

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL HIDROGRAMA
UNITARIO SINTÉTICO DE SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y ELABORACIÓN DEL MAPA DE NÚMERO DE CURVA
DE LA CUENCA DEL RÍO VIRÚ”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: HIDRÁULICA

AUTOR: Br. ALTAMIRANO RODRIGUEZ FRANS DILMER

ASESOR: Ing. GARCIA RIVERA JUAN PABLO

TRUJILLO - PERÚ

2017

ACREDITACIONES

TÍTULO: “CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS Y ELABORACIÓN DEL MAPA DE NÚMERO DE CURVA DE LA CUENCA DEL RÍO VIRÚ”

AUTOR: Br. Altamirano Rodríguez Frans Dilmer

APROBADO POR:

Ing. Ricardo Andrés, Narváez Aranda
PRESIDENTE
N° CIP 58776

Ing. Guillermo Juan, Cabanillas Quiroz
SECRETARIO
N° CIP 17902

Ing. Jorge Antonio, Vega Benites
VOCAL
N° CIP 78666

Ing. Juan Pablo, García Rivera
ASESOR
N° CIP 68614

PRESENTACIÓN

Distinguidos Miembros del Jurado:

Dando cumplimiento y conforme a las normas establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos y Reglamento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada Antenor Orrego, para obtener el título profesional de Ingeniero civil, se pone a vuestra consideración el Informe del Trabajo de Investigación Titulado **“CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE SUELOS Y ELABORACIÓN DEL MAPA DE NUMERO DE CURVA DE LA CUENCA DEL RÍO VIRÚ”**, con la convicción de alcanzar una justa evaluación y dictamen.

Trujillo, 09 de Noviembre de 2017.

Altamirano Rodríguez, Frans Dilmer.

DEDICATORIA

Mi eterno agradecimiento a:

A nuestro Dios Jehová él todopoderoso, agradecerle infinitamente por las bendiciones derramadas en cada una de nuestras familias, mediante su voluntad hemos conseguido muchos logros tanto académico como laboral, te agradezco eternamente mi Dios por darme la bendición de aun conservar a mis queridos y respetados padres.

A mi Padre ISMAEL ALTAMIRANO ORTIZ, por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, por su constante amor y consejos me ha mostrado el verdadero significado de esta vida, con tu ejemplo me has enseñado a vivir y a reír con el mundo, hemos compartido momentos muy agradables que los llevo presente cada instante. Con paciencia has forjado en mis sueños, ilusiones y esperanzas, me has hecho crecer como persona, ayudándome a salir adelante en momentos difíciles para hacer de mí lo que hoy soy. A tu lado, la vida es un regalo divino, porque eres y por siempre serás un ejemplo en mi vida. Gracias PAPÁ, ¡Dios te bendiga!

A mi Madre ANTONIA RODRIGUEZ VILLAREAL, tu amor de “MADRE” fue un bálsamo de vida en mis momentos difíciles, eres mi bendición madre querida, gracias por la confianza que prestaste en mí, por tu gran sacrificio en darme lo mejor. TE AMO MAMÁ. ¡Dios te bendiga!

A mis queridos hermanos ELMER URÍAS ALTAMIRANO ARENAS Y JHORDAN SLITH MARQUEZ NEYRA, por todo el amor y apoyo incondicional que me dieron en vida, hoy pude cumplirles esta meta.

¡ESTE LOGRO VA PARA USTEDES QUERIDOS HERMANOS!

Br. ALTAMIRANO RODRIGUEZ FRANS DILMER

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a mis compañeros tesisistas quienes desinteresadamente, y con espíritu altruista me brindaron información requerida para hacer realidad la presente investigación.

Mi sincero agradecimiento a la Universidad de Privada Antenor Orrego y a los profesores de la carrera profesional de Ingeniería Civil quienes con su apoyo permanente Científico y Tecnológico ha hecho posible la culminación de mi carrera profesional.

Mi sincero agradecimiento a mi asesor Ing. JUAN PABLO GARCÍA RIVERA, por su apoyo y oportuno asesoramiento para el desarrollo de la presente tesis.

.

RESUMEN

El presente proyecto a nivel de Ingeniería denominado **“Calibración de Parámetros del Hidrograma Unitario Sintético de Servicio de Conservación de Suelos y Elaboración del Mapa de Numero de Curva de la Cuenca del Río Virú”**, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Entonces surge como una necesidad de investigación en obtener un programa que muestre mayor precisión en su totalidad la simulación de la cuenca a estudiar.

Dentro del recorrido se presentan diversas condiciones de tipos de suelos (cobertura vegetal, pendientes, etc). Estas condiciones le dan unas características particulares a la escorrentía superficial, tanto así que termina variando el caudal y el tiempo que demora una partícula de agua en recorrer el punto más alto al punto más bajo. En la cuenca se desconocen los caudales de los afluentes que forman el río Virú. Asimismo, no se conocen valores de cuencas vecinas. Esto genera que los valores de caudales generados sean alejados de la realidad o muchas veces erróneos por lo tanto se realizará una estimación del volumen de escorrentía resultante de la precipitación (escurrimiento directo), también se determinará el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta, es de suma importancia obtener valores que estén bien calibrados. Para hacer un proceso de calibración se debe contar con valores observados de tal forma que los valores generados por medio de un cálculo o modelamiento se pueda determinar con exactitud los resultados de los modelamientos.

La relevancia que tiene esta investigación es que por medio de estos resultados se va a calibrar el tiempo de concentración en el tipo de suelo que pueden ser utilizados para microcuencas que se encuentran dentro de estas cuencas así mismo pueden extrapolarse para cuencas vecinas estos resultados

Los beneficiados serán los pobladores y toda la gente involucrada en la prevención de riesgos por que con esto se va a calcular mejor los caudales resultantes de la cuenca y si mismo los agricultores de la zona, cabe recalcar que también le será de gran información para el ALA (asociación local del agua) el ANA (asociación Nacional del agua), SENAMHI y el ministerio de agricultura.

ABSTRACT

The present project at the Engineering level called "Calibration of Parameters of the Synthetic Unitary Hydrogram of Soil Conservation Service and Preparation of the Curved Number Map of the Viru River Basin", despite the recent advances in science and technology, There is a hydrological model that simulates to perfection the complex processes involved in hydrology due to the presence of errors of different origin. Then it arises as a need for research in obtaining a program that shows more accurately the simulation of the basin to be studied.

Various types of soil conditions (vegetative cover, slopes, etc.) are presented within the route. These conditions give particular characteristics to surface runoff, so much so that it ends up varying the flow and the time it takes for a particle of water to travel from the highest point to the lowest point. In the basin the flows of the tributaries that form the Virú river are unknown. Also, values of neighboring basins are not known.

This means that the flow values generated are far from reality or often erroneous, therefore an estimate of the runoff volume resulting from the precipitation (direct runoff) will be made, the runoff distribution time will also be determined, including the flow of tip, it is very important to obtain values that are well calibrated. To perform a calibration process, you must have observed values in such a way that the values generated by means of a calculation or modeling can be used to determine exactly the results of the modeling.

The relevance of this research is that through these results we will calibrate the concentration time in the type of soil that can be used for microwatersheds that are within these basins, so they can be extrapolated to neighboring basins.

The beneficiaries will be the villagers and all the people involved in the prevention of risks because this will calculate better the resulting flows of the basin and itself farmers in the area, it should be stressed that it will also be great information for the ALA (local water association) ANA (National Water Association), SENAMHI and the Ministry of Agriculture.

INDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN.....	IIV
ABSTRACT	V
INDICE	VI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema:	1
1.2. Aporte del Trabajo.	2
1.3. Formulación del problema:	2
1.4. Formulación de la Hipótesis	2
1.5. Objetivos de la investigación.....	2
1.5.1. Objetivo General:	2
1.5.2. Objetivos Específicos:	3
1.6. Alcances:.....	3
1.7. Justificación de la investigación:	3
1.8. Meta del proyecto:.....	4
II. MARCO TEORICO.....	5
2.1. Antecedentes de la investigación:	5
2.2. Fundamentación teórica de la investigación	7
III. MATERIAL Y PROCEDIMIENTOS.	22
3.1. Población y Muestra.....	22
3.2. Tipo y diseño de investigación.....	22
3.3. Materiales	22
3.4. Procedimientos o Métodos	22
IV. DESARROLLO.....	27
4.1. Topografía y Modelamiento de la Cuenca Hidrográfica	27
4.2. MODELAMIENTO ARCGIS	28
4.2.1. FILL SINKS.....	28
4.2.2. FLOW DIRECTION	29
4.2.3. FLOW ACCUMULATION.....	30
4.2.4. STREAM DEFINITION	31
4.2.5. STREAM SEGMENTATION	32
4.2.6. CATCHMENT GRID DELINEATION.....	33
4.2.7. DRAINAGE LINE PROCESSING	33
4.2.8. ADJOINT CATCHMENT PROCESSING	34

4.2.9. PROJECT SETUP.....	35
4.2.10. CHARACTERISTICS	36
4.2.11. BASEN CENTROID	37
38	
4.2.12. SELECT HMS PROCESSES.....	38
4.2.13. RIVER AUTO NAME.....	38
4.2.14. BASIN AUTO NAME.....	38
4.2.15. SUBBASIN PARAMETERS FROM RASTER	38
4.2.16. MAP TO HMS UNITS	42
4.2.17. HMS SHEMATIC	43
4.2.18. TOOGLE LEGEND – HMS LEGEND.....	44
4.2.19. ADD COORDINATES.....	44
4.2.20. PREPARATE DATA FOR MODEL EXPORT.....	44
4.2.21. BACKGROUD SHAPE FILE.....	44
4.2.22. BASIN MODEL FILE.....	44
4.2.23. MET MODEL FILE – SPECIFIC HYETOGRAPH.....	44
4.2.24. CREATE HEC-HMS PROJECT.....	45
4.3. POLIGONO DE THIESEN.....	46
4.4. MODELAMIENTO HEC HMS	53
4.4.1. SIMULACION HEC-HMS – MARZO 2017.....	54
4.4.1.1. CURVA NÚMERO.....	54
4.4.1.2. DESARROLLO MEDIANTE EL SCS TIPO TRIANGULAR Y EL METODO DE KIRPICH	55
KIRPICH Y EL TIEMPO DE CONCENTRACION (TLAG).....	55
4.4.1.3. MUSKINGUM.....	56
4.4.1.4. METEOROLOGIC MODELS.....	58
4.4.1.5. CONTROL SPECIFICATIONS	59
4.4.1.6. TIME SERIES DATA.....	60
4.4.1.7. SIMULATION RUN MANAGER	66
4.4.2. SIMULACION HEC-HMS – FEBRERO 2016	68
4.4.2.1. CURVA NÚMERO.....	68
4.4.2.2. DESARROLLO MEDIANTE EL SCS TIPO TRIANGULAR Y EL METODO DE KIRPICH	69
4.4.2.3. MUSKINGUM.....	70
4.4.2.4. METEOROLOGIC MODELS.....	72
4.4.2.5. CONTROL SPECIFICATIONS	73
4.4.2.6. TIME SERIES DATA.....	74
4.4.2.7. SIMULATION RUN MANAGER	80
V. RESULTADOS	82
5.1. Análisis topográfico y relieve para la delimitación del Río Virú.	82
5.2. Recopilación de data de Precipitación de estaciones cercanas a la cuenca del río Virú.....	84

5.3. Desarrollo del Mapa de Numero de Curva que contenga los valores del tipo de suelo.....	87
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	88
VII. CONCLUSIONES.....	89
VIII. RECOMENDACIONES.....	92
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema:

La cuenca del río Virú forma parte de las provincias de Trujillo, Otuzco y Santiago de Chuco, todos ellos comprendidos dentro del departamento de la Libertad esta cuenca cubre un área de 1926 km², la longitud del río es de 89 km, con una pendiente promedio de 5% teniendo las mayores pendientes en la cuenca alta.

Dentro de su recorrido se presentan diversas condiciones de tipos de suelos (cobertura vegetal, pendientes, etc). Estas condiciones le dan unas características particulares a la escorrentía superficial, tanto así que termina variando el caudal y el tiempo que demora una partícula de agua en recorrer el punto más alto al punto más bajo.

El problema que se presenta en la cuenca es que no se conocen los caudales de los afluentes que forman el río Virú. Asimismo, no se conocen valores de cuencas vecinas.

Esto genera que los valores de caudales generados sean alejados de la realidad o muchas veces erróneos.

Se realizará una estimación del volumen de escorrentía resultante de la precipitación (escurrimiento directo), también se determinará el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta.

Es de suma importancia obtener valores que estén bien calibrados. Para hacer un proceso de calibración se debe contar con valores observados de tal forma que los valores generados por medio de un cálculo o modelamiento se pueda determinar con exactitud los resultados de los modelamientos.

Como se sabe, la calibración es un proceso que identifica los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos generados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

En el caso de la cuenca del río Virú, en la parte alta se cuenta con estaciones que miden la precipitación y en la parte baja con una estación que mide la descarga del río Virú, con estos datos se puede realizar la determinación de las variables

que intervienen en la simulación del proceso de transformación de lluvia a escorrentía mediante caudales generados versus caudales observados.

Con esta investigación se podrá determinar las variables que intervienen en la ecuación para las microcuencas de la cuenca del río Virú y servirá como punto de inicio para el estudio de cuencas vecinas con similares características.

1.2. Aporte del Trabajo.

- ✓ Proporcionar soluciones inmediatas y adecuadas en cuanto a un aumento excesivo de caudal en tiempos de lluvias y así mejorar el bienestar de los poblados.
- ✓ El proyecto aporta los procesamientos de los cálculos hidráulicos para un mejor desplazamiento del agua, así como, la necesidad de utilizar nuevas estaciones para identificar con mayor precisión la escorrentía generada.
- ✓ El proyecto da a conocer que se puede aplicar todo lo aprendido en clase para poder dar una buena y eficiente solución a un posible caso real para una identificación de parámetros mediante hidrogramas.

1.3. Formulación del problema:

¿Qué parámetros influyen en la calibración del Hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos y elaboración del Mapa del Número de Curva de la cuenca del Río Virú?

1.4. Formulación de la Hipótesis

En la calibración de parámetros del Hidrograma unitario Soil Conservation Service los resultados son alejados de la realidad debido a que la estación más cercana a la cuenca está averiada y las estaciones vecinas no brindan información con precisión para la cuenca Rio Virú.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General:

Calibrar los parámetros del Hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos y elaboración del Mapa del Número de Curva de la cuenca del Río Virú.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Analizar la topografía y el relieve para la delimitación de la cuenca del Río Virú.
- Recopilar data de Precipitación de estaciones cercanas a la cuenca del río Virú.
- Generar el Mapa de Numero de Curva que contenga los valores del tipo de suelo.
- Evaluar fórmulas que nos permita determinar el tiempo de Concentración en la cuenca.

1.6. Alcances:

El alcance del proyecto es a nivel de la población de Virú, en la Provincia Virú, Región La Libertad.

1.7. Justificación de la investigación:

Se desea conocer con mayor exactitud la cantidad de caudal que es generado por las precipitaciones fluviales, porque se sabe que, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen.

La relevancia que tiene este proceso es que por medio de estos resultados se va calibrar el tiempo de concentración en el tipo de suelo que pueden ser utilizados para microcuencas que se encuentran dentro de estas cuencas así mismo pueden extrapolarse para cuencas vecinas estos resultados. Es importante elaborar el Mapa de Numero de Curva en la cuenca y subcuencas del río Virú, para un mejor desarrollo en los cálculos hidrológicos.

Los beneficiados serán los pobladores y toda la gente involucrada en la prevención de riesgos por que con esto se va calcular mejor los caudales resultantes de la cuenca y si mismo los agricultores de la zona, cabe recalcar que también le será de gran información para el ALA (asociación local del agua) el ANA (asociación Nacional del agua), SENAMHI y el ministerio de agricultura.

1.8. Meta del proyecto:

Obtener las variables del tiempo de concentración que interviene en el Hidrograma unitario Sintético del Servicio de Conservación de Suelos y elaborar el mapa de Número de Curva para la cuenca del río Virú.

II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la investigación:

Antecedentes de la Investigación: Informados ya con las necesidades que requiere este estudio tesis, visitamos el lugar a estudiar y se buscó una adecuada información que nos indique el correcto uso de las técnicas de diseño y aplicación de las Normas establecidas:

Barrios (2008) en su tesis “Análisis espacial de hietogramas para la estimación de caudales de diseño" llega a la siguiente conclusión.

En lo relativo a proyectos de estimación de caudales de diseño: Aunque se tuvo los datos cercanos, la lejanía respecto de la cuenca pudo afectar de manera negativa a los resultados de las correcciones que se realizaron según estos datos, y por ende a las precipitaciones que sirvieron de base para la generación de los hidrogramas. Se detectaron diferencias en algunos casos significativas entre los valores registrados y simulados, por lo que fue necesario aplicar factores de corrección para ambas variables, magnitud y duración de la precipitación. Es posible que utilizar una única estación para la caracterización de la precipitación en la cuenca sea muy limitante, por lo que pudo haber sido importante la inclusión de información de otras estaciones cercanas a la zona de estudio. Sin embargo, no fue factible obtener estos antecedentes para el período analizado.

Armijos (2012) es su tesis "Implementación de un modelo lluvia escorrentía de evento en el laboratorio virtual de hidrología " llega a la siguiente conclusión.

En la herramienta “modelo de lluvia escorrentía de evento”, ofrece al usuario dos formas de introducir la precipitación media; por pesos y por precipitación, y da la facilidad de introducir la topología e interpretarla. Es importante recalcar que la herramienta “modelo de lluvia escorrentía de evento”, ofrece una interfaz gráfica que le permite al usuario trazar la topología de la cuenca.

Lopez (2012) en su tesis "Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú" llega a la siguiente conclusión.

Del modelo hecho para la cuenca de Jequetepeque, discretizado espacialmente en subcuencas y unidades de respuesta hidráulica, permitieron un cálculo más exacto y preciso del caudal y sedimentos, teniendo en cuenta los dos aspectos más influyentes que son el tipo y uso de suelo y de la cual se obtuvo un conjunto de parámetros que caracterizaban el caudal y el transporte de sedimentos en la cuenca, se calibraron los parámetros. Con la calibración automática hecha para los parámetros de caudal usando el software Parasol, y no a la manual que resultó no ser poco viable computacionalmente debido al set de datos insuficiente para los requerimientos del programa. La calibración manual de los parámetros relacionados al transporte de sedimentos para el modelo de la cuenca de Jequetepeque en ArcSWAT, después de 19 simulaciones, dio resultados muy buenos para los tres estadísticos que evaluaban el desempeño de estas, los cuales son el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje BIAS (PBIAS) y el radio de la desviación estándar (RSR) de los datos observados, graficando para cada una de las simulaciones hechas los datos contrastados de las mediciones observadas en campo con los resultados del modelo.

Jorquera (2010) en su tesis "Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de una simulación mixta" llega a la siguiente conclusión.

Este modelo permite representar el proceso de transformación lluvia-caudal, el transporte vertical de agua (evaporación, evapotranspiración e infiltración), los almacenamientos temporarios superficiales y la variación del contenido de humedad del suelo de la cuenca, responsable esta última del comportamiento del flujo base. La simulación mixta implica modelar tanto los caudales de estiaje, o flujo base (submodelo continuo), como los caudales de crecida (submodelo de eventos). Los intervalos de tiempo seleccionados para cada submodelo fueron: paso diario para el submodelo continuo y 15 minutos para el submodelo de eventos. En total el modelo propuesto posee 7 parámetros libres: 5 en el submodelo continuo y 2 en el

submodelo de eventos. Fueron planteados tres reservorios hipotéticos, el primero, retiene las abstracciones iniciales y la salida de agua es por evaporación. El segundo, simula las variaciones en el contenido de humedad del suelo, donde el ingreso de agua es por infiltración y las salidas son por evapotranspiración y/o percolación. El último reservorio, es el correspondiente al almacenamiento subterráneo, y la salida de agua del mismo es el flujo base.

2.2. Fundamentación teórica de la investigación

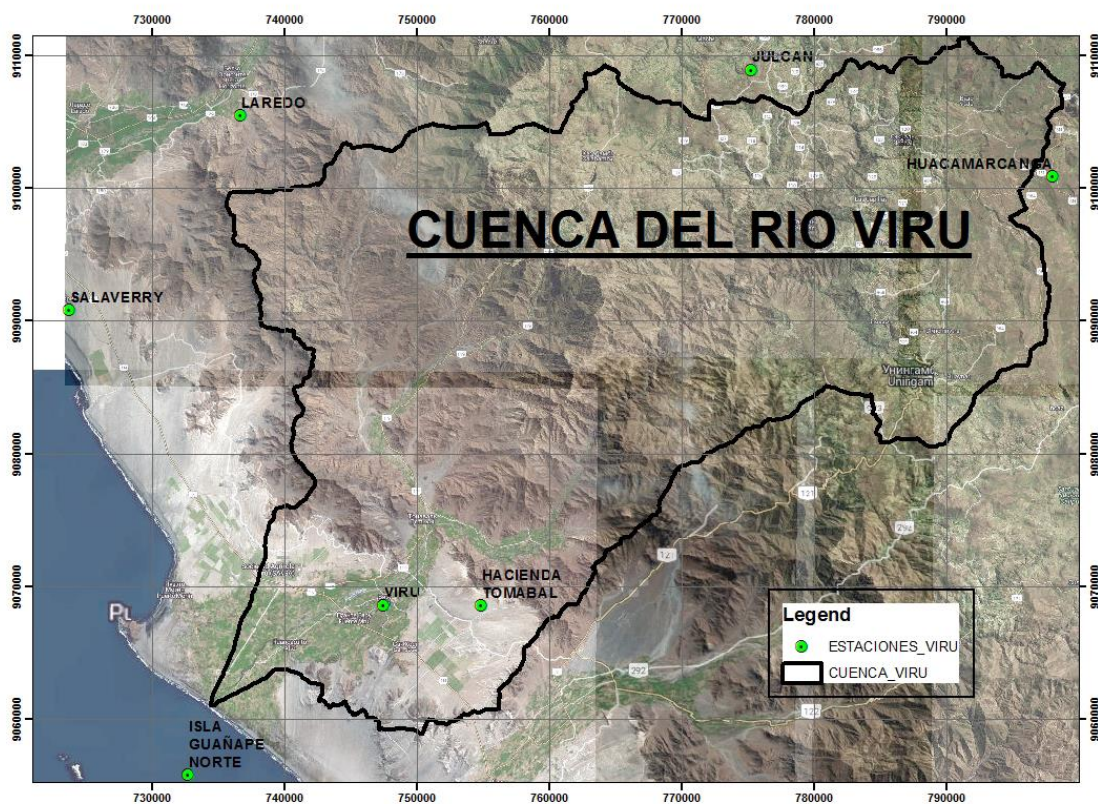
Aparicio describe que una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Otra definición que podemos encontrar más local es por Absalón Vásquez define a las Cuencas Hidrográficas como la superficie cuyas aguas fluyen a un mismo río, lago o mar.

En general la cuenca hidrográfica se le conoce como el área de terreno de donde provienen las aguas de un río, quebrada, lago, laguna, humedal, acuífero o pantano.

La importancia de las cuencas es porque el agua que llega a nuestros cuerpos a través de las cuencas hidrográficas. A través de los ríos el agua llega a los embalses desde donde una vez procesada, pasará a nuestros hogares. Por eso es importante mantener las cuencas hidrográficas saludables para así garantizar una mejor calidad de agua en nuestros ríos y embalses.

“Las cuencas hidrográficas saludables disipan las inundaciones, aumentan la fertilidad de nuestros suelos y disminuyen el daño a la vida, la propiedad y los cuerpos de agua.

