú de la Clasificación Climática .....	84
Figura 22: Ventana del Script 6. Clasific_Clima_Thornthwaite .....	84
Figura 23: Mapa Índice de Aridez en climas húmedos. ....	85
Figura 24: Mapa Índice de Aridez en climas secos.....	86

Figura 25 Mapa de Clasificación Climática a partir de la Disponibilidad de  
Humedad: .....86

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Algunos autores y sus metodologías para el cálculo de la Evapotranspiración .....	16
Tabla 2: Humedad Disponible - Thornthwaite .....	18
Tabla 3: Índice de Aridez - Thornthwaite .....	18
Tabla 4: Índice de Humedad – Thornthwaite .....	18
Tabla 5: Fórmula de Isabellina.....	31
Tabla 6: Promedio de horas de luz (N) para diferentes latitudes para el día 15 del mes.....	33

## **GLOSARIO**

**Balance Hídrico:** Es la cuantificación de lo que entra y lo que sale en términos hídricos o de agua.

**Clasificación Climática:** Clasificación de un territorio en rangos o áreas caracterizadas por parámetros homogéneos de temperatura y humedad.

**Precipitación:** Se refiere a la caída de agua en una región (lluvia) y se expresa en milímetros (mm).

**Temperatura:** Se refiere a la cantidad física de calor en una región dada, expresada en grados centígrados (°C).

**Evapotranspiración:** Es la pérdida de humedad del suelo o del ambiente en una región dada y se expresa en milímetros (mm)

**Escorrentía:** Es la cantidad de agua que escurre por la superficie del suelo, después que este ha completado su capacidad de almacenamiento y se expresa en milímetros (mm)

**Capacidad de Campo:** Es la capacidad que tienen los suelos de almacenar y retener agua y se expresa en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

**Sistemas de Información Geográfica:** unión de herramientas informáticas como gestores de bases de datos, diseñadores de bases de datos enmarcados en parámetros cartográficos, geográficos y geométricos con la capacidad de simular el mundo real para realizar un análisis de la información para un objetivo específico.



## RESUMEN

El presente trabajo se trata de la utilización de herramientas SIG para que, a través de una serie de procesos se pueda llegar a la Clasificación Climática por la metodología de Thornthwaite.

Se buscó una metodología sencilla, donde la consecución de los datos no representara ningún tipo de complejidad y que realmente ayudara a los profesionales de los recursos naturales a obtener información de manera fácil, rápida y válida. Por tal motivo se escogió la propuesta de Thornthwaite [4], que solamente requiere de los datos de Temperatura y precipitación para llegar hasta la Clasificación Climática.

Se desarrollaron rutinas en el lenguaje de programación Python, orientado al ambiente del SIG ArcGis, que llevan paso a paso todo el proceso de generación de los mapas necesarios para modelar la Evapotranspiración, el Balance Hídrico y la Clasificación Climática.

Al final, con la ayuda del aplicativo "Add-in" se diseñó una pequeña barra de tareas en ArcMap, de tal manera que facilite la ejecución del modelo.

**PALABRAS CLAVES:** Clasificación Climática, Python, ArcGis, ArcMap, Thornthwaite, Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración, Balance Hídrico.

## **ABSTRACT**

The present work deals with the use of GIS tools so that, through a series of processes, the Climate Classification can be achieved by the Thornthwaite methodology.

A simple methodology was sought, where the achievement of the data did not represent any kind of complexity and would really help natural resource professionals to obtain information easily, quickly and validly. For this reason, the Thornthwaite [4] proposal was chosen, which only requires temperature and precipitation data to reach the Climate Classification.

Routines were developed in the Python programming language, oriented to the environment of the ArcGis GIS, which take step by step the whole process of generating the necessary maps to model the Evapotranspiration, the Water Balance and the Climatic Classification.

At the end, with the help of the "Add-in" application, a small taskbar was designed in ArcMap, in such a way as to facilitate the execution of the model.

**KEY WORDS:** Climate Classification, Python, ArcGis, ArcMap, Thornthwaite, Precipitation, Temperature, Evapotranspiration, Water Balance.

## INTRODUCCIÓN

En las entidades rectoras y administradoras de los recursos naturales, se llevan a cabo proyectos de ordenamiento y planificación para el uso adecuado y sostenible del territorio. Actividades tales como zonificación de unidades homogéneas del terreno, propuestas de uso adecuado del terreno, propuestas de cultivo, diagnóstico de microcuencas abastecedoras de acueducto, identificación y estrategias de manejo de zonas vulnerables a degradación, propuestas en el diseño de sistemas de riego, etc. requieren del conocimiento de factores climáticos como precipitación mensual, evapotranspiración, suficiencia de agua, escurrimiento y de ser posible identificación de caudales aproximados de las corrientes.

El presente modelo es un pequeño aporte a todos estos procesos, consciente de que en la mayoría de las ocasiones no se dispone de todos los datos básicos que requieren las fórmulas propuestas por algunos autores, se escogió la propuesta por Thornthwaite, que además de ser usada ampliamente en gran número de trabajos en el mundo, es también usada en Colombia con gran éxito en entidades como el IDEAM.

La fórmula propuesta por Thornthwaite para obtener la Evapotranspiración Potencial, solo requiere de los datos de Temperatura y para realizar el Balance hídrico el único dato adicional es de precipitación. Entonces con sólo la necesidad de estos dos datos es posible llegar hasta la clasificación climática, lo que facilita enormemente el trabajo de un temático ambiental.

El propósito del presente trabajo no es la programación de un aplicativo propiamente dicho, sino la utilización de las herramientas SIG, por lo que el modelo tiene algunas limitaciones en el manejo de las rutinas que requieren algo de cuidado y una breve inducción inicial para poder utilizar estas herramientas.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El análisis del balance hídrico es un factor importante en la planificación del uso del suelo, ya sea en proyectos agrícolas o pecuarios, sistemas de riego, programas forestales, hidroeléctricas, determinación de zonas de vulnerabilidad y riesgo o como lo menciona D. Pumo [1], para estudios y análisis relacionados con el suministro de agua y manejo de cuencas. De acuerdo con CLARO RIZO [2] el análisis del componente climático de una región constituye uno de los elementos más importantes dentro del patrimonio de los recursos naturales renovables y ofrece información muy importante y necesaria para el manejo de la tierra, desde el punto de vista productivo.

Así mismo, el uso del balance hídrico y la zonificación climática, son herramientas de gran importancia y frecuente uso en las instituciones rectoras de los recursos naturales, tales como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), de igual manera, entidades de carácter privado pero que también fundamentan su razón de ser en la planificación del uso del suelo, deben tener conocimiento de los factores climáticos que afectan un área determinada. Sin embargo, tener a la mano esta información no es para nada fácil y mucho menos bajarla a una resolución adecuada para la escala de trabajo requerida en un proyecto en particular.

Elaborar un excelente balance hídrico y zonificación climática, requiere de mucho trabajo en cuanto a la recolección de los datos climatológicos y el procesamiento de los mismos, además de uno o varios profesionales idóneos en este tema. Económicamente, este tipo de proyectos son costosos y frecuentemente hay dificultades en la disponibilidad de los datos por una u otra razón, ya sea por los costos de adquisición de datos actualizados o porque, aunque se tengan los recursos suficientes, las estaciones climatológicas no están disponibles o no existen en un área de trabajo o, los datos son insuficientes o muy discontinuos en el tiempo. Es de resaltar también el tiempo que se puede llevar la elaboración de un balance hídrico.

Aun así, para las CAR e instituciones públicas y privadas cuyo resorte se enmarca en la planificación del uso del suelo o prevención de riesgos, es indispensable disponer de esta información; pero en la mayoría de los casos, están supeditados a usar la información de algún balance contratado tiempo atrás, pueden ser años, o a recurrir a algún informe de un Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca (POMCA) o un Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de algún municipio, entre otras fuentes, que de todos modos es muy posible que no tengan la escala de trabajo requerida o inclusive la cobertura necesaria.

Para una zona como la conformada por el Departamento de Caldas, área localizada en el Centro del país, en la Región Andina, de gran relevancia ambiental dada su

heterogeneidad espacial y por ende amplia gama de zonas climáticas y biodiversidad ¿cómo podría, un investigador o profesional en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso del territorio, modelar un balance hídrico de cualquier parte del territorio, con información básica disponible, de una manera fácil y ágil, de tal manera que sea insumo oportuno para la toma de decisiones ?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo de un Balance Hídrico y Zonificación Climática, utilizando herramientas SIG.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener los insumos básicos para la modelación del balance hídrico.
- Determinar la clasificación climática para la zona de estudio.
- Crear una interfaz gráfica para correr el balance hídrico desde la barra de herramientas del SIG ArcGis.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día existen muchos aplicativos SIG que ofrecen dentro de sus herramientas, módulos hidrológicos que ayudan a los usuarios a realizar interpolación de datos de precipitación o temperatura, entre otros, a partir de información registrada y tabulada en diferentes estaciones meteorológicas georreferenciadas dentro de un territorio. Según GRIMALDOS MOJICA [3], actualmente se adelantan distintos trabajos hidrológicos, para resolver problemáticas de ingeniería bajo diversas tecnologías.

Una de las tecnologías más conocidas y comercializadas es la de la casa “ESRI”, éste es un software de licencia paga muy utilizado en la mayoría de instituciones administradoras de los recursos naturales, también existe software SIG de uso libre, dentro de los que se encuentra el QGis (Quantum GIS), gvGis y otros. La mayoría de estos software ofrecen módulos o aplicativos para trabajar, en formato ráster, interpolaciones de datos, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, es difícil encontrar, o no hay, un aplicativo que permite de manera conjunta utilizar estos módulos o rutinas para generar un producto terminado como un balance hídrico o clasificación climática.

El propósito del presente trabajo, es generar una herramienta que permita a profesionales en la planificación del uso del suelo, realizar una modelación de un balance hídrico y zonificación climática de una manera sencilla y ágil, que se pueda realizar para cualquier zona del territorio a partir de información cartográfica básica y con datos climatológicos que se pueden obtener fácilmente de la red (internet) para su procesamiento, pero también que funcione con datos obtenidos de una manera más elaborada y más reciente para resultados de mayor precisión y confiabilidad.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico en nuestro planeta es tan simple como entender que, es la cuantificación de lo que entra y lo que sale en términos hídricos o de agua, o como lo expresa Claro Riso [2], se trata de la evaluación de las ganancias y pérdidas de agua sufridas por el suelo en períodos de tiempo definidos, el balance hídrico especifica que el total de agua que penetra a un sistema, debe ser igual al agua que sale de él, más la diferencia entre los contenidos final e inicial; es decir, ingreso = egreso + saldo.

El principio de un modelo hidro climático se basa en el ciclo del agua en la atmósfera, entre los aportes en forma de lluvia o precipitación y las salidas en forma de evapotranspiración, como lo menciona UPM [8], partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada, podemos estudiar el balance del agua en el suelo a lo largo del año.

Según MARIN VALENCIA [9], Colombia no cuenta con mediciones directas de ETP, por lo cual se hace estrictamente necesaria su correcta evaluación mediante las fórmulas teóricas y/o empíricas que ofrecen diferentes autores.

En la siguiente tabla se mencionan algunos autores cuyas metodologías han sido ampliamente utilizadas alrededor del mundo, además de esto se muestra las variables climáticas requeridas para el cálculo de la Evapotranspiración.

*Tabla 1: Algunos autores y sus metodologías para el cálculo de la Evapotranspiración*

Método	Variables Climáticas					
	Temperatura	Radiación solar	Velocidad del viento	Humedad relativa	Precipitación	Altitud
Thornthwaite-Wilm (1944)	X					
Penman-Monteith (1949)	X	X	X			
Turc Anual (1954)	X				X	
Hargreaves (1956)	X		X	X		X
Turc (1961)	X	X		X		
Jensen-Haise (1963)	X	X				X
Christiansen (1966)	X	X	X	X		X
García-López (1970)	X			X		
Blaney-Criddle (1977)	X		X	X		



Para obtener el balance hídrico de una región determinada se parte del conocimiento de los regímenes de precipitación y evapotranspiración, como lo menciona Claro Riso [2], a partir de estos datos se puede conocer el balance del agua en el suelo a lo largo del año y la ecuación general del balance hídrico, en un suelo con vegetación sería:

$$P = ET + E + I + VR$$

Dónde:

P	=	Precipitación
ET	=	Evapotranspiración
E	=	Escorrentía
I	=	Infiltración
VR	=	Variación de la Reserva (Ri – Ri-1)
Ri	=	Reserva final
Ri-1	=	Reserva inicial

## 4.2. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE

Thornthwaite [4], consideró la clasificación climática en términos de la Evapotranspiración Potencial y la Humedad Disponible, esta última se compone de los índices de aridez en climas húmedos y de aridez en climas secos, a partir del balance hídrico.

**Índice Aridez en Climas Húmedos (Iah):** Está dado por la relación entre el exceso de agua anual (Ex) y la evapotranspiración potencial anual (Etp), en porcentaje.

$$I_h = (Ex/Etp) * 100.$$

**Índice de aridez en Climas Secos (Ias):** Está dado por la relación entre la deficiencia anual de agua (D) y la evapotranspiración potencial anual (Etp) en porcentaje.

$$I_a = (D/Etp) * 100$$

**Humedad Disponible (Im):** Está dado por la relación de las dos anteriores según la siguiente fórmula.

$$I_m = I_h - I_a * 0.6.$$

A partir de estos índices se define la clasificación climática

de Thornthwaite, como se puede ver en las siguientes tablas.

Tabla 2: Humedad Disponible - Thornthwaite

<b>Humedad Disponible (Im)</b>	<b>Tipo Climático</b>
100,1 y más	Super húmedo
80,1 a 100,0	Muy húmedo
60,1 a 80,0	Húmedo
40,1 a 60,0	Moderadamente húmedo
20,1 a 40,0	Ligeramente húmedo
0,1 a 20,0	Semihúmedo
-20,0 a 0,0	Semiseco
-40,0 a -20,1	Semiárido
-60,0 a -40,1	Árido

Tabla 3: Índice de Aridez - Thornthwaite

<b>Índice de Aridez Climas Húmedos (Iah)</b>	<b>Déficit de agua</b>
0,0 a 16,7	Nulo o pequeño exceso de humedad
16,7 a 33,3	Moderado exceso de humedad
Mayor que 33,3	Gran exceso de humedad

Tabla 4: Índice de Humedad – Thornthwaite

<b>Índice de Aridez Climas Secos (Ias)</b>	<b>Déficit de agua</b>
0,0 a 10,0	Nula o pequeña falta de humedad
10,0 a 20,0	Moderada falta de humedad
Mayor que 20,0	Gran falta de humedad

### 4.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica -SIG- se dinamizaron enormemente los procesos en casi todas las áreas del conocimiento, especialmente en lo que tiene que ver con la administración y gestión de los recursos naturales.

Antes de los SIG muchas de las tareas que tenían que realizar los expertos en la gestión de los recursos naturales y el medio ambiente, demandaban un tiempo considerable en la articulación de las diferentes variables para lograr obtener un resultado a partir de la integración de éstas.

La forma de articular y comparar los diferentes datos espaciales de la naturaleza y su contexto antrópico y cultural, consistía en superponer transparencias de cada una de estas variables y con base en la observación y el conocimiento experto se tomaban decisiones y aplicaban las diferentes matrices del conocimiento para poder obtener nuevos productos que aportaran nuevo conocimiento para la toma de decisiones y planificación.

Para las modelaciones de escenarios posibles en la naturaleza, como el balance del agua en el suelo, o para la clasificación de zonas de vida, como por ejemplo con el sistema Holdridge, ha sido necesario recurrir a gráficas y tablas en las que identifica todas las variables que participan en el modelo, una y otra vez.

Hoy en día todo esto ha cambiado considerablemente, de acuerdo con Peña J. [14], los SIG son una valiosa herramienta tecnológica que permite gestionar, organizar y administrar la información espacial, que surgió de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar preguntas de modo inmediato.

Los SIG son la unión de herramientas informáticas como gestores de bases de datos, diseñadores de bases de datos enmarcados en parámetros cartográficos, geográficos y geométricos con la capacidad de simular el mundo real para realizar un análisis de la información para un objetivo específico.

Al igual que lo expresa Peña J. [14], al incluir el término “geográfico” y “cartográfico” se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el mundo real.

Con todas las herramientas que nos permiten los SIG, tenemos la enorme posibilidad de sistematizar todas estas variables, organizar las matrices posibles y crear rutinas a través de lenguajes de programación compatibles con los SIG, de tal manera que la creación de un modelo sea replicable o fácilmente modificable o adaptable a las diferentes posibilidades, ambientes o disponibilidad de información, además de poder realizar validaciones de los resultados de manera fácil, versátil y sobre todo en tiempos mucho más cortos que con los métodos antiguos.

#### 4.4. ANTECEDENTES

Con el auge de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son muchos los trabajos realizados con herramientas SIG encaminados a la modelación o cálculo del balance hídrico de una región en particular, en internet se pueden encontrar muchos modelos realizados con las diferentes herramientas en el mercado, tanto comerciales como software libre.

Algunos casos son los publicados por [Gidahatari](#), consultora en recursos hídricos especializado en modelamiento numérico, del Perú y quienes tienen varias publicaciones en la web acerca del tema del modelamiento de los recursos hídricos y climáticos, su portal en youtube se puede encontrar en el siguiente enlace: [https://www.youtube.com/channel/UCKeFq9ZJC\\_3Z\\_i6IR5Xeygw](https://www.youtube.com/channel/UCKeFq9ZJC_3Z_i6IR5Xeygw).

Un caso particular de Gidahatari es “¿Como hacer un balance hídrico en cuencas con SIG?” publicado el 29 de abril de 2015 en la siguiente dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=XgFLOyZuxUE>. Esta publicación tiene cosas muy interesantes como la utilización del aplicativo LocClim (abreviatura de Clima Local) desarrollado por la FAO, el cual proporciona estimaciones de las condiciones climáticas promedio en lugares para los cuales no hay observaciones disponibles; con este aplicativo se logran descargar los datos climáticos de las estaciones meteorológicas mundiales climáticos procedentes de diferentes fuentes y en diferentes formatos.

En general, en la web se encuentran muchas publicaciones para generar mapas de isoyetas, isothermas o evapotranspiración con herramientas SIG.

#### **An automatic tool for reconstructing monthly time-series of hydroclimatic variables at ungauged basins**

D.Pumo [1], en su resumen menciona la elaboración y metodología empleada de un complemento SIG para una evaluación rápida de variables hidroclimáticas, sin ser explícito en los diferentes modelos utilizados para determinar estas variables, ni qué software utilizó para correr el complemento, por ejemplo el modelo de Thornthwaite [4] para la Evapotranspiración potencial, Allen 1984 en D. Pumo [1] para derivar las series mensuales de Evapotranspiración real y estimaciones de humedad del suelo y el Sistema de Información Geográfica seleccionado es el QGIS. En su introducción expone claramente la importancia para los científicos investigadores de la disponibilidad de datos hidroclimáticos y el conocimiento de los componentes del ciclo del agua para estudios relacionados con el suministro de agua y manejo de cuencas, hidroelectricidad agricultura y prácticas de riego, a su vez, el problema al que se enfrentan por la falta de instrumentación en las cuencas fluviales o la discontinuidad espacial y temporal de las estaciones, para obtener datos de

variables hidroclimáticas. Una alternativa son los datos obtenidos de sensores remotos, sin embargo, tienen sus limitaciones especialmente en el aspecto temporal y se requiere de conocimientos técnicos básicos por parte de los usuarios. Estas limitaciones han llevado a científicos e investigadores a experimentar con métodos indirectos empíricos y regresivos para determinar variables hidroclimáticas y aunque estos modelos son antiguos, se han utilizado frecuentemente para diferentes problemas de la gestión del agua. Según D.Pumo [1] el uso de los SIG brinda muchas ventajas en el tratamiento de estos datos hidrológicos y muchos de estos aplicativos han sido diseñados con este fin específico. El trabajo presentado por D.Pumo [1] está encaminado a integrar modelos indirectos con la tecnología SIG para determinar seis variables hidrológicas (precipitación, temperatura, escorrentía, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y almacenamiento de humedad del suelo) en cualquier cuenca de la región de Sicilia, Italia. El modelo propuesto es un complemento (Plug in) llamado Tri.Mo.Ti.S. (Modelo de Trinacria para Series de tiempo mensuales, donde Trinacria es el antiguo nombre de Sicilia). En conclusión, este modelo representa una buena contribución en el campo hidroclimático conjugado con las tecnologías de los SIG, proporcionando herramientas fácilmente accesibles y disponibles.

### **Calculation of past and present water availability in the Mediterranean Region and future estimates according to the Thornthwaite water-balance Model**

Según Karsili [6], una de las regiones más sensibles en el aspecto climático es la del mediterráneo, donde es esencial modelar el balance hídrico para comprender mejor los impactos del cambio climático. De acuerdo con IPCC 2007 en Karsili [6], durante los próximos años se espera un calentamiento de 0.2 °C a escala global. Karsili [6] enfoca su estudio en el aumento de la temperatura en el futuro, manteniendo la precipitación igual que en el presente.

Como dice Karsili [6], el balance hídrico representa el resultado del ciclo del agua mediante el flujo del agua desde la atmósfera a la superficie y viceversa, la primera entrada de este modelo es la evapotranspiración, la cual está en función de la temperatura y la latitud utilizando fórmulas propuestas por Thornthwaite y el enfoque del balance hídrico de Thornthwaite [4] se puede aplicar desde las regiones más pequeñas a las más grandes ubicadas en cualquier parte del mundo.

El objetivo del estudio de Karsili [6] es calcular la evapotranspiración potencial para desarrollar un modelo de balance de agua, utilizando para ello el SIG ArcGis (ESRI). Este aplicativo es uno de los más conocidos y utilizados a nivel mundial y ofrece una gran cantidad de herramientas de procesamiento con las cuales se pueden realizar interpolaciones según varias metodologías y llevar a cabo ecuaciones a nivel espacial mediante algebra de mapas, con lo cual se pueden lograr excelentes resultados en la modelación de los fenómenos de la naturaleza como el balance hídrico.

Para calcular el balance hídrico, Karsili [6] estimó el almacenamiento mensual del suelo, el cambio de almacenamiento (almacenamiento de agua en el suelo mensual menos el del mes anterior), la evapotranspiración real y el excedente o déficit de agua, conforme a la fórmula propuesta por Thornthwaite [4]. En su trabajo, Karsili hace una buena descripción de la temperatura, precipitación, disponibilidad de agua, cobertura y uso del suelo de la región mediterránea, enfocado en el cambio climático, su efecto sobre la disponibilidad del agua en el suelo y su influencia en el uso y la cobertura del suelo, pero también la presión que ciertos usos del territorio están causando sobre los recursos hídricos de la región objeto del estudio.

Los datos de precipitación y temperatura los obtuvo del sitio web NOAA (Earth System Research Laboratory, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>), para un periodo de tiempo de dos series de 30 años (1910-1940 y 1980-2010), los datos de contenido de agua disponible los tomó de la “Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2”, del portal de suelos de la FAO (<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/>).

Con base en la metodología de Thornthwaite [4] y los datos de entrada para poder aplicarla, Karsili [6] utilizó la herramienta Model Builder de ArcGIS 10, con lo que se puede automatizar, de cierta manera, las rutinas que permiten iterar y ejecutar todos los algoritmos y ecuaciones necesarios para realizar el balance hídrico y obtener las salidas deseadas. Con las salidas obtenidas, pudo hacer comparaciones de los diferentes parámetros climáticos presentes y pasados.

Entre las conclusiones de Karsili [6], se resalta que la metodología de Thornthwaite [4] permite su implementación con las herramientas Model Builder de ArcGIS, obteniendo resultados muy realistas. Su estudio es útil para comprender los impactos del aumento de la temperatura en el balance hídrico y para evaluar las ubicaciones favorables y de impacto crítico en la región. El principal resultado de la metodología del balance hídrico de Thornthwaite [4] es el PET, que es significativo para la determinación de otros elementos del balance hídrico (como el almacenamiento, el excedente, el déficit y la evapotranspiración real).

### **Development of a GIS-based Spatially Distributed Continuous Hydrological Model and its First Application**

K. Soulis & N. Dercas [7], desarrollan una herramienta basada en Sistemas de Información Geográfica, para modelar un balance hídrico. El área de estudio es una región del Mediterráneo, en la isla de Naxos, una isla del Mar Egeo; según los autores, en estas islas del Mediterráneo, con aumento de actividades turísticas, las malas prácticas de uso del agua durante las últimas décadas han afectado el

suministro de agua y la intrusión del agua de mar a los acuíferos, han aumentado la escasez de agua dulce.

El modelo fue desarrollado con base en ArcGis (ESRI) utilizando la funcionalidad de ArcObjects, los objetos se crearon utilizando la interfaz estándar para programación orientada a componentes COM, de Microsoft.

Los datos de entrada que emplea el modelo son un Modelo Digital del Terreno, una capa (o mapa) de Suelos, la Cobertura vegetal y datos de Precipitación y Temperatura de estaciones meteorológicas, obviamente todos circunscritos a la región de estudio. El enfoque para calcular el balance hídrico consiste en la separación de la precipitación diaria en la escorrentía e infiltración directa y luego de eso, la determinación de la humedad del suelo, la evapotranspiración real y la recarga del acuífero.

Emplearon el método Número de Curva del Servicio de Conservación del Suelos (SCS CN) de los Estados Unidos para calcular el Exceso de lluvia, teniendo en cuenta el uso del suelo, el tipo de suelo y la humedad relativa del suelo. Para la evapotranspiración Potencial se utilizó el método Penman-Monteith, mismo de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), para la Evapotranspiración de cultivo, se relaciona la Evapotranspiración Potencial con un coeficiente de cultivo y para la Evapotranspiración Real se calcula mediante el uso de un coeficiente de estrés hídrico de la disponibilidad de agua en la evapotranspiración de cultivo.

Según los autores, los datos de entrada se pueden preparar, almacenar y gestionar fácilmente utilizando herramientas de preprocesamiento y SIG, de igual manera los datos de salida se pueden almacenar, administrar y analizar de manera efectiva. Este modelo se puede aplicar a diferentes escenarios o regiones con la simple adición de los datos de entrada exigidos por el programa.

### **Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran**

La mayoría de las fórmulas empíricas para calcular la Evapotranspiración requieren de muchos datos, como temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, precipitación o altitud, la consecución de estos datos requiere de un esfuerzo grande, puesto que no siempre hay la disponibilidad o la densidad de estaciones climáticas es insuficiente, además, puede llegar a ser muy costoso. Según S. Ahmadi & H. Fooladmand, [11], la ecuación de Penman-Monteith es el método más común para estimar la evapotranspiración, pero requiere muchos datos meteorológicos y en una región dada, son pocas las estaciones con datos

meteorológicos adecuados, también comentan que configurar una estación que registre los datos meteorológicos requeridos por esta ecuación, es costoso.

Según Karsili [6], la ecuación para estimar la evapotranspiración propuesta por Thornthwaite, se puede aplicar en cualquier lugar del mundo y como dicen S. Ahmadi & H. Fooladmand [11], éste es un método más simple para calcular la evapotranspiración ya que es un método basado en la temperatura.

S. Ahmadi & H. Fooladmand [11], realizaron la estimación de la evapotranspiración para la provincia de Fars, que se encuentra en la parte sur de Irán, mediante la ecuación de Thornthwaite calibrada espacialmente según el método de Penman-Monteith (como método estándar de referencia para calcular la Evapotranspiración) para cada mes del año, utilizando los datos meteorológicos de siete estaciones sinópticas en la provincia de Fars y siete estaciones sinópticas fuera de esta provincia.

La utilización de las herramientas SIG para este estudio fue la interpolación espacial en formato ráster utilizando el método de distancia inversa (IDW).

Como resultados de este estudio, según los autores, fue la demostración que el mismo análisis podría usarse en otras partes del país o en cualquier lugar del mundo y resultaría en una programación eficiente de los recursos hídricos para la agricultura.

### **Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil**

En este documento, Sparovek & D. Dourado [12], describen un software desarrollado para modelar la clasificación climática no asistida de Koeppen, basada solo en datos de temperatura y precipitación media mensual. Este software fue integrado con herramientas SIG y con esta combinación se realizó el primer mapa climático de Brasil. Posteriormente, el mapa fue comparado con uno ya existente de la FAO/SDRN de 1997, mostrando coincidencias solo en la información menos detallada.

Según los autores, la fórmula propuesta por Koeppen, ha sido modificada por varios autores para fines específicos o localidades, pero sin cambiar los conceptos originales de clasificación y la utilización de las herramientas SIG pueden mejorar la calidad y precisión de los mapas temáticos regionales de la clasificación climática de Koeppen. El software descrito en el trabajo de Sparovek & D. Dourado [12] utiliza una cantidad grande de estaciones climáticas para obtener un mapa climático global de Brasil.

Este software se desarrolló en Microsoft Visual Basic y los datos de entrada se suministran en formato de texto (Datos de Precipitación y Temperatura).



Obviamente para que dicha información sea georreferenciada, otros datos de entrada son las coordenadas de las estaciones climáticas. Las fuentes de estos datos fueron la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FaoClim), el Instituto Brasileño de Meteorología (Inmet) y el Centro Integrado de Información Agroclimática del Estado de São Paulo, Brasil (CIIAGRO).

### **Índice de Disponibilidad Hídrica (IDH), Metodología de Cálculo y Aplicación en Colombia**

En el trabajo de Claro Rizo [2], se pone de manifiesto la importancia de la realización de un balance hídrico para determinar el potencial climático y agroclimático de una región, puesto que constituye uno de los elementos más importantes dentro del patrimonio de los recursos naturales renovables. El conocimiento de estas variables en un área determinada proporciona fundamentos para una buena planificación en el sector agropecuario y forestal.

En concordancia con Claro Rizo [2], ha sido iniciativa del IDEAM proporcionar al territorio colombiano de información agrometeorológica que apoye la planificación del territorio en el uso racional de la tierra y establecer el potencial productivo de los recursos naturales.

Para el trabajo desarrollado por Claro Rizo [2], se siguió método del balance hídrico directo propuesto por Thornthwaite y Matter, 1955 (en Claro Rizo [2]), de acuerdo con los autores, en este modelo cuando la precipitación es deficitaria, consume el agua de la reserva del suelo a una tasa proporcional para abastecer la demanda de la evapotranspiración potencial hasta agotar dicha reserva.

El modelo informático desarrollado por los autores de este trabajo se basó en tres componentes, un motor de bases de datos, Oracle 9.i, para realizar los cálculos de la información alfanumérica, mediante el lenguaje de consultas SQL, para calcular la información geográfica se hizo a través del software ArcMap de ArcGis, mediante programación en Visual Basic y el último componente, para visualizar los productos en internet, consistió en el uso del software ArcIMS y programación en javascript.

### **A GIS tool for hydrogeological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments**

Portoghese [5], implementa una herramienta SIG para evaluar el balance hidrogeológico a los sistemas de superficie y subsuperficial para una región costera del sur de Italia, con el fin de proporcionar estimaciones de la recarga de aguas subterráneas en ambientes áridos y semiáridos. Para el balance hídrico superficial, estimó como entrada del ciclo del agua, las lluvias y los posibles sistemas de riego, y las salidas la evapotranspiración y escorrentía superficial. Para el balance de agua

subterránea estimó las extracciones de agua para diferentes usos junto con los flujos de otros cuerpos y salidas costeras.

El estudio de Portoghese [5], estuvo motivado por la necesidad de desarrollar un medio confiable para estimar el balance hídrico del suelo en una escala de cuencas hidrográficas, el modelo propuesto se implementó usando el lenguaje de scripts AVENUE orientado a objetos, este lenguaje de programación se encontraba disponible con un aplicativo de Sistemas de Información Geográfica denominado ArcView de la casa (ESRI), la última versión de este aplicativo fue la 3.3, en el año 2002 aproximadamente, después llegó al mercado ArcGis (desarrollado también por ESRI) y reemplazó al ArcView como SIG, de aquí en adelante todo el soporte y actualizaciones fueron encaminadas al ArcGis.

El lenguaje de programación, Avenue, propio de ArcView, no fue incorporado en el SIG ArcGis, en su lugar se utilizan los lenguajes Visual Basic, C# y Python (Es de aclarar que en este caso se trata del ArcGis Desktop, el ArcGis Server maneja otros lenguajes, pero en todo caso, no utiliza Avenue). Con el rápido avance de la informática, llegaron nuevos sistemas operativos, como Windows 8 y Windows 10, pero el ArcView sólo es funcional hasta el Windows XP, por lo que este aplicativo SIG se hizo obsoleto y con ello el Avenue. Es así que el aplicativo desarrollado por Portoghese [5], también pasó a la obsolescencia (a menos que se haya migrado a un lenguaje de programación compatible con SIG que sea funcional con los Sistemas Operativos actuales)

A partir de datos de entrada como Precipitación mensual y evapotranspiración, mapa de uso de la tierra, mapas de vegetación, mapas de suelos, mapas de área de fuentes contributivas, y entradas y salidas de cuerpos de agua que rodean el área de interés, la herramienta SIG realiza ecuaciones basadas en diferentes metodologías (fórmulas) para calcular las variables hidroclimáticas.

