



---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

*“EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL  
EN EL MUNICIPIO DE PARACHO”*

Tesis  
para obtener el grado de  
INGENIERO CIVIL

Presenta:  
KATYA ONCHI RAMOS

Asesor:  
SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE  
Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Co – Asesor:  
MARÍA DEL MAR NAVARRO FARFÁN  
Ingeniero Civil

## DEDICATORIA

*“Lo que aprendas de ellos te coronará de gracia y  
será como un collar de honor alrededor de tu cuello”*

*Proverbios 1:9*

A mis padres:

Victor L. Onchi Zalapa

M. Patricia Ramos Tapia

Por ser el cimiento del hogar que formaron, gracias por sus enseñanzas de amor otorgado, por ustedes tenemos sueños grandes y fe en lograrlos.

A mis hermanos:

Mara P Onchi Ramos

Victor L. Onchi Ramos

Mis amigos y compañeros de vida, gracias por su amor y paciencia en todo momento, son pilares en mi vida.

A mi familia, por enseñarnos que ante cualquier circunstancia podemos permanecer unidos.

A todos ustedes, por el apoyo incondicional para alcanzar cualquier meta, GRACIAS TOTALES.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por permitirme tener esta vida y otorgarme la dicha de encontrar en mi camino a tanta gente tan maravillosa.*

A mi Asesora la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por su paciencia, apoyo, tiempo y motivación para poder concluir este trabajo y apoyarme a crecer.

A mi Asesora la Ing. María del Mar Navarro Farfán, por su incondicional apoyo en mi superación académica, profesional y personal, por no sólo brindarme sus conocimientos, sino también su amistad a lo largo de todo este periodo, gracias por el honor de estar en tu vida.

A mis amigos que me han acompañado antes y durante esta etapa: Ileana, Laila, Ruiz, Izaguirre, Julio, Lalo, Arciga, Gera, Charlie, David, Fani, Bere, PC, Tafolla, Vic, Azu, Solache, Ángel, Esme, Ing. Zalapa, entre otros que me apoyaron a llegar hasta acá.

A mi cuñado Salvador Molina, por su apoyo, amor y amistad incondicional en todo momento.

A mi pareja Jonathan Gomez, por su paciencia, apoyo, amistad y amor incondicional, por acompañarme e impulsarme en todo momento a ser mejor y crecer.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	A
ABSTRACT .....	C
INTRODUCCIÓN.....	E
OBJETIVOS.....	G
GENERAL .....	G
PARTICULARES .....	G
1 ANTECEDENTES.....	1
1.1 HIDROLOGÍA .....	1
1.2 CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA .....	2
1.3 CONCEPTO DE CUENCA.....	4
1.4 PRECIPITACION .....	5
1.5 EVAPOTRANSPIRACION .....	6
1.6 ESCURRIMIENTO .....	7
1.7 INFILTRACION .....	7
2 ZONA DE ESTUDIO.....	9
2.1 LOCALIZACIÓN.....	9
2.2 OROGRAFÍA .....	13
2.3 HIDROGRAFÍA.....	14
2.4 CLIMA.....	16

2.5	EDAFOLOGÍA.....	18
2.6	GEOLOGÍA.....	20
2.7	USO DE SUELO .....	21
2.8	POBLACIÓN.....	25
3	MATERIALES.....	27
3.1	BASE DE DATOS.....	27
3.1.1	INEGI .....	28
3.1.2	SISTEMA CLICOM .....	33
3.1.3	BANDAS – CONAGUA.....	34
3.2	NOM – 011 – CONAGUA – 2015 .....	36
3.3	SOFTWARE DE MODELACIÓN GEOGRÁFICA .....	40
3.3.1	ARCGIS .....	40
3.1	SOFTWARE DE MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	42
3.1.1	EVALHID .....	43
3.1.2	MODELO DE TÉMEZ .....	48
3.1.3	CALIBRACIÓN .....	59
3.1.4	INDICADORES DE AJUSTE .....	60
3.2	R STUDIO .....	64
3.2.1	HIDROGOF .....	65
4	MÉTODOS.....	76

4.1	ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	76
4.2	RECOPIACIÓN DE DATOS .....	77
4.2.1	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS.....	77
4.2.2	ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	78
4.3	PRUEBAS EN LAS ESTACIONES .....	79
4.3.1	LÍMITES DE ANDERSON .....	79
4.3.2	PRUEBA DE SECUENCIAS .....	80
4.3.3	TEST DE HELMERT .....	81
4.4	LLENADO DE ESTACIONES.....	82
4.4.1	PRECIPITACIONES .....	82
4.4.2	INVERSO DE LA DISTANCIA AL CUADRADO	85
4.4.3	TEMPERATURA.....	87
4.4.4	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	88
4.5	MANEJO DE INFORMACIÓN EN ARCGIS.....	91
4.5.1	ESTACIONES FICTICIAS.....	94
4.6	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	94
4.6.1	TÉMEZ DE EVALHID.....	95
4.6.2	NOM – 011 – CONAGUA – 2015.....	107
4.7	COMPARATIVA DE LOS MODELOS, R STUDIO..	112
5	RESULTADOS .....	116

5.1	GENERALES .....	116
5.2	ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	117
5.3	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS .....	120
5.4	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN – EVALHID .....	121
5.4.1	CUENCA 1 .....	122
5.4.2	CUENCA 2 .....	128
5.5	NOM – 011 – CONAGUA – 2015 .....	134
5.6	COMPARATIVA GRÁFICA .....	136
5.7	HIDROGOF – R STUDIO .....	138
5.8	BALANCE HIDRICO .....	141
6	CONCLUSIONES .....	143
6.1	LLENADO DE DATOS .....	143
6.2	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS .....	144
6.3	MODELACIÓN SUPERFICIAL .....	144
6.4	CONCLUSIONES GENERALES .....	145
7	RECOMENDACIONES .....	146
8	REFERENCIAS .....	148
	ÍNDICE DE FIGURAS .....	153
	ÍNDICE DE TABLAS .....	156
	ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	158



*RESUMEN*

El estudio realizado en el presente trabajo se localiza en la sierra Purépecha, específicamente en el municipio de Paracho, Michoacán. Nace debido al constante cambio de uso de suelo que se presenta en la región y con ello la importancia de contar con estudios y modelos hidrológicos superficiales actualizados que nos permitan conocer el estado actual de los recursos hídricos con los que cuenta la zona.

El trabajo consiste en la obtención y comparación del área de estudio, cuenca y microcuencas utilizando modelos digitales de elevación previamente procesados en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS, y la gestión de datos de la zona de estudio. A partir de estos datos de precipitación y temperatura tomados de estaciones climatológicas cercanas y en la zona, se evalúan y tratan para su utilización.

La modelación superficial por medio de microcuencas se realiza en el software EvalHid, con el modelo de Témez, el cual requiere la serie de datos ya tratadas de precipitación, temperatura y evapotranspiración; obteniendo por medio de este modelo matemático los volúmenes de escurrimiento que se generan en la zona.

Es de gran importancia revisar la normatividad mexicana que se utiliza para la obtención del aporte superficial en la región, ello se emplea mediante la Norma NOM – 011 – CONAGUA – 2015, en la cual se utilizan parámetros que dependen de la precipitación anual de la cuenca, área de la cuenca y del coeficiente K, que a su vez, está en función del tipo y uso de suelo de la zona.

Una vez obtenidos los modelos hidrológicos con ambas metodologías, se hace una comparación de los tres resultados mediante el software R studio, de tal manera que sea viable generar una bondad de ajuste entre los datos simulados con los observados, y con ello poder tomar decisiones de los datos que se tomarán para el resultado balance hídrico en el municipio.

**Palabras clave: Modelación superficial, modelo matemático, Norma Mexicana, cuenca, bondad de ajuste.**

*ABSTRACT*

The location of the present study is at the Purépecha mountain range, specifically in the location of Paracho, Michoacán. It was born due to the constant change in land use in the region and with it the importance of having studies and updated surface hydrological models that allow us to know the current state of water resources in the area.

The present work consists of obtaining and comparing the study area, watershed and microbasins using high speed digital models processed in the ArcGIS Geographic Information System, and the data management of the study area. From these precipitation and temperature data taken from nearby weather stations and in the area, they are evaluated and treated for use.

Surface modeling by means of micro-basins is performed in the EvalHid software, with the Témez model, which requires the data series and the management of temperature and evapotranspiration; obtaining by means of this mathematical model the runoff volumes that are generated in the zone.

For the study is very important to review the Mexican regulations that are used to obtain surface water in the region, it is

through the Standard NOM - 011 - CONAGUA - 2015, which uses parameters that depend on the annual precipitation on the watershed, watershed area and coefficient K, which in turn, is in function of type and land use of the area.

Once obtained the hydrological models with both methodologies, a comparison of the three results is made by means of the software R studio, in such a way that it is viable to generate a *goodness - of -fit* between the simulated data and the observed ones, and whit it to be able to make decisions of the data that will be taken for the hydric balance result in the location.

**Keywords: Surface modeling, mathematical model, Mexican Norm, watershed, goodness of fit.**

## *INTRODUCCIÓN*

El agua es necesaria para todas las formas de vida, es un elemento crucial para el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios ambientales que dependemos para sobrevivir, además de ser un factor estratégico para el desarrollo del país (AGUA.org).

La disponibilidad del agua para consumo humano se ha visto afectada debido a que, con el paso del tiempo el uso de suelo ha cambiado de acuerdo a las necesidades de la propia comunidad y las comunidades aledañas. Se sabe que en México gran parte de su economía depende de la agricultura y que en Michoacán un mayor porcentaje de la misma depende de la sobre explotación de suelo para la producción de aguacate. Con esta producción en los últimos años se ha causado desequilibrios en el ciclo hidrológico del agua, afectando en abastecimiento de agua en las comunidades aledañas.

Es por ello que es importante generar y contar con estudios de la hidrología superficial, datos y modelos matemáticos que nos permitan conocer la interacción, con el tiempo y actual, del agua en el suelo y su posible aprovechamiento, tanto como para la comunidad como para el equilibrio del ciclo hidrológico natural del agua.

En México los estudios que se realizan en cuanto a la modelación hidrología superficial para conocer la disponibilidad, son mediante la Norma NOM – 011 – CONAGUA – 2015, en la cual los datos de entrada de mayor influencia en la modelación son el tipo y uso de suelo.

En México, la información existente es escasa, por lo que el uso de la Norma podría no reflejar de manera correcta dicha modelación. Es por ello que se compara con los resultados de la modelación mediante el software EvalHid con el método de Témez; el manejo de mismo además de simplificar el proceso por ser un programa automatizado, los datos de entrada que requiere son de mayor número a comparación con la Norma.

En el presente trabajo se hace la modelación mediante las dos metodologías (Témez y la Norma Oficial Mexicana), de las cuales el balance hídrico se hace con los resultados de un solo modelo para llegar a la comparación gráfica y numérica; la bondad de ajuste numérica es generada mediante el software R studio con el paquete hidroGOF, indicando cuál de las modelaciones es la más exacta a los datos reales.

*OBJETIVOS*

*GENERAL*

Calibrar y comparar diferentes modelos hidrológicos de simulación superficial para la misma zona en estudio, con los que sea factible obtener resultados confiables para cualquier periodo de simulación a partir de la determinación del método con menor error, para que así, pueda ser utilizado el método más factible en futuros estudios hidrológicos, así como los datos calculados para gestión de los mismos como recursos hídricos.

*PARTICULARES*

- Generar una base de datos sin vacíos y sin ser alterados los datos reales, para que puedan ser consultados en un futuro.
- En base a los datos generar diferentes métodos de modelación hidrológica y matemática superficial.
- Calibrar los distintos modelos mediante dos metodologías distintas para así comparar los resultados gráficamente matemáticamente.
- Conocer distintos métodos numéricos de bondad de ajuste para la comparación de resultados obtenidos de las modelaciones.

→ Mediante los resultados obtenidos y con la comparación de los modelos, determinar cuál metodología es la más cercana a la realidad, y así, pueda ser utilizada en un futuro en zonas donde no se cuente con suficientes datos para la modelación superficial.

## 1 ANTECEDENTES

### 1.1 HIDROLOGÍA

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 de 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.

## 1.2 CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA



*Figura 1. Ciclo Hidrológico del agua*

En la tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrósfera, el cual, se extiende desde unos 15 km arriba en la atmósfera hasta 1 km por debajo de la corteza terrestre.

El agua circula a través de caminos que constituyen el ciclo hidrológico, el cual es un concepto central para la hidrología, como

todo ciclo, el hidrológico no tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua.

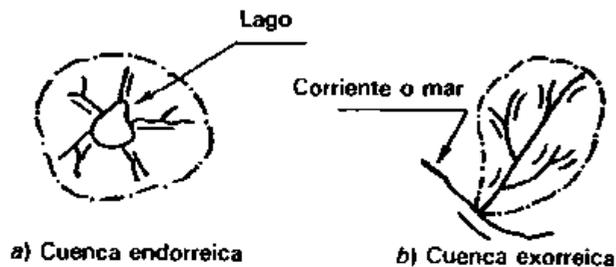
El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua formado se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante el trayecto hacia la superficie, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o 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 atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u 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.*

A pesar de que el concepto es simple, el fenómeno es enormemente complejo e intrigado, 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.

### 1.3 CONCEPTO DE CUENCA

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En la primera 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.*



Fuente: Fundamentos de hidrología de superficie. Francisco J. Aparicio Mijares. editorial Limusa. México D.F. 1992

*Figura 2. Tipos de cuencas*

En una cuenca donde la superficie terrestre es impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes de la misma hacia el punto de salida.

Y cuando una cuenca de drenaje y su correspondiente cuenca de agua subterránea no necesariamente tienen la misma proyección horizontal, la cuenca de drenaje de una corriente es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios.

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 infiltra, aparece como escurrimiento en tal sección. Y la geohidrológica es el área de terreno donde se infiltra la precipitación y alcanza su manto acuífero correspondiente.

#### *1.4 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 convenientes 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 un entendimiento de la humedad del suelo, la recarga del agua subterránea y el escurrimiento de los ríos.

### *1.5 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.

Evapotranspiración potencial, se entiende el agua que consume o requiere una cierta área, debido a la evaporación del suelo y la transpiración de su vegetación. La evaporación y la transpiración dependen principalmente de la energía disponible, para que se realice tal cambio de estado del agua, de la sequedad del aire, la cual es función de su temperatura, así como el viento, debido a su poder de renovación de aire seco. Y otro factor importante del que depende es la facilidad con la cual se reemplaza al agua que se consume.

### *1.6 ESCURRIMIENTO*

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o 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.

### *1.7 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.

## 2 ZONA DE ESTUDIO

Paracho, Michoacán, colinda con los municipios de Chilchota y Cherán al norte, con Cherán, Nahuatzen y Uruapan al este, con Uruapan al sur y con Uruapan, Charapan y Chilchota al oeste.

El municipio se encuentra dentro de la subcuenca Paracho – Nahuatzen, siendo la cuenca la zona de estudio determinada.

### 2.1 LOCALIZACIÓN

La cuenca se encuentra al noroeste del estado de Michoacán, con su ubicación en el centroide en coordenadas geográficas: WGS84 19° 47' 30.762" N y 102° 5' 42.608" O.

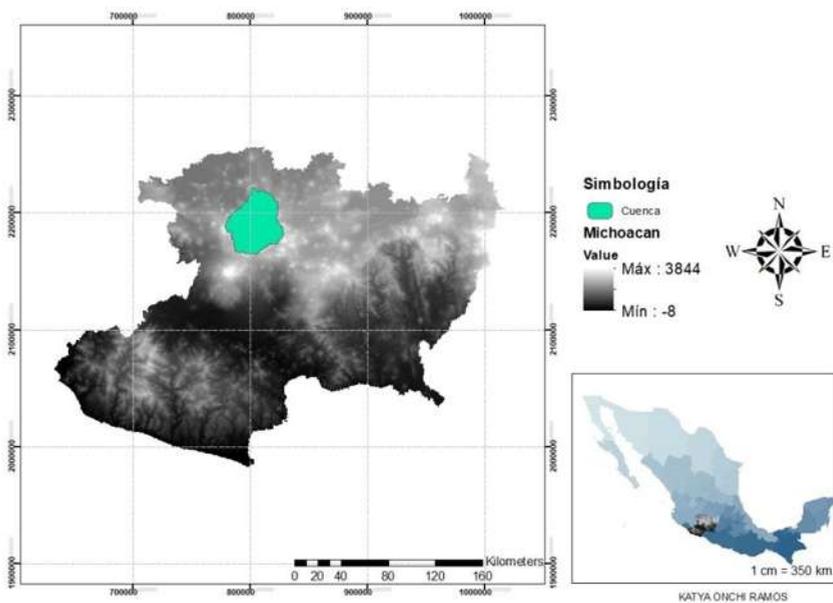


Figura 3. Macro localización de la cuenca

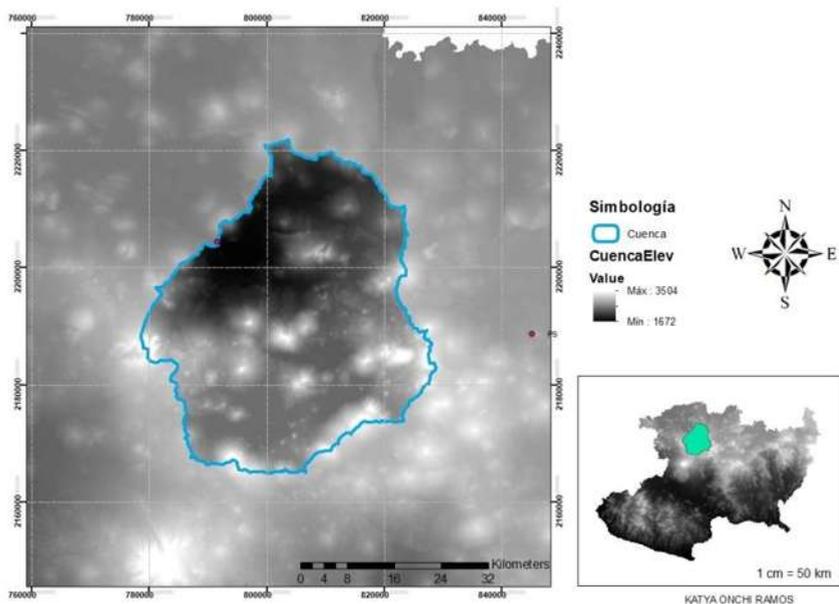
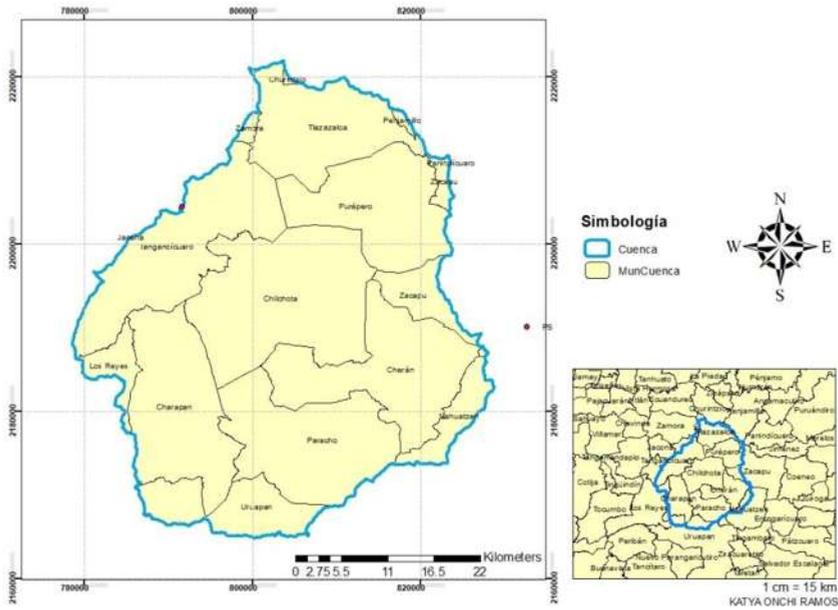


Figura 4. Micro localización de la cuenca

Abarcando 16 municipios de Michoacán que se muestran en la **Figura 5** y **Tabla 1** en la entidad 16.



**Figura 5.** Municipios dentro de la cuenca

## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

Clave del municipio	Municipio	Área (km <sup>2</sup> )	Área total (km <sup>2</sup> )	% Área del Municipio	% Área en la Cuenca
102	Uruapan	99.947	1,006.99	9.93%	5.48%
65	Paracho	221.715	242.61	91.39%	12.15%
56	Nahuatzen	46.191	302.23	15.28%	2.53%
21	Charapan	213.217	232.25	91.80%	11.68%
75	Los Reyes	33.733	477.87	7.06%	1.85%
24	Cherán	220.900	220.91	100.00%	12.11%
25	Chilchota	302.580	302.58	100.00%	16.58%
107	Zacapu	59.575	451.62	13.19%	3.26%
70	Purépero	189.079	191.33	98.82%	10.36%
85	Tangancícuaro	238.725	383.17	62.30%	13.08%
43	Jacona	0.012	117.87	0.01%	0.001%
94	Tlazazalca	172.764	202.31	85.40%	9.47%
63	Panindícuaro	0.000	287.19	0.00%	0.00%
108	Zamora	6.283	332.50	1.89%	0.34%
67	Penjamillo	3.569	368.52	0.97%	0.20%
28	Churintzio	1.678	227.72	0.74%	0.09%

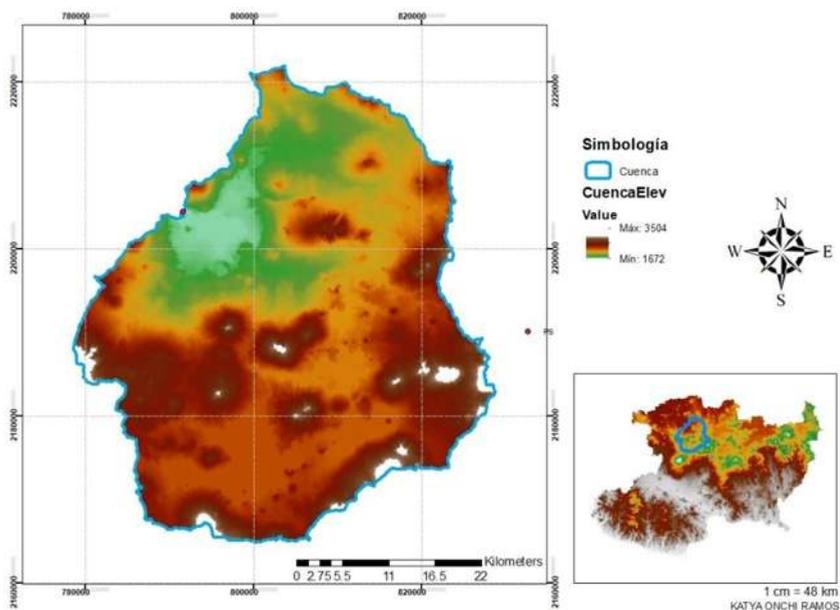
*Tabla 1. Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca*

## 2.2 OROGRAFÍA

La región de estudio forma parte del eje Neovolcánico (volcán nuevo) conectada con las cadenas de Sierra Madre Occidental y Sierra Madre Oriental al sur de ciudad de México, predominando en la zona la elevación del cerro Taretzuruan (cerro del Águila) con una elevación máxima de 3,504 msnm en el municipio de Paracho y una elevación mínima de 1,672 en el municipio de Tangancícuaro.

