



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“BALANCE HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO DUERO”

Tesis para obtener el grado de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

SETH MARTÍNEZ LEÓN

Asesor:

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Co – Asesor:

SERGIO EDUARDO CÁZARES RODRÍGUEZ

Co – Asesor:

KATYA ONCHI RAMOS

DEDICATORIA

A mis padres:

Salvador Martínez Ortiz

Ma. Asunción León Rodríguez

Que, con su amor, paciencia, esfuerzo me han permitido llegar a cumplir mis metas, gracias por enseñarme el trabajo y la valentía para cumplir mis metas para proponerme más mientras sigo mejorando y aprendiendo a su lado.

A mis hermanos:

María Goretti Martínez León

Yves Martínez León

También a mis amigos que me han acompañado a lo largo de mi trayecto, que me han tenido paciencia, con los cuales he compartido muchas experiencias, momentos, y dificultades las cuales aun así sé que se preocupan por mí y por eso los tengo presentes siempre.

Por todo eso les doy las GRACIAS,
y les brindare *el apoyo que ustedes me han dado.*

AGRADECIMIENTOS

“La gente tiene diferentes formas de pensar, incluso cuando se comete un error... Si la persona se da cuenta de su error es posible que lo enmiende, si mantienes tu visión clara verás el futuro, es de lo que se trata esta vida...”

A mi Asesora la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, quien me tuvo la paciencia, me brindo su apoyo, me regañó cuando lo necesite, por el tiempo que me dedico para concluir este trabajo y seguir creciendo que no todo se termina al concluir algo.

A Sergio Eduardo Cázares Rodríguez y Katia Onchi Ramos, quienes también me apoyaron a lo largo de mi trabajo, de los cuales aprendí mucho para hacerlo de la mejor forma posible y a quienes agradezco la compañía ya mistad que me brindaron.

A mis amigos con quienes sigo compartiendo experiencias y aunque no con todos sigo en comunicación sé que siempre puedo esperar su apoyo y compañía de igual manera les regreso de la mejor manera todo lo que me han dado: Checo, Cristian, Daniel Mejía, Daniel Coria, Cyntia, Tonatiuh, Jonatan, Tania, Joshua, entre otros los cuales me aguantaron y les agradezco la amistad que me brindaron.

Y a una compañera en especial Cristina Palomares Ochoa, de quien he aprendido muchas cosas, aunque hago que se enoje sigue conmigo apoyándome para mejorar en todo lo que hago y me motiva para seguir adelante para seguir compartiendo tantos momentos juntos de los cuales tengo tantos muchos favoritos para recordar.

INDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCION	9
HIPOTESIS	10
OJETIVO GENERAL.....	10
PARTICULARES.....	10
ANTECEDENTES	11
HIDROLOGIA.....	11
CICLO HIDROLOGICO DEL AGUA	13
CONCEPTO DE CUENCA.....	14
PRECIPITACION.....	15
EVAPOTRANSPIRACION.....	15
ESCURRIMIENTO	15
INFILTRACION.....	16
ZONA DE ESTUDIO.....	17
LOCALIZACION	17
OROGRAFÍA	19
HIDROGRAFIA.....	20
CLIMA	21
EDAFOLOGIA	23
GEOLOGÍA	23
USO DE SUELO	25
MATERIALES	26
BASE DE DATOS	26
INEGI.....	26
SISTEMA CLICOM.....	28
BANDAS – CONAGUA	28
SOFTWARE DE MODELACION GEOGRAFICA	29
ARCGIS.....	29
SOFTWARE DE MODELACION MATEMATICA	30
EVALHID.....	30
MODELO DE TÉMEZ.....	33

CALIBRACION.....	40
INDICADORES DE AJUSTE	40
METODOS.....	42
ANALISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO	42
RECOPIACION DE DATOS	43
ESTACIONES HIDROMETRICAS	43
ESTACIONES METEOROLOGICAS.....	44
PRUEBAS EN LAS ESTACIONES MANUALES	44
LIMITES DE ANDERSON	44
PRUEBA DE SECUENCIAS	45
TEST DE HELMERT	45
GESTAD.....	46
CARGADO DE DATOS.....	47
CRITERIOS DE DISCRIMINACION DE DATOS	48
ANALISIS Y VALIDACION DE DATOS.....	48
SELECCIÓN DE ESTACIONES PRINCIPALES.....	58
LLENADO DE ESTACIONES	60
PRECIPTACIONES	60
INVERSO DE LA DISTACIA AL CUADRADO	61
TEMPERATURA	62
EVAPOTRANSPIRACION.....	62
MANEJO DE INFORMACION EN ARCGIS.....	64
ESTACIONES FICTICIAS	66
MODELACION HIDROLOGIA	66
TÉMEZ EN EVALHID	67
RESULTADOS	82
GENERALES.....	82
ESTACIONES METEOROLOGICAS	82
ESTACIONES HIDROMETRICAS	88
CALIBACION Y VALIDACION – EVALHID.....	90
CUENCA 1: PRESA DE UREPETIRO	90
CUENCA 2: RIO DUERO CON TRANSLADO DE AREA.....	95
BALANCE HIDRICO.....	101

CONCLUSIONES	102
LLENADO DE DATOS	102
ESTACIONES HIDROMETRICAS	102
CONCLUSIONES GENERALES	103
REFERENCIAS.....	104
INDICE DE FIGURAS	106
INDICE DE TABLAS	107
INDICE DE GRAFICAS	108

CONTENIDO

RESUMEN

El estudio realizado en el presente trabajo se localiza al noreste del estado de Michoacán, más específico en la cuenca del río Duero. Este estudio se realizó debido a cambio de uso de suelo y la sobre explotación del recurso, ha generado que en los últimos años se provoquen cambios en la cuenca y con ello la importancia de hacer estudios y modelos hidrológicos, ya que estos nos permitirán conocer el estado actual en el que se encuentran los recursos con los que cuenta la zona.

EL trabajo consiste en obtener las características principales de la cuenca, como es el área, uso y tipo de suelo, flujo de corrientes, de donde se utilizó modelos digitales de elevación previamente procesados en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS, con la gestión de datos de la zona. También a partir de datos de precipitación y temperatura tomados de estaciones climatológicas lo más cercanas a la zona de estudio, los cuales se verificará para escoger los que mejores resultados den.

La modelación Superficial se realizara con el software de EvalHid con ayuda de GESTAD para la validación de estaciones y de un algoritmo soporte a la decisión para el calibrado del modelo, usando el modelo de Témez el cual al tener una cuenca grande, necesitamos hacer microcuencas porque así lo necesita el modelo para su mejor aplicación, y usando una serie de datos ya tratados de precipitación, temperatura y evapotranspiración; obteniendo un modelo matemático de del escurrimiento que se genera en la zona, al tener el modelo hidrológico se verificara la bondad de ajuste para poder tomar los resultados del balance hídrico.

Palabras clave: Modelación superficial, bondad de ajuste, algoritmo de optimización, GESTAD, Témez.

ABSTRACT

The study carried out in the present work is in the northeast of the state of Michoacán, more specifically in the Duero River basin. This study was carried out due to a change in land use and the over-exploitation of the resource, it has generated that in recent years changes are caused in the basin and with it the importance of doing studies and hydrological models, since these will allow us to know the current state of the resources in the area.

The work consists of obtaining the main characteristics of the basin, such as the area, use and type of soil, flow of currents, from which digital elevation models previously processed in the ArcGIS Geographic Information System were used, with data management of the area. Also based on precipitation and temperature data taken from weather stations closest to the study area, which will be verified to choose the ones that give the best results.

The Surface modeling will be carried out with the EvalHid software with the help of GESTAD for the validation of stations and a decision support algorithm for the calibration of the model, using the Témex model which, having a large basin, we need to make micro-basins because the model needs it for its best application, and using a series of already processed data on precipitation, temperature and evapotranspiration; Obtaining a mathematical model of the runoff that is generated in the area, having the hydrological model will verify the goodness of fit to be able to take the results of the water balance.

Keywords: Surface modeling, goodness of fit, optimization algorithm, GESTAD, Témex.

INTRODUCCION

El agua es un elemento esencial para la vida incluida la del hombre, debido a esto toda problemática relacionados con dicho elemento generan afectaciones directas a toda la sociedad y a los sectores económicos. Con el pasar del tiempo la creciente urbanización e industrialización, el crecimiento demográfico de la sociedad y, la expansión de la agricultura ha ejercido un impacto muy importante en este recurso indispensable. La gestión del agua es un proceso indispensable que condiciona la existencia misma de las ciudades y su desarrollo (Caire M., 2005).

Uno de los fenómenos que mayores interferencias genera en la gestión de los recursos hídricos es la sequía. Este fenómeno natural a comparación de otros fenómenos como pueden ser sismos, huracanes, incendios, etc., no es un evento puntual y de corto plazo, y al estar relacionado a un elemento tan indispensable como lo es el agua genera impacto directo en la sociedad. En México, donde la agricultura de riego y de temporal es una fuente importante de empleo y de ingreso económico, las sequías representan un alto riesgo (Ortega G. & Velasco, 2013).

Por lo que es necesario contar con los estudios hidrológicos superficiales, de los cuales obtendremos datos y modelos que nos permitirán tener una mejor interacción y al generarlos podremos contar con una mejor perspectiva del agua en el suelo y su mejor aprovechamiento, en la zona del rio Duero es muy importante ya que desde hace mucho tiempo esta la sobre explotación del recurso del agua, que dentro de ello también están las tomas clandestinas de agua, y los cambio de uso y tipo de suelo, son cosas que afectan.

Buscando la forma de administrar este recurso tan importante, se trabajó la forma de automatizar los procesos para hacerlo de una mejor forma y más rápido, sin perder la eficiencia, de ahí el uso de programas para el manejo de la información climatológica, el programa GESTAD, el cual a partir de la carga de datos de precipitación, nos ayudara hasta la selección de estaciones principales y también, la versión en la que trabaje hasta la ayuda con llenado de datos, para saber que tanta correlación tiene con cada estación y los vacíos que esta presenta, este proceso se hará manual mente pero es una ayuda para agilizar el proceso, después de tener todo los datos llenados, seguiremos con el programa EvalHid, el cual no ayudara y por medio del método de Témez para hacer el modelo matemático y generar el balance hídrico, también hare uso de un algoritmo soporte a la decisión SCE-UA, el cual calibrara el modelo para no tener que cambiar los parámetros uno a uno si no después de poner uno límites de cada parámetro este buscara la solución para tener el mejor resultado de una forma automática.

HIPOTESIS

Gestionar sistemas de recursos hídricos por medio de un sistema de soporte a la decisión, mediante la utilización el software de EvalHid y algoritmos de soporte a la decisión para hacerlo de mejor manera.

OJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de soporte a la decisión para la evaluación de los recursos hídricos de la zona de estudio el río Duero Michoacán.

PARTICULARES

- Obtener y validar los datos de precipitación, temperatura, escurrimiento, tasi como las características físicas como topografía, uso y tipo de suelo, y geologías correspondientes a la zona de estudio.
- Generar un modelo lluvia escurrimiento de la zona de estudio.
- Realizar un modelo de gestión de recursos hídricos para la zona de estudio.

ANTECEDENTES

HIDROLOGIA

El agua es la sustancia más abundante sobre la faz de la tierra, es el principal constituyente de todos los seres vivos; también es factor fundamental que condiciona la existencia humana e influye en el progreso de la civilización.

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”. *Chow, V. T., Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1964*

La hidrología se describe como la ciencia que describe los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico. Está determinada por patrones de clima, la topografía, geología y vegetación, también, a medida que las actividades humanas invaden gradualmente el medio ambiente del agua, alteran el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e inician nuevos procesos y eventos.

La hidrología en la ingeniería incluye las partes de campo que involucren el diseño y operación de proyectos para el control y aprovechamiento del agua. El análisis hidrológico es el primer paso fundamental en la planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos, estructurales y de comunicación.

La sequía es un concepto al que estamos familiarizados, pero como en muchos casos resulta un concepto difícil de definir y como consecuencia han resultado un buen número de definiciones y clasificaciones, entre las más comunes se encuentra definida como la deficiencia de precipitaciones durante un período de tiempo relativamente prolongado (Valiente, 2001).

Pita (2007) plantea la clasificación de los índices de sequía como indicadores de sequía, indicadores de escasez, indicadores de peligrosidad e indicadores de vulnerabilidad o fragilidad.

En este punto es importante diferenciar un indicador de sequía de un indicador de escases como es la sequía operativa, mientras que la sequía operativa como se definió anteriormente se centra en la escasez de agua durante prolongados periodos de tiempo, un índice de sequía operativa indica la diferencia entre el agua disponible y la requerida por los usos establecidos, es por esto por lo que la sequía operativa es también definida como un fallo en el sistema de recursos hídricos.

Los modelos matemáticos de simulación y optimización se utilizan para estudiar las reglas de explotación y los suministros de las demandas de agua para alcanzar una gestión óptima de la sequía. Es preferible anticiparse mediante el establecimiento de ahorros en los suministros, pequeños déficits repartidos son mejores que un gran déficit de igual magnitud concentrado (Estrela, 2014).

Muchos modelos son construidos para casos particulares en cuencas específicas, sin embargo, existen otros modelos más generales que integran herramientas matemáticas, sistemas de

información y bases de datos para ayudar al gestor de un sistema en el proceso de toma de decisiones. Estos son los denominados sistemas de soporte de decisiones (SSD) (Aviles et al., 2016).

En 1987 se desarrolló el módulo Optired (Andreu, 1989), en el que se generaliza la resolución del problema de la asignación del agua mediante la generación de una red de flujo y el uso de algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Este módulo realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo. Posteriormente se desarrolló el módulo de simulación de la gestión de cuencas SGC (Andreu et al., 1989). Aunque desarrollado para la simulación, este modelo incluye también la optimización de una red de flujo conservativa que, a diferencia del modelo de optimización, se formula para resolver la gestión en un solo mes. En 1989 se utilizaron los módulos SGC y Optired en el análisis de la gestión del río Mijares en España incluyendo la gestión conjunta de las aguas subterráneas (CHJ, 1990). A partir de 1990 se comenzaron a desarrollar nuevas aplicaciones para aumentar las posibilidades de análisis y para facilitar el uso de los modelos, lo que conforma un SSD más amplio orientado al análisis de la gestión integral de SRH. A este conjunto se le denomina AQUATOOL (Andreu et al., 1991).

CICLO HIDROLOGICO DEL AGUA



Figura 1. Ciclo Hidrológico del agua

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente.

De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos, Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad hacia la atmosfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar. **Figura 1.**

Figura 1

El concepto es simple, el fenómeno es enormemente complejo e intrincado, está compuesto de muchos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local. Aunque el volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece constante, la distribución de agua está cambiando constantemente en continentes, regiones y cuencas locales.

CONCEPTO DE CUENCA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Esto para una cuenca superficial, desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar. **Figura 2.**

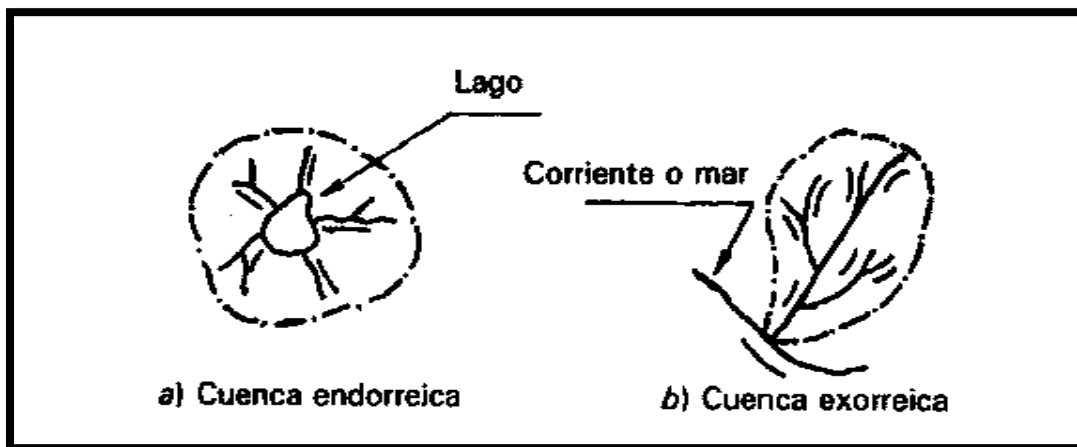


Figura 2. Tipos de cuencas

En sentido general, cualquier extensión de terreno que tenga alguna relación con el agua es una cuenca hidrológica, también siendo de tipo: topográfica y la geohidrológica.

La cuenca topográfica vertiente a una sección transversal de un cauce, es la superficie en la cual, al caer una gota de agua, si no se evapora o se infiltra, aparece como escurrimiento en tal sección, y la geohidrológica es el área de terreno donde se infiltra la precipitación y alcanza a su manto acuífero correspondiente.

PRECIPITACION

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.

La precipitación es el factor principal que controla la hidrología de una región. Constituye la principal aportación de agua a la superficie terrestre, por ello el conocimiento de sus patrones de comportamiento en espacio y tiempo es fundamental para entendimiento de la humedad del suelo, la recarga del agua subterránea y el escurrimiento de los ríos.

EVAPOTRANSPIRACION

El conocimiento de la evapotranspiración o uso consuntivo es un factor determinante en el diseño de sistemas de riego, incluyendo las obras de almacenamiento, conducción, distribución y drenaje. Especialmente, el volumen útil de una presa para abastecer a una zona de riego depende en gran medida del uso consuntivo.

En donde la evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, ha estado gaseoso y se trasfiere a la atmosfera.

Y la transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas, naturalmente, del suelo. Por lo que la evapotranspiración es la combinación de estos dos anteriores.

ESCURRIMIENTO

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre y bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Se dividen en tres clases: escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo.

Es una parte de la precipitación drenada por las corrientes de las cuencas hasta su salida, el agua que fluye por las corrientes proviene de diversas fuentes.

INFILTRACION

La infiltración se define como movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

Es el proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero satisface la deficiencia de la humedad del suelo y, después, cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea.

El agua al penetrar en el suelo a través de su superficie queda retenida en él o alcanza un manto acuífero. Esto implica que la descripción de la evolución del contenido de humedad del suelo, resultante de la lluvia y el almacenamiento en depresiones, es también parte del fenómeno de la infiltración. Y esta continuara hasta que exceda a la llama capacidad de infiltración del suelo.

ZONA DE ESTUDIO

El río Duero, nace en los manantiales del poblado de Carapan la región conocida como “La cañada de los once pueblos” perteneciente al municipio de Chilchota, cruza por los valles de Zamora y Guadalupe y la Ciénega de Chapala (porción Michoacán), se une al río Lerma en los límites estatales de Michoacán y Jalisco, cerca de la población de Ibarra en el municipio de Briseñas, con un recorrido total de 75 km en línea recta.

LOCALIZACION

La cuenca del río Duero se encuentra ubicada al noroeste del estado de Michoacán, México, dentro de las coordenadas 19° 40' y 20° 15' latitud norte y 101° 45' y 102° 45' longitud oeste, a una altitud aproximada de 2 000 msnm, y con una superficie de 2531.3 km².

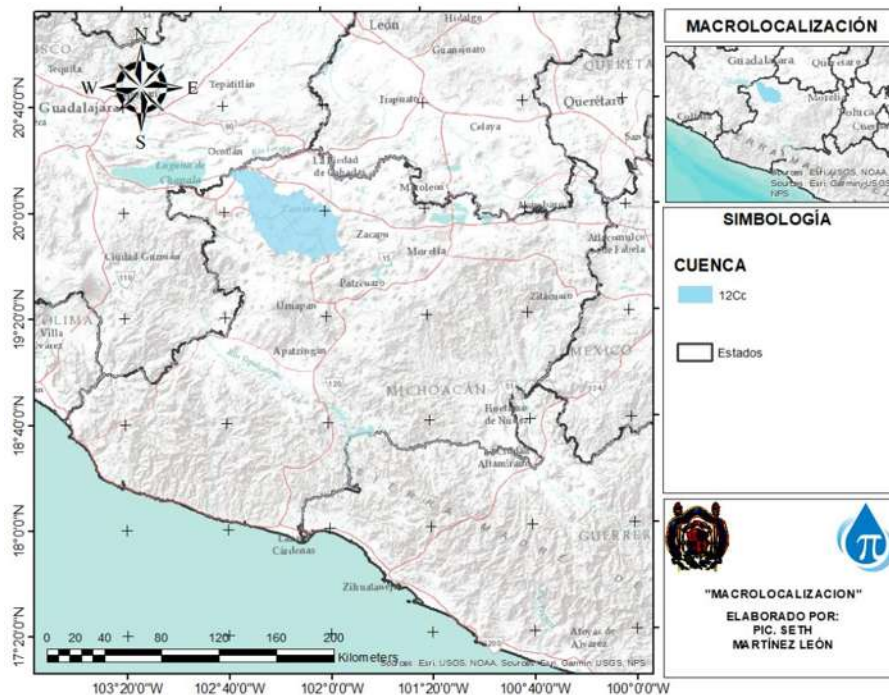


Figura 3. Macro localización de la cuenca

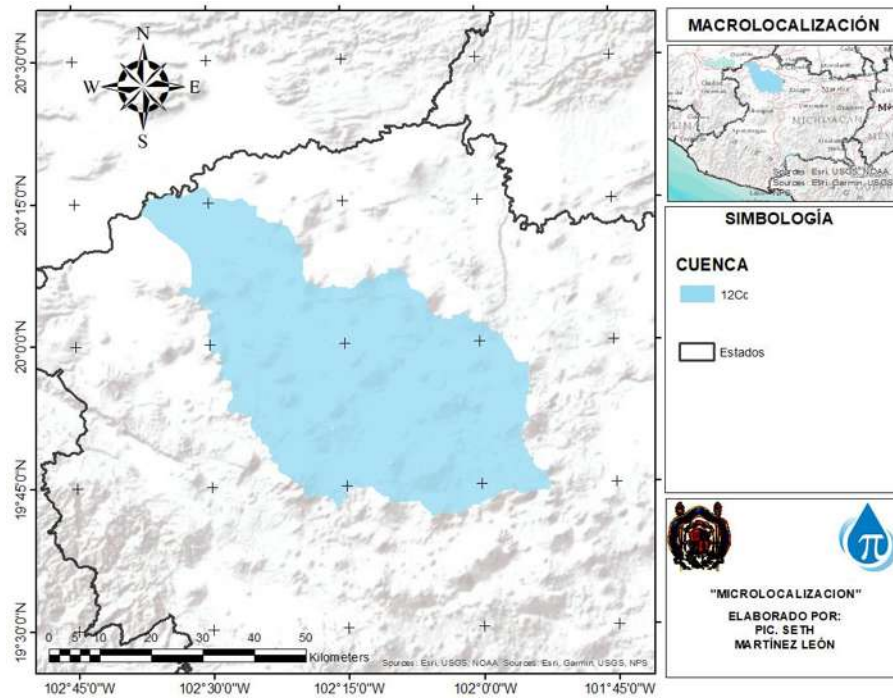


Figura 4. Micro localización de la cuenca

La zona de estudio abarca 24 municipios del estado de Michoacán como se muestra en la **Figura 5**.

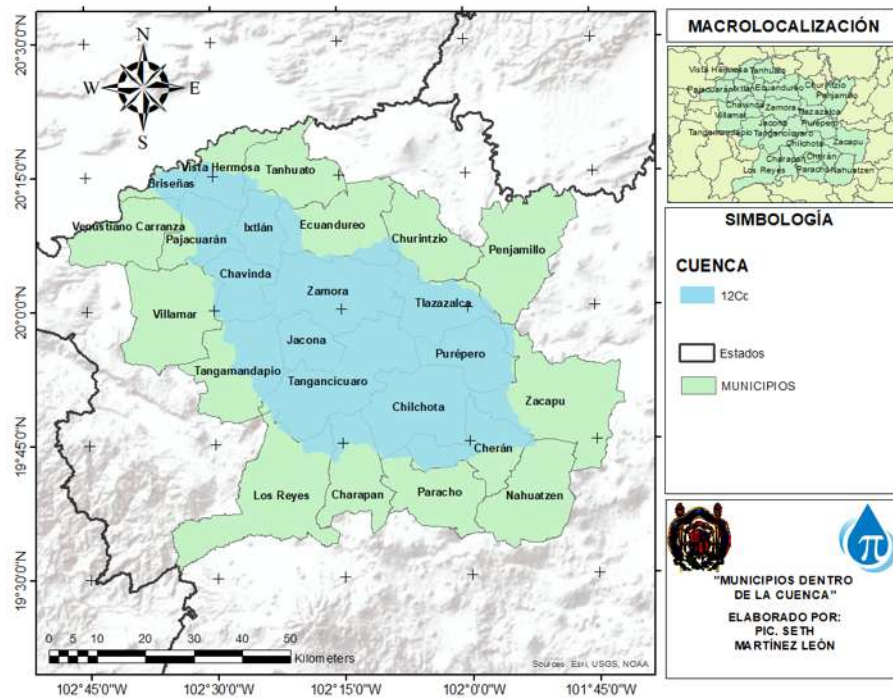


Figura 5. Municipios de la cuenca

OROGRAFÍA

La región, está caracterizada por un ambiente volcánico, destacando estructuras de tipo estratovolcán, volcanes en escudo y conos cineríticos. Todos ellos con un alto grado de fracturas (Silva y Ramos 1998). Hay que tener presente que la cuenca se ubica dentro de una provincia geológica caracterizada por su alta densidad volcánica (Hasenaka y Carmichael 1985).

El área de estudio se localiza dentro de la provincia geológica denominada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), específicamente hacia el límite oeste del denominado Campo Volcánico Michoacán – Guanajuato (CVMG) caracterizado por la presencia de una alta concentración de elementos volcánicos, entre los que predominan los conos volcánicos pequeños.

La cuenca del río Duero forma parte de este sistema volcánico, en el que destacan estructuras volcánicas de tipo estratovolcán de composición generalmente andesítico-basáltico como son los cerros de La Beata y de San Isidro. Además de volcanes en escudo como el cerro Patámbar y conos cineríticos como el Curutarán, La ladera y La cantera.

Este volcanismo es causante de la formación de valles fluviales parcialmente cerrados como el de Guadalupe y el de Zamora, que limitan con la región lacustre de la Ciénega de Chapala. **Figura 6**

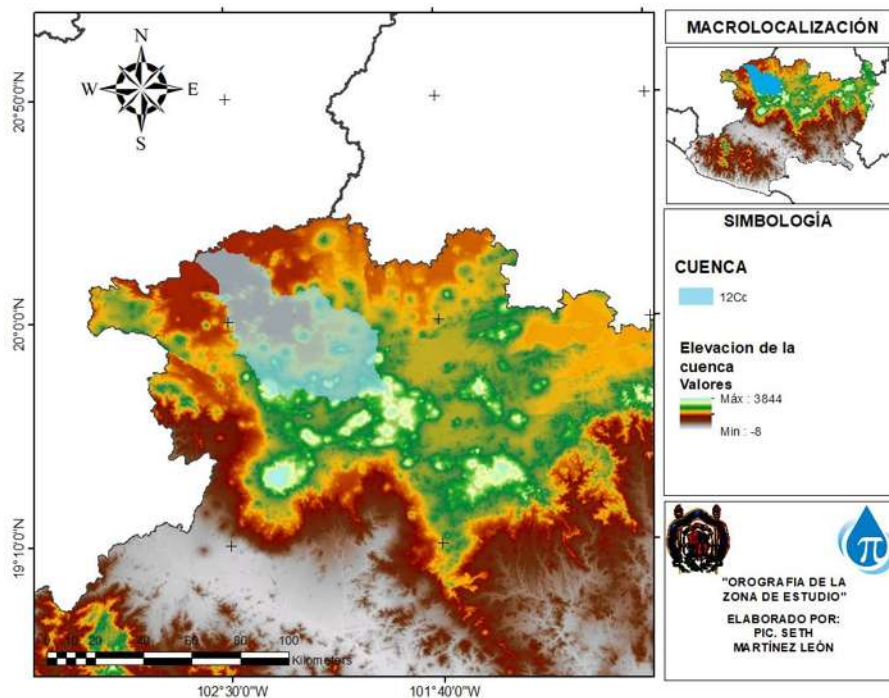


Figura 6. Orografía de la región en estudio

HIDROGRAFIA

En la cuenca del río Duero, el agua proveniente de manantiales es la principal fuente de abastecimiento en la zona y estos son los principales aportadores al caudal del río Duero, después de los escurrimientos pluviales (CONAGUA 2009). Mostrado en la **Figura 7** con las corrientes de México y en la **Figura 8** las corrientes de la cuenca.