Esta herramienta SIG permite la aplicación de un modelo basado en el equilibrio del agua del suelo y el agua subterránea, y según su autor, puede utilizarse con fines de investigación, planificación y protección en cuencas de drenaje semiáridas, puede ser útil también para estimaciones de recarga de aguas subterráneas, demanda de agua de riego y contenido de humedad del suelo a escala regional.

### **Evaluación de un Modelo para Caracterizar las Condiciones Hídricas de la Zona Cafetera Colombiana**

J.P. Lhomme et. al [17] Dice en su documento que es necesario conocer las regiones de Colombia y las épocas del año en las que se pueda esperar un buen suministro de agua para las plantas de cada zona.

En su estudio analiza las condiciones hídricas de la zona cafetera colombiana, en las regiones norte, centro y sur. Probó un modelo de balance hídrico, el cual permite hacer un análisis de la disponibilidad o deficiencia diaria de agua.

Parte de la premisa inicial de que el balance hídrico climático se expresa como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (P-ETP). Se considera un mes seco cuando la diferencia es negativa y húmedo si es positiva.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial utilizó la fórmula de Priestley-Taylor, cuya expresión general es la siguiente:

$$ETP = 1,26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial

R<sub>n</sub> = Radiación neta

G = Flujo de calor a nivel del suelo (aproximadamente el 5% de R<sub>n</sub>)

Δ = Pendiente de la curva de saturación que da la presión máxima del vapor de agua en función de la temperatura.

γ = Constante psicrométrica.

Según los autores, el balance climático o potencial constituye una manera simplificada de representar el balance hídrico real, ya que no toma en cuenta el papel de reserva que desempeña el suelo.

El modelo desarrollado por ellos trata de caracterizar mejor las condiciones de abastecimiento hídrico de las plantas. El modelo es recurrente y funciona con intervalo de un día. La cantidad de agua almacenada en el suelo y disponible para las plantas, o capacidad de campo, la denominaron Reserva Hídrica del suelo (RH) y la estimaron en 120 milímetros.

Los datos de entrada la modelo fueron los registros diarios de lluvia, los valores de la evapotranspiración potencial promedio mensual, y tuvieron en cuenta también los valores de capacidad de campo representados en lo que llamaron reserva útil (RU) y la reserva fácilmente utilizable (RFU).

El modelo también fue utilizado para determinar valores de Ocurrencia de Sequía y Duración de períodos secos con base en procesos estadísticos.

## **Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional de Agua**

Según el IDEAM, en su publicación “Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional de Agua” [18] las dificultades actuales para la consecución, ordenación, manipulación y distribución de la información, muestran la necesidad de implementar sistemas de información que permitan almacenar y procesar los datos hidrológicos, los censos de usuarios, infraestructura y demás información necesaria para optimizar la gestión del recurso hídrico.

La información geográfica y bases de datos sistematizadas propenden por la optimización de los recursos físicos y de personal, que a la fecha son limitados en las autoridades ambientales. También afirma que facilitará el trabajo conjunto con sus pares, el intercambio interinstitucional de datos fundamentales, compartir costos y evitar la duplicación de esfuerzos en la captura de datos.

En este documento, en el Capítulo 1, Evaluación del estado y dinámica del agua superficial, se menciona que para la evaluación a nivel regional se requiere conocer el comportamiento del agua superficial y estimar tanto la oferta como la disponibilidad de agua en cuencas de jerarquía menor a las subzonas hidrográficas, que la implementación de modelos dinámicos permitirá mejorar la interpretación de procesos que se dan en el ciclo hidrológico y apoyar las estimaciones de los componentes del balance hídrico en unidades hídricas adecuadas para la administración del agua por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales, Autoridades Ambientales Urbanas y Parques Nacionales Naturales.

Posteriormente, entre otras temáticas relacionadas con la Evaluación Regional del Agua, propone ecuaciones generales para el Balance Hídrico en unidades hidrográficas de análisis regional, al igual que expresa que la interpretación y análisis de los procesos hidrológicos y componentes del balance hídrico permiten caracterizar las condiciones de recurso agua en los diferentes sistemas hidrológicos del país.

Según el IDEAM [18], el balance hídrico es la base para cuantificar la oferta hídrica en una unidad hídrica de análisis, a partir del cálculo de entradas y salidas de flujo.

Lo anterior le da más fuerza e importancia al modelo presentado en esta tesis.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. TIPO DE TRABAJO

El presente trabajo es un desarrollo en el lenguaje de programación Python, orientado a las funciones de ArcGis, para implementar una fórmula para conocer el Balance del agua en el suelo de una región. Importante para las personas que tienen que ver con la administración y el manejo de los recursos naturales, como insumo para el conocimiento del territorio en este tema.

### 5.2. PROCEDIMIENTO

#### 5.2.1. Fase 1. Selección del Modelo y Datos Básicos.

- **Actividad 1. Selección del Modelo Climático**

El principio de un modelo hidro climático se basa en el ciclo del agua en la atmósfera, entre los aportes en forma de lluvia o precipitación y las salidas en forma de evapotranspiración, como lo menciona UPM [8], partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada, podemos estudiar el balance del agua en el suelo a lo largo del año.

Según MARIN VALENCIA [9], Colombia no cuenta con mediciones directas de ETP, por lo cual se hace estrictamente necesaria su correcta evaluación mediante las fórmulas teóricas y/o empíricas que ofrecen diferentes autores.

El punto más crítico para la aplicación de la fórmula del Balance Hídrico es la ecuación utilizada para el cálculo de la Evapotranspiración; uno de los propósitos del presente modelo es facilitar los procesos para conocer el balance del agua en el suelo de un territorio, siendo consecuente con ello y que según Karsili [6], la ecuación para estimar la evapotranspiración propuesta por Thornthwaite, se puede aplicar en cualquier lugar del mundo y como dicen S. Ahmadi & H. Fooladmand [11], éste es el método más simple para calcular la evapotranspiración ya que es un método basado en la temperatura; como es obvio, se ha escogido la propuesta por Thornthwaite.

- **Actividad 2. Obtención de la información de Altitud sobre el nivel del mar**

Se puede obtener de varias formas; a partir de curvas de nivel, ya sea directamente de la fuente oficial de Colombia IGAC o levantamientos topográficos de los diferentes proyectos que puedan contribuir con esta valiosa información; pero en la mayoría de las ocasiones esto se hace difícil. Sin embargo, existe una alternativa que puede satisfacer enormemente las expectativas, se trata del modelo de elevación del terreno puesto a disposición por el instituto geológico de los EEUU (conocido por sus siglas en inglés USGS), de 30 metros de resolución. Este archivo digital se puede descargar ingresando al link <https://earthexplorer.usgs.gov/> y se busca en las opciones del *Data Set*, como *Digital Elevation / ASTER GLOBAL DEM*, se proporcionan las coordenadas de interés, ya sea ubicando la zona sobre el mapa disponible o digitando las coordenadas geográficas.

- **Actividad 3. Obtención de la información de Precipitación y Temperatura**

Los datos de precipitación y temperatura se obtienen de la página del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, en el siguiente link: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>. Se pueden descargar de forma gratuita los promedios de precipitación y temperatura media de las series de tiempo 1971-2000 y 1981-2010, correspondientes “a la suma de los promedios mensuales de precipitación y al promedio de temperatura media de 30 años, considerado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como el número de años para establecer una media climatológica” (IDEAM).

Para cada una de estas tablas se realizó un tratamiento previo consistente en lo siguiente: Los campos de Latitud y Longitud contienen las coordenadas de localización de las estaciones climáticas, en el sistema WGS84 en grados, minutos y segundos, entonces se realizó la conversión a grados decimales.

También las columnas con los datos mensuales se les modificó el nombre del campo anteponiéndoles el prefijo “P\_” para la precipitación y “T\_” para la temperatura, seguido de los tres primeros caracteres del mes correspondiente así:

Precipitación: (P\_Ene, P\_Feb, P\_Mar....P\_Dic).

Temperatura: (T\_Ene, T\_Feb, T\_Mar....T\_Dic).

En muchas regiones no hay suficiente cobertura de estaciones para esta variable. Una opción que se pone a disposición en este trabajo es la propuesta por Castañeda O. [15], dónde se emplea un factor de corrección tomado de la *Fórmula de*

*Isabellina*, que se basa en una serie de constantes mensuales aplicadas en una fórmula que las relaciona con la altitud sobre el nivel del mar, dando como resultado la temperatura media mensual teórica. En la siguiente tabla se muestra esta fórmula

Tabla 5: Fórmula de Isabellina

<b>FÓRMULA DE ISABELLINA</b>	
<b>Temperatura = Altitud (m.s.n.m.) * ( a ) / 100 + ( b )</b>	
<b>Enero</b>	=Altitud * (-0,71) / 100 + (30,9)
<b>Febrero</b>	= Altitud * (-0,7) / 100 + (31,1)
<b>Marzo</b>	= Altitud * (-0,68) / 100 + (30,6)
<b>Abril</b>	= Altitud * (-0,66) / 100 + (29,8)
<b>Mayo</b>	= Altitud * (-0,65) / 100 + (29,8)
<b>Junio</b>	= Altitud * (-0,68) / 100 + (30,4)
<b>Julio</b>	= Altitud * (-0,74) / 100 + (32,1)
<b>Agosto</b>	= Altitud * (-0,74) / 100 + (31,6)
<b>Septiembre</b>	= Altitud * (-0,76) / 100 + (31,3)
<b>Octubre</b>	= Altitud * (-0,66) / 100 + (29,3)
<b>Noviembre</b>	= Altitud * (-0,65) / 100 + (29,4)
<b>Diciembre</b>	= Altitud * (-0,68) / 100 + (30,1)
<b>Anual</b>	= Altitud * (-0,69) / 100 + (30,6)

Fuente: CASTAÑEDA O, Alonso [15]

- **Actividad 4. Obtención de la información de Evapotranspiración Potencial (ETP) según Thornthwaite**

Según UPM, O [8], Los cálculos de Thornthwaite [4] están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en Hidrología y en la estimación del balance hídrico para Climatología e Hidrología de cuencas. También es empleado en los índices y clasificaciones climáticas. Thornthwaite [4] comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial, “a”

La fórmula propuesta por Thornthwaite en UPM, O. [8], es la siguiente:

$$e = 16 * (10 * t_m / I)^a$$

Dónde:

e = Evapotranspiración mensual si ajustar en mm (mm/mes)

t<sub>m</sub> = Temperatura media mensual en °C

I = Índice de calor anual

$$I = \sum i_j ; j = 1, \dots, 12$$

Que se calcula a partir del índice de calor mensual, i, como la suma de los doce índices mensuales:  $i_j = (t_{mj} / 5)^{1.514}$

a = parámetro que se calcula en función de I, según la siguiente expresión:

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar “e” mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la ETP sin ajustar para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes).

$$ETP_{Tho} = e * L$$

Dónde:

e = Evapotranspiración mensual si ajustar en mm (mm/mes)

L = Factor de corrección del número de días del mes (N<sub>d</sub>) y la duración astronómica del día N<sub>i</sub>-horas de sol

L<sub>i</sub> = N<sub>d</sub> / 30 \* N<sub>i</sub> / 12

En valor N<sub>i</sub>-horas de sol, se puede obtener de la tabla 6

- **Actividad 5. Obtención de la información de Variación de la Reserva de Agua en el Suelo (VR)**

Según Claro Rizo [2], El balance de entradas y salidas de agua del suelo clasifica un período como seco (P-ET < 0) o húmedo (P-ET > 0) según sea la diferencia, negativa o positiva.

Cuando en un período se produzcan más entradas que salidas (P > ET), el agua sobrante pasará a engrosar las reservas del suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas, se reducirá la reserva del suelo.

Sin embargo, el suelo tiene una capacidad máxima de retención, el agua añadida en “exceso” se perderá superficialmente o por infiltración profunda, por lo que se debe manejar el concepto de “reserva máxima” (R<sub>máx</sub>) o cantidad de agua por unidad de superficie en milímetros que el suelo es capaz de almacenar en su perfil



Tabla 6: Promedio de horas de luz (N) para diferentes latitudes para el día 15 del mes

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	deg	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0	70	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	68	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.4	12.7	9.0	5.2	1.9	66	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.5	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.3	14.4	15.0
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Fuente: Allen et al, [16]

De acuerdo con Claro Rizo [2], la Capacidad de Almacenamiento de Agua del Suelo es la cantidad de agua aprovechable por las plantas que puede almacenar el suelo, y depende fundamentalmente de la textura del suelo y de su profundidad.

UPM O [8] dice que como referencia climática se toma una reserva máxima de 100 mm, el valor se toma como referencia climática para comparaciones entre distintas zonas. Thornthwaite y mather dieron valores de reserva máxima entre 500 y 400; por otro lado, Thornthwaite [4], en su clasificación utilizó como referencia climática la reserva de 100 mm.

En Claro Rizo [2], se recomienda el uso del promedio ponderado de las características físicas consideradas (textura media en la zona y profundidad media del suelo).

Por último, se pueden tomar los datos textura del suelo profundidad del suelo, a partir del mapa de suelos del IGAC.

- **Actividad 5. Cálculo del Balance Hídrico**

El siguiente cálculo del balance hídrico es tomado de la metodología expuesta en el documento de Claro Rizo [2].

Los balances mensuales y/o decadales se calculan utilizando como aportes los valores probables de lluvia, considerando Cálculo dichos aportes de agua, ya que los ingresos provenientes de agua subterránea por la dificultad en determinarlos, no se tienen en cuenta.

Las demandas siempre estarán representadas por la ETP.

Las pérdidas en el almacenamiento de agua del suelo, se calculan a una tasa proporcional, dependiendo de la fracción de agua almacenada en el suelo. Estas pérdidas se calculan cuando la lluvia es insuficiente para cubrir la demanda de agua ( $ETP_i$ ), la cual deja un déficit de agua ( $ETP_i - P_i$ ); entonces a partir de la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo ( $R_{m\acute{a}x}$ ), y del valor correspondiente al periodo anterior ( $R_{i-1}$ ), se calcula la proporción de agua cedida por el suelo para cubrir parte de dicho déficit. Pasando al cálculo del balance hídrico, la variación de la reserva del periodo "i" (en función de la del periodo anterior "i-1") será:

$$VR_i = (ETP_i - P_i) * (R_{i-1} / (R_{m\acute{a}x} + (ETP_i - P_i) / 2))$$

A continuación, se muestra la forma de cálculo para el período "i"

Precipitación ( $P_i$ )

Evapotranspiración Potencial ( $ETP_i$ )

Variación de la reserva ( $VR_i$ ):  $(ETP_i - P_i) * (R_{i-1} / (R_{m\acute{a}x} + (ETP_i - P_i) / 2))$

Almacenamiento ( $R_i$ ):

$R_{i-1} + (P_i - ETP_i)$	si $0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i) < R_{m\acute{a}x}$
$R_{m\acute{a}x}$	si $R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq R_{m\acute{a}x}$
0	si $0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i)$

Evapotranspiración Real ( $ET_i$ ):  $P_i + VR_i$  cuando  $P_i < ETP_i$

Déficit ( $D_i$ ):  $ETP_i - ET_i$

Exceso ( $Ex_i$ ):  $R_{i-1} + (P_i - ETP_i) - R_{m\acute{a}x}$  cuando  $P_i > ETP_i$  y  $(R_{i-1} + P_i) > (ETP_i + R_{m\acute{a}x})$

### 5.2.2. Fase 2. Implementación.

El software seleccionado para el presente trabajo es:

**SIG ArcGis:** Uno de los software de Sistemas de Información Geográfica de mayor utilización entre las diferentes instituciones de nuestro país, como lo menciona GRIMALDOS MOJICA [3], es una plataforma para el diseño y gestión de soluciones a través de la aplicación de los conocimientos geográficos.

**Lenguaje Python:** Python es un lenguaje de programación, de código abierto, soportado por ArcGis y con una sintaxis muy fácil de asimilar por el programador, especialmente aquellos que no son muy eruditos en este arte, según VAN ROSSUM [10], la elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de éste un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas.

- **Actividad 1. Preparación de la información fuente para la modelación**

Lo primero que se realizó fue el montaje de todos los datos necesarios para correr el modelo en una geodatabase.

Se construyó un archivo *File Geodatabase*, con ArcGis, y allí se creó un *Dataset* para los *Datos* básicos.

En la figura 1 se pueden apreciar las capas de puntos de precipitación (*Precip\_1981\_2010*) y temperatura (*Temper\_1981\_2010*); la capa de segmentos de las curvas de nivel (*Curvas\_Nivel*) y la capa de polígonos del departamento de Caldas (*Caldas*); así como la capa ráster del modelo digital de elevación (*Caldas\_mde\_mcb*).

Figura 1: Árbol de ArcCatalog con los datos básicos para la modelación





Figura 3: Tablas con datos de Temperatura (°C)

Temperatura Media 1981 - 2010												
CODIGO	T ENE	T FEB	T MAR	T ABR	T MAY	T JUN	T JUL	T AGO	T SEP	T OCT	T NOV	T DIC
26195020	22,093333	22,556667	22,52	22,303333	21,996552	21,842857	21,986667	21,862069	21,62963	21,626667	21,731034	21,733333
26175040	26,143478	26,990909	27,017391	26,356522	25,858333	25,833333	25,904167	26,129167	25,6625	25,241667	25,356522	25,4375
26195030	17,068421	17,4	17,342105	17,3	17,215789	17,115789	17,005263	17,010526	16,847368	16,731579	16,715789	16,910526
26195010	19,030769	19,530769	19,707692	19,738462	19,476923	19,523077	19,315385	19,323077	18,815385	18,661538	18,792308	18,907692
26185020	14,544444	14,781481	14,925926	15,2	15,284615	15,2	14,930769	15,02	14,892308	14,67037	14,603846	14,611538
23085140	21,703571	21,767857	21,742857	21,825	21,828571	22,010714	21,978571	21,917857	21,746429	21,532143	21,503571	21,696429
26175030	22,703448	23,382143	23,434483	22,934483	22,513793	22,503448	22,662069	22,957143	22,382759	21,831034	21,955172	22,131034
23115010	28	28,207143	27,821429	27,575862	27,77931	27,913793	28,306897	28,410345	27,586207	27,024138	27,12069	27,52069
26185010	16,723077	16,969231	16,830769	16,792308	16,830769	16,784615	17,146154	17,076923	16,669231	16,307692	16,084615	16,346154
26145020	16,925	17,078571	17,037037	17,103571	17,164286	17,278571	17,253571	17,282143	16,935714	16,718519	16,588889	16,677778
26155110	16,936364	17,234783	17,208333	17,154167	17,15	17,116667	17,208333	17,241667	16,917391	16,640909	16,627273	16,827273
26185040	19,676923	11,315385	11,455556	11,640741	11,72963	11,607143	11,592857	11,484615	11,381481	11,244444	10,996154	10,959259
23035020	28,596154	28,884615	28,688462	28,538462	28,653846	28,915385	29,426923	29,703846	28,816	28,042308	27,961538	28,308
23065110	20,789655	21,058621	21,113793	21,12069	21,371429	21,572414	21,648276	21,755172	21,403571	20,860714	20,760714	20,767857
26135040	21,796667	22,04	21,866667	21,533333	21,416667	21,473333	21,726667	21,97	21,46	20,916667	20,936667	21,353333
26135100	24,09	24,263333	24,24	23,916667	23,773333	23,88	24,136667	24,36	23,933333	23,433333	23,669666	23,669666
26135070	15,272727	15,145455	15,327273	15,309091	15,363636	15,436364	15,345455	15,490909	15,127273	14,563636	14,763636	15,027273
26135110	18,906667	19,103333	19,076667	18,81	18,736667	18,736667	18,95	18,9	18,65	18,29	18,436667	18,603333
54015010	18,255172	18,282759	18,468966	18,724138	18,793103	18,672414	18,589655	18,503448	18,482759	18,255172	18,127586	18,193103
26135060	19,833333	19,975	20,175	19,55	19,418182	19,736364	20,027273	20,075	19,383333	18,683333	18,825	19,4
26135160	16,97619	17,238095	17,171429	17,209524	17,252381	17,190476	17,309524	17,409524	16,957143	16,752381	16,757143	16,852381
26145030	19,146667	19,35	19,266667	19,236667	19,236667	19,236667	19,556667	19,633333	19,206667	18,933333	18,673333	18,666667
21255080	28,982759	29,234483	29,082759	28,193103	28,086207	28,806897	29,379214	30,310345	29,37931	27,955172	27,834483	28,375862
21255090	28,343478	28,404348	27,954545	27,731818	27,754545	28,034783	28,663636	29,181818	28,740909	27,882609	27,595652	27,940909
23025020	27,458065	27,753333	27,718129	27,393548	27,419355	27,706452	28,641935	29,106452	28,453333	27,4	26,967742	27,32
21255150	27,922727	28,131818	27,963636	27,422727	27,265217	27,778261	28,513043	28,917391	28,069565	27,036364	26,872727	27,3
21255140	27,33	27,177273	27,285	26,905	26,757143	27,172727	27,685714	28,057143	27,418182	26,854545	26,685	27,142105
23025040	24,863636	24,995238	24,8	24,947826	24,890476	25,280952	25,526087	25,795652	25,2	24,58087	24,473913	24,491304
23015040	26,458824	26,729412	26,541176	26,323529	26,317647	26,5	27,170588	27,35625	26,585714	26,057143	25,820777	26,046154
21255120	16,475862	16,641379	16,803448	17,068966	17,255172	17,089655	16,941379	17,037931	16,986207	16,737931	16,662069	16,586207

Figura 4: Tabla con datos de Precipitación

Precipitación Media 1981 - 2010												
CODIGO	P ENE	P FEB	P MAR	P ABR	P MAY	P JUN	P JUL	P AGO	P SEP	P OCT	P NOV	P DIC
26180160	90,62069	95,003448	151,513793	189,77931	220,548276	142,889655	120,537931	145,865517	215,32069	277,82069	240,793103	151,806897
26190120	94,825	89,9375	175,25	258,9375	262,375	212,3	189,4625	200,875	256,29375	246,99375	202,133333	102,6875
26195020	82,493333	99,373333	165,053333	228,643333	248,205256	193,76	183,45	178,896667	226,096667	212,423333	188,425255	129,558229
26190100	114,216667	136,583333	173,88	247,833333	262,563333	206,996667	194,96	195,94	226,473209	260,266667	198,486667	161,59
23055070	365,91875	400,00625	512,625	484,81875	477,8875	330,025	332,525	324,09375	461,4125	555,4125	564,93125	494,43125
26190090	124,466667	148,236667	198,213333	291,843333	318,166667	227,086667	219,3	234,72	265,366667	307,2	240,886667	161,833333
26170180	123,587481	156,34657	216,848098	248,865311	283,256936	175,620113	168,597688	175,445342	253,1794	299,111094	299,426009	190,546447
26175040	57,34156	76,26162	114,231378	170,043353	219,660547	167,870792	142,261752	160,422938	214,121223	243,568621	209,684799	125,282466
26195030	111,435464	136,475788	222,415652	266,464167	304,317128	244,257221	197,540451	210,209155	283,490426	280,188	232,143561	156,796322
26195010	96,122806	101,273477	166,380166	231,033372	250,88184	187,590814	172,511228	183,517853	230,225321	237,889447	194,947353	120,360851
26170190	99,946667	95,223333	163,533333	235,086667	315,203333	249,926667	197,976667	228,196667	281,656667	315,746667	279,633333	161,096667
26170150	114,9	109,966667	205,1	288,866667	348,633333	291,233333	257,2	247,966667	303,633333	338,8	288,866667	174,166667
23050100	105,977778	134,440741	219,546429	327,975	326,510714	164,842857	154,660714	200,342857	256,285714	397,153571	264,578571	165,35
26180180	93,896667	121,383333	177,19	242,27	271,766667	184,133333	178,106667	184,543333	254,743333	284,153333	223,796667	129,918669
26175030	85,943333	102,56	148,37	230,536667	291,256667	204,35	192,25	202,293333	278,506667	306,546667	246,903333	161,456667
26180190	109,907143	131,340741	234,124138	333,034483	356,165517	210,806897	180,875	195,058621	292,224138	367,868966	303,489655	190,175862
26160160	122,566667	145,733333	220,733333	244,766667	334,666667	212,866667	165,833333	183,566667	248,1	322,086667	317,433333	209,233333
26185010	89,325	127,79375	165,6875	195,725	240,025	181,01875	164,63125	135,525	189,56625	212,7875	195,8125	121,5125
26180020	67,610345	77,323333	118,91	197,37	255,676667	149,968966	141,723333	178,056667	243,75	292,576667	212,263333	118,623333
26145020	98,988537	95,982898	159,775915	238,112511	208,793809	147,408877	134,32568	143,487275	178,839507	221,688916	180,270942	111,487976
26140170	106,4	105,72	149	234,866667	230,866667	172,428571	140,46	151,333333	200,466667	252,933333	187,133333	102,75
26160110	118,88	122,266667	178,333333	221,38	218,533333	118,2	97,166667	110,066667	186,9	252,566667	211,266667	136,293333
23040030	92,534955	99,858876	149,408931	242,554283	248,546208	122,376561	85,443918	118,570459	180,607952	308,439562	258,239932	153,985503
26155110	103,52	93,961063	133,826667	176,22	161,866667	108,949042	74,154395	74,246809	139,797157	208,961225	176,547427	131,549971
26150160	68,4	69,623333	112,443333	175,083333	193,966667	132,133333	108,103333	93,877456	140,599171	185,98384	168,27075	99,271519
26150080	149,266667	134,466667	199,142857	270,473333	215,2	134,8	135,086667	139,857143	182,333333	264	274,428571	172,066667
26150250	120,033333	117,733333	163,133333	219,642857	205,266667	112,066667	84,866667	95,533333	143,953333	251,946667	232,893333	174,533333
26150030	95,733333	112,5	152,3	205,866667	166,2	91,8	65,214286	82,6	144,9	227,133333	187,6	149,4
26150050	159,766667	163,726667	185,92	261,066667	253,866667	123,166667	104,2	122,666667	191,846667	334,473333	282,653333	174,886667
26150070	159,6	117,066667	173,8	230,533333	206,6	101,866667	98,066667	114,133333	171,466667	277,153333	271,533333	157,133333
26150040	134,133333	143	180,571429	220,94	232	113,866667	91,533333	104,333333	168,266667	272,466667	252,266667	175,133333
23025010	170,890797	207,875991	270,992118	349,337876	336,254118	164,921106	143,905847	164,338524	299,90039	362,942445	308,196661	215,488907
23020080	185,51	237,586667	318,62	358,89	358,89	177,713333	131,156667	188,509743	287,496667	373,266667	361,423333	260,154547
23050080	214,38	264,26	322,41	331,506667	346,64663	203,481484	141,8893	200,692229	299,754766	352,859165	333,586667	264,15428



- **Actividad 2. Obtención de los Insumos básicos para la Modelación del Balance Hídrico empleando el lenguaje de programación en Python**

Los insumos básicos para la modelación del Balance Hídrico, son las capas ráster de la Temperatura y la Precipitación, principalmente.

Las curvas de nivel o el Modelo Digital de Elevación se emplean en el caso que no se cuente con datos de temperatura. En esta situación se aplica la fórmula de isabellina (CASTAÑEDA O, Alonso [15]), con la cual se puede generar el mapa de temperatura a partir de la altitud sobre el nivel del mar.

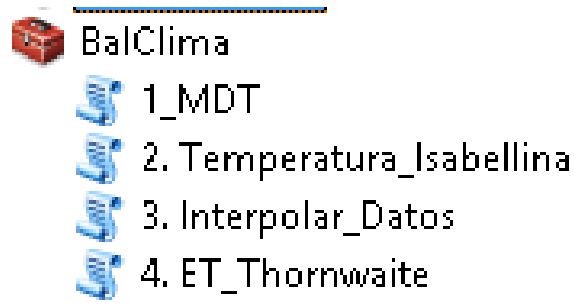
Es claro que para generar los mapas ráster de Precipitación y Temperatura a partir de las capas de puntos ya creadas, es suficiente con ejecutar los comandos de interpolación del *ArcToolBox* de *ArcGis*. Sin embargo, la idea es automatizar todos estos procesos.

Se diseñan entonces las rutinas en el lenguaje de programación Python para generar los mapas ráster de:

- **MDT (Modelo Digital de Elevación):** Esto en caso de no contar con datos de temperatura ni un Modelo Digital del Terreno previos. Se aplicaría entonces la *Fórmula de Isabellina*.
- **Temperatura\_Isabellina:** Para el caso descrito en el punto anterior.
- **Interpolar\_Datos:** Con esta rutina se interpolan, con el método de interpolación IDW (*Distancia Inversa Ponderada ó Inverse Distance Weighting, por sus siglas en inglés*), los datos de Precipitación mensual y Temperatura mensual.
- **ET\_Thornwaite:** Con esta rutina se obtienen las capas ráster de Evapotranspiración Potencial, con base en los datos anteriores.

En la siguiente figura se pueden ver los scripts mencionados ya montados en el *ARcToolbox* de *ArcGis*.

Figura 5: Herramienta "BalClima" con las rutinas para obtener los insumos para el modelo del Balance Hídrico.



Antes de correr estas rutinas se debe crear el ambiente de trabajo apropiado en ArcGis, teniendo el área de estudio y la escala de trabajo, pues para una extensión demasiado grande, un tamaño de pixel muy pequeño puede ralentizar el proceso o detenerlo.

También es muy importante definir el área de trabajo (*Workspace*) a donde se quiere que se generen los mapas resultados

Para el presente caso, se establece como área de trabajo el *Dataset "Resultados"* de la Geodatabase *BalClima"* y se establece un tamaño de pixel de 100. Ver figuras siguientes.

Figura 6: Establecimiento del Área de Trabajo

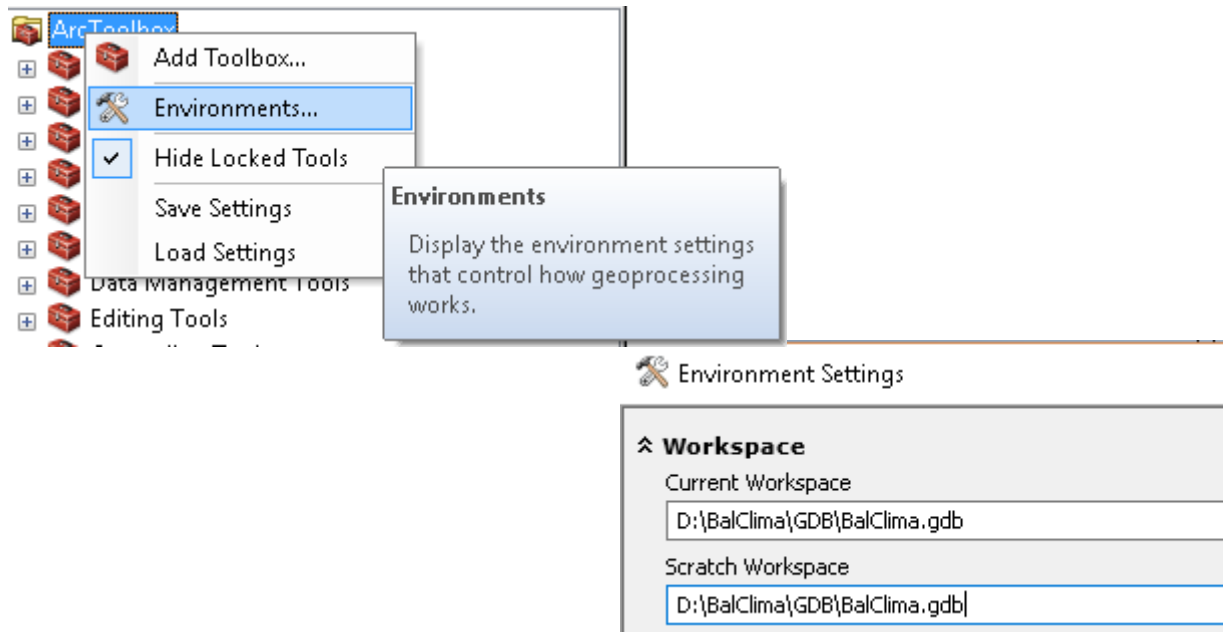
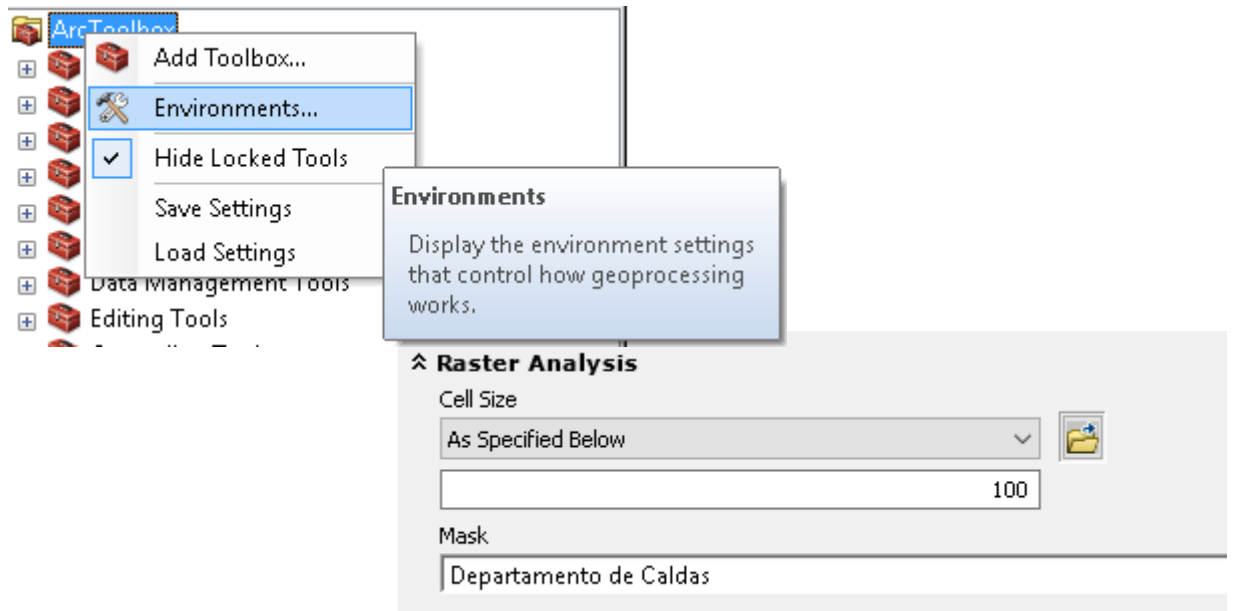


Figura 7: Establecimiento del tamaño de pixel



Una vez establecido el ambiente de trabajo, se procede a correr las rutinas y obtener los insumos para el Balance Hídrico.