Su relieve lo constituyen el sistema volcánico transversal, la Sierra de Paracho y los cerros de Marijuata, Tamapujuata, Chato y Quinceo (CONABIO).

En la zona se puede observar que las elevaciones van disminuyendo de sur a noroeste, representando posteriormente lomeríos *Figura 6*.



*Figura 6. Orografía de la región en estudio*

### 2.3 HIDROGRAFÍA

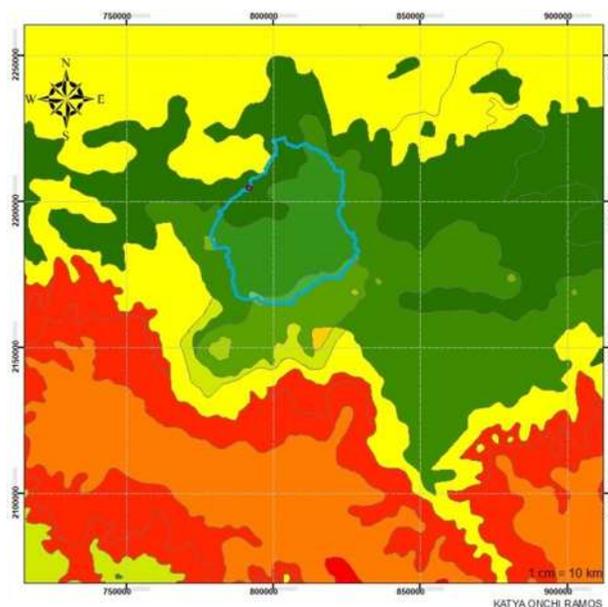
La cuenca pertenece a la región hidrológica Balsas, en la subcuenca Paracho – Nahuatzen, teniendo corrientes de agua intermitentes y no presenta cuerpos de agua, esto quiere decir que no tiene manantiales, únicamente arroyos de temporal, como se presenta en la *Figura 8*.



## 2.4 CLIMA

El clima del municipio de Paracho es templado con lluvias casi todo el año. Tiene una precipitación pluvial anual de 1,100 mm y temperaturas que oscilan entre los 7°C y los 22°C (INAFED, 2018).

La cuenca su clima dominante es templado – subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío está entre -3°C y 18°C, y la temperatura del mes más caliente bajo 22°C (CONABIO. 2018) y una precipitación de 1,000 mm, como se muestra en la *Figura 9*.



*Figura 9. Clima en la cuenca*

## Simbología



Cuenca

### Clima Cuenca

-  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.
-  Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
-  Templado, húmedo, 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.
-  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.
-  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.

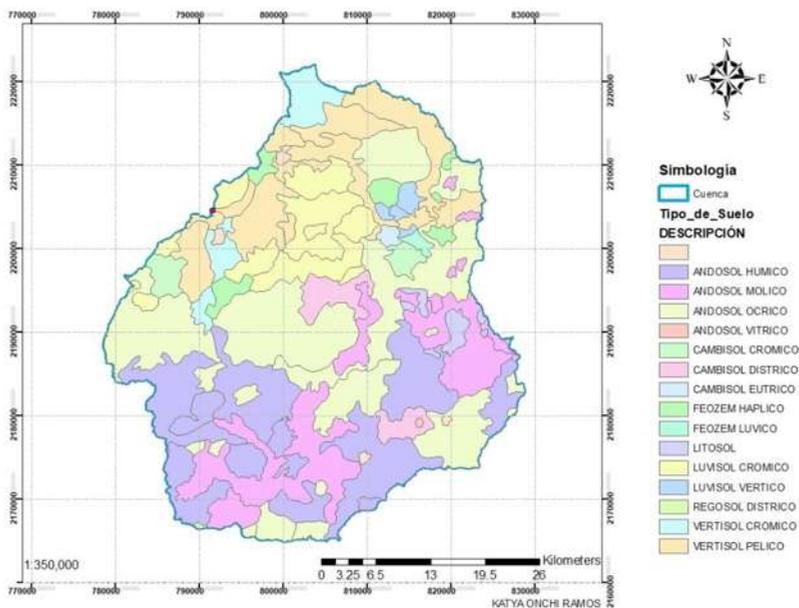
### Clima Michoacán

-  Árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
-  Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
-  Frío, temperatura media anual entre -2°C y 5°C, temperatura del mes más frío sobre 0°C y temperatura del mes más caliente entre 0°C y 6,5°C.
-  Semiarido cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C.
-  Semiarido, semicálido, 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.
-  Semicálido húmedo 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.
-  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.
-  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.
-  Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C; temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
-  Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
-  Templado, húmedo, 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.
-  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.
-  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.

*Figura 10. Simbología del clima en la cuenca*

## 2.5 EDAFOLOGÍA

Dentro de la cuenca se presenta un suelo dominante Andosol (64.63%), Vertisol (16.62%) y Luvisol (11.15%) como se muestra en la **Figura 11** y **Tabla 2**.



**Figura 11.** Tipo de suelo en la cuenca

EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

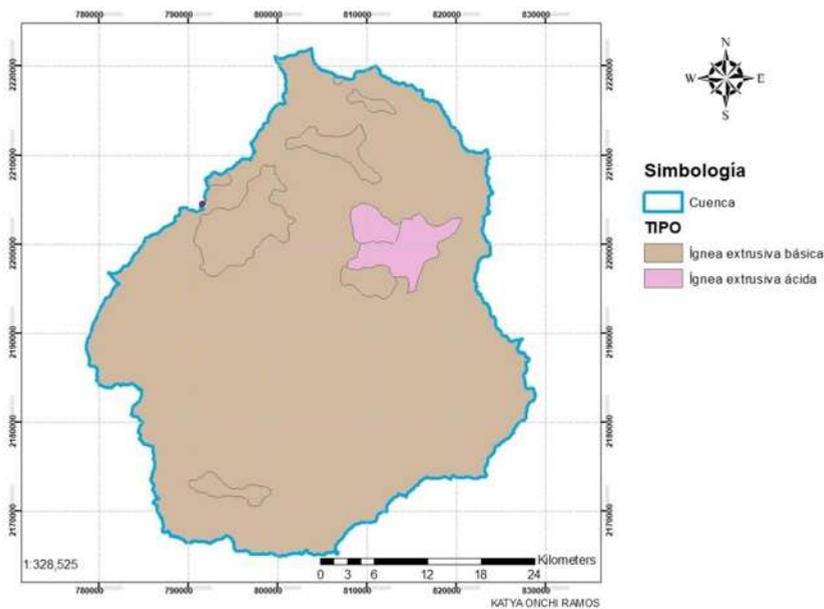
Descripción	Área en la cuenca	% Área en la cuenca	$\Sigma$
ANDOSOL HUMICO	393.3157	21.55%	64.63%
ANDOSOL MOLICO	254.1500	13.92%	
ANDOSOL OCRICO	531.5142	29.12%	
ANDOSOL VITRICO	0.8139	0.04%	
CAMBISOL CROMICO	30.6819	1.68%	4.66%
CAMBISOL DISTRICO	48.7864	2.67%	
CAMBISOL EUTRICO	5.5351	0.30%	
FEOZEM HAPLICO	39.7270	2.18%	2.49%
FEOZEM LUVICO	5.6731	0.31%	
LITOSOL	19.9114	1.09%	11.15%
LUVISOL CROMICO	167.6301	9.18%	
LUVISOL VERTICO	15.9524	0.87%	
REGOSOL DISTRICO	0.7404	0.04%	0.04%
VERTISOL CROMICO	58.7930	3.22%	16.62%
VERTISOL PELICO	244.5136	13.40%	

*Tabla 2. Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca*

## 2.6 GEOLOGÍA

La región de estudio presenta dos tipos de rocas ígneas extrusivas, ambas de la era cenozoica cuaternario y neógeno, dentro de la clasificación geológica. Las rocas que presenta son ácidas y básicas, se presenta en la **Figura 12**:

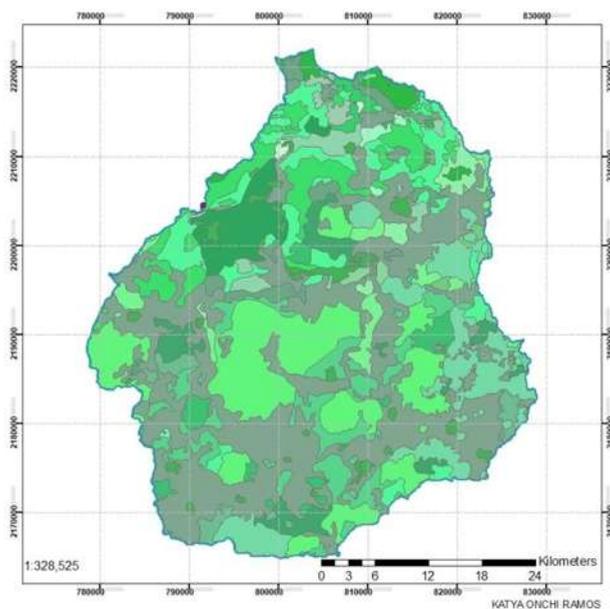
- Ígneas extrusivas ácidas: Riolota, Riodacita y Dacita; Sindo roca volcánica formada principalmente de cuarzo.
- Ígneas extrusivas básicas: Basalto, siendo una roca volcánica que consiste en plagiocasa cálcica.



**Figura 12. Geología en la cuenca**

2.7 USO DE SUELO

El uso de suelo se compone principalmente de agricultura en la zona, posteriormente de bosque y vegetación secundaria de los mismos bosques, su uso de suelo en la región se presenta en la *Figura 13* y los porcentajes dentro de la cuenca se muestran en la *Tabla 3*.



*Figura 13. Uso de suelo en la cuenca*

EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

Descripción	Área	% Área en la cuenca	Σ
ÁREA DESPROVISTA DE VEGETACIÓN	0.57	0.03%	0.03%
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	32.11	1.77%	38.71%
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	3.23	0.18%	
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	64.34	3.55%	
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	1.12	0.06%	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	577.44	31.90%	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	4.00	0.22%	
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	12.47	0.69%	
AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	5.85	0.32%	
AGUA	3.36	0.19%	0.19%
BOSQUE DE ENCINO	21.75	1.20%	26.44%
BOSQUE DE ENCINO-PINO	40.37	2.23%	
BOSQUE DE PINO	271.30	14.99%	
BOSQUE DE PINO-ENCINO	145.06	8.01%	
PASTIZAL CULTIVADO	7.68	0.42%	7.89%
PASTIZAL INDUCIDO	135.04	7.46%	
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	10.58	0.58%	0.58%
URBANO CONSTRUIDO	41.69	2.30%	2.30%
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	6.36	0.35%	4.41%
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	0.63	0.03%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	39.53	2.18%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-	27.57	1.52%	

## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

ENCINO			
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	5.63	0.31%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	42.39	2.34%	19.46%
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO- PINO	22.46	1.24%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	121.99	6.74%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO- ENCINO	60.48	3.34%	
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	104.94	5.80%	

**Tabla 3. Porcentaje del área de uso de suelo**

## Simbología

 Cuenca

## USuelo

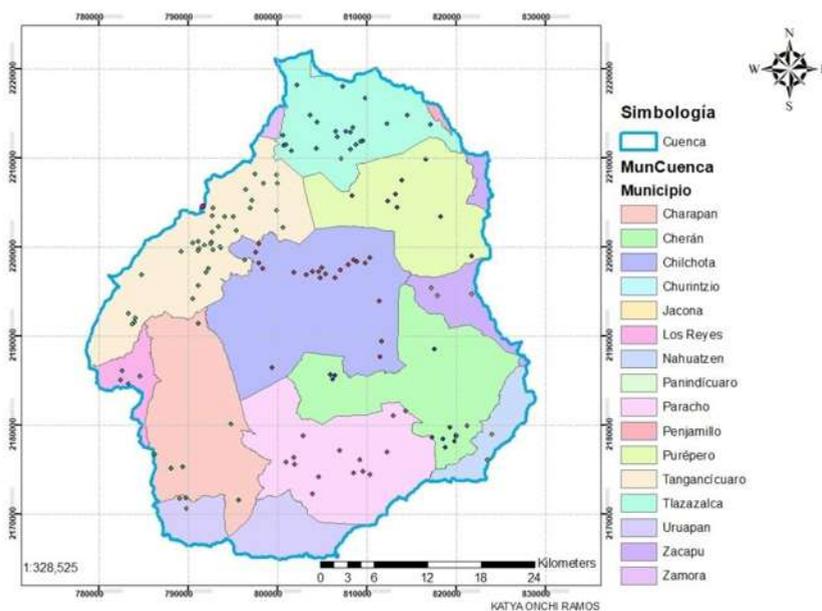
### DESCRIPCIO

	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL
	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE
	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE
	AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE
	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL
	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE
	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE
	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE
	AGUA
	BOSQUE DE ENCINO
	BOSQUE DE ENCINO-PINO
	BOSQUE DE PINO
	BOSQUE DE PINO-ENCINO
	PASTIZAL CULTIVADO
	PASTIZAL INDUCIDO
	SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	URBANO CONSTRUIDO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	ÁREA DESPROVISTA DE VEGETACIÓN

*Figura 14. Simbología de uso de suelo*

## 2.8 POBLACIÓN

Las zonas urbanas están creciendo sobre el suelo cuaternario en la sierra volcánica, teniendo una población en el municipio de Paracho de 32,029 habitantes y dentro de la cuenca 166,464 habitantes, con las localidades dentro de los municipios observados en la *Figura 15*.



*Figura 15. Localidades dentro de los municipios en la cuenca*

## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

---

Municipio	Población
Charapan	12,163.0
Cherán	18,141.0
Chilchota	36,293.0
Churintzio	0.0
Jacona	0.0
Los Reyes	2,235.0
Nahuatzen	10,575.0
Panindícuaro	0.0
Paracho	32,029.0
Penjamillo	0.0
Purépero	15,306.0
Tangancícuaro	29,267.0
Tlazazalca	6,831.0
Uruapan	2,002.0
Zacapu	1,622.0
Zamora	0.0
	166,464.0

**Tabla 4. Porcentaje del área de uso de suelo**

### 3 MATERIALES

#### 3.1 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, es requerible 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); e información para el coeficiente de escurrimiento de la NOM – 011 – CONAGUA – 2015 (Norma Mexicana para la conservación del recurso agua).

### *3.1.1 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 2018)

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 sub-métricos, tanto del terreno como de la superficie del mismo (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.

### 3.1.1.1 CONTINUO DE ELEVACIONES MEXICANO (CEM) 3.0

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular. Dadas las posibilidades otorgadas por las tecnologías emergentes, las necesidades crecientes de los usuarios, la importancia de tener continuos nacionales en diversos temas, el contar con información actualizada, además del impacto positivo de estos en la generación de productos derivados, en el año 2007 se generaron los continuos de la red hidrográfica, cuerpos de agua y curvas de nivel a escala 1:50 000. A la par, se crearon los

correspondientes a los bancos de nivel y vértices geodésicos. A continuación se presentan imágenes de los continuos. (INEGI, 2018).

Este tipo de modelos presenta una resolución de 15 metros, lo que logra un mejor detalle y por lo tanto se vuelve más confiable para el trabajo; ya que versiones anteriores cuentan con una resolución de 30 metros

### 3.1.1.2 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, con mayor relevancia, en la NOM – 011 – CONAGUA – 2015.

### 3.1.2 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, 2018).

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.

### 3.1.3 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, 2018).

Cuenta con los datos de 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la Conagua y el IMTA. Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas hasta el año 2006 y tiene registradas aproximadamente 180 presas (IMTA, 2018).

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.

### 3.2 NOM – 011 – CONAGUA – 2015

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos naturales (SEMARNAT) establece la NOM – 011 – CONAGUA – 2015, que es específica para la conservación del recurso agua, que estableciendo las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; tomando en consideración los artículos en la Ley de Aguas Nacionales para la protección, mejoramiento, conservación y restauración de las Cuencas hidrológicas, acuíferos, cauces, vasos y depósitos de agua de propiedad nacional.

Tiene como objetivo el establecimiento del método para la determinación de la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento, los métodos para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural, están establecidos en el *Apéndice Normativo “A”*.

En el Apéndice Normativo “A”, se describen dos métodos que permiten determinar el escurrimiento natural para cada año hidrológico analizado:

- Método directo: se aplica si en la cuenca en estudio existe un registro mínimo de 20 años consecutivos o no consecutivos; si hay más de 5 años faltantes es necesario calcular los periodos faltantes con algún método establecido por la Comisión Nacional del Agua. En caso de contar con un sistema de cuencas interconectadas, se debe elaborar un esquema de interconexión de la cuenca en estudio con las cuencas vecinas, indicando nombres de cauces, dirección del flujo y, en su caso, la ubicación de los embalses naturales y artificiales.
- Método indirecto

### MÉTODO INDIRECTO

El método indirecto es utilizado en caso de no haber suficiente información de registros hidrométricos o la información existente sea escasa, para la determinación del volumen medio anual de escurrimiento natural, es aplicado el método denominado *precipitación - escurrimiento*:

$$\begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO NATURAL DE} \\ \text{LA CUENCA} \end{array} = \begin{array}{l} \text{PRECIPITACIÓN ANUAL} \\ \text{DE LA CUENCA} \end{array} * \begin{array}{l} \text{ÁREA DE LA} \\ \text{CUENCA} \end{array} * \begin{array}{l} \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \end{array}$$

La *precipitación anual* de la cuenca es obtenida mediante información pluviométrica, abarcando un periodo mínimo de 20

años, en caso de faltar un máximo de 5 años, se deberá calcular los años faltantes. La precipitación deberá determinarse a partir del análisis de los registros de las estaciones ubicadas dentro y vecinas de la cuenca.

El *coeficiente de escurrimiento* podrá ser determinado con dos diferentes procedimientos:

- Por transferencia de información hidrométrica y climatológica de cuencas vecinas, hidrológicamente homogéneas: se obtiene información de la cuenca vecina mediante la relación del volumen de escurrimiento anual entre el volumen de precipitación anual ( $C_e = V_e / V_p$ ), con el que se establece una correlación gráfica del volumen de precipitación anual y el coeficiente de escurrimiento de la cuenca vecina; con la gráfica se estiman los correspondientes coeficientes anuales de escurrimiento de la cuenca en estudio.
- *En función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual*, de la cuenca en estudio: con apoyo de los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), se clasifican los suelos de la cuenca de estudio en tres diferentes tipos, establecidos en la **Tabla 5**.

EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hilera			
El Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

*Tabla 5. Valores de K, en función del tipo y uso de suelo*

Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, K se calcula como la resultante de la división de la cuenca en zonas homogéneas y obteniendo el promedio ponderado de todas ellas; una vez obtenido, Ce se calcula como se describe en la **Tabla 6**.

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (Ce)
Si $K \leq 0.15$	$Ce = K(P-250)/2000$
Si $K > 0.15$	$Ce = [K(P-250)/2000] + [(K-0.15)/1.5]$

**Tabla 6. Cálculo del coeficiente de escurrimiento (Ce)**

Donde P es la precipitación anual (mm), y tiene un rango de validez si  $350 < P < 2150$ .

→ En casos en que se cuente con estudios hidrológicos y se conozcan los Ce, se podrán utilizar para el cálculo del escurrimiento.

### 3.3 SOFTWARE DE MODELACIÓN GEOGRÁFICA

#### 3.3.1 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 primero elementos discretos, continuos que representan una malla y facilitan la combinación de datos con capas y el análisis espacial, y el segundo llamados también shapes cuenta con objetos lineales, puntuales y polígonos cerrados

### *3.1 SOFTWARE DE MODELACIÓN MATEMÁTICA*

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.