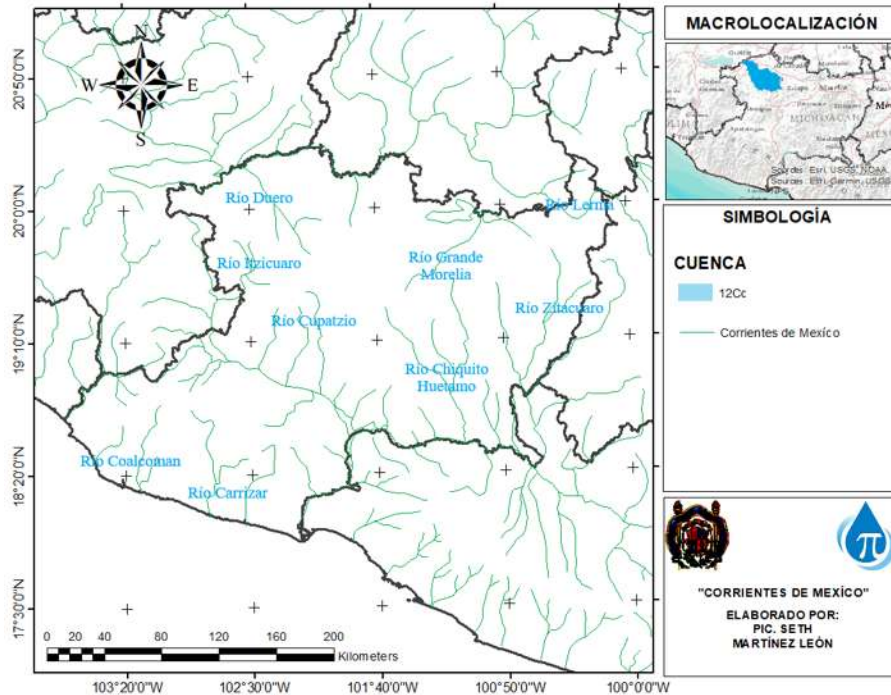


Figura 7. Corrientes de México

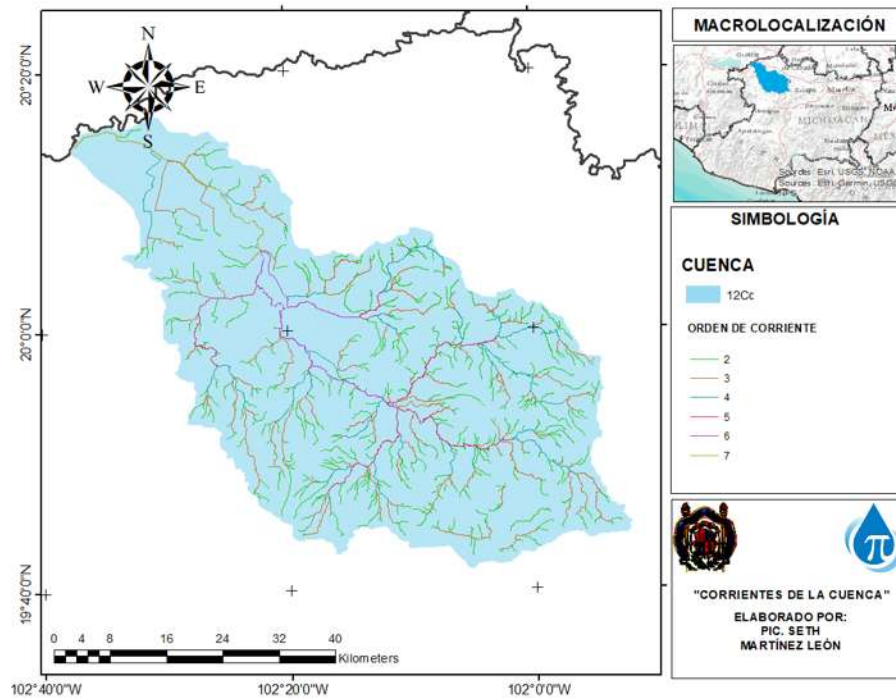


Figura 8. líneas de corriente de la cuenca

CLIMA

La región del sur de la cuenca está representada por dos subregiones, la región sureste de la cuenca que fundamentalmente se encuentra ubicada en el estado de México, presenta un clima definido como templado semifrío húmedo con verano fresco largo y lluvias en verano.

Considerando la clasificación climática de Köppen modificado por E. García (1988), los climas predominantes dentro de la Cuenca van de semicálido subhúmedo con tendencia a templados. Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Este subtipo de clima predomina en la zona plana, iniciando en el Valle de Zamora por debajo de los 1,700 msnm, hasta internarse en la Ciénega de Chápala por la población de Ixtlán, siguiendo el cauce del propio río hasta el límite Nor-Noroeste, donde se une con el río Lerma. Además, está delimitado por la zona de lomeríos suaves y algunas serranías, sobre todo en la parte Sur, Sureste y Suroeste.

Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente debajo de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Este subtipo de clima se localiza en las zonas de lomeríos y zonas serranas circundantes a las zonas planas, como la Sierra de Pajacuarán en la parte baja y los cerros circundantes al Valle de Zamora como La Beata, Tamandaro etc.

El subtipo inicia en la Cañada de los Once Pueblos a la altura de la población de Chilchota entre los 1,700 y 2,000 msnm. Se continúa como una banda por el valle de Tangancícuaro (Guadalupe), limitado por un contorno de dirección aproximada ENE, desde el cerro Tamándaro hasta la parte NW del cerro Etúcuaro, continuando hacia la parte alta de la Ciénega de Chápala con dirección Nor-Noreste hasta limitar con la zona plana cerca de la población de Ixtlán.

Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Este subtipo de clima a diferencia del anterior presenta un índice P/T mayor de 55, se localiza en la parte Sur de la cuenca en una franja que corre en dirección Noreste Suroeste, continuándose hacia el Oeste, donde se ubica el Cerro de Patamban. Coincide con las zonas de la cuenca que sobrepasan los 2,000 msnm. En esta zona se localizan poblaciones como Purépero, Tlazazalca y hacia la parte sureste Patamban.

EDAFOLOGIA

Dentro de la cuenca se presenta un suelo dominante Vertisol, después Andosol, Feozem, y Acrisol, Luvisol. Como se muestra en la **Figura 9**.

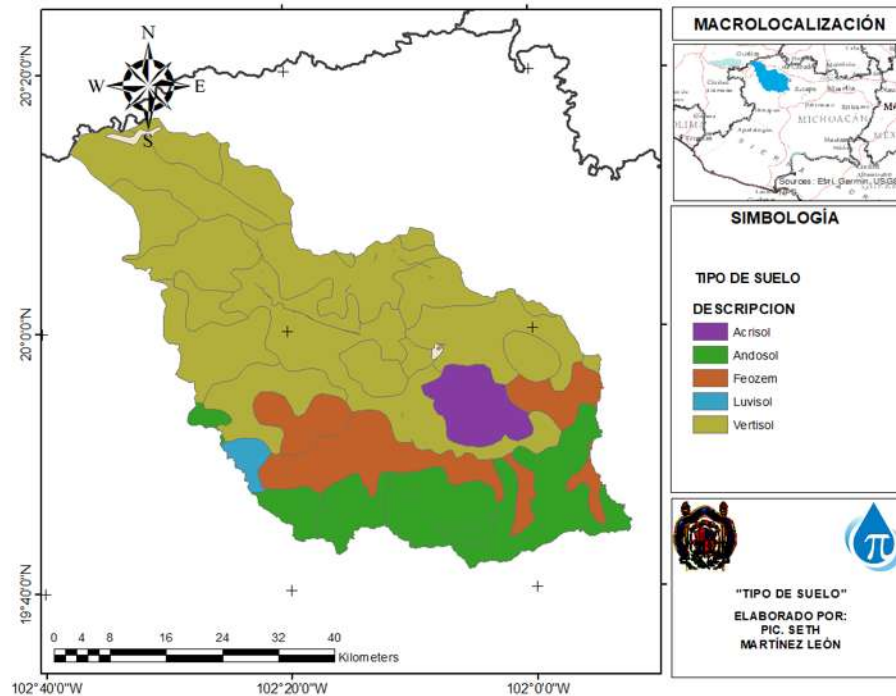


Figura 9. Tipo de suelo en la cuenca

GEOLOGÍA

La región de estudio presenta cuatro tipos de rocas, dos de ellas rocas ígneas extrusivas, ambas de la era cenozoica cuaternario y neógeno, en la clasificación geológica y las rocas que presenta son ácidas y básicas. También presenta una roca sedimentaria, de la era cenozoica neógeno, la roca que presenta es de tipo limolita-arenisca, y una última que solo se tiene registro que es de la era cenozoica y marcada como "N/A", presentado en la **Figura 10**.

- Ígneas extrusivas ácidas: Riolota, Riodacita y Dacita; Siendo roca volcánica formada principalmente de cuarzo.
- Ígneas extrusivas básicas: Basalto, siendo una roca volcánica que consiste en plagiocasa cálcica.
- Limolita-Arenisca: Mineralógicamente la limolita está compuesta de alrededor del 30% de minerales arcillosos y óxidos de hierro como hematita, goetita y ferrihidrita. No es una roca que ocupe grandes extensiones al formarse, debido a que es la transición entre las lutitas y areniscas.

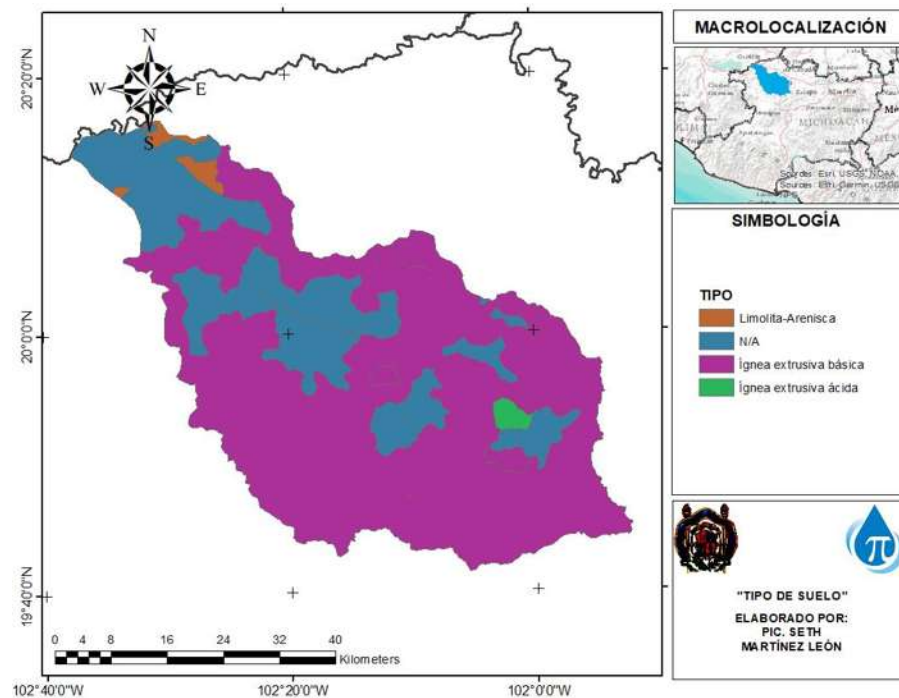


Figura 10. Geología en la cuenca

USO DE SUELO

El uso de suelo se compone principalmente de agricultura que es la de mayor presencia, posteriormente de bosque y matorral, la distribución se presenta en la **Figura 11**.

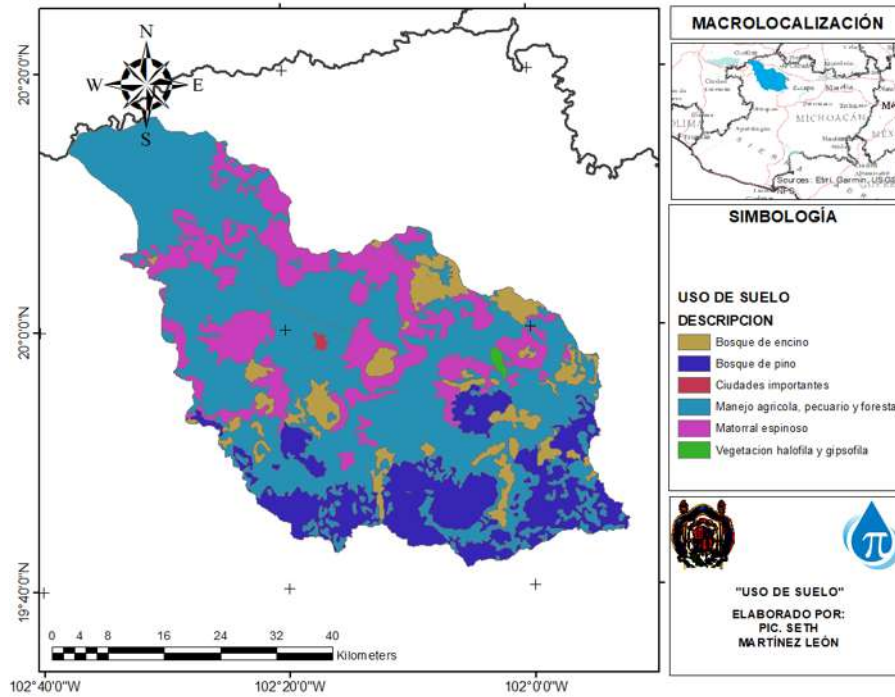


Figura 11. Uso de suelo en la cuenca

MATERIALES

BASE DE DATOS

Una base de datos es un conjunto de datos persistentes que es utilizado por los sistemas de aplicación de alguna empresa o entidad dada, por lo que, un sistema de base de datos es básicamente un sistema computarizado para guardar registros: es decir, es un sistema computarizado cuya finalidad general es almacenar información y permitir a los usuarios recuperar y actualizar esa información con base en peticiones (C. J. Date, 2001).

- Datos persistentes: son los datos de la base de datos que difiere de otros datos más efímeros, como los datos de entrada, los datos de salida, las instrucciones de control, las colas de trabajo, los bloques de control de software, los resultados intermedios y de manera más general, cualquier dato que sea de naturaleza transitoria.

Para el desarrollo de este proyecto, se requiere la estructuración de un conjunto de datos obteniéndose de manera individual para posteriormente ser procesados para conocer las características geográficas, climatológicas y físicas. Se obtienen cartas vectoriales con información del relieve, uso y tipo de suelo por parte de INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática); datos climatológicos de la zona de estudio y alrededor de la misma; datos de volumen de escurrimiento de BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales).

INEGI

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) es un organismo público autónomo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones. (INEGI 2020)

El Instituto Mexicano aplica métodos para la generación de mapas digitales del territorio mexicano para información de relieve, topografía, recursos naturales, geodesia, nombres geográficos, entre otros. Estos métodos se dividen en dos grupos:

- Métodos directos: obtenidos a partir de mediciones que se realizan sobre el terreno real, mediante levantamientos topográficos con estación total o GPS; o, mediante el uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o laser.
- Métodos indirectos: se hace uso de documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un modelo digital de elevación mediante la digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática o manual (escáner y vectorización, o, uso de pantalla digitalizadora, respectivamente), o, por restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, permitiendo caracterizar formas del relieve y elementos en el mismo, estos modelos son utilizados en equipos de cómputo y software mediante un CEM para el caso del trabajo a desarrollar.

En la actualidad INEGI emplea los métodos siguientes para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE):

- **Generación a partir del método fotogramétrico de correlación cruzada:** La técnica de correlación cruzada de imágenes se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitalizadas. En este método se extraen sub-imágenes homólogas digitales de ambas fotografías, izquierda y derecha, que subsecuentemente se correlacionan por medio de su información radiométrica (los valores de la escala de grises), para así determinar áreas homólogas. De esta manera el proceso de correlación proporciona el ajuste necesario del cual proporcionará valores de elevación para una serie de puntos de densidad irregular. Los modelos generados por este método pueden ser del tipo superficie y del terreno con una resolución de 15 metros, exactitud de 3 metros y la cobertura territorial representada en el modelo es la correspondiente a la escala cartográfica 1:20,000.
- **Tecnología LIDAR (acrónimo en el idioma inglés de Light Detection and Ranging”, esto es, “Detección y Medición a través de la Luz”):** LIDAR es la combinación de tecnologías diseñadas para la obtención de coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), de puntos del terreno mediante un telémetro láser montado en un avión. A partir de estos datos llamados “Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno” se pueden elaborar modelos digitales de elevación de alta resolución submétricos, tanto del terreno como de la superficie de este (objetos naturales o artificiales). Los modelos generados mediante esta tecnología tienen una cobertura territorial disponible correspondiente a la escala cartográfica 1:10,000 y 1:20,000 y pueden tener una resolución de 1 a 15 metros, con exactitud de 15 a 90 centímetros dependiendo de las características de planeación y ejecución del vuelo para la captación de los datos.

- **Digitalización de cartografía topográfica:** Los mapas topográficos proporcionan información acerca del relieve del terreno, dicha información viene en forma de curvas de nivel y puntos de altura (elevaciones de las puntas de los cerros o puntos bajos en los valles), la opción de digitalizar las curvas y aplicar un algoritmo de interpolación produce un Modelo Digital de Elevación de tipo terreno con buena calidad si se tiene la precaución de asegurarse que la digitalización de las curvas ha sido realizada de buena manera y cuidando que los valores de altura asignados a las curvas sean correctos, a este proceso se le conoce como “Conversión de Curvas de Nivel”, ya que se pasa de altimetría analógica (en papel) a una de formato digital mediante el uso de un seguidor de línea semiautomático que utiliza como fondo una imagen raster de las curvas de nivel y la hidrografía. Los modelos generados por este método tienen una resolución de 10 a 100 metros con exactitudes de 8 a 100 metros, tanto la resolución como la exactitud depende de la escala cartográfica de la información fuente utilizada para generar el modelo y la cobertura territorial representada en este tipo de modelos es la correspondiente a la escala cartográfica a 1:50 000, 1:250 000, 1:1’000 000.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Además, INEGI cuenta con información en formato shape del uso y tipo de suelo (edafología) que nos permite representar de forma gráfica la distribución del uso agrícola, de la vegetación natural e inducida en la zona, así como conocer sus propiedades físicas, químicas y morfológicas que nos serán de utilidad al momento de la caracterización para la modelación superficial de la zona.

SISTEMA CLICOM

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COMputing project. Las observaciones son diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información. Se puede encontrar información de datos de 1920 a 2015 (CICESE, 2020).

Dentro del interfaz de CLICOM, se encuentran las **estaciones climatológicas** de cada estado clasificadas de mayor y menor a 25 años de años de efectividad de las estaciones, esto se refiere a los años que las estaciones han registrado información.

BANDAS – CONAGUA

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana (IMTA, 2020).

La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica que es utilizada para el trabajo descrito es:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) día 1 a día 28-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).
- Hidrograma: Incluye la fecha en que ocurre el gasto, hora en que ocurre el gasto y gasto instantáneo (m^3/s).
- Limnigrama: Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- Sedimentos: Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

SOFTWARE DE MODELACION GEOGRAFICA

ARCGIS

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema empleado para describir y categorizar la tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia.

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como Smartphones y equipos de escritorio.

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes

- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas con el análisis espacial
- Crear aplicaciones basadas en mapas
- Dar a conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización

Los formatos con los que ArcGIS obtiene información son: ráster y vectoriales, siendo el primer elemento discretos, continuos que representan una malla y facilitan la combinación de datos con capas y el análisis espacial, y el segundo llamado también shapes cuenta con objetos lineales, puntuales y polígonos cerrados.

SOFTWARE DE MODELACION MATEMATICA

Un modelo matemático puede ser de una complejidad muy variable; desde formulas sencillas hasta un conjunto de ecuaciones cuya solución puede ser imprescindible para un ordenador. El tipo de modelo a desarrollar depende del tipo de proceso que se quiera modelar, clasificándolos en dos grupos: Modelos deterministas y modelos estocásticos. (Miguel, et. Al., 2018)

Los modelos estocásticos o series temporales carecen de bases físicas, y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios (Miguel, et. Al., 2018).

Los **modelos deterministas** describen el comportamiento del ciclo hidrológico (o de parte de este) en forma de expresiones analíticas que relacionan las interacciones físicas entre sus componentes. Las relaciones matemáticas se establecen por calibración sin que se conozca de qué forma pueden estar relacionadas las variables. Estos modelos reciben el nombre de modelos empíricos o de caja negra (Miguel, et. Al., 2018).

En muchas ocasiones en hidrología no se puede conocer con exactitud todas las componentes del sistema y sus interrelaciones, aunque sí una gran parte de estas; por ejemplo, los modelos de lluvia – escorrentía, la variable de entrada es la precipitación, la variable de salida es el caudal y ambas están relacionadas por una serie de ecuaciones que representan, con mayor o menor fidelidad, los procesos que actúan en la cuenca como evapotranspiración, escorrentía, entre otros. Estos modelos se denominan deterministas de caja gris.

EVALHID

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la *modelación precipitación-escorrentía*. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias. El programa EVALUACIÓN de los recursos HÍDRICOS (EVALHID) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas

complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos. (Manual técnico EvalHid, 2014)

Como se ha comentado el modelo que se plantea es conceptual agregado de aplicación semidistribuida. Esto quiere decir que una cuenca que quiera ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben de ser del mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo. (Manual técnico EvalHid, 2014)

Dentro de las características principales en el programa se cuenta con varios modelos para estimar la escorrentía, así como diferentes métodos aplicables según los factores con los que se cuente, permite el desarrollo de grandes cuencas siendo éstas sistemas complejos, la escala temporal es configurada y definida por el usuario, para determinación sólo de la parte superficial se estima también la infiltración como salida en el programa.

Funcionamiento del programa:

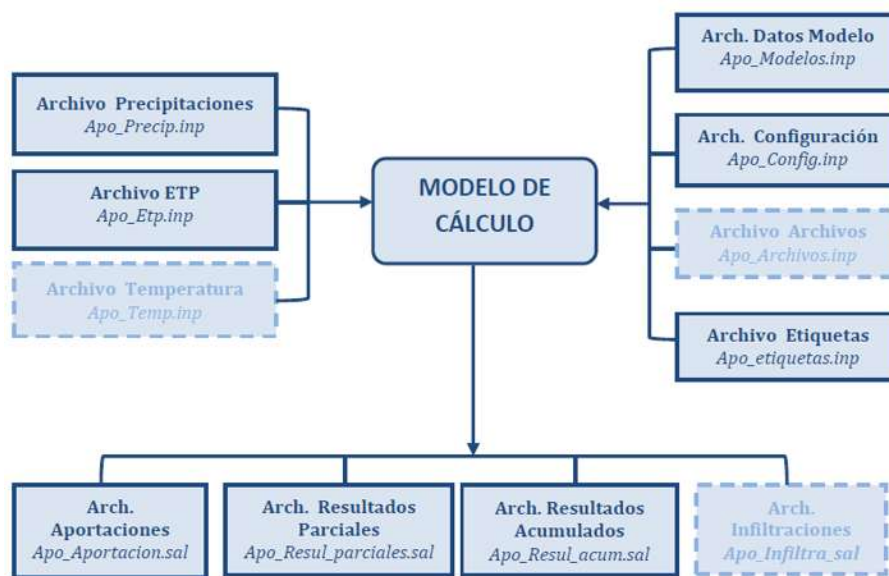


Figura 12. Estructura del programa

En EvalHid son necesarios los datos de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura del modelo asignados a cada microcuenca, su configuración en aspectos de correcciones y factores y un archivo de etiquetas que contiene errores y avisos del programa emplea para avisar al usuario, adicionalmente, si se requiere cambiar algún nombre el archivo de defecto es el de archivos.

En los archivos de salida del programa se tienen archivos de resultados parciales, acumulados, aportaciones y, opcionalmente, infiltraciones.

EvalHid cuenta con modelos de precipitación – escurrimiento que presentan diferentes niveles de complejidad en su modelación, además de los modelos de nieve.

- Témez, 1977
- HBV, 1995: es un modelo conceptual y agregado de precipitación escurrimiento ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escurrimiento empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el *Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI)* para predecir la escurrimiento a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

Consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escurrimiento. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual. (Manual técnico EvalHid, 2014)

- Sacramento, Burnash et al., 1973: denominado en muchos casos SAC-SMA model, fue desarrollado por Burnash y Ferral en la década de los 70. Según se indica en el documento de explicación del modelo, el modelo Sacramento es un intento de parametrizar las características de humedad en el suelo tal que: se distribuya la humedad en varios niveles de forma lógica, tenga unas características de percolación racionales y permita una efectiva simulación del caudal del río. Este modelo permite la estimación de la escurrimiento de una cuenca a partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial, la superficie de la cuenca y un conjunto de parámetros. Además, como sistema conceptual que es, intenta representar en detalle el ciclo hidrológico mediante la división del terreno en diferentes compartimentos, o estanques, que representan diferentes procesos del ciclo. Dentro de los modelos precipitación escurrimiento el modelo Sacramento se puede clasificar como conceptual, continuo, determinístico, de entradas agrupadas, número alto de parámetros y sólo cuantitativo. La modelación precipitación escurrimiento no es sencilla y suele ser complicado la calibración de diversos parámetros sobre todo cuando los datos son escasos

o poco fiables. El modelo Sacramento está basado en procesos físicos siendo sus parámetros representativos de estos procesos. (Manual técnico EvalHid, 2014)

MODELO DE TÉMEZ

La conceptualización del modelo Témez (1977) se presenta en la Figura 1; es un modelo de reservorios en el cual se reproducen los procesos esenciales del transporte de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico. En este modelo el sistema se divide en dos zonas, en la primera, la lluvia se almacena en forma de humedad y en ella, dependiendo del estado de humedad, de la capacidad máxima de almacenamiento y de la evapotranspiración potencial se origina un excedente que pasa a la segunda zona. El excedente tiene dos componentes: la escorrentía superficial y la infiltración que se almacena en el acuífero. El intervalo temporal más empleado es el mensual.

El ciclo hidrológico simulado por Témez se presenta en la **Figura 13**.

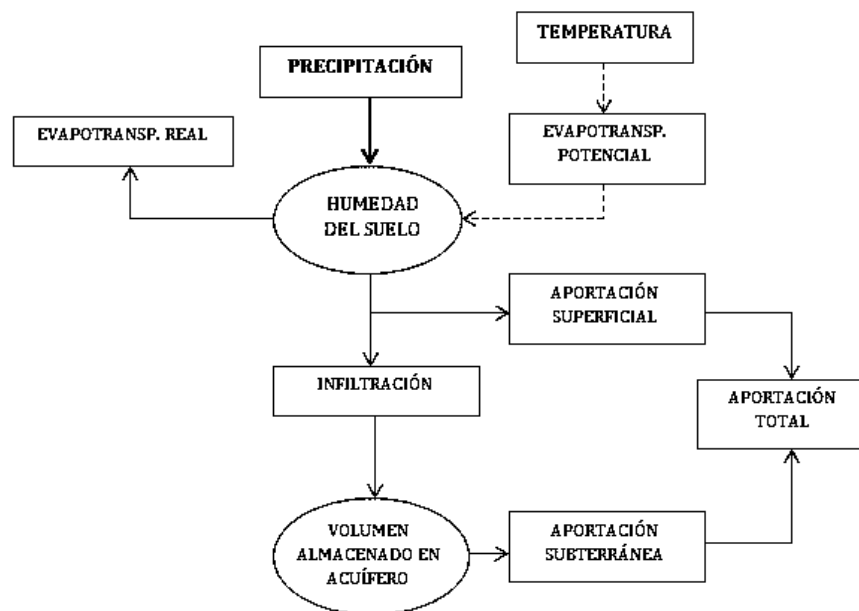


Figura 13. conceptual de la simulación del ciclo hidrológico del modelo

El modelo considera al terreno dividido en dos zonas: la superior que es la no saturada, en cuyos poros coexiste agua y aire y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo; y la zona inferior o acuífero, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El balance es realizado a partir del flujo que entra de la precipitación, que se reparte en los flujos salientes, intermedios y almacenamientos intermedios.