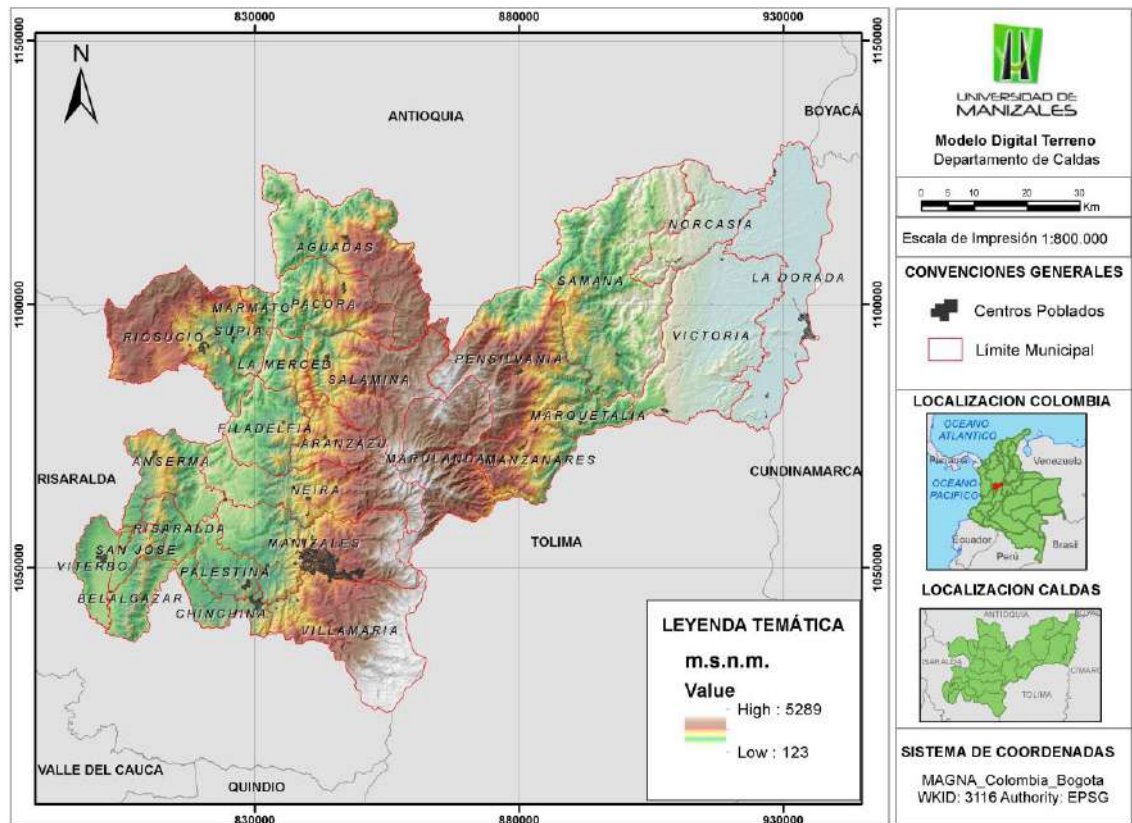
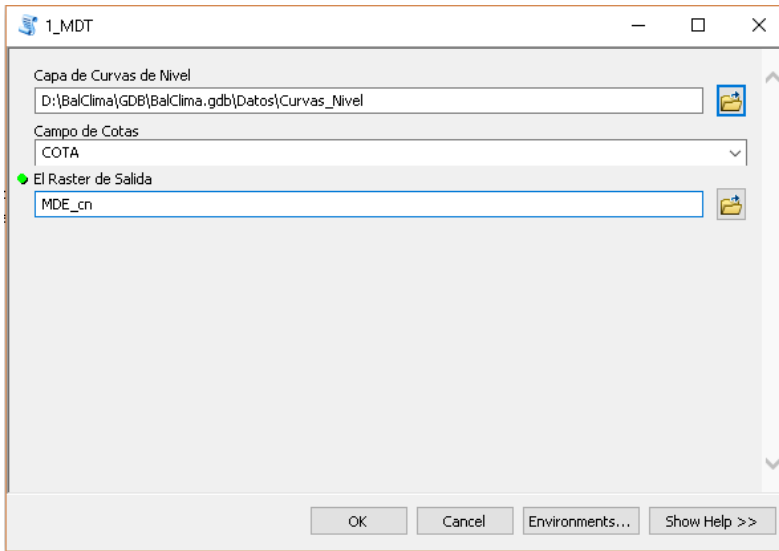
- **Modelo Digital de Elevación y Temperatura Isabellina:**

En caso de no contar con datos de temperatura, se puede recurrir a la fórmula de Temperatura de Isabellina, para lo cual es fundamental el Modelo Digital del Terreno.

**Script 1. MDT:** Genera el Modelo Digital de Elevación a partir de curvas de nivel. Ver figuras 8.



Figura 8: Ventana del Script 1. MDT y mapa ráster del Modelo Digital del Terreno



**Script 2. Temperatura\_Isabellina:** Genera los mapas ráster de temperatura (°C) mensual a partir del dato de Altura Sobre el Nivel del Mar. Ver figuras 9 y 10.

Figura 9: Ventana del Script 2. Temperatura\_Isabellina

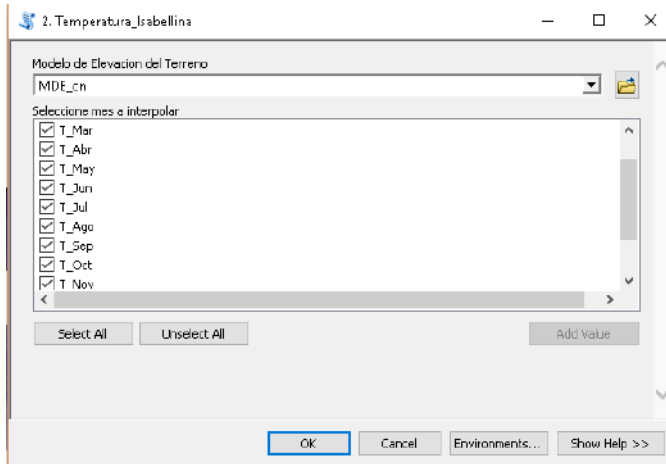
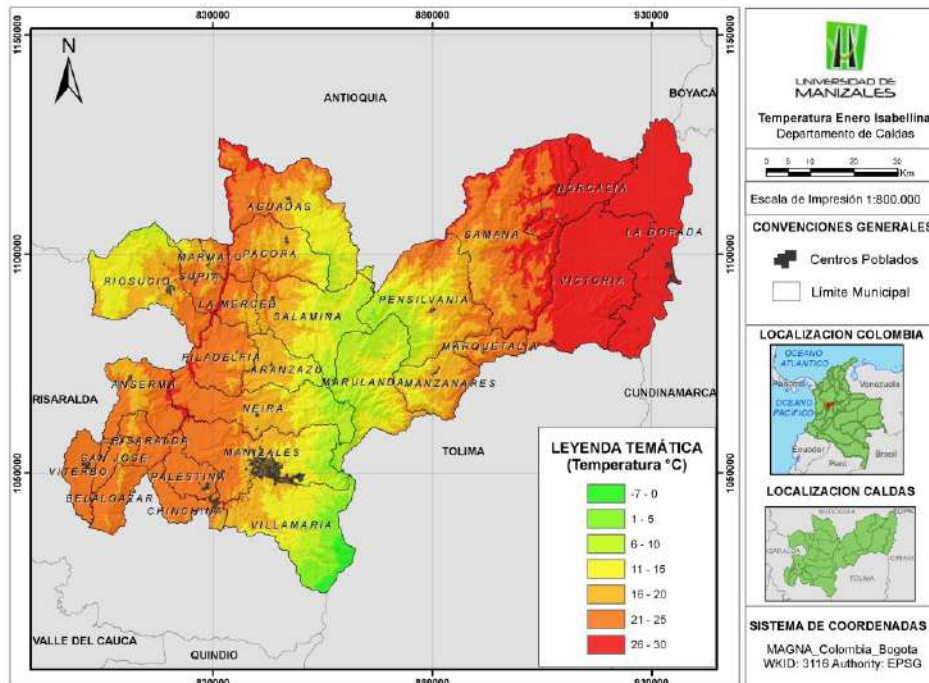
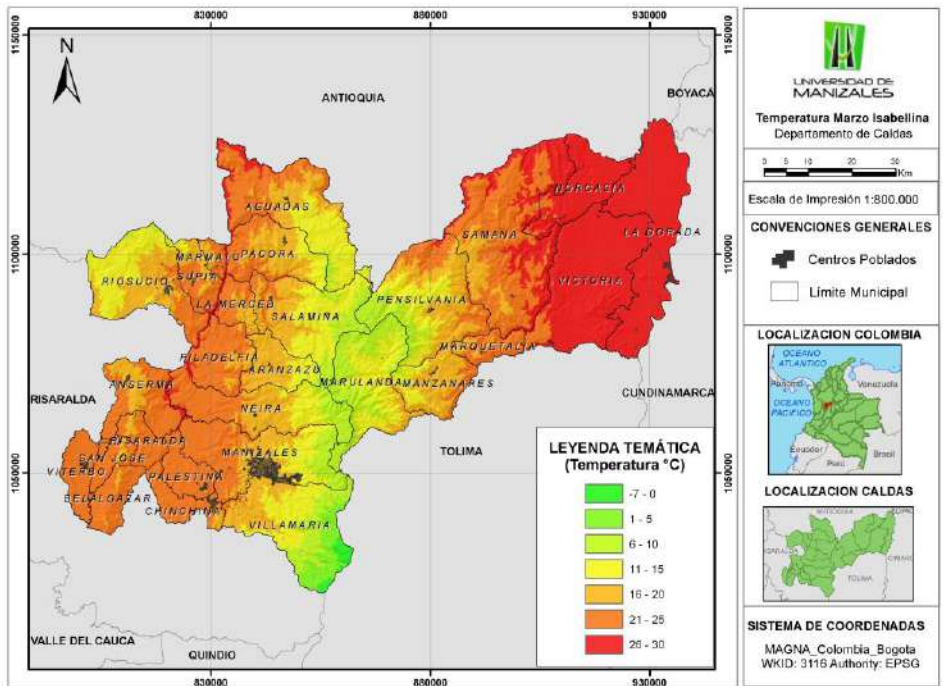
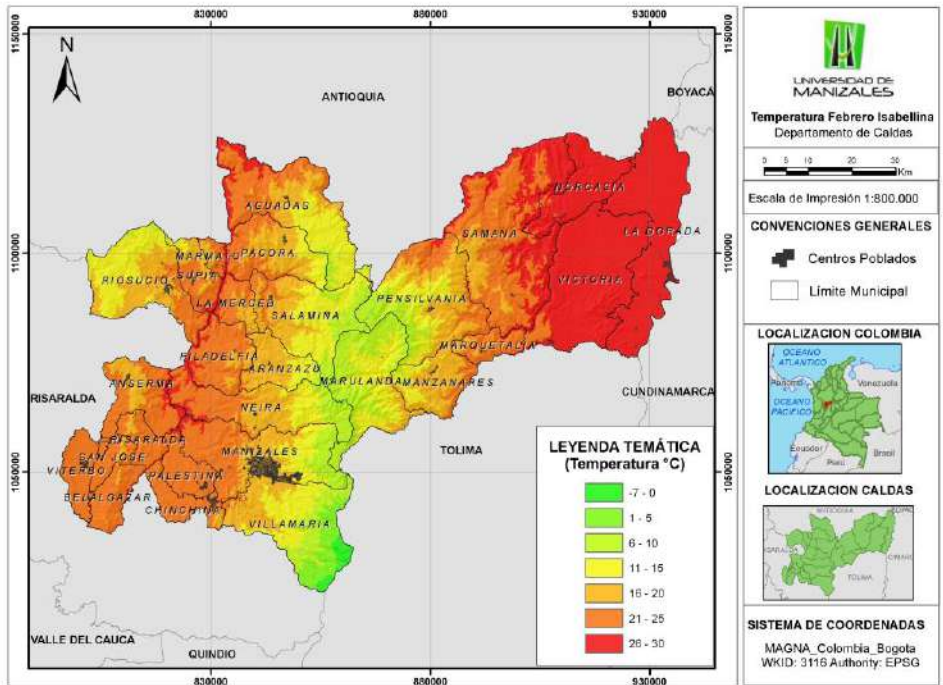
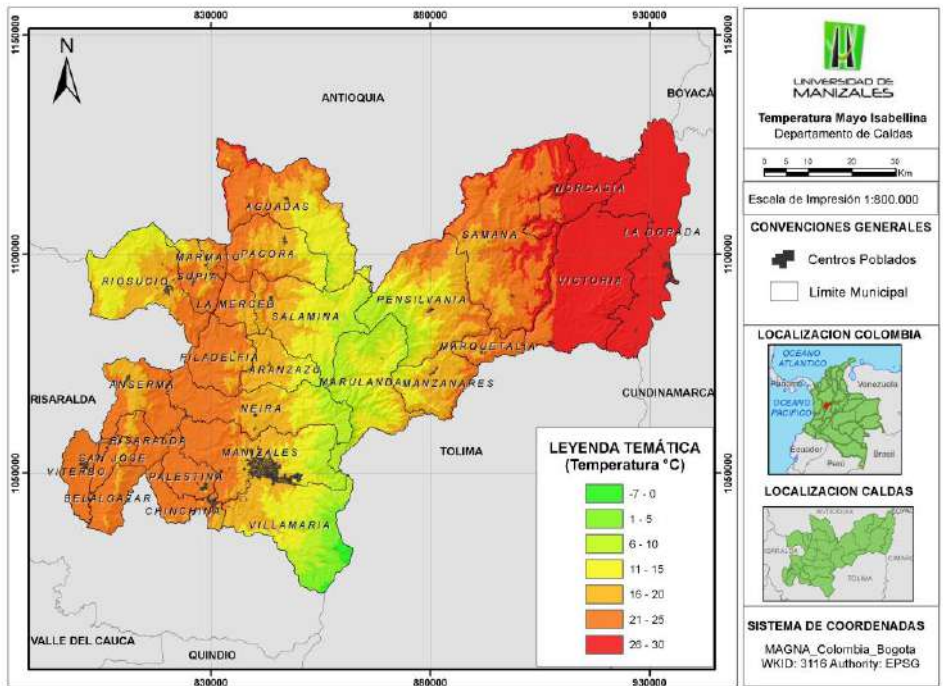
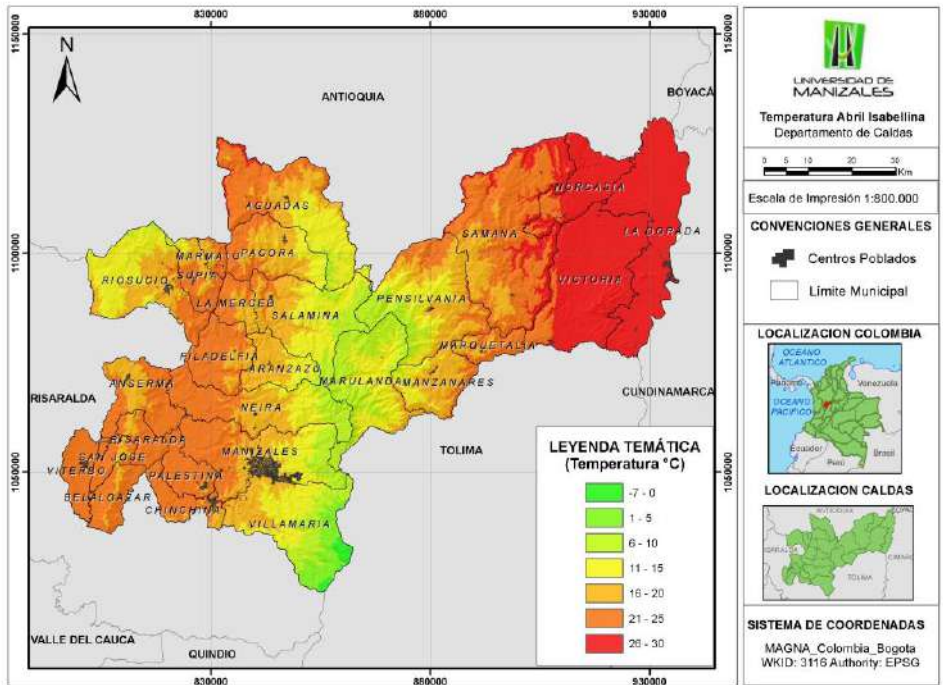


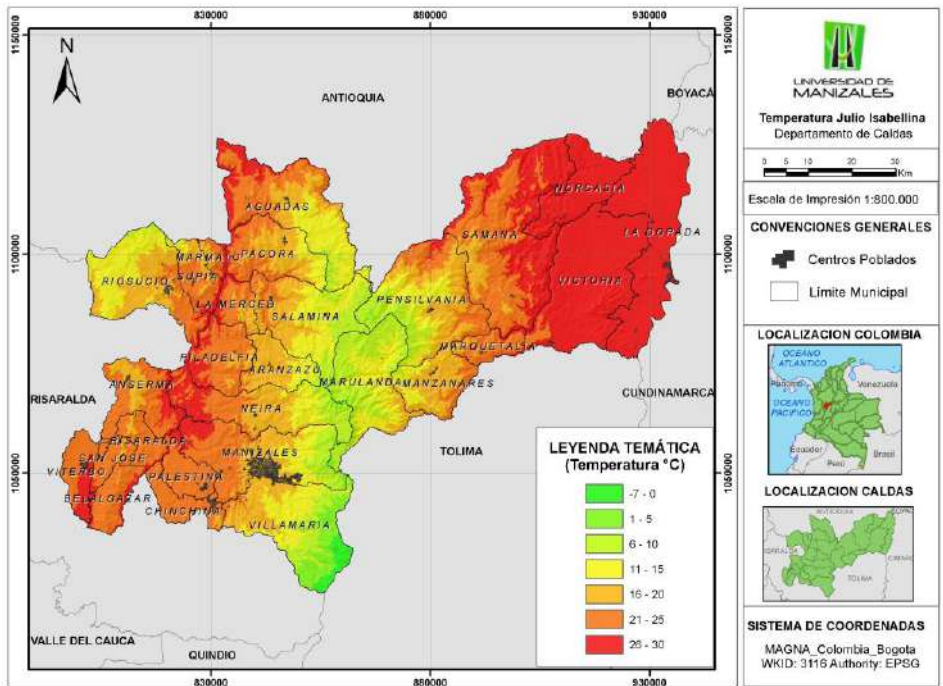
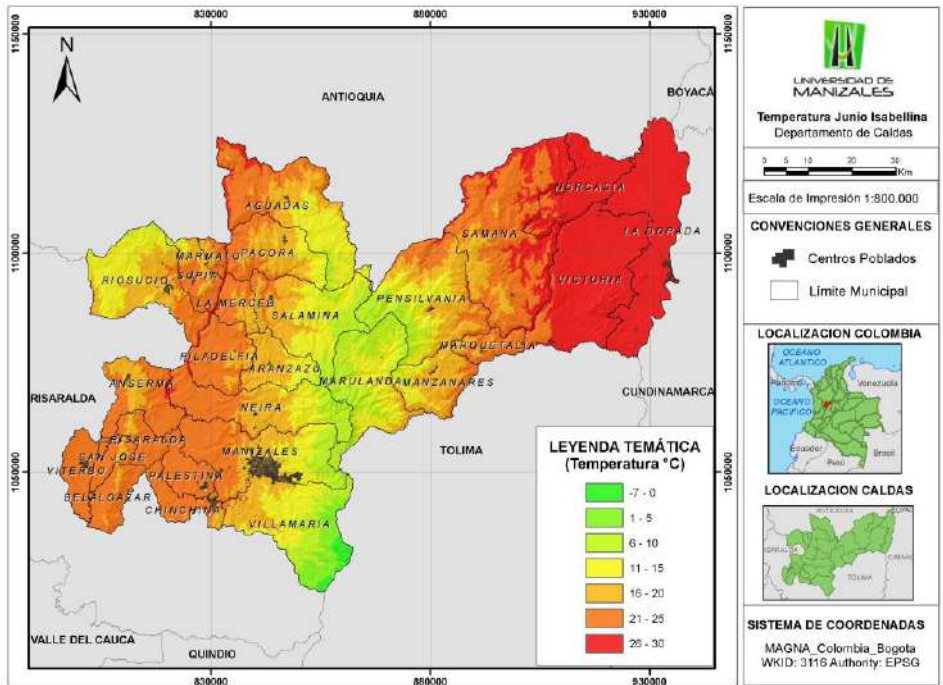
Figura 10: Mapas de temperatura (°C) mensual generados con la fórmula de Isabellina

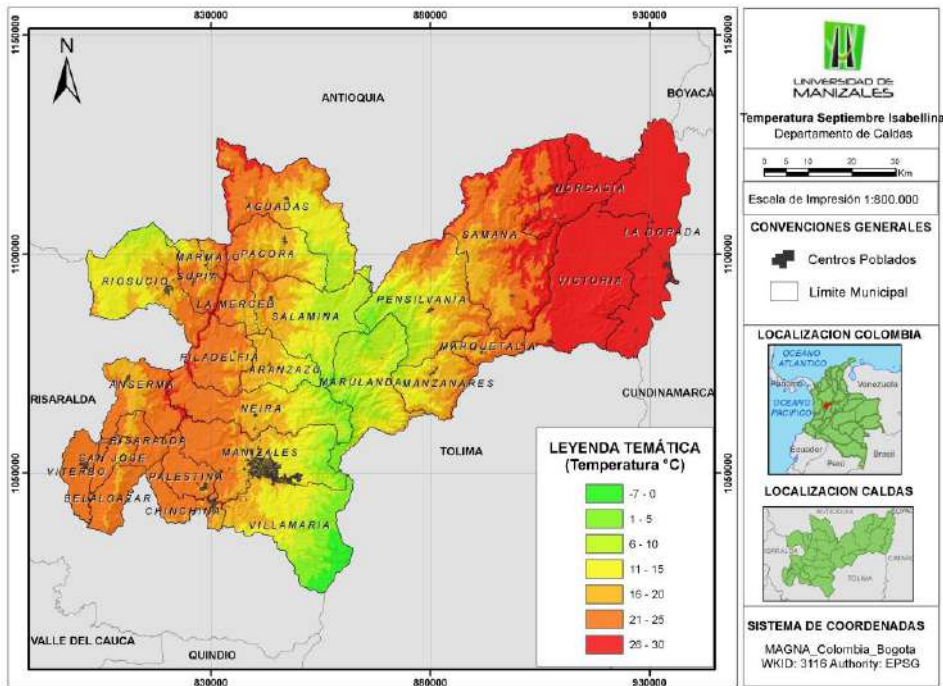
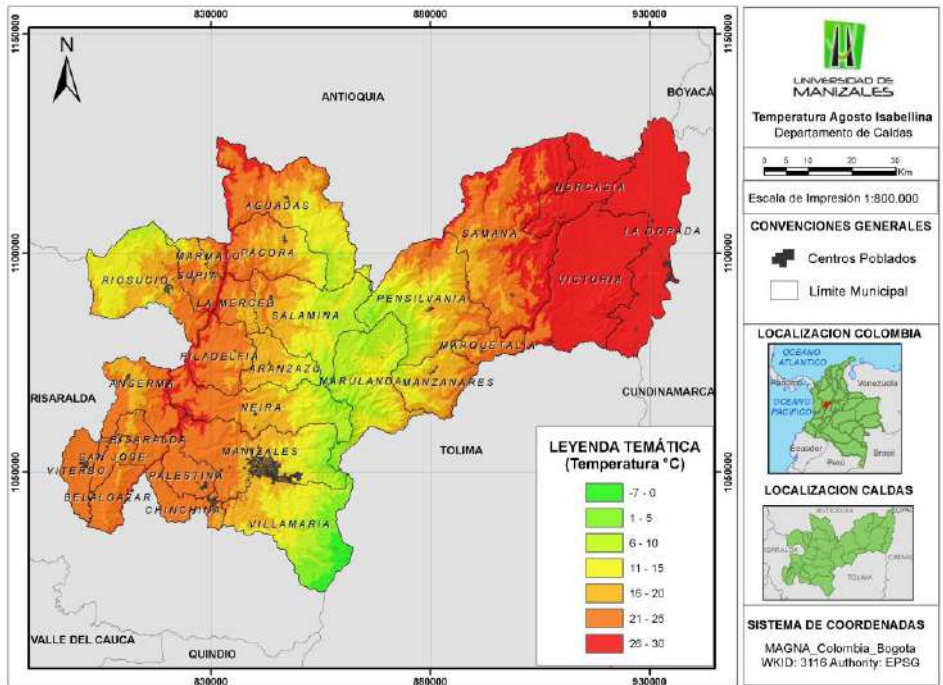


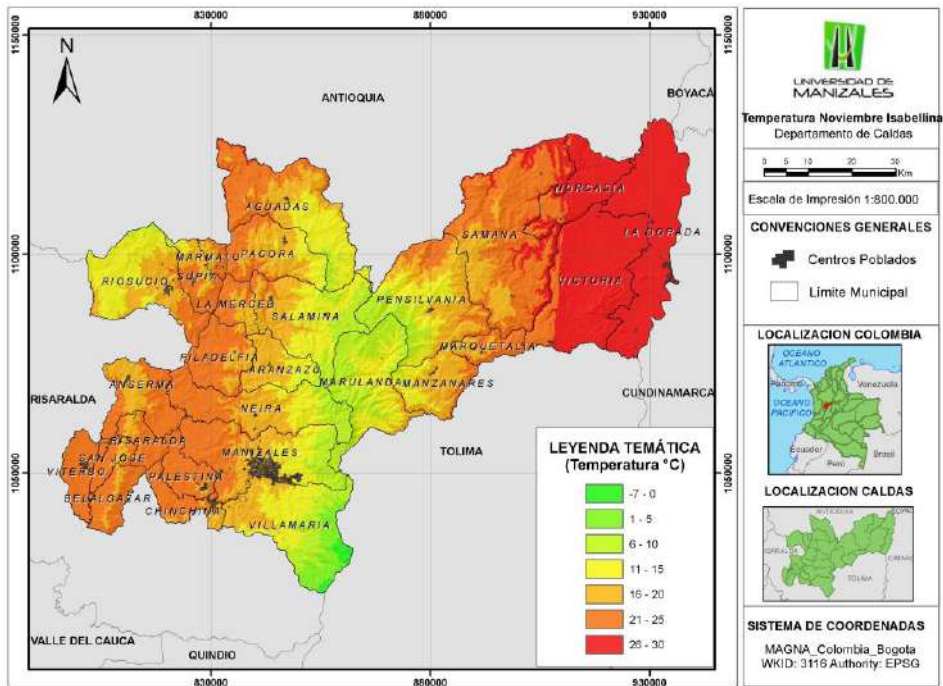
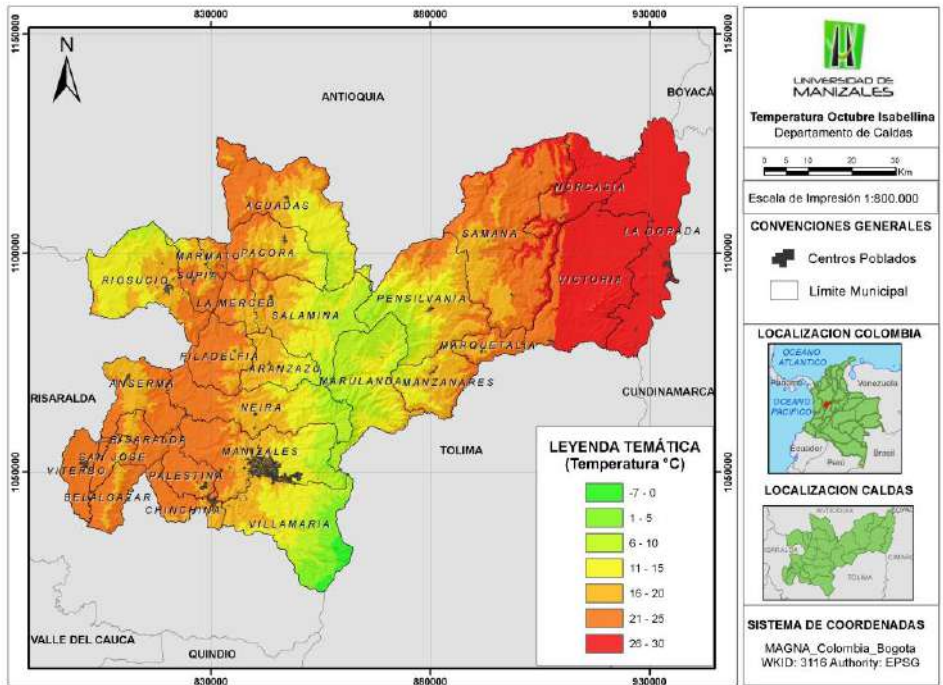




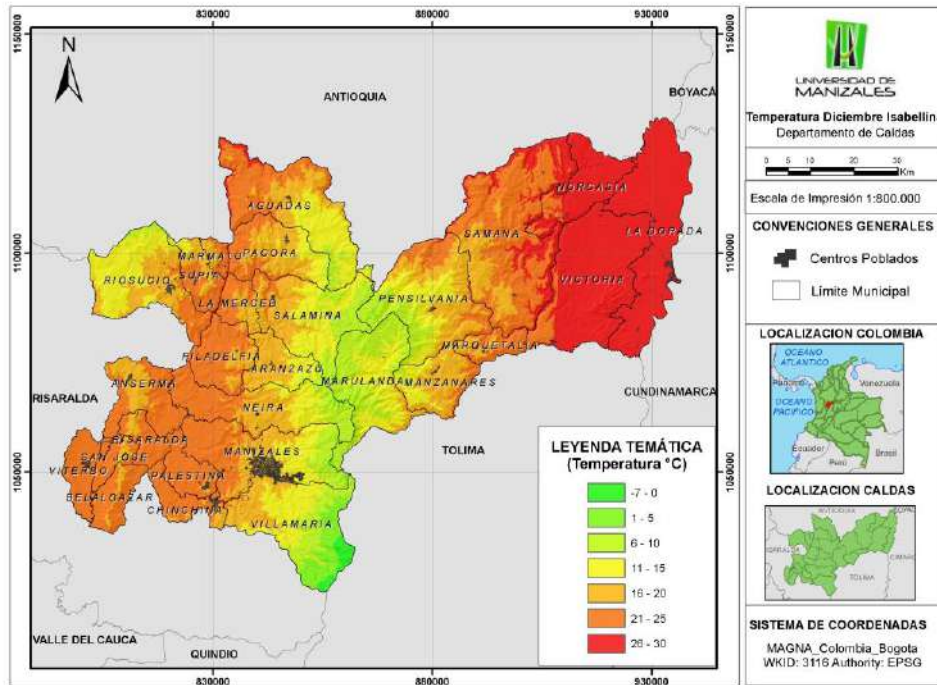












- **Interpolación de los datos de Precipitación (mm) y Temperatura (°C)**

**Script 3. Interpolar\_Datos:** Si los datos de Temperatura están disponibles, entonces no hay necesidad de correr el Script de la fórmula de Isabellina, sino que simplemente se corre un script para interpolar los datos de Temperatura y los datos de Precipitación.