### 3.1.1 EVALHID

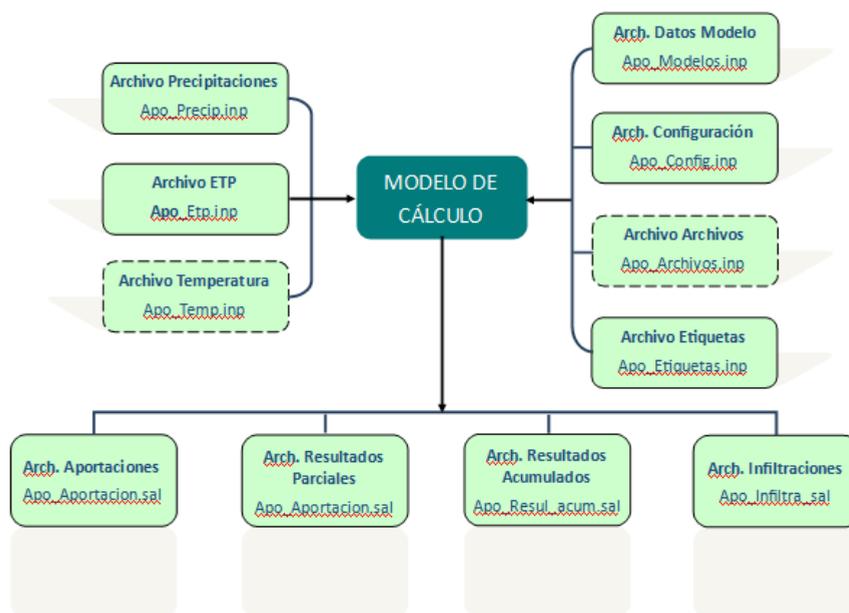
La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental de la planificación y gestión de recursos hídricos. Básicamente existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la *modelación precipitación-escorrentía*. Ambas metodologías suelen ser complementarias 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 cuenta, 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 16. 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 escorrentía. 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

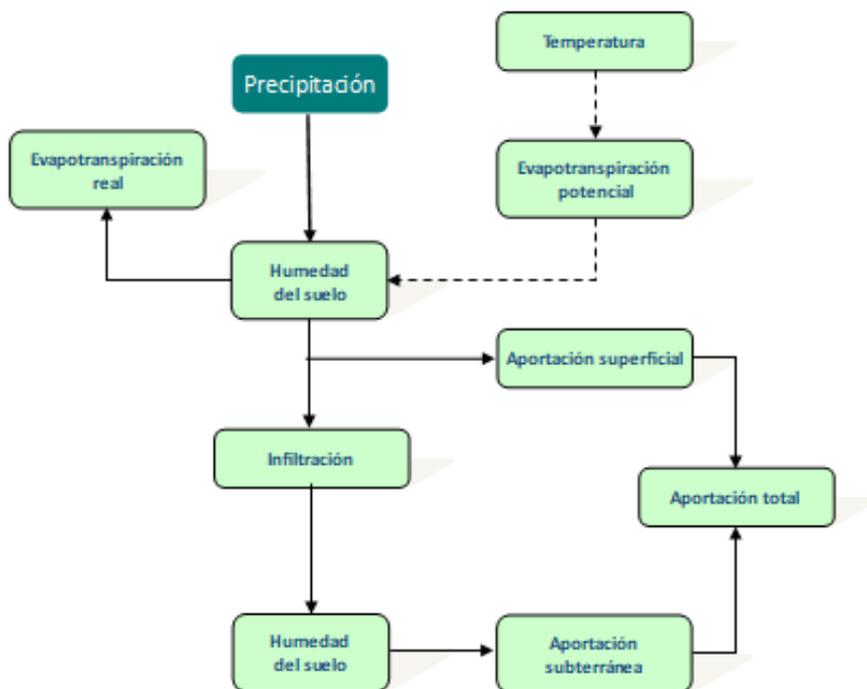
caudal del río. Este modelo permite la estimación de la escorrentía de una cuenca a partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial, la superficie de la cuenca y un conjunto de parámetros. Además, como sistema conceptual que es, intenta representar en detalle el ciclo hidrológico mediante la división del terreno en diferentes compartimentos, o estanques, que representan diferentes procesos del ciclo. Dentro de los modelos precipitación escorrentía el modelo Sacramento se puede clasificar como conceptual, continuo, determinístico, de entradas agrupadas, número alto de parámetros y sólo cuantitativo. La modelación precipitación escorrentía 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)

### *3.1.2 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.

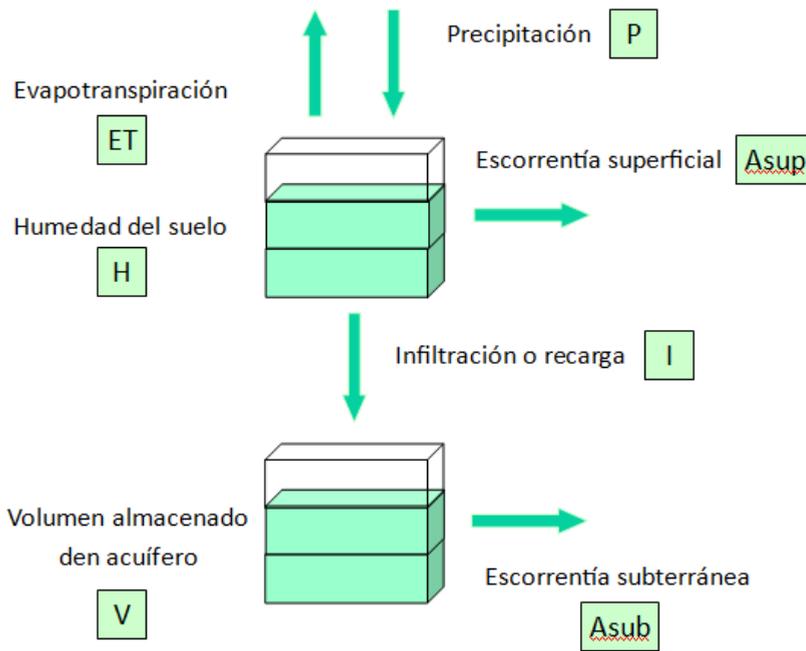
El ciclo hidrológico simulado por Témex se presenta en la *Figura 17*.



*Figura 17. 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.

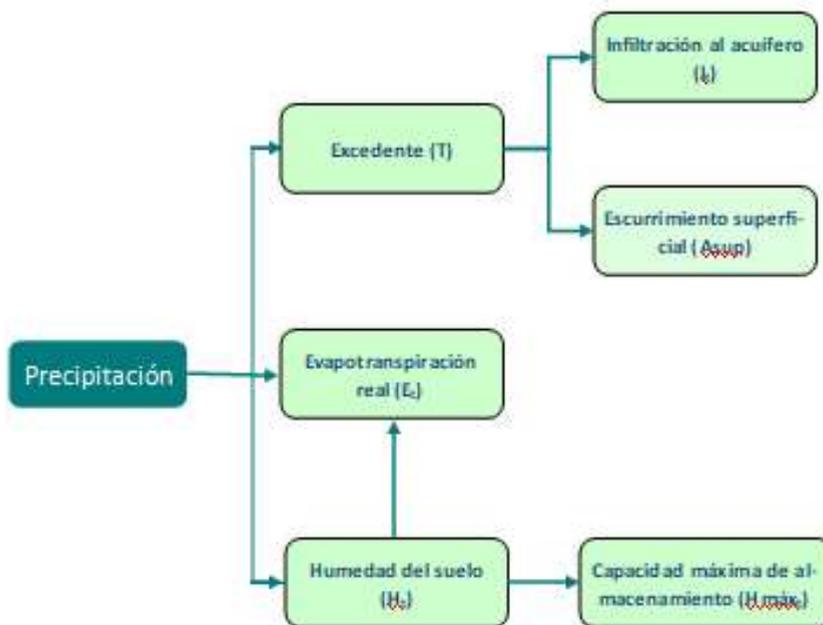


*Figura 18. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez*

Flujos de entrada	❖ Precipitación (P)
Flujos de salida	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Evapotranspiración real (E)</li> <li>❖ Aportación superficial (Asup)</li> <li>❖ Aportación de origen subterráneo (Asub)</li> </ul>
Flujos intermedios	❖ Infiltración (I), identificada con la recarga al acuífero durante el mes “t” ( $R_t$ )
Almacenamientos intermedios	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Humedad del suelo (<math>H_t</math>)</li> <li>❖ Volumen almacenado en el acuífero (<math>V_t</math>)</li> </ul>

*Tabla 7. Componentes de flujos y almacenamientos*

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



**Figura 19. Distribución de la precipitación**

### 3.1.2.1 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 ( $A_{sup,t}$ ), y la infiltración o recarga. (Manual técnico EvalHid, 2014)

El excedente total ( $T_t$ ) se calcula como:

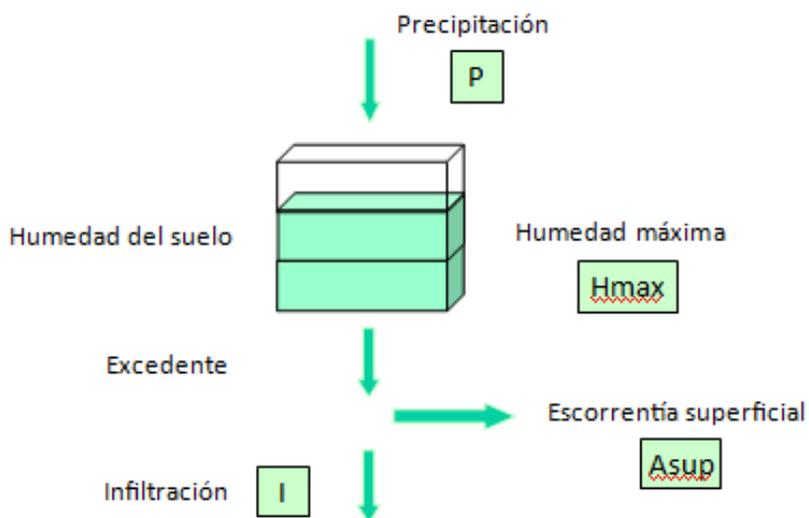
$$T_t = 0 \quad \text{si } P_t \leq P_0$$

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

Donde:

$$\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{t-1} - EPT_t$$

$$P_0 = C(H_{m\acute{a}x} - H_{t-1})$$



*Figura 20. Transformación de la precipitación en excedente*

- $H_{max}$  (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 del mismo que puede ser drenado por evapotranspiración.
- $H_{t-1}$  (mm): almacenamiento de agua en el suelo en el instante  $t-1$ .
- $ETP_t$  (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  $H_{max}$ .

### ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACIÓN

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

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

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

La evapotranspiración real producida se obtiene mediante:

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_t - T_t \\ ETP_t \end{array} \right.$$

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:

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

A medida de 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.

## APORTACIÓN SUPERFICIAL

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 ( $A_{sub_t}$ ) 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.
- $\alpha$ : Constante con dimensiones de ( $T^{-1}$ ).
- $R_t$ : Caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t.
- $V_0$ : Volumen unicial del acuífero.
- R: Caudal de recarga constante
- S: Superficie de la cuenca

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

## PARÁMETROS

Las tablas siguientes muestran los parámetros del modelo, rangos de operación y parámetros de uso y tipo de suelo de acuerdo a Hmax e Imax, su valor finalmente calibrado puede superar los límites descritos.

	Hmax (mm)	C	Imax (mm)	$\alpha$ (mes <sup>-1</sup> )
Mín	50	0.2	10	0.001
Máx	250	1	150	0.9

*Tabla 8. Rangos de los parámetros del modelo de Témez*

Uso de suelo	Hmax (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210

Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

**Tabla 9. Valores aprox. de Hmax, usos del suelo (Estela et al., 1999)**

Litología	I <sub>max</sub> (mm)
Mat. Aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo – arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gness	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

**Tabla 10. Valores aprox. de I<sub>max</sub>, litología del terreno (Estela et al., 1999)**

### 3.1.3 CALIBRACIÓN

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-escorrentía (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).

### 3.1.4 INDICADORES DE AJUSTE

La calibración de modelos está enfocado 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 modelos, 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 son calculados 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 escases 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 bodad 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; éste 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 *in* NSE a las observaciones o infravaloraciones sistemáticas del modelo (Casas y Paredes, 2013)

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

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

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 como 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 11**.

Calidad de ajuste	NSE/ln NSE/r <sup>2</sup>
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 11. Calidad de bondad de ajuste de los coeficientes**

### 3.2 R STUDIO

El sistema de R es un software bastante eficiente en el desarrollo de gráficos, análisis de datos y adecuando modelos estadísticos usando datos dentro de la memoria de la computadora. No es tan eficiente en almacenamiento de datos en estructuras complicadas, datos de preguntas o trabajando con datos que no ajustan en la memoria de la computadora.

Es usado para procesar archivos grandes antes usados en R, incluye diferentes componentes y usa el término R para referirse a diferentes factores como:

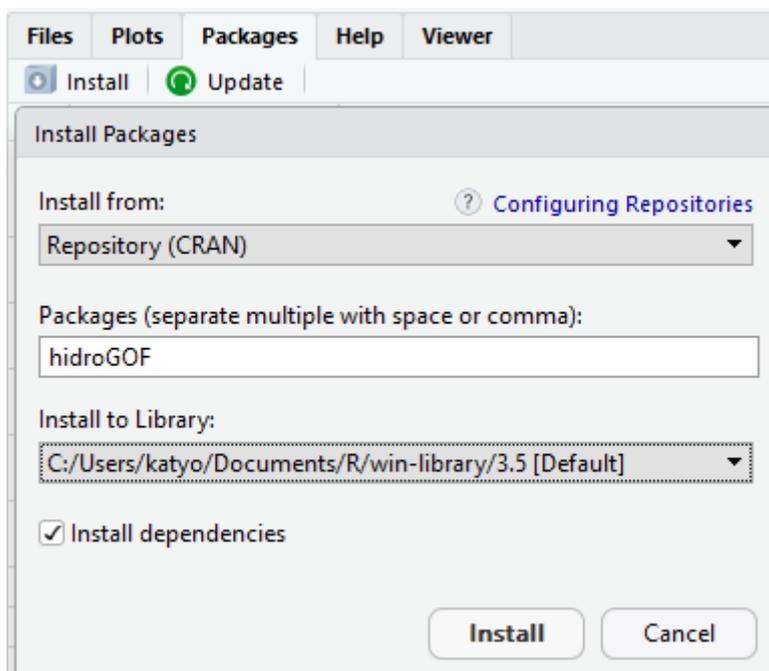
- Un lenguaje de computadora
- Un interpretador que ejecuta un código escrito en R
- Un sistema computarizado para gráficos descritos en el lenguaje de R
- Windows, Mac OS, o Linux incluyen su interpretador, sistema gráfico, paquetes estándar e interfaz del usuario

La consola de R es una herramienta que permite introducir comandos en R y ver cómo responden en el propio sistema, el intérprete leerá las expresiones y responderá si el resultado es correcto o tiene un error en un mensaje, también se pueden introducir expresiones dentro de un script “guion” de R, que

después de introducir todos los comandos requeridos se puede ir verificando completo.

### 3.2.1 HIDROGOF

El paquete utilizado para los índices de ajuste que serán usados dentro de R, es HidroGOF, el paquete se tiene que instalar ya que no viene dentro de los que contiene R.



*Figura 21. Instalador de paquetes dentro de R; HidroGOF*

Dentro de este paquete es necesario cargar los datos observados y simulados que se comparan utilizando la bondad de ajuste numérica, tratando con los valores perdidos entre uno y otro, utilizando el comando `> gof` (sim = simulados, Obs = observados), y posteriormente indicando “la mejor” simulación mediante la **Tabla 12**.

Bondad de ajuste numerico	
ME	0
MAE	0
MSE	0
RMSE	0
NRMSE %	0
PBIAS %	0
RSR	0
rSD	1
NSE	1
mNSE	1
rNSE	1
d	1
md	1
rd	1
cp	1
r	1
R2	1
bR2	1
KGE	1
VE	1

*Tabla 12. Valores de eficiencia en la Bondad de ajuste*

Donde:

→ ME = Error medio:  $me = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)}{N}$

→ MAE = Error medio absoluto:  $mae = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - y_i|}{N}$

→ MSE = Error cuadrático medio:  $mse = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}$

→ RMSE = Raíz del error cuadrático medio: da la desviación estándar de la predicción del error en el modelo, valores pequeños indican mejor actuación del mismo.

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$$

→ NRMSE = Raíz del error cuadrático medio normalizado: con un rango de -100% a 100%

$$nrmse = 100 \frac{rmse}{sd(y_i)} ; sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}$$

→ PBIAS = Sesgo porcentual: mide el promedio de la tendencia de los valores simulados a ser mayores o menores que los valores observados. El valor óptimo es 0.0, con valores de baja magnitud indica una simulación del modelo

precisa, los valores positivos indican una sobreestimación y valores negativos indican una subestimación del sesgo.

El resultado es dado en porcentaje.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^N y_i}$$

→ RSR = Relación de RMSE a la desviación estándar de las observaciones:  $RSR = \frac{rmse}{sd(y_i)}$

→ rSD = Relación de la desviación estándar:  $rSD = \frac{sd(x_i)}{sd(y_i)}$

→ NSE = Eficiencia de Nash – Sutcliffe: es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) comparada con la varianza medida de los datos (información) (Nash and Sutcliffe, 1970).

Es un indicador del rango de eficiencia de  $-\infty$  a 1, esencialmente, la cercanía a 1 indica la mayor precisión del modelo.

➤ NSE = 1, corresponde a una perfecta modelación respecto a los datos observados.

- NSE = 0, indica que la predicción del modelo es tan preciso como la media de los datos observados.
- $-\infty < NSE < 0$ , indica que la media observada es mejor predictor que el modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

*Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (3), 282-290*

→ mNSE = Eficiencia de Nash – Sutcliffe modificado:

$$mNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}_i|^2}$$

→ rNSE = Eficiencia de Nash – Sutcliffe relativo:

$$rNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - x_i}{y_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - \bar{y}_i}{\bar{y}_i} \right)^2}$$

→  $d$  = Índice de acuerdo: desarrollada por Willmott (1981) como una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo, variando entre 0 y 1.

El índice de acuerdo puede detectar diferencias aditivas y proporcionales en los medios y varianzas observados y simulados; sin embargo, es demasiado sensible a los valores extremos debido a las diferencias al cuadrado (Legates and McCabe, 1999). Con un rango en los resultados de  $0 \leq d \leq 1$ :

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^N [ |x_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i| ]^2}$$

→  $md$  = Índice de acuerdo modificado:

$$md = \frac{1 - \sum_{i=1}^N |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^N [ |x_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i| ]^2}$$

→  $rd$  = Índice de acuerdo relativo: su valor varía entre 0 y 1, donde 1 indica una combinación perfecta y 0 indica no tener acuerdo en absoluto.

$$rd = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - x_i}{y_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{|x_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i|}{\bar{y}_i} \right)^2}$$

→  $cp$  = Coeficiente de persistencia: es usado para comparar el rendimiento del modelo contra el modelo simple, usando los valores observados del día previo como predicción para el día actual.

Compara las predicciones del modelo con las predicciones obtenidas asumiendo que el proceso es un proceso Wiener (la variación incrementa linealmente con el tiempo), en ese caso, la mejor estimación para el futuro es dado por la última medición (Kitadinis and Bras, 1980).

La eficiencia del modelo de persistencia es una estadística de evaluación del modelo normalizada que cuantifica la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) a la varianza de los errores obtenidos mediante el uso de un modelo de persistencia simple (Moriassi et al., 2007).

Siendo sus rangos de 0 a 1, con 1 como el valor óptimo y debe de ser mayor a cero para indicar un rendimiento del modelo mínimamente aceptable.

$$cp = 1 - \frac{\sum_{i=2}^N (y_i - x_i)^2}{\sum (y_i[2:N] - y_i[1:(N-1)])^2}$$

→  $r$  = Correlación del coeficiente de Pearson: mide la dependendencia lineal entre los valores simulados y observados; se conoce también como una prueba de

correlación paramétrica porque depende de la distribución de los datos. Tiene un rango de valor de  $-1 \leq r \leq 1$ , de la misma manera que NSE.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$$

Donde:

$$S_{xy} = \Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{N}$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}$$

Y:

$S_{xx}$  y  $S_{yy}$  son la suma del error cuadrado de x y y, respectivamente

$S_{xy}$  es la suma de x y y

→  $R^2$  = Coeficiente de determinación:  $R^2$  da la proporción de la varianza de una variable que es predecible a partir de otra.

Con un rango de  $0 \leq R^2 \leq 1$

$$R^2 = 1 - \frac{N \cdot rmse^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

→  $bR^2$ :  $R^2$  multiplicado por el coeficiente de la línea de regresión entre la simulada y la observada, con un rango de  $0 \leq bR^2 \leq 1$ .

$R^2$  es un modelo que sistemáticamente predice más o menos y todo el tiempo resultará “buena” (cerca de 1), incluso si las predicciones fueron incorrectas (Krause et al., 2005). El coeficiente  $bR^2$  permite dar cuenta de la discrepancia en la magnitud de dos señales representadas por “b”, así como su dinámica representada por  $R^2$ .

La línea b es calculada por la línea de regresión entre los datos simulados y observados, forzando que el interceptor sea igual a cero.

$$bR^2 = |b| \cdot R^2 \quad ; \quad |b| < 1$$

→ KGE = Eficiencia de Kling – Gupta: fue desarrollada por Gupta en 2009 para proveer un diagnóstico de la descomposición de la eficiencia de Nash – Sutfficiency (and hence MSE), la cual facilita el análisis de la importancia relativa de sus diferentes componentes (correlación, bias y variabilidad) en el contexto de la modelación hidrológica.

En 2012, Kling propuso una versión revisada de este índice, para asegurar que las razones de BIAS y variabilidad no tengan correlación cruzada.

El cálculo en R Studio para éste índice envuelve 3 componentes:

- $r$  = producto – momento de la correlación del coeficiente de Pearson. Valor ideal 1.
- $\beta$  = Es la relación entre la media de los valores simulados y la media de los observados. El valor ideal es Beta = 1.
- $vr$  = relación de variabilidad, que podría calcularse utilizando la desviación estándar (Alpha) o el coeficiente de variación (Gamma) de sim y obs, dependiendo del valor del método.
  - ❖  $\alpha$  = es la relación entre la desviación estándar de los valores simulados y la de los observados. Valor ideal 1.
  - ❖  $\gamma$  = es la relación del coeficiente de variación (cv) de los valores simulados con los observados. Valor ideal 1.