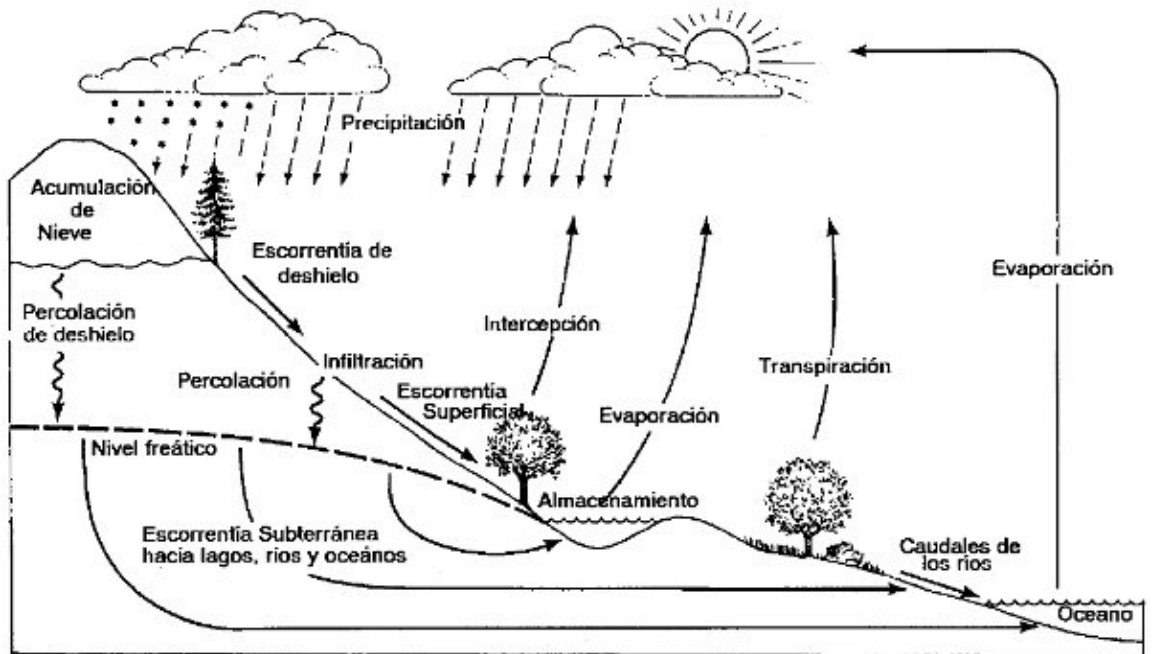


La cuenca del río Virú forma parte de las provincias de Trujillo, Otuzco y Santiago de Chuco, todos ellos comprendidos dentro del departamento de la Libertad esta cuenca cubre un área de 1926 km², la longitud del río es de 89 km, con una pendiente promedio de 5% teniendo las mayores pendientes en la cuenca alta.

Ciclo Hidrológico

Aparicio considera como al Ciclo Hidrológico como el concepto fundamental de la Hidrología. Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto.

La imagen representa el ciclo hidrológico.



También podemos se considera al ciclo hidrológico como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida.

La cantidad de agua movida, dentro del ciclo hidrológico, por el fenómeno de sublimación es insignificante en relación a la as cantidades movidas por evaporación y por transpiración, cuyo proceso conjunto se denomina evapotranspiración.

Clasificación de Suelos – Curva Número

Metodo SCS (Soil Conservation Service)

La metodología desarrollada por el Soil Conservation Service. SCS, ocupa un lugar en el “diseño hidrológico” por su practicidad, capacidad operativa y aceptables resultados, a medida que ha sido usada con más frecuencia y en un mayor número de escenarios. Los primeros trabajos del SCS se refieren principalmente a áreas cultivadas, luego se ha extendido a áreas naturales y urbanas. El Método SCS depende de las siguientes relaciones básicas:

$$\frac{F}{S} \text{ y } \frac{P_c}{P_r}$$

Fuente:

Dónde: F es la retención real de agua en la cuenca durante la lluvia excluyendo I_a su valor máximo es S .

S es la máxima capacidad total de la tormenta.

P_r es la precipitación total de la tormenta.

P_e es la precipitación directa o efectiva.

Cuando la lluvia se prolonga

$$F \rightarrow S \quad \text{y} \quad P_e \rightarrow P_r \quad \text{y ambas relaciones tienen a 1.}$$

Clasificación de los Modelos Hidrológicos

Según Ponce (1994) los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

Siguiendo a Ponce (1994), en la práctica, pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

1. Determinísticos: son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
2. Probabilísticos: por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.

3. Conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.

4. Paramétricos: o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

Los fenómenos hidrológicos cambian en las tres dimensiones espaciales, pero tener en cuenta toda esta variación, puede hacer que los modelos sean muy complejos. De acuerdo a Chow et al.(1994), los modelos determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en:

1. Modelos agregados: el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones.
2. Modelos distribuidos: considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.

De acuerdo a la escala temporal, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

1. Modelos de eventos aislados: son de corto plazo, diseñados para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.
2. Modelos de procesos continuos: toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. El objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca
3. Modelos de simulación mixta: intentan representar ambas escalas temporales en una forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad.

Modelo Determinístico

El modelamiento determinístico no considera términos aleatorios dentro del modelo; es decir, cada simulación que se realice producirá el mismo resultado. Bajo esta idea general, el proceso de calibración se centrará en minimizar las diferencias entre los datos observados y los datos simulados. Este “criterio de exactitud” se basa en el ajuste de parámetros como medio de calibración

El uso de modelos determinísticos requiere el manejo de términos como: variables de ingreso, parámetros y variables de estado.

Variables De Ingreso

Son series de datos a la cuales se les aplicará una serie de ecuaciones para intentar representar otra variable. Se asume que estas variables de ingreso son independientes, es decir, no dependen de ninguna otra. Algunos ejemplos son; precipitación, temperatura, etc.

a. Parámetros

Son parámetros del modelo que han sido asumidos constantes, como la conductividad hidráulica del suelo, la rugosidad, etc.

b. Variables de Estado

Representan una “situación” que afectará los resultados del modelo; por ejemplo, el modelado de una cuenca bajo régimen húmedo tiene diferentes características que en régimen seco. Un ejemplo de variable de estado es la humedad de suelo, la cual varía estacionalmente afectando la concentración de escorrentía superficial.

Exactitud

Dos conceptos importantes a tener en cuenta antes de utilizar modelos hidrológicos son “exactitud” y “precisión”. La exactitud mide la performance de un modelo; es decir, la cercanía entre los valores simulados y los observados. Un modelo exacto no arroja los mismos resultados, pero estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor de la medida observada.

Hidrograma Unitario Sintético Triangular Del SCS

Es el más usado para el estudio de Cuencas Pequeñas.

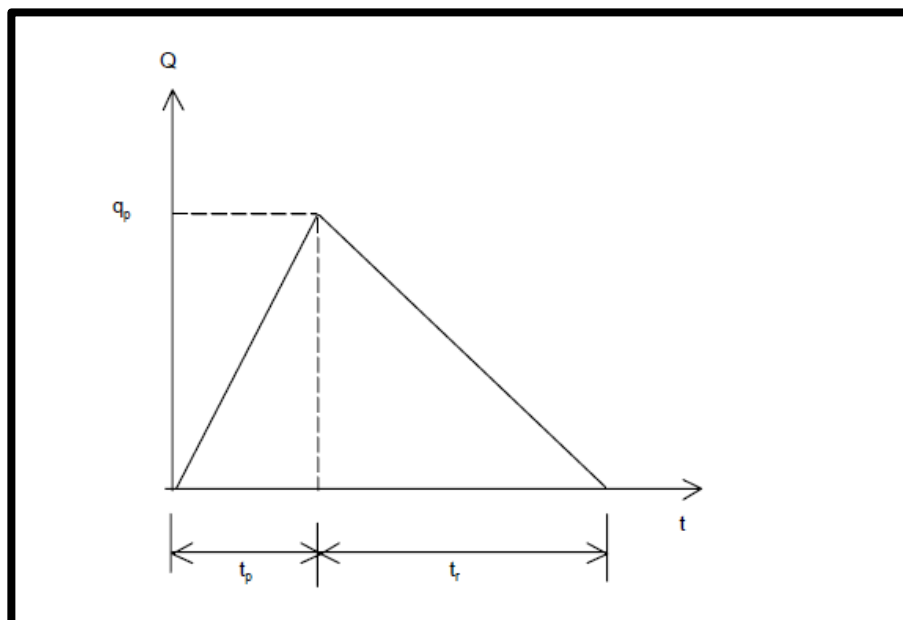


Figura 7: El gráfico muestra el Hidrograma Unitario triangular del SCS

Donde:

Q: es el Caudal

T: es el Tiempo

Tp: es el Tiempo Pico

Tr: es el Tiempo de Recesión

Definición de términos básicos.

De lo investigado de diferentes fuentes de información referentes a calibración de parámetros mediante distintos métodos de hidrogramas se obtuvo los resultados siguientes:

- ◆ Con la calibración automática hecha para los parámetros de caudal usando softwares es muy eficiente, y no a la manual que resultó no ser poco viable computacionalmente debido al set de datos insuficiente para los requerimientos del programa y alcanzar datos aproximadamente exactos.

Componentes de los Sistemas

El estudio realizado se basa en los resultados obtenidos de visitas a campo y las necesidades que se presentaron para la calibración de parámetros y lluvia escorrentía, se propone los siguientes componentes para;

A. Lluvia Escorrentía

Es una representación que forma parte del ciclo hidrológico en cuanto al fenómeno de la escorrentía superficial de una cuenca hidrográfica. El modelo se usa mayormente para entender el proceso de escurrimiento y para pronosticarlo con el propósito de regularizar el uso del agua o diseñar obras hidráulicas para el control de inundaciones. Se pueden clasificar en:

- Modelos Estadísticos:

Con este proceso analizaremos el *período de retorno* que sirven para evaluar la frecuencia de escasez o exceso de agua con el propósito de regularizar el uso del agua o diseñar obras hidráulicas para el control de inundaciones. Además nos permite estimar las recargas hidrológicas representativas de la cuenca que después pueden servir como datos de entrada en los modelos matemáticos que convierten las recargas en escorrentías.

- Modelos empíricos:

Se utilizarán estos métodos por experiencia:

- El método racional, que rinde el caudal máximo de escorrentía esperado en unidades de $[L^3/T]$ a base de una intensidad de la precipitación máxima en $[L/T]$ en un período igual al tiempo de concentración de la cuenca.

- El método del número de curva,² que rinde el volumen total de la escorrentía total (L^3), combinado con el método del hidrograma unitario, que calcula la distribución del volumen en el tiempo lo que resulta en un hidrograma del caudal en [L^3/T]

- Modelos de transporte

- Los modelos de transporte hidráulico son modelos matemáticos a base de ecuaciones hidráulicas usadas en la mecánica de fluidos, como la de *Saint Venant*, para el flujo del agua en el lecho o cauce del río.
- La complejidad de las características de la superficie de cuencas hace que los modelos de transporte todavía no son aplicables al proceso de escorrentía hasta el momento que el agua llega a un lecho o cauce bien definido.

B. Escorrentía Superficial

Describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua.

B.1. Flujo terrestre con exceso de infiltración:

Se produce con más frecuencia en regiones áridas y semiáridas, donde las intensidades de precipitación son altas y la capacidad de infiltración del suelo es reducida debido a la impermeabilización de la superficie, o en áreas pavimentadas.

B.2. Flujo terrestre con exceso de saturación:

Cuando el suelo está saturado y la cuenca de almacenamiento llena, la precipitación producirá inmediatamente una escorrentía superficial. El nivel precedente de humedad del suelo es un factor que afecta al tiempo que pasará hasta que el suelo se sature.

B.3. Flujo de retorno superficial:

Después de que el agua se infiltra en el suelo en la porción en cuesta de una colina, el agua puede fluir lateralmente por el suelo, y exfiltrarse (fluir fuera) cerca de un canal.

Al fluir, la cantidad de escorrentía puede verse reducida de varios modos: una pequeña parte puede evaporarse; el agua puede almacenarse temporalmente en cuencas microtopográficas; y otra parte puede fluir inmediatamente sobre la superficie. La escorrentía superficial que permanece al final fluye en una corriente de agua como ríos, lagos, estuarios u océanos.

C. Estimación de parámetros, validación de modelos y análisis de sensibilidad

C.1. Calibración

Una vez que se ha identificado el modelo y se ha programado, necesitamos aplicarlo al problema concreto que nos ocupa. Para ello necesitamos en primer lugar obtener los valores de los parámetros que utiliza el modelo estos pueden medirse directamente en el campo (sería la manera de proceder en un modelo físico) u obtenerse utilizando técnicas de optimización que a partir de unos valores conocidos de las variables de entrada produzcan los correspondientes resultados en las variables de estado y de salida (sería la manera de proceder en los modelos empíricos).

Medición de parámetros

Uno de los errores más habituales cuando se trabaja en la modelización de sistemas ambientales es medir primero en el campo y modelizar después sobre estos datos. El modo de proceder más adecuado sería empezar por una correcta identificación del problema que, al menos nos permitiera conocer cuáles son los parámetros que habrá que medir. Si el modelo se ha construido podremos haber hecho incluso un análisis de sensibilidad que nos permita determinar que parámetros merece la pena medir con mayor precisión y mayor resolución espacial. El problema es que también podemos encontrar parámetros que no puedan medirse por la falta de tecnología apropiada o su elevado coste. En este caso tendremos que utilizar funciones de transferencia que permitan obtener a partir de variables conocidas o fáciles de medir las variables que plantean

dificultades. Incluso podemos encontrar con que, si pretendemos simular condiciones pasadas, los objetos sobre los que deben medirse los parámetros no existan ya y la única opción sea hacer una estimación razonable.

Estrategias de muestreo

Es imprescindible diseñar la estrategia de muestreo de forma adecuada a los parámetros que van a medirse y a los objetivos de la campaña de muestreo. Hay que tener en cuenta que un modelo puede no dar los resultados adecuados debido a una campaña de muestreo inadecuada. Entre los aspectos que resulta necesario tener en cuenta cabe destacar:

1. Las variables y parámetros que van a medirse
2. Las técnicas que se utilizarán
3. El esquema espacial y temporal de muestreo.

Debe ponerse especial cuidado en el muestreo de los parámetros con un alto grado de sensibilidad, aunque en realidad la sensibilidad de un modelo a un parámetro concreto depende en numerosas ocasiones de los valores de otras variables, por lo que el análisis de sensibilidad a priori no es fácil.

- **Optimización**

Cuando estamos trabajando con un modelo empírico, los valores de los parámetros deben calibrarse a partir de una muestra de valores de entrada y de salida del modelo y de una función objetivo cuyo valor debe minimizarse. Uno de los objetivos más sencillos sería un modelo de regresión lineal que utiliza una variable de entrada x y una variable de salida y . El modelo a calibrar sería una ecuación de tipo $y = A + Bx$ en el que los parámetros A y B deben ser tales que minimicen la función objetivo $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$. Los valores de los parámetros, tras calibrar el modelo, deben tener valores con cierto sentido físico, si no es así puede que el modelo tenga poder predictivo para el conjunto de datos utilizado en la calibración pero tendrá muy poca capacidad explicativa y será muy poco generalizable. En el proceso de optimización debe tratarse de ajustarse el modelo no sólo a las variables de salida sino también a las de estado. Una vez calibrado el modelo, en la fase de validación debe utilizarse un conjunto de valores diferentes a los utilizados en la fase de calibración. La calibración de modelos

empíricos distribuidos resulta especialmente compleja debido al elevado número de parámetros con los que tratar, pudiéndose llegar a calibraciones multi objetivo o a calibraciones por áreas separadas.

C.2. Validación y Verificación.

Validación es el proceso de comprobar que los resultados aportados por el modelo para las variables de salida y de estado no son muy diferentes a los medidos en la realidad. Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo.

- Coeficiente de determinación

$$r^2 = \frac{\text{cov}(o, m)^2}{\text{sd}(o)\text{sd}(m)}$$

donde $\text{cov}(o, m)$ es la covarianza entre los valores observados y los devueltos por el modelo, $\text{sd}(o)$ la desviación típica de los valores observados y $\text{sd}(m)$ la desviación típica de los resultados del modelo.

- Eficiencia del modelo

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

Este índice produce resultados menores o iguales a 1, si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad predictora más alta que el modelo (lo que implica desde luego que el modelo es muy malo). Este índice no es sensible al efecto de los valores proporcionales pero sigue siendo sensible a los valores extremos.

- **Índice de ajuste modificado**

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|m_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

oscila entre 0 y 1, este último valor implica un ajuste perfecto. Al igual que los anteriores es sensible a la presencia de valores extremos.

- **RMSE/MAE**

El cociente entre el error cuadrático medio y el error absoluto medio permite determinar hasta qué punto la existencia de valores extremos está afectando al modelo.

$$\frac{RMSE}{MAE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n |o_i - m_i|}{n}}$$

C.3. Errores e Incertidumbre

Es necesario comprobar que el modelo se comporte de manera adecuada y los valores obtenidos por el modelo para las variables de estado y de salida son similares a los medidos directamente. Lo más habitual es utilizar procedimientos estadísticos basados en las magnitudes de los errores.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (mod - med/med)^2}{N}}$$

Los errores pueden surgir en cualquier fase del proceso de modelización, en la identificación, en la toma de datos, pueden aparecer errores en el cálculo con decimales, etc. De hecho podría darse el caso de que rechazásemos un buen modelo por dar resultados erróneos cuando el error en realidad estaba en las variables de entrada. De este modo podemos clasificar los errores en:

- **Errores de aproximación.** Surgen cuando se utilizan métodos numéricos para resolver integrales o ecuaciones diferenciales. Los métodos numéricos son por su propia naturaleza métodos aproximados en los que siempre existe una desviación respecto a la solución real.

- **Errores computacionales.** Las desviaciones que se producen de este modo son pequeñas, pero pueden propagarse y acumularse a lo largo de cientos de operaciones en un modelo y dar lugar a desviaciones importantes respecto a los resultados reales.
- **Errores de propagación.** Los pequeños errores en los datos de entrada o en los parámetros del modelo pueden propagarse a lo largo de las sucesivas iteraciones en los cálculos implicados en la ejecución de un modelo.

C.4. Análisis de Sensibilidad

Este proceso mide cuanto pueden llegar a afectar a los resultados de un modelo variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros. Tiene un gran número de utilidades:

- En primer lugar sirve para comprobar la lógica interna de un modelo, ayuda a entender cómo funciona el modelo o porque no funciona correctamente y aprender más acerca de su funcionamiento.
- Para definir la importancia de cada parámetro lo que servirá para determinar el grado de esfuerzo que debe prestarse a su medición o muestreo.
- Detectar si el modelo está sobre parametrizado, esto ocurre cuando existen parámetros a los que el modelo resulta insensible, en este caso será necesario eliminar algunos para simplificar el modelo.

C.5. Incertidumbre en la modelización

1. Falta de información, requiere la recolección de información adicional, aunque hay que tener en cuenta que la información debe ser adecuada tanto en calidad como en cantidad. En todo caso la complejidad de los sistemas ambientales obliga a una simplificación de la información disponible. *El objetivo estaría en buscar un adecuado punto intermedio entre simplicidad y completitud.*

2. Evidencias contradictorias, en ocasiones los resultados de un modelo pueden aparecer en contradicción con otros resultados previos o con la evidencia de campo, es necesario evaluar si estas contradicciones se deben a errores o están realmente presentes.

3. Incertidumbre de las medidas por falta de precisión, puede solventarse utilizando técnicas de medición más precisas. Sin embargo, la inversión en instrumental caro no garantiza la falta de errores.

4. Los juicios a priori del investigador a la hora de evaluar los resultados de un modelo pueden ser diferentes a los de otro investigador.

III. MATERIAL Y PROCEDIMIENTOS.

3.1. Población y Muestra

No es un estudio estadístico por lo tanto no se requiere muestra y población.

3.2. Tipo y diseño de investigación.

Posee un enfoque cuantitativo.

3.3. Materiales

- a). Precipitaciones.
- b). DEM (topografía).
- c). Registro de caudales.
- d). Tipos de cobertura de suelos.

3.4. Procedimientos o Métodos

ARCGIS

El ArcGis es un software de Sistema de Información Geográfica más conocido por sus siglas en inglés como un GIS.

Según Esri compañía encargada de la creación y distribución del programa, define al ArcGIS como un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, también se menciona como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (GIS), 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.

Cabe mencionar que ArcGis es un programa que maneja un API lo cual nos permite realizar nuestras propios script y ejecutar automatizaciones las tareas repetitivas, estas características facilita mucho al momento de procesar nuestra información.

Para nuestro proyecto usamos el Geo-HMS que es una extensión desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos que se usa dentro del ArcGis para el modelado y estudio de Cuencas.

También nos proporciona otras actividades que podemos realizar en el ArcGis, algunas de ellas son:

- 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.

Representación RASTER En Los Sig

Ventajas

- Facilidad de captura de datos con un escáner
- Estructura de datos simples(pixeles)
- Sencillez de manejo: técnicas de gestión y algoritmos de tratamientos
- Sencillez en procesos de comparación “pixel a pixel” (operaciones de superposición de mapas)
- Trata de eficientemente datos de variación espacial alta
- Formato adecuado para el tratamiento y realce de imágenes digitales
- Representa fenómenos variantes en el espacio
- Simulación y modelaje son más fáciles
- Análisis geográficos rápido

Inconvenientes

- Los mapas temáticos ocupan mucho espacio en memoria
- La representación en cuadrículas o pixeles es poco adecuada para representar entidades lineales.
- La técnica Raster tiene en general poca precisión en los cálculos de superficie, distancias, etc. A menos que se disminuya la anchura de pixel lo cual compromete el espacio y la ligereza del sistema.
- Ciertas relaciones topológicas son más difíciles de representar

- La representación final puede ser menos estética
- Posible pérdida de resolución y difícil asociar atributos

HEC- HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y por extensión en nuestro país.

El mismo Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos define al HEC HMS como un programa diseñado para la simulación de procesos hidrológicos completos para Cuencas.

El programa incluye diferentes métodos para la simulación de fenómenos hidrológicos dentro de una Cuenca.

Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

1. Subcuencas (subbasins)
2. Tramos de tránsito (routing reach)
3. Uniones (junctions)
4. Embalses (reservoirs)
5. Fuentes (Sources)
6. Sumideros (sinks)
7. Derivaciones (diversions)

Método para pérdidas

- Déficit y razón constante (DC)
- Exponencial
- Green y Ampt
- DC por grilla
- SCS CN por grilla
- Inicial y razón constante
- Número de curva (CN) del Soil Conservation Service
- Conteo de Humedad del suelo (SMA)
-

Método por Escurrimiento en la Cuenca

- Hidrograma Unitario de Clark
- Onda cinemática
- Clark modificado
- Hidrograma unitario del Soil Conservation Service
- Hidrograma unitario de Snyder
- Curva S especificada por el usuario
- Hidrograma unitario especificado por el usuario

Método Flujo Base

- Recesión delimitada
- Mensualmente constante
- Reservorio lineal
- Aproximación no lineal de Boussines
- Recesión

Método Transito

- Onda cinemática
- Retraso
- Puls modificado

- Muskingum
- Muskingum-Cunge
- "STRADDLE STAGGER"

Método de Perdidas / Ganancias

- Constante
- Percolación

Modelo Meteorológico

- Frecuencia de las tormentas
- Estaciones por peso
- Precipitación por grilla
- Inverso de la distancia
- Tormenta del SCS
- Hietograma especificado
- Tormenta estándar de proyecto

SASPLANET

El SASPlanet es un programa muy útil y portátil para cualquier momento del trabajo. Su función nos permite descargar información cartográfica desde diferentes servidores que brindan información cartográfica por mencionar algunas de ellas como Google, Bing, Esri, etc.

El funcionamiento del SASPlanet tiene le siguiente esquema:

- Seleccionar el servidor que provee la información cartográfica
- Seleccionar el Área a descargar.
- En el Selection Manager ubicamos las diferentes características como: resolución de imagen y tipo de archivo que deseamos que tenga nuestra imagen a descargar.

IV. DESARROLLO

4.1. Topografía y Modelamiento de la Cuenca Hidrográfica

Para el modelo de la cuenca Rio Virú, usamos el programa ArGis, como también el Hec-Hms que se ubica dentro del mismo programa.

Primero tuvimos que delimitar la cuenca de Virú, usamos el programa SAS-Planet identificando el Área de Estudio importando el archivo KML.