En la figura siguiente se muestran los mapas de Temperatura mensual (°C), pero esta vez son generados a partir de los datos del IDEAM.



Figura 11: Ventana del Sript 3. Interpolat\_Datos

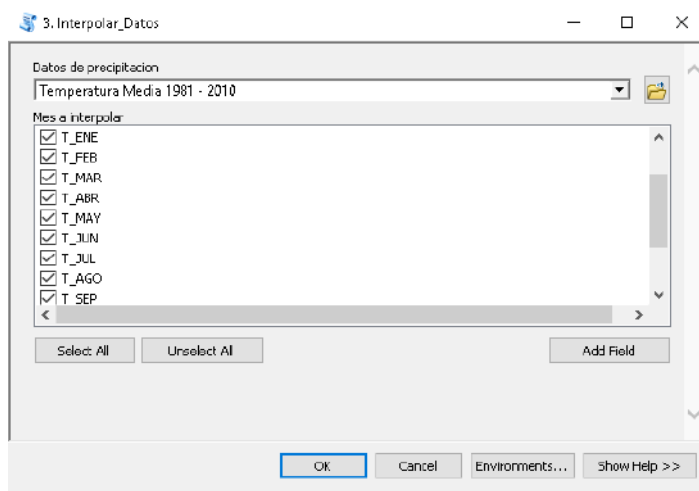
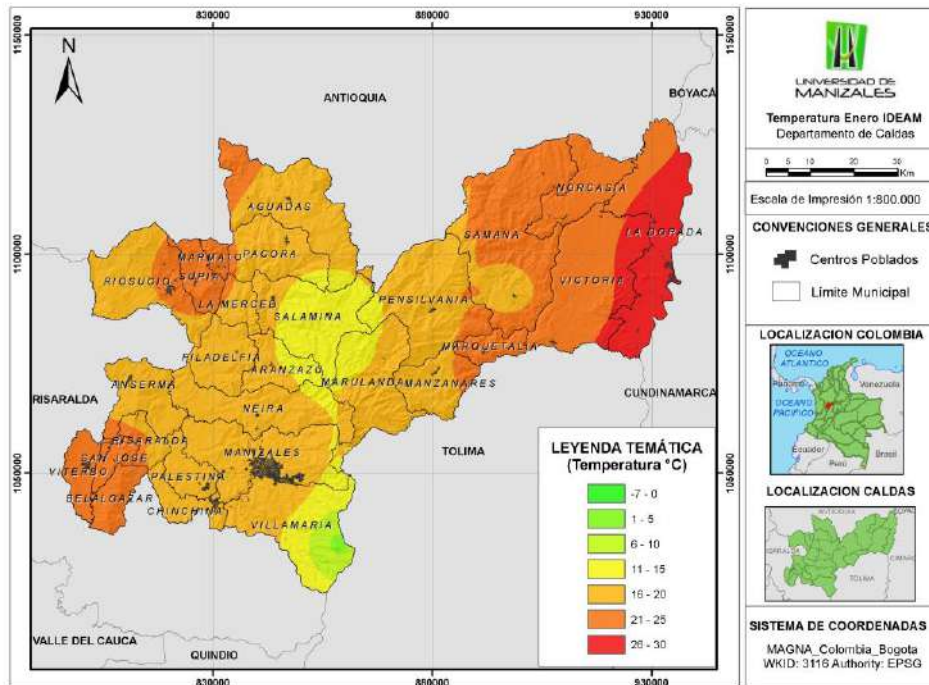
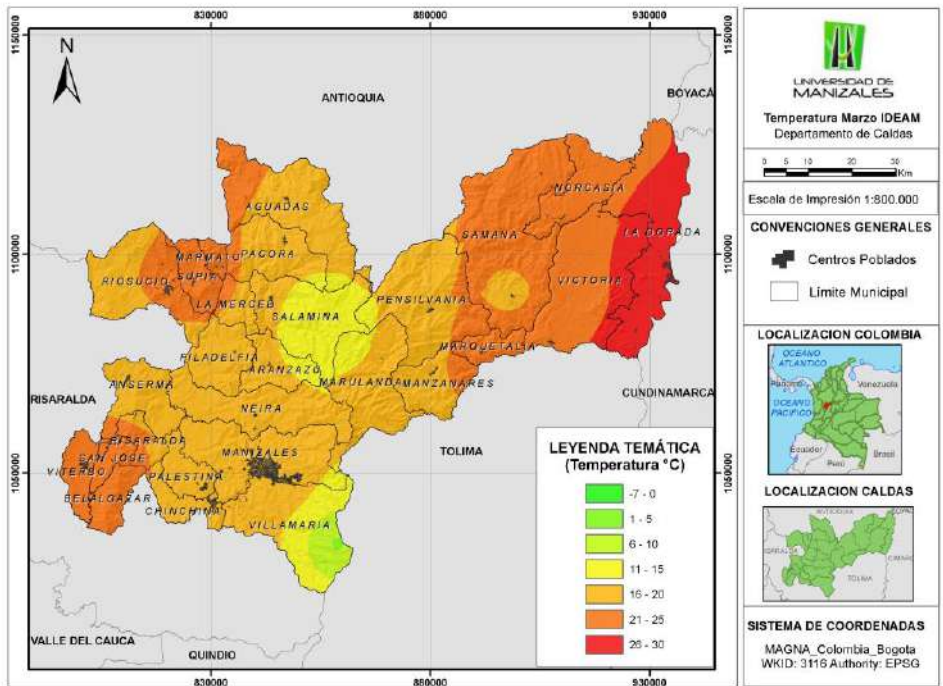
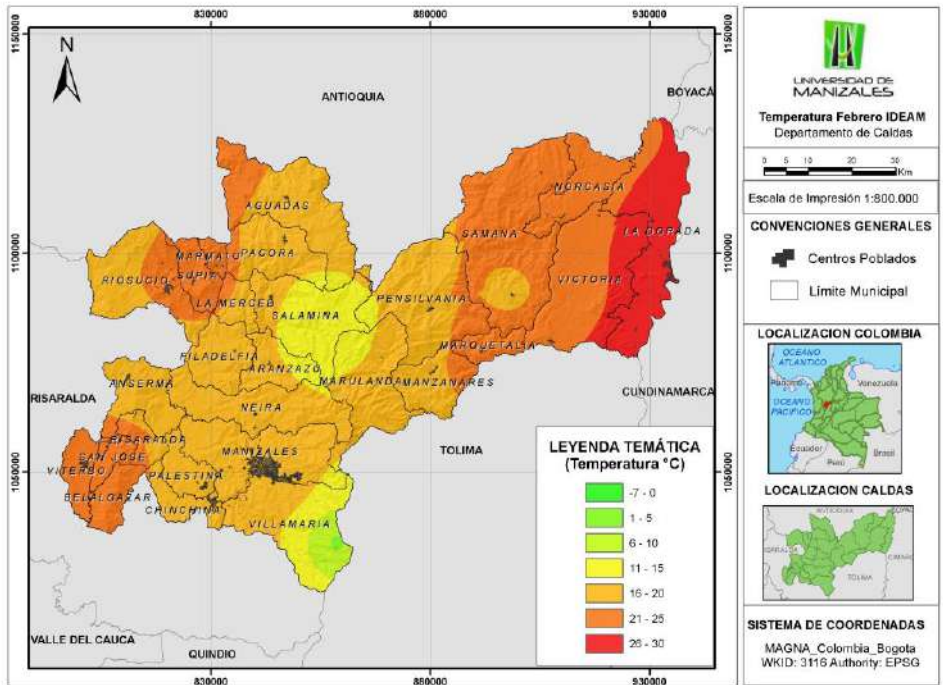
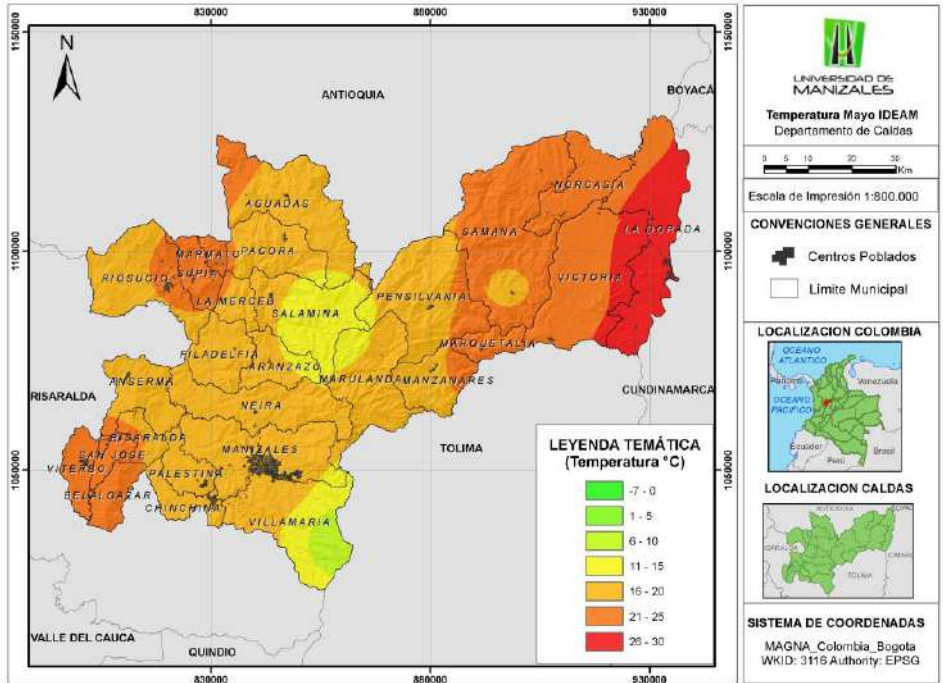
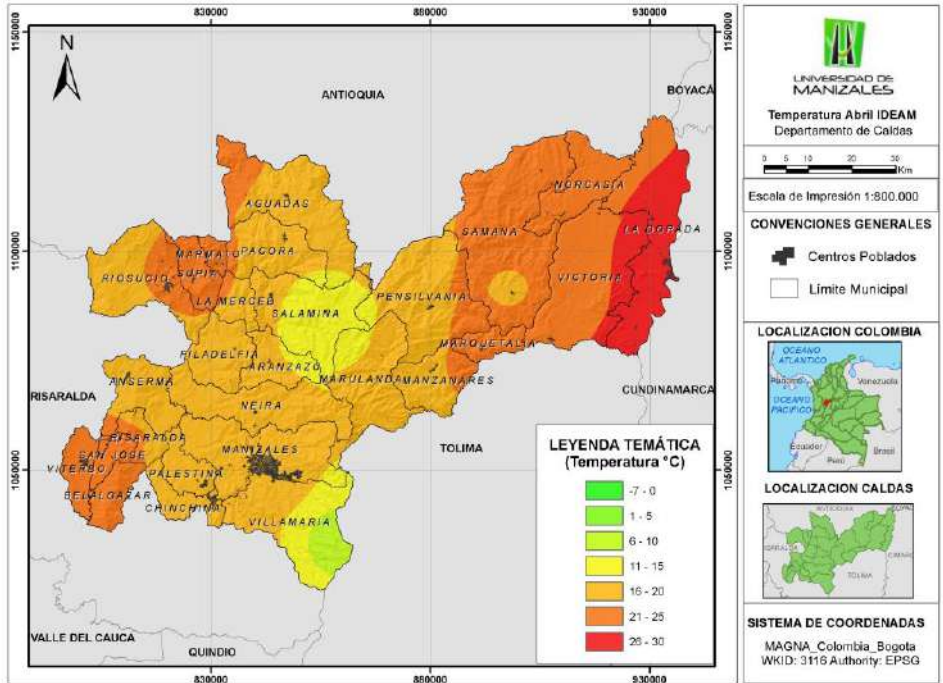


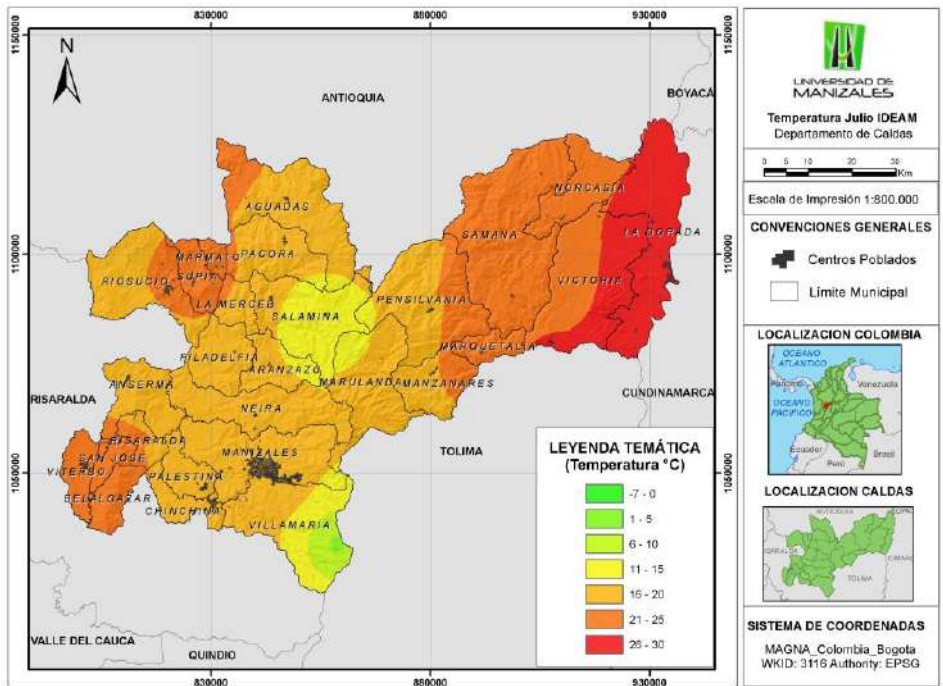
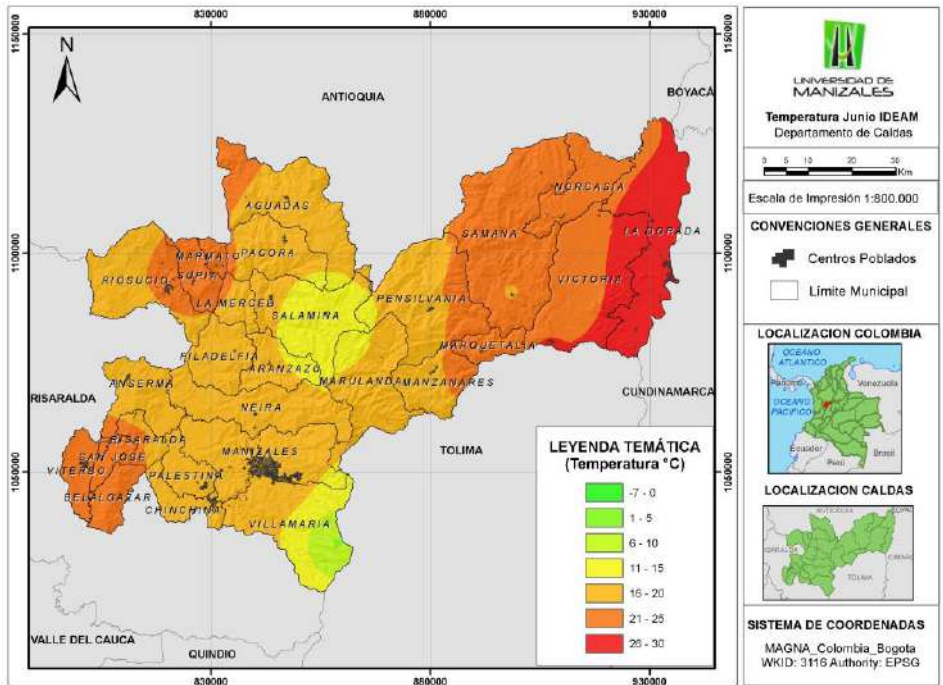
Figura 12: Mapas de Temperatura Mensual generados a partir de datos IDEAM, con el Sript 3. Interpolat\_Datos

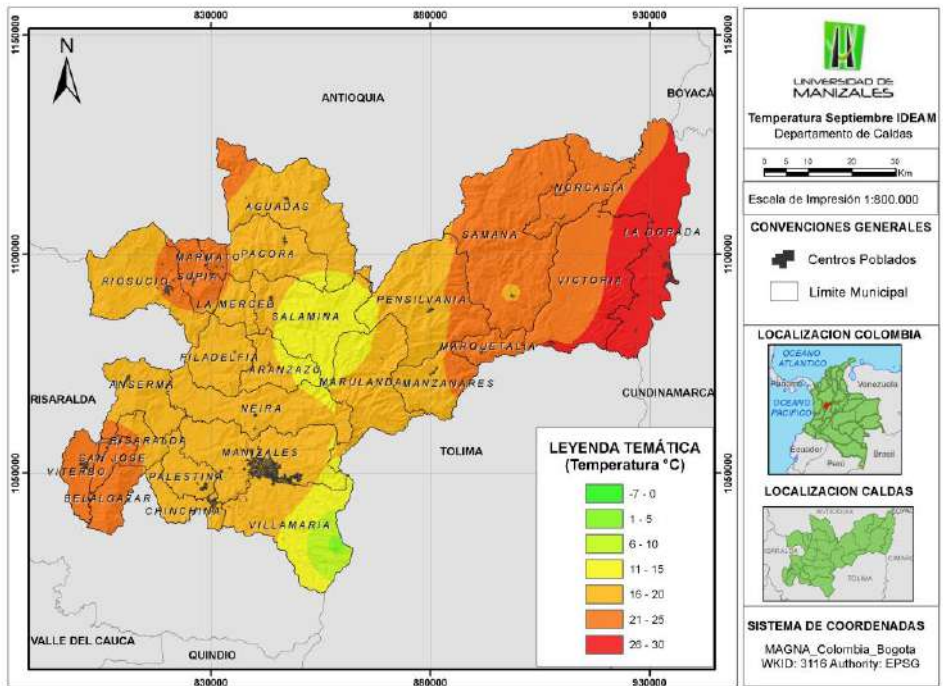
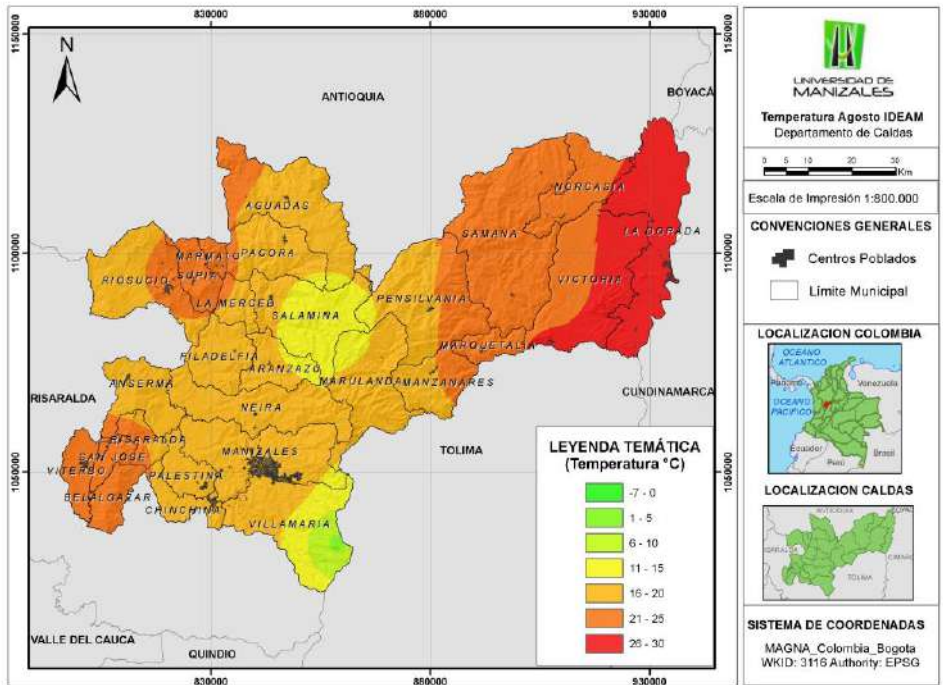


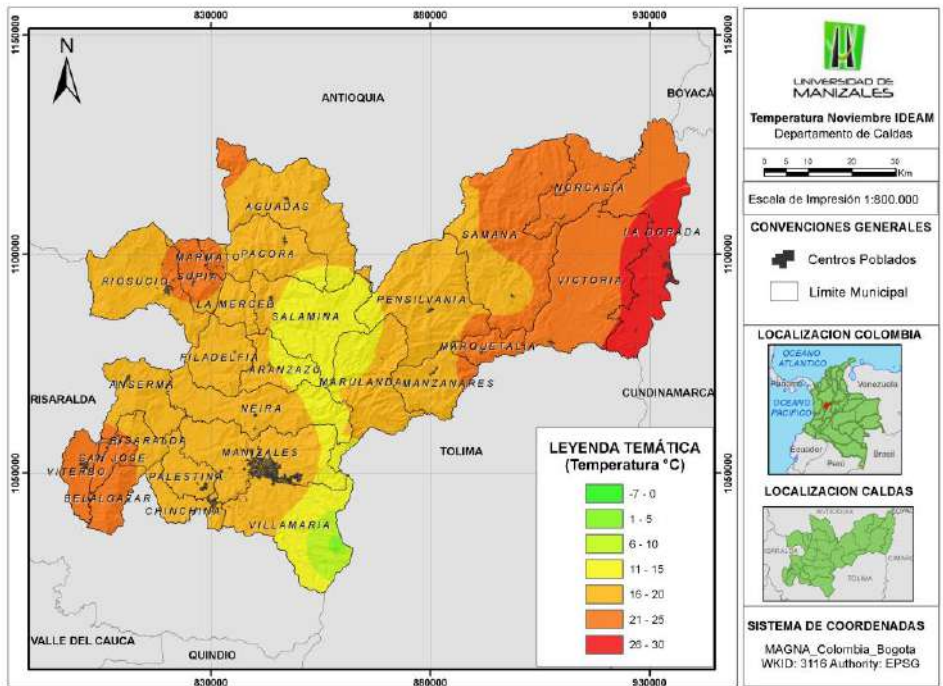
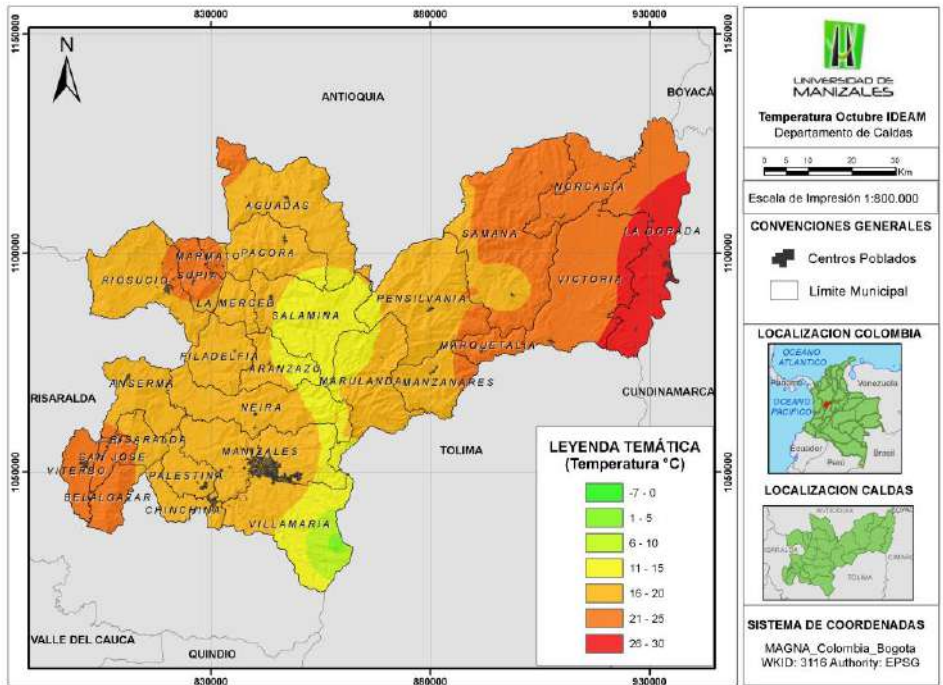




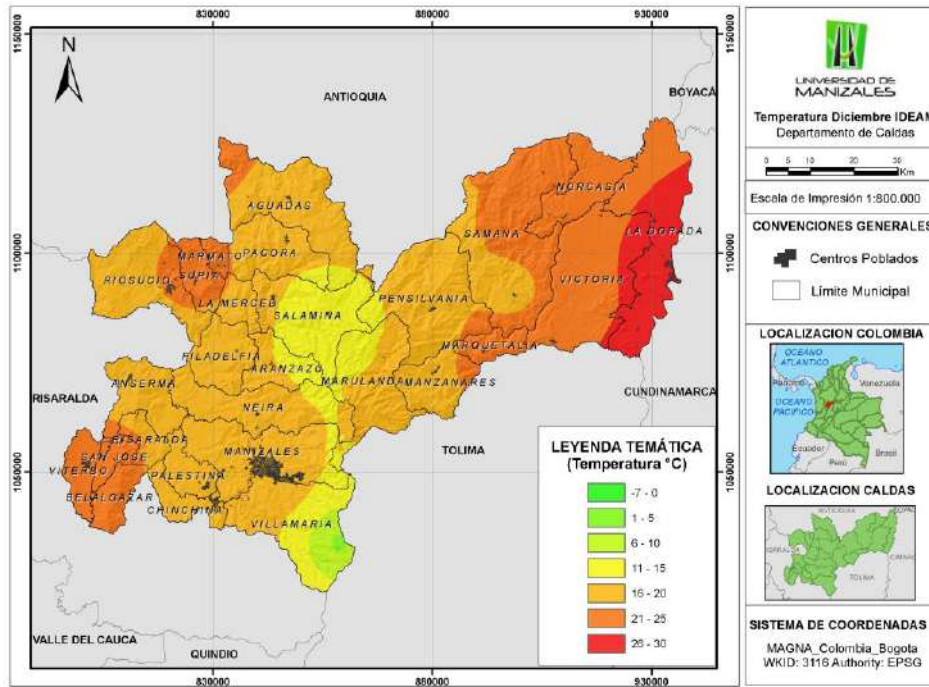






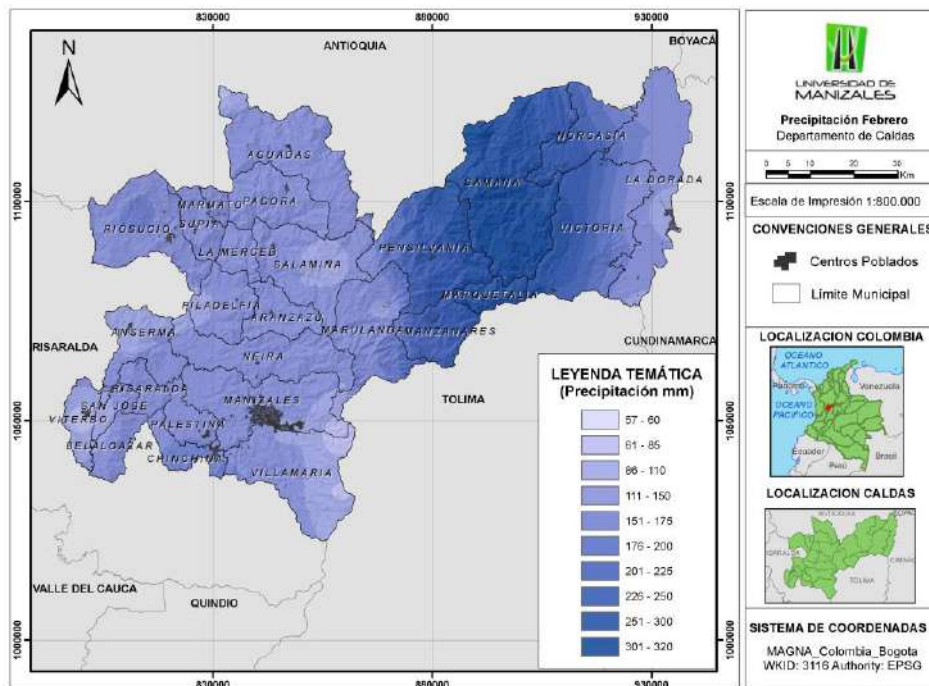
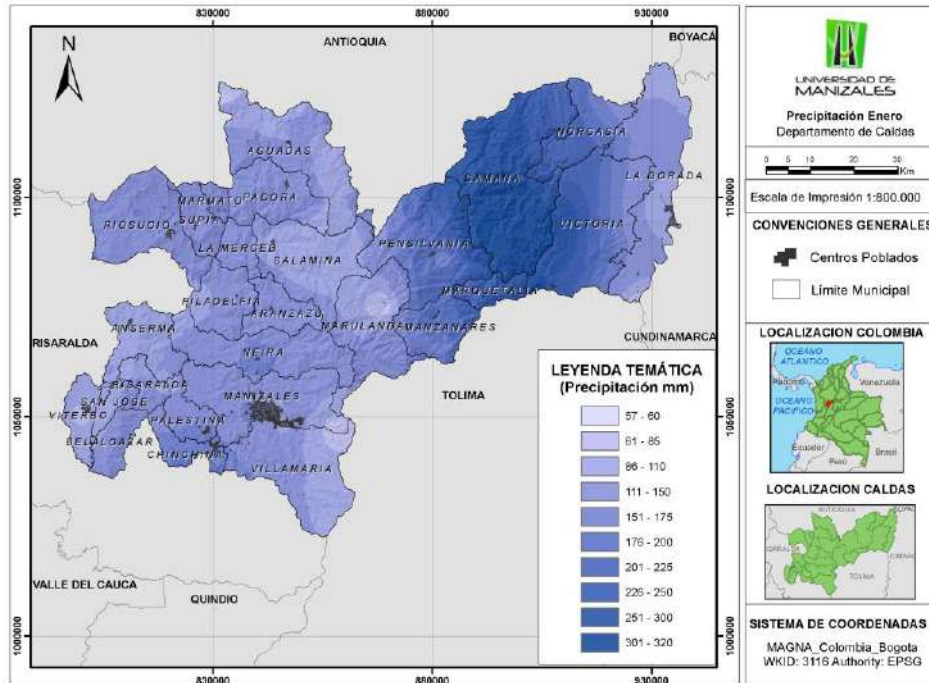