La eficiencia de Kling – Gupta es en un rango de  $-\infty$  a 1.

$$KGE = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(s[1] \cdot (r - 1))^2 + (s[2] \cdot (vr - 1))^2 + (s[3] \cdot (\beta - 1))^2}$$

→ VE = Eficiencia volumétrica: Se propuso para sortear algunos problemas asociados con la eficacia de Nash-Sutcliffe. Va de 0 a 1 y representa la fracción de agua entregada en el momento adecuado; su cumplimiento representa el partido de niebla volumétrico fraccional (Criss y Winston, 2008).

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{\sum_{i=1}^N y_i}$$

Donde:

$x_i$  = Datos simulados (mm)

$y_i$  = Datos observados (mm)

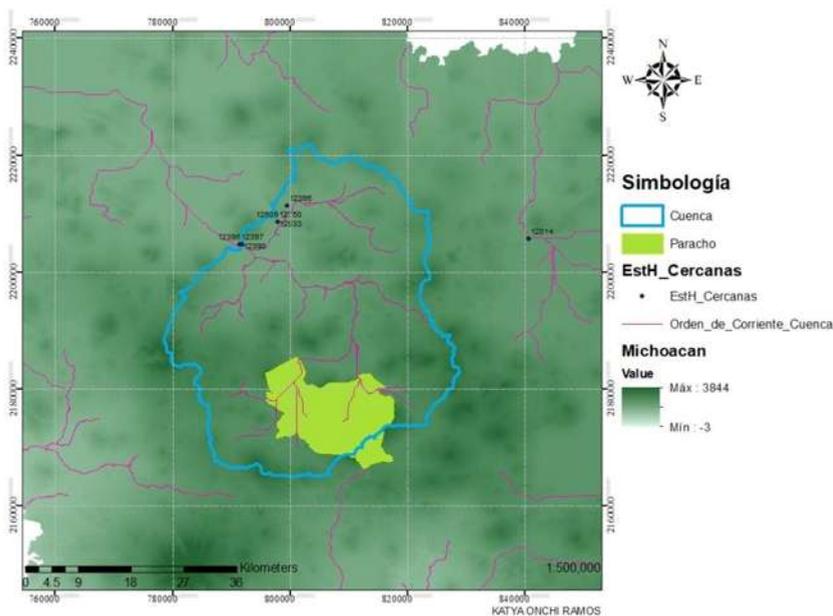
N = Número de datos

sd= Desviación estándar

## 4 MÉTODOS

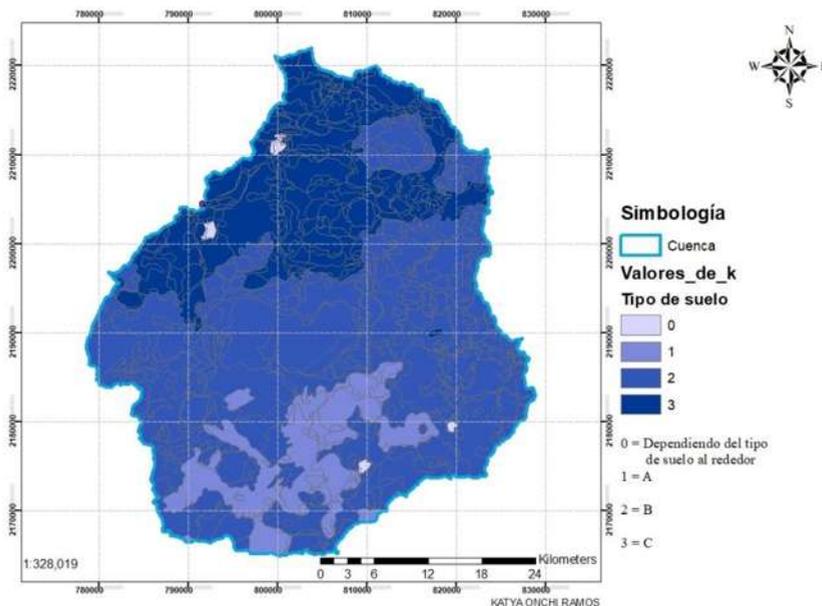
### 4.1 ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el trazo de la cuenca en estudio, de donde es parte el municipio de Paracho, se utiliza ArcGIS, donde se importan los municipios de México obtenidos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), y las estaciones hidrométricas identificando el punto de salida más cercano al municipio, así como las corrientes pluviales de Michoacán, para con ello delimitar la cuenca y comparar los datos que posteriormente simulados.



**Figura 22. Delimitación de la cuenca de cuerdo al municipio y estaciones**

El uso y el tipo de suelo para el uso de la NOM – 011 CONAGUA – 2018 se combinaron, haciendo un mismo mapa para clasificar la cuenca con la *Tabla 5. Valores de k, en función al uso y tipo de suelo.*



*Figura 23. Delimitación de la cuenca de acuerdo al municipio y estaciones*

## 4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS

### 4.2.1 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

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, se usan dos estaciones en el mismo sitio (12396 y 12397) y posteriormente se descarta una, utilizando los datos de la estación 12396 - Camecuaro.

### 4.2.2 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

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, 2017 y 2018); así como los datos de longitud, latitud y elevación.

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

### 4.3 PRUEBAS EN LAS ESTACIONES

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 éste trabajo:

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

#### 4.3.1 LÍMITES 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.

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

#### 4.3.2 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 13** 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 13. Valores de eficiencia en la bondad de ajuste*

#### 4.3.3 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:

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

#### 4.4 LLENADO DE ESTACIONES

##### 4.4.1 PRECIPITACIONES

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, es requerible 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 biceptrices hasta que se intersectan entre si. Con los límites del área en estudio y los que definen las biceptrices 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 las Isoyetas (Iso):** presenta más laboriosidad tanto en tiempo como en recursos materiales. Para su ejecución es necesario disponer, además de las mediciones de precipitaciones en los periodos de interés y de las ubicaciones de los puntos de observación, de las precipitaciones normales de cada estación, del material cartográfico correspondiente y de un conocimiento espacial y atmosférico lo más detallado posible de las áreas consideradas. Al incorporar factores de la zona y de las precipitaciones debería ser el mejor de los cinco métodos, pero a la vez tiene un alto grado de subjetividad dado por la experiencia y acceso a la información que posea el técnico encargado de la construcción de las curvas de dicha zona (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 fuertemente 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

conlleve 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)**

#### 4.4.2 *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 a 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)

#### 4.4.2.1 MATRIZ DE CORRELACIÓN

Se sabe que por datos faltantes en México, de acuerdo a 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 es requerible 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 a 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.

### 4.4.3 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.

#### *4.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN*

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).

#### 4.4.4.1 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 éste 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*

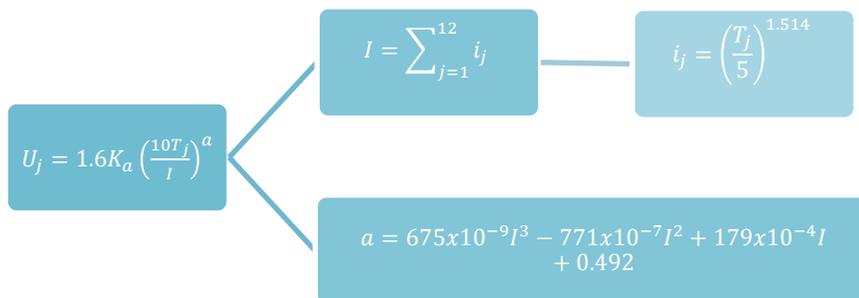
$T_j$  = *temperatura media del mes i en °C*

$K_g$  = *coeficiente global de desarrollo*

$E_t$  = *evapotranspiración durante el ciclo vegetativo (cm)*

#### 4.4.4.2 MÉTODO 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:



Donde:

$U_j$  = uso consuntivo en el mes  $j$  (cm)

$T_j$  = temperatura media en el mes  $j$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$a, I$  = constantes

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

$j$  = número de mes

#### 4.5 MANEJO DE INFORMACIÓN EN ARCGIS

La modelación de la cuenca se llevó en el software ArcGIS, obteniendo una superficie de 1,820 km<sup>2</sup>, como se muestra en la **Figura 4**, además de su orden de corrientes dentro de la cuenca.

De acuerdo al número de estaciones y las corrientes de la cuenca se dividió la cuenca en microcuenas para resultados más certeros y la comparación de los mismos, obteniéndose con ello, 6 y 9 microcuenas dentro de la cuenca, haciendo balance hídrico de ambas. **Figuras 24 y 25**.

Se obtuvieron también características de la cuenca en estudio como se muestra en la **Tabla 14**, teniendo en consideración 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 (km <sup>2</sup> )	1820.00	
Perímetro (km)	213.20	
Centroide (m)	x	804359.04
	y	2191064.86
Pendiente media (%)	15.11	
Longitud del cauce principal (km)	68.34	

**Tabla 14. Características de la cuenca**

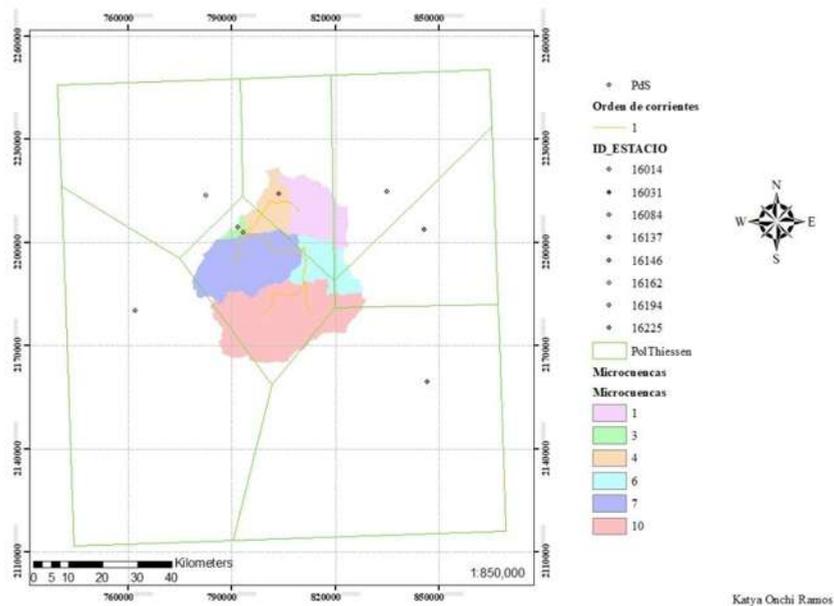


Figura 24. Microcuencas y polígonos de Thiessen 1

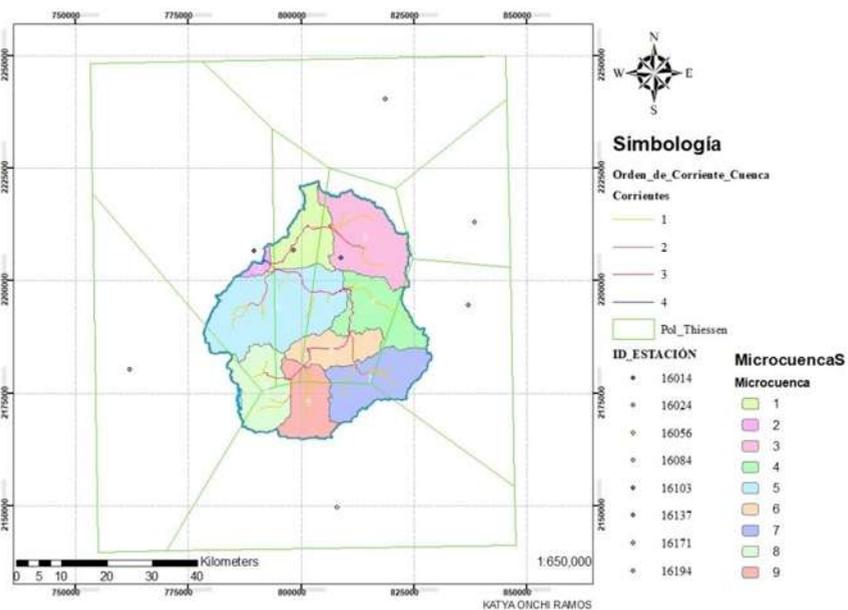


Figura 25. Microcuencas y polígonos de Thiessen 2

#### 4.5.1 ESTACIONES FICTICIAS

Las estaciones ficticias fueron seleccionadas de acuerdo al centroide de cada microcuenca, esto quiere decir que, para una hay 7 y 9 estaciones ficticias asignadas.

Al igual que como se llenaron las precipitaciones, se llenan las estaciones ficticias de acuerdo a los polígonos de Thiessen que tienen influencia en cada microcuenca como se muestra en las **Figuras 24 y 25**.

#### 4.6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica se llevó a cabo para el presente trabajo por medio de dos procedimientos diferentes para su comparación y consecutiva elección:

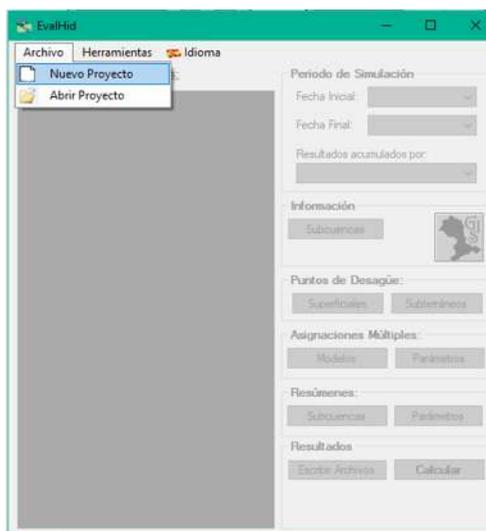
- Modelación con el software EvalHid, mediante el método de Témez.
- Modelación mediante la norma utilizada en Mexico, NOM – 011 – CONAGUA – 2015, utilizando la metodología indirecta de acuerdo al tipo y uso de suelo de la región en estudio.

#### 4.6.1 TÉMEZ DE EVALHID

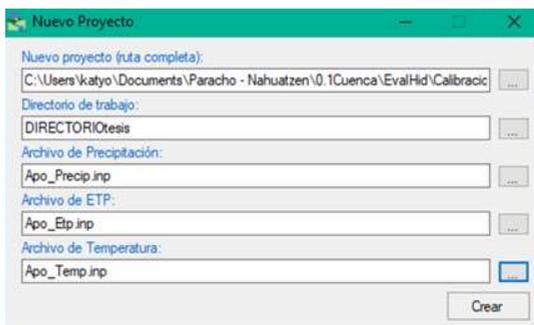
Para la modelación en EvalHid es necesario generar archivos de entrada, ya mencionado en el capítulo 4.1.1, siendo los datos de las estaciones ficticias:

- 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 26.** Ventana principal de EvalHid para generar un nuevo archivo



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

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.

*Figura 27. Introducción de 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.



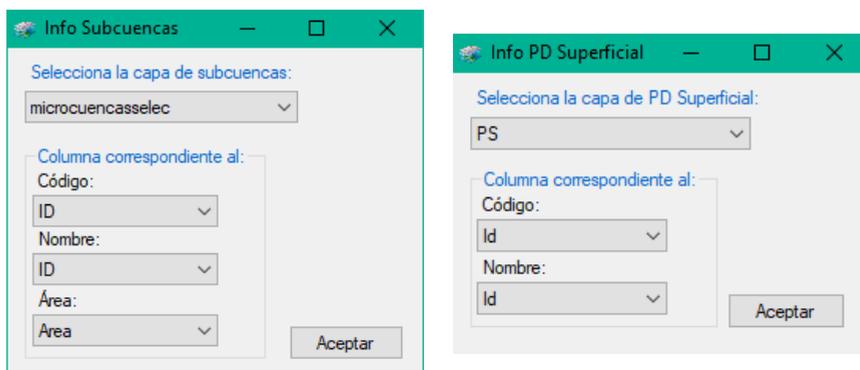
Y dentro del interfaz de EvalHid es necesario ingresar las microcuencas y el punto de salida ya generados en ArcGIS en archivo shape y georreferenciado a coordenadas UTM. Esto se hace mediante el ícono de "+", desplegando la ventana donde se encuentran los archivos.



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

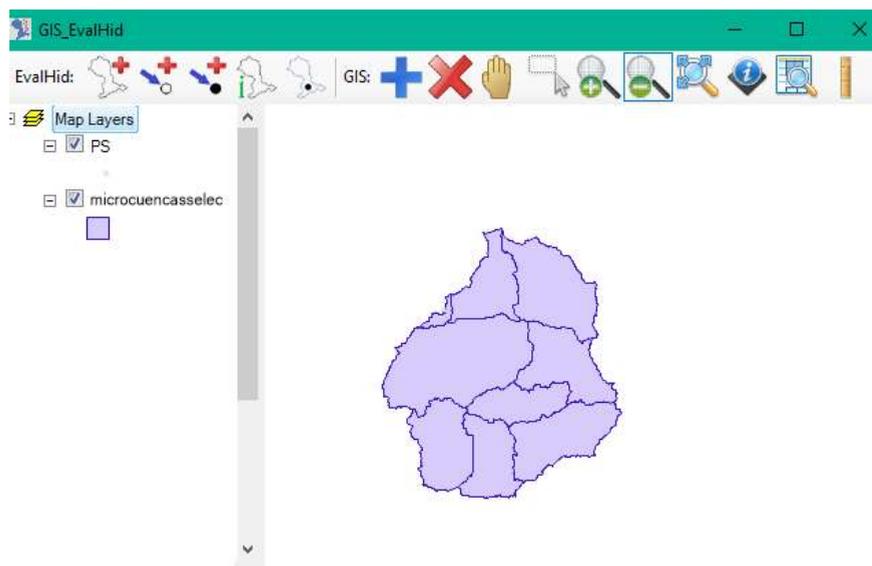


Para poder asignar los parámetros a la cuenca y el punto de salida se seleccionan estos iconos y se despliega lo mostrado en la **Figuras28**.



*Figura 28. 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 como se muestra en la *Figura 29*.



*Figura 29. Ventana de GIS con microcuencas y punto de salida*

Ya 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 microcuenca, como se muestra en la **Figura 30**.

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
1	1	1	1	1	161.64381...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
2	2	Ninguna	Ninguna	Ninguna	17.183790...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
3	3	Ninguna	Ninguna	Ninguna	268.19151...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
4	4	4	Ninguna	Ninguna	208.42829...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
5	5	5	Ninguna	Ninguna	452.4219646	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
6	6	6	Ninguna	Ninguna	133.60779...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
7	7	7	Ninguna	Ninguna	227.32377...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
8	8	8	Ninguna	Ninguna	193.07284...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1
9	9	Ninguna	Ninguna	Ninguna	158.12360...	No	1	1	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	1

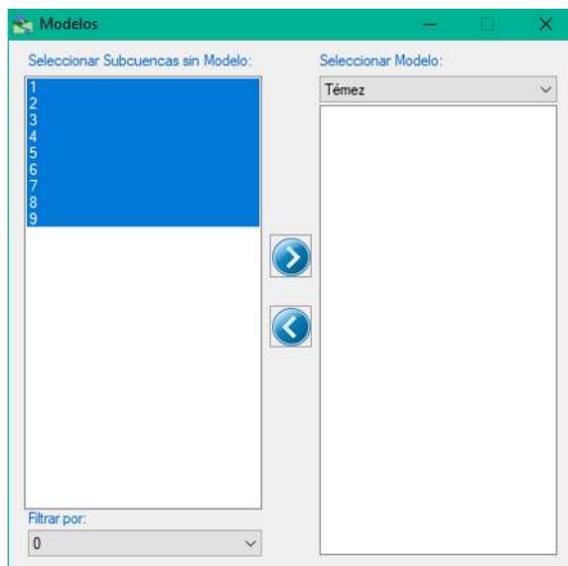
**Figura 30. Ventana de asignación múltiple a cada microcuenca**

Dentro de la misma ventana mostrada en la **Figura 30** se pueden 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 31** y **32**, dando clic en el botón seleccionado.

Parámetros:			Variables de Estado:		
Nombre	Valor	Unidades	Nombre	Valor	Unidades
Hmax	150	mm	H	20	mm
C	0.3	adim	Vi	35	mm
lmax	230	mm			
Alfa	0.23	1/tiempo			

**Figura 31. Parámetros del modelo**



**Figura 32. Ventana de Asignación Múltiple**

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

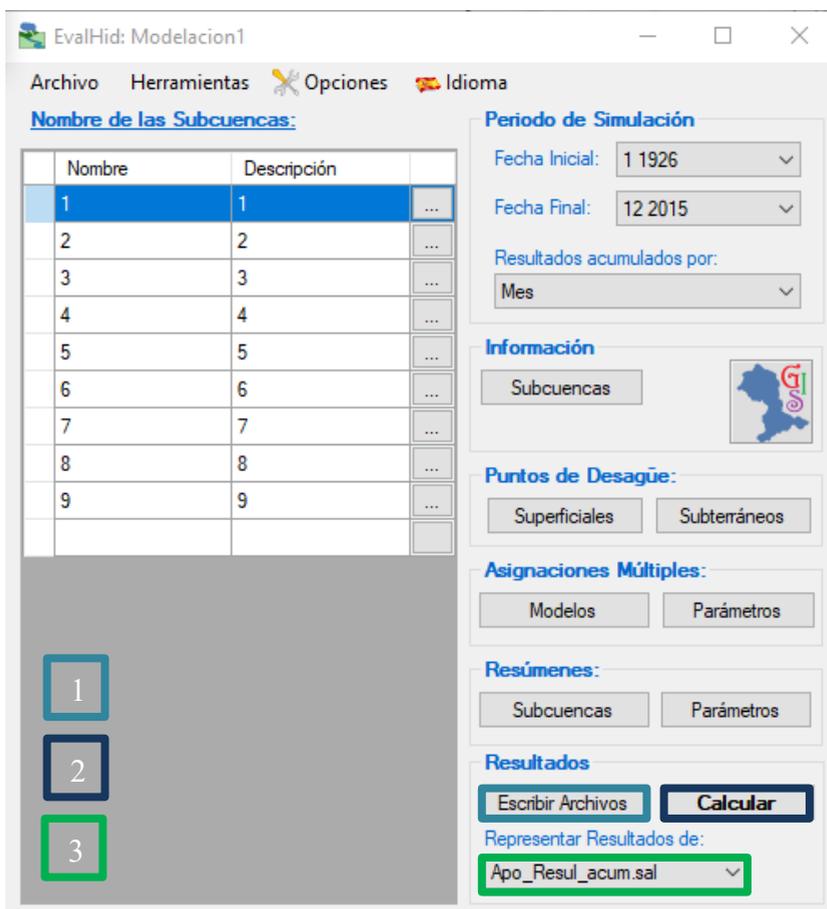
Nombre de la Subcuenca	Hmax	C	Imax	Alfa	H	Vi
1	150	0.3	230	0.23	20	35
2	150	0.3	230	0.23	20	35
3	150	0.3	230	0.23	20	35
4	150	0.3	230	0.23	20	35
5	150	0.3	230	0.23	20	35
6	150	0.3	230	0.23	20	35
7	150	0.3	230	0.23	20	35
8	150	0.3	230	0.23	20	35
9	150	0.3	230	0.23	20	35

**Figura 33. Tabla de resumen de los parámetros**

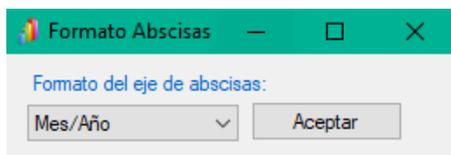
Ya asignados y verificados los parámetros, se prosigue a especificar el periodo de la modelación y la escala por mes de los

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 34*.