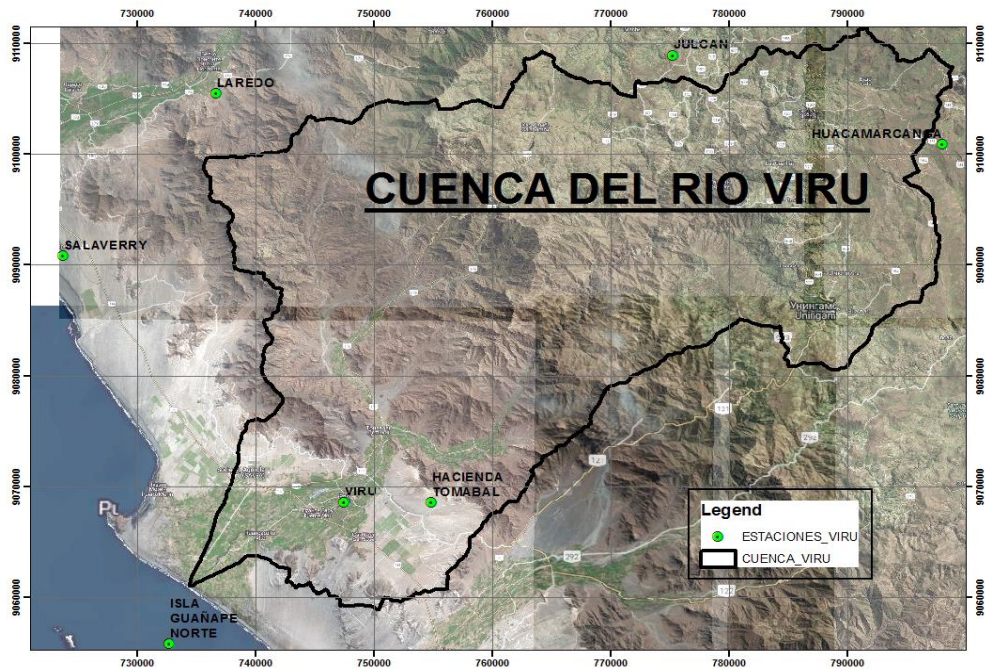
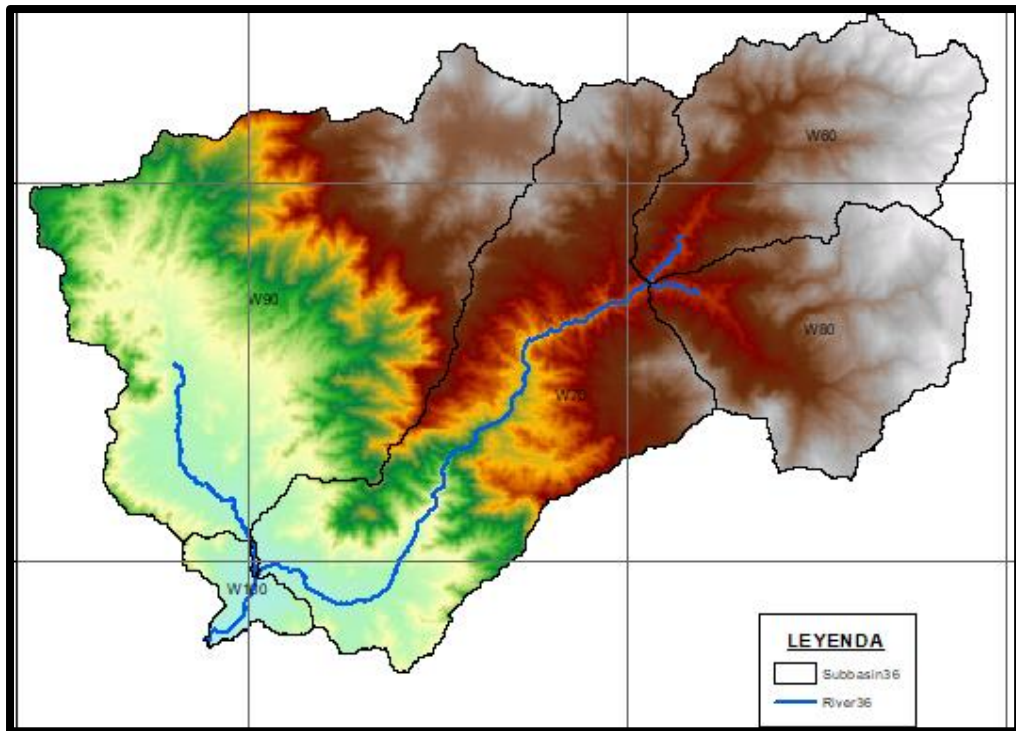


Figura 01: Se muestra la imagen de la cuenca Virú en SASPlanet.

Al obtener nuestra área de estudio, precedimos a trabajar nuestro modelamiento de la cuenca Rio Virú en el programa ArGis.

El Modelo Computacional de una Cuenca dentro del ArcGis el comando Tools llamado ArcHydro Tools nos proporciona una serie de Herramientas.

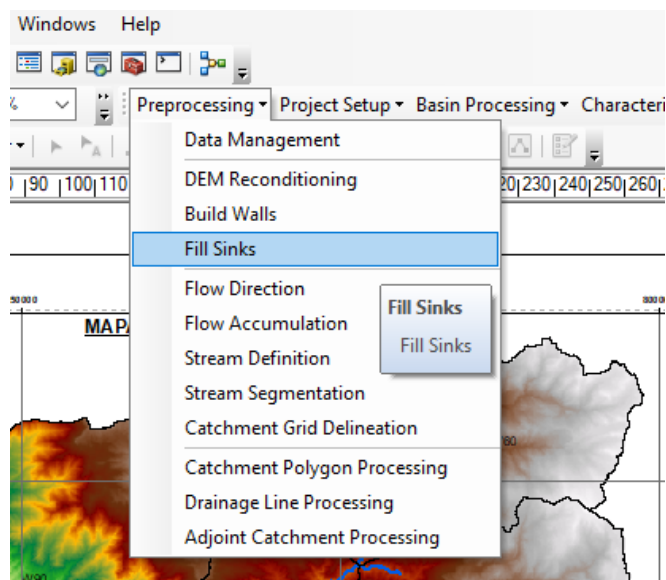
Es necesario procesar todos los comandos en formato DEM para poder importar al programa Hec-Hms, para ello se detalla cada proceso en el programa ArcGis.

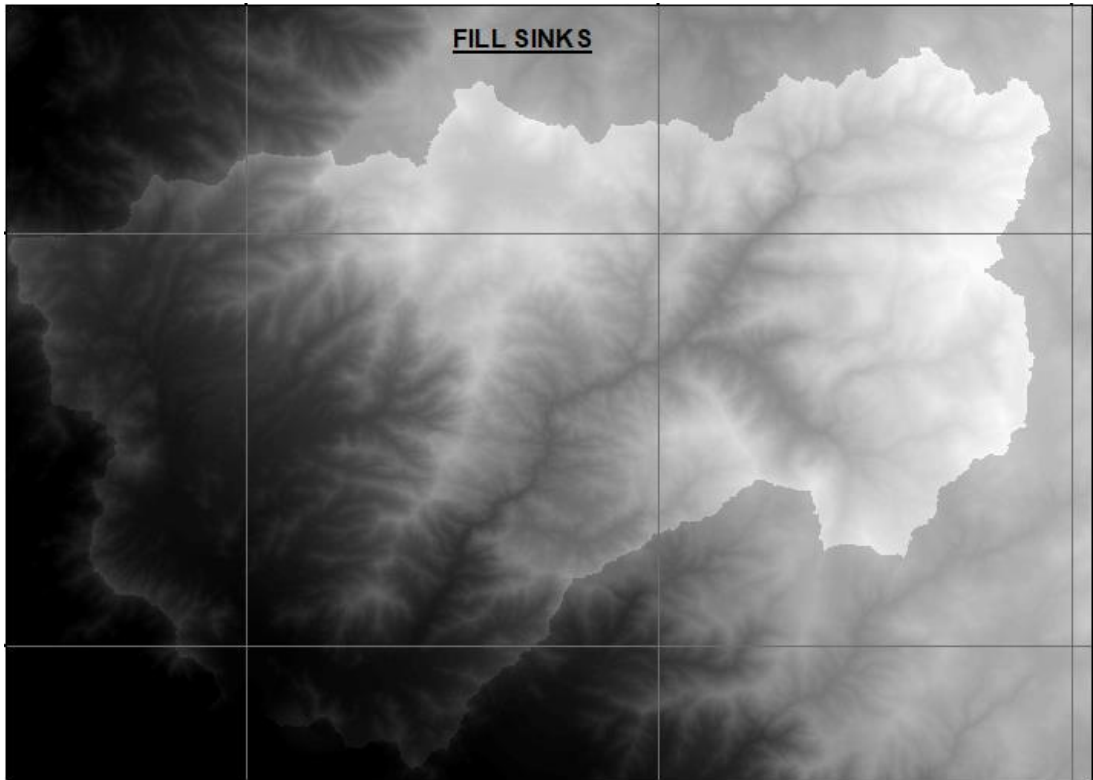


4.2. MODELAMIENTO ARCGIS

4.2.1. FILL SINKS

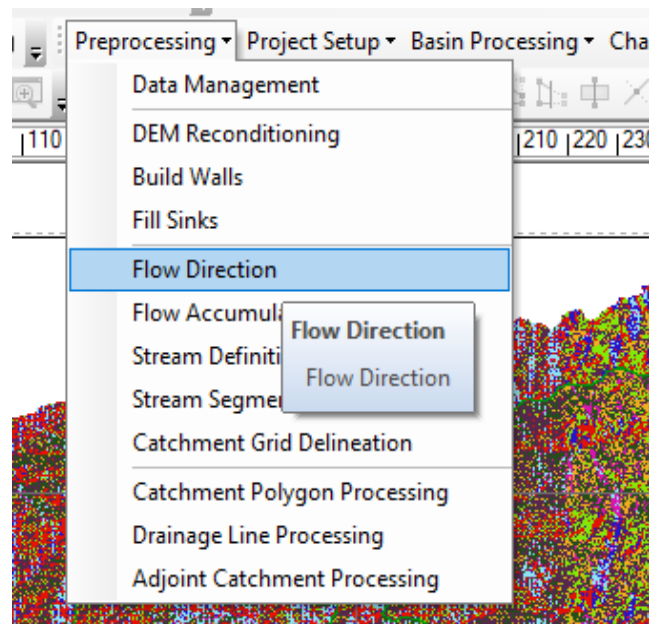
Procesando la imagen MDE para rellenar los agujeros que hay en la geometría del Raster.

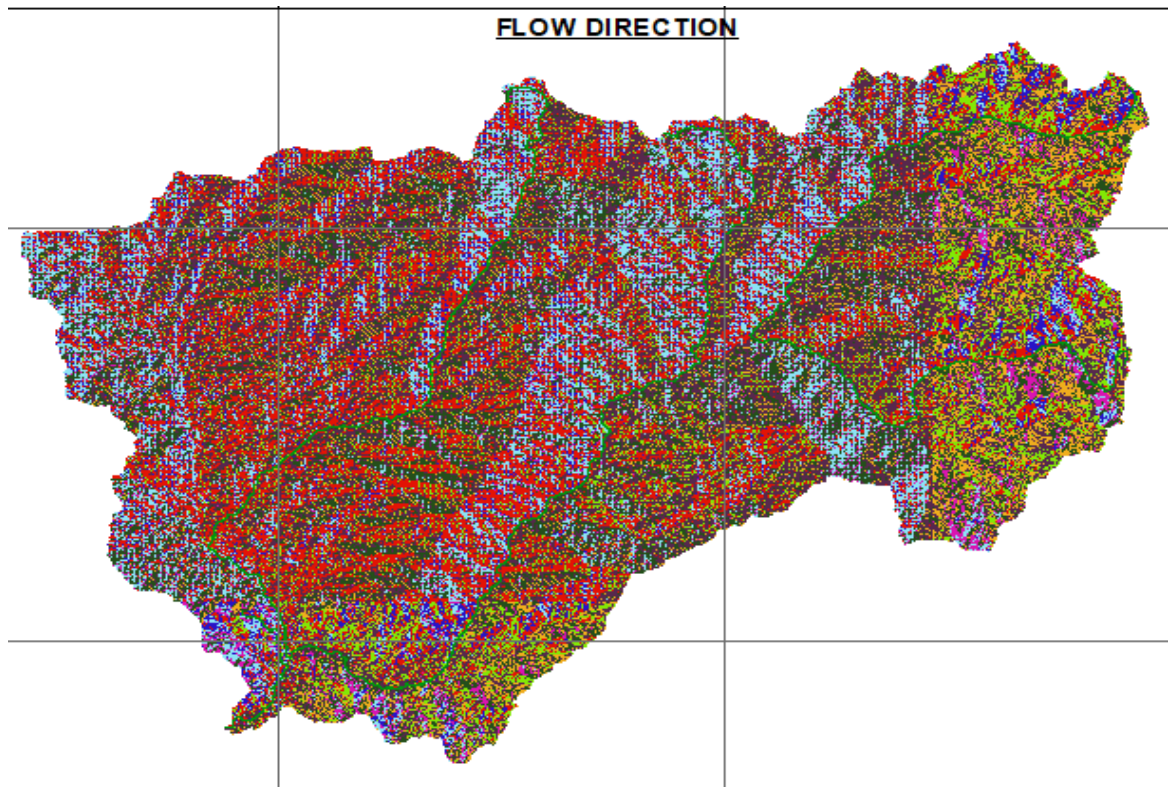




4.2.2. FLOW DIRECTION

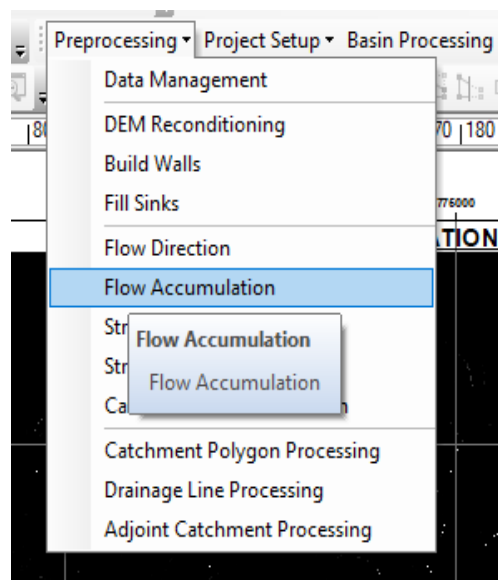
Lee por cada píxeles la dirección del flujo del agua.

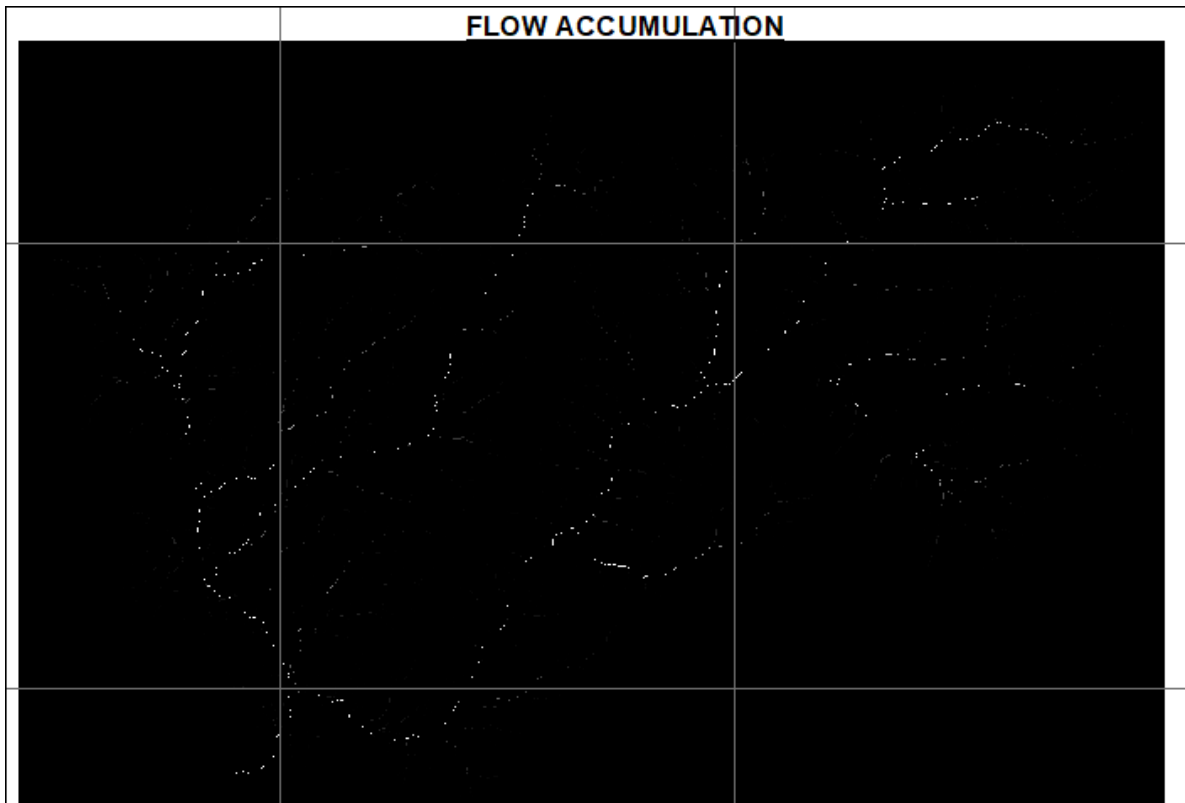




4.2.3. FLOW ACCUMULATION

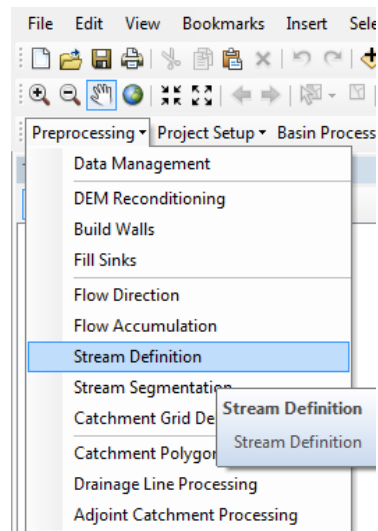
Por cada pixel atribuye cuanta cantidad de agua les corresponde.

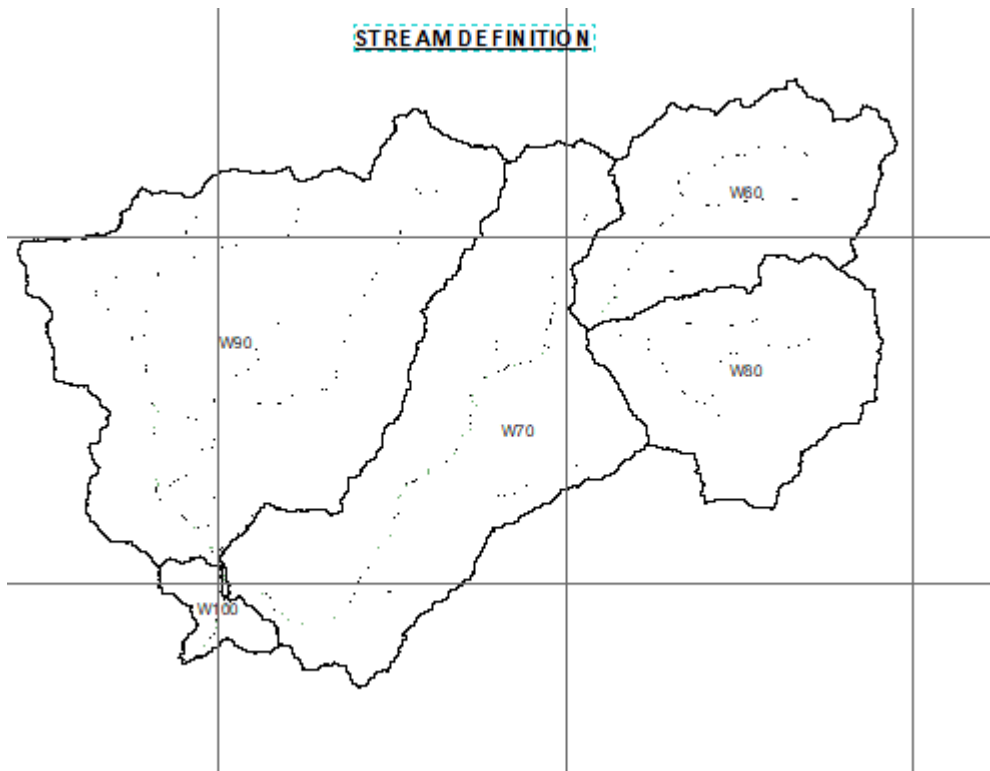




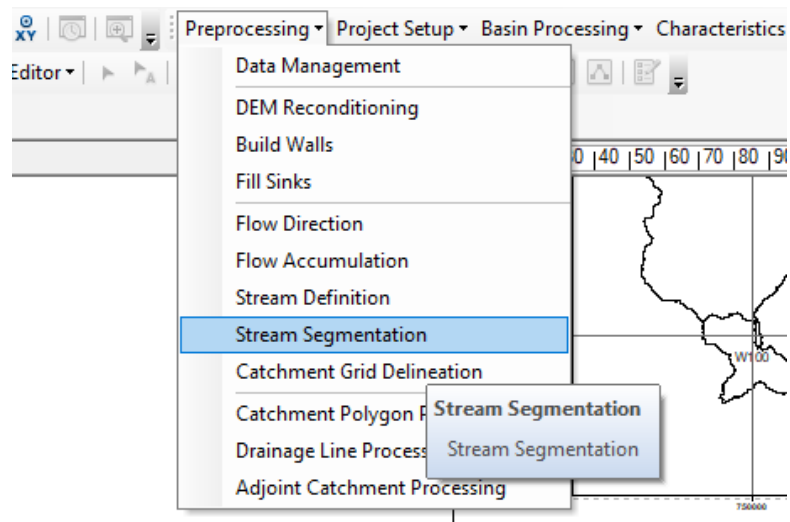
4.2.4. STREAM DEFINITION

A partir de las celdas que formamos con los pixeles, nos permite generar nuestros ríos.

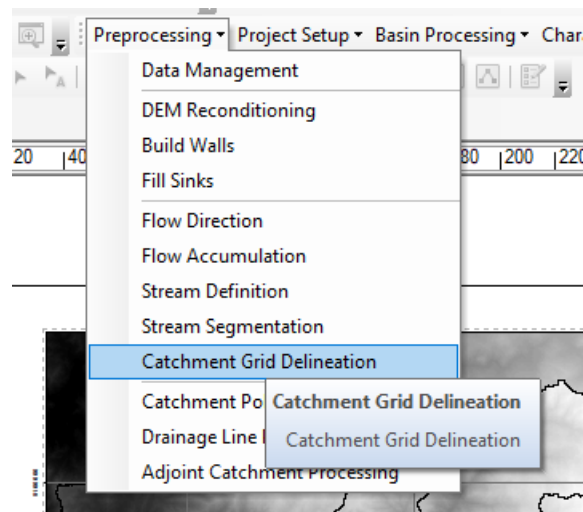




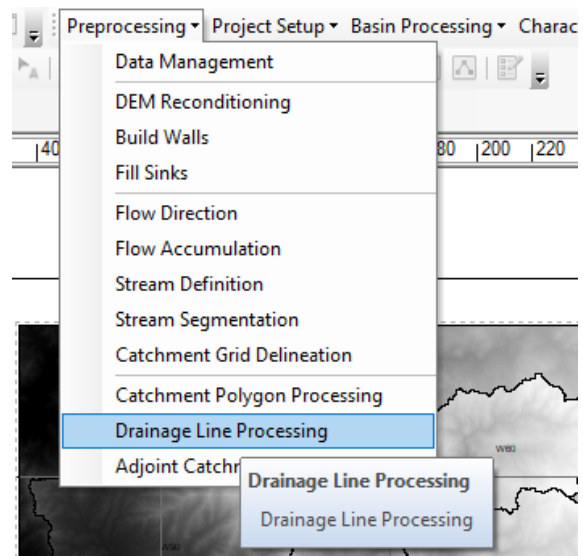
4.2.5. STREAM SEGMENTATION



4.2.6. CATCHMENT GRID DELINEATION

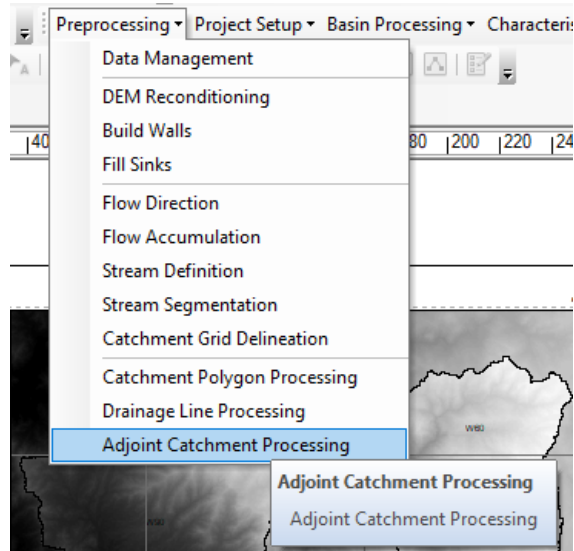


4.2.7. DRAINAGE LINE PROCESSING



4.2.8. ADJOINT CATCHMENT PROCESSING

Para esta actividad repetitiva, empleamos una automatización una herramienta de programación dentro del ArcGis, que nos permitió realizar en más de una ocasión el modelado del a cuenca hasta poder llegar a una correcta modelación.