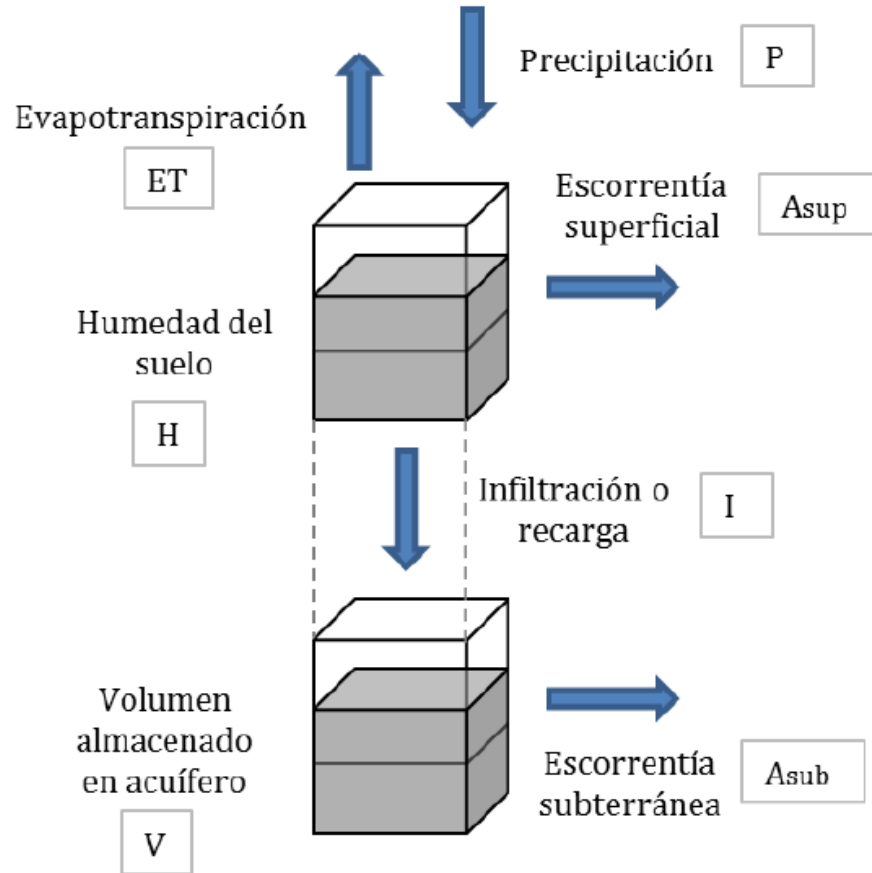


Figura 14. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Temez

Flujo de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (P)
Flujos de salida	<ul style="list-style-type: none"> • Evapotranspiración real (E) • Aportación superficial (Asup) • Aportación de origen subterráneo (Asub)
Flujos Intermedios	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltración (I), identificada con la recarga al acuífero el mes "t" (R_t)
Almacenamientos internos	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad del suelo (H) • Volumen almacenado en el acuífero (V_t)

Tabla 1. Componentes de flujos y almacenamientos

El agua que procede de la precipitación se distribuye como se muestra en el esquema siguiente:

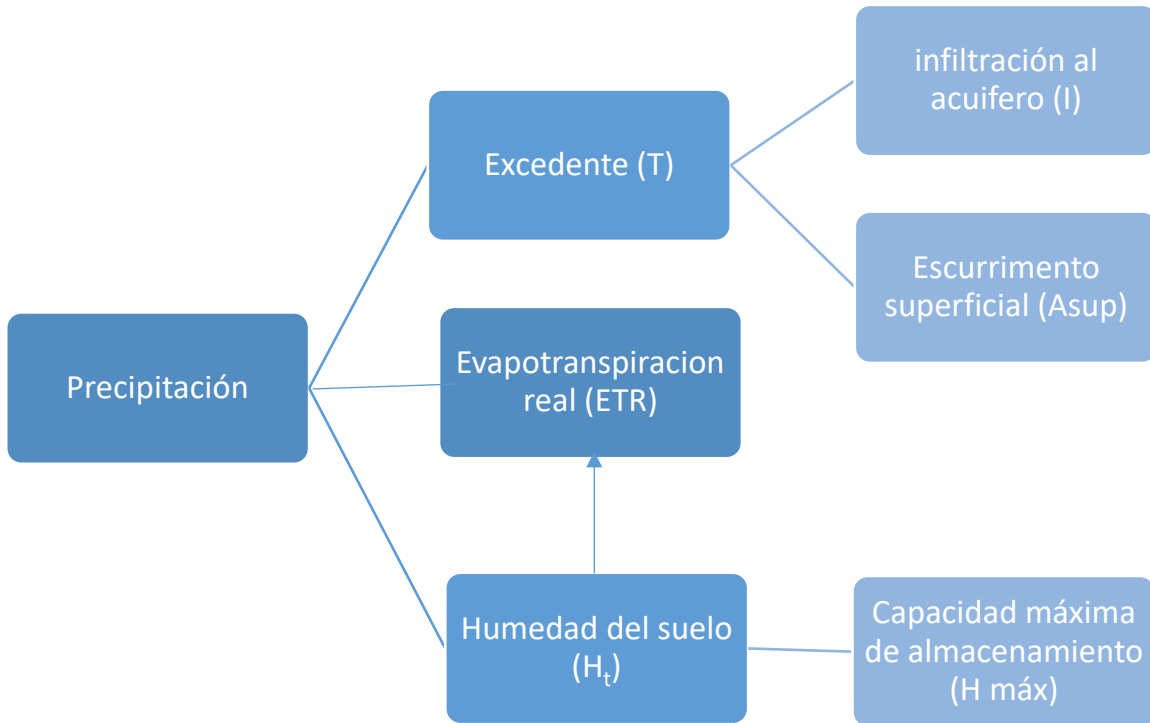


Figura 15. distribución de precipitación

CALCULOS

EXCEDENTE

Se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t), y que el resto, el excedente (T_t), se distribuye entre la aportación de origen superficial (A_{supt}), y la infiltración o recarga. (Manual técnico EvalHid, 2014)

El excedente total (T_t) se calcula como:

$$T_t = 0$$

$$\text{si } P_t \leq P_0$$

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta t - 2P_0} \quad \text{si } P_t > P_0$$

Donde:

$$\delta = H_{\text{máx}} - H_{t-1} - EPT_t$$

$$P_0 = C(H_{\text{máx}} - H_{t-1})$$

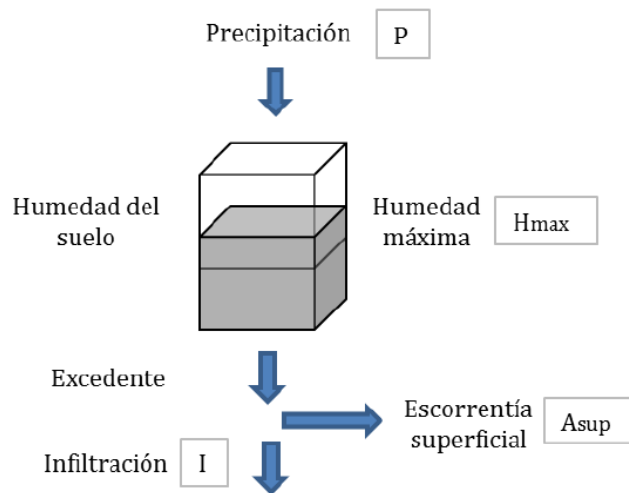


Figura 16. Transformación de la precipitación en excedente

- **Hmax (mm):** capacidad máxima de almacenamiento del suelo, depende de las características del suelo y su vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. Su valor aumenta conforme lo hacen los factores que facilitan la retención de agua en el suelo y espesor de este que puede ser drenado por evapotranspiración.
- **Ht-1 (mm):** almacenamiento de agua en el suelo en el instante t-1.
- **ETPt (mm):** evapotranspiración potencial en el intervalo de tiempo t. Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.
- **C:** coeficiente de inicio de excedente, es un factor adimensional, que toma valores en torno a 0.3 (Témez, 1977) y se define como el inicio de la escorrentía antes de que alcance el máximo de humedad en el suelo Hmax.

ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACION

Ya estimado el excedente, se requiere obtener la humedad del suelo al final de cada mes, con la expresión:

$$H_t = \min \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t, 0 \right\}$$

Representando el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP.

La evapotranspiración real producida se obtiene mediante:

$$ET_t = \min \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t, ETP_t \right\}$$

En caso de no haber suficiente agua en el suelo, la humedad en el suelo al final del mes sería nula.

La infiltración al acuífero es función del excedente y del parámetro infiltración máxima (I_{max}), expresándose como la cantidad de agua que se puede infiltrar en el terreno al mes, con la expresión:

$$I_t = I_{max} \frac{T_t}{T_t + I_{max}}$$

A medida que el excedente aumenta, la infiltración también lo hace, ascendiendo asintóticamente a su máximo. En caso de que el excedente sea nulo, la infiltración también lo será.

La infiltración, aparte de depender de las propiedades del terreno, también depende de la intensidad y concentración de las precipitaciones.

El excedente que no se infiltra se convierte en escorrentía superficial al final del mes "t", calculado con la siguiente expresión:

$$A_{sup t} = T_t - I_t$$

El programa también es capaz de obtener la aportación subterránea (A_{subt}) mediante el drenaje de agua almacenado en el acuífero (V_t). Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial.

Los parámetros que calcula son:

- Q_t : Caudal cedido a la red superficial.
- Balance de masa de tipo, representado por una ecuación diferencial ordinaria.
- α : Constante con dimensiones de (T^{-1}) .
- R_t : Caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t .
- V_o : Volumen inicial del acuífero.
- R : Caudal de recarga constante
- S : Superficie de la cuenca

La desventaja del modelo subterráneo es la simplicidad excesiva del sistema.

PARAMETROS

Las tablas siguientes muestran los parámetros del modelo, rangos de operación y parámetros de uso y tipo de suelo de acuerdo con H_{max} e l_{max} , su valor finalmente calibrado puede superar los límites descritos.

	H_{max} (mm)	C	l_{max} (mm)	α (mes^{-1})
Mín	50	0.2	10	0.001
Máx	250	1	150	0.9

Tabla 2. Rangos de los parámetros del modelo de Témez

Uso de suelo	Hmax (mm)
Superficies artificiales	40
Espacion con poca vegetacion	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadio	215
Prederas y pastizales naturales	15
Sistemas agricolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetacion arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas humedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 3. Valores aprox. de Hmax, uso de suelo (Estela et al., 1999)

litología	Imax (mm)
Mat. Aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
yesos	64
Materiales arenosos	450
Material gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gness	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Tabla 4. Valores aprox. de Imax, litología del terreno (Estela et al., 1999)

CALIBRACION

La calibración del modelo puede realizarse manual, automática o utilizando una herramienta de calibración; para el trabajo presente se utiliza la herramienta de calibración SCE – UA ya que ha sido utilizado con éxito para problemas no lineales en el ámbito de modelos hidrológicos de cuencas.

El algoritmo evolutivo de calibración Shuffled Complex Evolution Method, desarrollado por la Universidad de Arizona (SCE-UA), es un potente procedimiento de optimización global capaz de localizar de forma consistente el óptimo global de un modelo lluvia-escurrimiento (Duan, et al., 1992).

El funcionamiento básico del algoritmo SCE – UA está inspirado de la selección natural y la genética; es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios y parte de diferentes puntos de búsqueda que se organizan por equipos (complex); de esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción, donde además se mezclan (shuffle) equipos. (Casas y Paredes, 2013).

INDICADORES DE AJUSTE

La calibración de modelos está enfocada a un criterio de exactitud, que se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo; para ello se hace uso de diferentes metodologías basadas en ecuaciones para la bondad de ajuste o su indicador de ajuste. Dichas ecuaciones son una diferencia numérica entre la respuesta del modelo simulado y la del observado en las estaciones aforadas.

La calibración automática en los modelos tiene por objetivo encontrar valores de los parámetros del modelo que sean los óptimos de la bondad de ajuste numérico.

- EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFFE (NSE)

Según Casas y Paredes (2013), es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre suceden durante periodos de flujo elevado. El valor NS varía de -1 a 1: donde un valor NS = 1 significa un ajuste perfecto y un valor NS = 0 significa que el error es del mismo orden de magnitud de varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo; por otra parte, los valores menores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

$$F1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t))^2}$$

La desventaja que presenta del coeficiente de NS es que la diferencia de valores es calculada con los cuadráticos, dando como resultado los valores mayores en las series sobrevalorados y los valores bajos no tomados en cuenta. Lo anterior conlleva a una sobreestimación del funcionamiento del modelo durante los picos y una subestimación en condiciones de escasez del flujo. NS no es muy sensible a sobrevaloraciones o infravaloraciones sistemáticas del modelo, especialmente durante periodos de flujo escaso (Casas y Paredes, 2013).

Los rangos de calidad de la bondad de ajuste numérica de la eficiencia de Nash – Sutcliffe, se observan en *Tabla 5*.

- EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFFE MODIFICADO (*ln* NSE)

Es la transformación logarítmica del flujo, que da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadradas y la consecuente sensibilidad a los valores extremos; este coeficiente se calcula con los valores logarítmicos de los valores observados y los simulados (Q_{obs} y Q_{sim} , respectivamente). Mediante esta transformación logarítmica del flujo, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o mejor al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del *ln* NSE a las observaciones o infravaloraciones sistemáticas del modelo (Casas y Paredes, 2013)

La ecuación de la bondad de ajuste numérica es la siguiente:

$$F2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\overline{Q}_{obs}(t))]^2}$$

Los rangos de calidad de la bondad de ajuste numérica de la eficiencia de Nash – Sutcliffe modificado, se observan en *Tabla 5*.

- COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor del coeficiente varía de -1 a 1; tomando un valor de 1 cuando los puntos de datos describen una línea perfectamente recta con pendiente positiva, y, se denomina correlación completa positiva; por otra parte, si los puntos de datos describen una perfecta línea con pendiente negativa, el coeficiente toma un valor de -1, donde se denomina una correlación completa negativa. Un valor de correlación cercano a cero indica que las variables no están correlacionadas linealmente. El coeficiente de Pearson tiene como inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa y/o una correlación observada es significativamente más fuerte que otra (Casas y Paredes, 2013).

El coeficiente se determina mediante:

$$F3 = r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}}$$

Los rangos de calidad de la bondad de ajuste numérica del coeficiente de Pearson se observan en Tabla 5.

Calidad de ajuste	NSE/ln NSE/r ²
Muy buena	0.75 < Coeficiente ≤ 1.00
Buena	0.65 < Coeficiente ≤ 0.75
Satisfactoria	0.50 < Coeficiente ≤ 0.65
No satisfactoria	Coeficiente ≤ 0.50

Tabla 5. calidad de bondad de ajuste de los coeficientes

METODOS

ANALISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El trazo de la cuenca en estudio, donde abarca la cuenca del río Duero y sus municipios los cuales se obtuvieron de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), las estaciones hidrométricas, así como las corrientes pluviales de Michoacán, para con ello comparar los datos que posteriormente serán simulados.

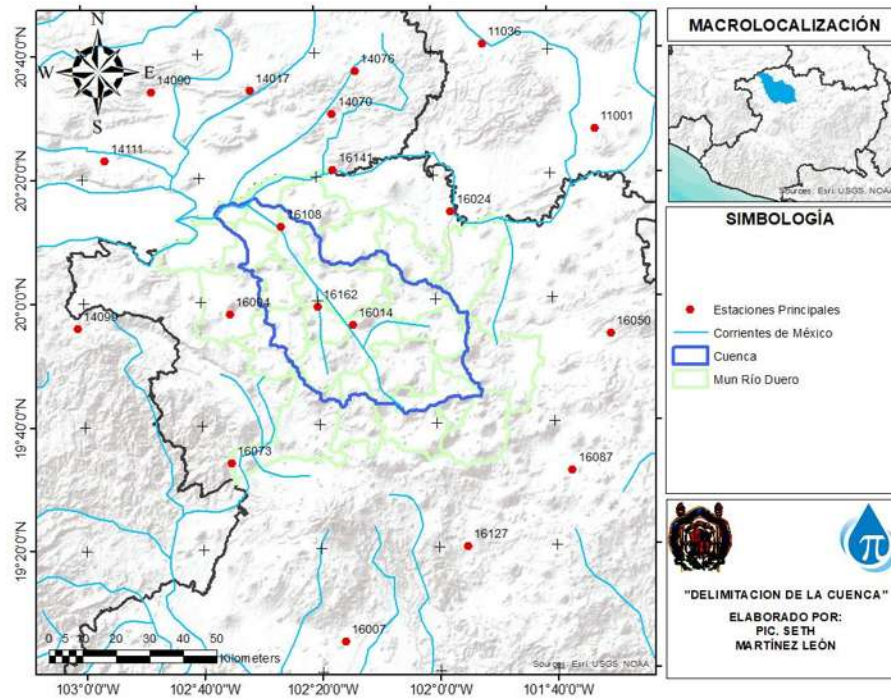


Figura 17. Delimitación de la cuenca

RECOPIACION DE DATOS

ESTACIONES HIDROMETRICAS

La estación hidrométrica se selecciona a partir de la cercanía en el municipio y de la corriente pluvial, sus datos se gestionan de BANDAS de CONAGUA; como la estación hidrométrica seleccionada se utiliza para la comparación con las modelaciones, tenemos varias estaciones hidrométricas, pero no cumplen con los requisitos para utilizarlas por lo que se utilizaron los datos de la presa de UREPETIRO (los datos de entrada).

ESTACIONES METEOROLOGICAS

Las estaciones meteorológicas se obtienen por la cercanía en la cuenca y dentro de la misma, además, considerando los años efectivos de las estaciones (mayor a 25 años) y el porcentaje de vacíos de las estaciones (no mayor a 20%), con ello procurando que al momento de ser llenados los vacíos no se vean afectados los datos por las estaciones cercanas.

Tanto los datos de temperatura promedio mensual anual, como los de precipitación diaria anual, se gestionan de CLICOM (CICESE, 2020); así como los datos de longitud, latitud y elevación.

Para poder usar los datos de las estaciones adecuadamente es requerirle realizarles pruebas que comprueben su consistencia, es decir, su independencia y homogeneidad.

PRUEBAS EN LAS ESTACIONES MANUALES

De acuerdo con lo ya mencionado anteriormente se debe considerar en las estaciones su independencia y homogeneidad como prioridad, realizándose a los datos de precipitación dentro de este trabajo:

- Independencia: Prueba de Límites de Anderson.
- Homogeneidad: Prueba de Secuencias y Test de Helmer

LIMITES DE ANDERSON

La prueba de independencia de Anderson (Salas, 1998 *apud* Escalante Sandoval, 2005) hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k para diferentes tiempos de retraso k .

En la gráfica de los valores estimados para r_k (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se denomina correlograma de muestra.

Las series presentan variabilidad en la muestra, contienen fluctuaciones alrededor de cero, pero no son necesariamente cero, por lo que, para determinar los límites de probabilidad de las series independientes se considera un 95% de nivel de confianza al utilizar este método.

Si menos del 10% de los valores superan los límites se dice que la serie de datos es independiente.

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm \sqrt{n_j - k - i}}{n_j - k}$$

PRUEBA DE SECUENCIAS

Esta prueba es bastante sensitiva, se realiza contando el número de secuencias o rachas (u) arriba o bajo la mediana de la serie, donde, el valor de la mediana se obtiene ordenando los datos respecto a su magnitud y seleccionando el valor central si n es impar, o la media aritmética de los dos valores centrales si n es par.

En series de grandes magnitudes, se acepta usar un rango de datos continuos, analizando el signo de las desviaciones con respecto a la mediana muestral para cada dato y comparar el número de cambios permitidos (u) en base al tamaño de la muestra (n).

Si el número de cambios esté entre los valores establecidos de la **Tabla 6** la serie de datos se considera homogénea.

n	u			n	U		
12	5	-	8	32	13	-	20
14	5	-	10	34	14	-	21
16	6	-	11	36	15	-	22
18	7	-	12	38	16	-	23
20	8	-	13	40	16	-	25
22	9	-	14	50	22	-	30
24	9	-	16	60	26	-	36
26	10	-	17	70	31	-	41
28	11	-	18	80	35	-	47
30	12	-	19	100	45	-	57

Tabla 6. Valores de eficiencia en la bondad de ajuste

TEST DE HELMERT

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones con respecto al valor medio, si una desviación de cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera un cambio C. cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio.

La serie se considera homogénea si se cumplen las condiciones de la ecuación:

$$-\sqrt{n-1} \leq (s - C) \leq \sqrt{n-1}$$

GESTAD

GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatológicos) es un software desarrollado para facilitar el análisis, validación y llenado de datos climatológicos el cual tiene como base el programa Matlab, pero es ejecutable en cualquier computadora que cuente con sistema operativo Windows sin necesidad de tener instalado el Matlab.

El software se divide en varios módulos los cuales son:

- Cargado de datos.
- Criterios de discriminación de datos.
- Análisis y validación de datos.
- Selección de estaciones principales.
- Llenado de datos faltantes.
- Validación de datos post-llenado.



Figura 18. Logo del software y la versión con la que se trabajó

Se trabajo con una beta del programa por lo que no está completo el funcionamiento de acuerdo a lo que hace, solamente se trabajó hasta la “Selección de estaciones principales”, ya que el programa presentaba errores en los demás pasos, así mismo el llenado de datos y su validación se hicieron sin

el programa pero teniendo la ayuda de los demás pasos, también sin olvidar que se tiene que corroborar al menos una estación hecha a mano para verificar que el programa está trabajando de forma efectiva. **“Agregando de que, aunque el programa pueda hacer todos los pasos explicados antes, solamente se añadirán los que se utilizaron para este trabajo”**.

CARGADO DE DATOS

Para la utilización del programa se requiere dos tipos de archivos previamente preparados:

- Un directorio el cual debe contar con la clave de las estaciones climatológicas a analizar, así como su coordenada “x” y coordenada “y” así como elevación en msnm, en este orden y con su encabezado correspondiente, dicho directorio debe guardarse en formato “csv” (archivo de valores delimitados por comas).
- Los archivos de datos de las estaciones climatológicas descargadas de la base de datos de CLICOM en formato “.mat”, estos datos deben llevar como nombre la clave de la estación climatológica correspondiente.
- Ambos formatos de archivo deben guardarse en la misma carpeta.
- Esta primera sección tiene por objetivo seleccionar la carpeta de trabajo en la cual se encuentran los archivos a cargar, así como visualizar en tablas y/o graficas los datos cargados como se muestra en la **Figura 19**.

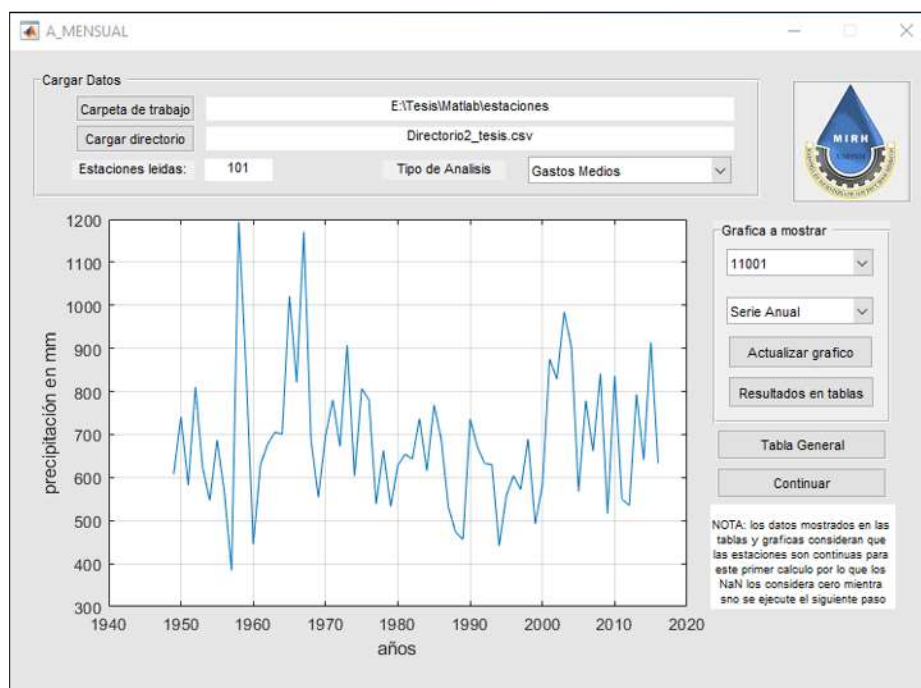


Figura 19. Ventana de cargado de datos en GESTAD

CRITERIOS DE DISCRIMINACION DE DATOS

Esta segunda sección tiene por objeto que el usuario seleccione su criterio para establecer cuantos datos pueden faltar antes de descartar un mes o un año, para ayudar a tomar la mejor decisión el software hace una separación entre datos de meses húmedos y meses secos, con la intención de permitir ser más estrictos en meses húmedos y menos estricto en meses secos.

Una vez tomada la decisión el programa muestra las tablas de datos y graficas resultados de estas decisiones **Figura 20**.

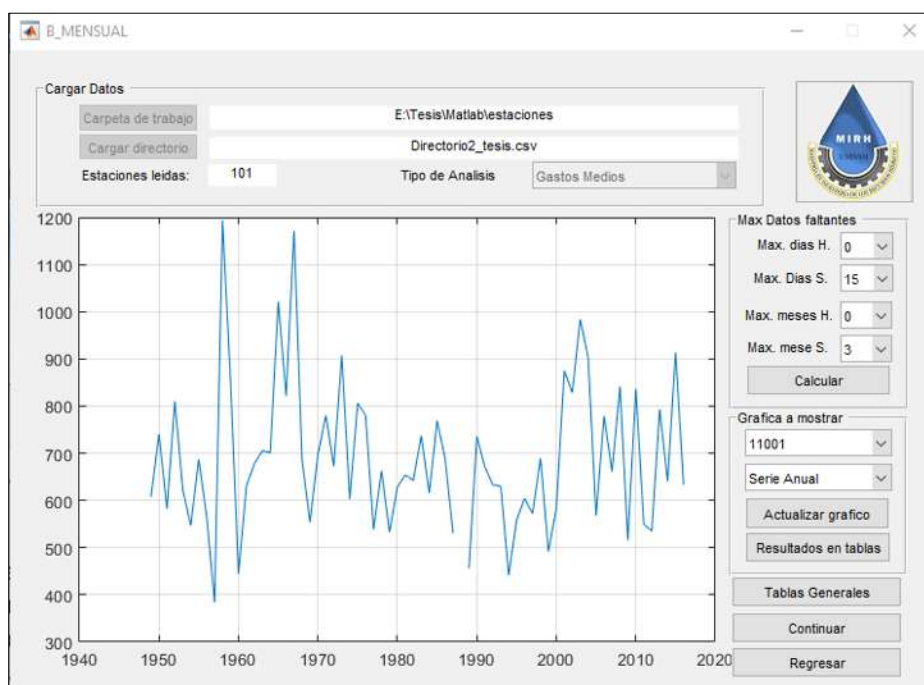


Figura 20. Ventana de criterio de discriminación de datos en GESTAD

ANALISIS Y VALIDACION DE DATOS

Este módulo es el más denso ya que realiza las pruebas para validación de los datos de cada una de las estaciones y permite eliminarlas de la lista si el usuario lo así lo desea. Dicha validación de datos se realiza en cuatro niveles (Inspección Grafica, Homogeneidad, tendencia e independencia) y se realiza al registro histórico anual, las pruebas empleadas se desglosan a continuación:

- Pruebas graficas.
 - Media móvil
- Pruebas de Homogeneidad

- Test de Secuencias.
- Test de Helmer.
- Test T-Student.
- Test de Cramer.
- Test de Bartlett
- Pruebas de Tendencia
 - Test de la Pendiente de la recta de regresión.
 - Test de Spearman.
 - Test de Mann Kendall
- Pruebas de Dependencia o persistencia.
 - Límites de Anderson.
 - Wald-wolfowitz

PRUEBAS GRAFICAS

Los métodos gráficos sirven para apreciar inicialmente por simple inspección el comportamiento de la serie histórica permitiendo tener una idea general del comportamiento, muchas veces este comportamiento puede ser complicado de identificar por algunos cambios abruptos, para apreciar de mejor manera el comportamiento de los datos se puede calcular y graficar ventanas móviles, para esto se recomienda usar una ventana móvil de 5 años para precipitación y 3 para escurrimientos, ya que estos últimos tienen un comportamiento menor errático.