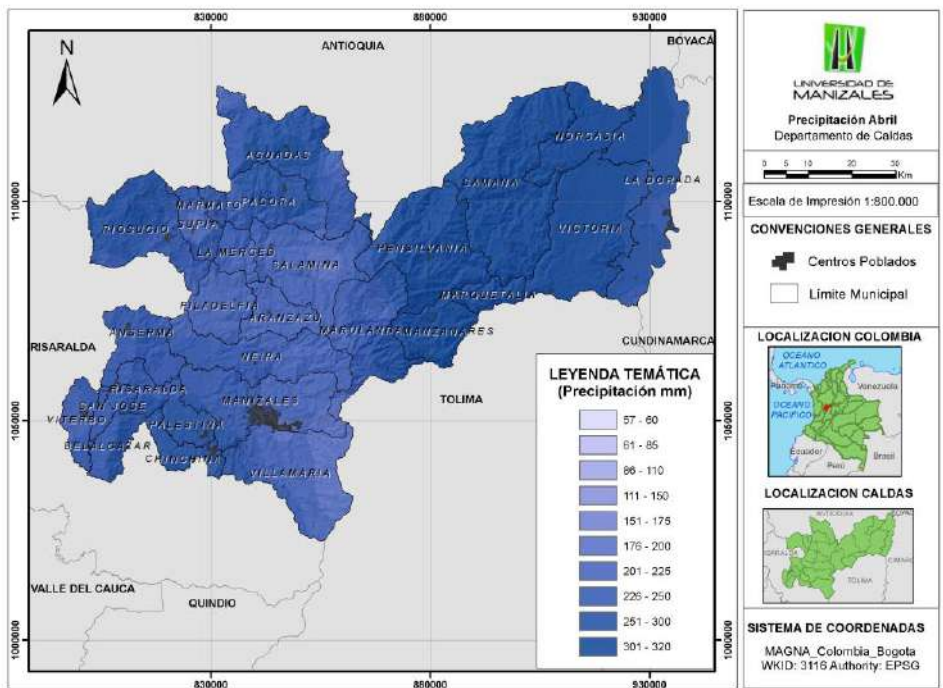
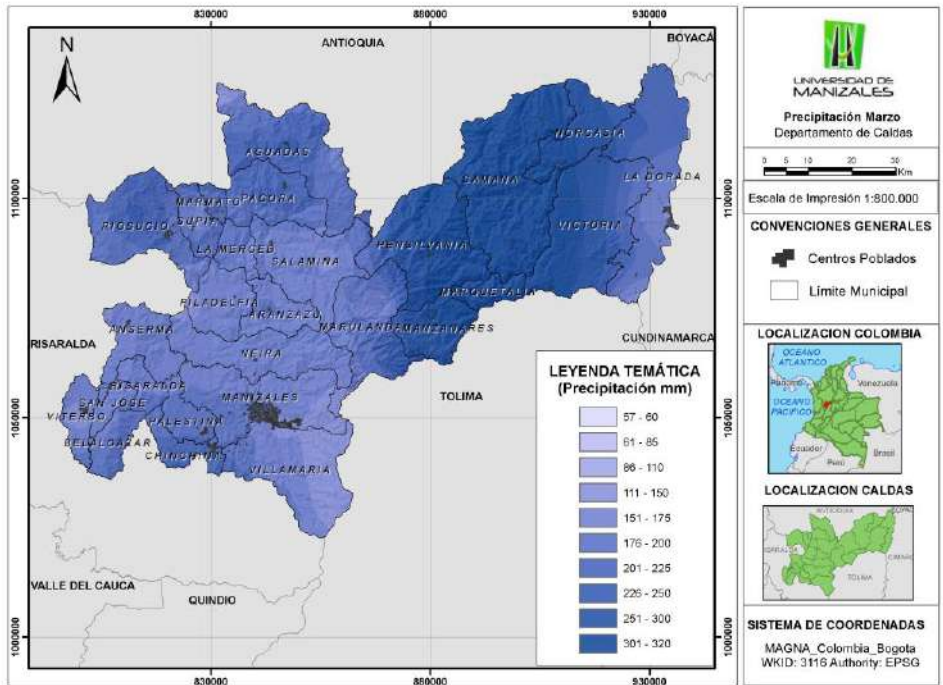


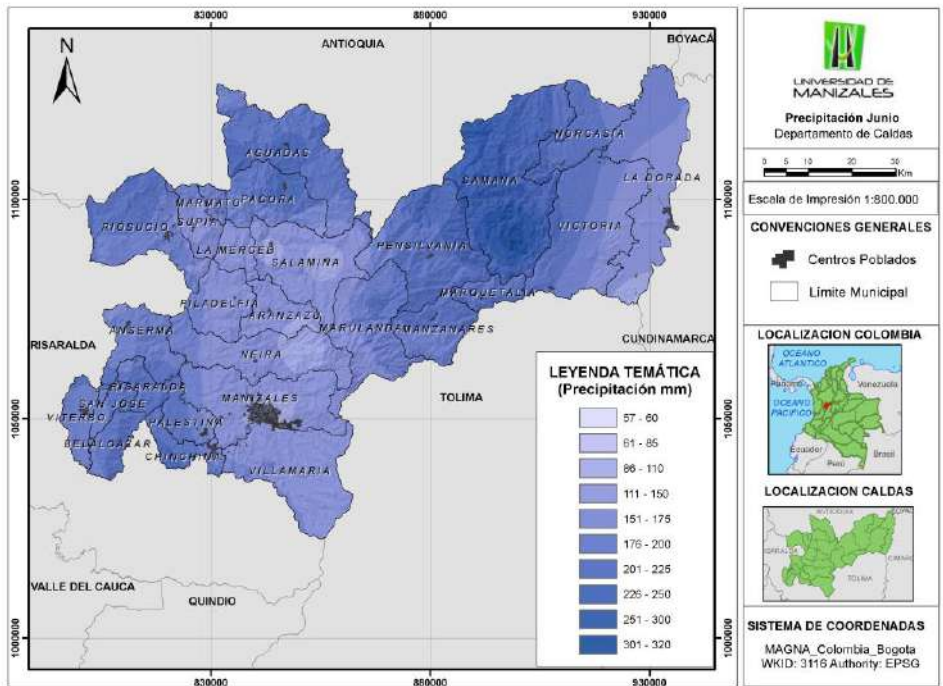
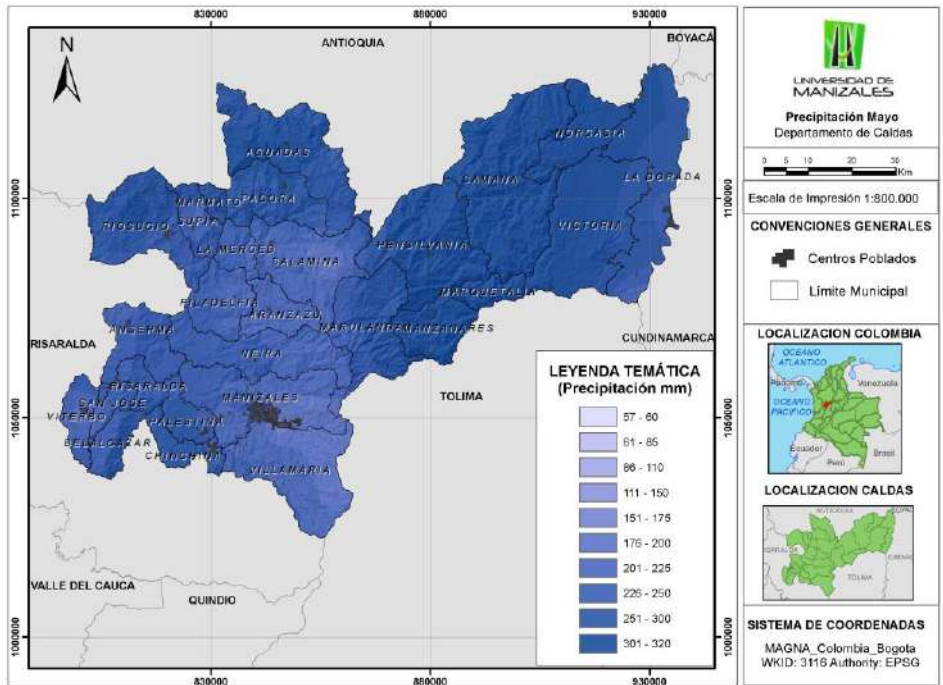
En la figura siguiente se muestran los mapas de Precipitación mensual (mm), generados a partir de los datos del IDEAM.

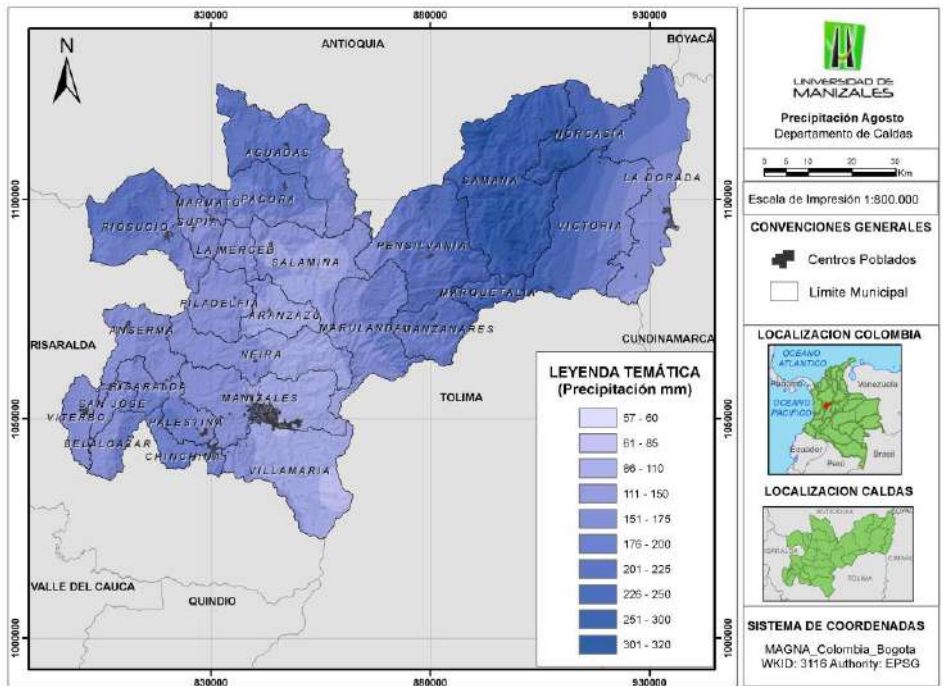
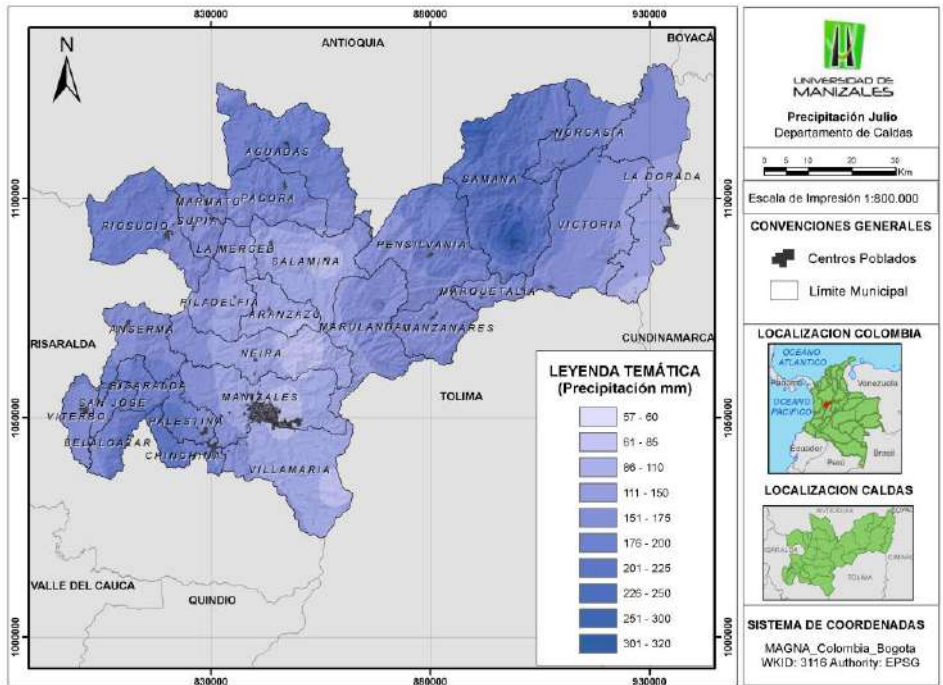
Figura 13: Mapas de Precipitación Mensual generados a partir de datos IDEAM, con el Script 3. Interpolar\_Datos.



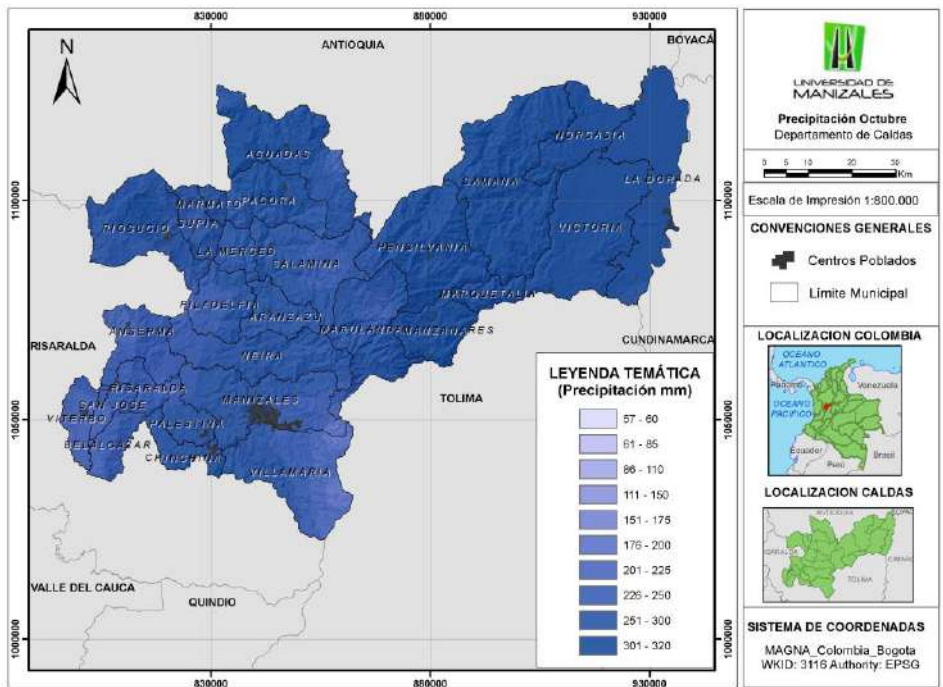
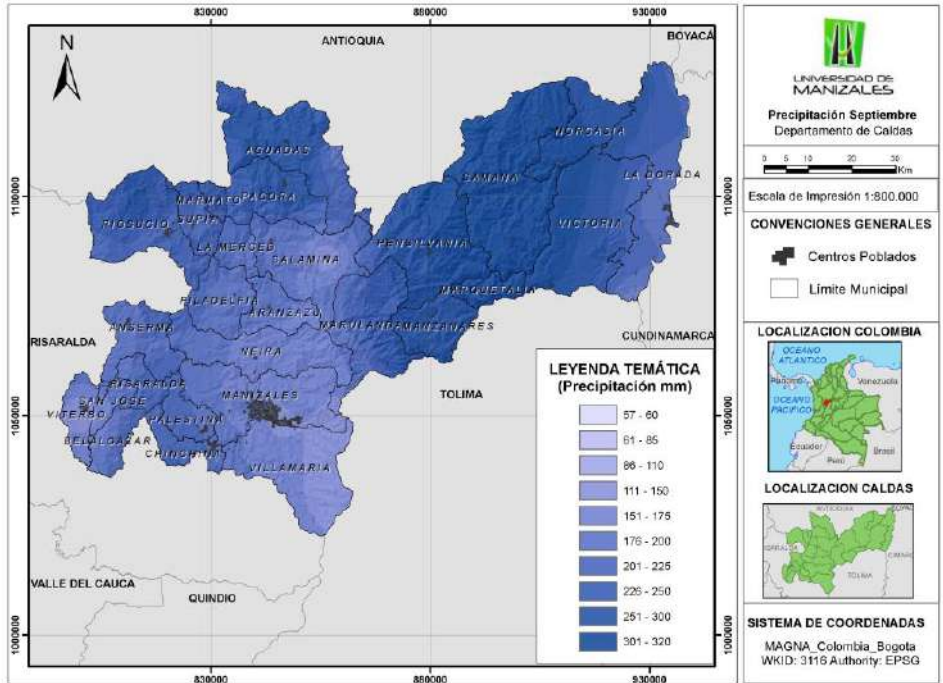


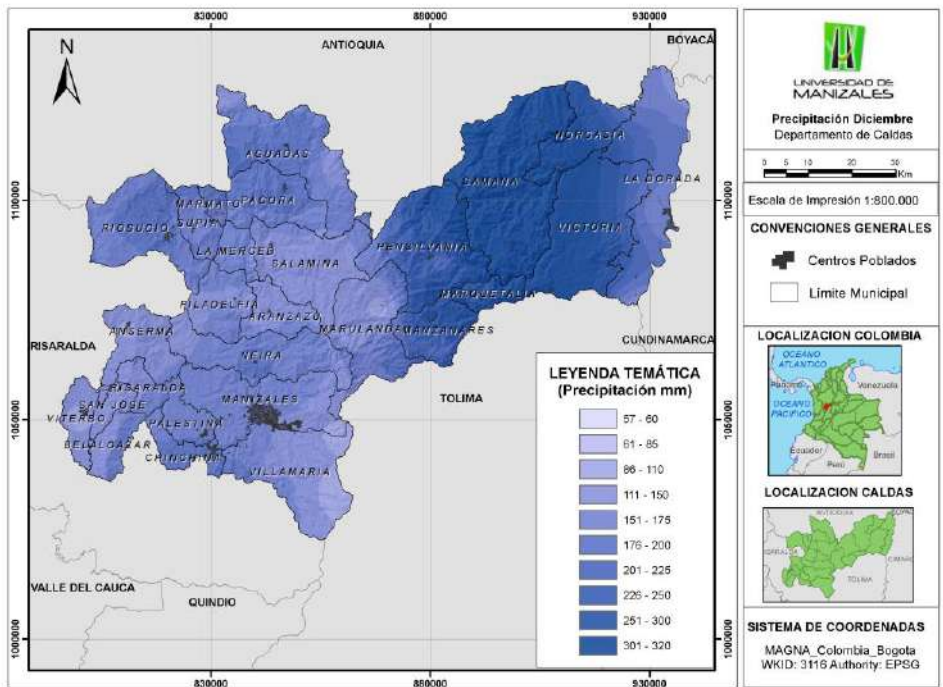
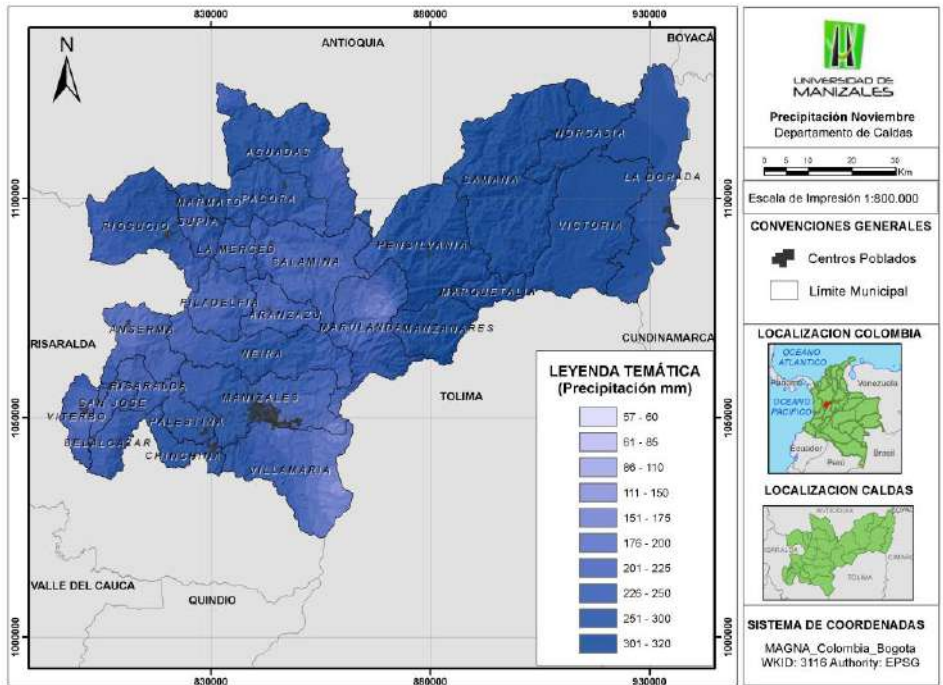










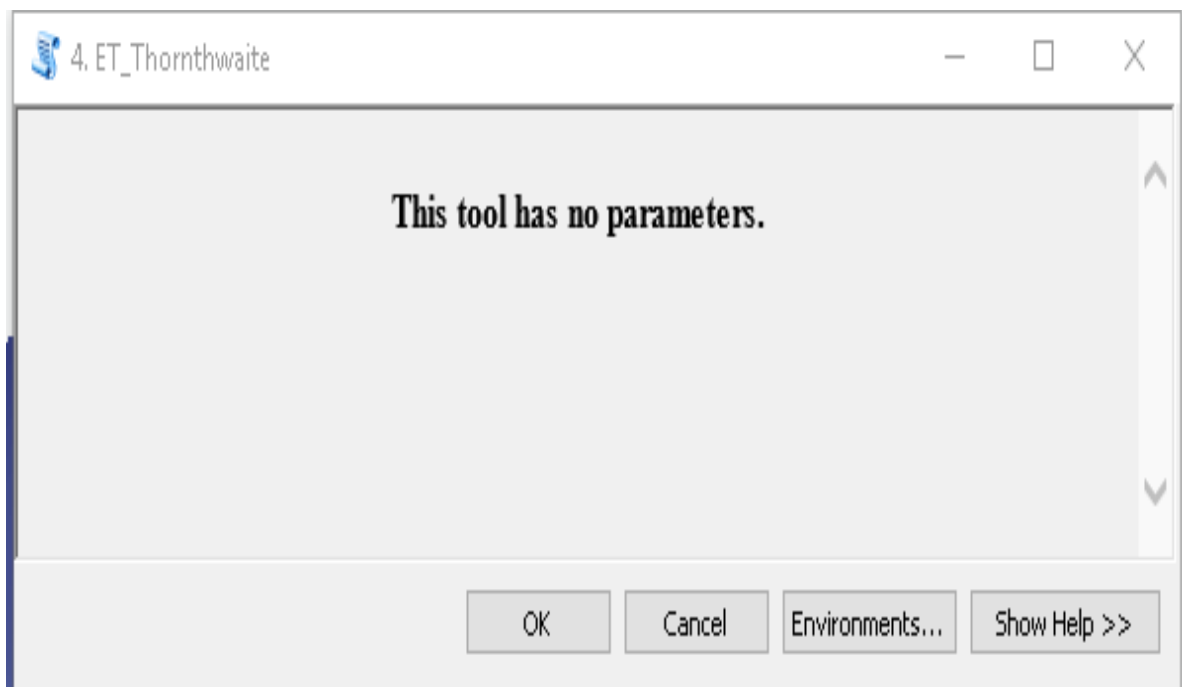


- **Generación de los mapas de Evapotranspiración Potencial**

Script 4. ET\_Thornthwaite: Este script corre el algoritmo para generar los mapas mensuales de Evapotranspiración, aplicando la fórmula propuesta por Thornthwaite [4], en el cual se tiene como insumo principal los mapas de temperatura mensual (Según la fórmula propuesta por Thornthwaite [4], mencionada con anterioridad).

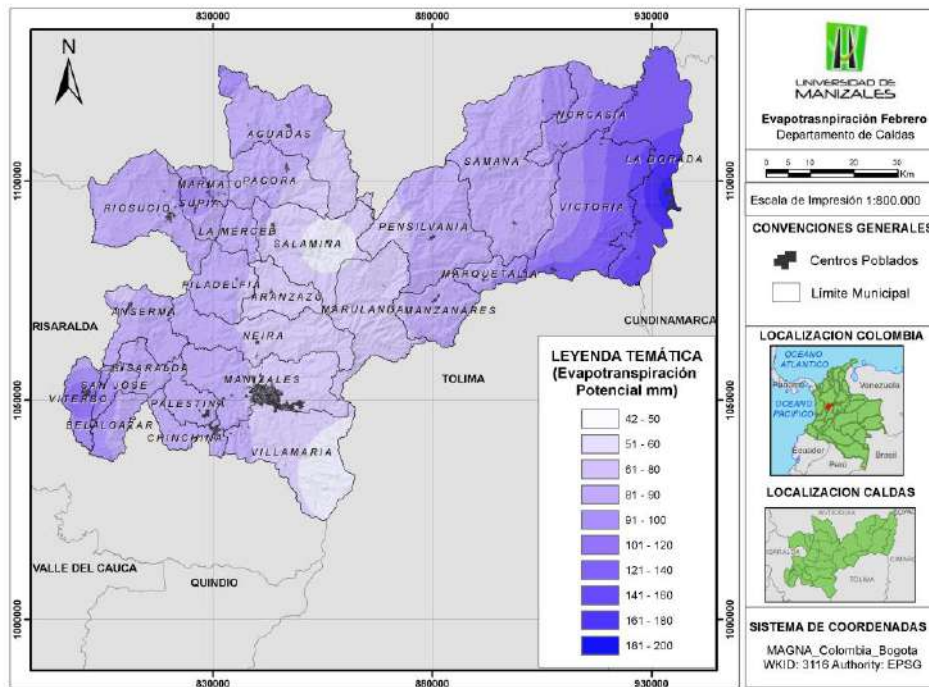
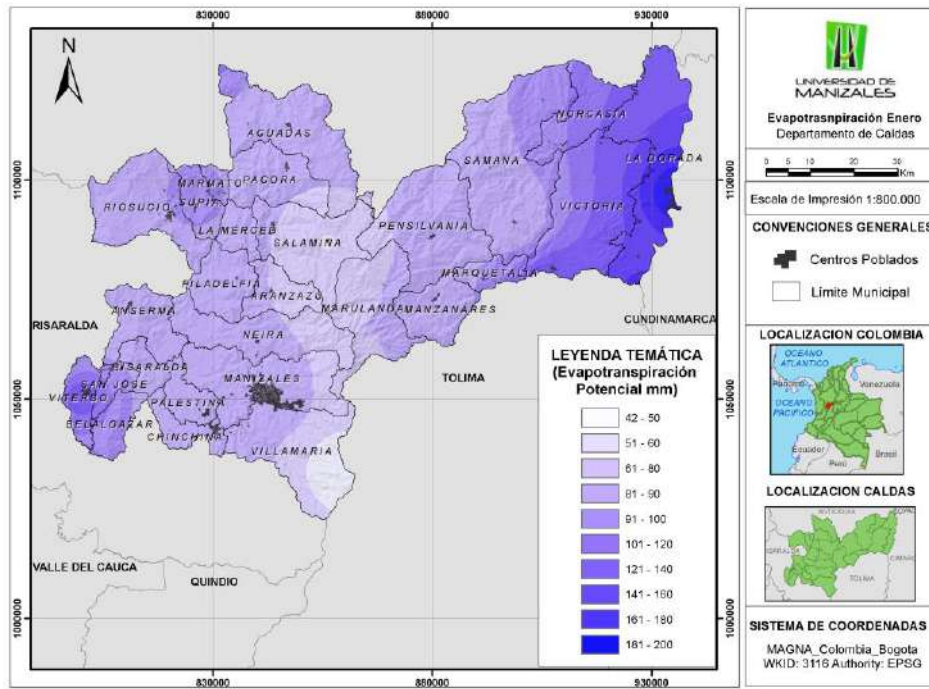
En la siguiente figura se muestran los mapas generados por este script.

*Figura 14: Ventana del Script 4. ET\_Thornthwaite*

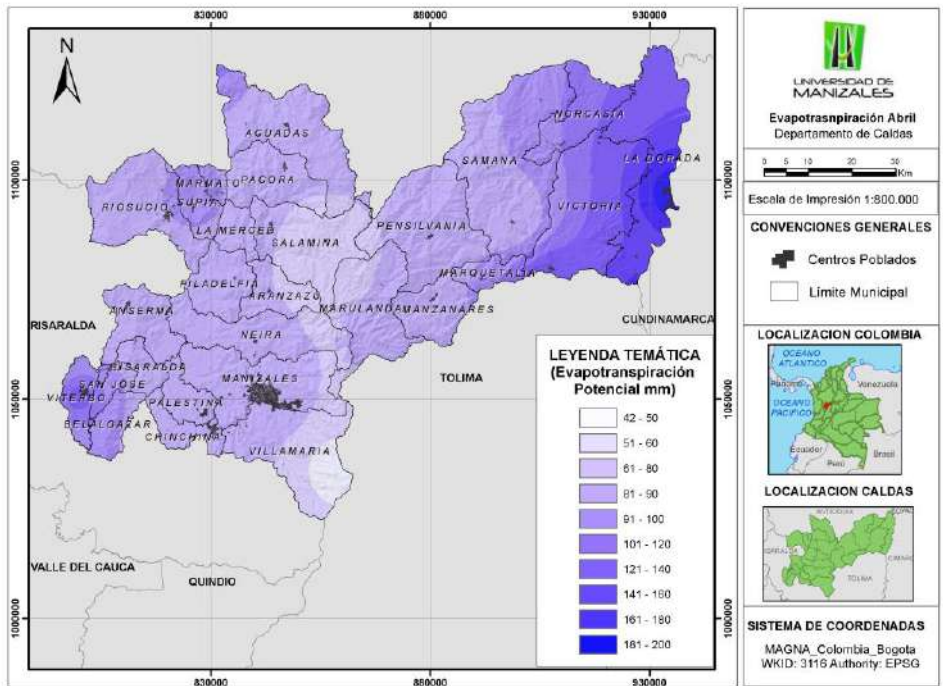
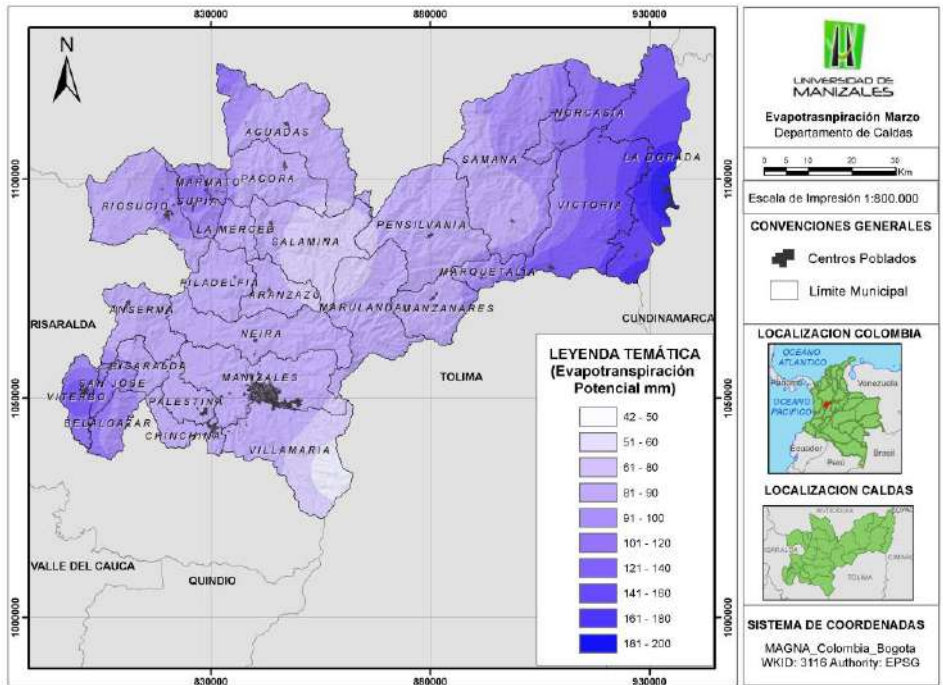


Como se puede observar, en la ventana para correr este script no se ingresa ningún parámetro, esto porque en la rutina ya se ha escrito cuales son los nombres de las capas a ingresar en el algoritmo (Precipitación y Temperatura).