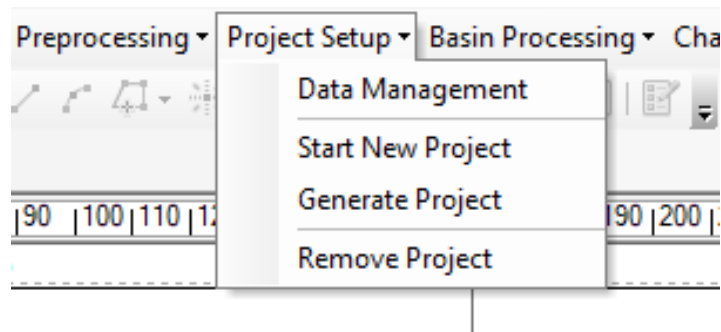


Siguiendo con nuestro modelo, usamos el Geo-Hms el cual nos permite trabajar en el ArcGis generando una Cuenca con todas sus características

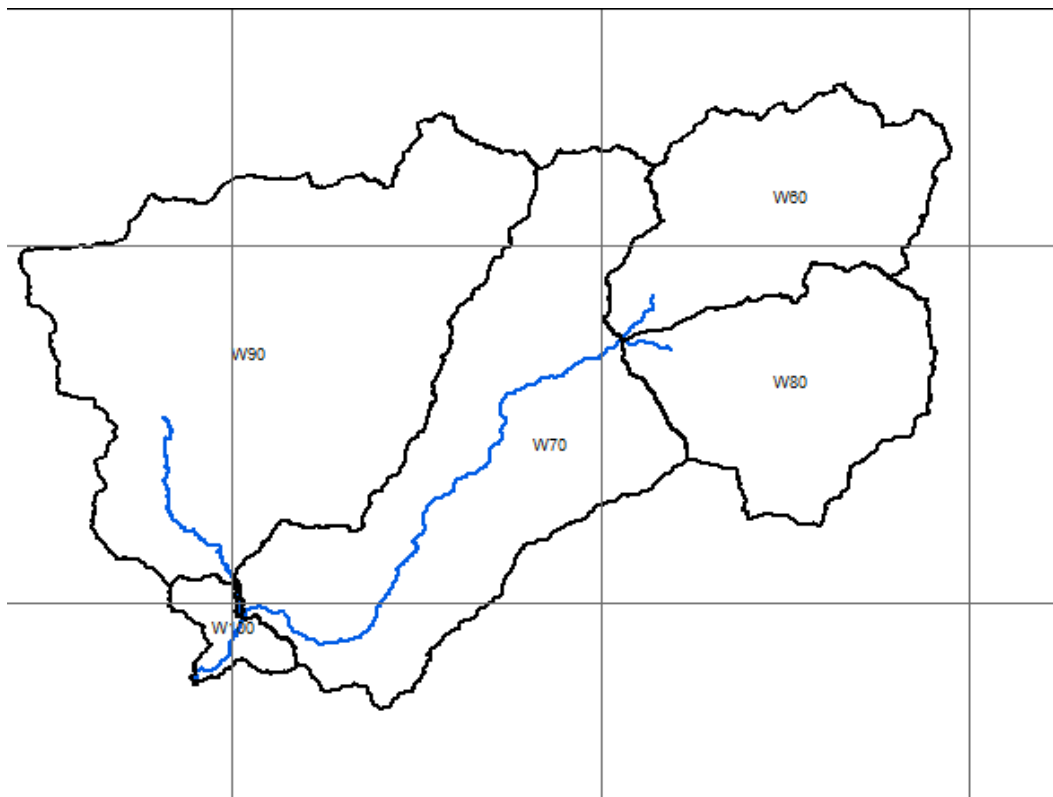
4.2.9. PROJECT SETUP

Start New Project

Esta opción nos permite definir el punto de salida de la Cuenca.



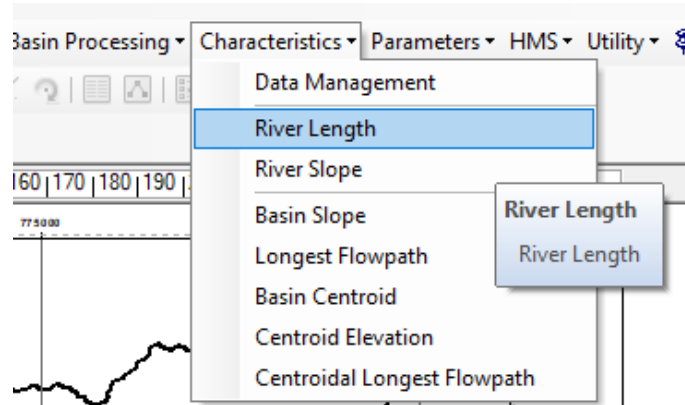
Esta imagen muestra el punto de aforo de la cuenca Rio Virú



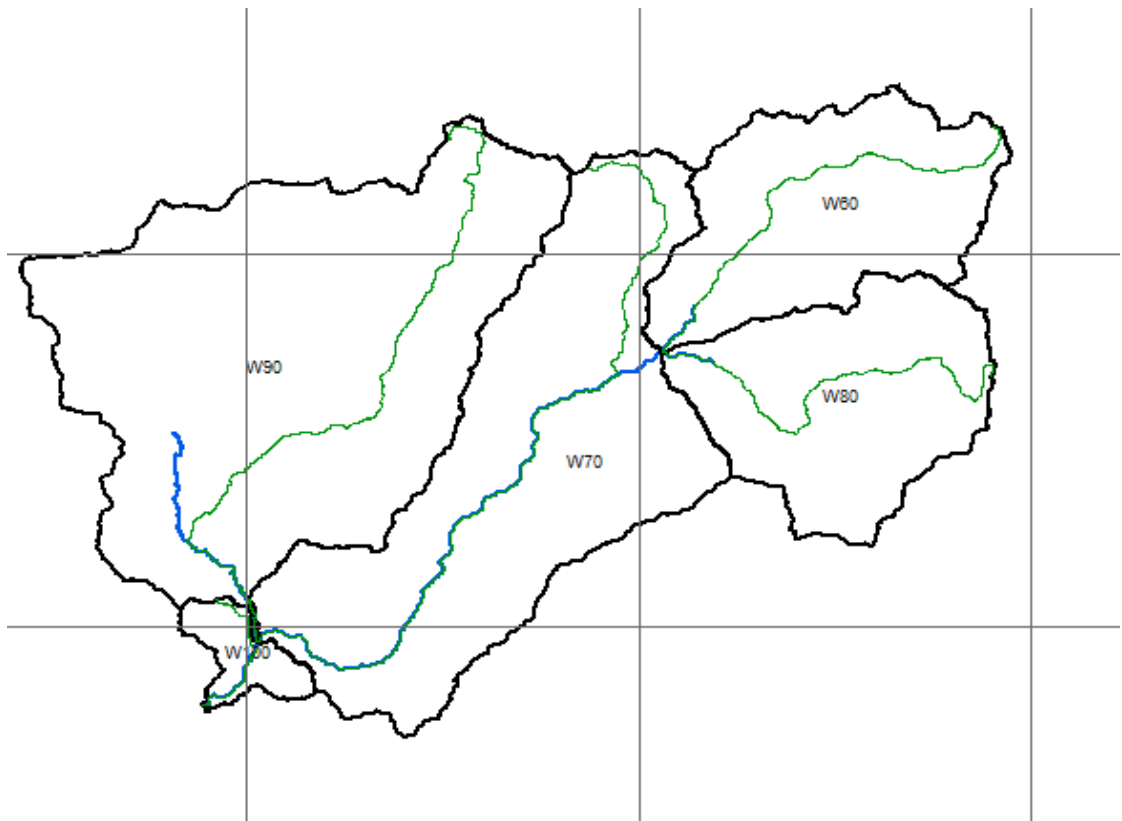
4.2.10. CHARACTERISTICS

River Length

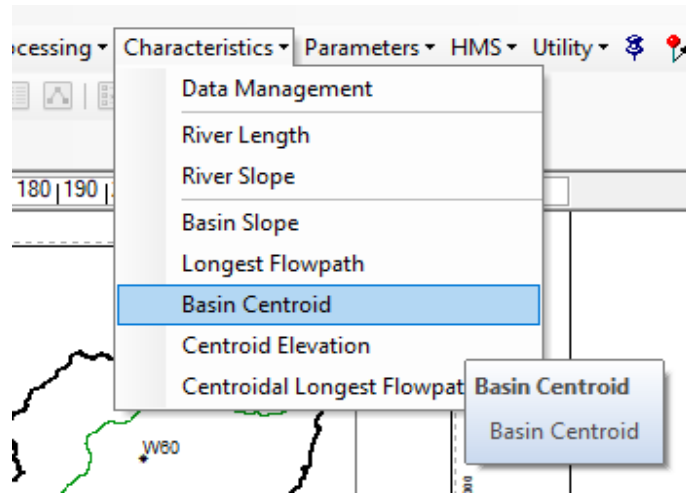
Esta opción nos permite calcular la longitud de los ríos de la nuestra Cuenca.



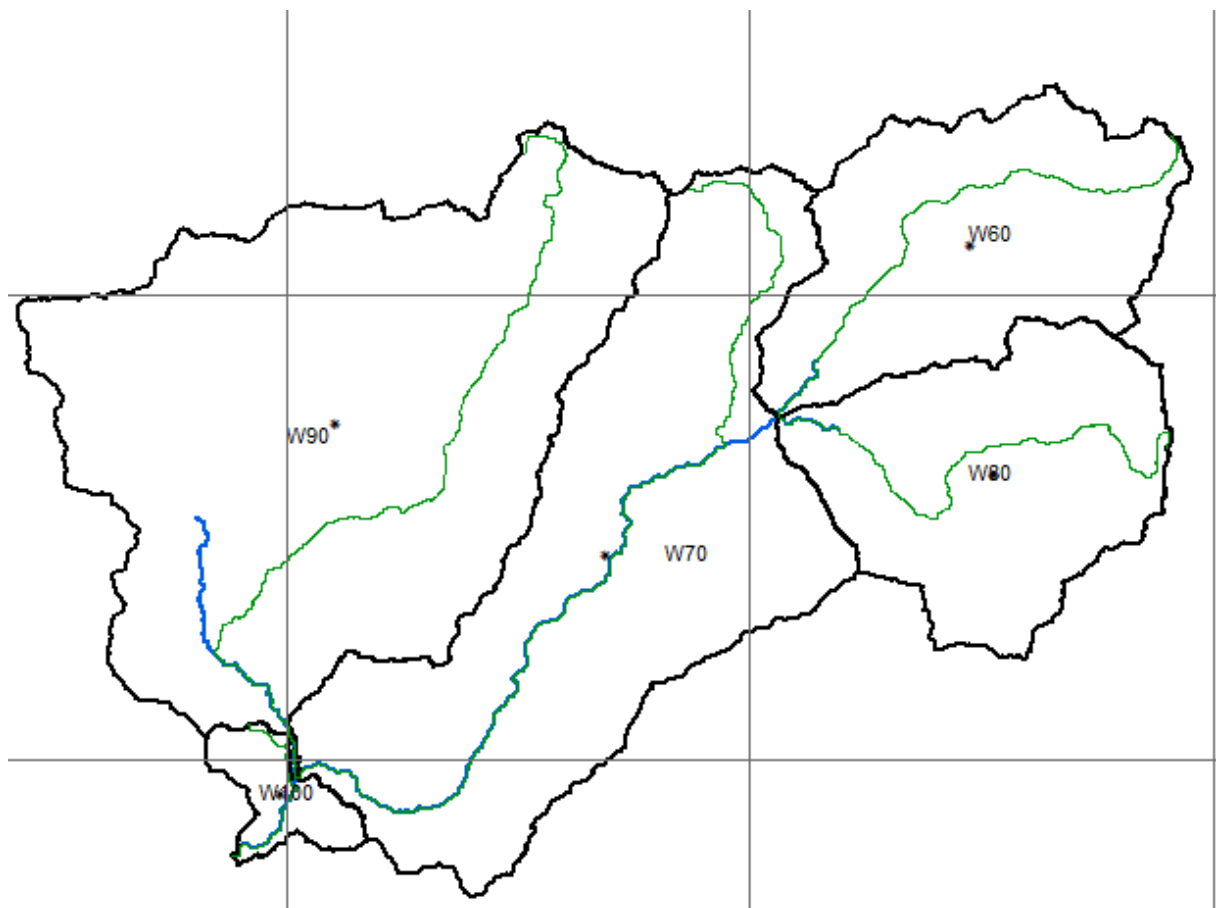
En esta imagen nos muestra el recorrido más largo del cause

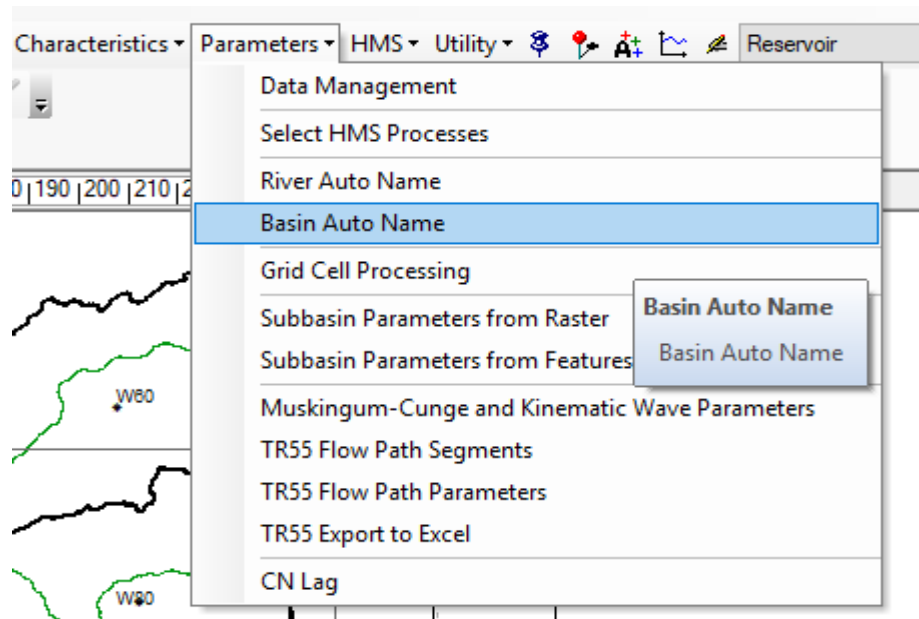


4.2.11. BASEN CENTROID



En esta imagen nos muestra el centro de cada cuenca.





4.2.12. SELECT HMS PROCESSES

En esta opción indicamos el método para calcular las perdidas.

4.2.13. RIVER AUTO NAME

Indicamos el nombre a cada Río que se encuentra a la Cuenca.

4.2.14. BASIN AUTO NAME

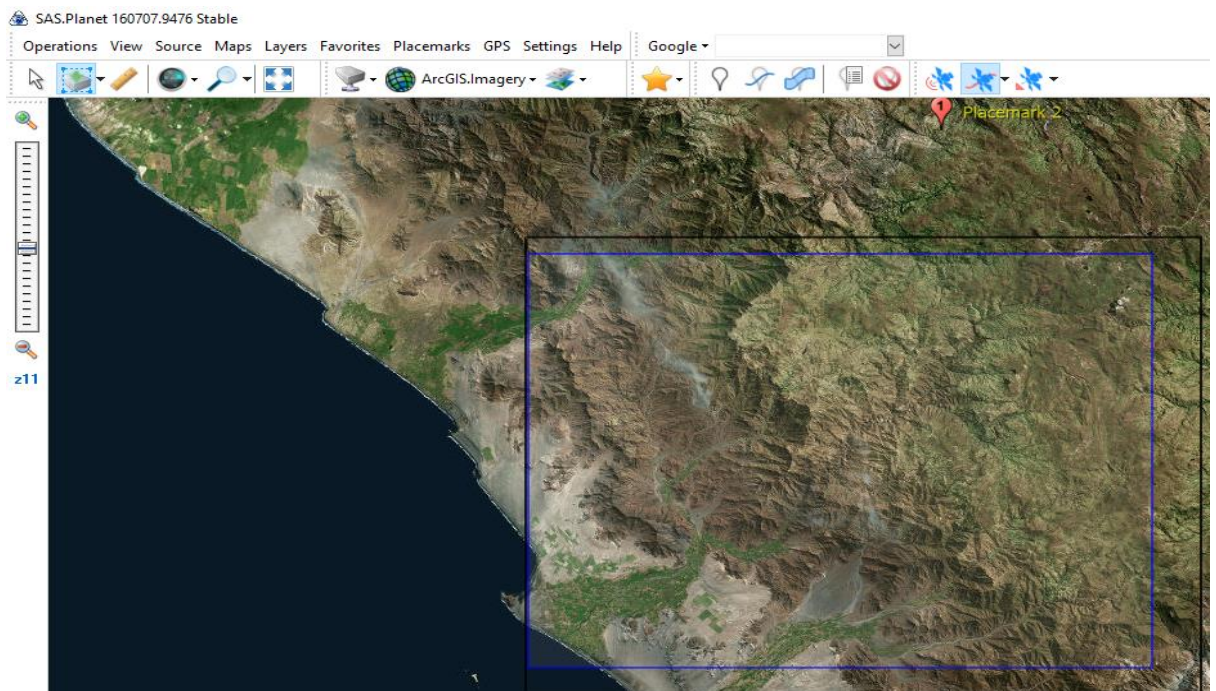
Indicamos el nombre a cada subcuenca.

4.2.15. SUBBASIN PARAMETERS FROM RASTER

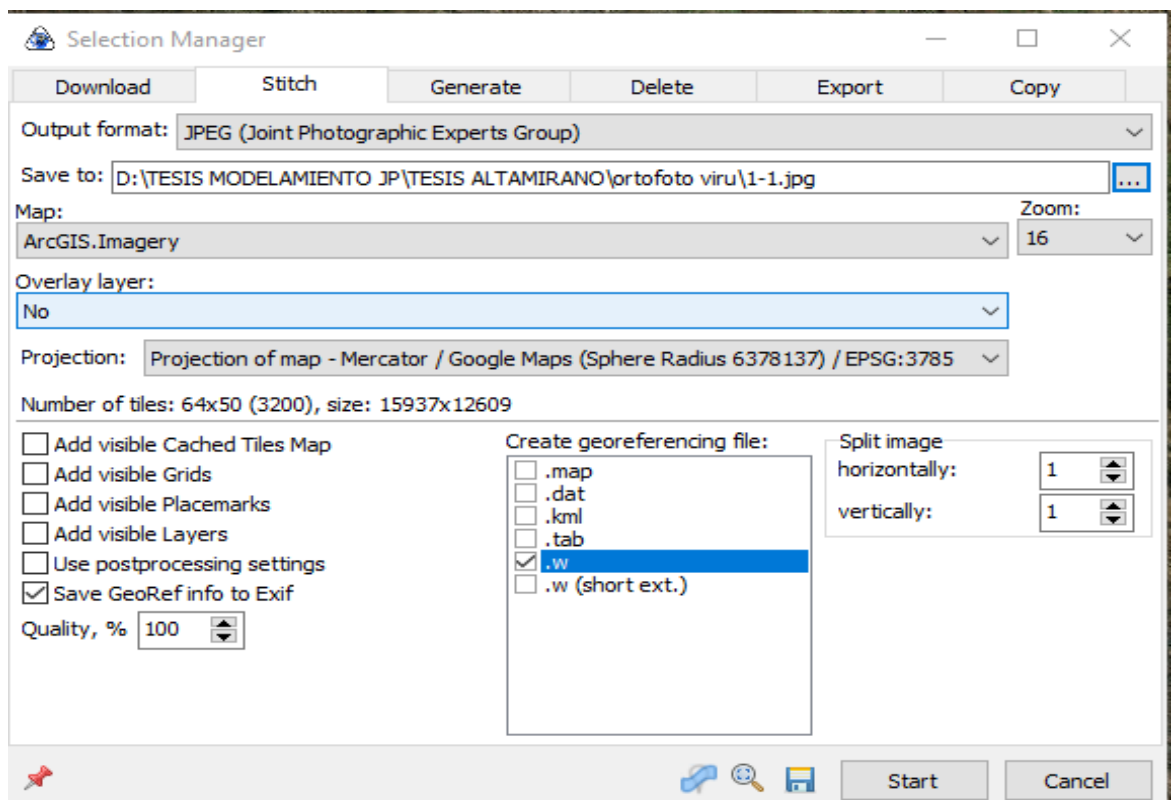
Agregamos Parámetros a nuestro Raster, en este caso los parámetros que agregamos a nuestro Raster serán nuestro Curva Numero. Para importamos el Raster de la Clasificación Manual. Para la clasificación de suelos usamos el método Clasificación Supervisada Manual en el ArcGis considerando que es más exacta que los demás métodos.

DESARROLLO DE NUMERO DE CURVA DE LA CUENCA RIO VIRU

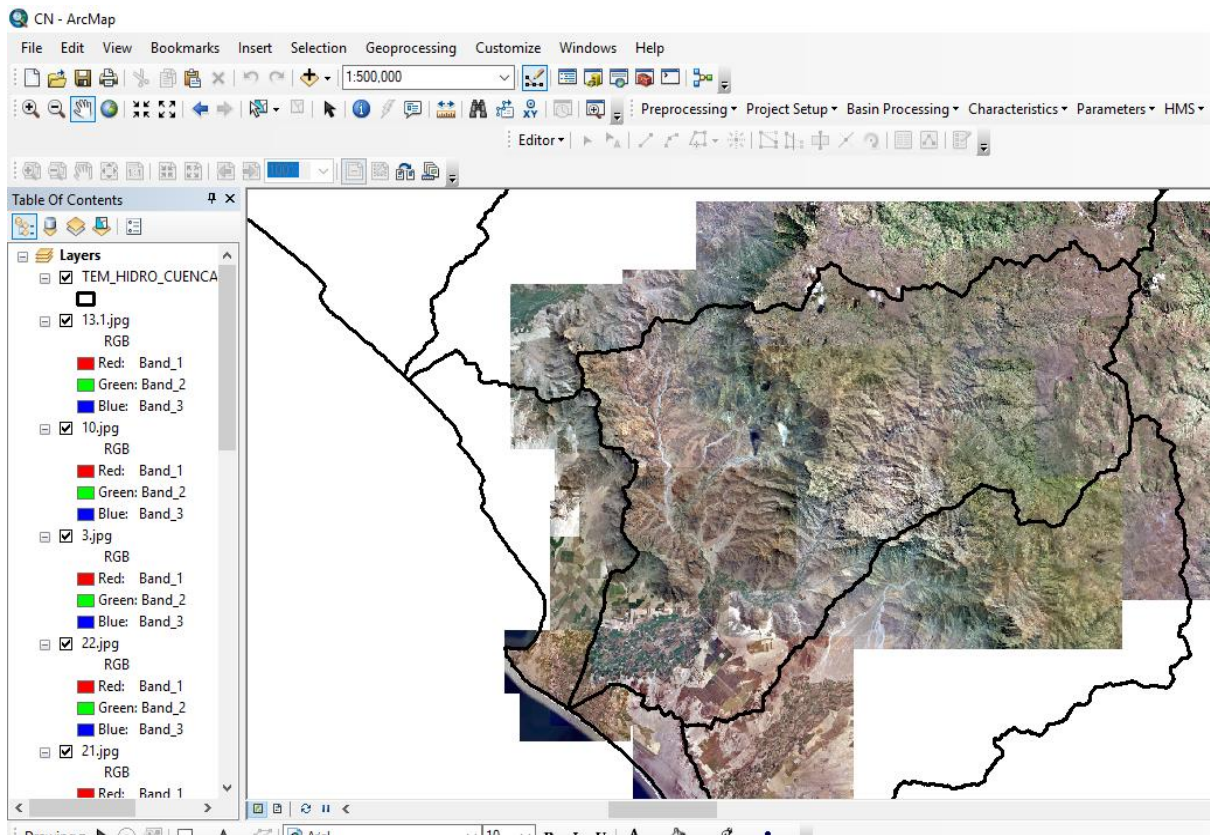
Se descargó ortofotos de la cuenca Virú del programa SASPLANET



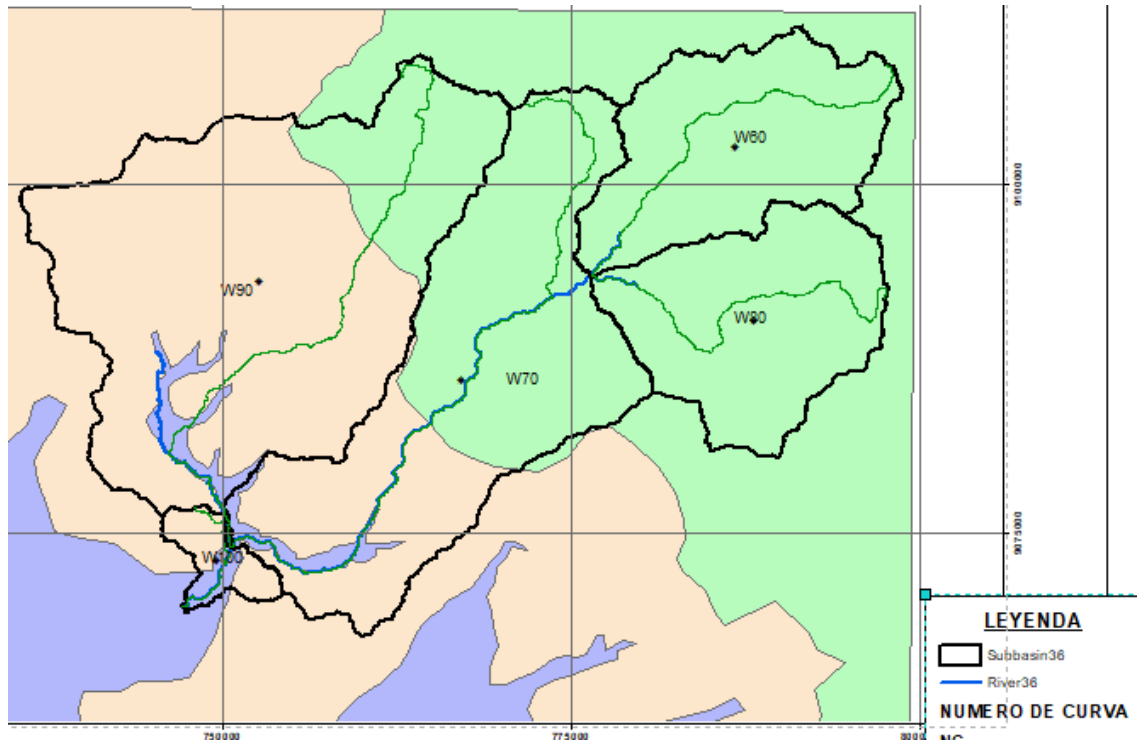
Buscamos la ruta donde guardaremos los archivos para luego importarlo al ARGIS