MEDIA MOVIL

Esta ventana móvil consiste en determinar el promedio de los primeros datos con forme a la ventana, para posterior mente desplazarse 1 posición y calcular nuevamente la media de este nuevo grupo de datos y repetir este procedimiento hasta utilizar todos los datos. Esta nueva serie de datos se gráfica y es más fácil identificar el comportamiento de la serie, es importante mencionar que estos son métodos tentativos por lo que pueden variar dependiendo del punto de vista de quien los analice.

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{x_2 + x_3 + \dots + x_{n+1}}{n}, \frac{x_3 + x_4 + \dots + x_{N+2}}{n}, \dots$$

PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

Estas pruebas tienen como objetivo demostrar que los datos no cambian, esto se debe a que la climatología al ser una serie de eventos cíclicos se dice que tiende a mantener una homogeneidad en grandes periodos de tiempo.

TEST DE SECUENCIAS

Test de secuencias es un método que busca analizar los datos respecto a la mediana y contando el número de cambios presentes en la serie de datos consecutivos y verificar que el número de cambios existentes se encuentre entre el rango de datos indicado en **Tabla 7**, según el número de datos (N).

N	U		N	U		N	U		N	U	
12	5	8	22	9	14	32	13	20	50	22	30
14	5	10	24	9	16	34	14	21	60	26	36
16	6	11	26	10	17	36	15	22	70	31	41
18	7	12	28	11	18	38	15	23	80	35	47
20	8	13	30	12	19	40	16	25	100	45	57

Tabla 7. Cambios permitidos para el test de secuencias

TEST DE HELMER

Es un método que analiza los datos denominando secuencias (S) a aquellos datos consecutivos que mantienen la misma posición con respecto a la media (Mayor o menor) y denominándolo cambio (C) en caso contrario, este método se aplica a la serie de datos consecutivos más grande que se tenga descartando el resto de los valores (Campos, 2011). Una vez que se analizaron los datos se aplica el criterio mostrado en la ecuación.

$$-\sqrt{n-1} \leq (s - c) \leq \sqrt{n-1}$$

TEST T-STUDENT

El Test de t-student en una prueba que permite probar si la media de una serie de datos es igual que la de otra, esto en series de precipitación permite comparar la media de la primera mitad de los datos contra la segunda mitad permitiendo demostrar que la serie en ambas secciones tiene la misma media por lo que es homogénea. La prueba se basa en determinar un estadístico (t) por medio de la aplicación de la ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \delta_1^2 + n_2 \delta_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}}$$

Donde:

- $n_1, \delta_1^2, \bar{x}_1$ son el número de datos, la varianza y la media de la primera mitad del grupo de datos.
- $n_2, \delta_2^2, \bar{x}_2$ son el número de datos, la varianza y la media de la segunda mitad del grupo de datos.

Este estadístico debe encontrarse entre los límites establecidos (t_r) por una distribución t de student de dos colas con un nivel de significancia del $\alpha=0.05$ y $N-2$ grados de libertad (Escalante & Reyes, 2002).

Una limitación de este método es la cantidad de datos ya que si se tiene una serie muy grande puede arrojar resultados erróneos.

TEST DE CRAMER

De manera similar a la prueba t Student la homogeneidad de la muestra, pero este método divide la muestra en 3 bloques, el primero del tamaño total de la muestra (n_j), el segundo (n_{60}) toma el 60% de los últimos datos de (n_j) y el tercer grupo (n_{30}) toma el 30% de los últimos datos de n_j .

La prueba compara el valor de la media \bar{X}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\bar{X}_{60}^j, \bar{X}_{30}^j$. Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media o homogénea, se deberá cumplir que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques para esto se usan las ecuaciones:

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^2$$

$$\tau_w^j = \frac{\bar{X}_w^j - \bar{X}^j}{\delta_Q^j}$$

$$\bar{X}_w^j = \sum_{k=1}^{n_w} \frac{\bar{X}_w^j}{n_w}$$

$$\delta_x^j = \left[\frac{1}{(n_w - 1)} \sum_{k=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{X}^j)^2 \right]^{0.5}$$

- Para w= 60 y 30

Este estadístico (tw) tiene distribución t - student de dos colas con n30+n60-2 grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, si el valor de tw es menor a los límites de la distribución t-studen para w=60 y w=30 se concluye que la serie es homogénea (Escalante & Reyes, 2002).

TEST DE BARTLETT

Introducida por Bartlett en 1937, es una modificación del test de Newman y Pearson para “corregir el sesgo”, esta prueba es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de las varianzas En esta prueba los ni en cada tratamiento no necesitan ser iguales; sin embargo, se recomienda que los ni no sean menores que 3 y muchos de los ni deben ser mayores que 5.

El estadístico de la prueba está definido por las ecuaciones:

$$U = \frac{1}{C} \left[(N - k) \ln(\delta^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(\delta_i^2) \right]$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k - 1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right)$$

Donde

- N es la cantidad de datos de la serie
- K es el número de grupos en los que se dividirá la muestra (mínimo 2)
- n_i es el número de datos en el grupo iésimo.
- δ_i^2 es la varianza del grupo iésimo.

Cuando la hipótesis nula es cierta, el estadístico tiene distribución aproximadamente χ^2 con k - 1 grados de libertad (Correa, et al 2006).

TENDENCIA

Las pruebas de tendencia persiguen un objetivo similar a las pruebas de homogeneidad ya que si la climatología no cambia en el tiempo deberá mantener la misma tendencia.

TEST DE LA PENDIENTE DE LA RECTA DE REGRESION

Esta prueba consiste en demostrar si existe tendencia en los datos a partir de ajustar una recta de regresión simple común mente determinada por el método de mínimos cuadrados.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2}$$

Donde y representa la serie de tiempo, x la serie de datos correspondiente a la serie de tiempo y m la pendiente de regresión.

Una vez determinada la pendiente el estadístico que indica si la pendiente es representativa se calcula con las ecuaciones:

$$tr = \frac{m}{SE^2}$$

$$SE^2 = \frac{Se^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}$$

$$Se^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{N - 2}$$

Donde

- SE^2 es el error estándar.
- Se^2 es la varianza del error de ajuste.

- N el número de datos de la serie.

Final mente el estadístico t_r se compara con la distribución t student para una significancia de $\alpha=0.5$ y grados de libertad $N-2$ en caso de ser t_r menor a la prueba t student se afirma la hipótesis de tendencia insignificante.

TEST DE SPEARMAN

En esta prueba no paramétrica que se conoce como correlación del orden de rangos primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por su rango (k_i), después para cada dato de la serie original se calculan las diferencias: $d_i = k_i - i$, con $i = 1$ a n y se evalúan los estadísticos mostrados en las fórmulas:

$$t_s = R_k \sqrt{\frac{N-2}{1-R_k^2}}$$

$$R_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{N(N^2 - 1)}$$

El valor de t_s se compara con el intervalo definido por la distribución t-studen de 2 colas para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y $n-2$ grados de libertad (Campos, 2015).

TEST DE MANN KENDALL

Esta prueba paramétrica es muy efectiva si la tendencia fundamental es de tipo lineal o se aproxima a esta. Su procedimiento consiste en evaluar el número p , en todos los pares de observaciones (x_i, x_j ; con $i = 1$ a $n-1$; $j = i + 1$ a n) en que x_j es mayor que x_i , después se calculan las estadísticas de las ecuaciones:

$$Z_k = \frac{s + 1}{\sqrt{V(s)}}$$

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sig}(x_j - x_i)$$

Donde:

$$\text{Si } (x_j - x_i) > 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) = 1$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) = 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) = 0$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) < 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) = -1$$

Nota: t representa el número de grupos en los que se repite la misma variable, pero como en series de precipitación o gasto es muy poco probable que se repita una lectura se omite la parte $\sum_t t(t-1)(2t+5)$ en la ecuación.

Si el valor absoluto de Z_k es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ (Cantor & Ochoa, 2011).

DEPENDENCIA O PERSISTENCIA

Estudios realizados a lo largo del tiempo han demostrado que una característica que suele describir las series históricas es su dependencia o persistencia (Alvarez & Salas, 1989) en el caso de las series de precipitación cuentan con independencia, pero las series de escurrimientos suelen ser persistentes al menos para el primer año, aunque esto no se cumple siempre (Campos, 1992) es por esto que con este tipo de pruebas nos permite identificar la serie analizada.

LIMITES DE ANDERSON

La cuantificación de la persistencia se realiza con base en el coeficiente de correlación (r_k) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior (Campos A, 2011). Este estadístico se determina por medio de la ecuación.

$$r_k = \frac{cov(x_i, x_{i+k})}{\sqrt{var(x_i) * var(x_{i+k})}}$$

Este método establece unos límites de confianza los cuales dependen de la cantidad de datos en la serie, de tal forma que a mayor cantidad de datos más cerrados serán los límites y mayor grado de confianza tendrán, en caso de contar con pocos datos los límites de abren generando mayor incertidumbre. Os limites están definidos por la ecuación:

$$Lim = \frac{-1 \pm 1.964\sqrt{n-2}}{n-1}$$

En el caso de series de precipitación esta prueba se aplica para un numero de desfases $k=n/3$ si el 95% de los r_k se encuentran dentro de los limites se considera una serie independiente, en el caso de las series de escurrimientos se debe observar si es persistente (dependiente) para cada desfase para de esta forma indicar que es persistente hasta k desfases.

WALD-WOLFOWITZ

La prueba de Wald-Wolfowitz es generalmente la prueba principal usada para verificar la dependencia. Esta prueba detecta si un patrón es dependiente estadísticamente, esto mediante el evaluar el carácter de aleatoriedad de una secuencia de registros históricos. Para esto el método genera corridas de datos sobre la media y bajo la media y evalúa si estos cambios representan un carácter aleatorio.

$$\mu_R = 1 + \frac{2nm}{n+m}$$

$$Var[R] = \frac{2nm(2nm - n - m)}{(n+m)^2(n+m-1)}$$

$$Z_W = \frac{\left(R \pm \left(\frac{1}{2} \right) \right) - \mu_R}{\sqrt{Var[R]}}$$

Donde

- μ_R representa la media de las corridas
- n es son los datos de la serie sobre la media.
- m los datos bajo la media.
- R representa el número de corridas.

Esta prueba se compara con una distribución normal. Si el valor de Z_w calculado está dentro del rango del valor crítico de Z para $\alpha=0.05$ se dice que los datos son independientes.

La presentación de los datos es en forma matricial y si se desea se puede ver los resultados gráficos de las pruebas que lo permita como se puede ver en la **Figura 21** **Figura 22**.

PRUEBAS

Cargar Datos

Carpeta de trabajo: E:\Tesis\Matlab\estaciones

Cargar directorio: Directorio2_tesis.csv

Estaciones leídas: 101

Tipo de Analisis: Gastos Medios

Resultados de las pruebas

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Ande
11001	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11003	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11010	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11014	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11029	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11034	Homogenea	Homogenea	No Homog...	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11036	Homogenea	Homogenea	No Homog...	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11091	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11099	Homogenea	Homogenea	No Homog...	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11142	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11143	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ
11145	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independ

Estaciones eliminadas

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson
11019	No Homog...	No Homog...	Homogenea	Existe Tendencia	Existe tend...	Existe tenden...	Independient
11150	No Homog...	Homogenea	No Homog...	Existe Tendencia	Existe tend...	Existe tenden...	Independient
14180	No Homog...	No Homog...	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independient

Antes de continuar elimine las estaciones que crea conveniente en funcion del resultado de las pruebas de consistencia

las series de precipitacion deben ser Homogeneas, sin tendencia e independientes.

Grafica y Tabla

11001

Graficar

Eliminar estación

Papelera

11019

Recuperar estación

Tabla General

Continuar

Regresar

Figura 21. Ventana de análisis y validación de daos en GESTAD

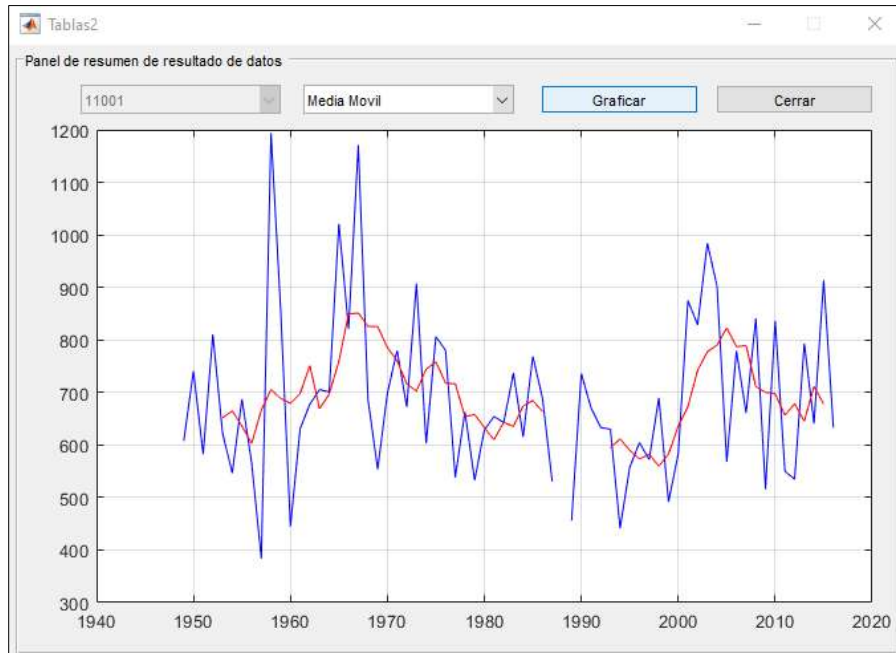


Figura 22. Ventana de resultados gráficos de análisis y validación de datos en GESTAD

SELECCIÓN DE ESTACIONES PRINCIPALES

Una vez descartadas las estaciones que no cumplen con los estándares establecidos por el usuario se procede a seleccionar entre las estaciones restantes las que fungirán como estaciones principales. Para realizar este proceso el usuario debe introducir las coordenadas del centroide de la cuenca o punto de interés en coordenadas UTM, así como asignar el peso o importancia que desea dar a los parámetros que analiza el programa. Estos parámetros son:

- Distancia al centroide
- Años de registro
- Años efectivos de registro
- Año último de registro

Una vez establecidos los pesos el programa determinara cuales son las mejores estaciones y el usuario podrá elegir, adicional al peso el programa indicara el cuadrante con respecto al centroide de cada estación adicional mente de mostrar de manera gráfica la ubicación de estas como se muestra en la **Figura 23**.

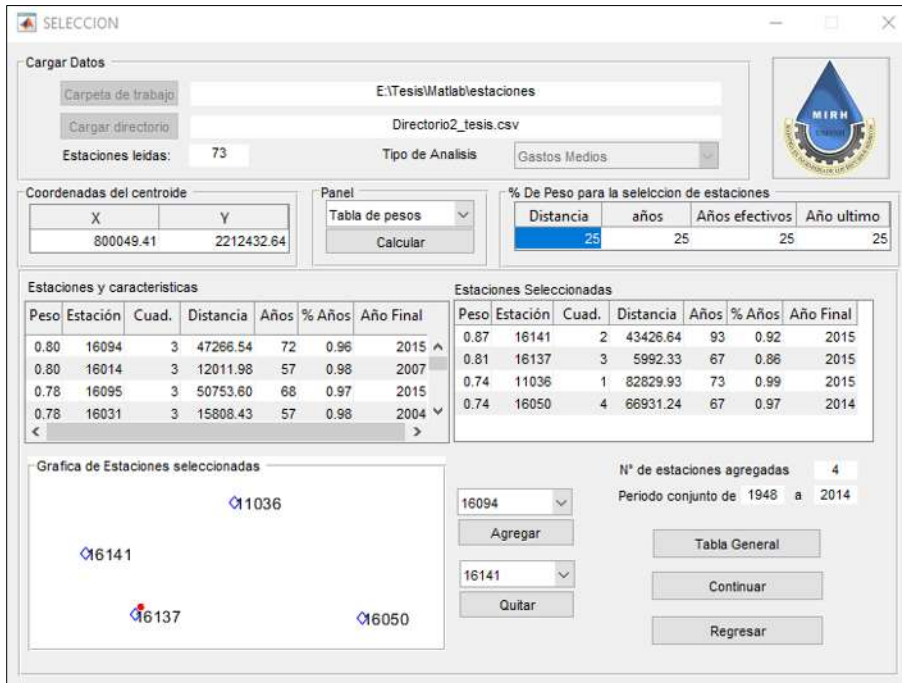


Figura 23. Ventana de selección de estaciones principales en GESTAD

Para el llenado de datos solo tendremos la ayuda del programa para saber que correlación tiene entre si las estaciones, también el número de vacíos que tiene la estación como se muestra en la Figura 24, a partir de eso el llenado es manual.

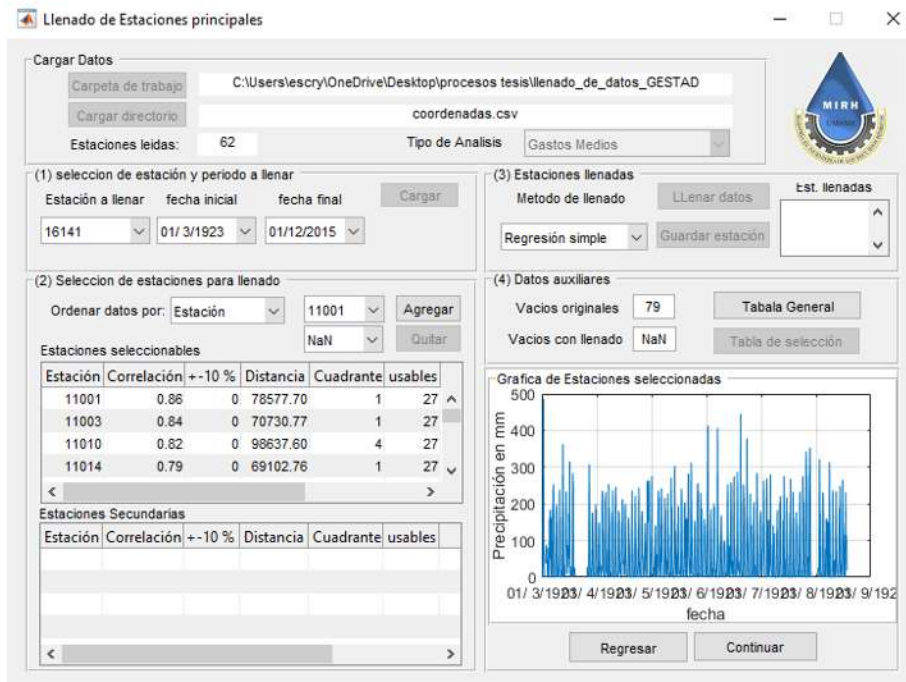


Figura 24. Muestra de correlación entre estaciones y numero de vacíos

LLENADO DE ESTACIONES

PRECIPTACIONES

En la modelación superficial de una cuenca se requiere contar con series de precipitación a lo largo de los años de forma completa, por lo que, con las estaciones existentes en México surge una problemática, ya que no cuentan con series completas de días, meses o hasta años.

Sabiendo que son de gran importancia las series de precipitaciones para su análisis, se requiere establecer relaciones entre los valores registrados en estaciones cercanas, así como la interacción con la cuenca en estudio, esto se consigue a través de métodos de distribución espacial que nos permiten extrapolar la información puntual de una estación a otra en un espacio más extenso con el fin de obtener las series completas para la superficie en estudio.

Algunos de los métodos para estimar las precipitaciones medias anuales utilizados son:

- **Media Aritmética (MA):** Consiste en calcular el promedio de los datos pluviométricos puntuales de estaciones ubicadas en un área geográfica determinada. La principal carencia del método es no considerar características anexas que pueden influir en las precipitaciones, como podría ser la presencia de cordones montañosos, cercanía con océanos, condiciones atmosféricas predominantes u otras (Pizarro, et. al., 2003).
- **Polígonos de Thiessen (Th):** no presentan mayores complicaciones en su aplicación. Además de la información pluviométrica, requiere para su ejecución sólo la ubicación espacial de las estaciones no requiere de una inversión excesiva de tiempo, ni de materiales. A cada estación se le asigna una superficie, la cual es obtenida representando estaciones en un plano y uniéndolas a través de rectas. A estas rectas posteriormente se les trazan sus bisectrices hasta que se intersectan entre sí. Con los límites del área en estudio y los que definen las bisectrices se obtiene la superficie de influencia para cada estación. El error que presenta el método radica en que sólo considera el posicionamiento de las estaciones en una superficie plana de influencia para cada una, sin considerar las diferencias topográficas que se pueden presentar, además de asumir que la precipitación de la estación es la misma de la zona que representa geométricamente, lo cual no siempre es cierto; sin embargo, al ponderar cada estación por diferentes superficies, hipotéticamente sus resultados deberían ser más precisos que el método **MA** (Pizarro, et. al., 2003).
- **Método de Thiessen Modificado (ThM):** es una mezcla de los polígonos de Thiessen y las Isoyetas, y debería presentar resultados bastante buenos. Entre la información que requiere para su puesta en práctica, además de la de Th, está la existencia previa de isoyetas. Este requisito condiciona bastante la ThM, debido a que su exactitud dependerá fuerte, ente de la calidad de esta información pluvial. Este método se basa en los dos últimos ya descritos. Un inconveniente de ThM, al igual que Th, es que existe una variación en la cantidad o ubicación de las estaciones que conlleva la realización de una nueva representación gráfica, y, por ende, a actualizar las mediciones de los polígonos, con los inconvenientes y nuevos cálculos asociados que ello demanda (Pizarro, et. al., 2003).
- **Inverso de la Distancia al cuadrado (IDC)**

INVERSO DE LA DISTANCIA AL CUADRADO

Este método es el más reciente entre los que se han analizado, y su importancia radica en la fácil aplicación en un S.I.G., sería similar a la MA pero con el agregado de una ponderación por distancia, dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones. El método divide la cuenca o área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de una celda sin medida es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa, elevada al cuadrado (Pizarro, et. al., 2003).

El método de IDW o IDC, presupone que la variable que se presenta cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra, por lo que, la distancia ponderada considera la diferencia entre una estación y la demás de longitud, latitud y elevación.

De acuerdo con este método, se encontró que el llenado depende de la correlación que se presente entre las estaciones en estudio, por lo tanto, el número de estaciones utilizadas varía de acuerdo con la correlación que exista y los datos faltantes de la estación.

Las fórmulas empleadas son:

$$do_i = \sqrt{(x_0 + x_1)^2 + (y_0 + y_1)^2 + (z_0 + z_1)^2}$$
$$P_1 = \frac{EP2 \frac{1}{dP_2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \frac{EP3 \frac{1}{dP_3}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \frac{ES1 \frac{1}{dS_1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}} + \dots + \frac{ESi \frac{1}{dS_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2}}$$

Donde:

do = Distancia euclidiana (m)

EP = Valor de la precipitación en la estación principal (mm)

ES = Valor de la precipitación en la estación secundaria (mm)

MATRIZ DE CORRELACIÓN

Se sabe que, por datos faltantes en México, de acuerdo con lo ya mencionado, es importante la utilización de varias estaciones que nos permita llenar datos vacíos con otras estaciones que si contengan el periodo de datos y no sólo llenar en base a una sola estación.

La matriz de correlación sirve para poder conocer las estaciones que podrán ser de apoyo para realizar el llenado de dichos vacíos en las estaciones principales; para ello se requiere que no exista una alta variación entre los valores de precipitación media anual de una estación con otra, por lo que se propone que el coeficiente de correlación debe ser no menor al 25 %. Dicha similitud es de gran importancia, puesto que, de acuerdo con este resultado serán seleccionadas las estaciones secundarias evitando discrepancia de datos (Navarro, 2017).

De acuerdo con lo anterior nos da la posibilidad de realizar una traslación espacial de datos de unas estaciones con otras, sin tomar en cuenta estaciones más lejanas, como es el caso del uso de IDW o IDC, obteniendo así, resultados más precisos.

TEMPERATURA

Las series de temperatura son gestionadas por su relación con la evapotranspiración, además de ser introducidas en el programa EvalHid para obtener el escurrimiento superficial en la cuenca, así como otros parámetros como propiedades del suelo.

El método empleado para hacer el llenado de las series de temperatura es tomando promedios de años, o sea, tomando la **MA** (media aritmética), suponiendo que no cambian las condiciones climatológicas en el tiempo.

EVAPOTRANSPIRACION

La evapotranspiración o uso consuntivo es la combinación de dos procesos diferentes: la transpiración de la vegetación y la evaporación desde la superficie del suelo; ambas ocurren simultáneamente y determinar cada proceso por separado no es un proceso sencillo, por lo que, se toma el cálculo como uno solo.

Estos datos son un factor determinante en estudios previos para el diseño y construcción de obras, especialmente para el volumen de una presa para una zona de riego que depende en gran medida de ello.

La estimación precisa de la evapotranspiración no es una tarea simple. Los procedimientos requieren el control continuo de un gran número de parámetros físicos, meteorológicos y de la cubierta vegetal (Aparicio, 1992).

En México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo:

- Thorntwaite
- Blaney – Criddle

Donde el primero toma sólo en cuenta la temperatura media mensual y arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente para estudios preliminares o de gran visión, mientras que el segundo es aplicable a casos más específicos (Aparicio, 1992).

MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE

El método toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona (Aparicio, 1992).

El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha, y por supuesto, varía de cultivo a cultivo, y, el coeficiente global de desarrollo K_g varía entre 0.5 y 1.2 (Aparicio, 1992).

Para la determinación de la evapotranspiración mediante este método es necesario calcular también el factor de temperatura y la luminosidad; se calcula mediante las siguientes formulas:

$$f_i = P_i \left(\frac{T_j + 17.8}{21.8} \right) \quad ; \quad F = \sum_{i=1}^n f_i \quad ; \quad E_t = K_g \cdot F$$

Donde:

f_i = factor de temperatura

F = factor de temperatura y Luminosidad

P_i = % de horas sol del mes i con respecto al año

T_j = temperatura media del mes i en °C

K_g = coeficiente global de desarrollo

E_t = evapotranspiración durante el ciclo vegetativo (cm)

METODO DE THORNTWAITE

Al igual que el método de Blaney – Criddle, calcula el uso consuntivo mensual como y una función de las temperaturas medias anuales, el método fue desarrollado en 1944, desarrollando el cálculo mediante las siguientes formulas:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

Donde:

U_j = uso consuntivo en el mes j (cm)

T_j = temperatura media en el mes j (°C)

a, I = constantes

K_a = constante que depende de la latitud y el mes de año

j = número de mes

MANEJO DE INFORMACION EN ARCGIS

La modelación de la cuenca se llevó a cabo en el software ArcGIS, de donde se obtuvo una superficie de 2,603 km², como se muestra en la **Figura 4**, además de su orden de corrientes dentro de la cuenca.

De acuerdo con el número de estaciones de la cuenca se dividió en microcuencas para resultados más certeros y la comparación de estos, obteniendo 25 microcuencas dentro de la cuenca, para la realización del balance hídrico.

Se obtuvieron también características de la cuenca en estudio como se muestra en la **Tabla 8**, teniendo en cuenta que se maneja el programa en coordenadas UTM, hemisferio norte zona 13.