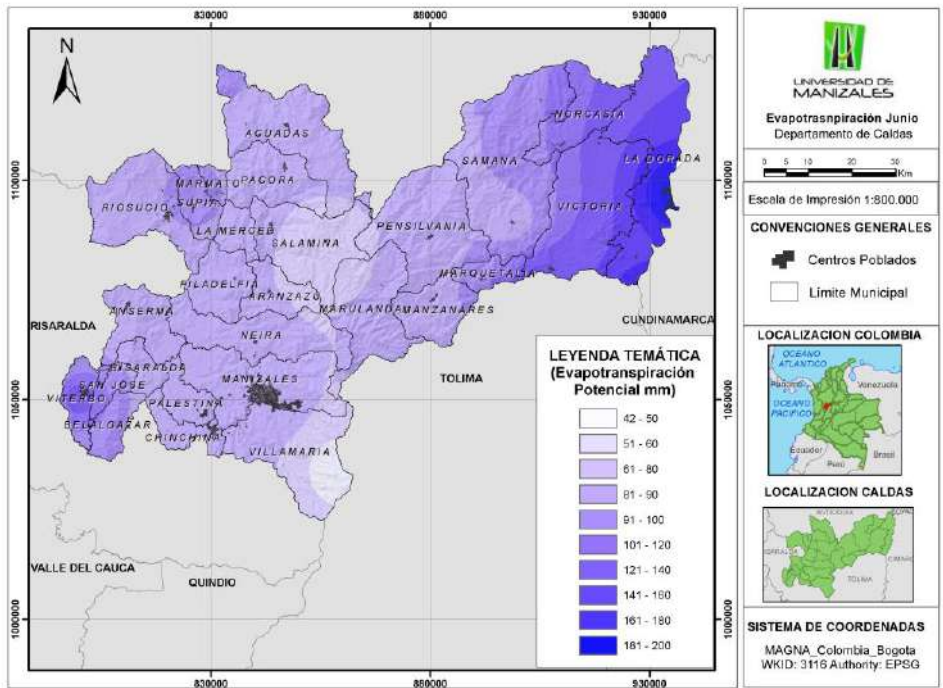
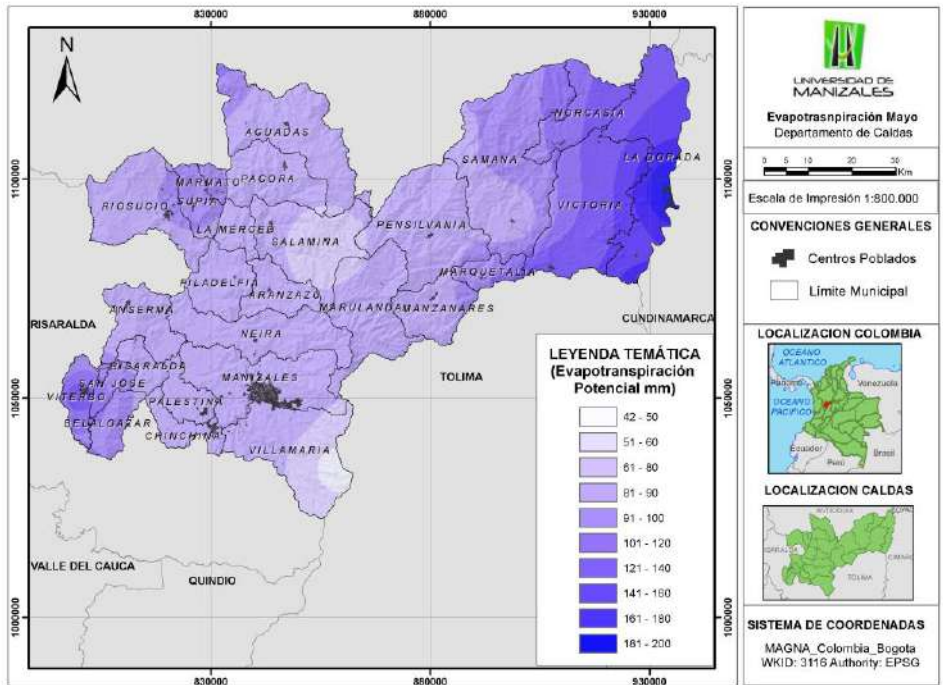
Figura 15: Mapas de Evapotranspiración Potencial generados con el Script 4. ET\_Thorntwaite

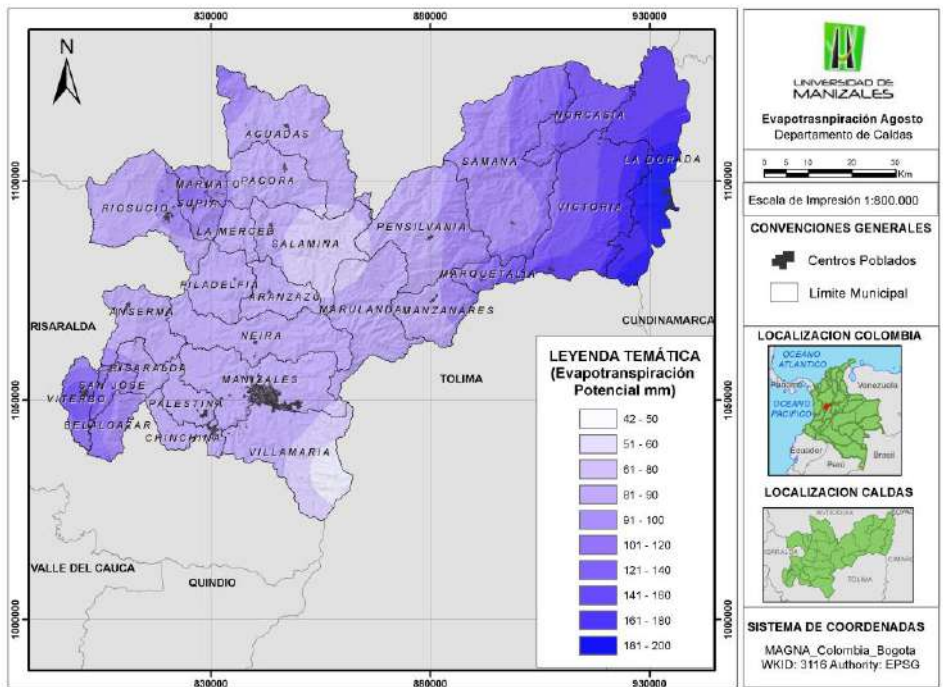
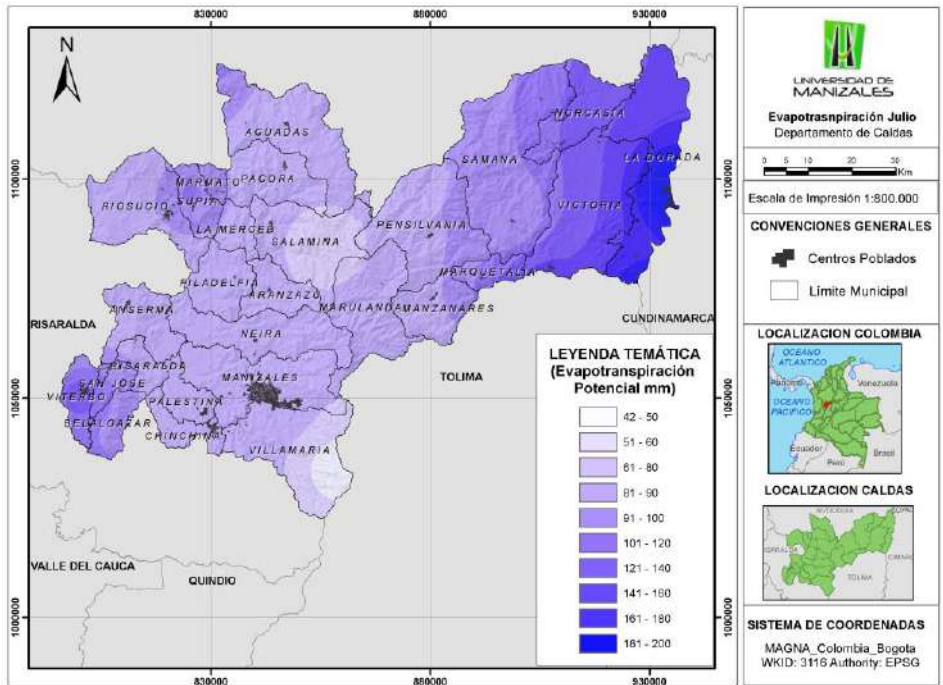


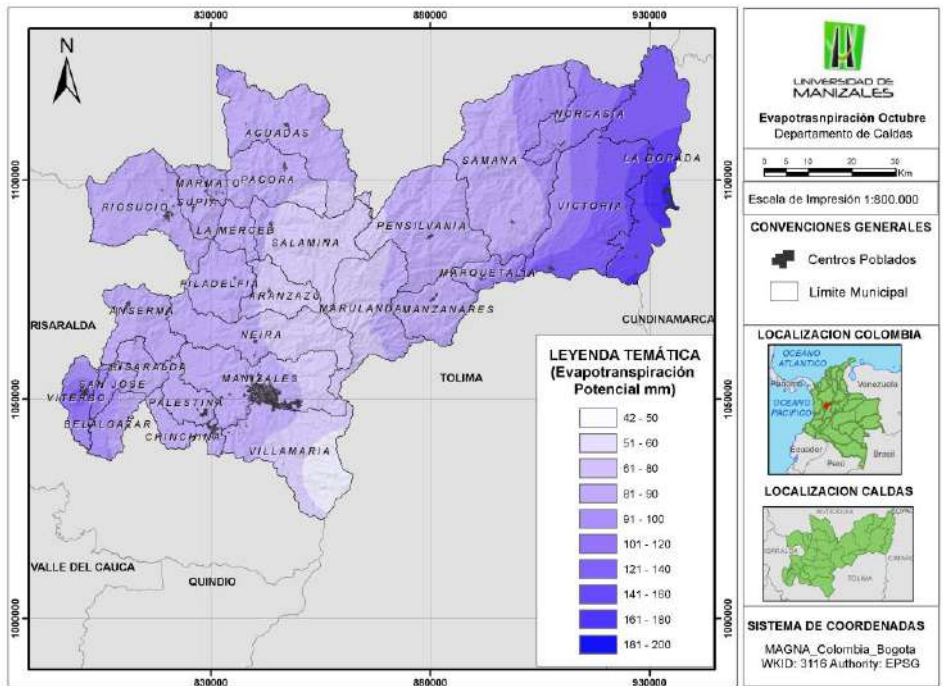
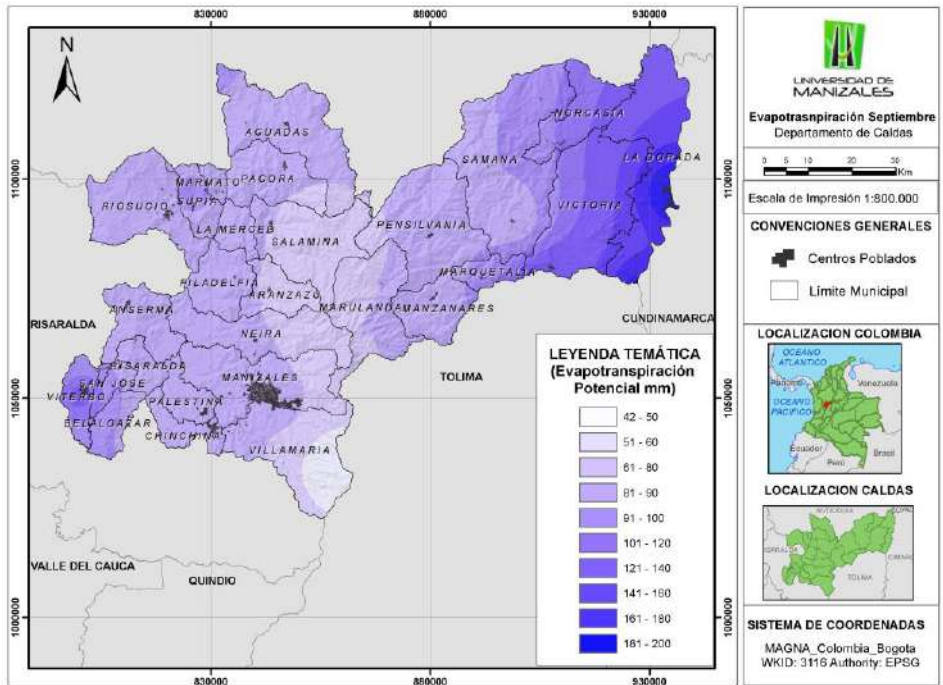




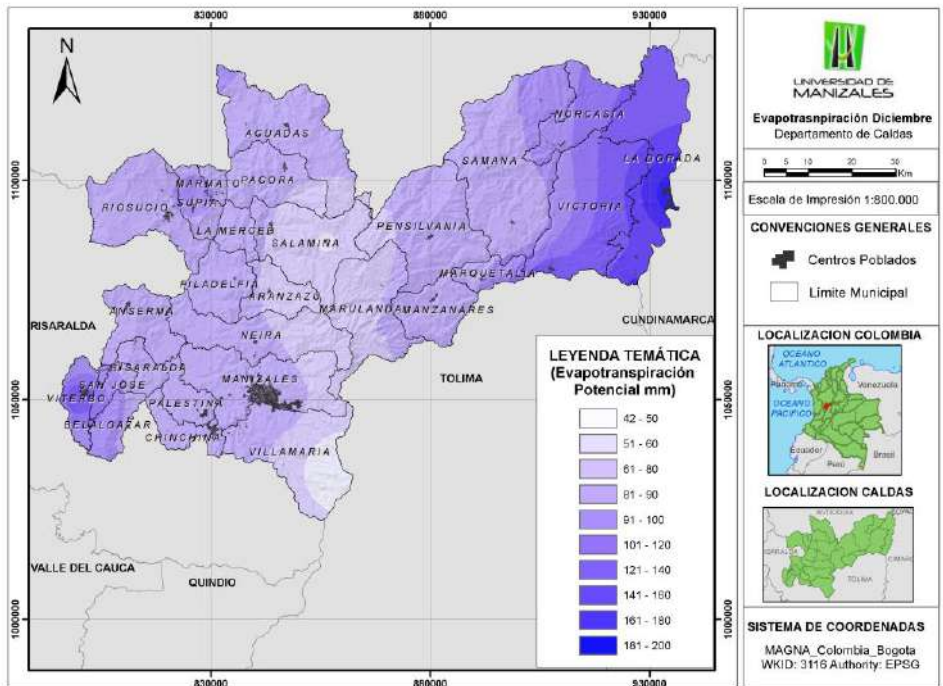
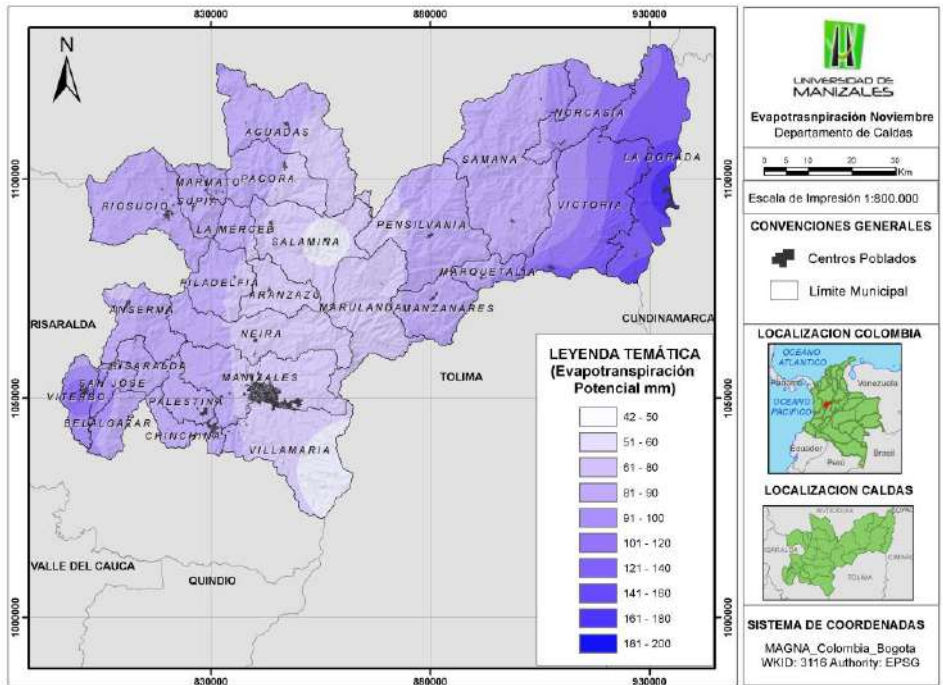












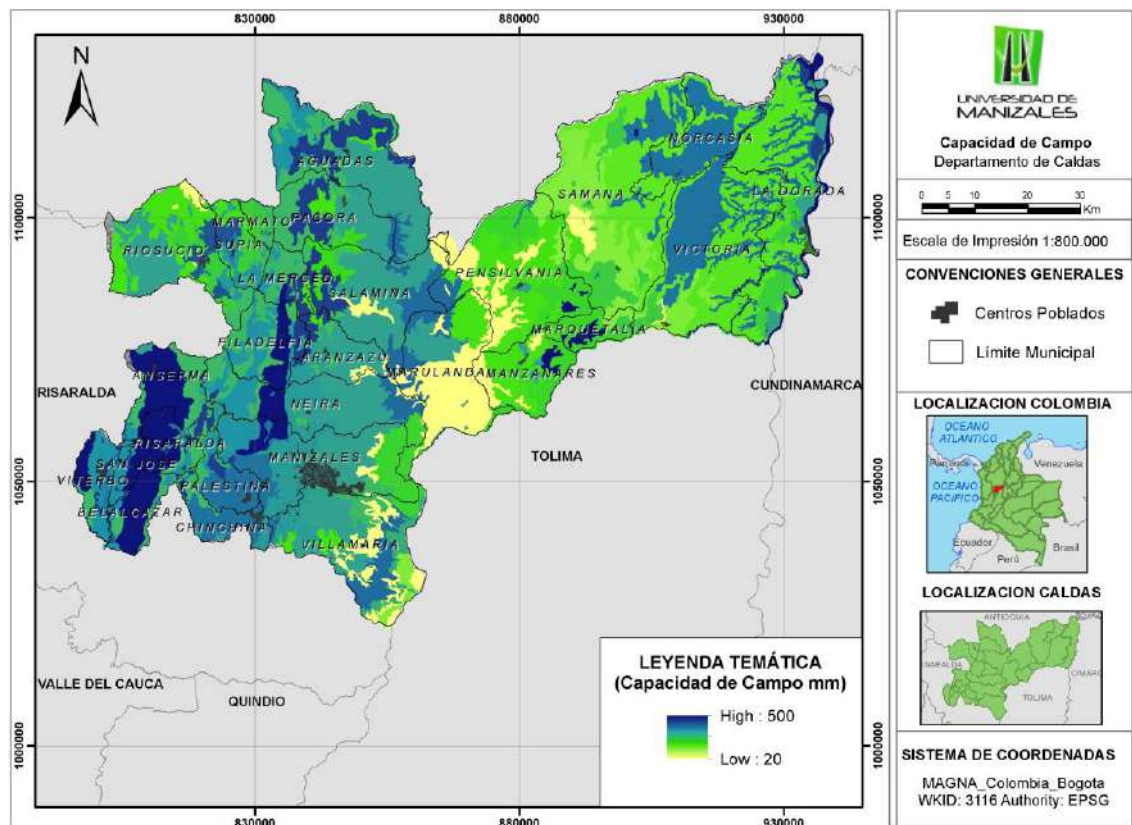
- **Mapa de Capacidad de Campo**

El último insumo necesario para realizar el balance hídrico es el mapa de capacidad de campo. Como se mencionó anteriormente, varios autores proponen diferentes supuestos de Capacidad de Campo del suelo o lo que también podríamos llamar Reserva Máxima (Rmax) del suelo; por ejemplo, Thornthwaite propone 100 mm como Capacidad de Campo.

En algunos casos se podrá contar con un mapa de suelos que contenga información de capacidad de campo, determinada a partir de la información de las unidades agrológicas y será esta la mejor y más precisa opción.

Para el presente trabajo, se cuenta con el mapa de Capacidad de Campo del departamento de Caldas

Figura 16: Mapa de Capacidad de Campo

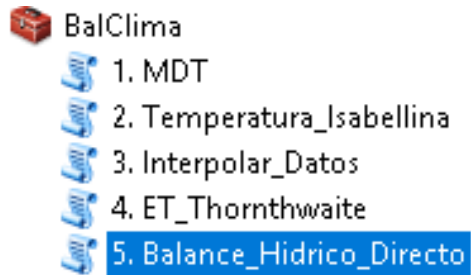


Fuente: Mapa De Suelos, IGAC 1988

- **Actividad 3: Balance Hídrico**

Tomando como base para el cálculo del balance hídrico, la metodología expuesta en el documento de Claro Rizo [2], se realizó el Script para el Balance\_Hidrico\_Directo, como se puede apreciar en el menú de la figura siguiente.

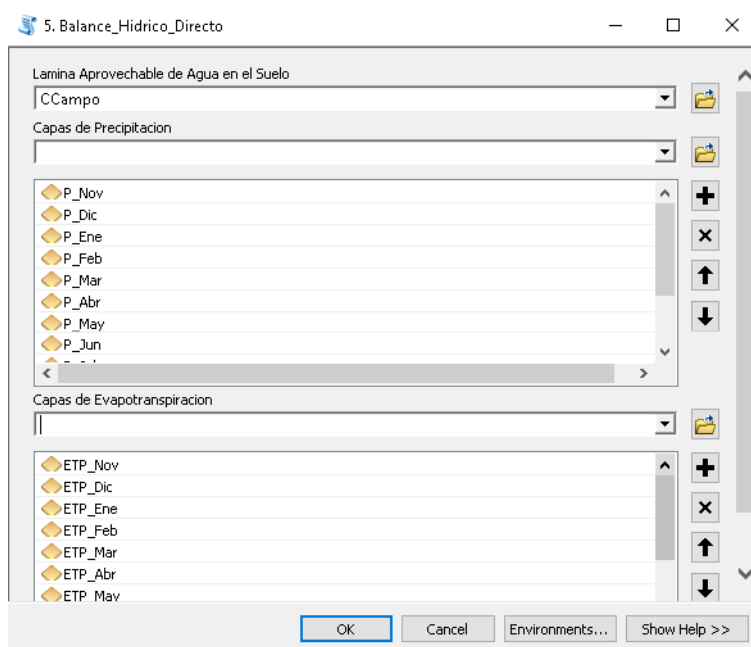
Figura 17: Menú del Balance Hídrico



Para correr el Script del Balance Hídrico es necesario tener los insumos del Mapa de Capacidad de Campo (ó Lámina Aprovechable de Agua en el Suelo), los mapas ó capas de Precipitación Mensuales y los mapas ó capas de Evapotranspiración Potencial.

Una vez se cuenta con esto, se corre el Script y se diligencian los cuadros de diálogo que aparecen en la ventana. Ver figura siguiente:

Figura 18: Ventana del Script 5. Balance\_Hidrico\_Directo

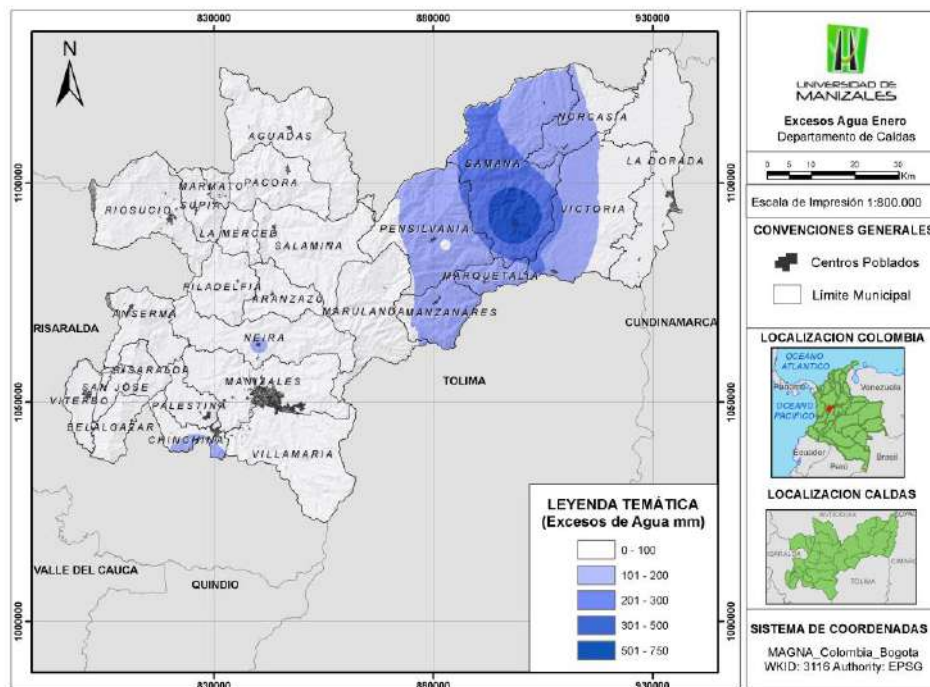


Para diligenciar los cuadros de diálogo de la Ventana del Script del Balance Hídrico Directo, es muy importante que el primer mes que se coloque en los cuadros sea el inmediatamente posterior al mes más húmedo del año, después se añaden los restantes en estricto orden hasta completar los doce (12) meses, tanto para la precipitación como para la Evapotranspiración. De esta manera se garantiza que el modelo empieza en un mes con las Reservas máximas (Rmax) de agua en el suelo. Para este caso, se escoge el mes de noviembre como el primero en Balance Hídrico, ya que octubre se mostró como el más húmedo.

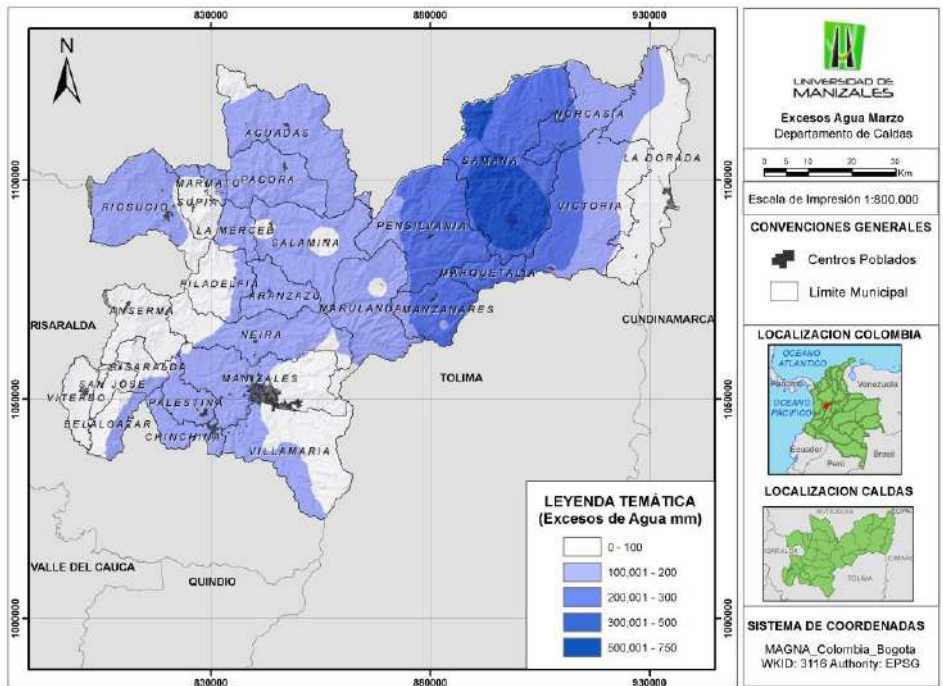
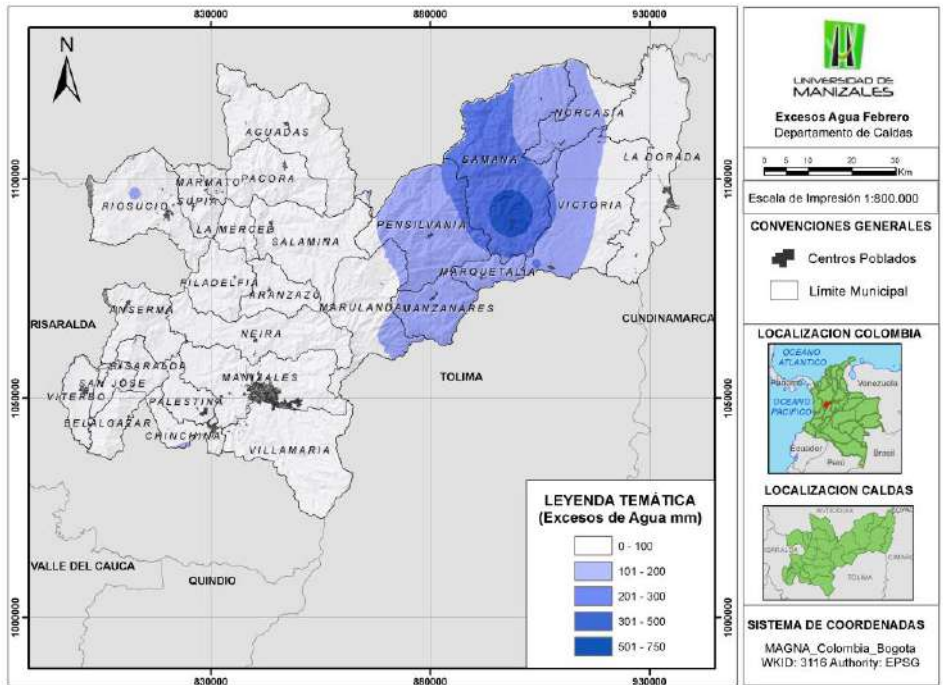
Una vez se corre el script del Balance Hídrico, se generan los mapas mensuales de Excesos de agua mensual y Déficit de agua mensual necesarios para la Clasificación Climática.

En las siguientes figuras se muestran los mapas de Exceso y Déficit de agua mensual generados a partir del Balance Hídrico.