*Figura 34. Pasos para la modelación*

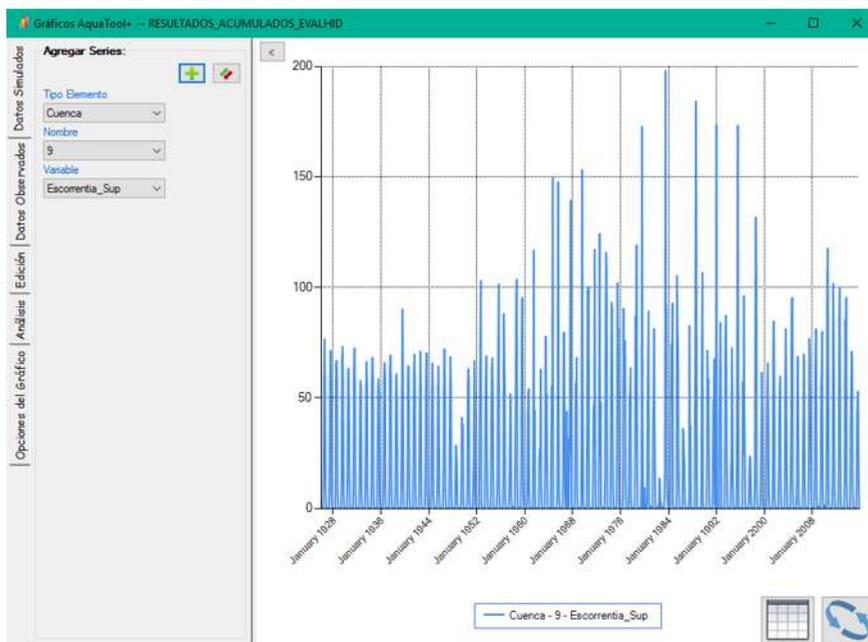


Ya calculado y seleccionado la representación de resultados en “Apo\_Resul\_acum.sal” se despliega la ventana para definir el formato de los ejes en Mes/Año y se acepta.

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 35**.



*Figura 35. Ventana de grafico de resultados*

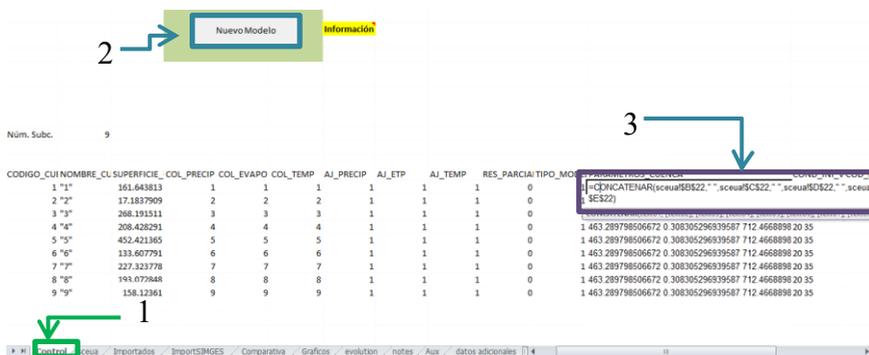
Llevar a cabo la simulación en EvalHid no tiene complejidad, esta radica en la posterior traslación a la herramienta de calibración para encontrar los parámetros que se adecuen al comportamiento real de la cuenca en el mismo periodo.

#### 4.6.1.1 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 36**.

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 36. 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 37**.

<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

Figura 37. Series de resultados EvalHid y series de datos estación 12396

Ya verificados los datos de EvalHid y los datos de la estación hidrométrica en Hm<sup>3</sup>, 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 38**, 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		LN(sim)-LN(obs)		LN(obs)-LN(obs_med)	
Fecha	Año	Cuenta	Mes	Observado	Simulado	Diferencia (E-D)2	Obs-Qobs_m	Qsim-Qsim_me	B^2	A^2	A*B	(LN(sim)-LN(obs))	(LN(obs)-LN(obs_med))					
oct-43	1	10	10	27.76	11.1311	256.8615	6.834124	-9.37823	46.70526	93.56505	-68.1325	0.795527	0.08402839					
nov-43	1	1	11	16.71	10.28547	41.50619	-3.61588	-10.8439	13.07456	117.5893	33.21004	0.237265	0.03837976					
dic-43	1	12	12	13.37	10.24324	9.75163	-6.95788	-10.8661	48.41203	118.0719	75.60489	0.070806	0.17562713					
ene-44	1	1	1	11.70	10.22706	2.175448	-8.62788	-10.8863	74.44024	116.5544	93.34263	0.01617	0.305306961					
feb-44	1	2	2	10.78	10.18893	0.342307	-9.53368	-10.9104	91.00523	113.0368	104.0638	0.003111	0.40161117					
mar-44	1	3	3	11.41	10.17683	1.516243	-8.91488	-10.9325	79.47501	119.5195	97.46186	0.013062	0.333379178					
abr-44	1	4	4	9.86	10.15478	0.087486	-10.4649	-10.9545	109.5136	120.0021	114.638	0.000874	0.0458074					
may-44	1	5	5	12.55	10.13278	5.828458	-7.77688	-10.9765	60.47979	120.4846	85.36325	0.045689	0.232624566					
jun-44	1	6	6	15.67	10.11993	23.89574	-4.65888	-10.91	21.68649	113.0287	50.89665	0.194242	0.067723963					
jul-44	1	7	7	21.63	13.62244	64.08959	1.304124	-7.46889	1.70074	98.0535	-9.78383	0.213691	0.003981963					
ago-44	1	8	8	31.02	18.57077	154.9335	10.63412	-2.53856	114.3643	6.44428	-27.1477	0.263145	0.17873479					
sep-44	1	9	9	26.83	18.63447	67.08478	6.501124	-2.47486	42.26462	6.124325	-16.0694	0.132729	0.077026655					
oct-44	2	10	10	24.04	11.85566	165.8001	3.718124	-9.34367	13.82445	98.87655	-36.9718	0.588219	0.02822575					
nov-44	2	11	11	13.01	10.58888	5.847304	-7.31888	-10.5224	53.56594	110.7219	77.02149	0.042319	0.199326232					
dic-44	2	12	12	11.37	10.51503	0.725853	-8.95688	-10.5943	80.22562	112.2392	94.89181	0.006107	0.337657682					
ene-45	2	1	1	10.62	10.43239	0.016739	-9.70168	-10.6169	94.12539	112.7194	103.0042	0.000051	0.42102576					
feb-45	2	2	2	8.57	10.46989	3.612622	-11.7549	-10.6396	158.1771	113.2019	125.0676	0.040133	0.745871533					
mar-45	2	3	3	9.32	10.44701	1.270152	-11.0039	-10.6623	121.0853	113.685	117.3268	0.013031	0.607819654					
abr-45	2	4	4	8.88	10.42437	2.39126	-11.4459	-10.685	131.0081	114.1683	122.2987	0.025782	0.685937904					
may-45	2	5	5	12.11	10.40179	2.921399	-8.21288	-10.7075	67.45133	114.6514	87.93968	0.023145	0.26799407					
jun-45	2	6	6	13.57	10.48088	9.562443	-6.75088	-10.6288	45.57432	112.9682	71.75288	0.066946	0.162382862					
jul-45	2	7	7	23.69	14.38918	75.63468	3.361124	-8.1215	11.29716	37.48948	-20.5739	0.209377	0.029422743					
ago-45	2	8	8	35.00	18.47385	272.3814	14.67212	-2.63548	215.2712	6.945747	-38.6681	0.408161	0.295322006					
sep-45	2	9	9	23.86	16.25353	57.88682	3.538124	-4.8558	12.51832	23.57878	-17.1804	0.147437	0.025757096					
oct-45	3	10	10	24.08	11.50461	158.0147	3.751124	-9.60472	14.07093	92.25062	-36.0285	0.545266	0.02868852					
nov-45	3	11	11	14.40	10.76284	13.25805	-5.91988	-10.3465	35.04493	107.0498	61.24933	0.084916	0.18534478					
dic-45	3	12	12	11.86	10.73582	0.845443	-8.66488	-10.3698	75.08007	107.5329	89.8531	0.006748	0.306816341					
ene-46	3	1	1	10.28	10.71626	0.152072	-10.0459	-10.3351	100.3196	100.0159	104.4075	0.001144	0.464631924					
feb-46	3	2	2	9.43	10.69305	1.593295	-10.8939	-10.4163	118.6705	108.4989	113.4736	0.0189	0.589662042					
mar-46	3	3	3	10.69	10.66989	0.046704	-9.43788	-10.4394	89.0735	108.9819	98.52612	0.000402	0.389786903					
abr-46	3	4	4	10.54	10.64677	0.0114	-9.78388	-10.4526	95.72422	109.4651	102.3644	0.000102	0.431142336					
may-46	3	5	5	11.41	10.62371	0.162552	-9.91388	-10.4856	79.45718	109.3482	93.4675	0.005098	0.333277974					
jun-46	3	6	6	17.13	10.78525	40.53551	-3.19188	-10.3441	10.18807	107	33.01701	0.25873	0.029188819					
jul-46	3	7	7	27.09	14.38285	161.5733	6.770124	-8.72648	45.83458	45.24551	-45.5391	0.401034	0.082664225					
ago-46	3	8	8	32.71	22.72044	99.73138	12.38312	1.61111	153.3418	2.59588	19.96059	0.132731	0.226377006					
sep-46	3	9	9	60.06328	60.06328	0.000000	0.000000	0.000000	76.91508	0.055047	2.057859	0.095953	0.128890192					

**CALIBRACION**

F1	0.475577
F2	0.600348
F3	0.747553
F4	0.396506
Fmed	0.705858
PBIAS	382.2758

1956-1959

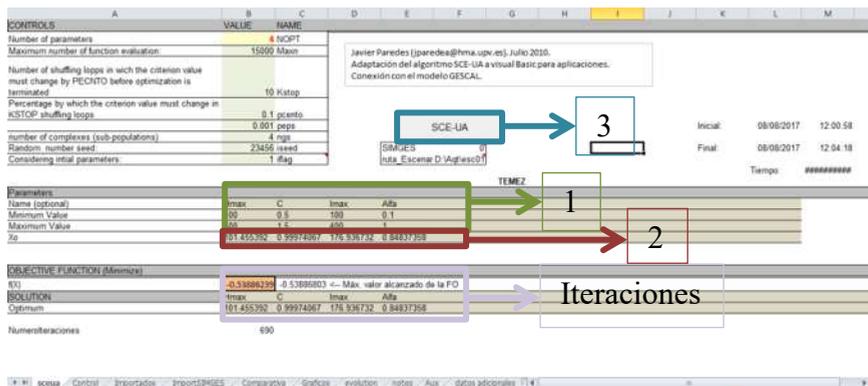
**VALIDACION**

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

Figura 38. Hoja de comparativa, indicando celdas importantes de verificar

Verificado lo anterior, se sitúa en la pestaña “sceua”, donde se establecen los límites de los parámetros Hma,x, 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 39**.



**Figura 39. Hoja sceua, 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 ( $X_0$ ) y la siguiente iteración tendrá que igualar la magnitud. Si los valores óptimos llegan al límite de  $H_{max}$  e  $I_{max}$ , 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 41 años hidrológicos, de octubre de 1943 a septiembre de 1984, y la validación de 2 años, de octubre de 2000 a septiembre de 2002.

Se debe considerar que para el presente trabajo se consideró la cuenca subdividida de dos maneras diferentes, por lo que se siguió el mismo procedimiento en ambos casos, tanto para calibración como validación de resultados.

### 4.6.2 NOM – 011 – CONAGUA – 2015

De acuerdo al procedimiento para la modelación mediante la Norma, se unen los mapas de tipo y uso de suelo en ArcGIS, para obtener la combinación de ambos parámetros y asignar a cada microcuenca el valor de k, con apoyo de la **Tabla 5**.

La modelación se lleva a cabo con la cuenca dividida en 9 microcuencas, esto quiere decir que, el mapa de uso y tipo de suelo se subdivide para cada microcuenca; posterior a esto se exportan las tablas de ArcGIS con el área ocupada por cada valor para su posterior cálculo como se muestra en la **Figura 40**.

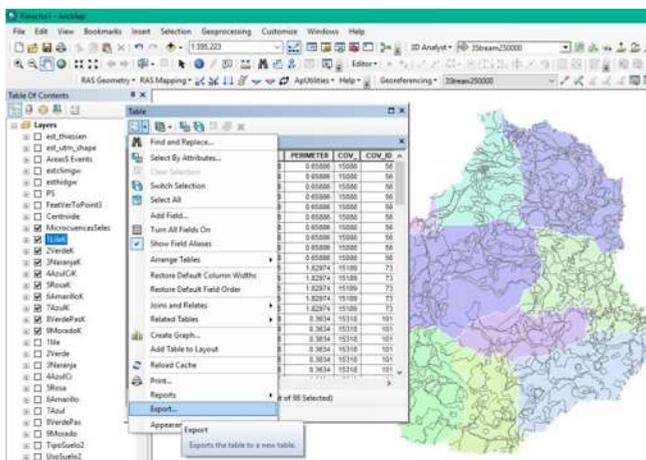


Figura 40. Exportar tabla desde ArcGIS

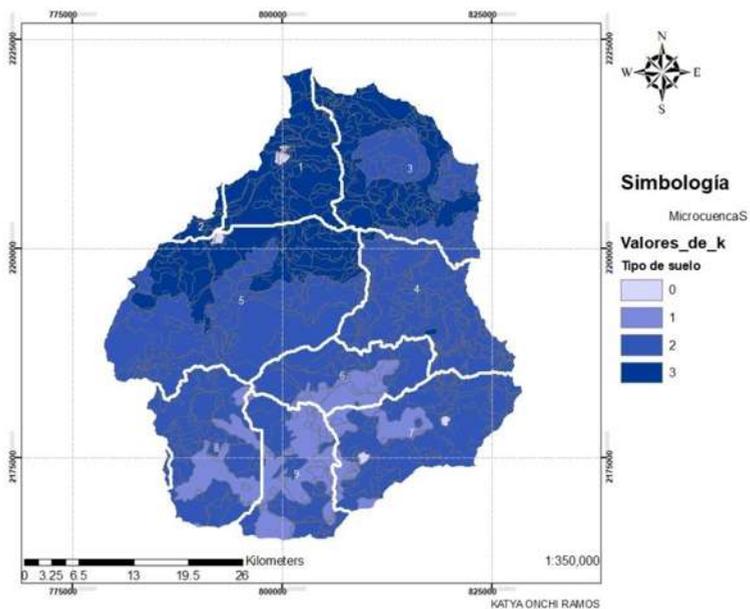


Figura 41. Mapa de asignación de k a cada microcuenca

Ya exportados a Excel, se prosigue a hacer una hoja de cálculo, en la que se asigna el porcentaje de área que ocupa dentro de la microcuenca y el valor de k de acuerdo a la tabla de la norma, como se muestra en la **Tabla 15**.

TEX	OBSERVACION	DESCRIPCIÓN	AREA 2	% Área	K	% K
3		BOSQUE DE ENCINO	0.6529	3.80%	0.24	0.0091
3		PASTIZAL INDUCIDO	0.0953	0.55%	0.28	0.0016
3		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	2.3032	13.40%	0.30	0.0402

**Figura 42. Muestra del cálculo de k en la microcuenca**

ID	Area	%	Perimetro	x	y	Elevación	k
1	161.64	8.86%	72.24	801051.87	2209631.65	1783	0.28
2	17.18	0.94%	28.61	790686.24	2203245.55	1720	0.29
3	268.19	14.70%	87.89	814260.86	2209078.60	2090	0.26
4	208.43	11.42%	89.97	816781.82	2192885.81	2383	0.21
5	452.42	24.79%	103.07	794379.11	2193636.84	1968	0.24
6	133.61	7.32%	65.07	807538.99	2184930.90	2156	0.17
7	227.32	12.46%	78.83	816033.49	2177868.99	2219	0.16
8	193.07	10.58%	68.99	791364.31	2176132.65	2502	0.23
9	158.12	8.67%	68.41	801333.40	2173073.53	2240	0.19

**Tabla 15. Resultado de K para cada microcuenca**

El resultado de k para cada microcuenca se obtiene de la suma en toda el área en la cuenca y posteriormente se realizan los cálculos en cada microcuenca del volumen de escurrimiento anual, en el mismo periodo de la calibración y la validación, y tomando en cuenta que este procedimiento es anual y no mensual.

Un ejemplo de los cálculos para el volumen de escurrimiento anual para la microcuenca 1, se presentan en la **Tabla 16**.

Calibración						
Año	P (mm)	Ce	Pe (mm)	Ve (m3)	Ve (hm3)	
1	1944	632.63	0.14	89.90	14531241.83	14.53
2	1945	697.24	0.15	105.43	17042871.17	17.04
3	1946	755.72	0.16	120.51	19480131.21	19.48
4	1947	877.48	0.18	155.00	25055498.93	25.06
5	1948	704.92	0.15	107.36	17353971.13	17.35
6	1949	680.98	0.15	101.41	16392846.11	16.39
7	1950	793.42	0.16	130.74	21134030.25	21.13
8	1951	685.09	0.15	102.42	16556162.04	16.56
9	1952	959.44	0.19	180.58	29189001.44	29.19
10	1953	784.31	0.16	128.24	20728765.19	20.73
11	1954	1165.20	0.22	253.13	40916488.87	40.92

**Tabla 16. Ejemplo del cálculo del volumen de escurrimiento**

Donde:

P = Precipitación anual (mm)

$$Ce = \text{Coeficiente de escurrimiento} > 0.15 = \frac{K \cdot (P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5}$$

Pe = Escurrimiento (mm) = Ce · P

Ve = Volumen de escurrimiento (hm<sup>3</sup>) = Pe · A

Una vez obtenido el volumen de escurrimiento en cada microcuenca para el periodo de calibración y validación, se hace la sumatoria de todas las microcuencas, **Tabla 17 y 18**.

## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

Calibración										
Ve (hm <sup>3</sup> )										
Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	14.53	1.57	40.02	21.00	34.41	8.90	13.61	24.71	4.00	162.74
2	17.04	1.51	41.41	19.56	34.60	9.47	11.90	25.16	21.05	181.71
3	19.48	2.01	43.17	22.50	42.60	9.80	15.46	27.42	21.41	203.86
4	25.06	2.59	45.89	22.83	52.71	10.71	15.88	30.50	22.38	228.55
5	17.35	2.35	15.82	8.63	41.01	2.81	11.84	31.92	15.18	146.92
6	16.39	1.63	14.77	6.19	28.86	2.80	7.73	21.59	15.18	115.15
7	21.13	2.34	34.98	17.56	50.69	7.62	14.16	44.00	19.85	212.34
8	16.56	1.86	26.63	11.60	34.61	5.63	9.04	21.42	17.94	145.30
9	29.19	3.15	54.64	28.17	63.60	13.26	18.70	33.10	24.34	268.13
10	20.73	2.32	35.89	16.58	44.38	8.12	11.68	24.97	20.22	184.88
11	40.92	2.82	43.51	19.03	58.76	11.34	14.80	32.42	23.75	247.35
12	35.80	4.03	45.00	23.36	76.26	10.90	19.22	40.33	23.03	277.92
13	32.00	3.96	53.08	27.73	75.08	13.00	19.24	35.74	24.26	284.10
14	11.98	0.99	16.61	8.32	19.64	3.39	8.40	16.97	15.58	101.87
15	41.69	4.27	63.65	37.14	85.48	17.18	26.16	39.41	27.49	342.46
16	42.46	4.79	70.95	39.84	93.90	17.89	28.09	41.84	27.92	367.69
17	17.21	1.82	24.44	12.78	34.89	5.28	11.74	24.42	17.68	150.27
18	38.47	3.17	40.84	21.12	62.30	10.65	17.03	30.64	20.79	245.00
19	22.47	2.75	35.97	20.18	50.73	8.02	13.49	21.83	12.82	188.26
20	29.93	3.38	41.03	20.45	61.91	10.01	14.64	27.10	20.07	228.52
21	36.41	3.64	57.48	28.31	72.34	14.19	19.71	35.30	26.01	293.39
22	25.83	2.86	58.63	35.05	58.78	13.67	23.83	28.70	21.68	269.03
23	25.59	3.20	52.02	31.23	61.42	12.09	23.33	29.33	22.97	261.18
24	30.80	3.44	51.24	29.43	67.58	11.97	28.50	43.46	33.84	300.26
25	35.06	3.24	53.22	30.18	64.11	12.69	25.73	32.11	26.22	282.56
26	23.56	2.03	32.10	16.41	40.41	7.11	15.47	26.72	21.04	184.84
27	25.04	3.11	41.41	21.97	59.07	9.58	18.44	35.00	25.27	238.90
28	25.24	2.33	32.21	16.33	44.76	7.13	14.65	25.82	18.69	187.16
29	28.07	2.67	39.61	20.73	53.65	9.59	18.12	34.41	25.48	232.33

30	25.55	2.62	59.66	33.70	56.02	14.38	24.43	33.65	29.84	279.85
31	33.56	4.59	57.04	30.75	84.92	14.16	22.73	40.23	29.01	317.00
32	28.11	3.31	62.88	35.03	67.30	15.46	24.00	35.66	29.57	301.32
33	22.01	2.56	39.71	21.26	49.86	9.13	14.80	26.59	18.40	204.31
34	26.70	2.58	88.12	51.67	60.60	21.59	30.95	32.15	31.93	346.29
35	29.98	4.01	48.04	26.63	73.36	10.84	22.72	37.24	24.89	277.71
36	27.83	2.35	55.83	29.76	52.06	13.62	18.08	27.46	20.55	247.54
37	28.95	4.05	53.65	28.93	75.08	13.10	18.49	32.28	22.31	276.85
38	21.27	2.17	41.45	22.69	45.59	9.29	18.24	31.75	22.87	215.32
39	16.95	2.00	17.22	8.03	34.78	3.39	6.96	19.58	10.34	119.25
40	33.58	4.44	124.72	72.70	97.01	30.01	42.31	44.93	39.76	489.46
41	23.87	2.42	42.13	22.74	49.24	9.25	22.96	37.42	31.05	241.09

**Tabla 17. Sumatoria del volumen de escurrimiento, calibración**

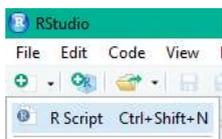
Validación										
Ve (hm <sup>3</sup> )										
#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	25.59	3.19	45.47	27.15	60.70	10.05	22.88	32.65	21.89	249.59
2	22.61	2.36	29.46	14.75	44.32	6.65	13.00	26.53	19.16	178.84

**Tabla 18. Sumatoria del volumen de escurrimiento, validación**

#### 4.7 COMPARATIVA DE LOS MODELOS, R STUDIO

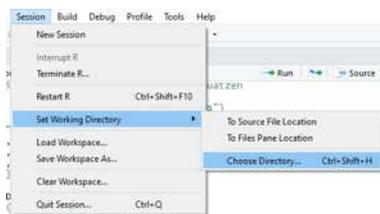
La comparativa de los resultados de volumen de escurrimiento se hicieron a través del software R studio, con la herramienta hidroGOF que es utilizada especialmente en parámetros hidrológicos.

La herramienta es usada para conocer la bondad de cada modelo hidrológico, su nombre original el Numerical *Goodness – Of – fit* Measures. Dicha bondad de ajuste utiliza más parámetros de los usados en los indicadores de ajuste en EvalHid.



Para obtener dichos ajustes es necesario entrar al programa y establecer la hoja de trabajo llamada “R Script”.

Posteriormente se establece la carpeta en la que se estará trabajando, como se extraerán archivos, es necesario que pertenezca a la misma carpeta.



Una vez establecida la carpeta de trabajo se procede a activar la herramienta de hidroGOF e indicar los comandos para generar la bondad de ajuste a cada modelación como se muestra en la **Figura 43**.

# EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

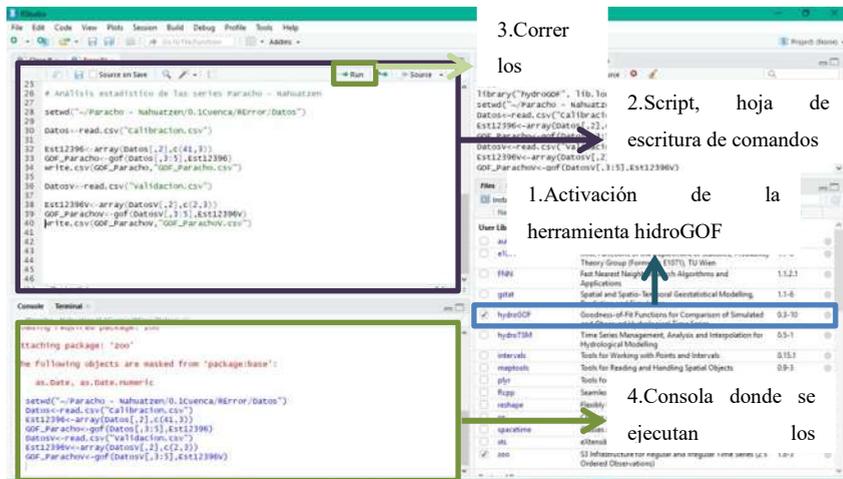


Figura 43. Introducción de comandos en R studio

Así mismo, se guardaron los archivos creados como csv, para su comparación en Excel y se mostraron en la consola del programa.

	Eval.Hid...Témez.2017	Eval.Hid...Témez	NOM...011.CONAGUA...2015
<b>&gt; GOF_Paracho</b>			
ME	-7.45	-18.62	-3.68
MAE	24.31	39.28	41.49
MSE	928.49	2523.92	2949.09
RMSE	30.47	50.24	54.31
NRMSE %	69.20	114.10	123.30
PBIAS %	-3.10	-7.60	-1.50
RSR	0.69	1.14	1.23
rSD	1.06	1.71	1.72
NSE	0.51	-0.33	-0.56
mNSE	0.35	-0.05	-0.11
rNSE	0.45	-0.36	-0.60
d	0.87	0.81	0.76
md	0.66	0.60	0.56
rd	0.86	0.81	0.76
cp	0.43	-0.53	-0.89
r	0.78	0.81	0.70
R2	0.62	0.66	0.49
bR2	0.59	0.62	0.48
KGE	0.77	0.26	0.22
VE	0.90	0.84	0.83
<b>&gt; GOF_Parachov</b>			
	Eval.Hid...Témez.2017	Eval.Hid...Témez	NOM...011.CONAGUA...2015
ME	-4.26	37.40	-33.05
MAE	9.74	37.40	33.05
MSE	113.06	1507.13	1833.81
RMSE	10.63	38.82	42.82
NRMSE %	92.40	337.20	372.00
PBIAS %	-1.70	15.10	-13.40
RSR	0.92	3.37	3.72
rSD	2.20	2.28	4.35
NSE	-0.71	-21.74	-26.67
mNSE	-0.20	-3.59	-3.06
rNSE	-0.79	-21.04	-28.56
d	0.84	0.38	0.39
md	0.63	0.18	0.24
rd	0.83	0.40	0.34
cp	0.26	-1.75	-12.71
r	1.00	1.00	1.00

*Figura 44. Bondad de ajuste para cada modelo en R studio*

## 5 RESULTADOS

### 5.1 GENERALES

La descripción de la zona de estudio se realiza mediante la utilización del programa ArcGIS, donde como resultado se obtuvieron los mapas de:

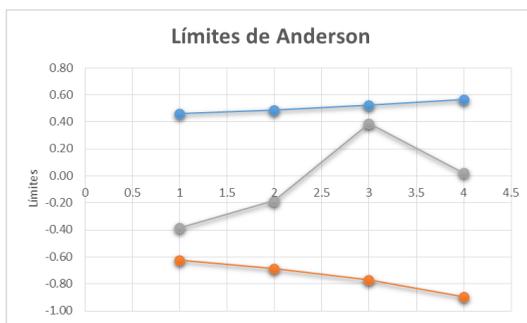
- Ubicación ..... . **Figura 3**
- Área de la cuenca de 1820 km<sup>2</sup>..... . **Figura 4**
- Municipios dentro de la cuenca..... . **Figura 5**
- Orografía e hidrografía..... . **Figuras 6 y 8**
- Clima en Michoacán y en la cuenca... . **Figura 9**
- Edafología y geología..... . **Figuras 11 y 12**
- Uso de suelo..... . **Figuras 13**
- Localidades dentro de la cuenca..... . **Figura 15**
- Población..... . **Figura 15**
- Mapa para los valores de K..... . **Figura 23**

5.2 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Como ya se mencionó, las estaciones presentan inconsistencias y vacíos, por lo que se deben efectuar pruebas que nos validen si los datos son homogéneos e independientes.

Además, se observó en la descarga de datos que las estaciones deben cumplir con un periodo de años mayor a 25 años, por los que de acuerdo a la **Figura 47** se muestra que existen muchas estaciones cerca y dentro de la cuenca.

En la **Tabla 20** se muestra un resumen de las pruebas de las estaciones, así como las pruebas a la estación 16103 en la gráfica y figuras siguientes:



**Gráfica 1. Independencia con Límites de Anderson**

AÑO	PMA				
1973	1436	M	1		
1974	1284.4	M	1	DATOS	14
1975	1099.5	L	2	CAMBIOS	9
1976	1530.6	M	3		
1977	1888.6	L	4		
1978	1117	L	4		
1979	1196.6	M	5	SI PASA	
1980	1216.5	M	5		
1981	906.2	L	6		
1982	711	L	6	DATO	14
1983	1939.1	M	7	MINIMO	5
1984	778.6	L	8	MAXIMO	10
1985	996.4	L	8		
1986	1323.2	M	9		

Figura 45. Homogeneidad con Secuencias

AÑO	PMA				
1973	1436	M			
1974	1284.4	M	5	DATOS	14
1975	1098.5	L	C	CAMBIOS	8
1976	1530.6	M	C	SIGUE	5
1977	1888.6	L	C		
1978	1117	L	5	SI PASA	
1979	1196.6	M	C		
1980	1216.5	M	S		
1981	906.2	L	C		
1982	711	L	S	S-C	-3
1983	1939.1	M	C	N-1	13
1984	778.6	L	C	(N-1)%	3.61
1985	996.4	L	S		
1986	1323.2	M	C		

$S - C = 0 \pm (N - 1)^{1/2}$

Figura 46. Homogeneidad con Helmert

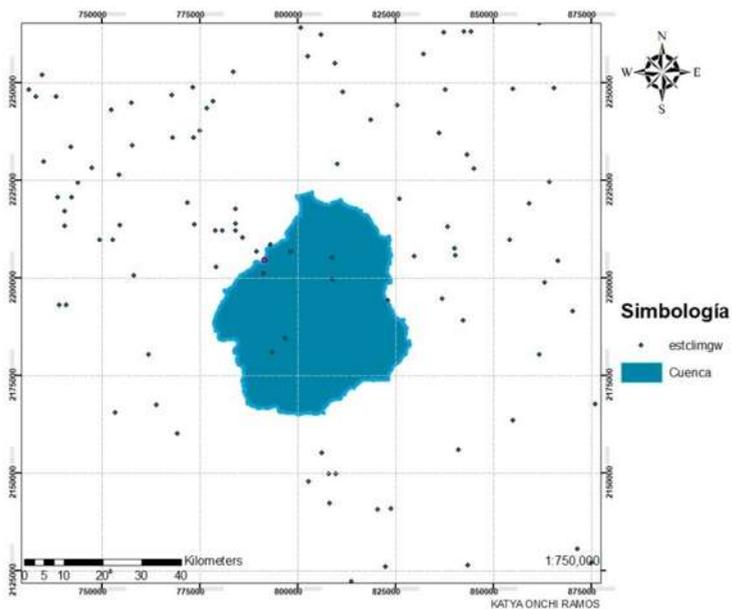


Figura 47. Estaciones meteorológicas dentro y cerca de la cuenca

La correlación de las estaciones es de gran importancia para el llenado en IDW, por lo que en la *Tabla 19* se muestra la correlación entre estaciones, donde el color azul indica aquellas que pueden ser usadas para el llenado con otras.

	16005	16014	16024	16031	16056	16060	16073	16084	16087	16094	16103	16108	16117	16118	16127	16137	16146	16159	16162	16225	16194	16171
16005	1.00	0.89	0.90	0.89	0.84	0.88	0.84	0.84	0.86	0.85	0.86	0.87	0.91	0.86	0.86	0.91	0.74	0.97	0.87	0.00	0.72	0.86
16014	0.89	1.00	0.88	0.93	0.86	0.91	0.86	0.80	0.82	0.86	0.85	0.90	0.90	0.82	0.86	0.93	0.82	0.88	0.89	0.92	0.90	0.91
16024	0.90	0.88	1.00	0.88	0.85	0.89	0.85	0.75	0.77	0.83	0.83	0.88	0.93	0.85	0.84	0.89	0.76	0.90	0.86	0.89	0.84	0.83
16031	0.89	0.93	0.88	1.00	0.85	0.92	0.86	0.75	0.80	0.86	0.82	0.90	0.90	0.84	0.84	0.91	0.79	0.85	0.91	0.87	0.86	0.89
16056	0.84	0.86	0.85	0.85	1.00	0.86	0.90	0.73	0.88	0.84	0.77	0.88	0.82	0.82	0.94	0.87	0.88	0.83	0.82	0.82	0.91	0.84
16060	0.88	0.91	0.89	0.92	0.86	1.00	0.87	0.76	0.77	0.90	0.82	0.94	0.89	0.83	0.86	0.91	0.79	0.87	0.88	0.87	0.89	0.86
16073	0.84	0.86	0.85	0.86	0.90	0.87	1.00	0.71	0.87	0.85	0.81	0.91	0.83	0.79	0.88	0.87	0.84	0.83	0.83	0.83	0.89	0.83
16084	0.84	0.80	0.75	0.75	0.73	0.76	0.71	1.00	0.75	0.76	0.72	0.72	0.80	0.71	0.73	0.77	0.67	0.74	0.77	0.86	0.77	0.84
16087	0.86	0.82	0.77	0.80	0.88	0.77	0.87	0.75	1.00	0.72	0.80	0.87	0.77	0.79	0.85	0.80	0.81	0.74	0.78	0.77	0.81	0.99
16094	0.85	0.86	0.83	0.86	0.84	0.90	0.85	0.76	0.72	1.00	0.79	0.90	0.83	0.76	0.83	0.86	0.75	0.81	0.84	0.81	0.83	0.87
16103	0.86	0.85	0.83	0.82	0.77	0.82	0.81	0.72	0.80	0.79	1.00	0.81	0.84	0.79	0.76	0.86	0.68	0.79	0.81	0.91	0.80	0.86
16108	0.87	0.90	0.88	0.90	0.88	0.94	0.91	0.72	0.87	0.90	0.81	1.00	0.10	0.83	0.87	0.92	0.84	0.88	0.88	0.93	0.88	0.93
16117	0.91	0.90	0.93	0.90	0.82	0.89	0.83	0.80	0.77	0.83	0.84	0.10	1.00	0.84	0.86	0.89	0.71	0.92	0.87	0.85	0.90	0.88
16118	0.86	0.82	0.85	0.84	0.82	0.83	0.79	0.71	0.79	0.76	0.79	0.83	0.84	1.00	0.79	0.84	0.80	0.82	0.80	0.80	0.81	0.89
16127	0.86	0.86	0.84	0.84	0.94	0.86	0.88	0.73	0.85	0.83	0.76	0.87	0.86	0.79	1.00	0.86	0.87	0.83	0.81	0.83	0.87	0.86
16137	0.91	0.93	0.89	0.91	0.87	0.91	0.87	0.77	0.80	0.86	0.86	0.92	0.89	0.84	0.86	1.00	0.80	0.88	0.88	0.89	0.90	0.91
16146	0.74	0.82	0.76	0.79	0.88	0.79	0.84	0.67	0.81	0.75	0.68	0.84	0.71	0.80	0.87	0.80	1.00	0.84	0.83	0.85	0.88	0.70
16159	0.97	0.88	0.90	0.85	0.83	0.87	0.83	0.74	0.74	0.81	0.79	0.88	0.92	0.82	0.83	0.88	0.84	1.00	0.84	0.89	0.84	0.00
16162	0.87	0.89	0.86	0.91	0.82	0.88	0.83	0.77	0.78	0.84	0.81	0.88	0.87	0.80	0.81	0.88	0.83	0.84	1.00	0.88	0.84	0.92
16225	0.00	0.92	0.89	0.87	0.82	0.87	0.83	0.86	0.77	0.81	0.91	0.93	0.85	0.80	0.83	0.89	0.85	0.89	0.88	1.00	0.86	0.00
16194	0.72	0.90	0.84	0.86	0.91	0.89	0.89	0.77	0.81	0.83	0.80	0.88	0.90	0.81	0.87	0.90	0.88	0.84	0.84	0.86	1.00	0.00
16171	0.86	0.91	0.83	0.89	0.84	0.86	0.83	0.84	0.99	0.87	0.86	0.93	0.88	0.89	0.86	0.91	0.70	0.00	0.92	0.00	0.00	1.00

*Tabla 19. Matriz de correlación entre estaciones*

## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

	ESTACIÓN	NOMBRE	COORDENADAS			PMA	PRUEBAS		
			X	Y	Z		ANDERSON	SECUENCIAS	HELMERT
1	16005	ANGAMACUITRO,(SMN)	845139.65	2225993.7	1685	758.432	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
2	16014	CAMECUARO, MICH	793181.44	2202882.7	1708	889.52982	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
3	16024	CORRALES, MICH	823999.19	2236670.3	1730	735.28378	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
4	16031	CHAPARACO, MICH	782526.35	2213787	1589	788.93333	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
5	16056	JICALAN (CFE), MICH	804602.48	2147676.3	1610	1414.4286	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
6	16060	LA ESTAZUELA, MICH	771884.34	2224696.3	2445	785.12426	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
7	16073	LOS LIMONES (CFE), MICH	762242.95	2169165.4	1175	1014.9814	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
8	16084	PANINDICUARO, MICH	834884.75	2214709.9	1852	824.71887	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
9	16087	PATZCUARO, MICH	856945.77	2159717.9	2140	955.79897	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
10	16094	PRESA GUARACHA, MICH	751119.48	2213308.6	1580	766.60841	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
11	16103	PUREPERO, MICH	814137.29	2203244	2083	1066.1306	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
12	16108	SAN CRISTOBAL, MICH	771711.1	2235771.4	1530	817.695	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
13	16117	SANTA FE DEL RIO, MICH	834458.98	2236869	1681	724.14545	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
14	16118	SANTA FE, MICH	856504.09	2181879.7	2203	791.04444	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
15	16127	TARETAN, MICH	825823.91	2136964.1	1147	1152.6135	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
16	16137	UREPETIO, MICH	803467.54	2214137.3	1753	851.83051	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
17	16146	ZIRAHUEN, MICH	846438.14	2159512.6	2090	1097.4584	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
18	16159	EL ROSARIO, MICH	845139.65	2225993.7	1700	749.13077	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
19	16162	ORANDINO, MICH	782526.35	2213787	1580	806.73186	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
20	16225	VILLA JIMENEZ II, MICH	845576.68	2203833	2000	736.69394	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
21	16194	ETA 039 TOCUMBO, MICH	762080.36	2180239.4	1600	1086.4815	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO
22	16171	ZACAPU (SMN), MICH	835306.44	2192551	1994	755.97027	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO	HOMOGÉNEO

**Tabla 20. Resumen de estaciones que cumplen homogeneidad e independencia**

### 5.3 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Para la comparación de cada modelación son necesarios datos reales, estos se obtienen de estaciones hidrométricas. De acuerdo a la **Figura 49**, son 8 estaciones cercanas a la zona de estudio pero sólo 3 se ubican cerca de una red de corriente, por lo que, se seleccionaron dos y se calibró con ambas, seleccionándose la 12396 – Camecuaro, por ser más congruente con los resultados gráficos y numéricos.

Tablas	
DA12396	
DD12396	
DM12396	
HD12396	
LI12396	
ST12396	

DM12396	
nvolum_esc	9774
	8800
	9706
	12843
	16941
	24846

Figura 48. Datos de volumen de escurrimiento en miles de m<sup>3</sup>

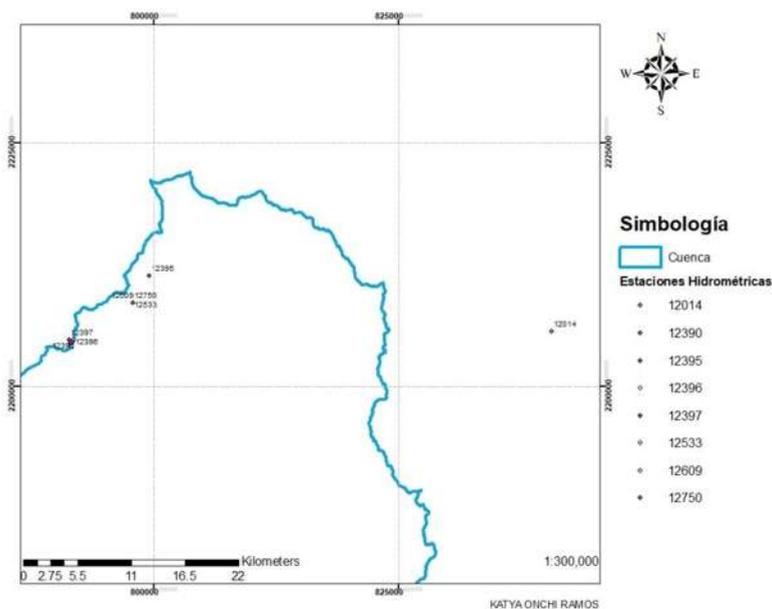


Figura 49. Estaciones hidrométricas posibles

#### 5.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN – EVALHID

En EvalHid se presentan los resultados de forma anual, mensual y año medio, siendo el año medio el promedio de los valores mensuales.