Los sistemas de coordenadas cartesianas en 2D y 3D brindan el mecanismo para describir la ubicación y la forma geográfica de las entidades utilizando los valores x, y, z, debido a que la Tierra es esférica, uno de los desafíos que se deben afrontar es representar al mundo real por medio de un sistema de coordenadas llanas o planas.

Área (km²)	2603.79
Perímetro (km)	281.39
Centroide	x
(m)	y
	789276.06
	2208920.14

Tabla 8. características de la cuenca

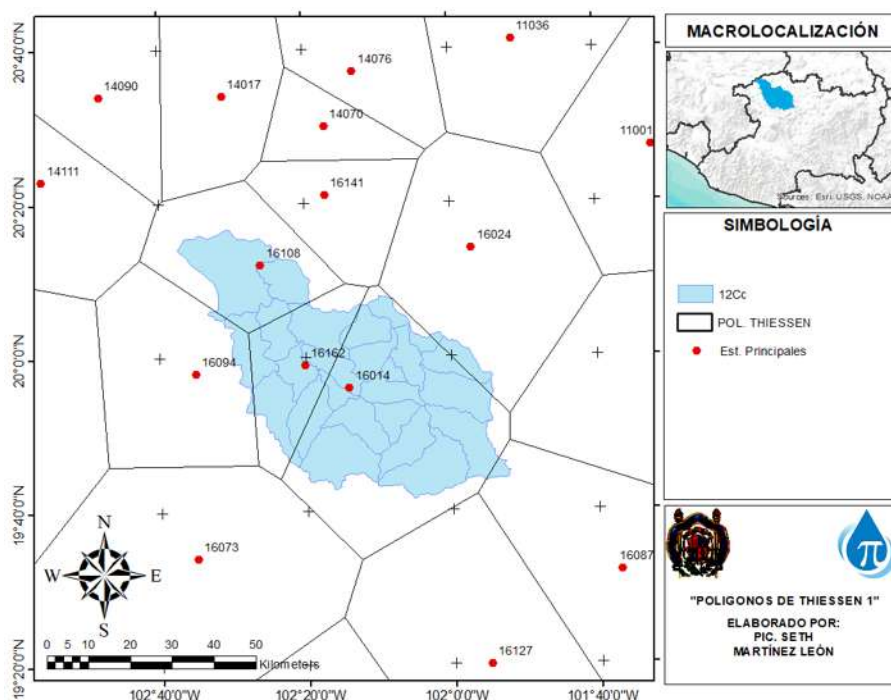


Figura 25. Microcuencas y polígonos de Thiessen 1

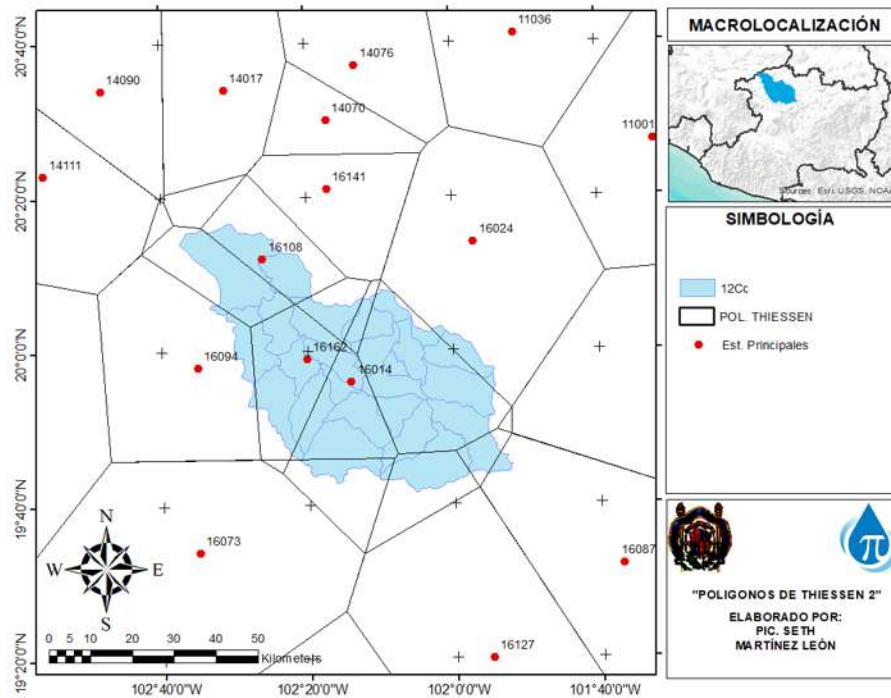


Figura 26. Microcuencas y polígonos de Thiessen 2

ESTACIONES FICTICIAS

Las estaciones ficticias fueron seleccionadas de acuerdo con el centroide de cada microcuenca, esto quiere decir que, tenemos 25 estaciones ficticias asignadas.

Al igual que como se llenaron las precipitaciones, se llenan las estaciones ficticias de acuerdo con los polígonos de Thiessen que tienen influencia en cada microcuenca como se muestra en las **Figura 25** **Figura 26**.

MODELACION HIDROLOGIA

La modelación hidrológica se llevó a cabo en un solo medio (software) con el fin de ver los resultados que este arroja y el uso de un algoritmo de soporte a la decisión, el cual es el siguiente:

- Modelación con el software EvalHid, mediante el método de Témez.
- Algorithm Shuffled Complex Evolution (SCE UA)

TÉMEZ EN EVALHID

Para la modelación en EvalHid es necesario generar archivos de entrada, ya mencionado en el capítulo 4.1.1, siendo los datos de las estaciones ficticias:

- Apo_Precip.int
- Apo_Etp.int
- Apo_Temp.int

Una vez generados los datos de entrada, se abre el software, que abrirá la ventana principal como se muestra en las siguientes figuras:

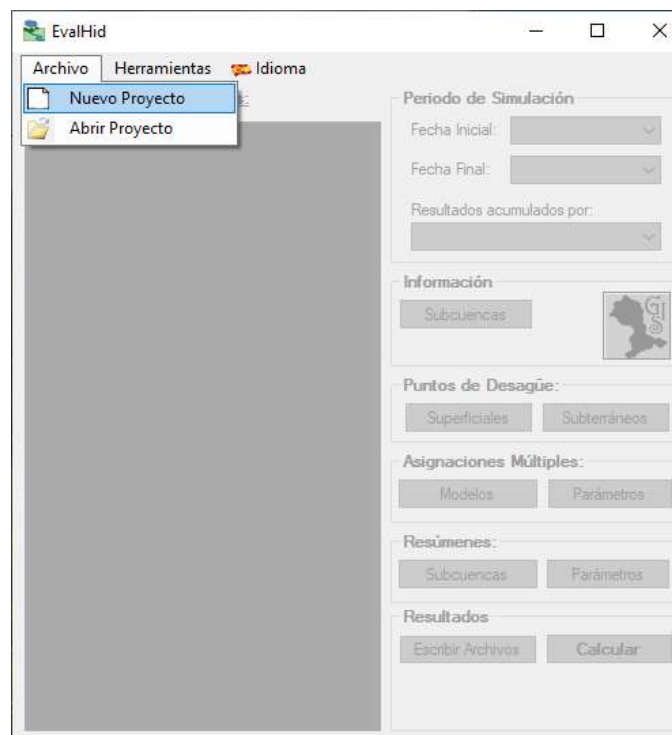
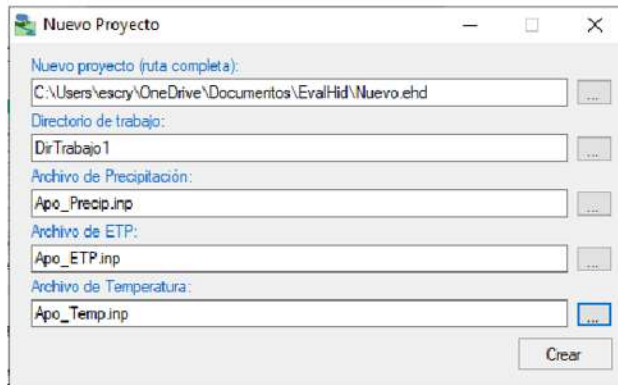


Figura 27. Ventana principal de EvalHid para generar un nuevo archivo



Dentro de esta ventana se ingresa la ruta donde se guarda el proyecto, así como el directorio que es donde se encuentran las series de precipitación, evapotranspiración y temperatura.

Para crear el archivo se prosigue a dar clic en el botón crear.

Figura 28. Introducción a datos de entrada



Ya en el directorio, se procede a seleccionar el botón de GIS para ingresar las microcuencas y el punto de salida de la cuenca.



Y dentro del interfaz de EvalHid es necesario ingresar las microcuencas y el punto de salida ya generados en ArcGIS en archivo shape y georreferenciado a coordenadas UTM. Esto se hace mediante el ícono de "+", desplegando la ventana donde se encuentran los archivos.



Posteriormente, ya agregados los archivos se seleccionan los archivos dentro de EvalHid con el ícono mostrado para posteriormente la selección de información.



Para poder asignar los parámetros a la cuenca y el punto de salida se seleccionan estos iconos y se despliega lo mostrado en la **Figuras28**.

Figura 29. Selección de datos en EvalHid

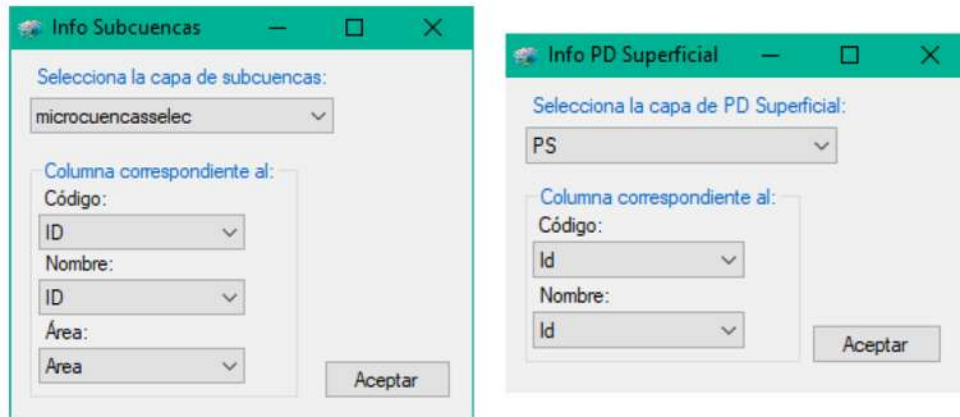


Figura 30. Ventanas de asignación de la información de las microcuencas y el punto de salida

Una vez asignada la información la ventana de GIS se mostrará en la **Figura 31**.

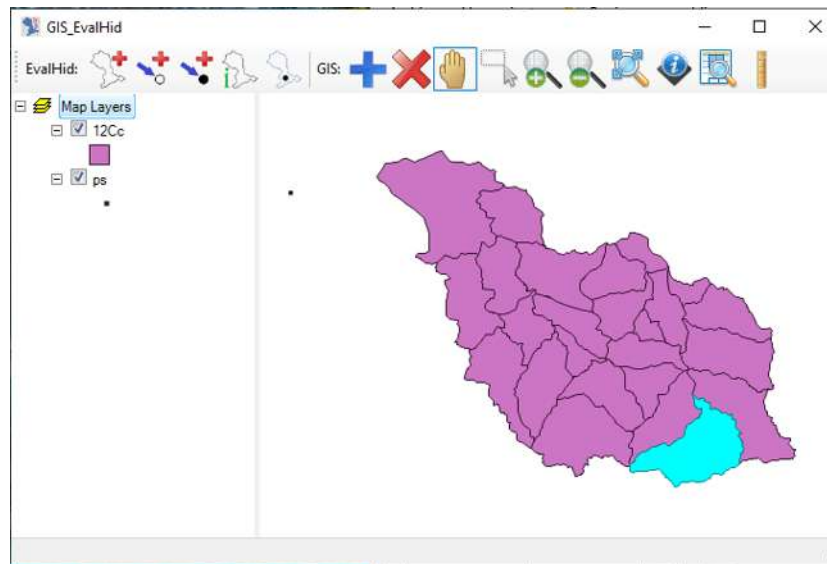


Figura 31. Ventana de GIS con microcuencas y punto de salida

A ingresados los shapes, en la ventana principal del programa, se selecciona el botón de “Subcuencas” del apartado “resúmenes” para asignar información del punto de salida, precipitaciones, temperaturas y evapotranspiración a cada microcuena, como se muestra en la **Figura 32**.

Nombre de la Subcuenca	Descripción	Columna de Precipitación	Columna de ETP	Columna de Temperatura	Superficie	Parciales	Ajuste Precipitación	Ajuste ETP	Modelo Escorrentía	Modelo Nieve	PD Superficial	PD Subterráneo	Ajuste Temperatura
12Cc20	60	60	60	60	135.96675...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc5	61	61	61	61	22.160204...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc2	62	62	62	62	95.416780...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc22	63	63	63	63	130.67293...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc4	64	64	64	64	70.541828...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc3	65	65	65	65	141.66132...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc10	66	66	66	66	65.008127...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc14	67	67	67	67	122.10936...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc21	68	68	68	68	130.37526...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc7	69	69	69	69	159.32485...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc9	70	70	70	70	106.06800...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc12	71	71	71	71	104.60216...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc11	72	72	72	72	184.10977...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc16	73	73	73	73	37.597854...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc19	90	90	90	90	77.706902...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc13	92	92	92	92	35.578129...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc15	93	93	93	93	68.850063...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc23	94	94	94	94	96.358812...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc6	95	95	95	95	71.890054...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc18	96	96	96	96	74.051884...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc8	55	55	55	55	181.65712...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc24	56	56	56	56	97.017668...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc25	57	57	57	57	288.71222...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc17	58	58	58	58	79.615867...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1
12Cc1	59	59	59	59	26.644948...	No	1	1	Témez	Ninguno	ps	Ninguno	1

Figura 32. Ventana de asignación múltiple a cada microcuenca

Dentro de la misma ventana mostrada en la **Figura 32** se puede verificar también las áreas del modelo.

Así mismo, se asigna el modelo con el que se desea calibrar, tomando en consideración que los parámetros la están establecidos por el programa, en “Asignaciones Múltiples” – “Modelos”, como se muestra en la **Figura 33** **Figura 34**, dando clic en el botón seleccionado.

Parámetros:

Nombre	Valor	Unidades
Hmax	150	mm
C	0.3	adim
lmax	230	mm
Alfa	0.23	1/tiempo

Variables de Estado:

Nombre	Valor	Unidades
H	20	mm
Vi	35	mm

Figura 33. parámetros del modelo

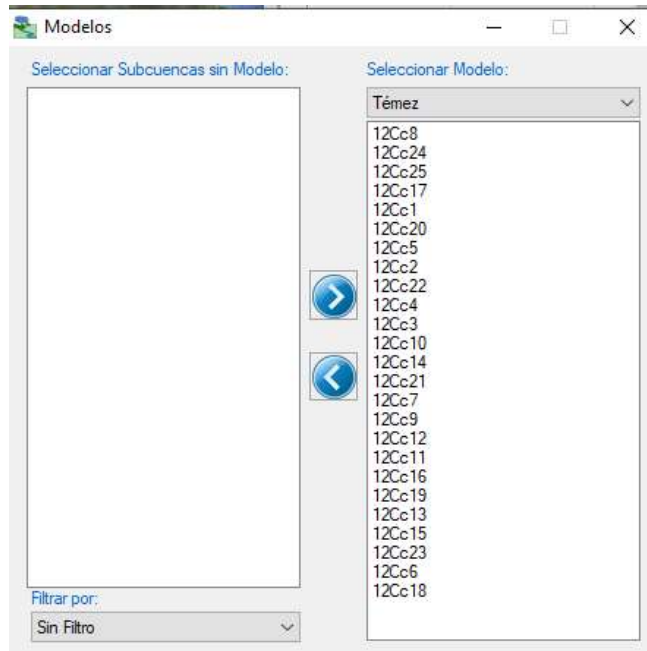


Figura 34. Ventana de asignación múltiple

Para saber que los resultados fueron asignados de una manera correcta se hace clic en el apartado de “Resúmenes” en “Parámetros”.

Nombre de la Subsecuencia	Hmax	C	lmax	A/a	H	V
12Cc8	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc24	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc25	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc17	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc1	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc20	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc5	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc2	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc22	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc4	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc3	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc10	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc14	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc21	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc7	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc9	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc12	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc11	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc16	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc19	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc13	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc15	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc23	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc6	150	0.3	230	0.23	20	35
12Cc18	150	0.3	230	0.23	20	35

Ya asignados y verificados los parámetros, se prosigue a especificar el periodo de la modelación y la escala por mes de los resultados acumulados; de estos datos depende directamente la calibración del modelo.

Después de los datos ya asignados de manera adecuada, se prosigue a correr el software, siguiendo los pasos que se muestran en la **Figura 35**.

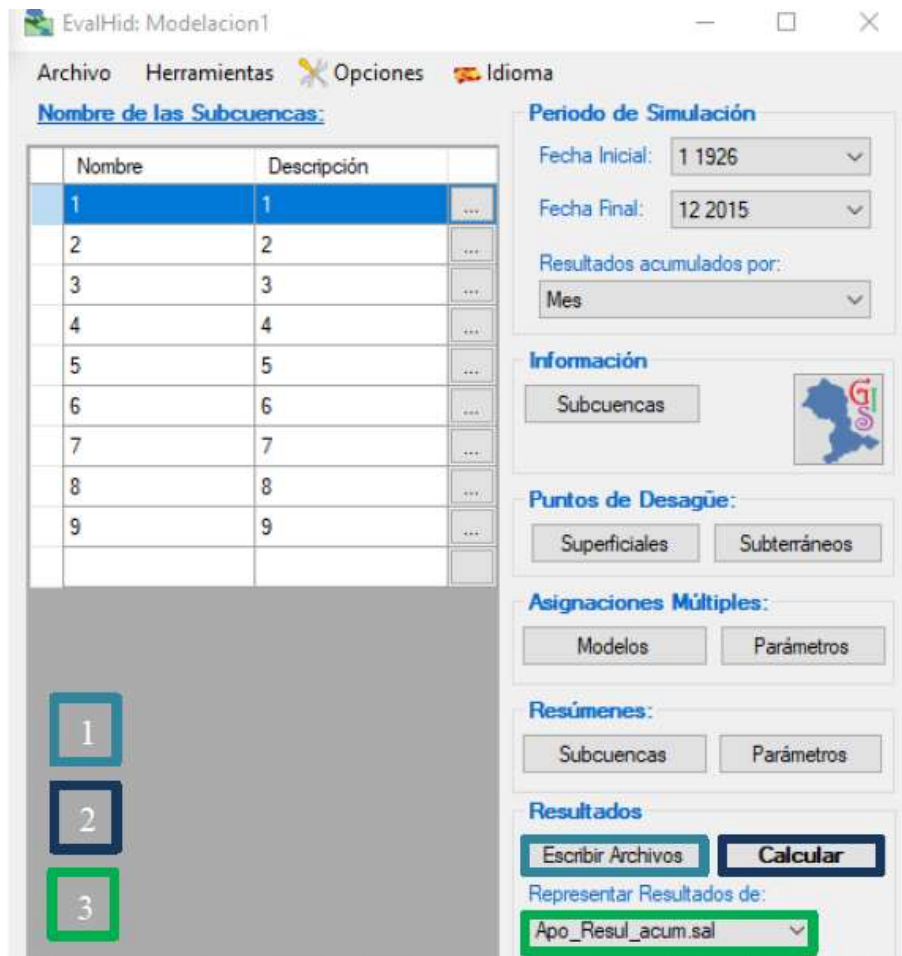
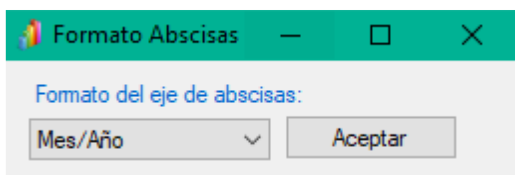


Figura 35. Pasos para la modelación



Ya calculado y seleccionado la representación de resultados en “Apo_Resul_acum.sal” se despliega la ventana para definir el formato de los ejes en Mes/Año y se acepta.

Una vez aceptando se abre la ventana de gráficos, donde se muestran los resultados de las series ya ingresadas, dentro de esta ventana se pueden observar los resultados de:

- Precipitación líquida
- Aportación
- Escorrentía superficial
- Escorrentía subterránea

- Evapotranspiración
- Infiltración

Para el estudio presente, el resultado de interés es el de Escorrentía superficial, el cual se selecciona en “Variable” y posteriormente se da clic en “+” para la obtención de la gráfica mostrada en la **Figura 36**.

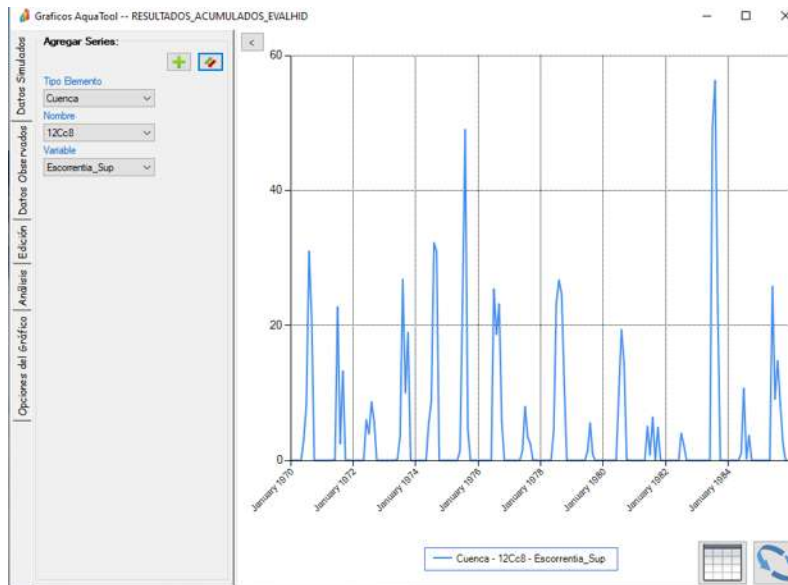


Figura 36. Ventana de Grafico de resultados

Llevar a cabo la simulación en EvalHid no tiene complejidad, esta radica en la posterior traslación a la herramienta de calibración para encontrar los parámetros que se adecuen al comportamiento real de la cuenca en el mismo periodo.

CALIBRADOR SCE-UA

El calibrador SCE – UA, requiere encontrarse en la misma carpeta donde se escriben los archivos, incluyendo la aplicación APO_Aqt, que se descarga del sitio oficial de AQUATOOL de la UPV. (UPV, 2018). Este funciona como un archivo de extensión XLS, por lo que ya realizada la ejecución el EvalHid, los datos se ingresan al calibrador donde se genera un nuevo modelo como se indica en la **Figura 37**.

En la pestaña de control, también se vinculan (concatenar) los valores óptimos que arroja el programa cuando el calibrador comienza a trabajar; éste recalcula los valores propuestos en la hoja “sceua”, la cual con cada valor propuesto va sensibilizando el modelo.

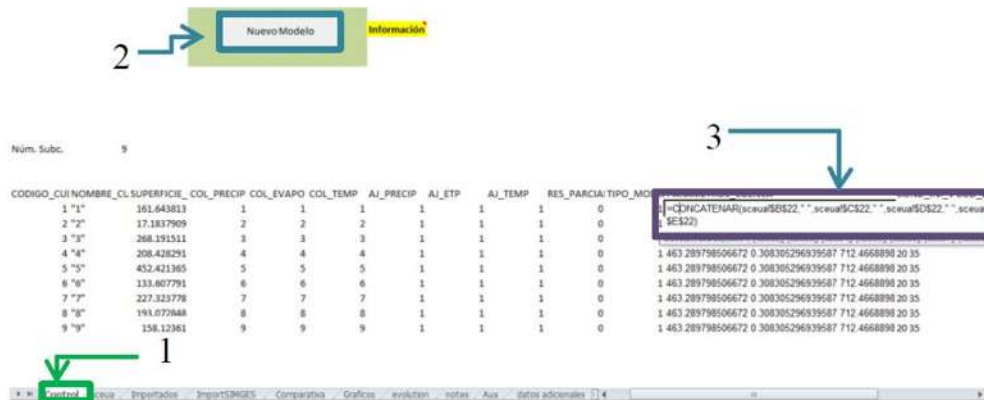


Figura 37. Pestaña de control en el calibrador

Para establecer la comparación de la simulación y los datos reales (Estación hidrométrica 12396), se verifica que los valores en la hoja “importados”, sean del mismo periodo que los de la estación 12396, que se importan a la hoja de “datos adicionales”, como se muestra en la Figura 38.

<CONTENIDO>				fecha	mes	año	Hm3
RESULTADOS APORTACIONES EVALHID				01/01/1943	1	1943	
</CONTENIDO>				01/02/1943	2	1943	9.774
<NUMEROSERIES>				01/03/1943	3	1943	9.8
1				01/04/1943	4	1943	9.706
</NUMEROSERIES>				01/05/1943	5	1943	12.843
<CONFIGTABLA>				01/06/1943	6	1943	16.941
3				01/07/1943	7	1943	24.846
</CONFIGTABLA>				01/08/1943	8	1943	30.053
<TITULOS>				01/09/1943	9	1943	43.639
Mes	Año	0		01/10/1943	10	1943	27.158
</TITULOS>				01/11/1943	11	1943	16.708
<SERIES>				01/12/1943	12	1943	13.366
1	1926	0.138		01/01/1944	1	1944	11.696
2	1926	0.1377		01/02/1944	2	1944	10.784
3	1926	0.1374		01/03/1944	3	1944	11.409
4	1926	0.13711		01/04/1944	4	1944	9.859
5	1926	0.13681		01/05/1944	5	1944	12.547
6	1926	0.15664		01/06/1944	6	1944	15.667
7	1926	2.58638		01/07/1944	7	1944	21.628
8	1926	11.39911		01/08/1944	8	1944	31.018
9	1926	7.68623		01/09/1944	9	1944	26.825
10	1926	1.3332		01/10/1944	10	1944	24.042
11	1926	0.72063		01/11/1944	11	1944	13.005
12	1926	0.7191		01/12/1944	12	1944	11.367
1	1927	0		01/01/1945	1	1945	16.688

Control sceua Importados ImportSIMGES Comparativa evolucion notes Aux datos adicionales

Figura 38. Serie de resultados EvalHid y serie de datos estaciones

Ya verificados los datos de EvalHid y los datos de la estación hidrométrica en Hm3, se trasladan a la hoja “comparativa”, que es donde se pondrá el periodo de años a calibrar, siendo los datos “simulados” los importados de EvalHid y los “observados” los de la estación. Así mismo, se

encuentran en la misma hoja los indicadores de ajuste como se muestra en la Figura 39, dentro de esta hoja es necesario verificar y modificar los rangos que se utilizarán, tanto de periodo de tiempo como de los datos a utilizar, así, como los rangos en los indicadores de ajuste para una correcta calibración.