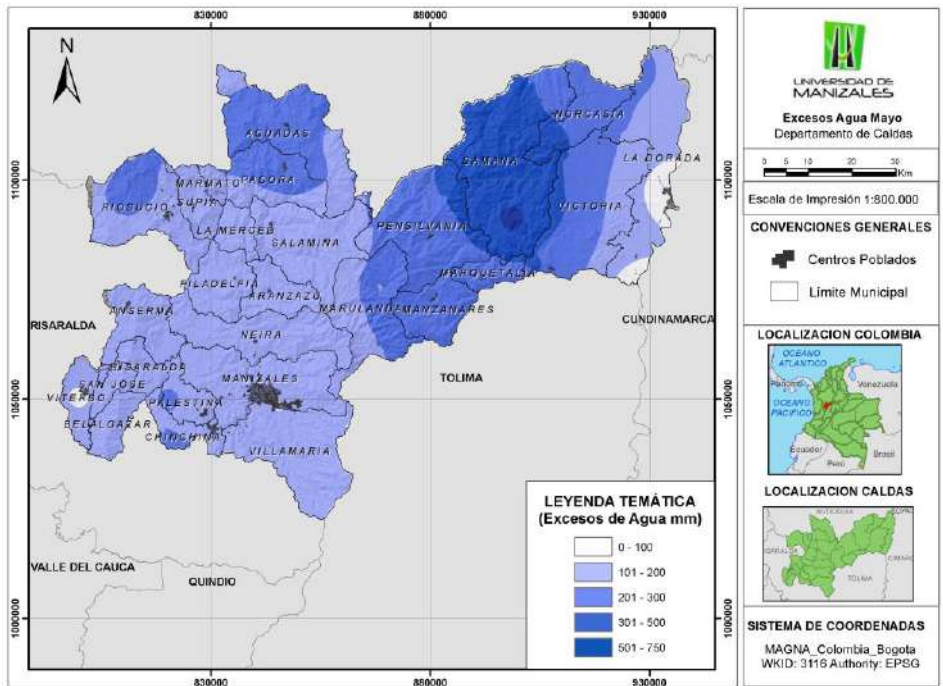
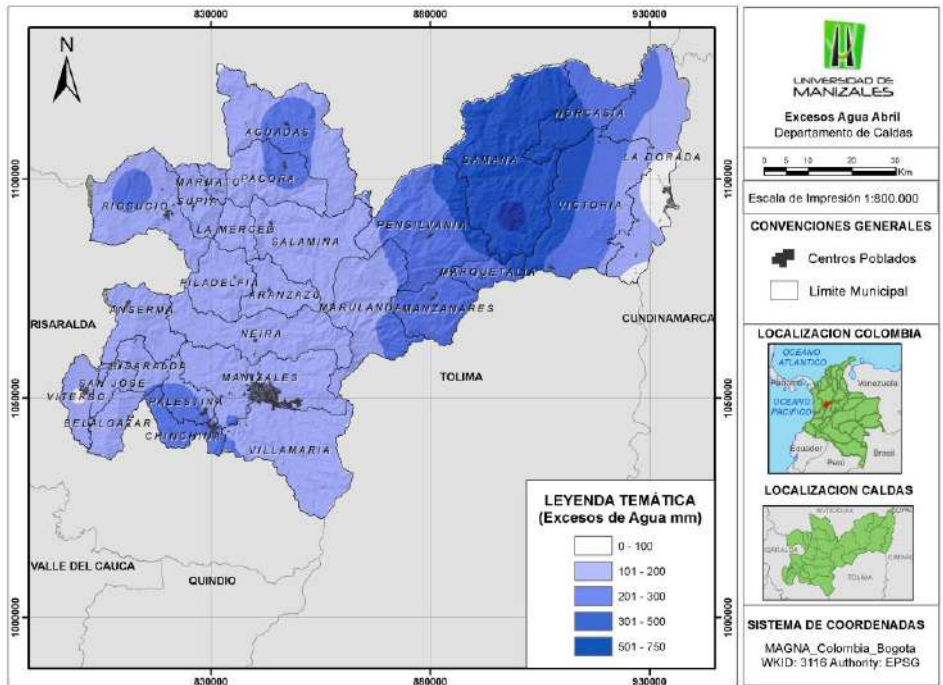
Figura 19: Mapas de Exceso de agua mensual

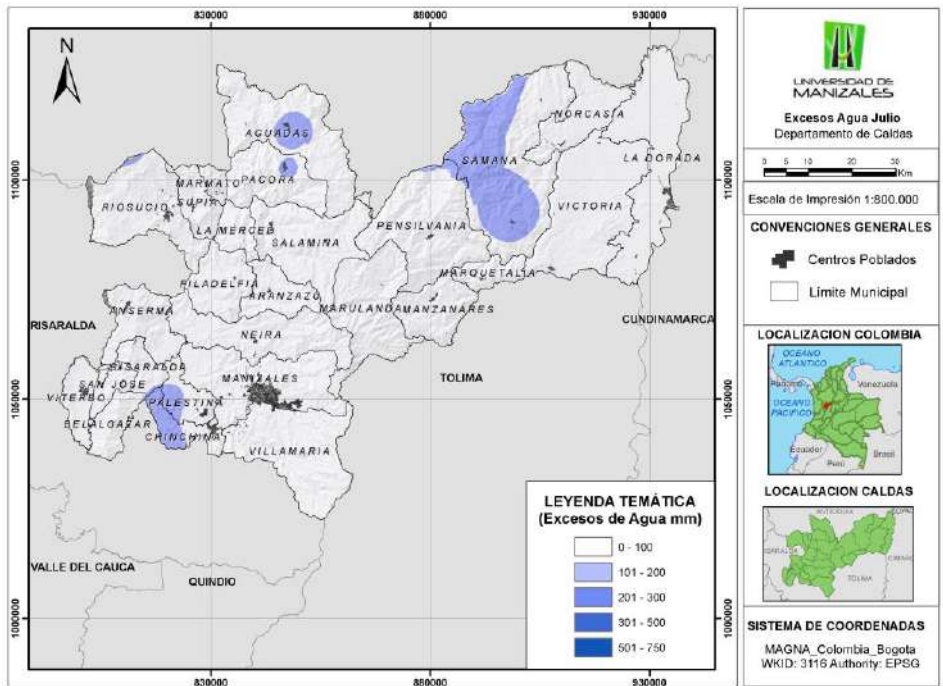
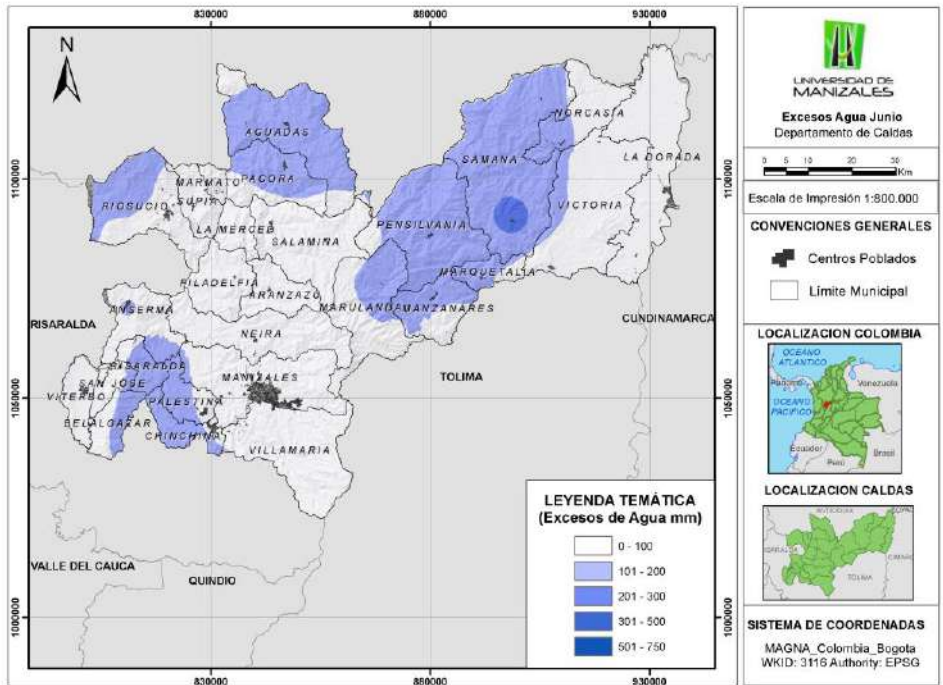


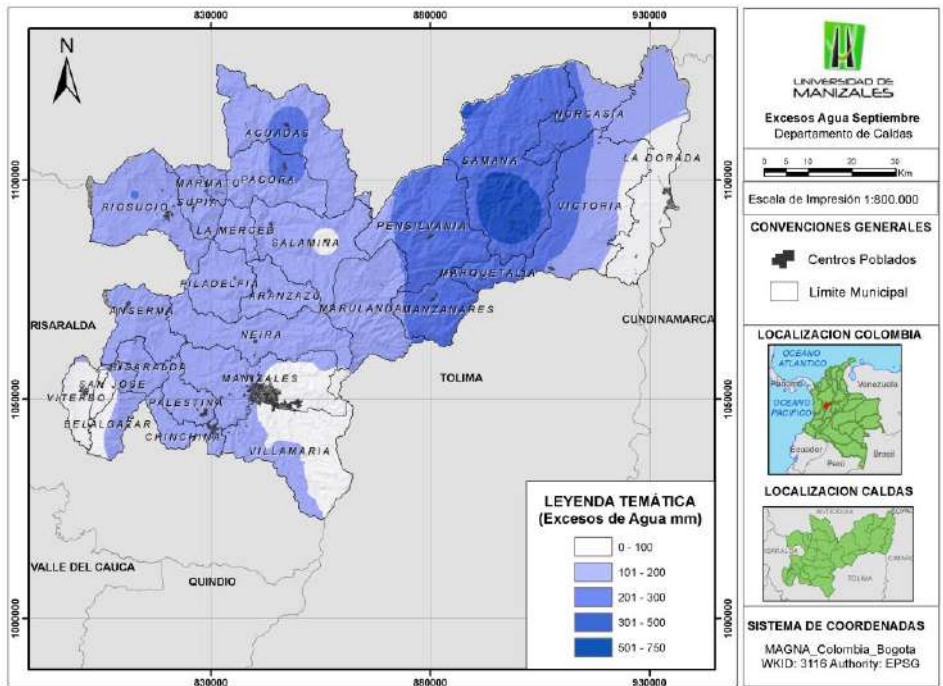
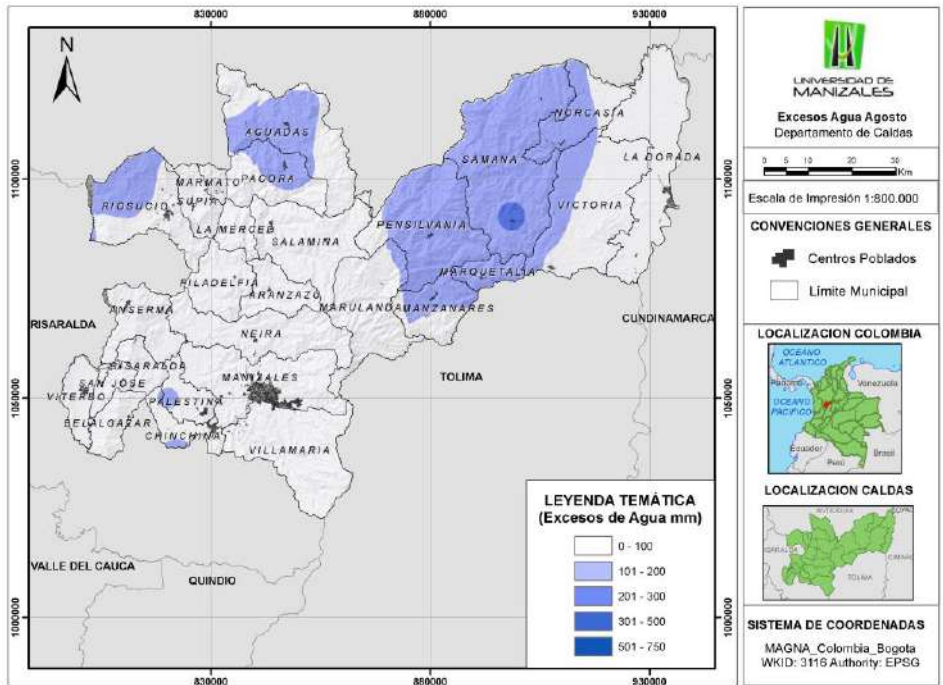




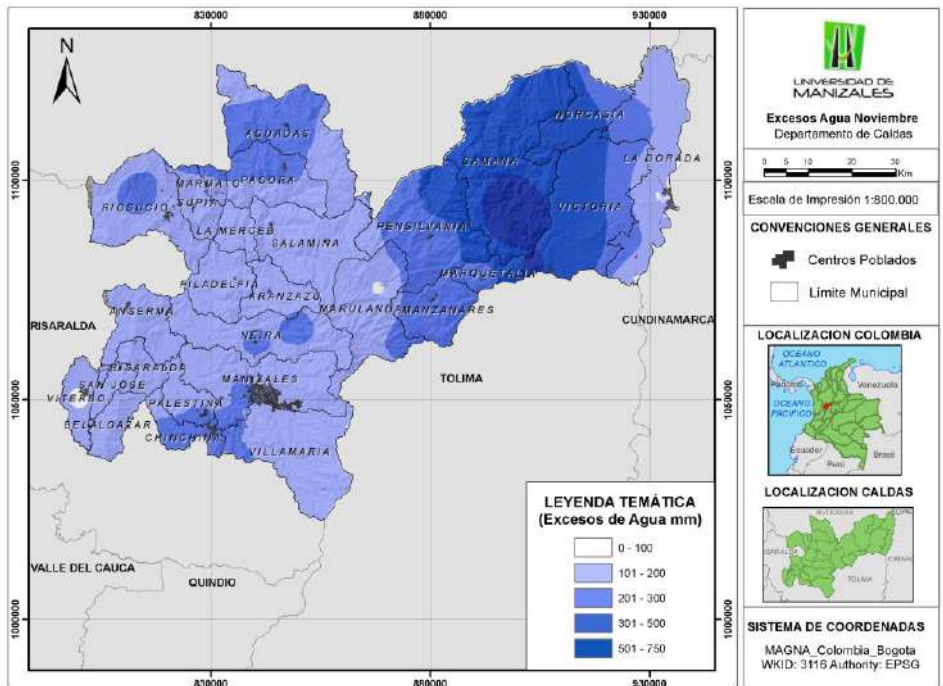
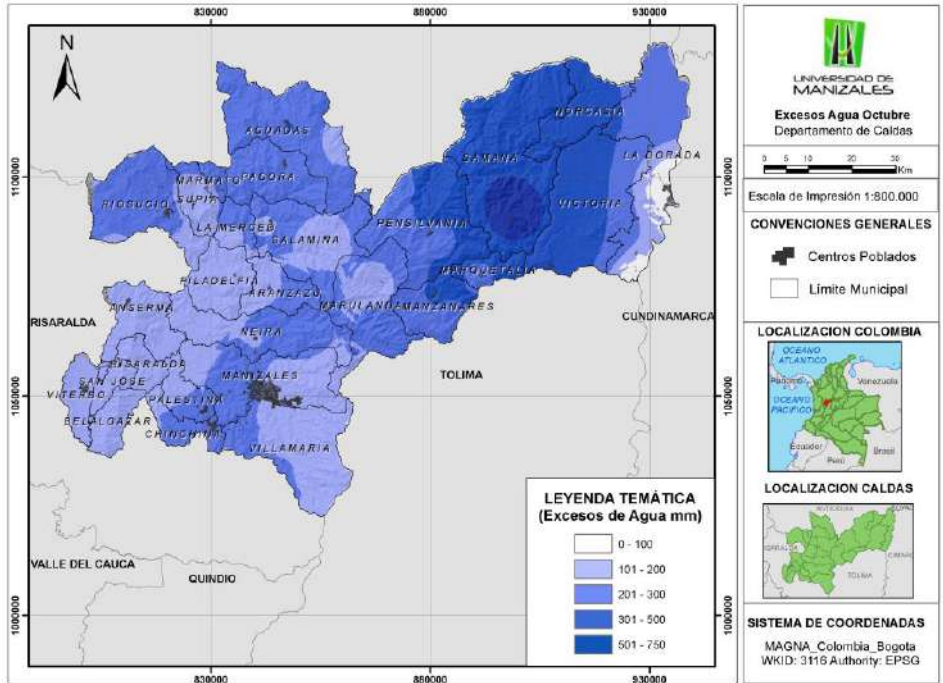












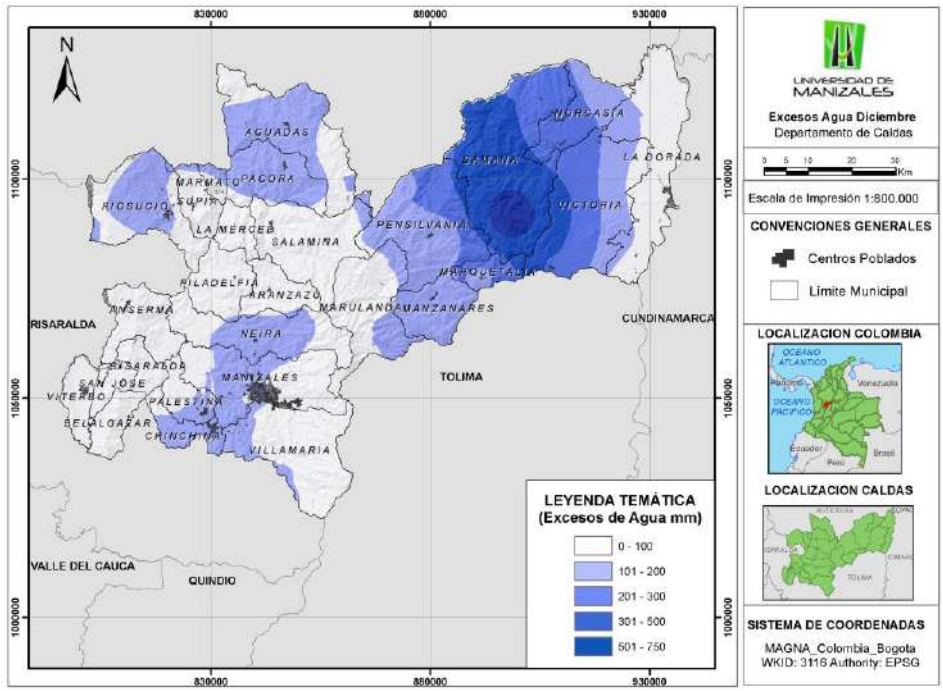
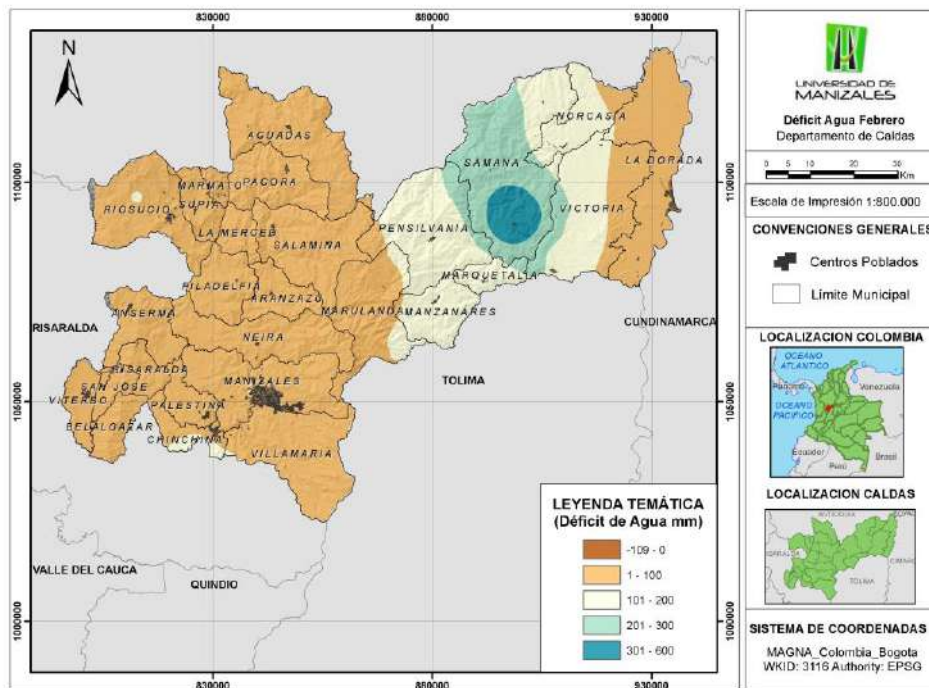
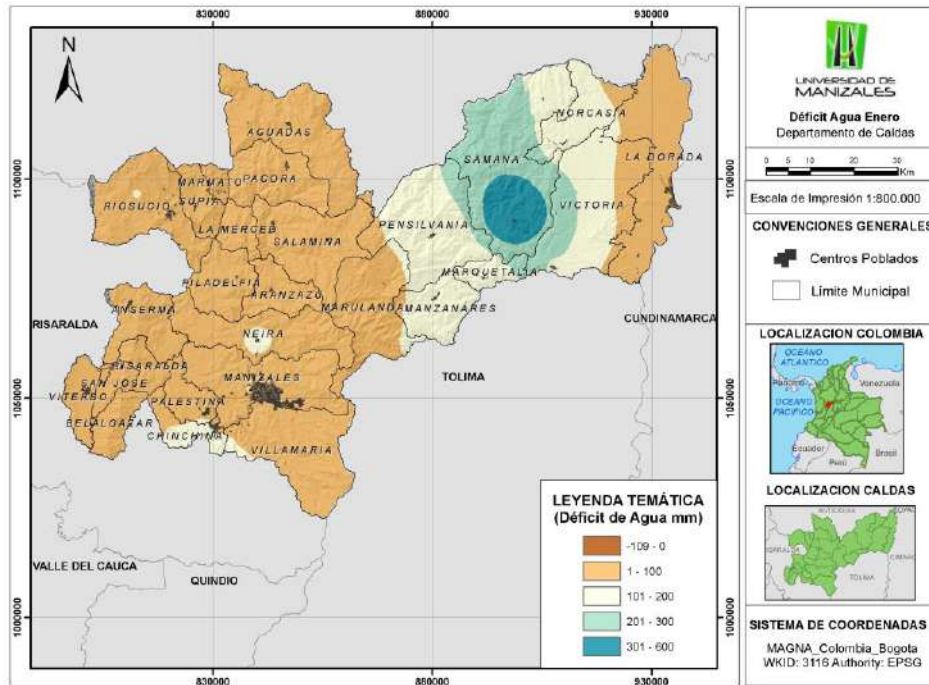
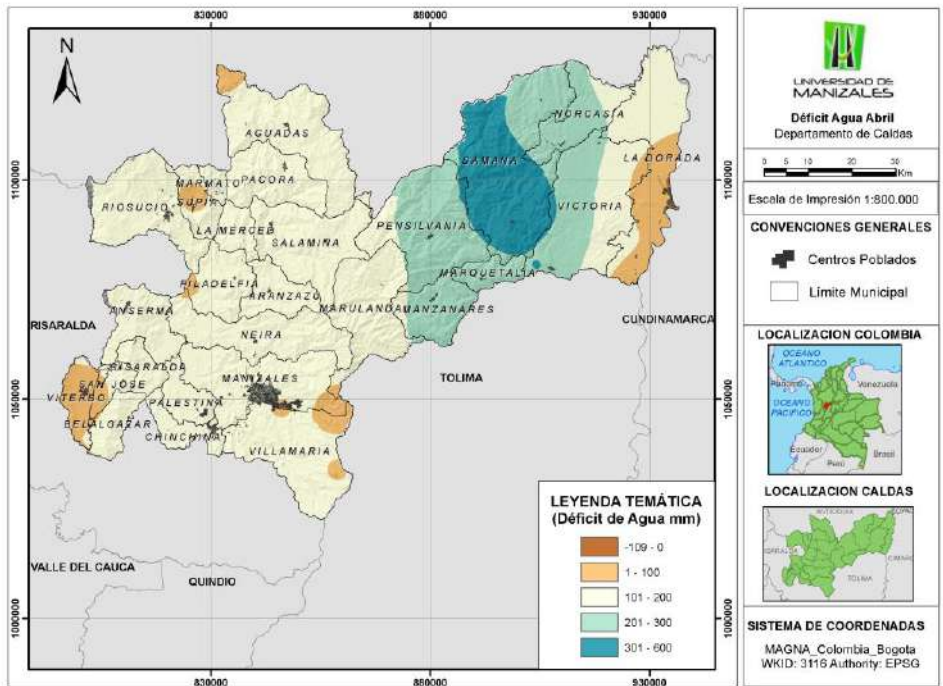
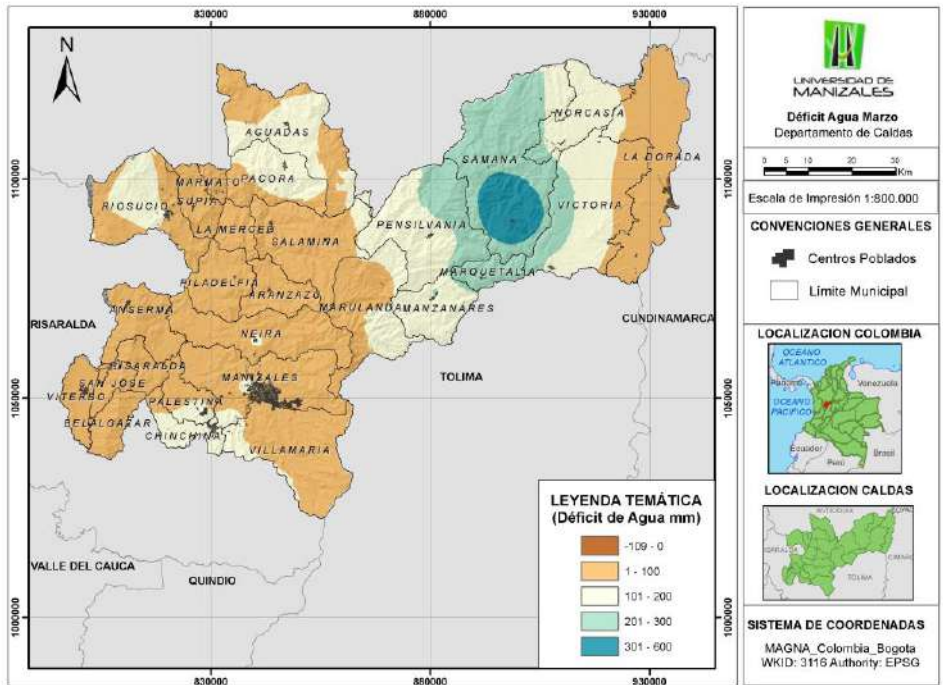
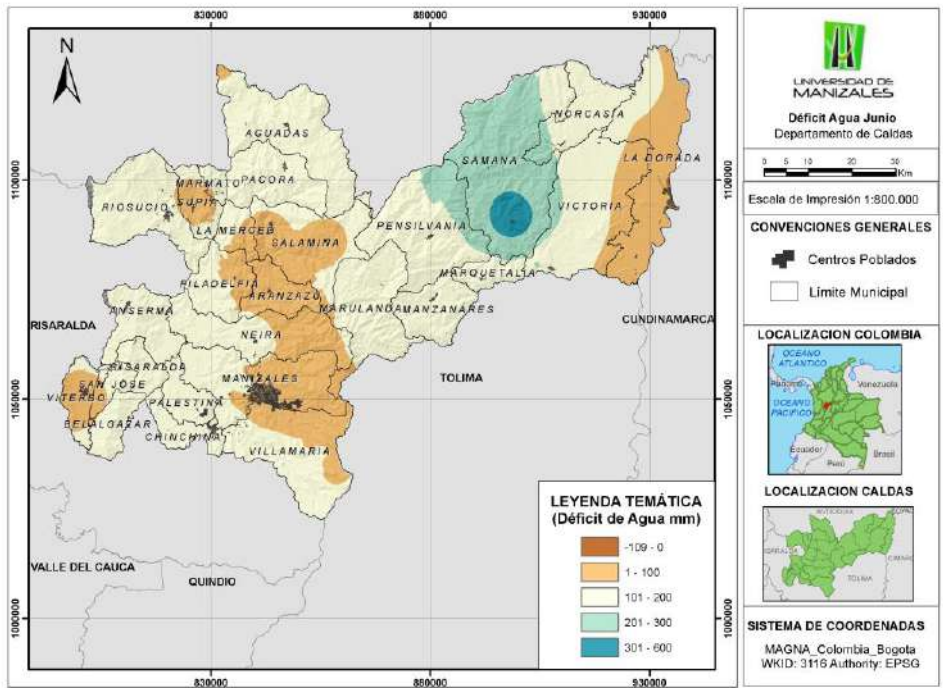
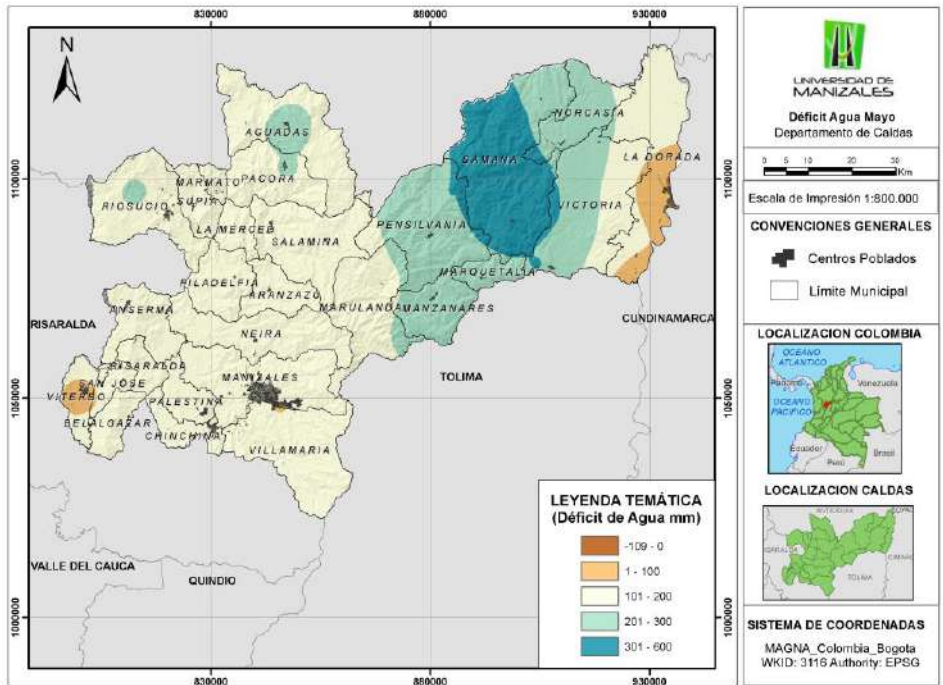


Figura 20: Mapas de Déficit de agua mensual

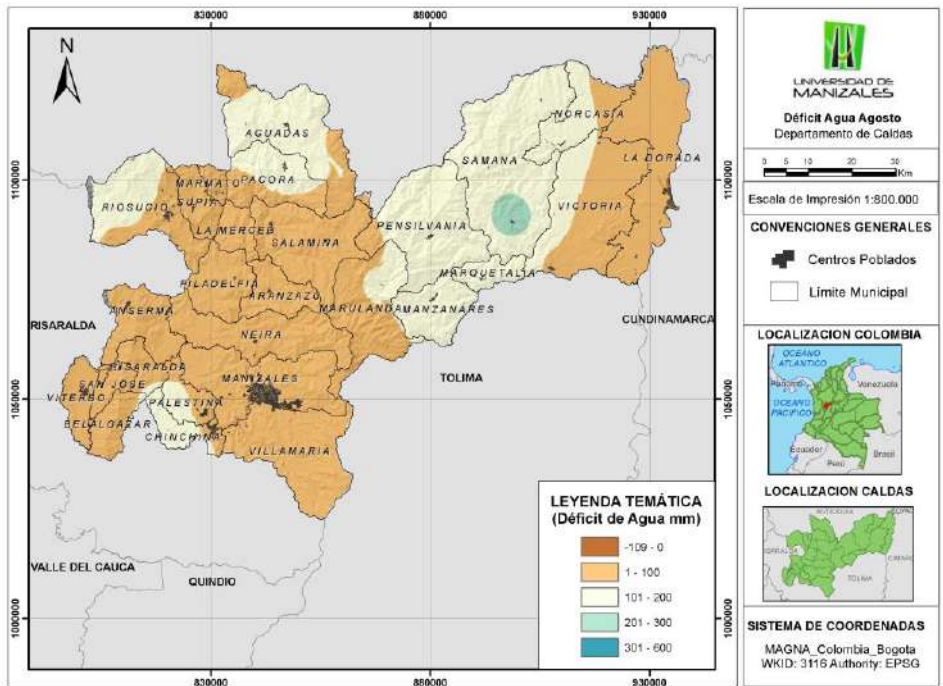
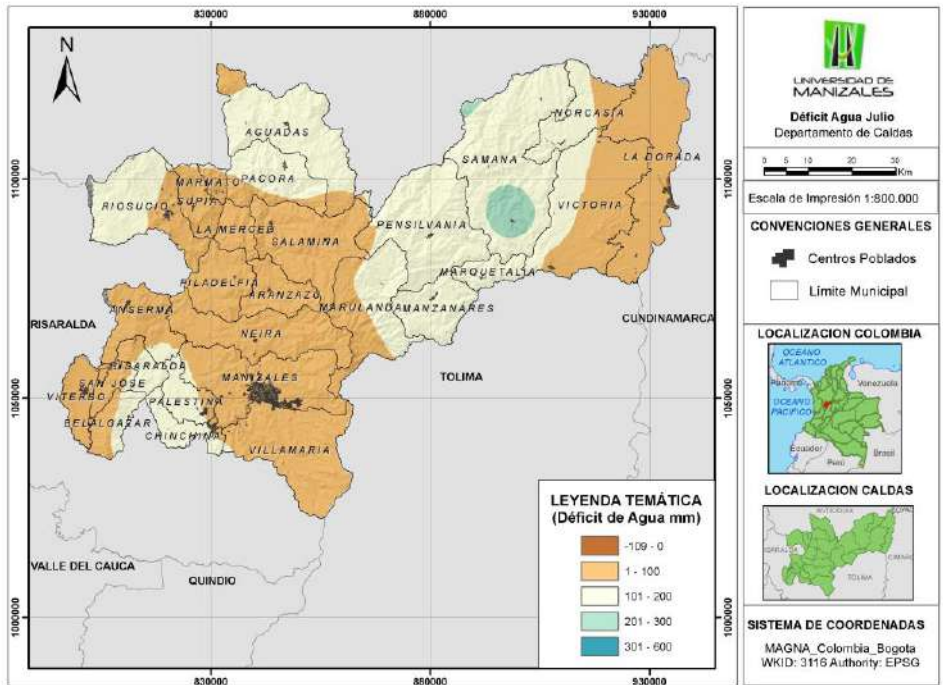


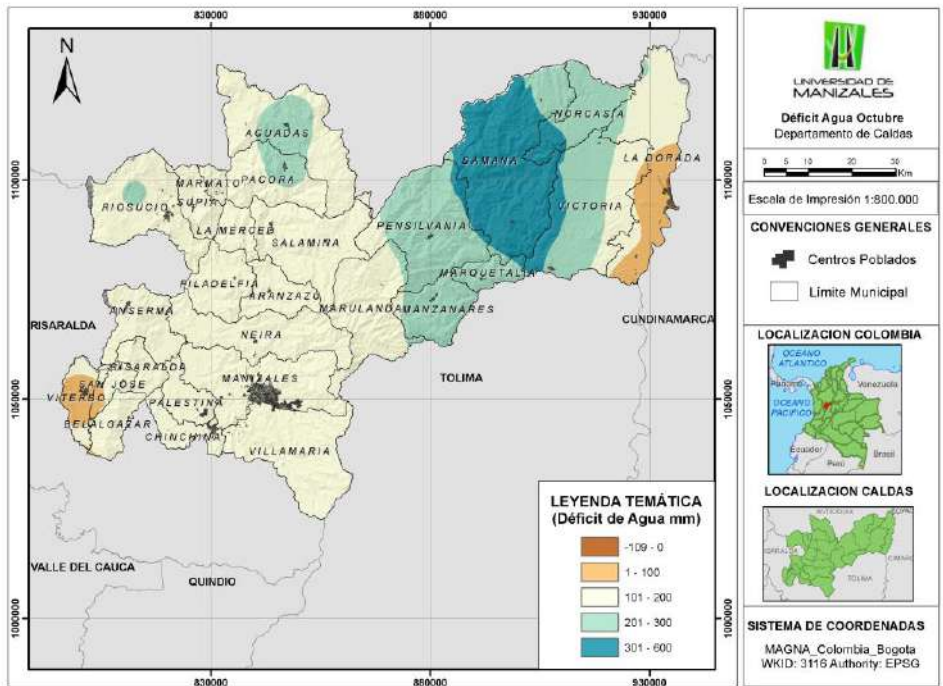
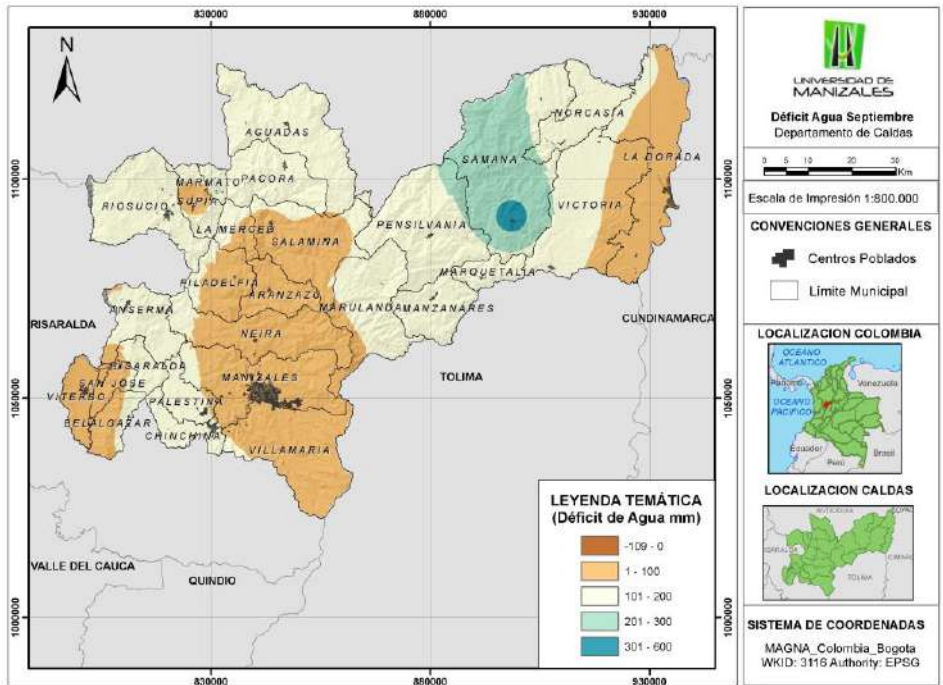