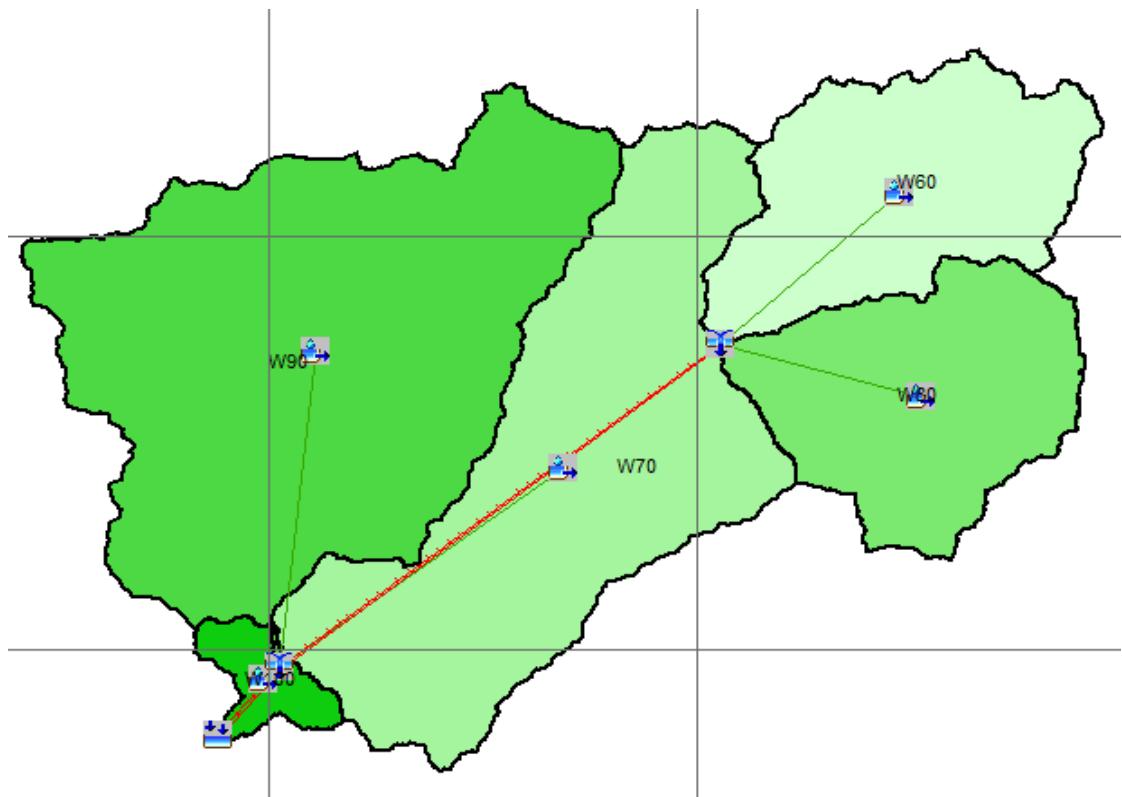
Adjuntamos los archivos descargados del SASPLANET en el programa ARCGIS para procesarlos y crear un Raster que contenga los valores de Numero de Curva de los tipos de Suelos.



RASTER DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN EL NUMERO DE CURVA



Clasificación manual de suelos

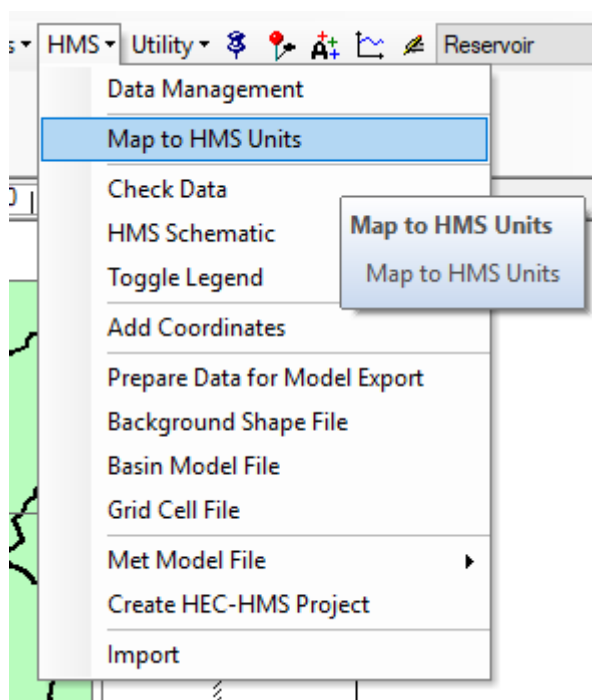


La tabla representa los valores de numero de curva.

N°	NOMBRE	AREA (km2)	CN
1	W100	32,78	60.12
2	W90	656.86	77.81
3	W80	240.17	72.71
4	W70	487.70	78.69
5	W60	247.86	74.21

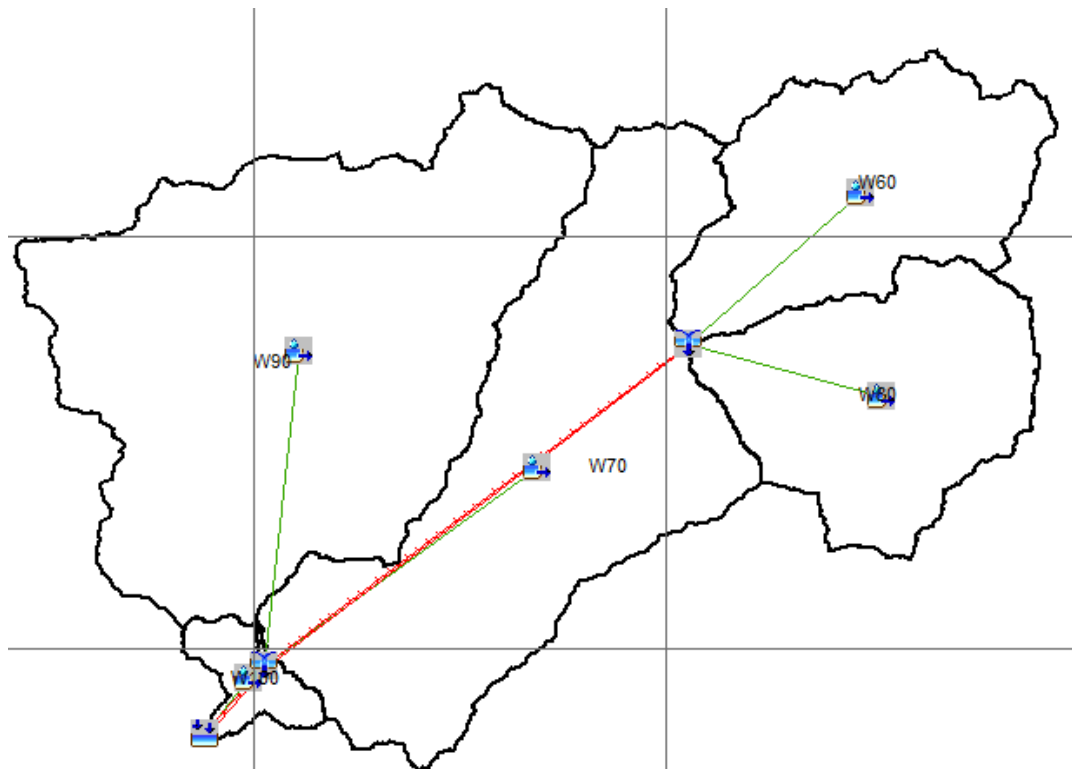
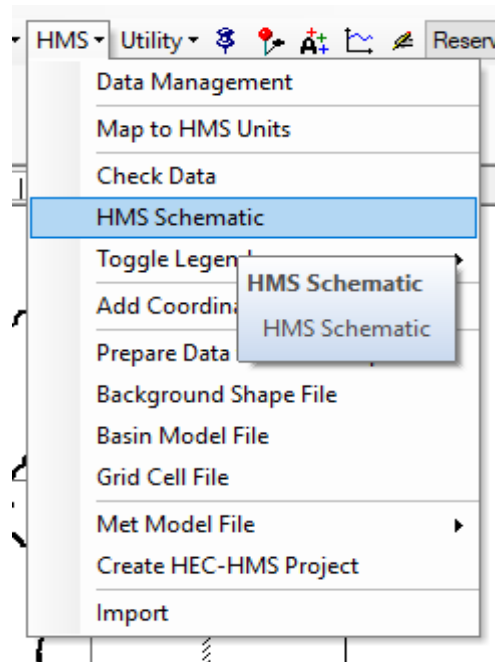
4.2.16. MAP TO HMS UNITS

Agregamos las características y unidades al archive para exportarlo al HEC-HMS



4.2.17. HMS SHEMATIC

Creamos las conexiones dentro de nuestras cuencas.



4.2.18. TOOGLE LEGEND – HMS LEGEND

Incorporamos las leyendas dentro del modelo de la Cuenca.

4.2.19. ADD COORDINATES

Agregamos las coordenadas al modelo de la Cuenca.

4.2.20. PREPARATE DATA FOR MODEL EXPORT

Preparamos todos los datos para ser exportados al HEC-HMS

4.2.21. BACKGROUD SHAPE FILE

Ordenados al programa copie todas las imágenes al Modelo de la Cuenca.

4.2.22. BASIN MODEL FILE

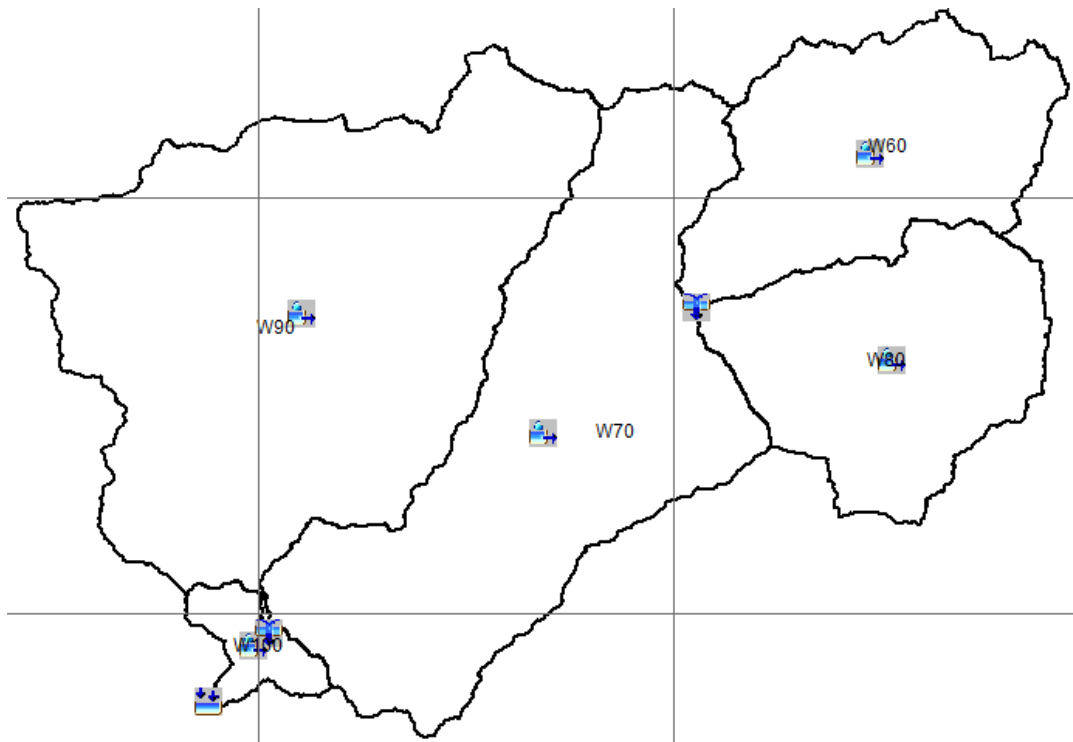
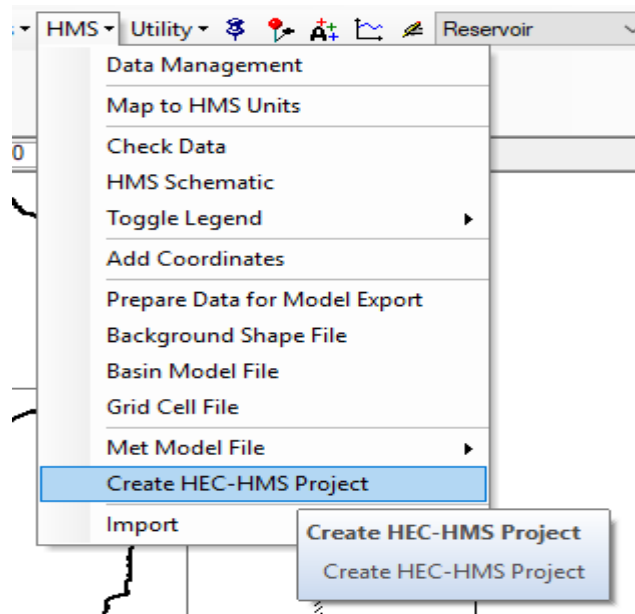
Crea el Modelo de la Cuenca para el HEC-HMS.

4.2.23. MET MODEL FILE – SPECIFIC HYETOGRAPH

Copia el modelo meteorológico al Modelo de la Cuenca.

4.2.24. CREATE HEC-HMS PROJECT

Creamos el Proyecto y adjuntamos todos los archivos anteriores.



4.3. POLIGONO DE THIESEN

Este método se utiliza para poder ingresar las precipitaciones y caudales, el cual nos permite una mejor distribución de las lluvias en toda la extensión de nuestra cuenca.

Las precipitaciones se han agrupado por fechas, en eventos que mediante el método de Polígonos de Thiesen a través del ArcGis, pudimos obtener las áreas de influencia de cada estación vecina a la cuenca Virú. Y así poder calcular la precipitación promedio máxima diarios.

AREAS DE LAS SUBCUENCAS DEL RIO VIRU

ESTACION	AREAS PARCIALES (m ²)				
	W60	W70	W80	W90	W100
AREA TOTAL	247,863,750.00	487,698,593.75	240,177,187.50	656,861,562.50	32,780,000.00

AREAS DE INFLUENCIA POR POLIGONOS DE THIESEN

ESTACION	AREAS PARCIALES (m ²)				
	W60	W70	W80	W90	W100
JULCAN	110,338,459.64	266,847,154.50	29,540,079.33	175,662,842.21	
QUIRUVILCA	32,605,083.70				
HUANCAMARCANGA	104,920,206.66	1998866.712	210,637,108.17		
LAREDO				268,370,272.56	
VIRU		218,852,572.54		212,828,447.74	32,780,000.00
AREA TOTAL	247,863,750.00	487,698,593.75	240,177,187.50	656,861,562.50	32,780,000.00

AREAS PARCIALES Y AREAS DEL RASTER DE LAS SUBCUENCAS

	SUBCUENCAS				
	W60	W70	W80	W90	W100
AREA PARCIALES	247,863,750.00	487,698,593.75	240,177,187.50	656,861,562.50	32,780,000.00
RASTER	1,586,328.00	3,121,271.00	1,537,134.00	4,203,914.00	209,792.00
JULCAN	110,338,459.64	266,847,154.50	29,540,079.33	175,662,842.21	
QUIRUVILCA	32,605,083.70				
HUANCAMARCANGA	104,920,206.66	1998866.712	210,637,108.17		
LAREDO				268,370,272.56	
VIRU		218,852,572.54		212,828,447.74	32,780,000.00
AREA TOTAL	247,863,750.00	487,698,593.75	240,177,187.50	656,861,562.50	32,780,000.00
DIFERENCIA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

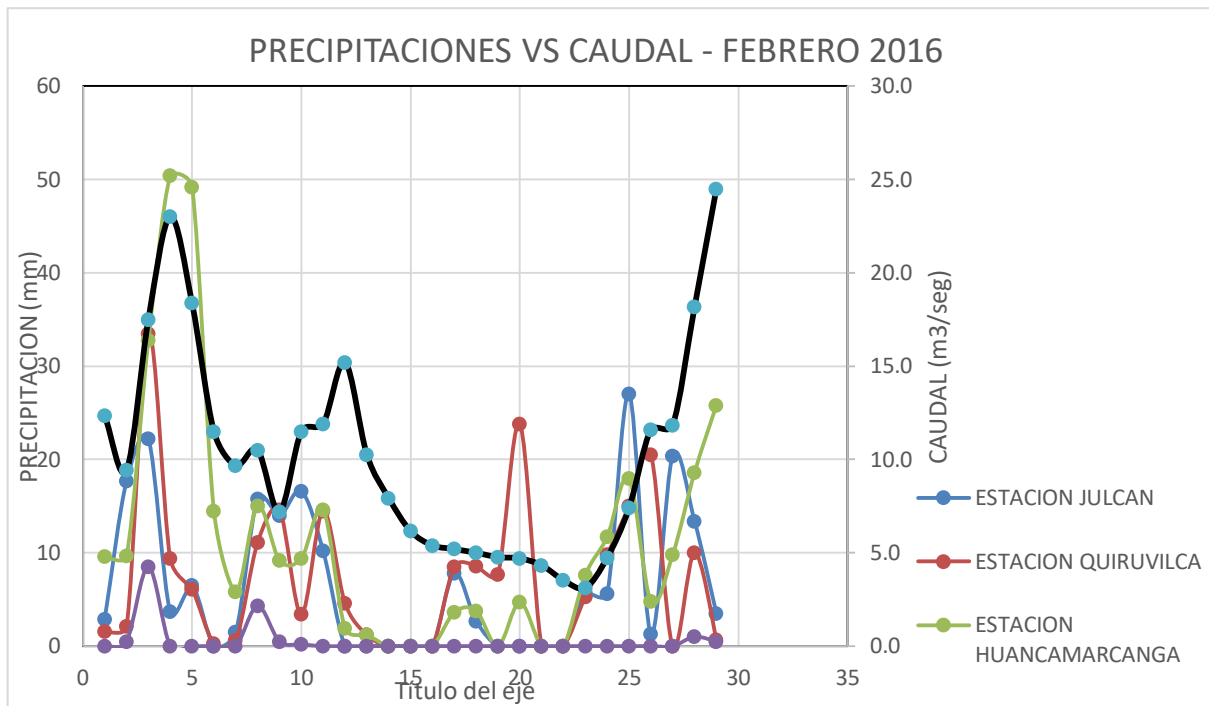
FEBRERO 2016

MES	ESTACION/ALTITUD					CAUDAL
	JULCAN	QUIRUVILCA	HUANCAMARCANGA	LAREDO	VIRU	VIRU
Feb-16	3500	3950	4123	100	64	64
1	2.9	1.6	9.6	0	0	12.3
2	17.7	2.1	9.7	0.5	0	9.4
3	22.2	33.5	32.8	8.5	0	17.5
4	3.7	9.4	50.4	0	0	23.0
5	6.5	6.1	49.2	0	0	18.4
6	0	0.3	14.5	0	0	11.5
7	1.5	0.6	5.8	0	0	9.7
8	15.8	11.1	15	4.3	0	10.5
9	14	14.6	9.2	0.5	0	7.2
10	16.6	3.4	9.4	0.2	0	11.5
11	10.2	14.5	14.6	0	0	11.9
12	0	4.6	1.9	0	0	15.2
13	0	1.2	1.2	0	0	10.3
14	0	0	0	0	0	7.9
15	0	0	0	0	0	6.2
16	0	0	0	0	0	5.4
17	7.8	8.5	3.6	0	0	5.2
18	2.7	8.6	3.8	0	0	5.0
19	0	7.7	0	0	0	4.8
20	0	23.8	4.7	0	0	4.7
21	0	0	0	0	0	4.3
22	0	0	0	0	0	3.5
23	5.7	5.3	7.6	0	0	3.1
24	5.6	9.8	11.7	0	0	4.7

25	27	15	18	0	0	7.4
26	1.3	20.5	4.8	0	0	11.6
27	20.4	0	9.8	0	0	11.8
28	13.4	10	18.6	1	0	18.2
29	3.5	0.7	25.8	0.5	0	24.5

PRECIPITACION PROMEDIO – FEBRERO 2016

SUBCUENCAS					PP
W60	W70	W80	W90	W100	
5.57	1.63	8.78	0.78	0.00	2.88
12.26	9.72	10.68	4.94	0.00	8.16
28.17	12.28	31.50	9.41	0.00	16.04
24.22	2.23	44.66	0.99	0.00	11.09
24.52	3.76	43.95	1.74	0.00	11.77
6.18	0.06	12.72	0.00	0.00	2.77
3.20	0.84	5.27	0.40	0.00	1.64
14.84	8.71	15.10	5.98	0.00	9.30
12.05	7.70	9.79	3.95	0.00	7.02
11.82	9.12	10.29	4.52	0.00	7.70
12.63	5.64	14.06	2.73	0.00	6.63
1.41	0.01	1.67	0.00	0.00	0.45
0.67	0.00	1.05	0.00	0.00	0.25
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.11	4.28	4.12	2.09	0.00	3.58
3.94	1.49	3.66	0.72	0.00	1.84
1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
5.12	0.02	4.12	0.00	0.00	1.36
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.45	3.15	7.37	1.52	0.00	3.55
8.73	3.11	10.95	1.50	0.00	4.38
21.61	14.85	19.11	7.22	0.00	13.17
5.31	0.73	4.37	0.35	0.00	1.77
13.23	11.20	11.10	5.46	0.00	9.00
15.15	7.41	17.96	3.99	0.00	8.59
12.57	2.02	23.06	1.14	0.00	6.24