Los indicadores de ajuste nos indicaran la calibración óptima, presentándose como:

- F1: Nash – Sutcliffe.
- F2: Nash – Sutcliffe Modificado.
- F3: Correlación de Pearson.
- F4: Simetría de ajuste
- Fmed: promedio de los anteriores

MENSUALES			B		A							
Fecha	Año	Cuenta	Observado	Simulado	Diferencia (E-D)	Qobs_m	Qsim_m	B ²	A ²	A/B	(LN(sim)-LN(obs))	(LN(sim)-LN(obs))
oct-43	1	1	27.76	11.1311	256.8615	6.83424	-9.37823	46.70526	39.56505	-68.1525	0.735527	0.084026389
nov-43	1	1	16.71	0.26547	41.50619	-3.51588	-10.8439	13.07456	117.5833	39.21004	0.237265	0.038373736
dic-43	1	1	13.37	0.24324	3.7563	-6.35786	-10.8661	46.41203	116.0719	75.60469	0.070806	0.17562773
ene-44	1	1	11.70	0.22106	2.175440	-0.62700	-10.0603	74.44224	110.5544	33.34263	0.01017	0.305300061
feb-44	1	1	10.78	0.19893	0.342307	-9.53988	-10.9704	31.00523	119.0368	104.0638	0.003111	0.40161177
mar-44	1	1	11.41	0.17683	1.518243	-8.31488	-10.9325	79.47501	116.5795	97.46186	0.010662	0.333379178
abr-44	1	1	9.36	0.15478	0.087486	-10.4649	-10.9545	109.5736	120.0021	111.638	0.000874	0.523316771
may-44	1	1	12.55	0.13278	5.828458	-7.77888	-10.9765	60.47979	120.4846	85.36325	0.045669	0.232824566
jun-44	1	1	15.67	0.11993	29.89574	-4.65888	-10.91	21.68649	119.0287	50.80665	0.184742	0.067723963
jul-44	1	1	21.63	0.102244	64.08899	1.30424	-7.48689	1.70074	56.0535	-9.76383	0.213691	0.003867863
ago-44	1	1	31.02	0.070777	54.93535	10.93412	-2.53655	114.3643	6.44428	-27.14777	0.253145	0.176734179
sep-44	1	1	26.83	0.034477	67.09478	6.90124	-2.47486	42.26462	6.124325	-16.0694	0.122729	0.077026655
oct-44	2	1	24.04	0.16556	165.8001	3.78124	-9.34367	13.82445	98.87655	-36.9718	0.596219	0.02822575
nov-44	2	1	13.01	0.58688	6.847304	-7.31888	-10.5224	63.56594	110.7219	77.01249	0.042319	0.39326232
dic-44	2	1	11.37	0.51503	0.725853	-8.35688	-10.5943	60.22562	112.2392	94.89181	0.00607	0.337651682
ene-45	2	1	10.62	0.49239	0.016799	-9.70188	-10.6769	94.12639	112.7394	103.0042	0.000151	0.42102516
feb-45	2	1	8.57	0.46969	3.612622	-11.7549	-10.6396	138.1171	113.2019	125.0676	0.040133	0.745871533
mar-45	2	1	9.32	0.44701	1.27052	-11.0039	-10.6623	121.0853	113.685	117.3268	0.013031	0.607819654
abr-45	2	1	8.88	0.42437	2.39126	-11.4459	-10.685	131.0081	114.1683	122.2387	0.025782	0.685331904
may-45	2	1	12.11	0.40173	2.321399	-8.21288	-10.7075	67.45133	114.6514	67.33968	0.023145	0.267939407
jun-45	2	1	13.57	0.40006	2.562443	-0.75000	-10.6206	45.57432	112.9602	71.75260	0.006646	0.02302062
jul-45	2	1	23.03	0.40010	75.63400	3.50124	-6.1215	11.20716	37.40646	-20.5730	0.209377	0.023422743
ago-45	2	1	35.00	0.47305	272.3014	14.87212	-2.63540	215.2712	6.945747	-36.6601	0.400161	0.293322000
sep-45	2	1	23.06	0.25353	57.00002	3.530124	-4.0550	12.51032	23.57670	-11.1604	0.147437	0.025757030
oct-45	3	1	24.08	0.50461	156.0747	3.75124	-9.60472	14.07093	92.25062	-36.0285	0.545266	0.02968062
nov-45	3	1	11.40	0.76294	3.25505	-5.31588	-10.3465	35.04493	107.0498	61.24999	0.084916	0.118534178
dic-45	3	1	11.96	0.73852	0.615413	-8.66488	-10.3699	75.08007	107.5329	69.8931	0.006718	0.308618341
ene-46	3	1	10.28	0.71836	0.182072	-10.0459	-10.3931	106.9396	106.059	104.4075	0.001144	0.464631824
feb-46	3	1	9.43	0.69306	1.585295	-10.9939	-10.4163	116.6785	106.4989	113.4736	0.01058	0.559862042
mar-46	3	1	10.89	0.66989	0.048704	-9.43788	-10.4394	89.0735	106.9819	98.52812	0.000402	0.389788603
abr-46	3	1	10.54	0.64677	0.0114	-9.78388	-10.4628	95.72422	108.4851	102.3644	0.000102	0.13142236
may-46	3	1	11.41	0.62371	0.618252	-8.31388	-10.4856	79.45718	109.9482	93.4675	0.005098	0.333277974
jun-46	3	1	17.13	0.76525	40.53551	-3.19188	-10.3441	10.88007	107	33.01701	0.215873	0.029188819
jul-46	3	1	27.09	0.83285	161.5733	6.770124	-6.72648	45.83458	45.24551	-45.5391	0.401634	0.082664725
ago-46	3	1	32.71	22.72044	99.7338	12.38312	16.1111	153.3418	2.59668	19.95059	0.132731	0.226377006
...
...

CALIBRACION

F1	0.475577
F2	0.600946
F3	0.747833
F4	0.398066
Fmed	0.705658
PBIAS	362.2758

1958-1953

VALIDACION

F1	0.719515
----	----------

Figura 39. Hojas de comparativa, indicando celdas importantes de verificar

Verificado lo anterior, se sitúa en la pestaña "SCE-UA", donde se establecen los límites de los parámetros Hmax, C, Imax y Alfa, así como el valor inicial para las iteraciones (Xo); una vez asignados se procede a correr en modelo haciendo clic en el botón SCE – UA, como se muestra en la **Figura 40**.

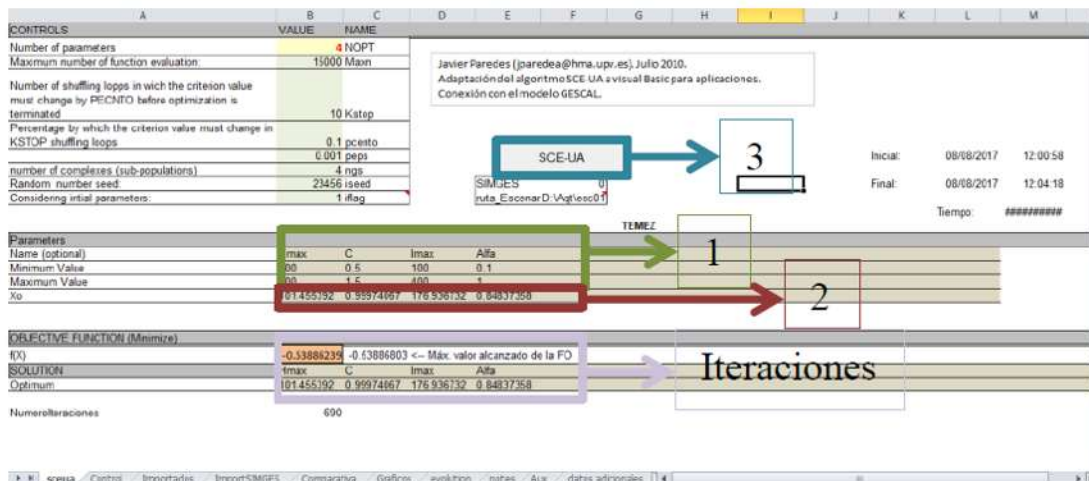


Figura 40. Hoja SCE-UA, ubicación de los parámetros y botón para la simulación

Ya que el calibrador haya terminado de calibrar, se verifican los valores óptimos que el calibrador sugiere, estos valores se pueden copiar como los valores iniciales (Xo) y la siguiente iteración tendrá que igualar la magnitud. Si los valores óptimos llegan al límite de Hmax e lmax, estas también se van modificando, observando y cuidando que estos valores sean lógicos.

Cuando la función objetivo cumple con un rango de aceptación según los indicadores de ajuste ya mencionados, es cuando la calibración se termina y los valores obtenidos son los resultados.

Para la calibración se llevó a cabo un periodo de 10 años hidrológicos, de enero de 1970 a diciembre de 1880, y la validación de 5 años, de enero de 1981 a diciembre de 1985.

ALGORITMO SOPORTE A LA DECISIÓN SCE-UA

Para el calibrado en el modelo se utilizó un algoritmo de soporte a la decisión el cual es el SCE-UA (Suffled Complex Evolution), que hace los procesos automatizados a través de algoritmos de optimización, este surge en los años 90 con la aparición de algoritmos como: el SCE-UA, que requiere herramientas computacionales para su funcionamiento, reduciendo el tiempo y permitiéndonos trabajar con modelos muy grandes y con un elevado número de parámetros. Esta apoyado en **índices de ajuste** (Duan et al., 1992), que son estadísticos para determinar la capacidad de reproducción del modelo estudiado los que usa este calibrador son:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
- Logaritmo de Nash-Sutcliffe (ln NSE)
- Coeficiente de correlación de Pearson (r)
- Coeficiente de simetría
- Sesgo porcentual (PBIAS)
- Desviación estándar de las observaciones (RSR)

Y Rangos de ajuste (Moriassi et al., 2007):

Calidad de ajuste	NSE ó E	PBIAS	RSR
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

Tabla 9. Tabla de rangos de nivel de rango para los índices de ajuste

Trabajando con la ecuación que será optimizada dadas ciertas restricciones y con variables que deben ser maximizadas o minimizadas mediante la utilización de técnicas lineales o no lineales como se muestra en la Figura 41.

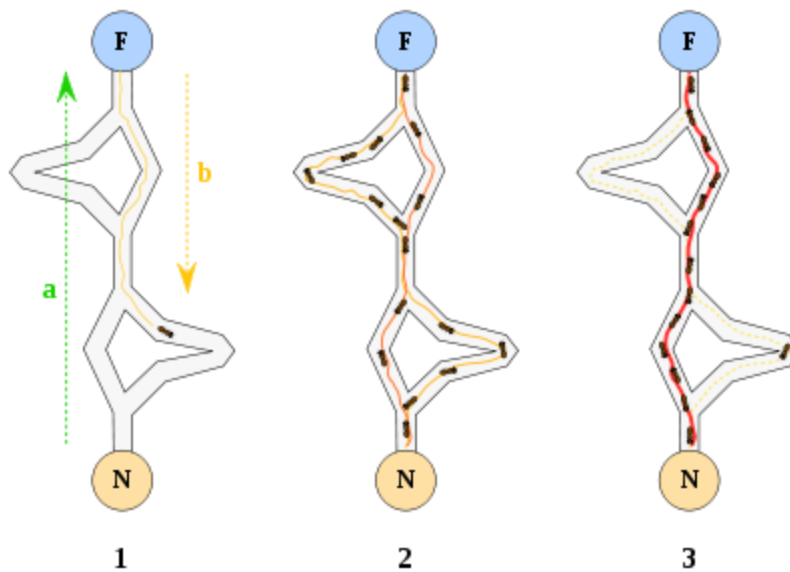


Figura 41. Interpretación de algoritmo en forma de colonias de hormigas

Entonces de una forma sencilla lo que hace es una vez ingresados los parámetros iniciales, y da resultados y ese sería el fin de una iteración, los guarda y los vuelve a correr en otra iteración, en la cual llega a los resultados más cercanos a la solución óptima y hasta que estos no cambien mucho por más iteraciones que haga, así el proceso termina una forma de verlo es como en la siguiente **Figura 42**.

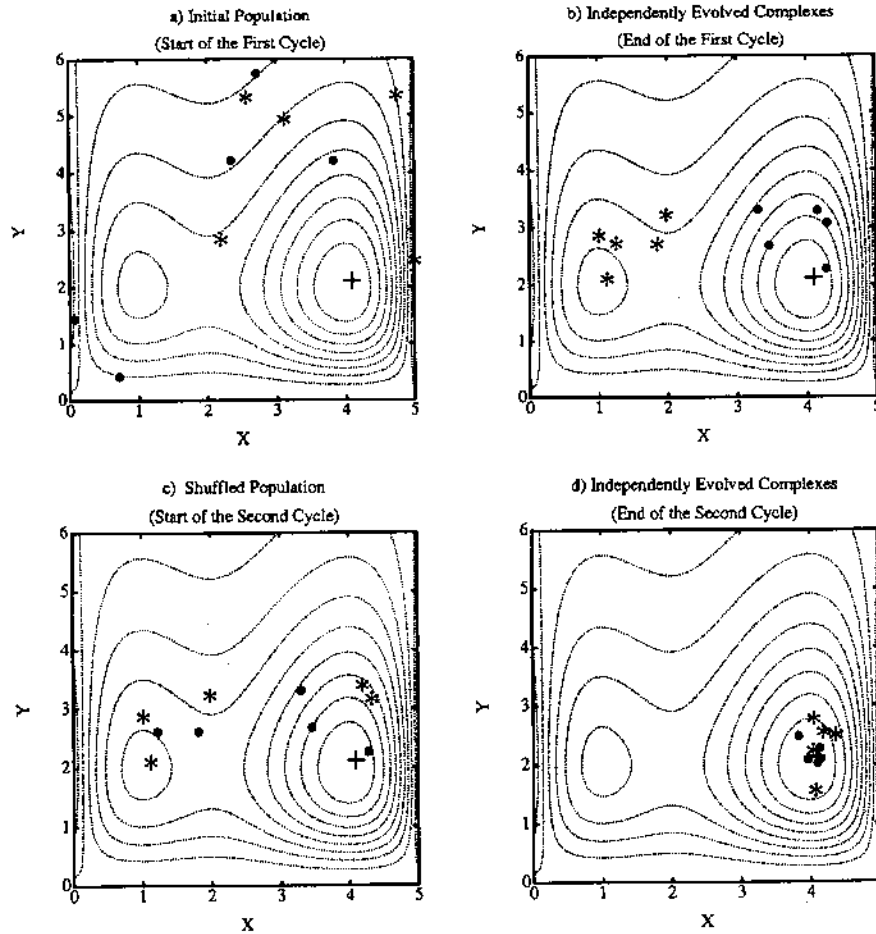


Figura 42. Shuffled Complex Evolution, Algoritmo evolutivo

También se necesitarán de archivos y parámetros sugeridos para poder correr el algoritmo y poder calibrar el modelo los cuales son los siguientes:

- Apo_aqt.exe
- Calibrador.exe
- Opciones.txt

Los dos primeros son ejecutables los cuales después de correr el software EvalHID y tengamos los primeros resultados ahora si podremos correr los siguientes archivos que se encontraran en la misma carpeta o directorio de trabajo de EvalHid, primero se modificaría el código del archivo de texto “Opciones.txt” como se muestra en la siguiente **Figura 44**, después y asegurándonos de haber ingresado todo correctamente podremos correr el ejecutable “Calibrador.exe”.

Después de abrir las opciones del calibrador podremos escoger entre lo siguiente:

CÓDIGO	NOMBRE	NÚMERO DE PARÁMETROS DEL ALGORITMO
1	SCE UA	6
2	HCL + ROSENBROCK	8

Tabla 10. selección del algoritmo y número de parámetros

ALGORITMO	CÓDIGO	ORDEN	PARÁMETROS	VALORES POR DEFECTO	UNIDADES	
SCE-UA	1	1º	MAXN	Número máximo de iteraciones	10 000	Adimensional
		2º	NGS	Número de grupos	3	Adimensional
		3º	KSTOP	Número de bucles de mezcla	10	Adimensional
		4º	PCENTO	Valor del criterio en los bucles de mezcla	0.1	Adimensional
		5º	PEPS	Valor de convergencia de parámetros	0.001	Adimensional
		6º	SEED	Valor de la semilla	Aleatorio	Adimensional
HCL + ROSENBROCK	2	1º	MAXN	Número máximo de iteraciones	2000	Adimensional
		2º	ALPHA	Coficiente de avance	3	Adimensional
		3º	BETA	Coficiente de retroceso	-0.5	Adimensional
		4º	RLAUNCHES	Lanzamientos del Algoritmo Rosenbrock	2	Adimensional
		5º	DIVHL	Divisiones del Hipercubo latino	50	Adimensional
		6º	STEPROS	Rango de subdivisión de parámetros	40	Adimensional
		7º	MERR	Valor de convergencia de parámetros	0.001	Adimensional
		8º	SEED	Valor de la semilla	Aleatorio	Adimensional

Tabla 11. Valores por defecto de los parámetros

CÓDIGO	NOMBRE	RANGOS DE LA FUNCIÓN	MEJOR VALOR DE AJUSTE
1	Nash	-1 a 1	1
2	Logaritmo de Nash	-1 a 1	1
3	Coficiente de Pearson	-1 a 1	1
4	Simetría de ajuste	-1 a 1	1
5	BIAS	0 a 1	0
6	RSR	0 a 1	0

Tabla 12. Indicadores para la función FO

TIPO DE MODELO	CÓDIGO ASOCIADO	NOMBRE
Modelos de Lluvia	1	Témez
	2	Sacramento
	3	HBV
	4	GR2M
	5	GR4J
	6	AWBM
Modelos de Nieve	1	Nieve 1
	2	Nieve 2

Tabla 13. Modelos hidrológicos disponibles

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación	Extensión	ID
..				
Carpeta de archivos		14/07/2020 09:...		
Apo_aqt.exe	445,952	17/01/2017 02:...	Aplicación	1B1484F3
Calibrador.exe	73,728	06/07/2017 09:...	Aplicación	7F27DC45
Opciones.txt	1,694	14/07/2020 09:...	Documento de tex...	4F1AC6EF
Visualizador de datos.xlsm	396,554	23/03/2018 12:...	Hoja de cálculo ha...	5B6ACD2B

Figura 43. Archivos necesarios para calibrar automáticamente


```

1 <OPCIONES_CALIBRADOR>
2 <ALGORITMO>2</ALGORITMO>
3 <PARAM_ALGORITMO>1000 3 -0.5 3 50 40 0.001 5</PARAM_ALGORITMO>
4 <NOM_FILE_MODELOS>"Apo Modelos.inp"</NOM_FILE_MODELOS>
5 <NOM_FILE_OBSERVADOS>"Obs.inp"</NOM_FILE_OBSERVADOS>
6 <NOM_FILE_SIMULADOS>"Apo Aportacion.sal"</NOM_FILE_SIMULADOS>
7 <FUNCIONES_OBJETIVO>1 2 3 4</FUNCIONES_OBJETIVO>
8 <PESO_FUNCION_OBJETIVO>1 1 1 1</PESO_FUNCION_OBJETIVO>
9 <CODCUENCAS>1 2 3 4 5</CODCUENCAS>
10 <CODMODELOSLLUV>1 1 1 1 1</CODMODELOSLLUV>
11 <CODMODELOSNIEV>0 0 0 0 0</CODMODELOSNIEV>
12 <CODZONAS>1 1 1 1 1</CODZONAS>
13
14 <INICIO_CALIBRACION>1</INICIO_CALIBRACION>
15 <FINAL_CALIBRACION>228</FINAL_CALIBRACION>
16 <FINAL_VALIDACION>228</FINAL_VALIDACION>
17
18 <MODELOSLLUV>
19 <MODELOLLUV>
20 <COD_MODELOLLUV>1</COD_MODELOLLUV>
21 <PARAMCALIBLLUV>1 2 3 4</PARAMCALIBLLUV>
22 <MINVALUESLLUV>0 0.1 5 0.001</MINVALUESLLUV>
23 <MAXVALUESLLUV>300 1 150 0.9</MAXVALUESLLUV>
24 </MODELOLLUV>

```

Figura 44. Código del archivo de "Opciones.txt"

RESULTADOS

GENERALES

La descripción de la zona de estudio se realiza mediante el uso de software de ArcGIS v.10.5, en la cual represento los resultados en forma de mapas y los cuales son:

- Ubicación..... . **Figura 3**
- Área de la cuenca de 2603.79 km²..... . **Figura 4**
- Municipios dentro de la cuenca..... . **Figura 5**
- Orografía e hidrografía..... . **Figura 6, Figura 8**
- Edafología y geología..... . **Figura 9, Figura 10**
- Uso de suelo..... . **Figura 11**

ESTACIONES METEOROLOGICAS

Dentro de los datos que tenemos de estaciones meteorológicas oficiales, no son muy confiables ya que estos presentan inconsistencias y vacíos, por lo que en todo trabajo que se realice se deben efectuar pruebas que nos validen si los datos son homogéneos e independientes.

También tuve presente que para descargar los datos de las estaciones que ya previamente seleccionamos de todas las posibles estas deberían de cumplir al menos un periodo de años mayor a 25 años y que podemos ver que existen muchas estaciones cerca de la cuenca lo cual puede ser bueno y malo, pero se da una vista general en la Figura 48.

En la **Figura 49, Tabla 14 y Tabla 15**, se muestra un resumen de las pruebas de las estaciones, así como las pruebas manuales para comprobar que lo que se muestra en el software de GESTAD es igual o parecido a lo que haríamos manualmente y se hizo con la estación 11001 como se muestran los resultados de las pruebas en las siguientes figuras y graficas:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	año	datos			mediana					
2	1949	607.97889	-		662		26			
3	1950	740.7	+	c		u° cambios	36	homogenea		
4	1951	582.4	-	c			41			
5	1952	810.3	+	c		n	68			
6	1953	622.7	-	c						
7	1954	546.5	-	s						
8	1955	687.1	+	c						
9	1956	565.9	-	c						
10	1957	384.27889	-	s						
11	1958	1193.9	+	c						
12	1959	855.2	+	s						
13	1960	444.7	-	c						
14	1961	630.6	-	s						
15	1962	677.5	+	c						
16	1963	705.3	+	s						
17	1964	700.9	+	s						
18	1965	1021.2	+	s						
19	1966	821.1	+	s						
20	1967	1181.1522	+	s						
21	1968	686.9	+	s						
22	1969	553.9	-	c						
23	1970	698.1	+	c						

N	U	N	U	N	U	N	U
12	5	8	22	9	14	32	13
14	5	10	24	9	16	34	14
16	6	11	26	10	17	36	15
18	7	12	28	11	18	38	15
20	8	13	30	12	19	40	16

Figura 45. Test de secuencias en la estación 11001

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	año	datos						
2	1949	607.978891	-		686.2763			
3	1950	740.7	+	c		n° cambios	36	
4	1951	582.4	-	c		n° Secuenci	31	
5	1952	810.3	+	c		s-c	-5	homogenea
6	1953	622.7	-	c		n	27	
7	1954	546.5	-	s		limite sup	5.09901951	
8	1955	687.1	+	c		limite inf	-5.0990195	
9	1956	565.9	-	c				
10	1957	384.278891	-	s				
11	1958	1193.9	+	c				
12	1959	855.2	+	s				
13	1960	444.7	-	c				
14	1961	630.6	-	s				
15	1962	677.5	-	s				

$$-\sqrt{n-1} \leq (s-c) \leq \sqrt{n-1}$$

Figura 46. Test de Helmert en la estación 11001

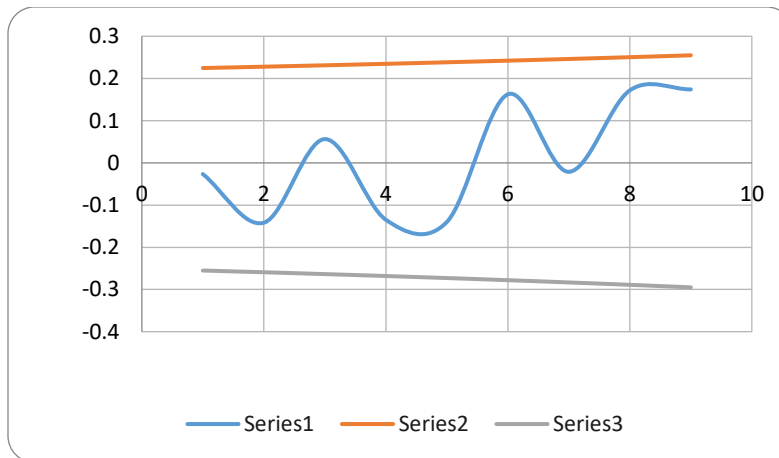
año	datos				y ajuste										
1949	607.97889	6130.4778	1122.25	1	674.7	sumax	134810								
1950	740.7	2961.9436	1056.25	2	675.0	sumay	46666.78561								
1951	582.4	10790.277	992.25	3	675.4	sumaxy	92509788.83								
1952	810.3	15381.888	930.25	4	675.7	sumax2	301049527.6								
1953	622.7	4041.9407	870.25	5	676.0	(y-my)2	1736198.549								
1954	546.5	19537.403	812.25	6	676.4	(x-mx)2	26197								
1955	687.1	0.6785492	756.25	7	676.7										
1956	565.9	14490.444	702.25	8	677.1	m=	0.346821926								
1957	384.27889	91202.41	650.25	9	677.4	my	686.276259								
1958	1193.9	257681.86	600.25	10	677.8	se2	26306.03863								
1959	855.2	28535.23	552.25	11	678.1	mx	1982.5								
1960	444.7	58359.089	506.25	12	678.5	SE2	1.004162256								
1961	630.6	3099.8458	462.25	13	678.8										
1962	677.5	77.022722	420.25	14	679.2	tr	0.345384348	no tiene tendencia							
1963	705.3	361.90272	380.25	15	679.5										
1964	700.9	213.8538	342.25	16	679.9	t student	0.618738098								
1965	1021.2	112173.91	306.25	17	680.2										
1966	821.1	18177.441	272.25	18	680.6										
1967	1181.1522	244902.21	240.25	19	680.9	y=mx+b	b=y-mx								
1968	686.9	0.3890528	210.25	20	681.2		-1.29820926								
1969	553.9	17523.474	182.25	21	681.6										
1970	698.1	139.80085	156.25	22	681.9										
1971	780	8784.1396	132.25	23	682.3										
1972	672.3	195.33582	110.25	24	682.6										
1973	907.5	48939.944	90.25	25	683.0										

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2}$$

$$tr = \frac{m}{SE^2}$$

$$SE^2 = \frac{Se^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad Se^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{N - 2}$$

Figura 47. Prueba de Regresión en la estación 11001



Gráfica 1. Independencia con límites de Anderson estación 11001

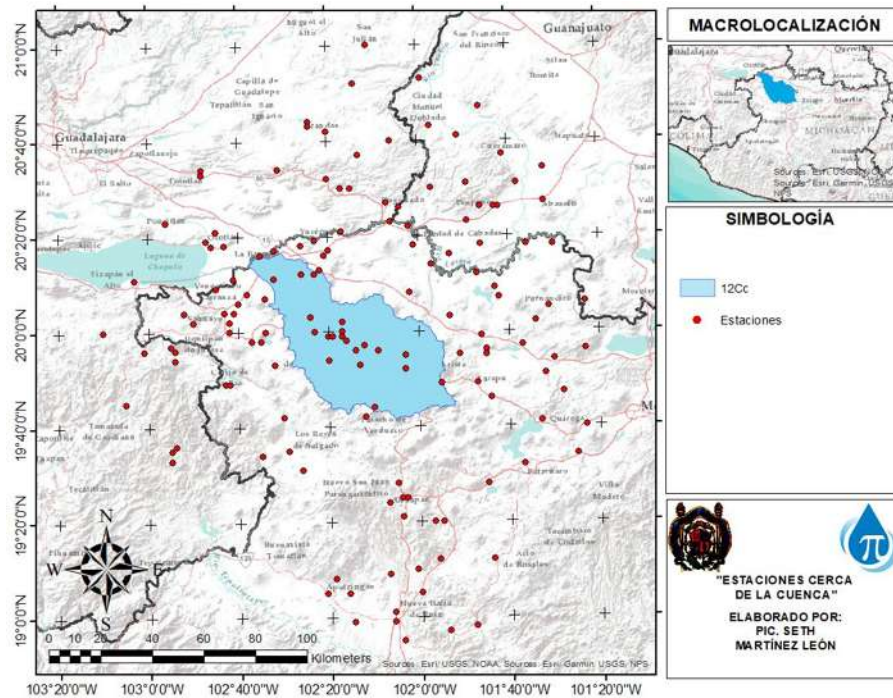


Figura 48. Estaciones cercanas a la cuenca

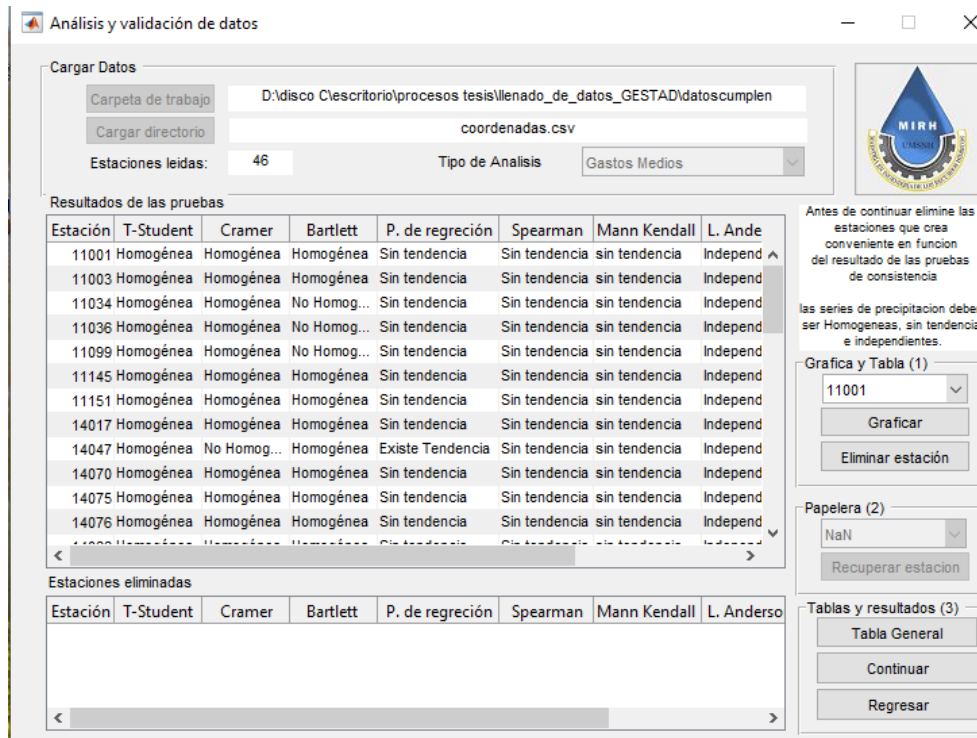


Figura 49. Resumen de estaciones en GESTAD

Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regreci	Spearman	Mann Kenda	L. Anderson	Wald-wolfowitz
11001	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
11036	Homogénea	Homogénea	No Homogér	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
14017	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
14070	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
14076	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
14090	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
14099	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Dep. a 1 año:	Independiente
14111	Homogénea	Homogénea	No Homogér	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Dep. a 1 año:	Independiente
16007	No Homogér	No Homogér	Homogénea	Existe Tende	Existe tende	Existe tende	Independier	Independiente
16014	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16024	No Homogér	No Homogér	Homogénea	Existe Tende	Existe tende	Existe tende	Independier	Independiente
16050	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16073	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16087	Homogénea	Homogénea	No Homogér	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16094	Homogénea	No Homogér	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16127	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente
16162	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendenci	Sin tendenci	sin tendenci	Independier	Independiente