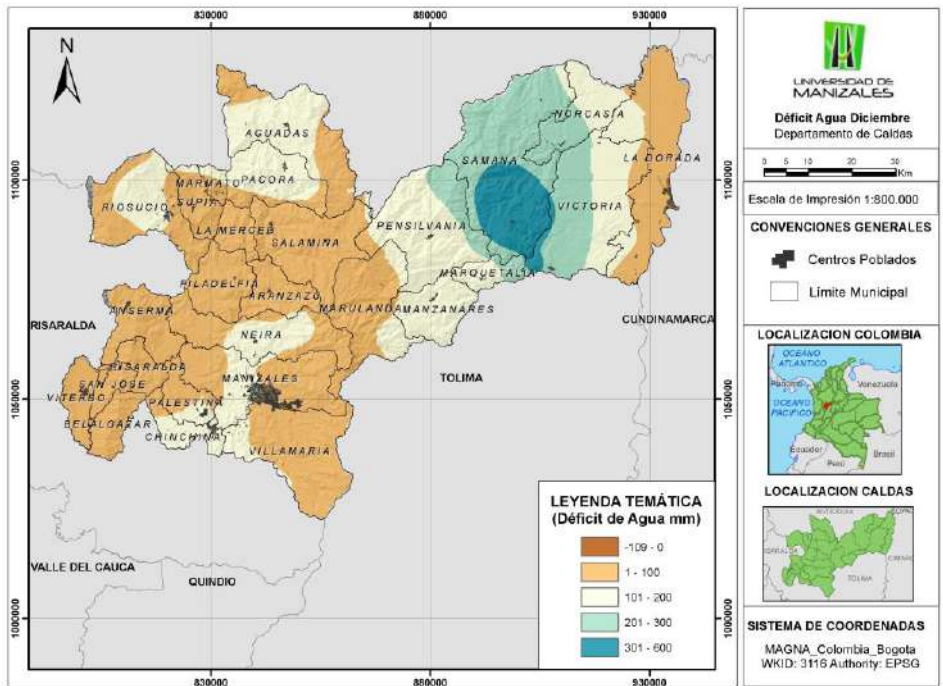
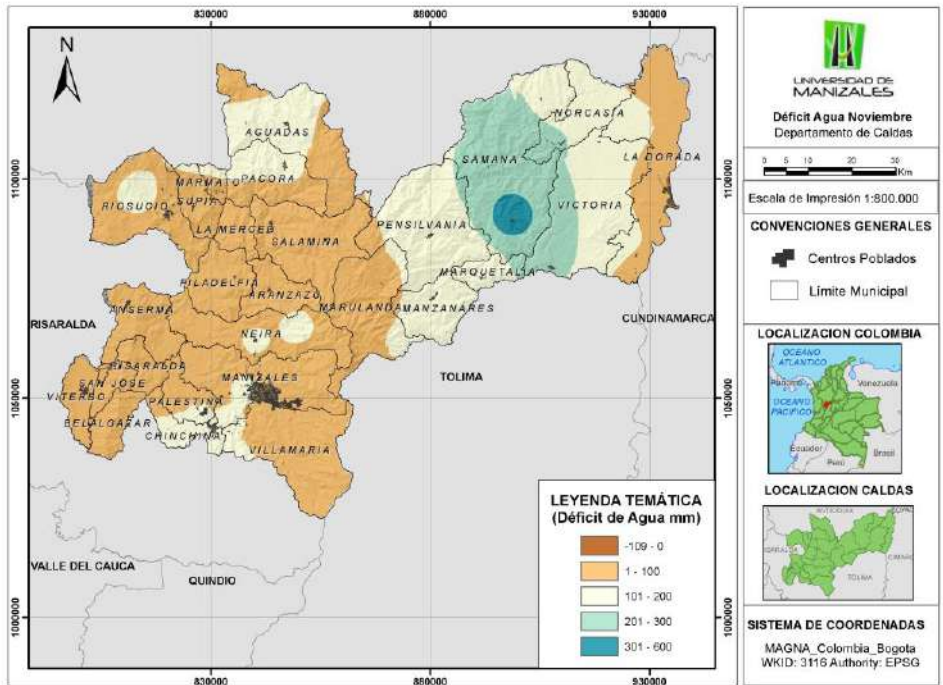












## 6. RESULTADOS

Después de haber obtenido todos los insumos necesarios para las diferentes modelaciones, como lo son los mapas de Temperatura, Precipitación y Evapotranspiración se generó el Balance Hídrico Climático, del cual se obtuvieron los insumos necesarios, mapas de Excesos de Agua y Déficit de Agua, además del mapa de Evapotranspiración, previamente logrado, para realizar la clasificación Climática según Thornthwaite.

Figura 21: Menú de la Clasificación Climática

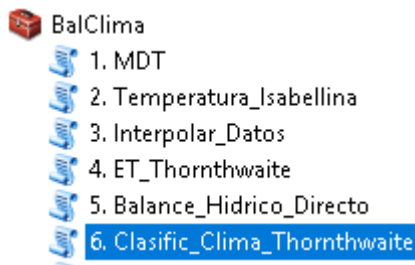
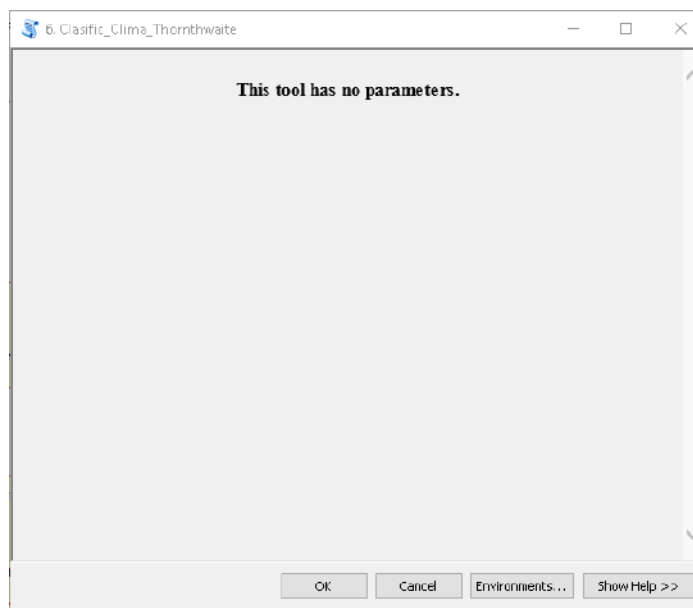


Figura 22: Ventana del Script 6.Clasific\_Clima\_Thornthwaite



Como se puede observar, en la ventana para correr este script no se ingresa ningún parámetro, esto porque en la rutina ya se han escrito cuales son los nombres de las capas a ingresar en el algoritmo (Evapotranspiración, Excesos de agua y Déficit de agua).



El resultado de este script es la generación de los mapas de Índice de Aridez en climas húmedos, Aridez en climas secos y la Clasificación climática a partir del la Humedad Disponible, como se mencionó en el capítulo 4.2.

Figura 23: Mapa Índice de Aridez en climas húmedos.

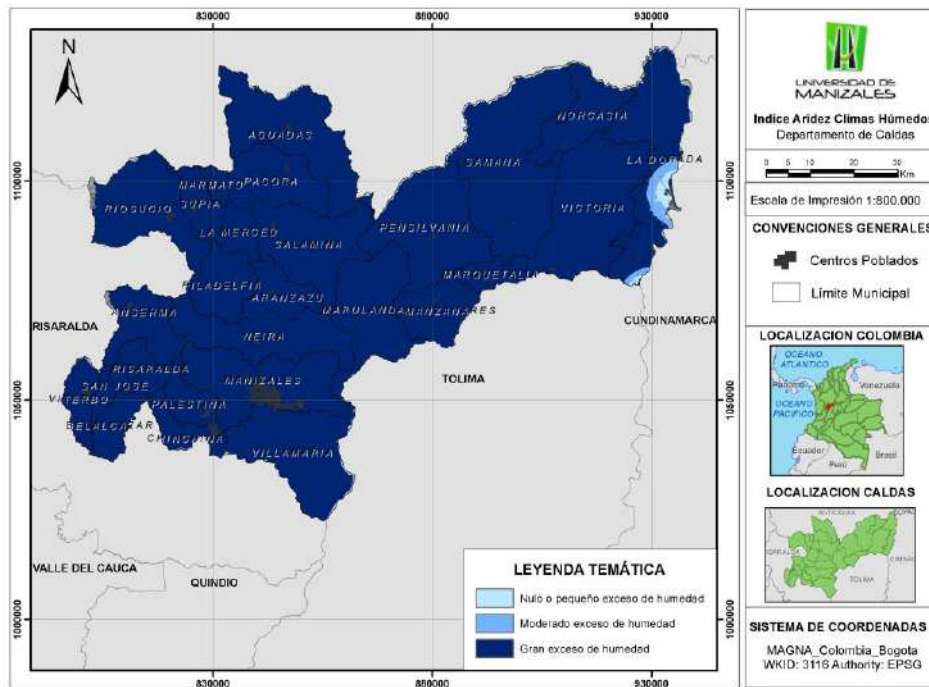


Figura 24: Mapa Índice de Aridez en climas secos.

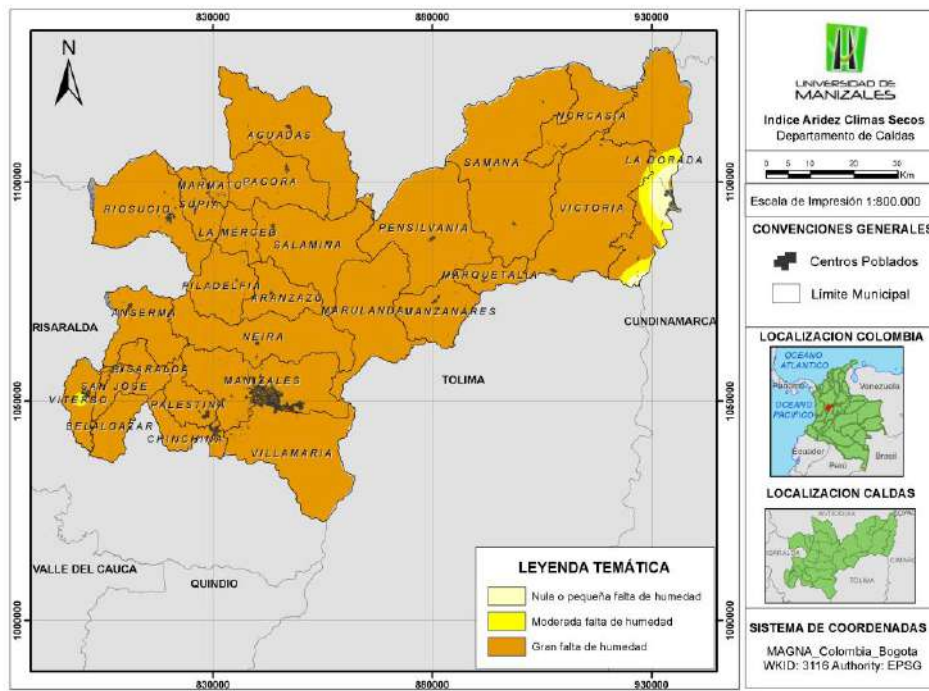
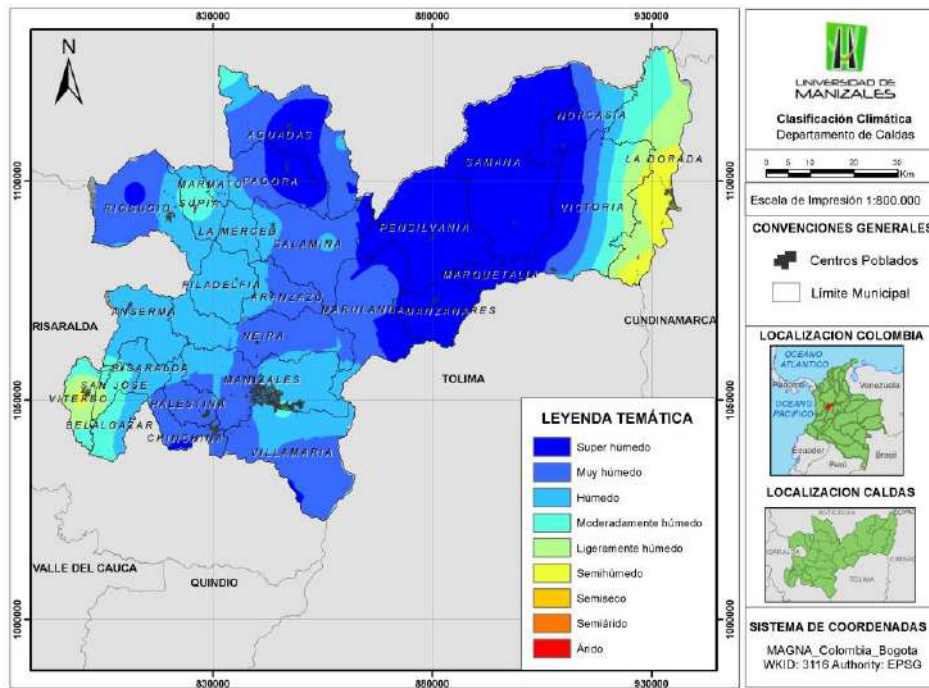


Figura 25 Mapa de Clasificación Climática a partir de la Disponibilidad de Humedad:



Por último, se creó una interfaz gráfica con la ayuda del aplicativo “add-in” de Python.

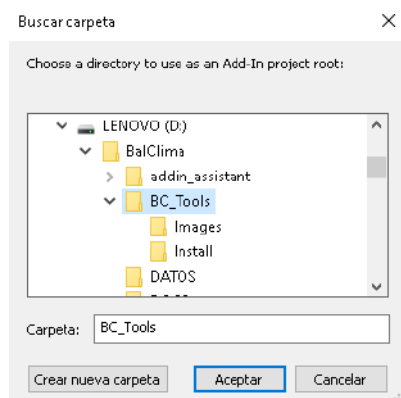
Este aplicativo se puede descargar en el siguiente enlace: <http://www.arcgis.com/home/search.html?t=content&q=tags%3APython%20add-in%20wizard&start=1&sortOrder=desc&sortField=relevance>

La instalación o creación de la interfaz gráfica es realmente sencilla con este aplicativo. Para el presente trabajo se realizó una barra de herramientas con botones, donde cada uno activa los Scripts empleados en el desarrollo de las diferentes modelaciones para llegar el resultado final que es la clasificación climática.

Lo primero es descargar Add-in de Python desde el enlace mencionado, luego se descomprime y en la carpeta [\\addin\\_assistant\bin](#),

Se da inicio al aplicativo dando doble clic sobre el archivo “addin\_assistant”

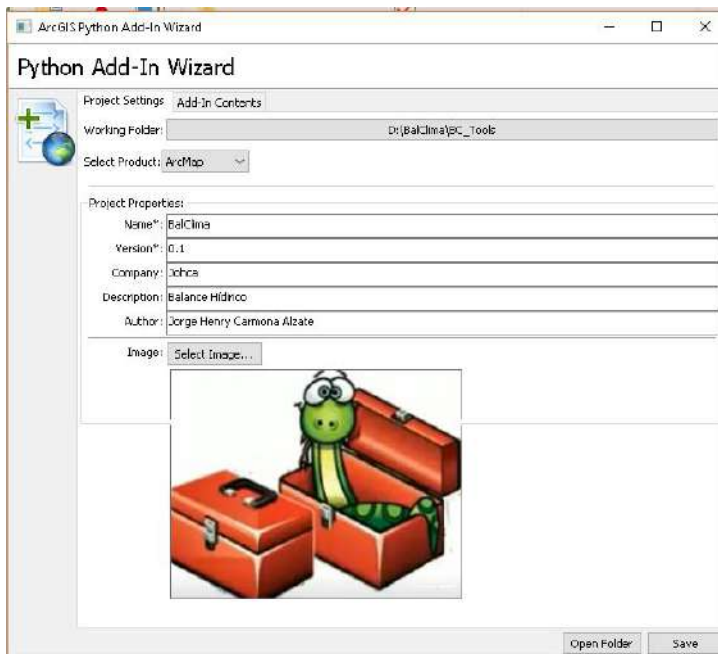
Aparece la siguiente ventana



Aquí se crea una carpeta en la cual se va a desarrollar la interfaz gráfica

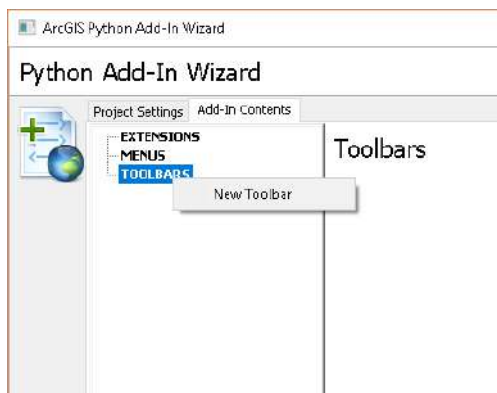
Posteriormente aparece otra ventana como la siguiente, la cual se diligencia en todos sus campos

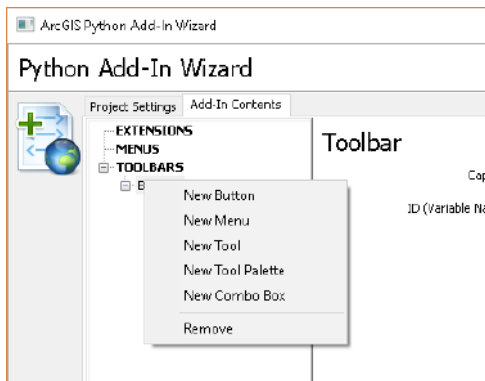




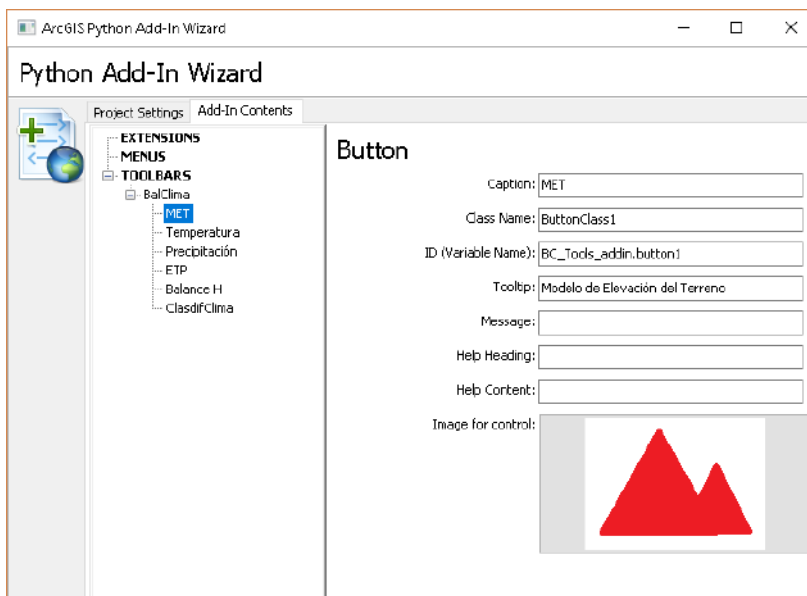
Luego en la pestaña “Add-In Contents” de esta ventana, se pueden construir los Toolbars necesarios para asignarles los scripts. Esto solo con un clic derecho sobre el menú “TOOLBAR”, aparecerá un menú contextual con la opción de una nueva herramienta.

Después se da clic derecho sobre la nueva Toolbar generada y se crean los botones.

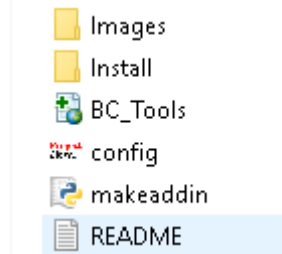




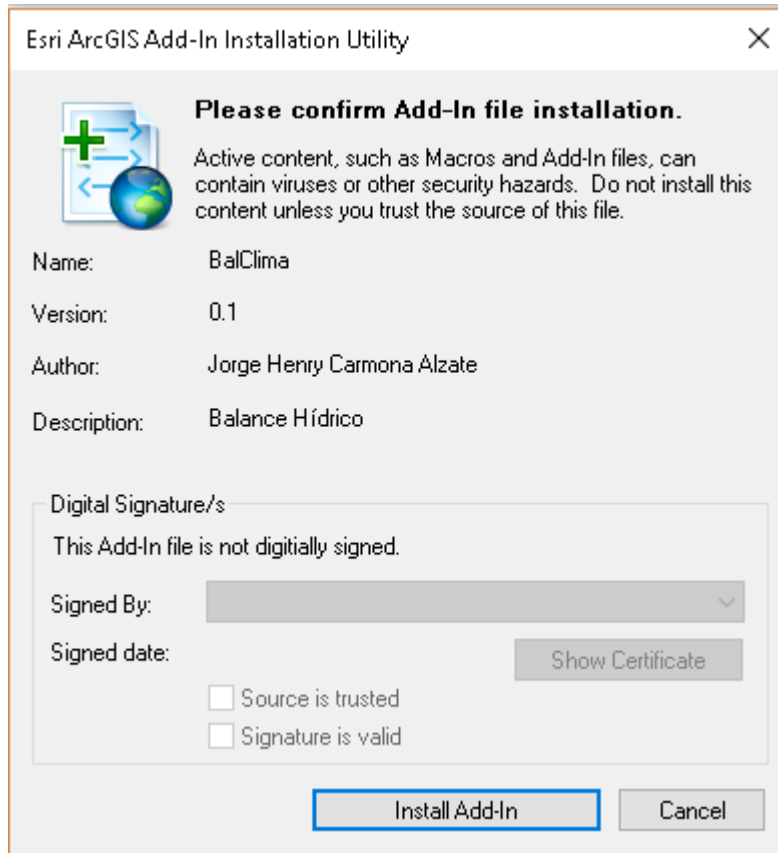
Cuando estén todas las herramientas incluidas en el menú (Toolbar y botones), entonces se deben asignar todos los datos a los cuadros de diálogo de cada botón.



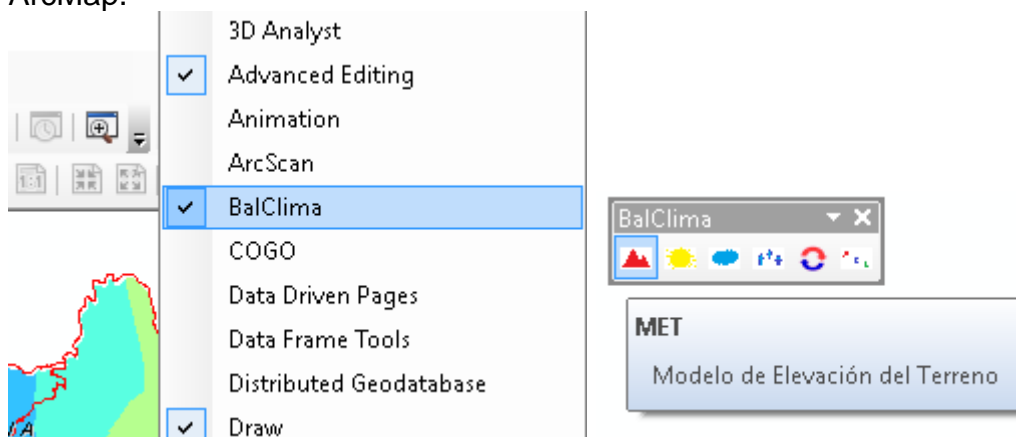
Después de grabar, en el directorio de trabajo se pueden ver algunos archivos.



Haciendo doble clic sobre el archivo BC\_Tools, aparece una ventana que instalará el aplicativo.



Cuando se abra ArcMap se puede ver el nuevo aplicativo activándolo en el menú contextual que sale haciendo clic derecho sobre la barra de herramientas del ArcMap.



Para desarrollar el código de cada botón, se debe entrar a la carpeta *“Install”* en el directorio de trabajo y abrir el archivo *“BC\_Tools\_addin”*, donde aparece el código fuente.

```
import arcpy
import pythonaddins

class ButtonClass1(object):
    """Implementation for BC_Tools_addin.button1 (Button)"""
    def __init__(self):
        self.enabled = True
        self.checked = False
    def onClick(self):
        pythonaddins.GPToolDialog("D:/BalClima/herramientas/BalClima.tbx", "MDT")
```

## 7. CONCLUSIONES

- Esta herramienta SIG, con un buen manejo de los datos climáticos, se puede convertir en un generador de información ambiental e hidrológica a bajo costo.
- El modelo es una herramienta que genera información a partir de datos base, haciendo uso de la nueva tendencia de los datos abiertos y contribuyendo con el conocimiento de los territorios en cuanto las variables climáticas.
- Las estaciones pluviométricas en el país superan, por mucho, la cantidad de estaciones de temperatura. Algunas zonas no tienen suficiente información en cuanto a temperatura se trata.
- Para correr el modelo es importante establecer primero en ArcMap, los parámetros de ambiente de trabajo con el que se trabajará durante toda la modelación, puesto que, de no hacerlo, puede llevar a imprecisiones en los cálculos realizados por el Algebra de Mapas de ArcGis.
- La temperatura (°C) en el departamento de Caldas presenta una tendencia similar mostrada en los mapas generados tanto con la fórmula de Isabellina como los generados a partir de los datos de IDEAM. Las zonas de mayor temperatura se presentan hacia el oriente de Caldas mientras que al centro son menores. Aunque nada reemplazará los datos tomados en campo, como lo serían los datos de las estaciones climáticas, en caso de no contar con este recurso, la fórmula de Isabellina sería una buena alternativa.
- La precipitación en el departamento de Caldas presenta un carácter bimodal; Diciembre – Febrero y Junio – Agosto son los períodos secos del año; mientras que Marzo – Mayo y Septiembre – Noviembre son los períodos más lluviosos.
- Según el modelo Balance Hídrico y la Clasificación Climática por la metodología de Thornthwaite, se muestra que la zona más húmeda del departamento de Caldas es aquella comprendida por los municipios de Pensilvania, Manzanares, Samaná y Marquetalia; y algunos sectores en los municipios de Marulanda, Norcasia y victoria. Las zonas más secas son las de los municipios de La dorada y Viterbo.

## 8. RECOMENDACIONES

- El propósito del presente ejercicio es la utilización de las herramientas SIG en la modelación para la Clasificación Climática, pero no es el desarrollo de un aplicativo como tal, que haga esta función. Se recomienda entonces continuar con la automatización de las rutinas y mejoramiento de las interfaces gráficas, con la ayuda u orientación de un ingeniero de sistemas, hasta conseguir un desarrollo de un aplicativo.
- Aunque la idea del presente modelo es poder realizar la Clasificación Climática con la metodología de Thornthwaite, se puede continuar agregando rutinas importantes en el tema ambiental y que los insumos requeridos para el presente modelo es fácil llegar a ellos, como por ejemplo la clasificación de zonas de vida por el sistema Holdridge o Caldas Lang.
- Las estaciones climáticas que aportan datos de temperatura son de muy baja cobertura en el país. Sería muy importante que las entidades que se ocupan de estas temáticas habiliten más estaciones para densificar los datos de temperatura y así poder llegar a resultados más cercanos a la realidad.
- Considerando lo que el mismo IDEAM dice en su publicación “Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional de Agua” [18], a cerca de la importancia de la sistematización de los datos geográficos y bases de datos de la información hidrológica, es importante seguir profundizando en modelos como el presentado en este documento, aplicando diferentes metodologías e incorporando nuevas variables.
- Las Corporaciones Autónomas Regionales, Autoridades Ambientales Urbanas y Parques Nacionales Naturales, deberían implementar modelos dinámicos que permitan mejorar la interpretación de procesos que se dan en el ciclo hidrológico y apoyar las estimaciones de los componentes del balance hídrico en unidades hídricas adecuadas para la administración del agua.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

<[1]D. Pumo, F. Lo Conti, F. Viola and L. Noto, "An automatic tool for reconstructing monthly time-series of hydro-climatic variables at ungauged basins", *Environmental Modelling & Software*, vol. 95, pp. 381-400, 2017.

[2]CLARO RIZO, Francisco. "Índice de Disponibilidad Hídrica (IDH), Metodología de Cálculo y Aplicación en Colombia". IDEAM-METEO/002-2006. Pp. 1-52, 2006.

[3]GRIMALDOS MOJICA, Manuel Alejandro. Herramienta Computacional para la Estimación del Balance Hídrico de Largo Plazo Utilizando ArcGis 10.1. Trabajo de Tesis Magister Ingeniería Civil. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. 4 de julio de 2014.

[4]C. THORNTHWAITTE, "An Approach Toward a Rational Classification of Climate", *Soil Science*, vol. 66, no. 1, p. 77, 1948.

[5]I. Portoghese, V. Uricchio and M. Vurro, "A GIS tool for hydrogeological water balance evaluation on a regional scale in semi-arid environments", *Computers & Geosciences*, vol. 31, no. 1, pp. 15-27, 2005.

[6]Karsili, Cansu. "Calculation of past and present water availability in the Mediterranean Region and future estimates according to the Thornthwaite water-balance Model", *Physical Geography and Ecosystems Science*, Lund University, pp. 1-81, 2013.

[7]K. Soulis and N. Dercas, "Development of a GIS-based Spatially Distributed Continuous Hydrological Model and its First Application", *Water International*, vol. 32, no. 1, pp. 177-192, 2007.

[8]UPM, O. Ingeniería Agroforestal. from OCW UPM - OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid Web site: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal>. (2010, February 19).

[9]MARIN VALENCIA, Valentina. Evaluación de la Relación Entre la Evapotranspiración Potencial Teórica y la Evaporación Registrada en los Departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería. 2010.

[10]VAN ROSSUM, Guido. El Tutorial de Python. Python Software Foundation, Septiembre 2009.



- [11]S. Ahmadi and H. Fooladmand, "Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran", *Irrigation Science*, vol. 26, no. 4, pp. 303-312, 2007.
- [12]G. Sparovek, Q. De Jong Van Lier and D. Dourado Neto, "Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil", *International Journal of Climatology*, vol. 27, no. 2, pp. 257-266, 2007.
- [13]J. Bahati Chishugi and B. F. Alemaw, "The hydrology of the Congo River Basin: A GIS-Based hydrological water balance model", *World Environmental and Water Resources Congress 2009:Great Rivers*", pp. 5864-5879, 2009 >
- [14]PEÑA, J. "Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio", San Vicente (Alicante): Editorial Club Universitario. 2008.
- [15]CASTAÑEDA O, Alonso. "Hidrología de Superficie2. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. Ibagué, 1986
- [16]Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. "Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements". *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization, Rome. 1998
- [17]J. P. Lhomme, Gómez G. Lucía, Jaramillo R. Álvaro. "Evaluación de un Modelo para Caracterizar las Condiciones Hídricas de la Zona Cafetera Colombiana". *Cenicafé*, 1985.
- [18]IDEAM. "Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional de Agua – ERA". 2013