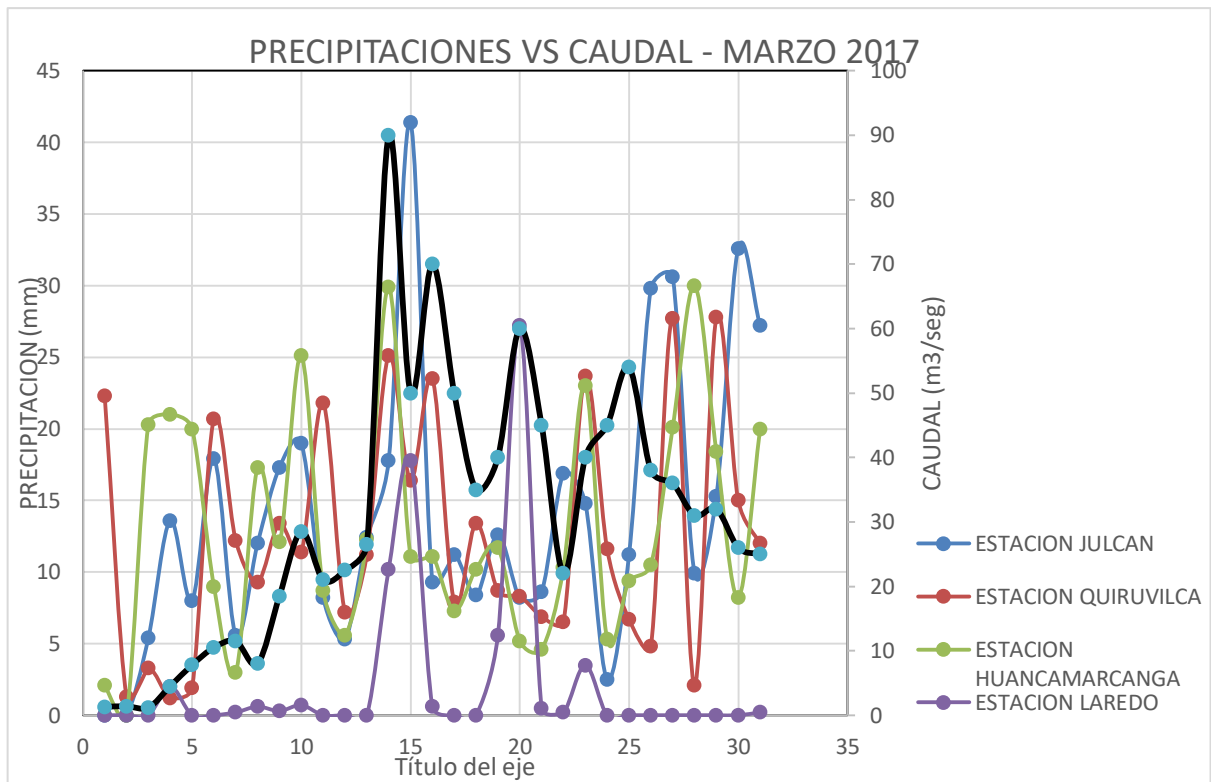


MARZO 2017

MES	ESTACION/ALTITUD					CAUDAL
	JULCAN	QUIRUVILCA	HUANCAMARCANGA	LAREDO	VIRU	VIRU
MARZO	3500	3950	4123	100	64	64
1	0	22.3	2.1	0	0	1.3
2	0	1.3	0	0	0	1.4
3	5.4	3.3	20.3	0	0	1.2
4	13.6	1.2	21	2	0	4.5
5	8	1.9	20	0	0	7.8
6	17.9	20.7	9	0	0	10.5
7	5.6	12.2	3	0.2	0	11.5
8	12	9.3	17.3	0.6	0	8
9	17.3	13.4	12.1	0.3	0	18.5
10	19	11.4	25.1	0.7	0	28.5
11	8.2	21.8	8.7	0	0	21
12	5.3	7.2	5.6	0	0	22.5
13	12.4	11.2	12.3	0	0	26.5
14	17.8	25.1	29.9	10.2	0	90
15	41.4	16.4	11.1	17.8	0	50
16	9.3	23.5	11.1	0.6	0	70
17	11.2	7.9	7.3	0	0	50
18	8.4	13.4	10.2	0	0	35
19	12.6	8.7	11.7	5.6	0	40
20	8.2	8.3	5.2	27.2	0	60
21	8.6	6.9	4.6	0.5	0	45
22	16.9	6.5	10.3	0.2	0	22
23	14.8	23.7	23	3.5	0	40
24	2.5	11.6	5.3	0	0	45
25	11.2	6.7	9.4	0	0	54
26	29.8	4.8	10.5	0	0	38
27	30.6	27.7	20.1	0	0	36
28	9.9	2.1	30	0	0	31
29	15.3	27.8	18.4	0	0	32
30	32.6	15	8.2	0	0	26
31	27.2	12	20	0.2	0	25

PRECIPITACION PROMEDIO – MARZO 2017

SUBCUENCAS					PP
W60	W70	W80	W90	W100	
3.82	0.01	1.84	0.00	0.00	0.84
0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
11.43	3.04	18.47	1.44	0.00	5.82
15.10	7.53	20.09	4.45	0.00	9.11
12.28	4.46	18.52	2.14	0.00	6.65
14.50	9.83	10.09	4.79	0.00	8.38
5.37	3.08	3.32	1.58	0.00	2.80
13.89	6.64	16.65	3.45	0.00	7.77
14.59	9.52	12.74	4.75	0.00	8.67
20.58	10.50	24.35	5.37	0.00	11.77
10.20	4.52	8.64	2.19	0.00	4.95
5.68	2.92	5.56	1.42	0.00	3.06
12.20	6.84	12.31	3.32	0.00	6.90
23.88	9.86	28.41	8.93	0.00	14.06
25.29	22.70	14.83	18.34	0.00	19.78
11.93	5.13	10.88	2.73	0.00	5.93
9.12	6.16	7.78	3.00	0.00	5.46
9.82	4.64	9.98	2.25	0.00	5.14
11.71	6.94	11.81	5.66	0.00	7.71
6.94	4.51	5.57	13.31	0.00	8.40
6.68	4.72	5.09	2.50	0.00	4.10
12.74	9.29	11.11	4.60	0.00	8.03
19.44	8.19	21.99	5.39	0.00	10.59
4.88	1.39	4.96	0.67	0.00	2.11
9.85	6.17	9.62	3.00	0.00	5.84
18.34	16.35	12.87	7.97	0.00	12.52
25.77	16.83	21.39	8.18	0.00	15.08
17.38	5.54	27.53	2.65	0.00	9.22
18.26	8.45	18.02	4.09	0.00	9.40
19.96	17.87	11.20	8.72	0.00	13.26
22.15	14.96	20.89	7.36	0.00	13.59



4.4. MODELAMIENTO HEC HMS

Culminado el modelamiento de la cuenca Virú e ingresando las precipitaciones mediante los Polígonos de Thiessen en ArcGis, continuamos en el programa Hec Hms para la Calibración de la misma.

Teniendo la cuenca ya modelada en el Hec-Hms, lo primero es ingresar algunos parámetros los cuales nos van a permitir calibrar de la manera óptima. Contamos con 5 sub cuencas las cuales reciben una denominación automática del programa empezando con **W100, W90, W80, W70, W60**, siendo en la sub cuenca **W100** en donde se encuentra la estación de aforo ([outlet1](#)).

También tenemos las propagaciones en donde se unen los cauces para formar estas propagaciones, las cuales están denominadas con **R40, R50 y R70**.

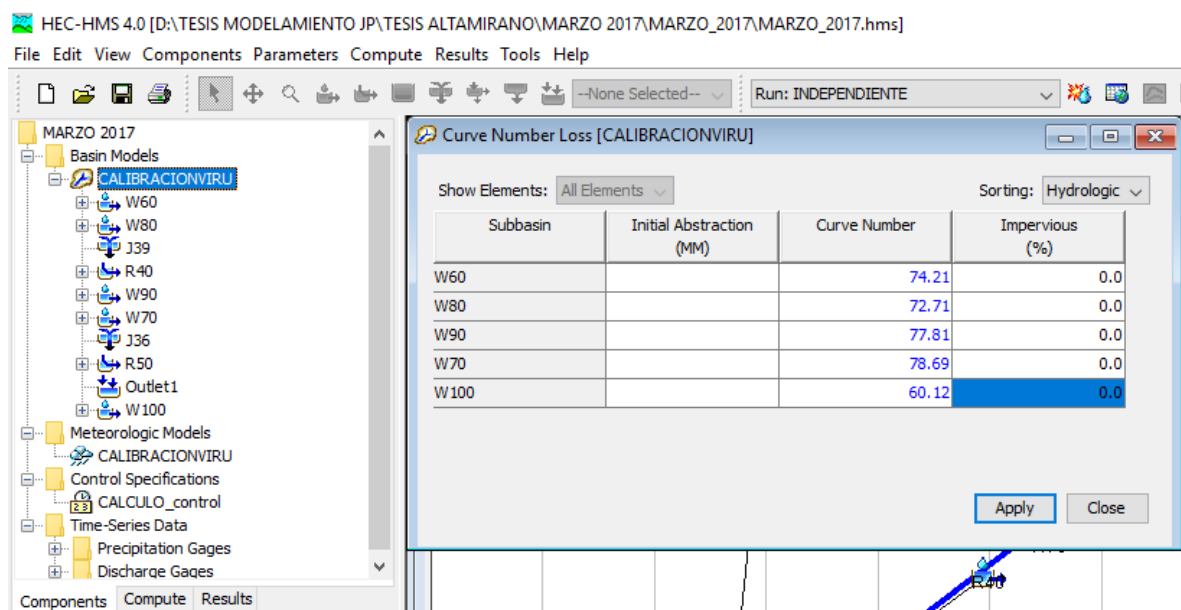
El método con el cuál trabajaremos es el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (llamado SCS, actualmente se lo conoce con las siglas NRCS en inglés) y partiendo de este método desarrollaremos la calibración mediante el modelo triangular.

Tipo Triangular o tipo 2: como es reconocido en el Hec-Hms, este método fue seleccionado debido a que proponemos calibrar la cuenca con datos promedios máximos diarios, y este método se ajusta a ese criterio y a los datos que hemos podido recolectar tanto de las precipitaciones como de los caudales.

4.4.1. SIMULACION HEC-HMS – MARZO 2017

4.4.1.1. CURVA NÚMERO

El primer parámetro que insertamos es el de la curva número, estos datos son obtenidos mediante el ArcGis ya mencionado páginas atrás, entonces solo tenemos que ingresar los datos en el siguiente cuadro:



HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\MARZO_2017\MARZO_2017.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

Run: INDEPENDIENTE

Curve Number Loss [CALIBRACIONVIRU]

Show Elements: All Elements Sorting: Hydrologic

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W60		74.21	0.0
W80		72.71	0.0
W90		77.81	0.0
W70		78.69	0.0
W100		60.12	0.0

Apply Close

Ingresamos los valores para cada sub cuenca. Estos valores son muy importantes ya que nos indican el porcentaje de infiltración que tiene el suelo de nuestra cuenca y en este caso está dividido en 5 subcuencas para que sea mucho más exacto. Este parámetro es válido de la misma manera tanto para cualquier tipo de modelos que se desee emplear, no altera en ninguna de sus formas de aplicación.

4.4.1.2. DESARROLLO MEDIANTE EL SCS TIPO TRIANGULAR Y EL METODO DE KIRPICH

KIRPICH Y EL TIEMPO DE CONCENTRACION (TLAG)

En este paso indicaremos como hallaremos el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida.

El método utilizado es el de Kirpich el cual es uno de los métodos que se adecua a la cuenca Virú y el cual es característico por los tiempos de concentración cortos en comparación a otros métodos.

Para poder calcular el Tiempo de concentración por el método de Kirpich necesitamos tener tanto la longitud del cauce como su pendiente.

La fórmula de Kirpich es la siguiente:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

L: Longitud

S: Pendiente

Tanto la longitud como la pendiente son datos conocidos que nos proporciona el ArcGis y así poder calcular el Tiempo de concentración de la Cuenca.

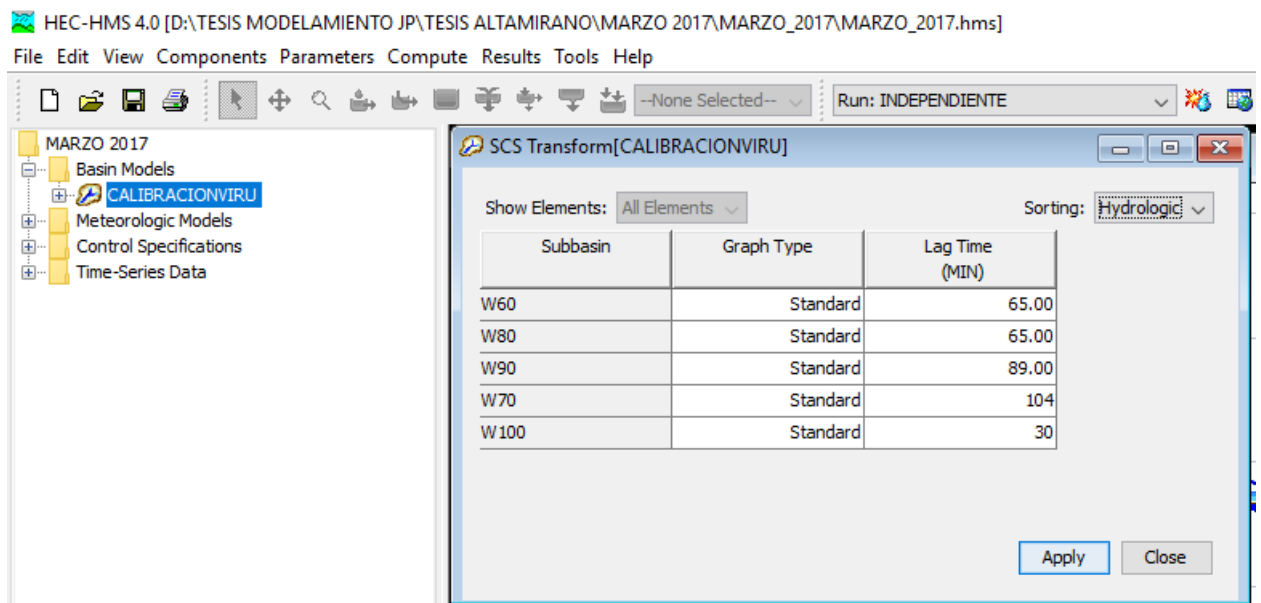
Con el dato del tiempo de concentración podemos calcular el Lag time o tiempo de retardo que es el tiempo que transcurre desde el punto más alto de la precipitación hasta el punto más alto del caudal, el cual se determina mediante la siguiente formula:

$$Tlag = 0.35Tc$$

Entonces ya podemos calcular el Lag time para cada subcuenca en la siguiente tabla.

L(m)	RIO	S	TC (horas)	Tlag (min)
35120.09	6	0.06	3.08	65.00
64500.37	7	0.06	4.98	104.00
34797.07	8	0.06	3.09	65.00
57233.54	9	0.07	4.26	89.00
12392.73	10	0.05	1.43	30.00

Luego los valores del Lag-time los ingresamos al Hec-Hms.



4.4.1.3. MUSKINGUM

Luego de aplicar el método de Kirpich para calcular el tiempo de concentración de la cuenca usaremos este método con el propósito de poder hallar los coeficientes K, X, y el N° de tramos que se necesitan en cada propagación de nuestra cuenca. Contamos con 3 propagaciones: R40, R50 y R70 para cada una de ellas obtenemos estos coeficientes que después ingresamos al Hec-Hms.

Empezamos definiendo todos los datos que tendremos q utilizar y los que hallaremos para la obtención de los coeficientes k, x y N° de tramos:

Q= CAUDAL DEL CAUCE
B= ANCHURA DEL CAUCE
SLP= PENDIENTE DEL CAUCE (J)
RIVLEN= LONGITUD DEL CAUCE (ΔX)
TV= TIEMPO DE VIAJE DEL CAUCE (KIRPICH)
 $\Delta t =$ INTERVALO DE TIEMPO

$$K = 0.6 * Tv$$

$$N^{\circ}tramos = \frac{K * 60(\text{min})}{\Delta t} \qquad c = \frac{L}{Tv * 3600(\text{seg})} * \frac{5}{3}$$

$$x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B * J * c * \Delta x} \right)$$

KIRIPICH

Q	B	Slp	RivLen	Name	Tv	K (hrs)	Δt	N tramos	c	x
200	50	0.044	45688.660	R40	4.18	2.50521297	10	15	5.07	0.50
200	50	0.008	7249.250	R50	1.95	1.16867445	10	7	1.72	0.48

HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\MARZO_2017\MARZO_2017.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

The screenshot shows the HEC-HMS 4.0 interface. The main window is titled "Muskingum Routing [CALIBRACIONVIRU]". It features a "Show Elements" dropdown set to "All Elements" and a "Sorting" dropdown set to "Hydrologic". Below these is a table with the following data:

Reach	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
R40	2.5052	0.50	15
R50	1.1687	0.48	7

At the bottom right of the window are "Apply" and "Close" buttons. The left sidebar shows a project tree for "MARZO 2017" with folders for Basin Models, Meteorologic Models, Control Specifications, and Time-Series Data.

4.4.1.4. METEOROLOGIC MODELS

El modelo meteorológico nos permite ingresar el dato de precipitación de distintas maneras o mejor dicho por distintos métodos, te permite escoger el que mejor se ajuste a lo que quieres realizar y en este caso debido a que solo contamos con un valor promedio máximo diario de lluvia entonces escogemos el SCS Storm que ya veremos más adelante.

HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\MARZO_2017\MARZO_2017.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

--None Selected-- Run: INDEPENDIENTE

MARZO 2017

- Basin Models
 - CALIBRACIONVIRU
 - W60
 - W80
 - J39
 - R40
 - W90
 - W70
 - J36
 - R50
 - Outlet1
 - W100
- Meteorologic Models
 - CALIBRACIONVIRU
 - Specified Hyetograph
- Control Specifications
- Time-Series Data
- Precipitation Gages
- Discharge Gages

Components Compute Results

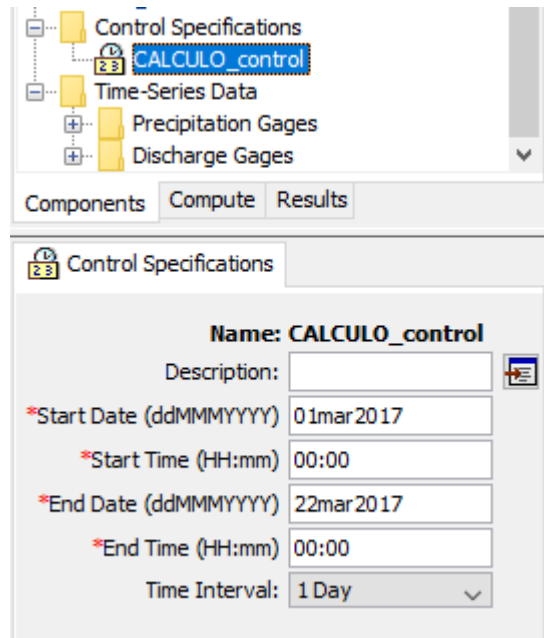
Subbasins

Met Name: CALIBRACIONVIRU

Subbasin Name	Gage
W100	PP MARZO 2017
W60	PP MARZO 2017
W70	PP MARZO 2017
W80	PP MARZO 2017
W90	PP MARZO 2017

4.4.1.5. CONTROL SPECIFICATIONS

Las especificaciones de control sirven para indicar el periodo de tiempo (comienzo y final) en el que el programa tiene que realizar cálculos y el incremento de tiempo que debe utilizar para los cálculos.



Creamos el control 1, nos pide ingresar dichas especificaciones para nuestro caso iniciamos el 01 Marzo del 2017 a las 00:00 horas y termina el 22 de Marzo a las 00:00 horas, con un intervalo de 1 día para los cálculos.

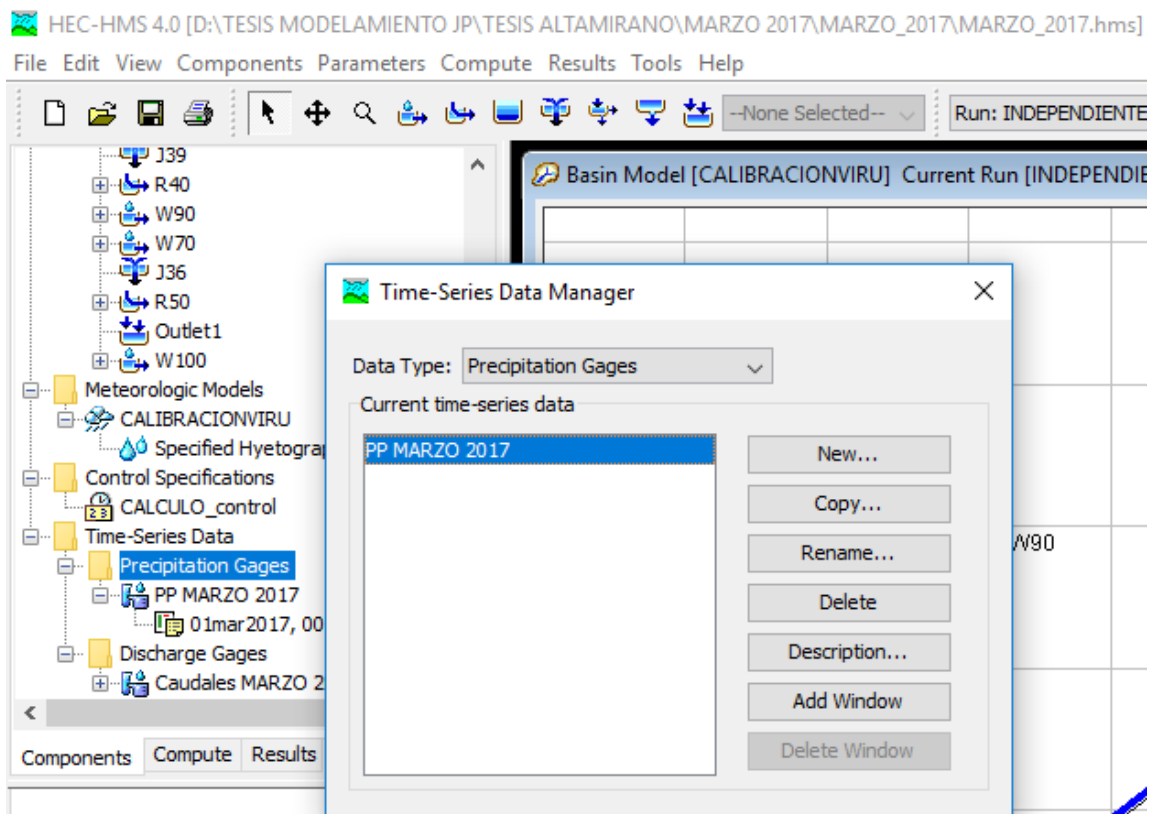
El control 1 trabajará para el evento Precipitación Promedio (PP) y así pueda facilitarnos desarrollo del programa. Acabando con lo que es el control, ya podemos correr el programa con los datos meteorológicos, donde observaremos el comportamiento de la lluvia generada formando los hidrogramas que nos servirán para la comparación y calibración.

Siguiendo con el procedimiento ahora ingresaremos los caudales promedios máximos diarios que nos proporciona el SENAMHI para poder realizar la calibración.

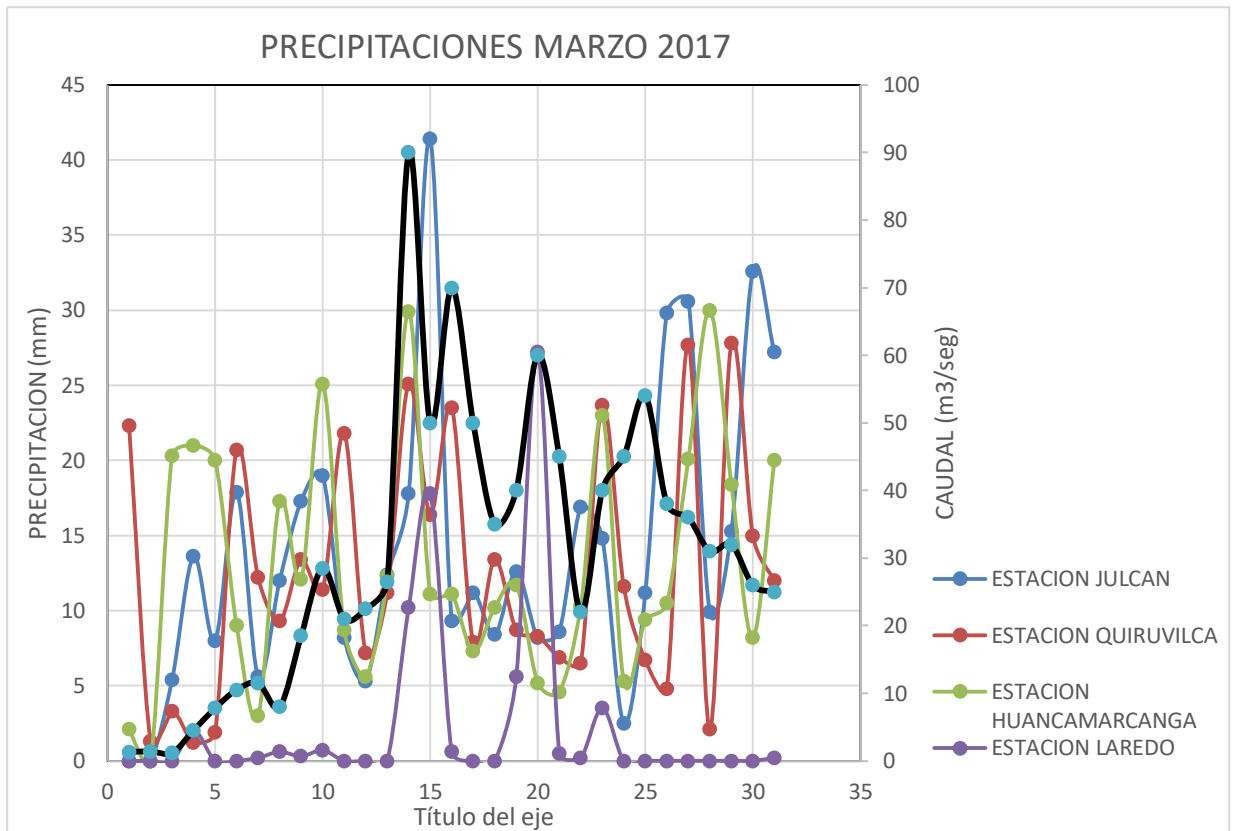
4.4.1.6. TIME SERIES DATA

Este comando nos permite ingresar diferentes tipos de valores con relación al tiempo en que se generan los mismos ya sean por minutos por horas o días. También podemos ingresar los datos de lluvias en el caso si tuviéramos datos de lluvias por horas mediante hietogramas.