Tabla 15. Resumen de estaciones que cumplen homogeneidad e independencia

De las cuales solo se escogieron 19 estaciones como principales para el llenado de las estaciones ficticias como se muestra en la siguiente

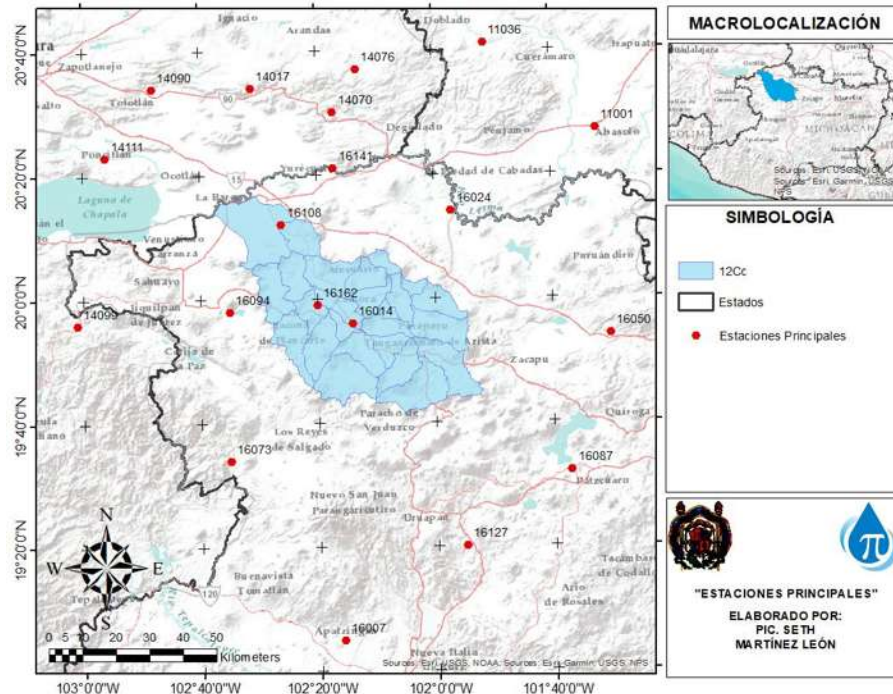


Figura 50. Estaciones principales de la cuenca

ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Para la comparación de la modelación es necesario tener datos reales, los cuales los obtuve de las estaciones hidrométricas. De acuerdo a la Figura 52 tenemos varias estaciones cercanas a una red de corriente, por lo que, se revisaron y ninguna de las estaciones más cercanas al punto de salida de la cuenca, no podemos usar los datos ya que como se muestra en la **Figura 52**, las estaciones 12011, 12379 y 12533 al estar después de la presa de Urepetiro los datos que tengan ya están alterados, y se busca que estén en régimen natural por eso opte por solo utilizar los datos de entrada de la estación 445URE, donde sus datos de entrada están en régimen natural y son los que usare para hacer el calibrado. **“POR LO QUE SE HARA EL TRANSLADO DE DATOS POR RELACION DE AREA ENTRE LA CUENCA DE LA PRESA DE UREPETIRO Y LA CUENCA DEL RIO DUERO”**

Tablas	
AD445URE	
FD445URE	
FH445URE	
FM445URE	
RD445URE	

FM445URE	
nentr_tot	
	36.304
	0
	20.603
	16.842
	102.357
	129.319

Figura 51. Datos de volumen de escurrimiento de la presa 445URE en miles de m³

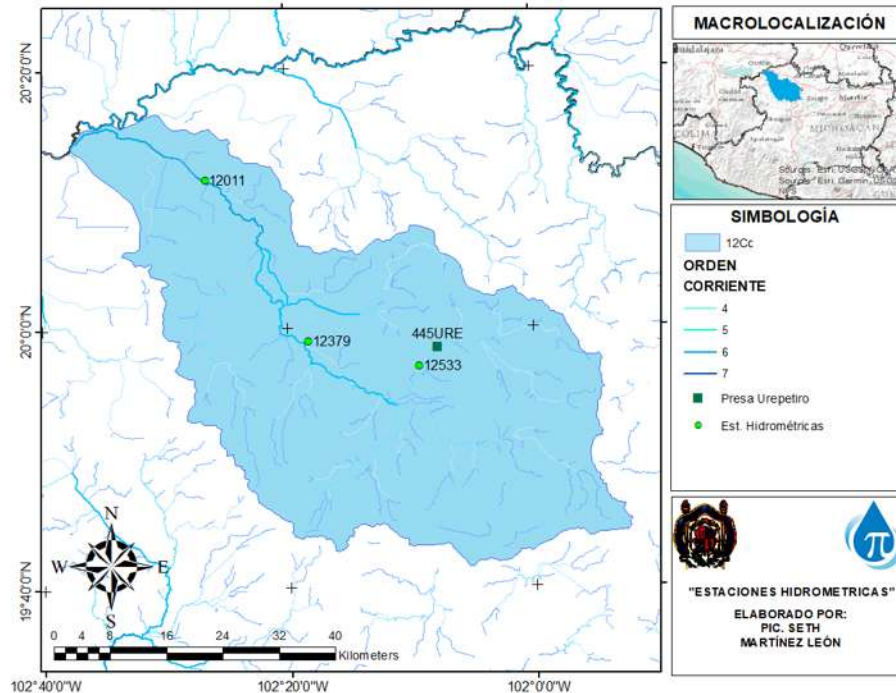


Figura 52. Estaciones hidrométricas posibles de la cuenca

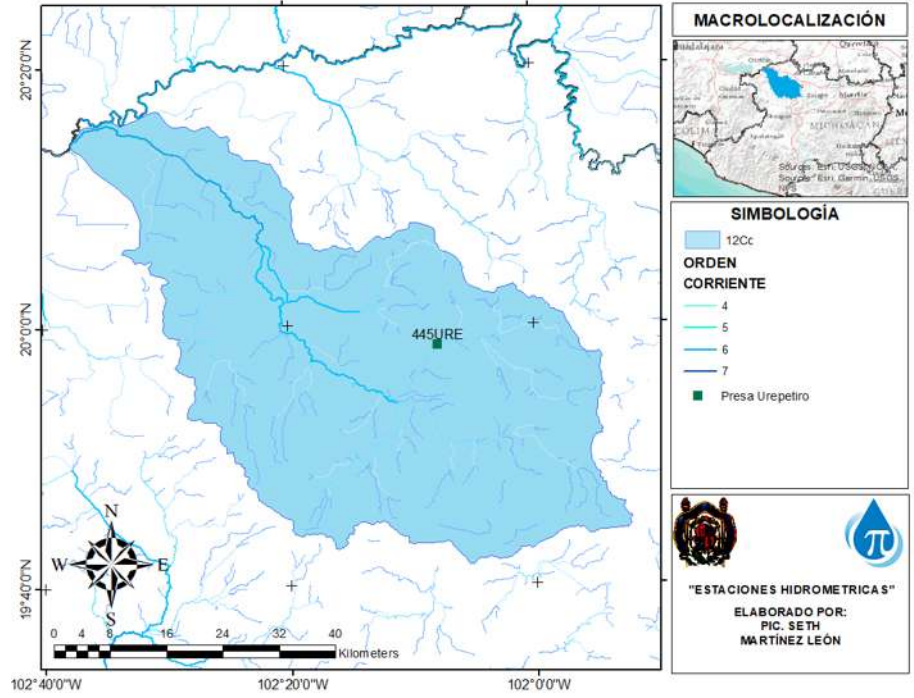


Figura 53. Estación hidrométrica de la presa de UREPETIRO

CALIBACION Y VALIDACION – EVALHID

En EvalHid se presentan los resultados de forma anual, mensual y año medio, siendo el año medio el promedio de los valores mensuales. De acuerdo con las tablas y graficas siguientes se presentan los resultados de la cuenca del río Duero completa.

Primero se procedió con la cuenca de la presa de Urepetiro para compararlos después con los que se haga el traslado de estación hidrométrica, por relación de áreas, tomando en cuenta solo el área para el traslado.

CUENCA 1: PRESA DE UREPETIRO

Dentro de la cuenca de la presa se subdividió en 4 microcuencas para tener una mejor calibración del modelo.

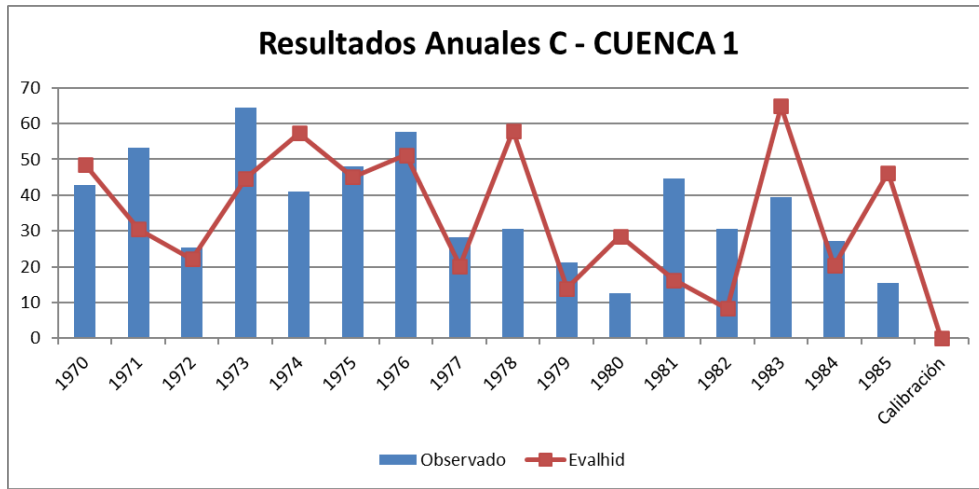
Los resultados mensuales se representan cada mes en los 10 años de calibración y los 5 de validación, los resultados se presentan en las gráficas y tablas siguientes:

calibración	Eficiencia	NSE	0.4854
		ln NSE	0.6267
		r ²	0.7064
		Simetría	1.0000
		Promedio	0.7046
	Parámetros	Hmax	503.0778
		c	0.2000
		Imax	42.5665
		alfa	0.3831
	Media	Sim	3.1852
Obs		3.2179	

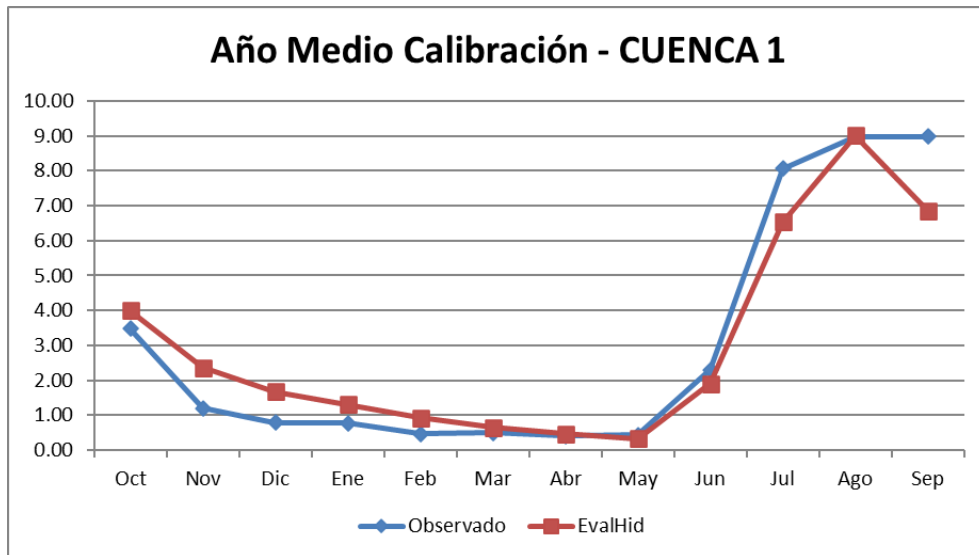
Tabla 16. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Calibración. Cuenca 1

Validación	Eficiencia	NSE	-0.2281
		ln NSE	0.3472
		r ²	0.3611
		Simetría	0.9616
		Promedio	0.3604
	Parámetros	Hmax	503.0778
		c	0.2000
		Imax	42.5665
		alfa	0.3831
	Media	Sim	2.6026
Obs		2.6208	

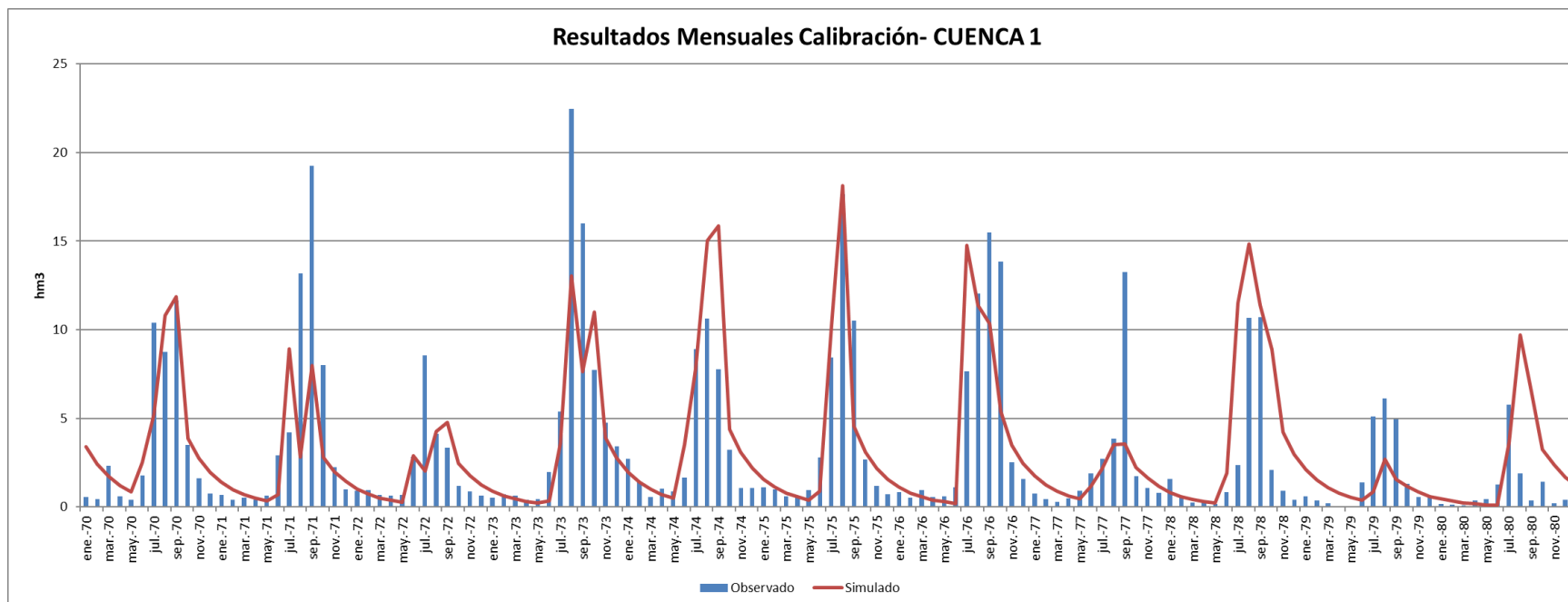
Tabla 17. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Validación. Cuenca 1



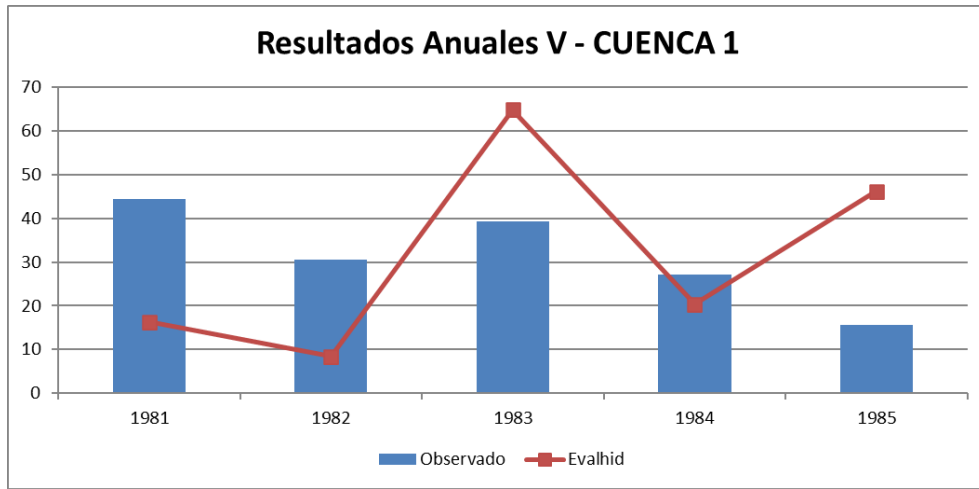
Gráfica 2. Resultados de escurrimiento anuales, calibración



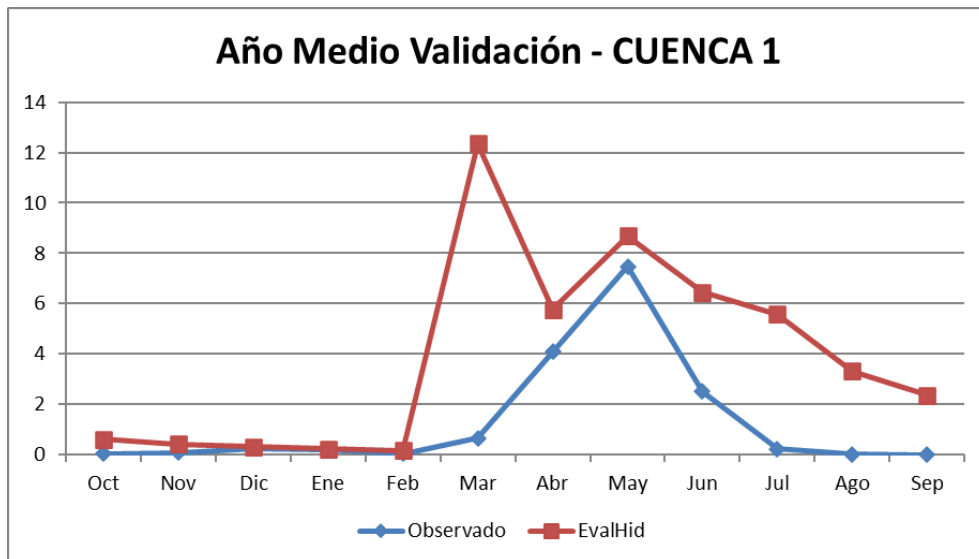
Gráfica 3. Resultados de escurrimiento año medio, calibración



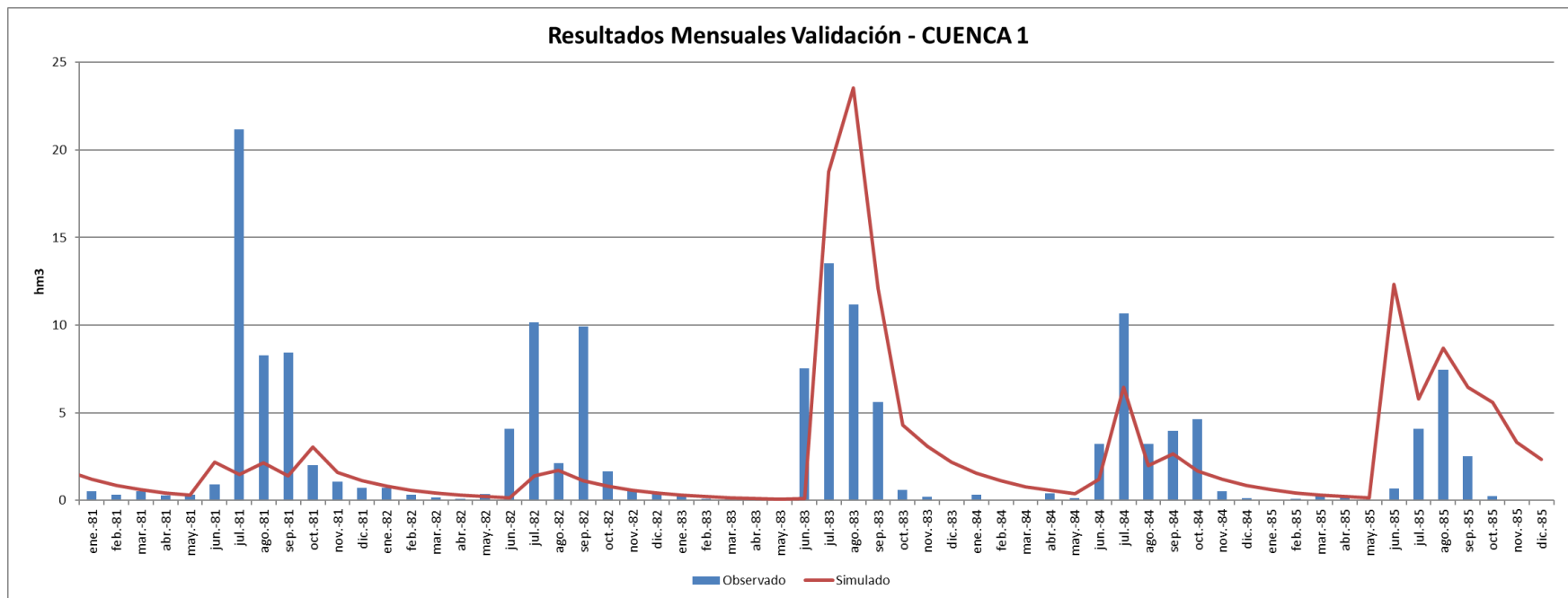
Gráfica 4. Resultados de escurrimiento mensuales, calibración



Gráfica 5. Resultado de escurrimiento anuales, validación



Gráfica 6. Resultados de escurrimiento año medio, validación



Gráfica 7. Resultados de escurrimiento mensuales, validación

CUENCA 2: RIO DUERO CON TRASLADO DE AREA

Dentro de la cuenca se subdividió en 25 microcuencas, y donde se calcularon estaciones ficticias en el centroide de cada cuenca para tener un mejor calibrado, como se muestra en la Figura 54, también se muestran las estaciones principales las cuales serán la base para llenar las estaciones ficticias como se muestra en la **Figura 54**.