En las gráficas y tablas siguientes se presentan los resultados de la cuenca subdividida de las dos formas:

- Cuenca 1: división de la cuenca en 6 microcuencas
- Cuenca 2: división de la cuenca en 9 microcuencas

#### 5.4.1 CUENCA 1

Dentro de la cuenca 1 se subdividieron 6 microcuencas, en las que una sola abarca el municipio de Paracho.

En cuanto a los resultados mensuales se presentan cada mes en los 41 y 2 años de calibración y variación respectivamente; presentándose en las **Gráficas 2, 3 y 4** Calibración y en las **Gráficas 5, 6 y 7** validación, así como los resultados en la **Tabla 21 y 22**.

Los indicadores de ajuste en la calibración se encuentran en un rango de bueno a excelente, ubicándose en promedio en un resultado excelente. En la validación NSE da menor a cero, lo que nos indica que la media observada es mejor que el modelo, pudiéndose observar en la **Gráfica 5**; los demás indicadores se ubican en un rango excelente de calibración y el resultado siendo un indicador bueno.

EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

Calibración											
Eficiencia					Parámetros				Media		% de variación
NSE	ln NES	r <sup>2</sup>	Simetría	Prom	Hmáx	C	Imáx	Alfa	Simulada	Observada	
0.6244	0.6649	0.8001	0.9990	0.7721	540.9613	0.0772	208.1016	0.0038	243.8865	236.4322	3.06%

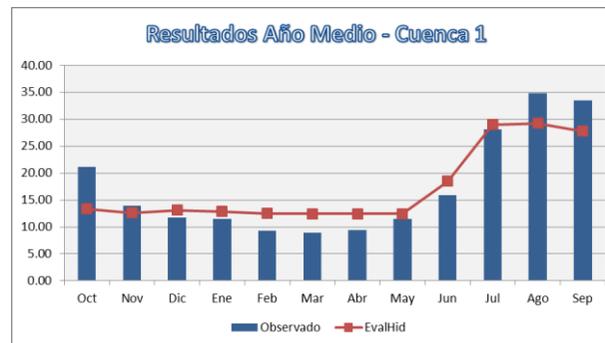
**Tabla 21. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Calibración. Cuenca 1**

Validación											
Eficiencia					Parámetros				Media		% de variación
NSE	ln NES	r <sup>2</sup>	Simetría	Prom	Hmáx	C	Imáx	Alfa	Simulada	Observada	
-0.2826	0.7898	0.8585	0.9997	0.5913	648.9493	0.0502	154.6979	0.0698	247.2575	242.9975	1.72%

**Tabla 22. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Validación. Cuenca 1**

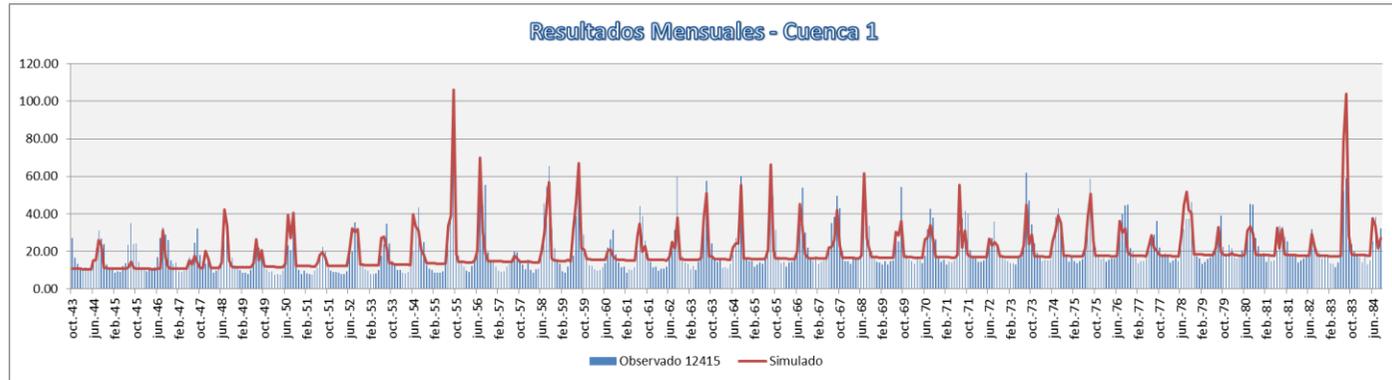


**Gráfica 2. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 1**

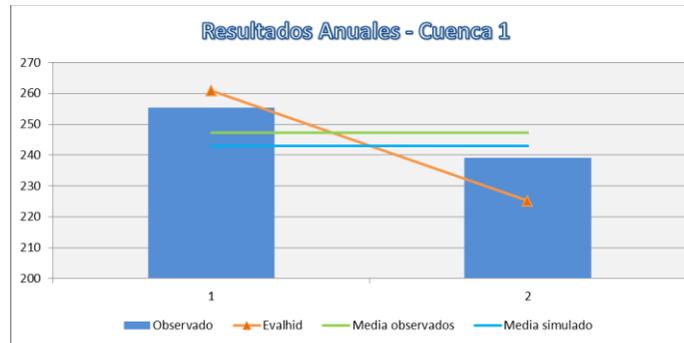


**Gráfica 3. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Calibración –Cuenca 1**

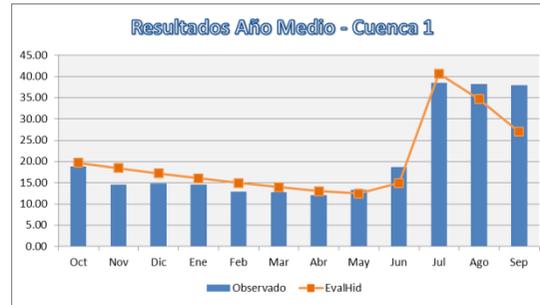
## EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO



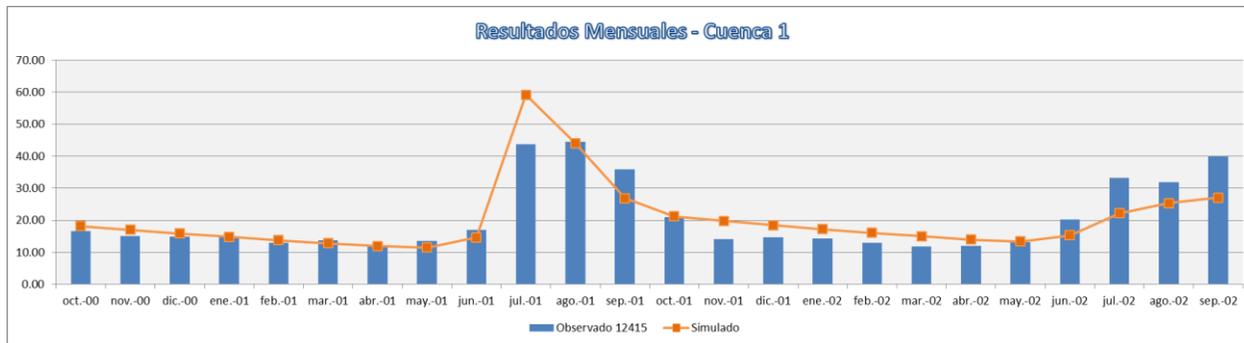
**Gráfica 4. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 1**



**Gráfica 5. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Validación –Cuenca 1**



**Gráfica 6. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Validación –Cuenca 1**



**Gráfica 7. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Validación –Cuenca 1**

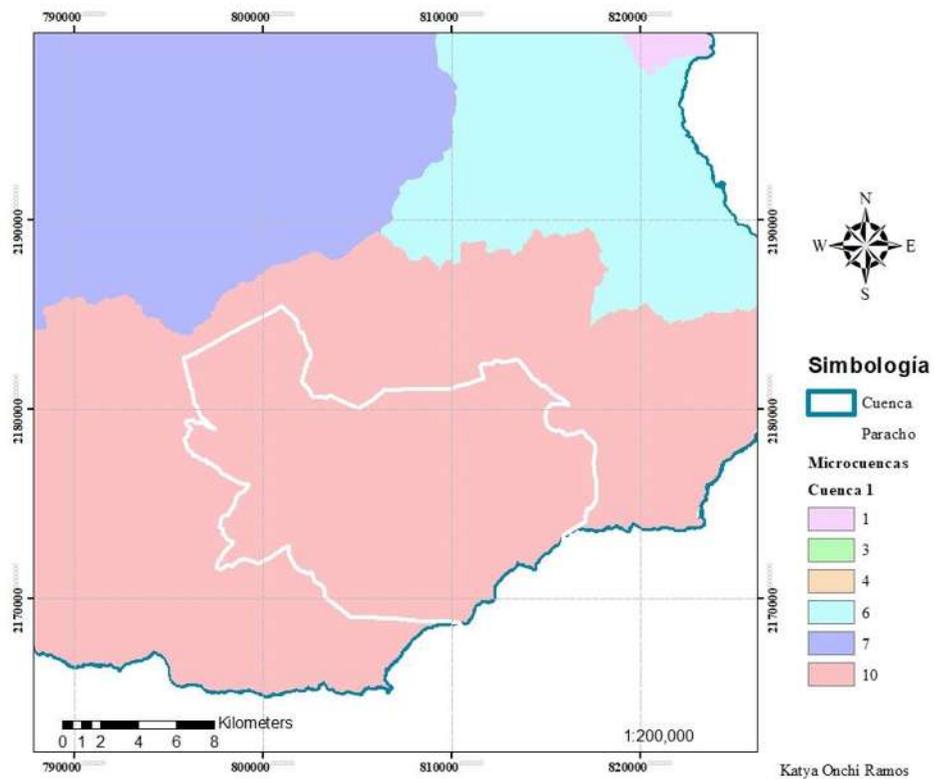


Figura 50. Microcuencas en el municipio de Paracho, Cuenca 1

#### 5.4.2 CUENCA 2

En la cuenca 2 se subdividieron 9 microcuencas, siendo dos microcuencas abarcando la mayor parte del municipio.

Los resultados mensuales se presentan cada mes en los 41 y 2 años de calibración y variación, respectivamente; presentándose en las *Gráficas 8, 9 y 10* Calibración y en las *Gráficas 11, 12 y 13* validación, así como los resultados en la *Tabla 23 y 24*.

Los indicadores de ajuste en la calibración se encuentran en un rango de malo a muy bueno, ubicándose en promedio en un resultado muy bueno. En la validación se ubican en un rango igual al de la calibración y el resultado un indicador excelente.

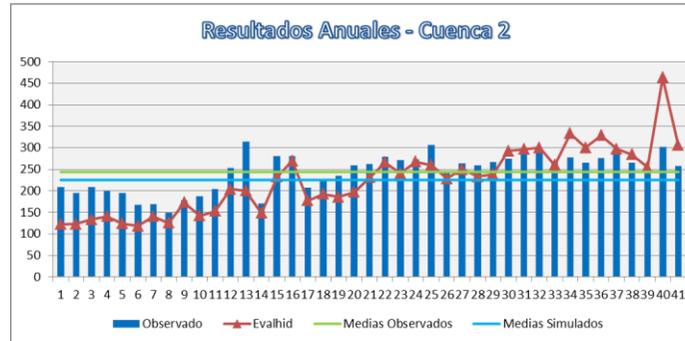
EVALUACIÓN DEL RECURSO SUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE PARACHO

Calibración											
Eficiencia					Parámetros				Media		% de variación
NSE	ln NES	r <sup>2</sup>	Simetría	Prom	Hmáx	C	Imáx	Alfa	Simulada	Observada	
0.4791	0.5982	0.7512	0.9932	0.7054	463.3083	0.3078	712.5984	0.0017	243.8865	225.2686	7.63%

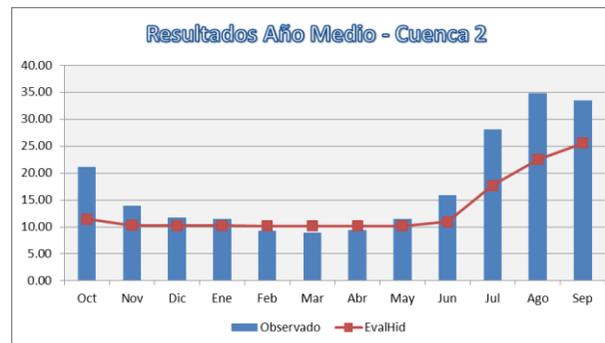
**Tabla 23. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Calibración. Cuenca 2**

Validación											
Eficiencia					Parámetros				Media		% de variación
NSE	ln NES	r <sup>2</sup>	Simetría	Prom	Hmáx	C	Imáx	Alfa	Simulada	Observada	
0.6797	0.4640	0.9197	0.9771	0.7601	532.9026	0.2845	702.5071	0.0013	247.2575	284.6564	15.13%

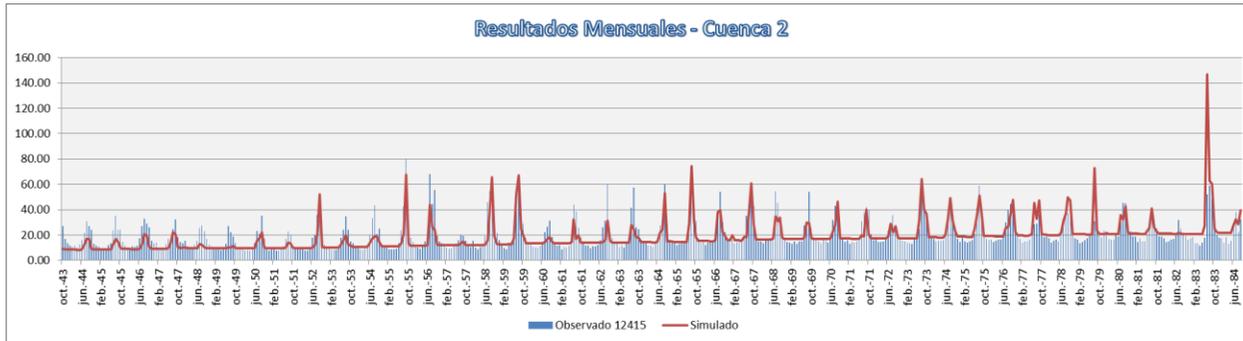
**Tabla 24. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Validación. Cuenca 2**



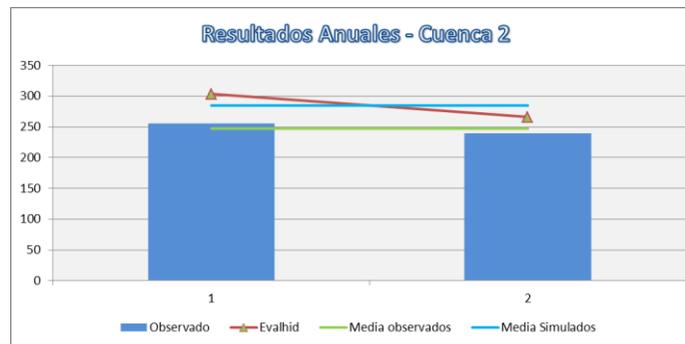
Gráfica 8. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 2



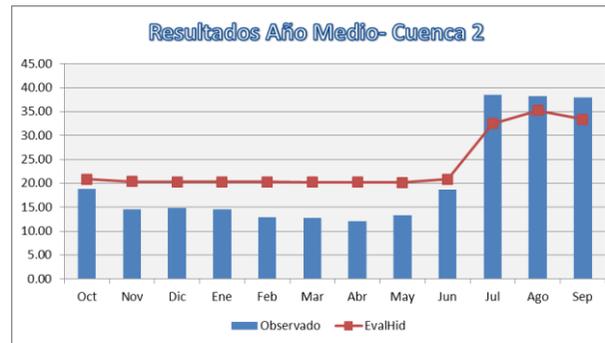
Gráfica 9. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Calibración –Cuenca 2



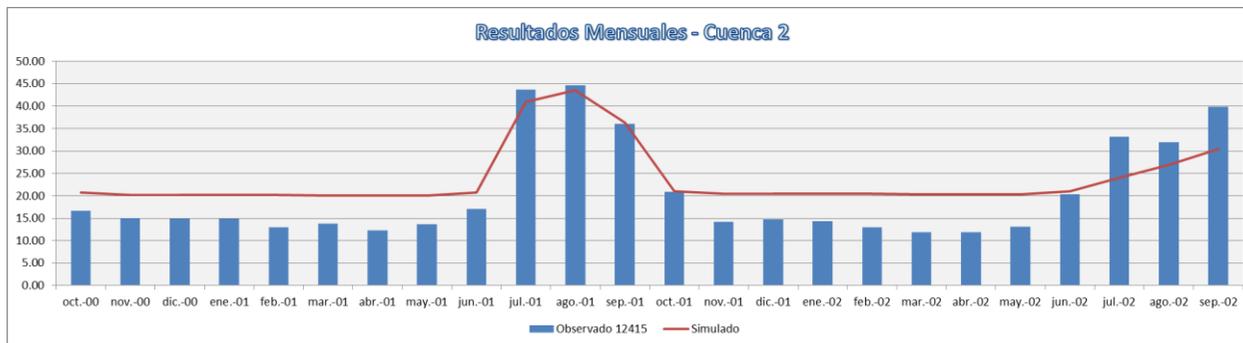
**Gráfica 10. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Calibración -Cuenca 2**



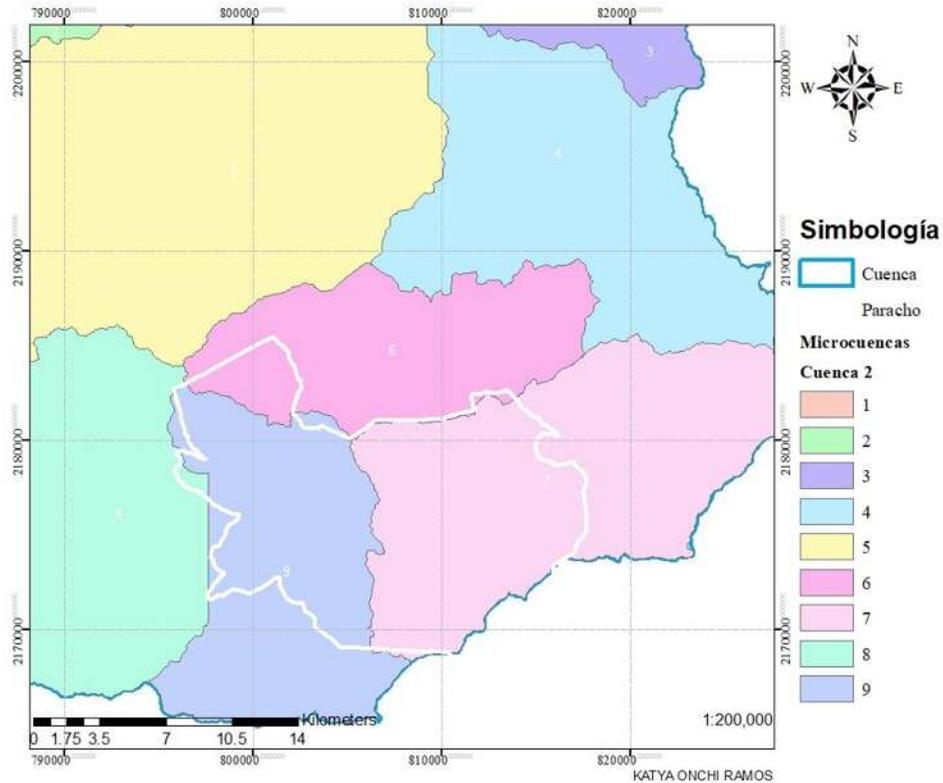
**Gráfica 11. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Validación –Cuenca 2**



**Gráfica 12. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Validación –Cuenca 2**



**Gráfica 13. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Validación –Cuenca 2**

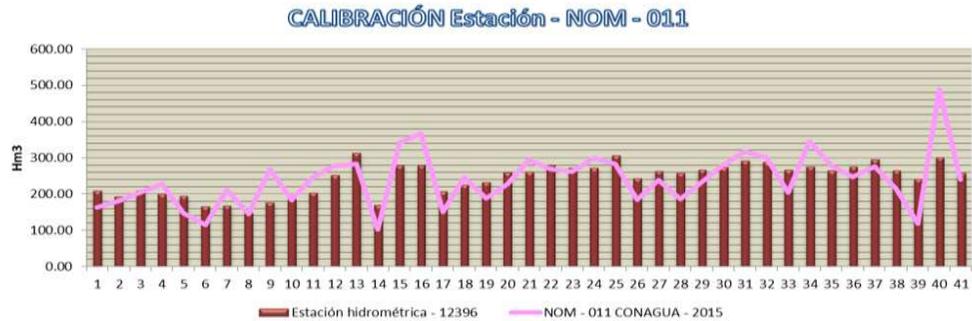


*Figura 51. Microcuencas en el municipio de Paracho, Cuenca 2*

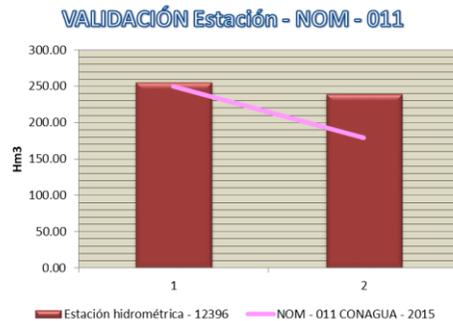
5.5 *NOM – 011 – CONAGUA – 2015*

Los resultados de escurrimiento anual con la Norma se establecieron de acuerdo a los resultados obtenidos con EvalHid, esto quiere decir que, se hicieron para dos periodos de años, calibración y validación. La cuenca utilizada fue la de 9 microcuencas.

Por lo que, los resultados se muestran en la **Tabla 17** y **18**, y gráficamente, en las **Gráficas 14** y **15**, donde se puede observar que los datos modelados con los datos reales (observados de la Estación hidrométrica) gráficamente tienen bastante similitud.