Para crear este componente seleccionamos en Time Series Data Manager la opción discharge Gages, la cual refiere a medidores de descargas que vienen a ser los caudales.

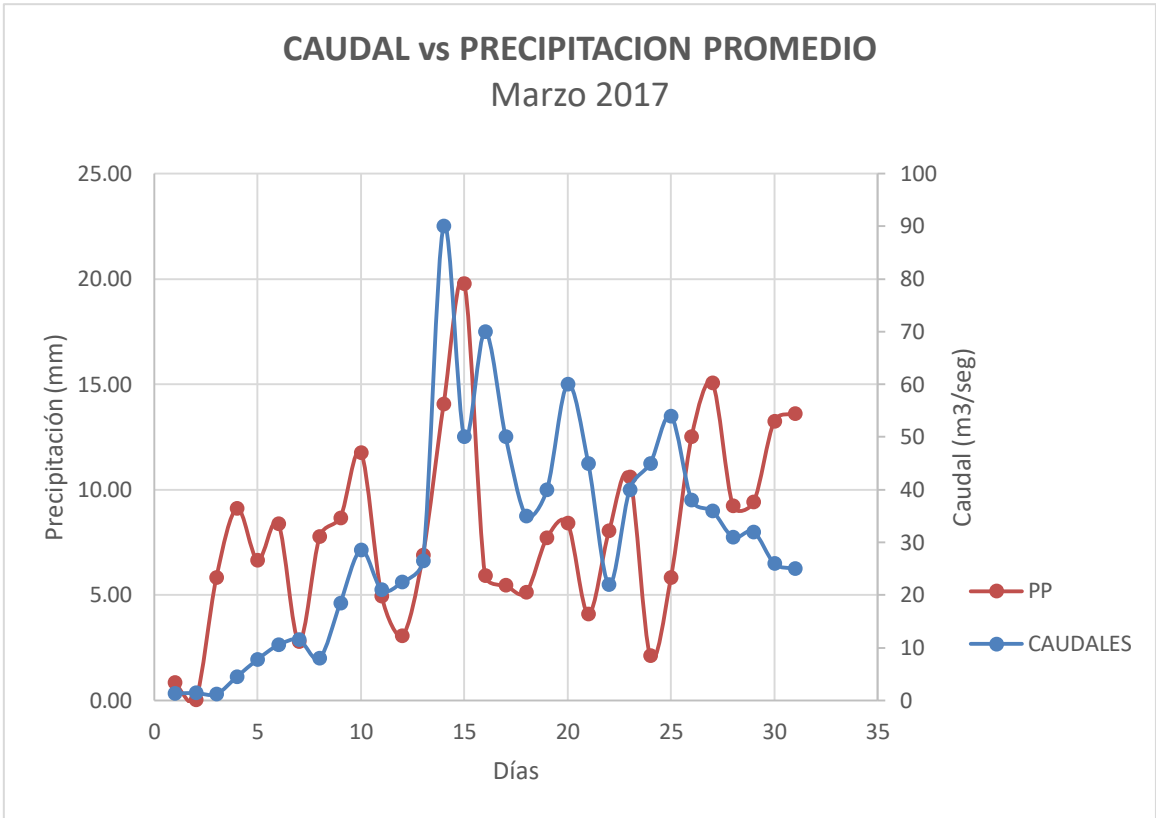


MES	ESTACION/ALTITUD				
	JULCAN	QUIRUVILCA	HUANCAMARCANGA	LAREDO	VIRU
MARZO	3500	3950	4123	100	64
1	0	22.3	2.1	0	0
2	0	1.3	0	0	0
3	5.4	3.3	20.3	0	0
4	13.6	1.2	21	2	0
5	8	1.9	20	0	0
6	17.9	20.7	9	0	0
7	5.6	12.2	3	0.2	0
8	12	9.3	17.3	0.6	0
9	17.3	13.4	12.1	0.3	0
10	19	11.4	25.1	0.7	0
11	8.2	21.8	8.7	0	0
12	5.3	7.2	5.6	0	0
13	12.4	11.2	12.3	0	0
14	17.8	25.1	29.9	10.2	0
15	41.4	16.4	11.1	17.8	0
16	9.3	23.5	11.1	0.6	0
17	11.2	7.9	7.3	0	0
18	8.4	13.4	10.2	0	0
19	12.6	8.7	11.7	5.6	0
20	8.2	8.3	5.2	27.2	0
21	8.6	6.9	4.6	0.5	0
22	16.9	6.5	10.3	0.2	0
23	14.8	23.7	23	3.5	0
24	2.5	11.6	5.3	0	0
25	11.2	6.7	9.4	0	0
26	29.8	4.8	10.5	0	0
27	30.6	27.7	20.1	0	0
28	9.9	2.1	30	0	0
29	15.3	27.8	18.4	0	0
30	32.6	15	8.2	0	0
31	27.2	12	20	0.2	0



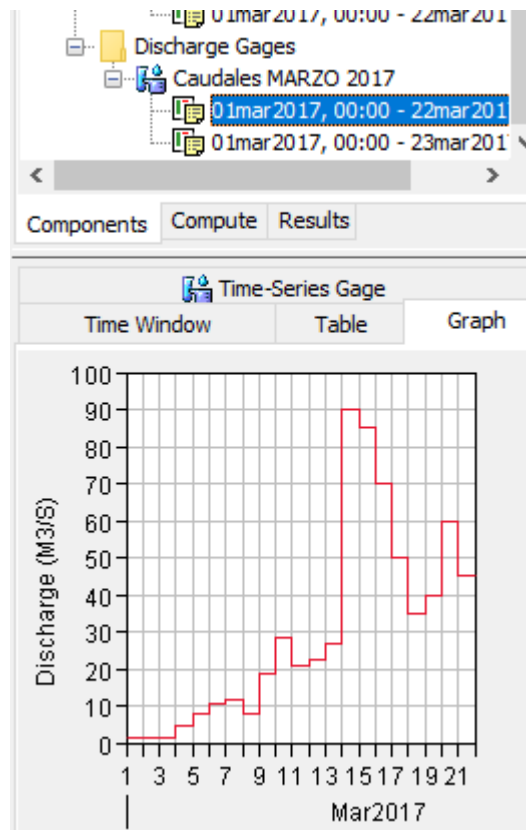
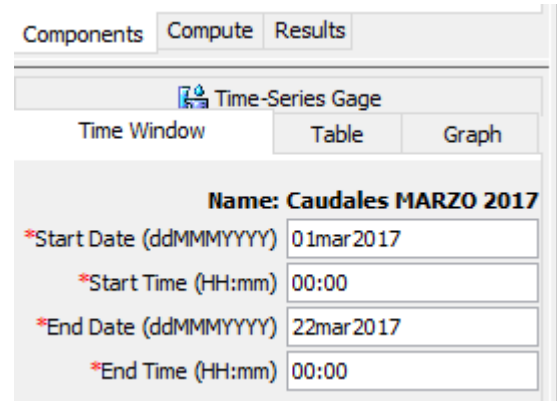
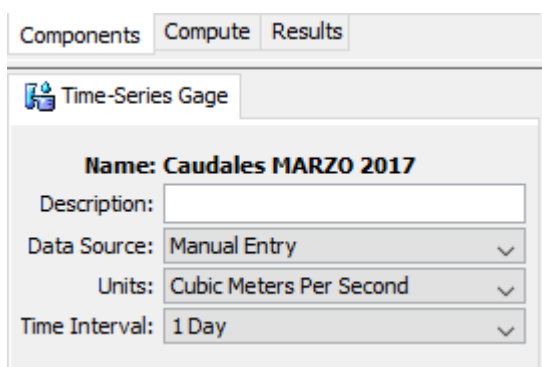
Al ingresar la data de precipitaciones nos muestra el comportamiento de cada estación correspondiente.

					CAUDAL	
SUBCUENCAS					PP	VIRU
W60	W70	W80	W90	W100		64
3.82	0.01	1.84	0.00	0.00	0.84	1.3
0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	1.4
11.43	3.04	18.47	1.44	0.00	5.82	1.2
15.10	7.53	20.09	4.45	0.00	9.11	4.5
12.28	4.46	18.52	2.14	0.00	6.65	7.8
14.50	9.83	10.09	4.79	0.00	8.38	10.5
5.37	3.08	3.32	1.58	0.00	2.80	11.5
13.89	6.64	16.65	3.45	0.00	7.77	8
14.59	9.52	12.74	4.75	0.00	8.67	18.5
20.58	10.50	24.35	5.37	0.00	11.77	28.5
10.20	4.52	8.64	2.19	0.00	4.95	21
5.68	2.92	5.56	1.42	0.00	3.06	22.5
12.20	6.84	12.31	3.32	0.00	6.90	26.5
23.88	9.86	28.41	8.93	0.00	14.06	90
25.29	22.70	14.83	18.34	0.00	19.78	50
11.93	5.13	10.88	2.73	0.00	5.93	70
9.12	6.16	7.78	3.00	0.00	5.46	50
9.82	4.64	9.98	2.25	0.00	5.14	35
11.71	6.94	11.81	5.66	0.00	7.71	40
6.94	4.51	5.57	13.31	0.00	8.40	60
6.68	4.72	5.09	2.50	0.00	4.10	45
12.74	9.29	11.11	4.60	0.00	8.03	22
19.44	8.19	21.99	5.39	0.00	10.59	40
4.88	1.39	4.96	0.67	0.00	2.11	45
9.85	6.17	9.62	3.00	0.00	5.84	54
18.34	16.35	12.87	7.97	0.00	12.52	38
25.77	16.83	21.39	8.18	0.00	15.08	36
17.38	5.54	27.53	2.65	0.00	9.22	31
18.26	8.45	18.02	4.09	0.00	9.40	32
19.96	17.87	11.20	8.72	0.00	13.26	26
22.15	14.96	20.89	7.36	0.00	13.59	25



Mediante este grafico se observa el comportamiento de la precipitación promedio de las estaciones vecinas y los caudales máximos generados en la cuenca Virú.

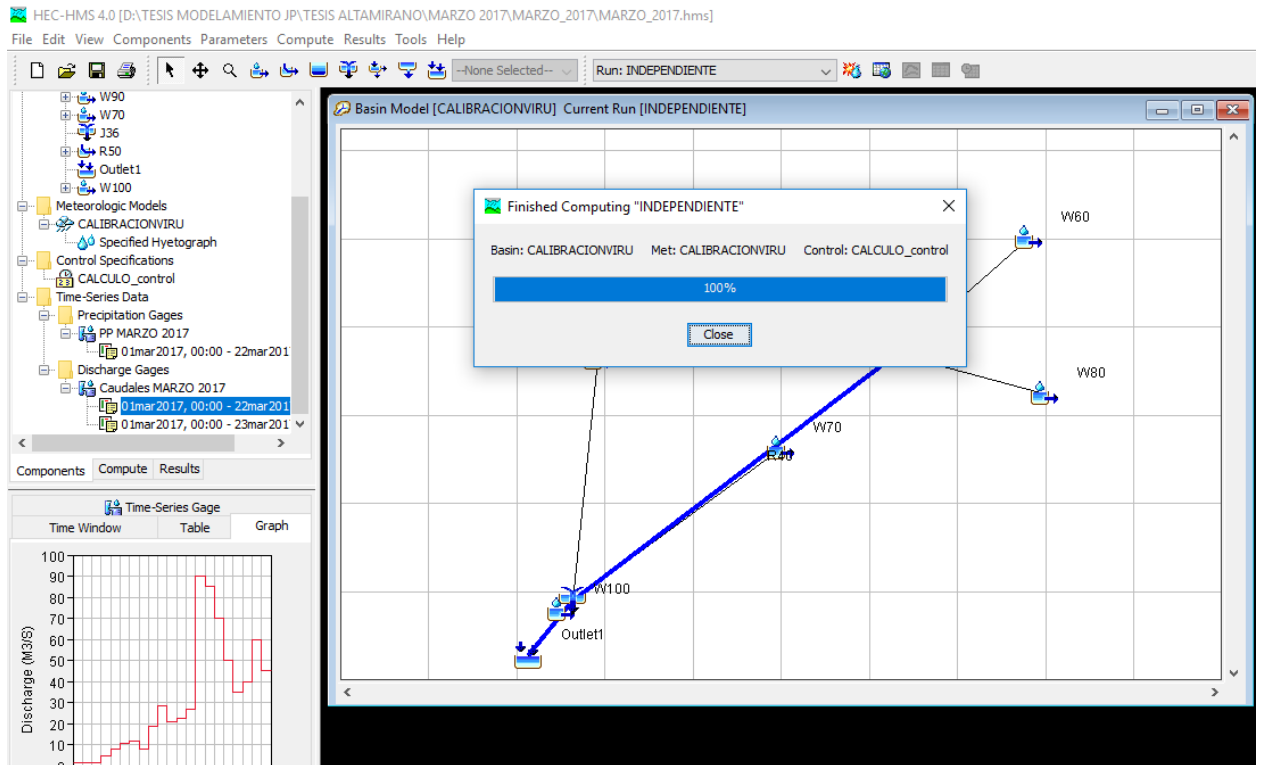
Para la gráfica seleccionamos en la pestaña Graph y podemos observar el gráfico que se genera debido a que el caudal se encuentra en un intervalo de 1 día (siendo en total 24 hrs.) en donde alcanza su máximo valor.



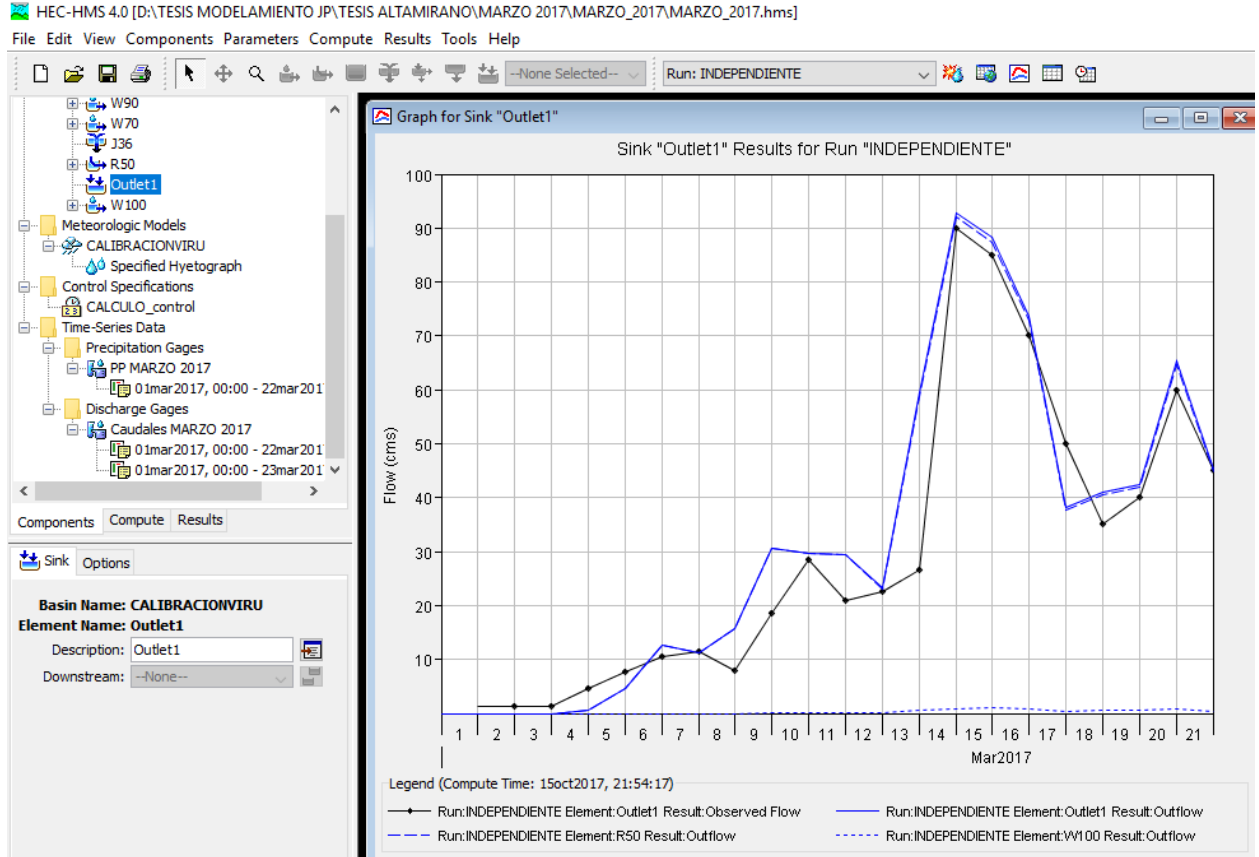
4.4.1.7. SIMULATION RUN MANAGER

En esta etapa creamos la simulación de las lluvias con su evento precipitación promedio y corremos el programa.

Nos muestra la simulación de las lluvias.



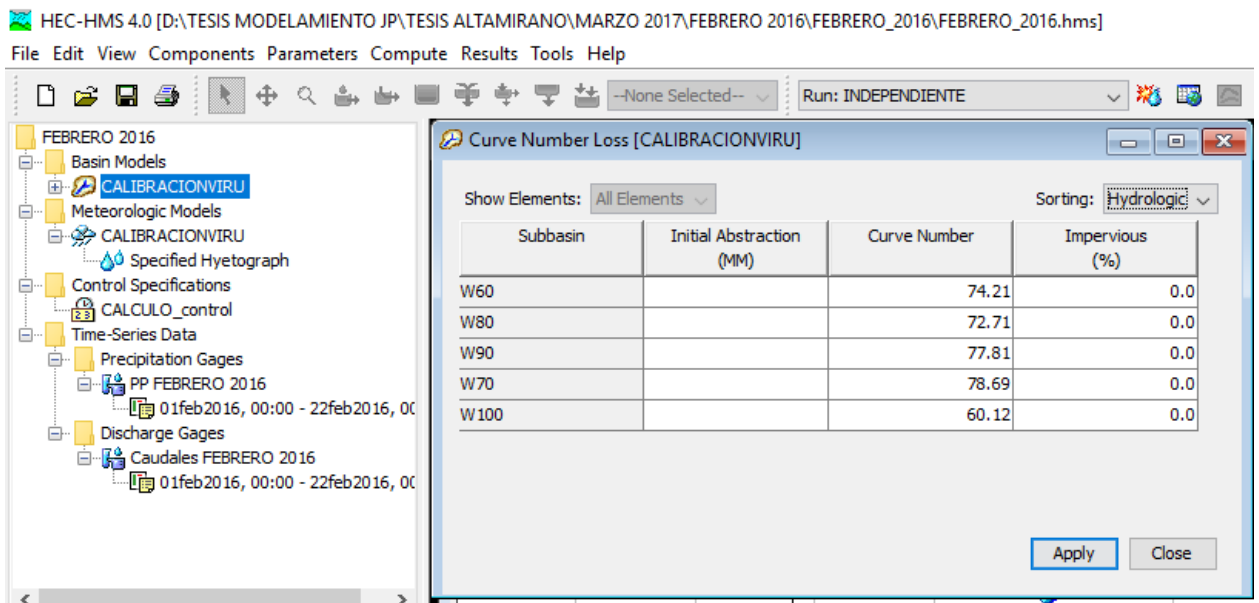
Este gráfico muestra el comportamiento de las Precipitaciones Promedios(PP) vs los Caudales máximos.



4.4.2. SIMULACION HEC-HMS – FEBRERO 2016

4.4.2.1. CURVA NÚMERO

El primer parámetro que insertamos es el de la curva número, estos datos son obtenidos mediante el ArcGis ya mencionado páginas atrás, entonces solo tenemos que ingresar los datos en el siguiente cuadro:



HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\FEBRERO 2016\FEBRERO_2016\FEBRERO_2016.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

Run: INDEPENDIENTE

Curve Number Loss [CALIBRACIONVIRU]

Show Elements: All Elements Sorting: Hydrologic

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W60		74.21	0.0
W80		72.71	0.0
W90		77.81	0.0
W70		78.69	0.0
W100		60.12	0.0

Apply Close

Ingresamos los valores para cada sub cuenca. Estos valores son muy importantes ya que nos indican el porcentaje de infiltración que tiene el suelo de nuestra cuenca y en este caso está dividido en 5 subcuencas para que sea mucho más exacto. Este parámetro es válido de la misma manera tanto para el primer tipo como para el segundo, no altera en ninguna de sus formas de aplicación.

4.4.2.2. DESARROLLO MEDIANTE EL SCS TIPO TRIANGULAR Y EL METODO DE KIRPICH

KIRPICH Y EL TIEMPO DE CONCENTRACION (TLAG)

En este paso indicaremos como hallaremos el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida.

El método utilizado es el de Kirpich el cual es uno de los métodos que se adecua a la cuenca Virú y el cual es característico por los tiempos de concentración cortos en comparación a otros métodos.

Para poder calcular el Tiempo de concentración por el método de Kirpich necesitamos tener tanto la longitud del cauce como su pendiente.

La fórmula de Kirpich $t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$ es la siguiente:

Donde:

L: Longitud

S: Pendiente

Tanto la longitud como la pendiente son datos conocidos que nos proporciona el ArcGis y así poder calcular el Tiempo de concentración de la Cuenca.

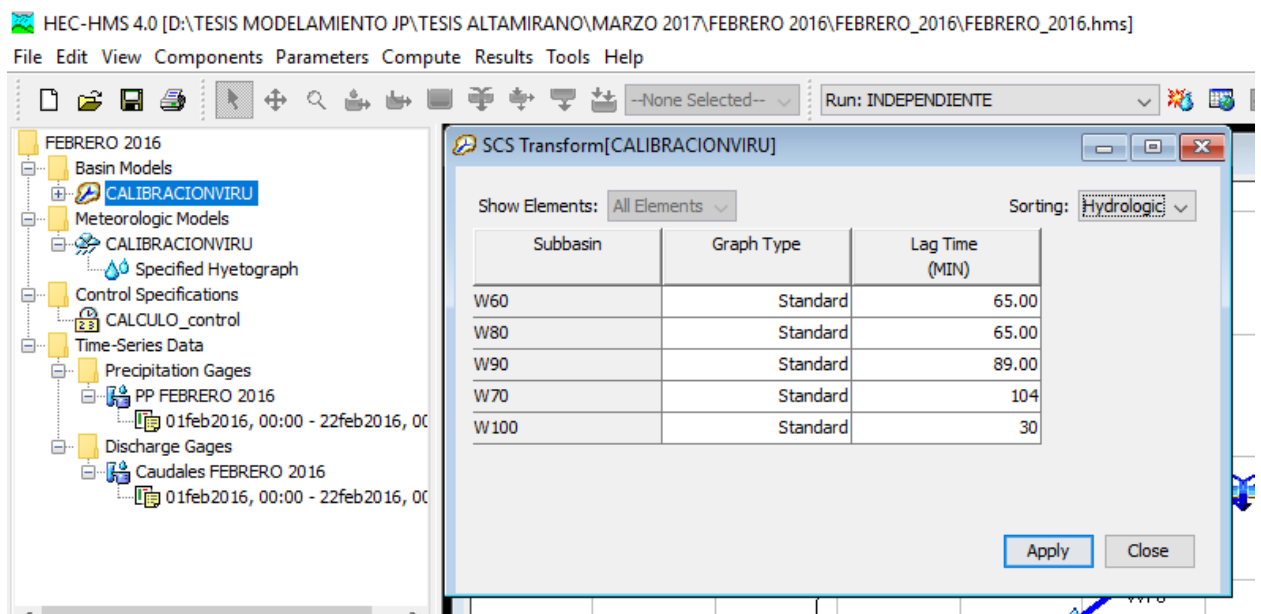
Con el dato del tiempo de concentración podemos calcular el Lag time o tiempo de retardo que es el tiempo que transcurre desde el punto más alto de la precipitación hasta el punto más alto del caudal, el cual se determina mediante la siguiente formula:

$$Tlag = 0.35Tc$$

Entonces ya podemos calcular el Lag time para cada subcuenca en la siguiente tabla.

L(m)	RIO	S	TC (horas)	Tlag (min)
35120.09	6	0.06	3.08	65.00
64500.37	7	0.06	4.98	104.00
34797.07	8	0.06	3.09	65.00
57233.54	9	0.07	4.26	89.00
12392.73	10	0.05	1.43	30.00

Luego los valores del Lag-time los ingresamos al Hec-Hms.