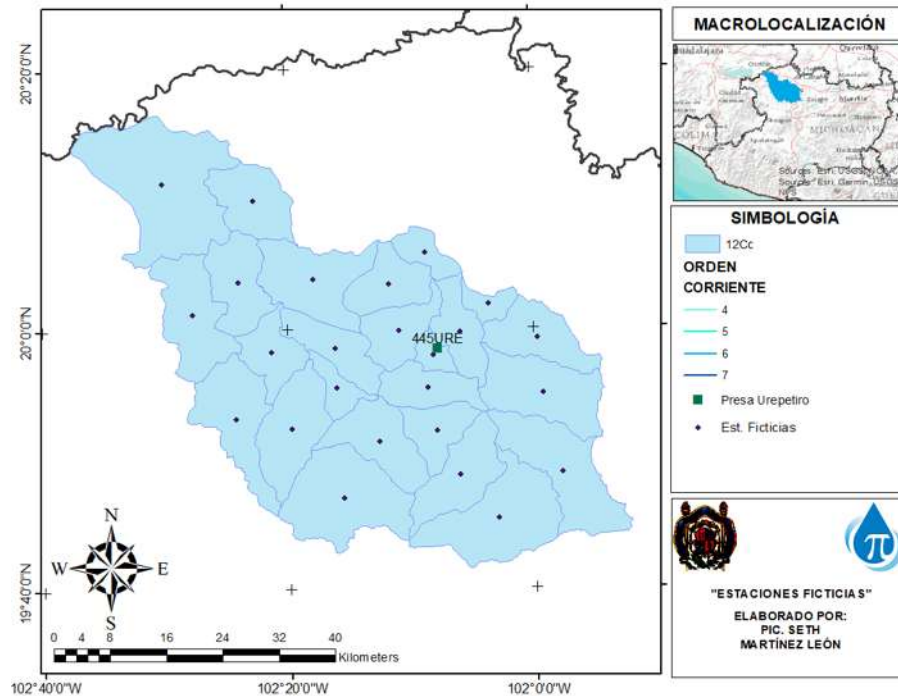
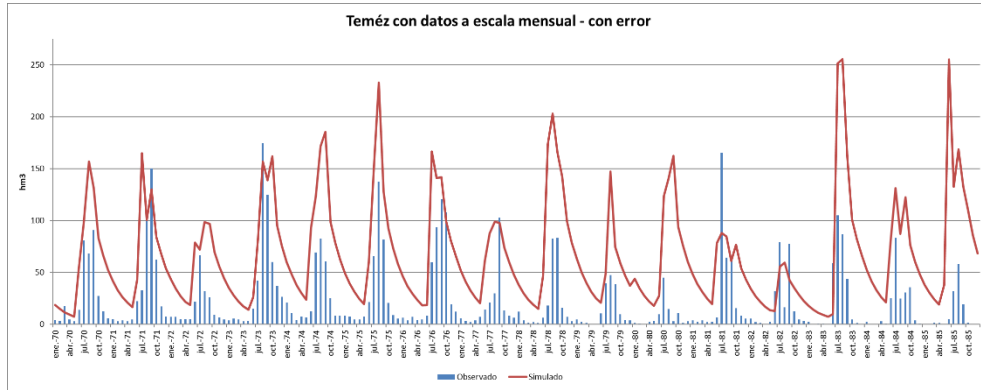


Figura 54. Estaciones ficticias de las microcuencas

Ya que se tuvo problemas al calibrar con los años hidrológicos, se cambió de empezar con octubre a enero, además de que al ingresar más de 15 años el modelo tiene errores como se muestra en la **Gráfica 8**, así que se optó por calibrar con 10 años y validar con 5, de 1970 a 1985 presentados en las tablas y graficas siguientes:



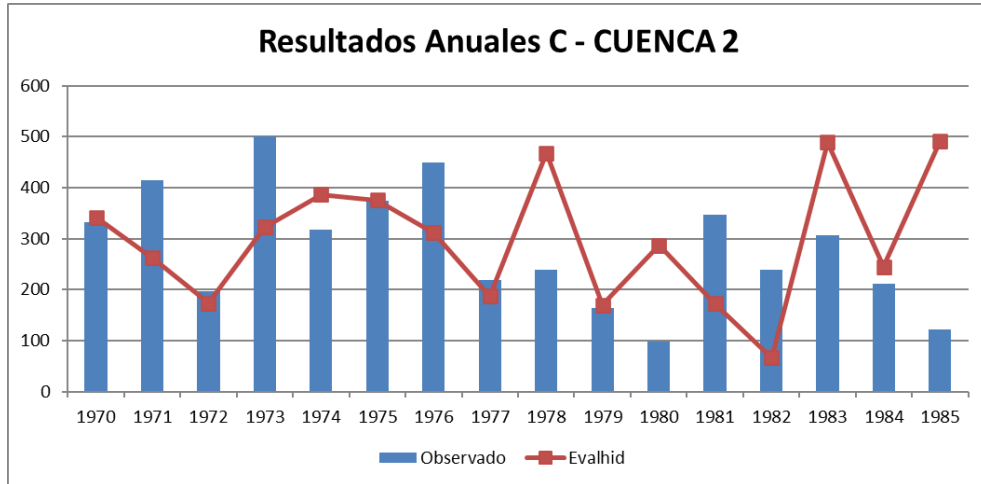
Gráfica 8. Primer modelo con parámetros sugeridos por el programa, con errores

Calibración	Eficiencia	NSE	0.4854
		ln NSE	0.6267
		r2	0.7064
		Simetría	1.0000
		Promedio	0.7046
	Parámetros	Hmax	503.0778
		c	0.2000
		Imax	42.5665
		alfa	0.3831
	Media	Sim	24.9050
		Obs	25.0654

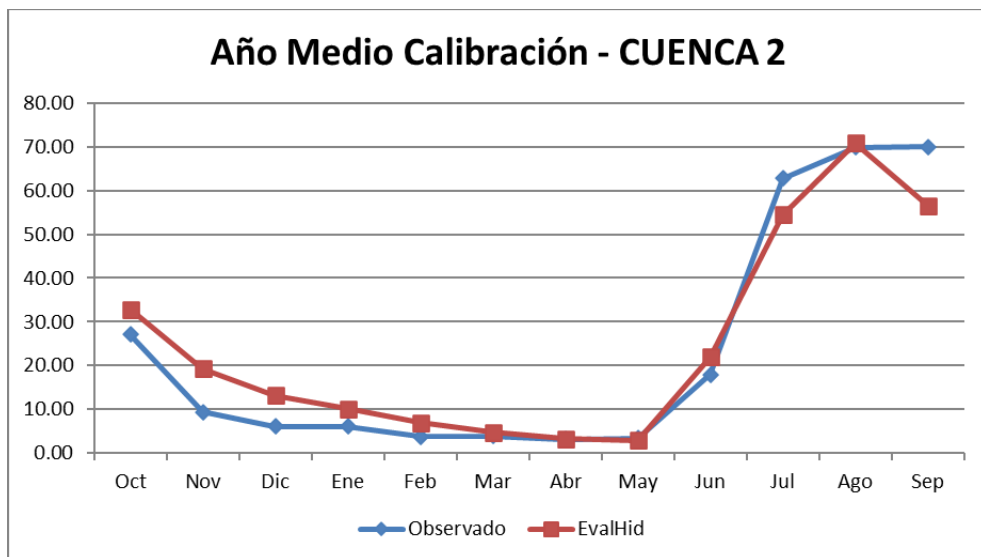
Tabla 18. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Calibración. Cuenca 2

Validación	Eficiencia	NSE	-0.2281
		ln NSE	0.3472
		r2	0.3611
		Simetría	0.9616
		Promedio	0.3604
	Parámetros	Hmax	503.0778
		c	0.2000
		Imax	42.5665
		alfa	0.3831
	Media	Sim	24.4137
		Obs	20.4147

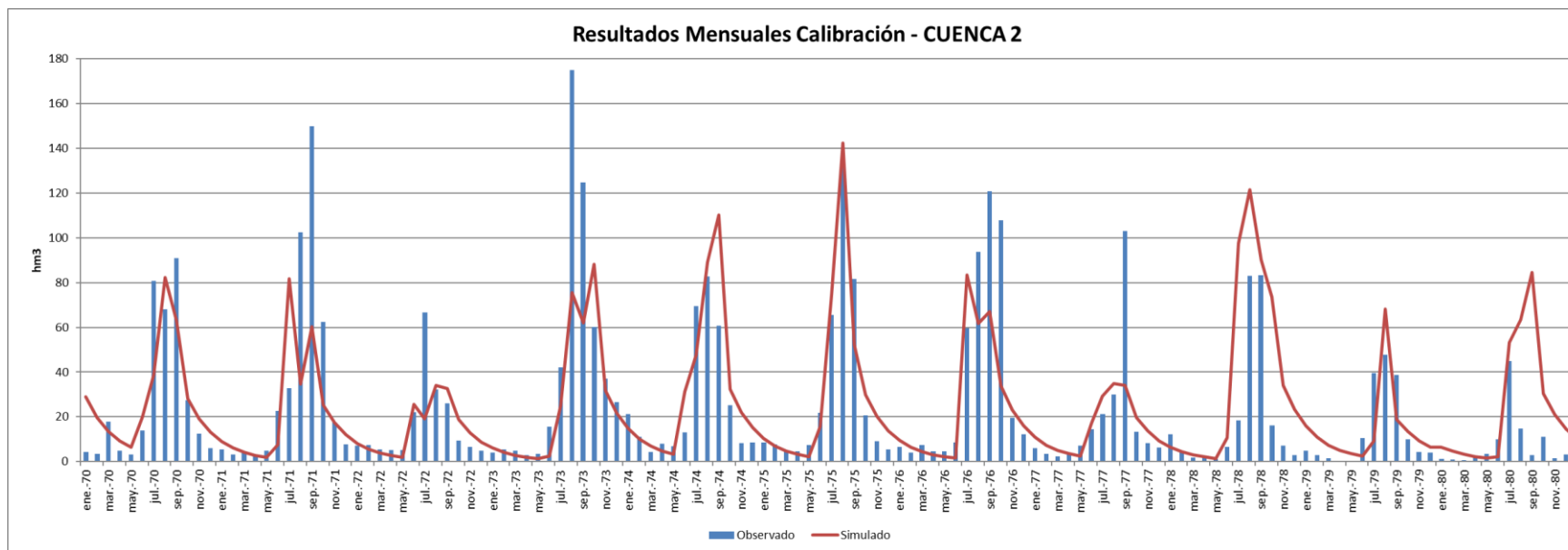
Tabla 19. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Validación. Cuenca 2



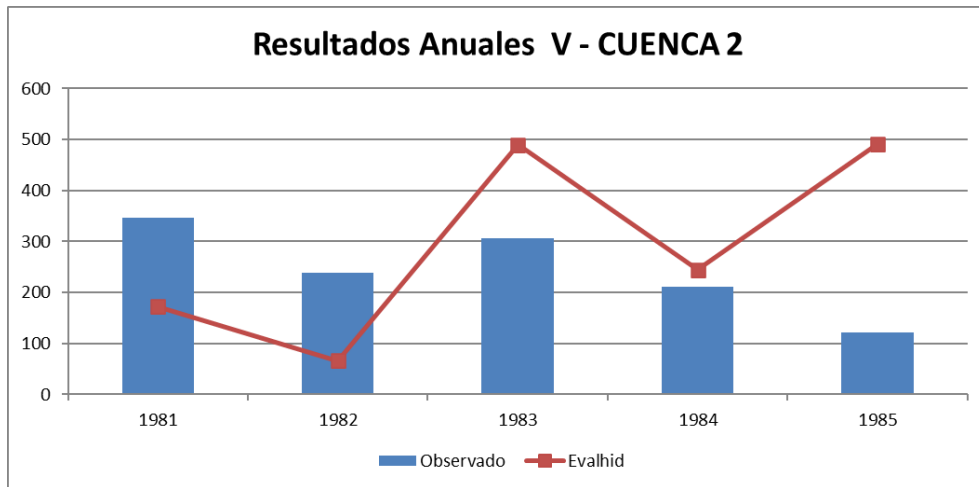
Gráfica 9. Resultados de escurrimiento anuales, calibración



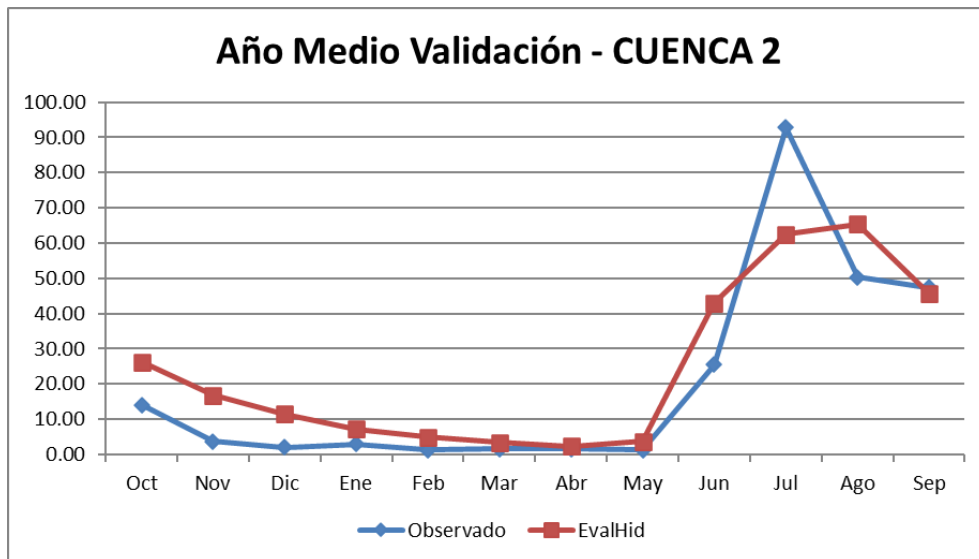
Gráfica 10. resultados de escurrimiento año medio, calibración



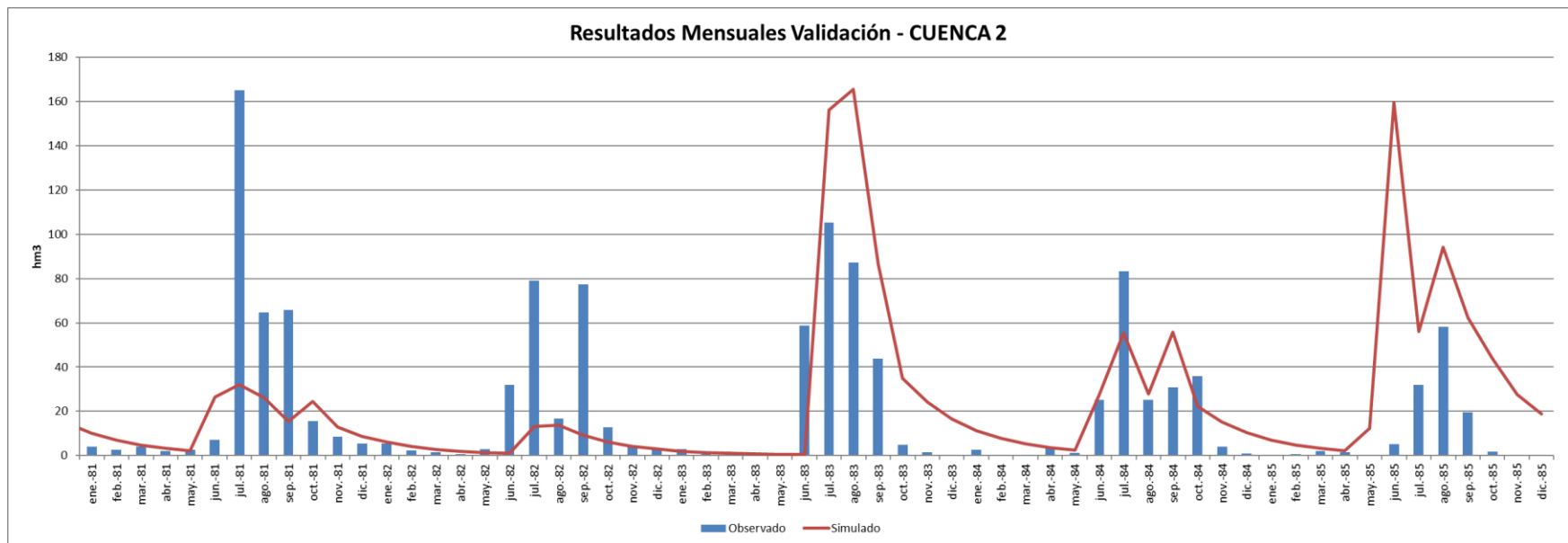
Gráfica 11. Resultados de escurrimiento mensuales, calibración



Gráfica 12. Resultados de escurrimiento anuales, validación



Gráfica 13. Resultados de escurrimiento año medio, validación



Gráfica 14. Resultados de escurrimiento mensuales, validación

BALANCE HIDRICO

De acuerdo con los resultados de la bondad de ajuste, se tomaron los resultados de la última calibración ya que son los que tienen más congruencia con los datos reales tomando en cuenta de que los datos ya están trasladados por similitud de áreas de la cuenca de la presa de Urepetiro a toda la cuenca del río Duero. En las gráficas podemos ver que son muy parecidas, pero tiene mejor ajuste el de la cuenca completa, por lo que ese es el modelo y parámetros que se usarán. En las tablas siguientes se muestran los valores para un periodo de 10 años del balance y los valores medios.

Año	Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escorrentía (mm)	Infiltración (mm)
1990	22057.52671	20221.9781	660.7895488	2232.53887
1991	20071.09819	20542.4571	796.9480966	1133.16979
1992	27548.49099	20659.8124	1386.05152	1094.51704
1993	19256.38454	17566.9572	1052.62441	1290.23937
1994	18953.3775	16172.1222	782.1648212	1665.63626
1995	23019.36299	17928.3589	1777.591324	1832.98816
1996	20476.50448	21215.0568	1708.0226	1818.51751
1997	18571.76368	21015.1125	276.6848333	1300.39177
1998	21073.1028	15848.6839	1657.557282	1020.86956
1999	21121.62672	17911.8425	1448.806121	713.804655
2000	19170.26237	19153.3958	1694.115208	1358.999
2001	21419.01001	16974.8727	1251.540003	1114.3034
2002	21117.8699	18973.195	187.0265064	1685.11843
2003	20853.8423	19669.5246	845.2337467	1533.59892
2004	20827.92746	21221.2148	1833.63064	1497.78154
2005	19550.12565	15887.6152	742.7910892	2044.04485
2006	18464.43713	16238.347	1510.437745	1817.38298
2007	19013.86215	19053.6712	142.0118042	1941.9207
2008	16563.40098	19766.4302	1556.845833	2089.36531
2009	19613.05388	16114.6939	506.8439757	1538.4138
2010	20662.82112	18346.5145	741.354382	1191.45901
2011	21712.70295	16066.2995	851.4500068	2113.06726
2012	20262.69964	21071.0727	339.7813978	1221.09096
2013	18812.81145	17267.2972	350.7963459	795.562126
2014	17863.03866	17044.3331	148.0182803	2216.6534
2015	21913.38152	16708.3901	1328.314497	406.212944

Tabla 20. Valores anuales del Balance hídrico para un periodo de 10 años

Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escorrentía (mm)	Infiltración (mm)
20829.68	18507.04	1086.35	1481.20

Tabla 21. Valores medios

CONCLUSIONES

LLENADO DE DATOS

En la modelación es de mayor importancia contar con los datos de entrada ya que si no se tienen no se puede proceder a hacer el estudio, estos datos de entrada dependen de los datos de las estaciones meteorológicas, por lo que para el caso en México no se cuenta con datos consecutivos, es decir, se tiene información escasa y en ocasiones poco precisos lo que nos lleva a recurrir a métodos para su llenado y validar que estos tengan las características para ser usados teniendo que hacer más trabajo .

Estos métodos no son complicados ni difíciles de aplicar, pero si tenemos demasiados datos estos llegan a ser mas largos, por ello que al usar GESTAD, para automatizar el proceso y hacerlo mucho mas rápido, recordando de nuevo que hasta donde me ayudo a llegar el programa fue a ver la correlación que tenían las estaciones entre sí, ya que las demás funciones hasta llenado no estaban disponibles a la versión que utilice.

Y aunque lo hiciera a través del programa tenia que hacer al menos una estación para comprobar que el programa trabajaba bien, y es muy fácil de interactuar con el programa para hacer los procesos necesarios y llegar hasta tener las estaciones principales.

ESTACIONES HIDROMETRICAS

Para las estaciones hidrométricas, lo más fácil es tener una en el punto de salida que nosotros deseemos, pero eso no es lo que pasa en la realidad, ya que al menos las 3 estaciones mas cercanas al punto de salida de la cuenca, ninguna contaba con los datos necesario, o estaban en régimen alterado, también la mas cercana tenia los valores más viejos que no podía usar con los valores más actuales de precipitación de las estaciones.

Por lo que se debe revisar muy bien los valores que nos dan ya que es el punto de comparación, para los que nos de el modelo matemático, y también, aunque haya una modelación muy buena puede ser que, como los datos que se tienen son datos captados in situ puede variar o se pueden equivocar los que toman los datos, por eso la importancia de revisar los datos para poderlos usar.

CONCLUSIONES GENERALES

La modelación hidrológica superficial es indispensable para cualquier proyecto a efectuar, es por ello que es de gran importancia saber que este depende de la ubicación de la zona de estudio y la información con la que se vaya a trabajar, que para el caso se requiere de datos de clima, uso y tipo de suelo, relieve continental de la zona, entre otros para conocer y tener una idea o referencia para saber si estoy haciendo bien los procesos; así como parámetros que se requieren para la correcta simulación del modelo.

Es importante usar datos reales obtenidos de campo para que un modelo nos precise más la simulación, como se vio con los datos observados y los simulados que, aunque tiende a ser un buen modelo no toma esos cambios o picos que puede presentar el modelo.

El uso de software para automatizar y hacer más rápido todos los procesos es fundamental en nuestros tiempos, ya que nos quitan tiempo de encima, y la posibilidad de trabajar con modelos mucho más grandes en un tiempo reducido, en el caso del programa GESTAD, que aunque no esté completo que haga por nosotros las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia así como saber la correlación sin tener que hacerlo manualmente, eso a que es mucho más fácil cambiar ciertos apartados del programa para que te muestre mejores los resultados, aunque le falta un poco más como el llenado y validación de los resultados es muy útil.

Al usar el programa de EvalHID, ya es una ayuda bastante grande, pero si agregamos la ayuda del algoritmo de soporte a la decisión este se vuelve mucho más sencillo y rápido de usar, ya que solo necesitamos los parámetros iniciales para revisar el modelo, ya con eso vemos cómo va evolucionando y cambiaremos esos datos sin la necesidad de volver a entrar a EvalHID a ingresar todo.

Entonces ya que es más sencilla de modelar los resultados obtenidos son mejores y los errores que tengamos se pueden corregir mejor, ya que no tendremos que recurrir a revisar todo desde el principio.

REFERENCIAS

Aparicio-Mijares, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Editorial Limusa.

ARCGIS. (AGOSTO, 2020). Coordenadas UTM: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm>

ARCGIS. (AGOSTO, 2020). IDW: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>

BANDAS. (AGOSTO, 2020). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Conagua: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>

Campos Aranda Daniel Francisco (julio 2011). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. San Luis potosí, México: talleres de pintego.

Campos, D.F. (1998), Procesos del Ciclo Hidrológico, San Luis Potosí, México, Editorial Universitaria Potosina.

CICESE. (AGOSTO, 2020). Información de base de datos climatológicos: <http://clicom-mex.cicese.mx/>

CONABIO. (AGOSTO, 2020). Clima en Michoacán: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Ganancias Martínez Facundo. (2009). Clase de Estadística Hidrológica. Cátedra de Hidrología y Procesos Hidráulicos, 6 y 9 páginas.

<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>, sistema de información geográfica, AGOSTO 2020

INEGI. (AGOSTO, 2020) información del uso y tipo de suelo: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/cartaedafologica.aspx>

INEGI. (AGOSTO, 2020). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0): <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx>

INEGI. (AGOSTO, 2020) Información de INEGI: <http://www.inegi.org.mx/inegi/acercade/default.aspx>

INEGI. (AGOSTO, 2020). Información de modelos digitales de elevaciones: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

INEGI. (AGOSTO, 2020). Geología en México: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx>

INEGI. (AGOSTO, 2020). Región hidrográfica: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#

INEGI. (AGOSTO, 2020). Relieve de Michoacán: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=16>

Miguel Fernández Mejuto, Alicia Vela Mayorga, Santiago Castañp Fernández. La utilización de modelos en hidrología, Ensayos: Revista de la facultad de educación albacete, pg 305-318

Orlando Calderas Díaz (2017). Evaluación del recurso superficial sobre el acuífero Pastor Ortiz. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán.

Pizarro T., R., Ramirez B. , C., & Flores V., J. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. Chile.

Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays (1944). Hidrología aplicada. Colombia: Editorial nomos a.a.

Javier Paredes, Abel Solera, Joaquín Andreu, Néstor Lerma (2014). Herramienta EvalHid para evaluación de recursos hídricos, Manual técnico v1.1, Grupo de ingeniería de recursos hídricos, Universidad Politécnica de Valencia.

Georgina Caire Martínez, Conflictos por el agua en la Cuenca Lerma-Chapala, (1996-2002), colegio de Sonora.

José Teodoro, Salvador Ochoa, Gustavo Cruz, Jaime Nava Fabian Villalpando (2015). Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: operación, calidad y cantidad. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el desarrollo Integral Regional, Unidad-Michoacán.

Sergio Vargas, (2005). Los retos del agua en la cuenca Lerma-Chapala, editado por Eric Mollard.- Jiutepec, Mor.: IMTA, 2005, Enstituto Mexicano de Tecnología del Agua.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico del agua	13
Figura 2. Tipos de cuencas	14
Figura 3. Macro localización de la cuenca.....	17
Figura 4. Micro localización de la cuenca.....	18
Figura 5. Municipios de la cuenca	18
Figura 6. Orografía de la región en estudio.....	19
Figura 7. Corrientes de México	20
Figura 8. líneas de corriente de la cuenca.....	21
Figura 9. Tipo de suelo en la cuenca	23
Figura 10. Geología en la cuenca	24
Figura 11. Uso de suelo en la cuenca	25
Figura 12. Estructura del programa	31
Figura 13. conceptual de la simulacion del cuiclo hidrologico del modelo	33
Figura 14. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.....	34
Figura 15. distribución de precipitación.....	35
Figura 16. Transformación de la precipitación en excedente	36
Figura 17. Delimitación de la cuenca	43
Figura 18. Logo del software y la versión con la que se trabajó	46
Figura 19. Ventana de cargado de datos en GESTAD.....	47
Figura 20. Ventana de criterio de discriminación de datos en GESTAD.....	48
Figura 21. Ventana de análisis y validación de daos en GESTAD	57
Figura 22. Ventana de resultados gráficos de análisis y validación de datos en GESTAD.....	58
Figura 23. Ventana de selección de estaciones principales en GESTAD	59
Figura 24. Muestra de correlación entre estaciones y numero de vacíos	59
Figura 25. Microcuencas y polígonos de Thiessen 1	65
Figura 26. Microcuencas y polígonos de Thiessen 2	66
Figura 27. Ventana principal de EvalHid para generar un nuevo archivo	67
Figura 28. Introducción a datos de entrada	68
Figura 29. Selección de datos en EvalHid.....	68
Figura 30. Ventanas de asignación de la información de las microcuencas y el punto de salida	69
Figura 31. Ventana de GIS con microcuencas y punto de salida.....	69
Figura 32. Ventana de asignación múltiple a cada microcuenca	70
Figura 33. parámetros del modelo.....	70
Figura 34. Ventana de asignación múltiple	71
Figura 35. Pasos para la modelación	72
Figura 36. Ventana de Grafico de resultados.....	73
Figura 37. Pestaña de control en el calibrador	74
Figura 38. Serie de resultados EvalHid y serie de datos estaciones.....	74
Figura 39. Hojas de comparativa, indicando celdas importantes de verificar	75
Figura 40. Hoja SCE-UA, ubicación de los parámetros y botón para la simulación	76
Figura 41. Interpretación de algoritmo en forma de colonias de hormigas	77
Figura 42. Shuffled Complex Evolution, Algoritmo evolutivo	78

Figura 43. Archivos necesarios para calibrar automáticamente.....	80
Figura 44. Código del archivo de "Opciones.txt"	81
Figura 45. Test de secuencias en la estación 11001	83
Figura 46. Test de Helmert en la estación 11001.....	83
Figura 47. Prueba de Regresión en la estación 11001	84
Figura 48. Estaciones cercanas a la cuenca.....	85
Figura 49. Resumen de estaciones en GESTAD	85
Figura 50. Estaciones principales de la cuenca	87
Figura 51. Datos de volumen de escurrimiento de la presa 445URE en miles de m ³	88
Figura 52. Estaciones hidrométricas posibles de la cuenca	88
Figura 53. Estación hidrométrica de la presa de UREPETIRO.....	89
Figura 54. Estaciones ficticias de las microcuencas	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de flujos y almacenamientos	34
Tabla 2. Rangos de los parámetros del modelo de Témez	38
Tabla 3. Valores aprox. de Hmax, uso de suelo (Estela et al., 1999.....	39
Tabla 4. Valores aprox. de I _{max} , litología del terreno (Estela et al., 1999)	39
Tabla 5. calidad de bondad de ajuste de los coeficientes.....	42
Tabla 6. Valores de eficiencia en la bondad de ajuste	45
Tabla 7. Cambios permitidos para el test de secuencias	50
Tabla 8. características de la cuenca.....	65
Tabla 9. Tabla de rangos de nivel de rango para los índices de ajuste	77
Tabla 10. selección del algoritmo y número de parámetros	79
Tabla 11. Valores por defecto de los parámetros	79
Tabla 12. Indicadores para la función FO.....	79
Tabla 13. Modelos hidrológicos disponibles	80
Tabla 14. Resumen de estaciones cercanas a la cuenca	86
Tabla 15. Resumen de estaciones que cumplen homogeneidad e independencia	87
Tabla 16. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Calibración. Cuenca 1	90
Tabla 17. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Validación. Cuenca 1.....	90
Tabla 18. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Calibración. Cuenca 2	96
Tabla 19. Eficiencia, Parámetros y Validación de la Validación. Cuenca 2.....	96
Tabla 20. Valores anuales del Balance hídrico para un periodo de 10 años.....	101
Tabla 21. Valores medios	102

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Independencia con límites de Anderson estación 11001.....	84
Gráfica 2. Resultados de escurrimiento anuales, calibración	91
Gráfica 3. Resultados de escurrimiento año medio, calibración	91
Gráfica 4. Resultados de escurrimiento mensuales, calibración	92
Gráfica 5. Resultado de escurrimiento anuales, validación	93
Gráfica 6. Resultados de escurrimiento año medio, validación.....	93
Gráfica 7. Resultados de escurrimiento mensuales, validación.....	94
Gráfica 8. Primer modelo con parámetros sugeridos por el programa, con errores.....	96
Gráfica 9. Resultados de escurrimiento anuales, calibración	97
Gráfica 10. resultados de escurrimiento año medio, calibración	97
Gráfica 11. Resultados de escurrimiento mensuales, calibración	98
Gráfica 12. Resultados de escurrimiento anuales, validación.....	99
Gráfica 13. Resultados de escurrimiento año medio, validación.....	99
Gráfica 14. Resultados de escurrimiento mensuales, validación.....	100