**Gráfica 14. Resultados de escurrimientos, Calibración -- NOM – 011 CONAGUA - 2015**

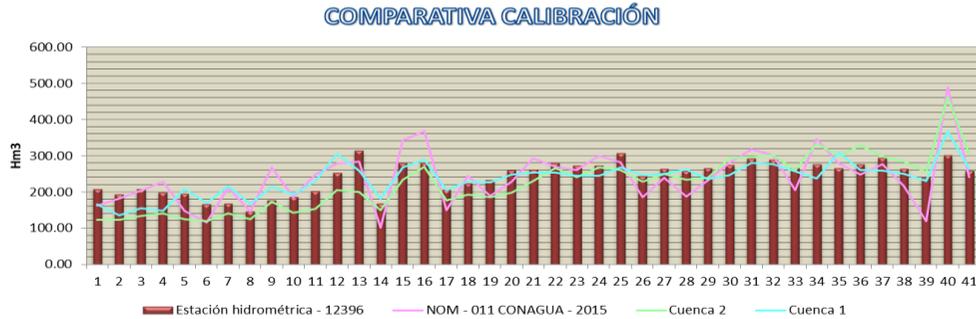


**Gráfica 15. Resultados de escurrimientos, Validación -- NOM – 011 CONAGUA – 2015**

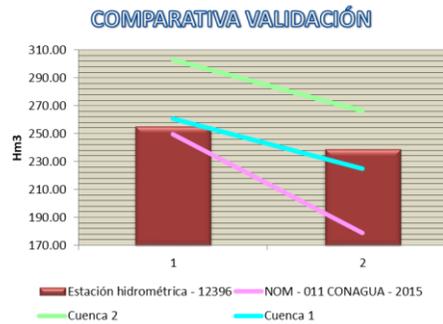
### 5.6 COMPARATIVA GRÁFICA

De acuerdo a los datos obtenidos en cada apartado se puede observar que existe una gran cercanía a los datos reales, por lo que en la *Gráfica 16* y *17* se hace una comparativa de todos los procesos en conjunto, tanto de validación como de calibración, estos resultados se comparan anualmente, pues como ya se mencionó, los resultados con la Norma sólo son anuales.

En las gráficas también se puede observar que aunque los tres resultados de escurrimiento muestran bastante similitud, se puede destacar que los resultados de la cuenca 1 son más cercanos.



**Gráfica 16. Comparativa de escurrimientos anuales, Calibración**



**Gráfica 17. Comparativa de escurrimientos anuales, Validación**

### 5.7 *HIDROGOF – R STUDIO*

Como gráficamente no se ve certeramente la cercanía de cada modelo a los datos observados, por medio de *R studio*, se estableció la bondad de ajuste de cada modelo, indicando de color verde los más cercanos a el valor “perfecto” según cada método en la **Tabla 12**, de amarillo los intermedios y de rojo los más lejanos; ello se muestra en **Tablas 25 y 26**.

En las tablas de bondad de ajuste se indicó el promedio de valores para cero, en por ciento y a uno según indicara cada método de bondad de ajuste, observando que tanto en validación como en calibración el modelo más cercano es el de la cuenca 1 con 6 microcuencas.

Calibración			
Indicador	EvalHid - Témez 2017	EvalHid - Témez	NOM - 011 - CONAGUA - 2015
ME	-7.46	-18.62	-3.72
MAE	24.31	39.28	41.49
MSE	928.51	2523.97	2948.65
RMSE	30.47	50.24	54.30
NRMSE			
%	69.20	114.10	123.30
PBIAS %	-3.10	-7.60	-1.50
RSR	0.69	1.14	1.23
rSD	1.06	1.71	1.72
NSE	0.51	-0.33	-0.56
mNSE	0.35	-0.05	-0.11
rNSE	0.45	-0.36	-0.60
d	0.87	0.81	0.76
md	0.66	0.60	0.56
rd	0.86	0.81	0.76
cp	0.43	-0.53	-0.89
r	0.78	0.81	0.70
R2	0.62	0.66	0.49
bR2	0.59	0.62	0.48
KGE	0.77	0.26	0.22
VE	0.90	0.84	0.83
Prom 0	195.30	519.20	608.39
Prom %	33.05	53.25	60.90
Prom 1	0.68	0.45	0.34

**Tabla 25. Bondad de Ajuste en Calibración**

Validación			
Indicadores	EvalHid - Témez 2017	EvalHid - Témez	NOM - 011 - CONAGUA - 2015
ME	-4.27	37.39	-33.09
MAE	9.74	37.39	33.09
MSE	113.16	1506.86	1836.48
RMSE	10.64	38.82	42.85
NRMSE			
%	92.40	337.20	372.30
PBIAS %	-1.70	15.10	-13.40
RSR	0.92	3.37	3.72
rSD	2.20	2.28	4.34
NSE	-0.71	-21.74	-26.72
mNSE	-0.20	-3.59	-3.07
rNSE	-0.80	-21.04	-28.60
d	0.84	0.38	0.39
md	0.63	0.18	0.24
rd	0.83	0.40	0.34
cp	0.26	-1.75	-12.73
r	1.00	1.00	1.00
R2	1.00	1.00	1.00
bR2	0.98	0.87	0.87
KGE	-0.20	-0.29	-2.35
VE	0.96	0.85	0.87
Prom 0	26.04	324.77	376.61
Prom %	45.35	176.15	179.45
Prom 1	0.52	-3.19	-4.96

**Tabla 26. Bondad de Ajuste en Calibración**

### 5.8 *BALANCE HIDRICO*

De acuerdo a los resultados de la bondad de ajuste, se tomaron los resultados de la Cuenca 1 por ser los más congruentes con los datos reales, en la cual una sola microcuenca abarca el municipio de Paracho.

Los resultados del balance se muestran en la ***Tabla 27***.

Año	Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escorrentía (mm)	Infiltración (mm)
1995	1019.12	578.58	134.70	261.41
1996	829.75	595.93	74.23	222.99
1997	785.52	595.54	28.72	161.26
1998	1050.89	500.84	204.34	323.36
1999	690.52	485.31	50.56	176.99
2000	867.23	533.52	77.70	240.84
2001	933.47	530.55	130.29	273.64
2002	874.44	552.22	58.66	225.55
2003	944.15	533.50	122.34	300.99
2004	1169.88	623.68	202.39	357.16
2005	646.54	486.17	40.11	146.42
2006	857.32	537.90	74.14	229.79
2007	784.85	515.64	54.62	201.39
2008	673.60	479.85	49.84	172.58
2009	744.57	528.31	44.36	171.91
2010	1016.10	571.72	155.06	289.32
2011	674.08	441.86	63.80	168.42
2012	743.56	534.77	51.25	157.54
2013	855.80	499.06	73.07	216.09
2014	848.84	577.79	72.01	242.95
2015	934.87	681.67	41.59	222.32

**Tabla 27. Valores anuales del Balance hídrico para un periodo de 10 años**

Precipitación (mm)	ETP (mm)	Escorrentía (mm)	Infiltración (mm)
854.53	542.11	85.89	226.81

**Tabla 28. Valores medios**

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 LLENADO DE DATOS

En la modelación hidrológica es de gran importancia contar con los datos de entrada, 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.

Es por ello que se tiene que contar con hacer pruebas a las estaciones que nos permitan saber que sus datos son congruentes, además de su posterior llenado; dicho llenado consiste en conocer la correlación de unas con otras estaciones para saber qué estación aportará más de acuerdo a su cercanía.

Para el llenado de las estaciones se eligió en método de IDW o IDC, puesto que el llenado de unas estaciones con otras radica en la cercanía espacial que tienen unas con otras, esto quiere decir que, mientras más cerca a la estación esté, mayor influencia de sus datos tendrá otorgando mayor precisión a este método.

## *6.2 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS*

En cuanto a las estaciones hidrométricas en la zona, se requiere verificar los datos con los que se cuenta, esto quiere decir que sean congruentes respecto al tiempo; además de ser verificadas al momento de compararlos con los datos obtenidos de la simulación, ello también nos dará acercamiento hacia cuales datos son los que se tendrán que utilizar para la comparación con la modelación superficial.

## *6.3 MODELACIÓN SUPERFICIAL*

La cuenca fue generada de acuerdo a un punto de comparación, en este caso, la estación hidrométrica para posteriormente seleccionar el modelo que mejor ajusta, para su modelación superficial se utilizó el modelo de Témez de EvalHid y la NOM – 011 – CONAGUA – 2015, ello para la comparación de ambos métodos de acuerdo a los datos que requieren para la obtención de resultados y los datos reales que se tengan.

Dentro del modelo de Témez se requiere de la utilización de parámetros para su calibración, estos parámetros apoyan a que los resultados que se vayan obteniendo sean comparados con los datos reales y se vayan acoplando para tener un resultado lo más cercano a la realidad posible; además de la subdivisión de la cuenca,

utilizando 6 en un modelo y 9 microcuencas en otro. El resultado en ambos modelos fue bastante diferente, esto por la diferencia en el parámetro del coeficiente C, aun así en ambos modelos el ajuste con los datos observados es muy bueno y excelente.

La modelación con la Norma es más manual a comparación con la modelación con EvalHid, puesto que aunque se requiere de menos parámetros, su cálculo no dispone de alguna herramienta de calibración o cálculo automático, además de que los resultados obtenidos únicamente es el escurrimiento para este caso, sin tomar en cuenta la evapotranspiración o la infiltración.

### *6.4 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 de la zona, entre otros; así como parámetros que se requieren para la correcta simulación del modelo.

Es importante destacar también, que el uso de datos verdaderos en un modelo nos precisará aún más la simulación como es el caso de la comparación entre la modelación con Témez de EvalHid y la

Norma, y que mientras más sencilla sea la simulación mejores resultados se tendrán, ya que los errores que se tengan no se irán arrastrando, como es el resultado de la comparación entre los dos modelos simulados en EvalHid.

## *7 RECOMENDACIONES*

De acuerdo a todo el proceso del presente trabajo, es de gran importancia comenzar a tener un registro real de todos los datos, es decir, trabajar con las estaciones existentes en cuanto al registro de datos climatológicos e hídricos, evitando así el arrastre de error al momento del llenado de estaciones ya que dicho error altera al proceso de la modelación.

También es importante destacar que la modelación en base a la norma se realizó utilizando datos de INEGI, los cuales no están actualizados a la fecha, dicho error también se arrastra ya que con el tiempo, de acuerdo a las necesidades de la población se cambia del uso de suelo, afectando los coeficientes. Es recomendable con esto, hacer visitas de campo para los estudios de uso y tipo de suelo.

En cuanto a la comparación de las dos metodologías, se recomienda el uso en la que sus datos de entrada sean reales, ya

que todos ellos están implicados e influyen en todo el ciclo hidrológico; siendo el caso el uso de Témez de EvalHid, usando datos de entrada con más influencia en el ciclo.

8 REFERENCIAS

- ✓ AGUA.ORG. Agua en México (Abril, 2018):  
<https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- ✓ Aparicio-Mijares, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Editorial Limusa.
- ✓ ARCGIS. (septiembre, 2018). Coordenadas UTM:  
<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000s000000.htm>
- ✓ ARCGIS. (septiembre, 2018). IDW:  
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>
- ✓ BANDAS. (2017 y 2018). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Conagua:  
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- ✓ C.J. Date. (2000). Introducción al sistema de base de datos. México: Pearson Estucation.
- ✓ 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.

- ✓ Casas-Mas, A., & Paredes-Arquiola, J. (2013). Evaluación del recurso hídrico en al cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia .
- ✓ CICESE. (Septiembre, 2018). Información de base de datos climatológicos: <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- ✓ CONABIO. (septiembre, 2018). Clima en Michoacán: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- ✓ CONABIO. (septiembre, 2018). Población en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad:  
[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/loc2010gw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/loc2010gw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- ✓ Daniel Mauricio Araiza Salcedo (2017). METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS PARA LA MODELACIÓN DE ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán.
- ✓ Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. View issue TOC, 1015-1031.

- ✓ Evapotranspiración en México. (septiembre, 2018):  
<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>
- ✓ 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, septiembre 2018
- ✓ IMTA. (Septiembre, 2018). IMTA. Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua:  
<https://www.imta.gob.mx/bandas>
- ✓ INAFED. (Septiembre, 2018). Clima en Paracho, Michoacán:  
<http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16065a.html>
- ✓ INEGI. (Julio, 2018) información del uso y tipo de suelo:  
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/edafofologia/cartaedafofologica.aspx>
- ✓ INEGI. (Junio, 2017). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0):  
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx>

- ✓ INEGI. (septiembre 2018) Información de INEGI:  
<http://www.inegi.org.mx/inegi/acercade/default.aspx>
- ✓ INEGI. (Septiembre 2018). Información de modelos digitales de elevaciones:  
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continent al/queesmde.aspx>
- ✓ INEGI. (septiembre, 2018). Geología en México:  
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoes cala.aspx>
- ✓ INEGI. (septiembre, 2018). Región hidrográfica:  
[http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- ✓ INEGI. (septiembre, 2018). Relieve de Michoacán:  
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/ter ritorio/relieve.aspx?tema=me&e=16>
- ✓ Josephb Adler (2010). R IN A NUTSHELL: A DESKTOP QUICK REFERENCE. United States of America. O'Reilly Media
- ✓ María del Mar Navarro Farfán (2017). MODELACIÓN DEL ACUÍFERO APATZINGÁN (tesis de Licenciatura). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán.
- ✓ Mauricio Zambrano – Bigiarini (Agosto 2011). Goodness - of - fit Measures to Compare Observed and Simulated Values with hydroGOF

- ✓ Miguel Fernández Mejuto, Alicia Vela Mayorga, Santiago Castañp Fernández. La utilización de modelos en hidrología, Ensayos: Revista de la facultadn de educación albacete, pg 305-318
- ✓ Onchi K., Navarro M. M. y Sánchez S. T. (2017). MODELACIÓN SUPERFICIAL DE LA CUENCA PARACHO – NAHUATZEN POR MEDIO DEL MODELO DE TÉMEZ. Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación (12).
- ✓ 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.
- ✓ R Studio. (Agosto 2018). Formula del coeficiente de correlación : <http://www.r-tutor.com/elementary-statistics/numerical-measures/correlation-coefficient>
- ✓ UPV, U. (septiembre, 2018). Descargas Aquatool. Obtenido de EvalHid y Caudeco: <https://aquatool.webs.upv.es/aqt/descargas/>
- ✓ Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays (1944). Hidrología aplicada. Colombia: Editorial nomos a.a.

*ÍNDICE DE FIGURAS*

<i>Figura 1. Ciclo Hidrológico del agua .....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Tipos de cuencas .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Macro localización de la cuenca.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Micro localización de la cuenca .....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Municipios dentro de la cuenca .....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6. Orografía de la región en estudio .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Ríos y flujos del estado de Michoacán .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Líneas de corriente en la cuenca.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9. Clima en la cuenca .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10. Simbología del clima en la cuenca.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11. Tipo de suelo en la cuenca .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12. Geología en la cuenca .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 13. Uso de suelo en la cuenca .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 14. Simbología de uso de suelo .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 15. Localidades dentro de los municipios en la cuenca... </i>	<i>25</i>
<i>Figura 16. Estructura del programa .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17. Conceptual de la simulación del ciclo hidrológico del modelo .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témex.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 19. Distribución de la precipitación.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20. Transformación de la precipitación en excedente.....</i>	<i>53</i>

<i>Figura 21. Instalador de paquetes dentro de R; HydroGOF.....</i>	65
<i>Figura 22. Delimitación de la cuenca de cuerdo al municipio y estaciones .....</i>	76
<i>Figura 23. Delimitación de la cuenca de acuerdo al municipio y estaciones .....</i>	77
<i>Figura 24. Microcuencas y polígonos de Thiessen 1 .....</i>	93
<i>Figura 25. Microcuencas y polígonos de Thiessen 2 .....</i>	93
<i>Figura 26. Ventana principal de EvalHid para generar un nuevo archivo.....</i>	95
<i>Figura 27. Introducción de datos de entrada.....</i>	96
<i>Figura 28. Ventanas de asignación de la información de las microcuencas y el punto de salida.....</i>	97
<i>Figura 29. Ventana de GIS con microcuencas y punto de salida .</i>	97
<i>Figura 30. Ventana de asignación múltiple a cada microcuenca .</i>	98
<i>Figura 31. Parámetros del modelo .....</i>	98
<i>Figura 32. Ventana de Asignación Múltiple .....</i>	99
<i>Figura 33. Tabla de resumen de los parámetros .....</i>	99
<i>Figura 34. Pasos para la modelación .....</i>	100
<i>Figura 35. Ventana de grafico de resultados .....</i>	102
<i>Figura 36. Pestaña de control en el calibrador .....</i>	103
<i>Figura 37. Series de resultados EvalHid y series de datos estación 12396 .....</i>	104
<i>Figura 38. Hoja de comparativa, indicando celdas importantes de verificar .....</i>	105

*Figura 39. Hoja sceua, ubicación de los parámetros y botón para la simulación* ..... 106

*Figura 40. Exportar tabla desde ArcGIS* ..... 108

*Figura 41. Mapa de asignación de k a cada microcuenca* ..... 108

*Figura 42. Muestra del cálculo de k en la microcuenca* ..... 109

*Figura 43. Introducción de comandos en R studio* ..... 114

*Figura 44. Bondad de ajuste para cada modelo en R studio* ..... 115

*Figura 45. Homogeneidad con Secuencias* ..... 118

*Figura 46. Homogeneidad con Helmert* ..... 118

*Figura 47. Estaciones meteorológicas dentro y cerca de la cuenca*  
..... 118

*Figura 48. Datos de volumen de escurrimiento en miles de m<sup>3</sup> ..* 121

*Figura 49. Estaciones hidrométricas posibles* ..... 121

*Figura 50. Microcuenca en el municipio de Paracho, Cuenca 1* 127

*Figura 51. Microcuencas en el municipio de Paracho, Cuenca 2*  
..... 133

*ÍNDICE DE TABLAS*

<i>Tabla 1. Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca</i>	12
<i>Tabla 2. Porcentaje del área del municipio dentro de la cuenca</i>	19
<i>Tabla 3. Porcentaje del área de uso de suelo</i>	23
<i>Tabla 4. Porcentaje del área de uso de suelo</i>	26
<i>Tabla 5. Valores de K, en función del tipo y uso de suelo</i>	39
<i>Tabla 6. Cálculo del coeficiente de escurrimiento (Ce)</i>	40
<i>Tabla 7. Componentes de flujos y almacenamientos</i>	51
<i>Tabla 8. Rangos de los parámetros del modelo de Témez</i>	57
<i>Tabla 9. Valores aprox. de Hmax, usos del suelo (Estela et al., 1999)</i>	58
<i>Tabla 10. Valores aprox. de Imax, litología del terreno (Estela et al., 1999)</i>	58
<i>Tabla 11. Calidad de bondad de ajuste de los coeficientes</i>	63
<i>Tabla 12. Valores de eficiencia en la Bondad de ajuste</i>	66
<i>Tabla 13. Valores de eficiencia en la bondad de ajuste</i>	81
<i>Tabla 14. Características de la cuenca</i>	92
<i>Tabla 15. Resultado de K para cada microcuenca</i>	109
<i>Tabla 16. Ejemplo del cálculo del volumen de escurrimiento</i>	110
<i>Tabla 17. Sumatoria del volumen de escurrimiento, calibración</i>	112
<i>Tabla 18. Sumatoria del volumen de escurrimiento, validación.</i>	112

<i>Tabla 19. Matriz de correlación entre estaciones .....</i>	119
<i>Tabla 20. Resumen de estaciones que cumplen homogeneidad e independencia .....</i>	120
<i>Tabla 21. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Calibración. Cuenca 1 .....</i>	123
<i>Tabla 22. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Validación. Cuenca 1 .....</i>	123
<i>Tabla 23. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Calibración. Cuenca 2 .....</i>	129
<i>Tabla 24. Eficiencia, Parámetros y Variación de la Validación. Cuenca 2 .....</i>	129
<i>Tabla 25. Bondad de Ajuste en Calibración .....</i>	139
<i>Tabla 26. Bondad de Ajuste en Calibración .....</i>	140
<i>Tabla 27. Valores anuales del Balance hídrico para un periodo de 10 años.....</i>	142
<i>Tabla 28. Valores medios .....</i>	142

*ÍNDICE DE GRÁFICAS*

<i>Gráfica 1. Independencia con Límites de Anderson .....</i>	<i>117</i>
<i>Gráfica 2. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 1 .....</i>	<i>124</i>
<i>Gráfica 3. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Calibración –Cuenca 1 .....</i>	<i>124</i>
<i>Gráfica 4. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 1 .....</i>	<i>125</i>
<i>Gráfica 5. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Validación –Cuenca 1 .....</i>	<i>125</i>
<i>Gráfica 6. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Validación –Cuenca 1 .....</i>	<i>126</i>
<i>Gráfica 7. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Validación –Cuenca 1 .....</i>	<i>126</i>
<i>Gráfica 8. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Calibración –Cuenca 2 .....</i>	<i>130</i>
<i>Gráfica 9. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Calibración –Cuenca 2 .....</i>	<i>130</i>
<i>Gráfica 10. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Calibración -Cuenca 2 .....</i>	<i>131</i>
<i>Gráfica 11. Resultados de escurrimientos anuales en EvalHid, Validación –Cuenca 2 .....</i>	<i>131</i>

<i>Gráfica 12. Resultados de escurrimientos año medio en EvalHid, Validación –Cuenca 2 .....</i>	<i>132</i>
<i>Gráfica 13. Resultados de escurrimientos mensuales en EvalHid, Validación –Cuenca 2 .....</i>	<i>132</i>
<i>Gráfica 14. Resultados de escurrimientos, Calibración -- NOM – 011 CONAGUA - 2015 .....</i>	<i>135</i>
<i>Gráfica 15. Resultados de escurrimientos, Validación -- NOM – 011 CONAGUA – 2015 .....</i>	<i>135</i>
<i>Gráfica 16. Comparativa de escurrimientos anuales, Calibración .....</i>	<i>137</i>
<i>Gráfica 17. Comparativa de escurrimientos anuales, Validación .....</i>	<i>137</i>