4.4.2.3. MUSKINGUM

Luego de aplicar el método de Kirpich para calcular el tiempo de concentración de la cuenca usaremos este método con el propósito de poder hallar los coeficientes K, X, y el N° de tramos que se necesitan en cada propagación de nuestra cuenca. Contamos con 3 propagaciones: R40, R50 y R70 para cada una de ellas obtenemos estos coeficientes que después ingresamos al Hec-Hms. Empezamos definiendo todos los datos que tendremos q utilizar y los que hallaremos para la obtención de los coeficientes k, x y N° de tramos:

Q= CAUDAL DEL CAUCE
B= ANCHURA DEL CAUCE
SLP= PENDIENTE DEL CAUCE (J)
RIVLEN= LONGITUD DEL CAUCE (ΔX)
TV= TIEMPO DE VIAJE DEL CAUCE (KIRPICH)
 $\Delta t =$ INTERVALO DE TIEMPO

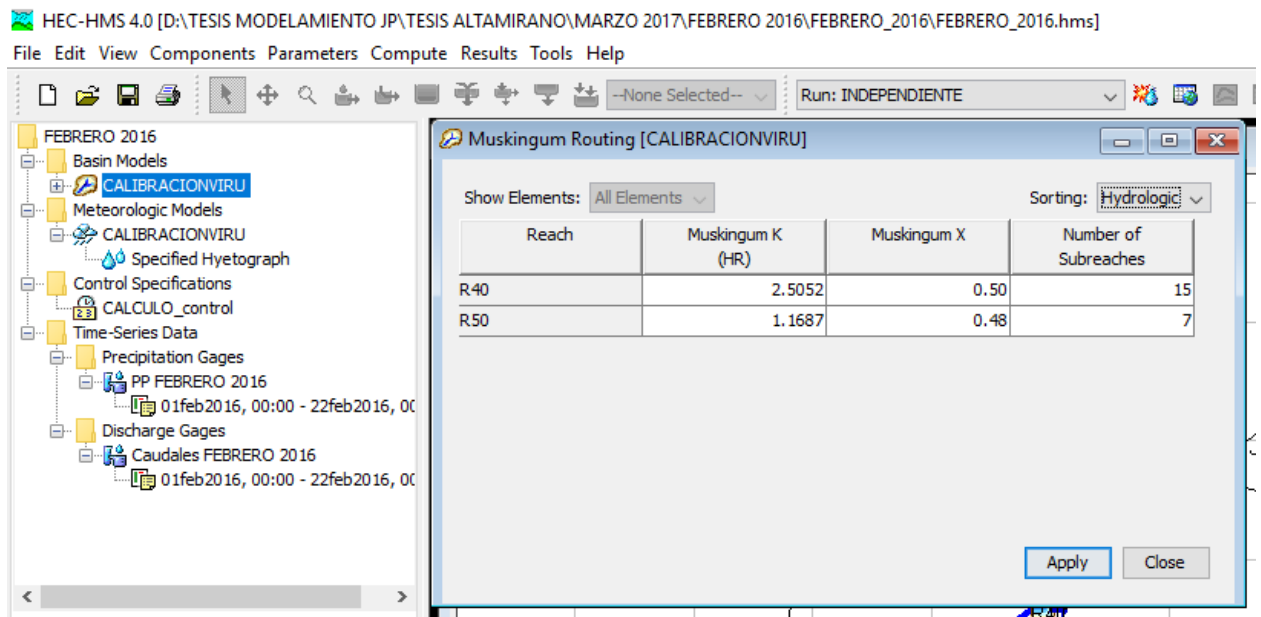
$$K = 0.6 * Tv$$

$$N^{\circ}tramos = \frac{K * 60(\text{min})}{\Delta t} \quad c = \frac{L}{Tv * 3600(\text{seg})} * \frac{5}{3}$$

$$x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B * J * c * \Delta x} \right)$$

KIRIPICH

Q	B	Slp	RivLen	Name	Tv	K (hrs)	Δt	N tramos	c	x
200	50	0.044	45688.660	R40	4.18	2.50521297	10	15	5.07	0.50
200	50	0.008	7249.250	R50	1.95	1.16867445	10	7	1.72	0.48



4.4.2.4. METEOROLOGIC MODELS

El modelo meteorológico nos permite ingresar el dato de precipitación de distintas maneras o mejor dicho por distintos métodos, te permite escoger el que mejor se ajuste a lo que quieres realizar y en este caso debido a que solo contamos con un valor promedio máximo diario de lluvia entonces escogemos el SCS Storm que ya veremos más adelante.

HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\FEBRERO 2016\FEBRERO_2016\FEBRERO_2016.hm:
File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

Run: INDEPENDIENTE

Basin Model [CALIBRACIONVIRU] Current Run [INDEPENDIENTE]

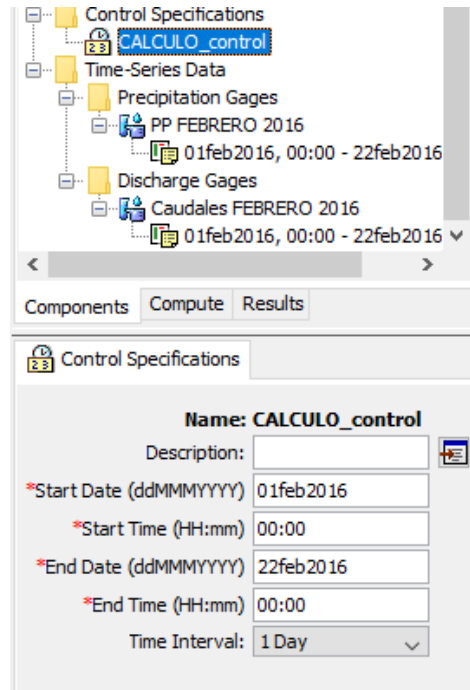
Subbasins

Met Name: CALIBRACIONVIRU

Subbasin Name	Gage
W100	PP FEBRERO 2016
W60	PP FEBRERO 2016
W70	PP FEBRERO 2016
W80	PP FEBRERO 2016
W90	PP FEBRERO 2016

4.4.2.5. CONTROL SPECIFICATIONS

Las especificaciones de control sirven para indicar el periodo de tiempo (comienzo y final) en el que el programa tiene que realizar cálculos y el incremento de tiempo que debe utilizar para los cálculos.



Creamos el control 1, nos pide ingresar dichas especificaciones para nuestro caso iniciamos el 01 Febrero del 2016 a las 00:00 horas y termina el 22 de Febrero 2016 a las 00:00 horas, con un intervalo de 1 día para los cálculos.

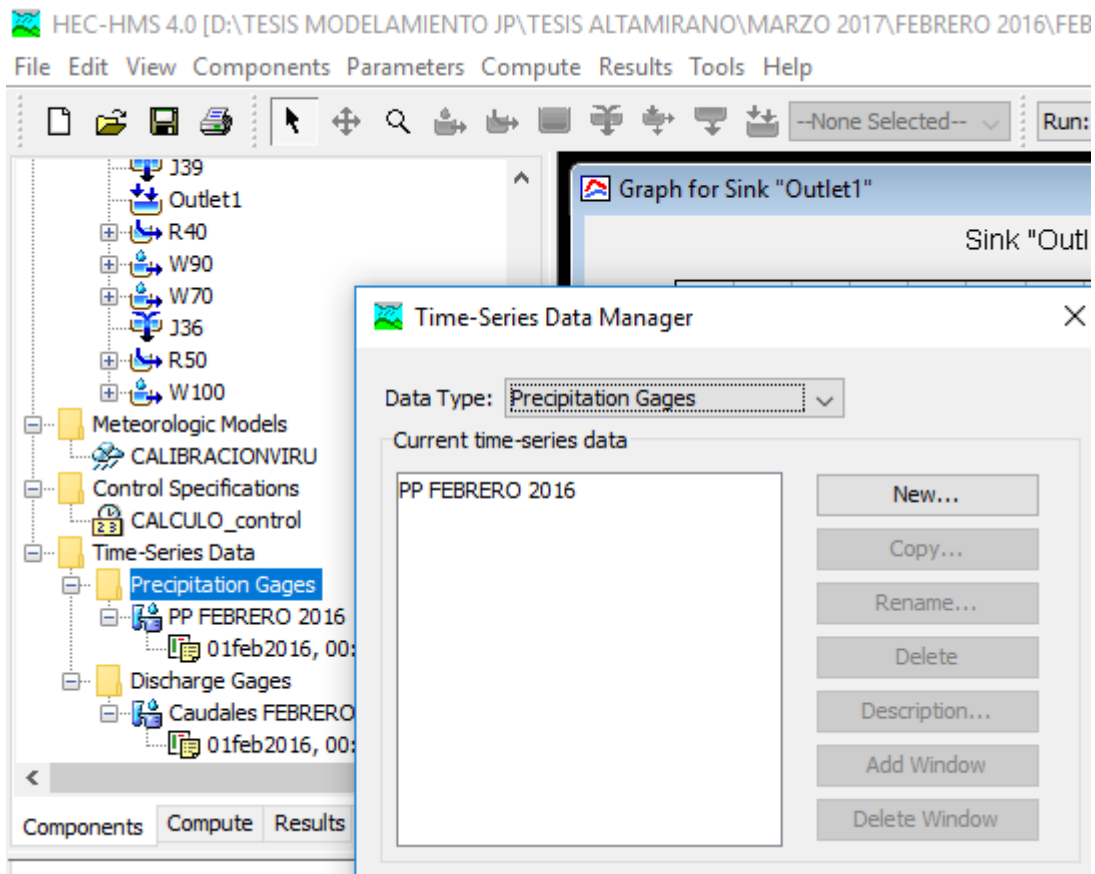
El control 1 trabajará para el evento Precipitación Promedio (PP) y así pueda facilitarnos desarrollo del programa. Acabando con lo que es el control, ya podemos correr el programa con los datos meteorológicos, donde observaremos el comportamiento de la lluvia generada formando los hidrogramas que nos servirán para la comparación y calibración.

Siguiendo con el procedimiento ahora ingresaremos los caudales promedios máximos diarios que nos proporciona el SENAMHI para poder realizar la calibración.

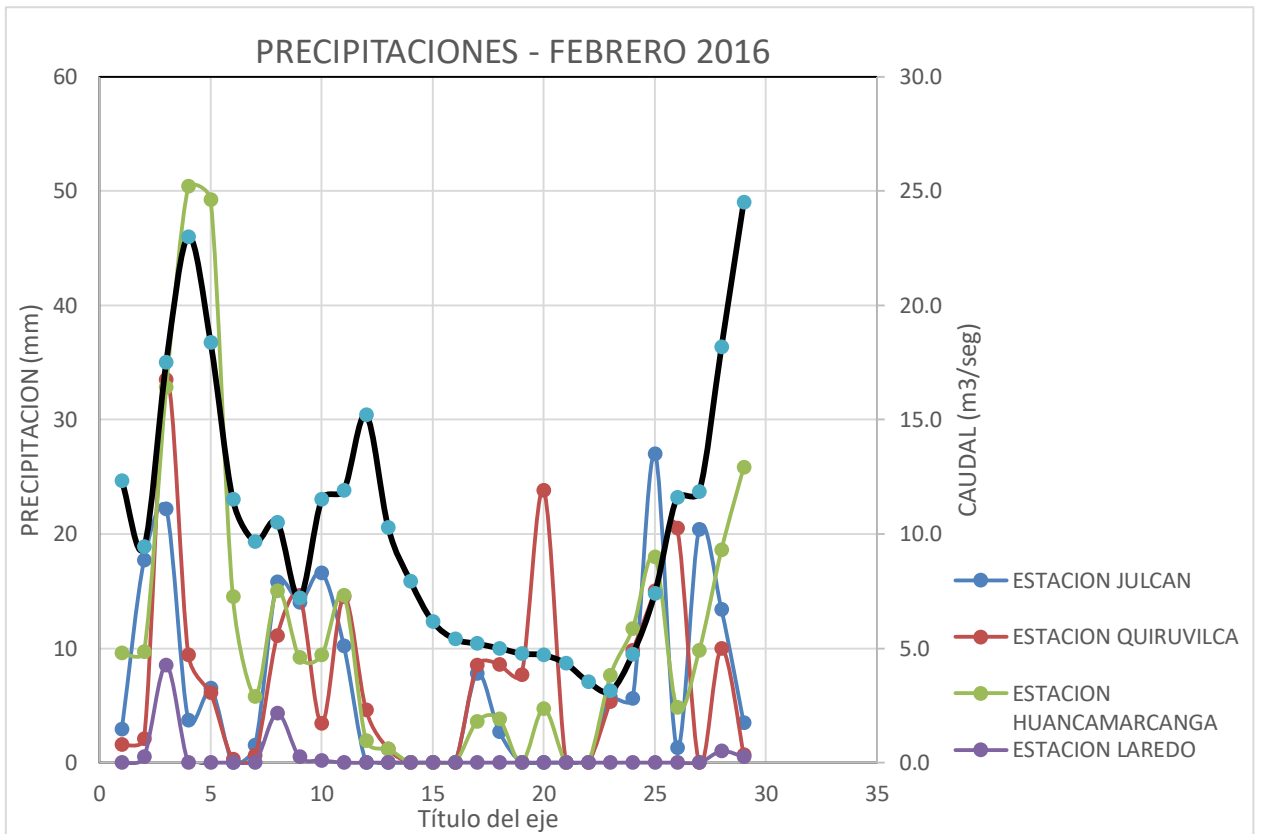
4.4.2.6. TIME SERIES DATA

Este comando nos permite ingresar diferentes tipos de valores con relación al tiempo en que se generan los mismos ya sean por minutos por horas o días. También podemos ingresar los datos de lluvias en el caso si tuviéramos datos de lluvias por horas mediante hietogramas.

Para crear este componente seleccionamos en Time Series Data Manager la opción discharge Gages, la cual refiere a medidores de descargas que vienen a ser los caudales.

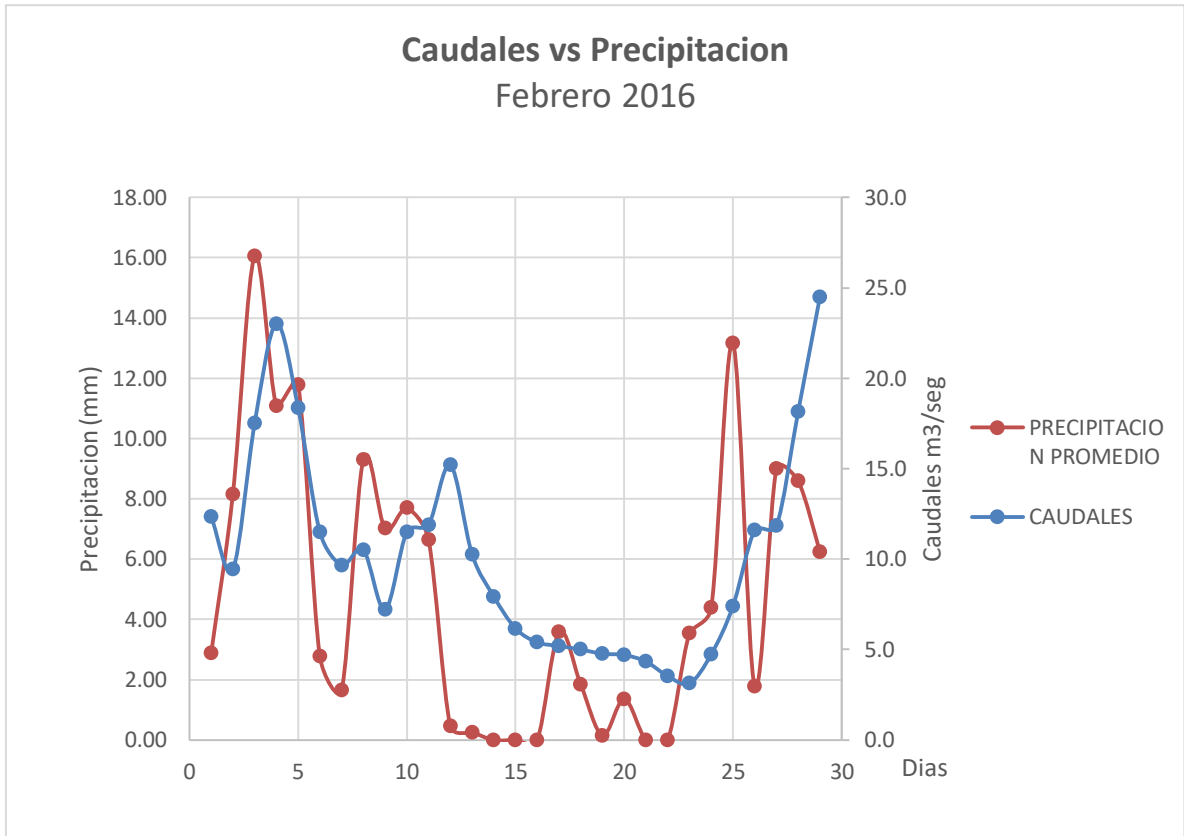


MES	ESTACION/ALTITUD				
	JULCAN	QUIRUVILCA	HUANCAMARCANGA	LAREDO	VIRU
Feb-16	3500	3950	4123	100	64
1	2.9	1.6	9.6	0	0
2	17.7	2.1	9.7	0.5	0
3	22.2	33.5	32.8	8.5	0
4	3.7	9.4	50.4	0	0
5	6.5	6.1	49.2	0	0
6	0	0.3	14.5	0	0
7	1.5	0.6	5.8	0	0
8	15.8	11.1	15	4.3	0
9	14	14.6	9.2	0.5	0
10	16.6	3.4	9.4	0.2	0
11	10.2	14.5	14.6	0	0
12	0	4.6	1.9	0	0
13	0	1.2	1.2	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	7.8	8.5	3.6	0	0
18	2.7	8.6	3.8	0	0
19	0	7.7	0	0	0
20	0	23.8	4.7	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	5.7	5.3	7.6	0	0
24	5.6	9.8	11.7	0	0
25	27	15	18	0	0
26	1.3	20.5	4.8	0	0
27	20.4	0	9.8	0	0
28	13.4	10	18.6	1	0
29	3.5	0.7	25.8	0.5	0



					CAUDAL	
SUBCUENCAS					PP	VIRU
W60	W70	W80	W90	W100		64
5.57	1.63	8.78	0.78	0.00	2.88	12.3
12.26	9.72	10.68	4.94	0.00	8.16	9.4
28.17	12.28	31.50	9.41	0.00	16.04	17.5
24.22	2.23	44.66	0.99	0.00	11.09	23.0
24.52	3.76	43.95	1.74	0.00	11.77	18.4
6.18	0.06	12.72	0.00	0.00	2.77	11.5
3.20	0.84	5.27	0.40	0.00	1.64	9.7
14.84	8.71	15.10	5.98	0.00	9.30	10.5
12.05	7.70	9.79	3.95	0.00	7.02	7.2
11.82	9.12	10.29	4.52	0.00	7.70	11.5
12.63	5.64	14.06	2.73	0.00	6.63	11.9
1.41	0.01	1.67	0.00	0.00	0.45	15.2
0.67	0.00	1.05	0.00	0.00	0.25	10.3
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.9
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.2
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.4
6.11	4.28	4.12	2.09	0.00	3.58	5.2
3.94	1.49	3.66	0.72	0.00	1.84	5.0
1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	4.8
5.12	0.02	4.12	0.00	0.00	1.36	4.7
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.3
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.5
6.45	3.15	7.37	1.52	0.00	3.55	3.1
8.73	3.11	10.95	1.50	0.00	4.38	4.7
21.61	14.85	19.11	7.22	0.00	13.17	7.4
5.31	0.73	4.37	0.35	0.00	1.77	11.6
13.23	11.20	11.10	5.46	0.00	9.00	11.8
15.15	7.41	17.96	3.99	0.00	8.59	18.2
12.57	2.02	23.06	1.14	0.00	6.24	24.5

Caudales vs Precipitation Febrero 2016



Para la gráfica seleccionamos en la pestaña Graph y podemos observar el gráfico que se genera debido a que el caudal se encuentra en un intervalo de 1 día (siendo en total 24 hrs.) en donde alcanza su máximo valor.

Components Compute Results

Time Window Table Graph

Time-Series Gage

Name: PP FEBRERO 2016

Description:

Data Source: Manual Entry

Units: Incremental Millimeters

Time Interval: 1 Day

Caudales FEBRERO 2016
01feb2016, 00:00 - 22feb2016

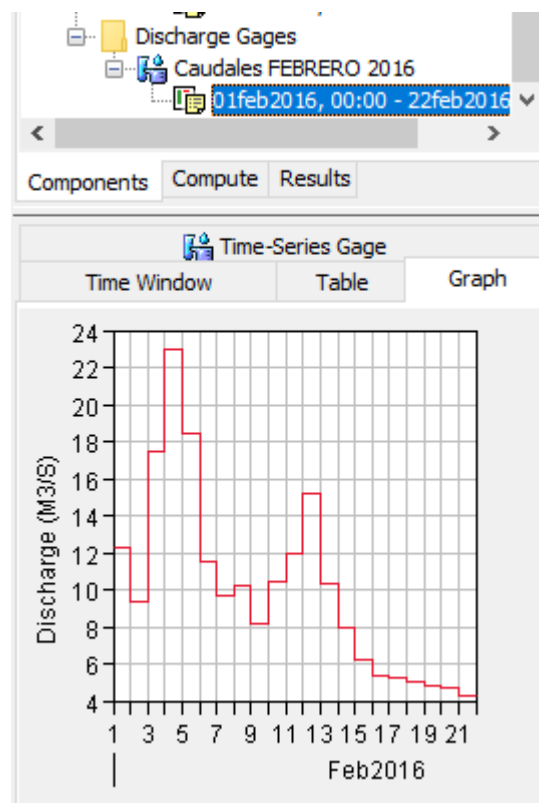
Components Compute Results

Time-Series Gage

Time Window Table Graph

Name: Caudales FEBRERO 201

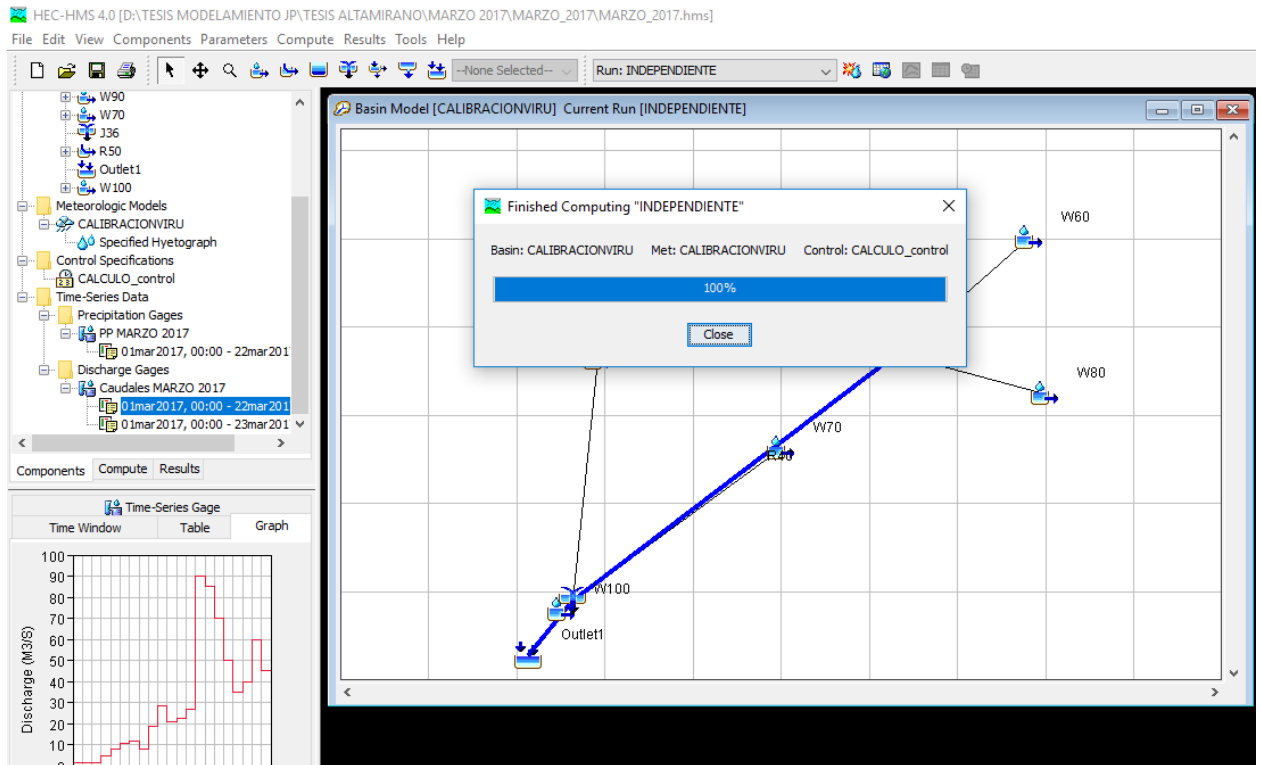
*Start Date (ddMMYYYY)	01feb2016
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	22feb2016
*End Time (HH:mm)	00:00



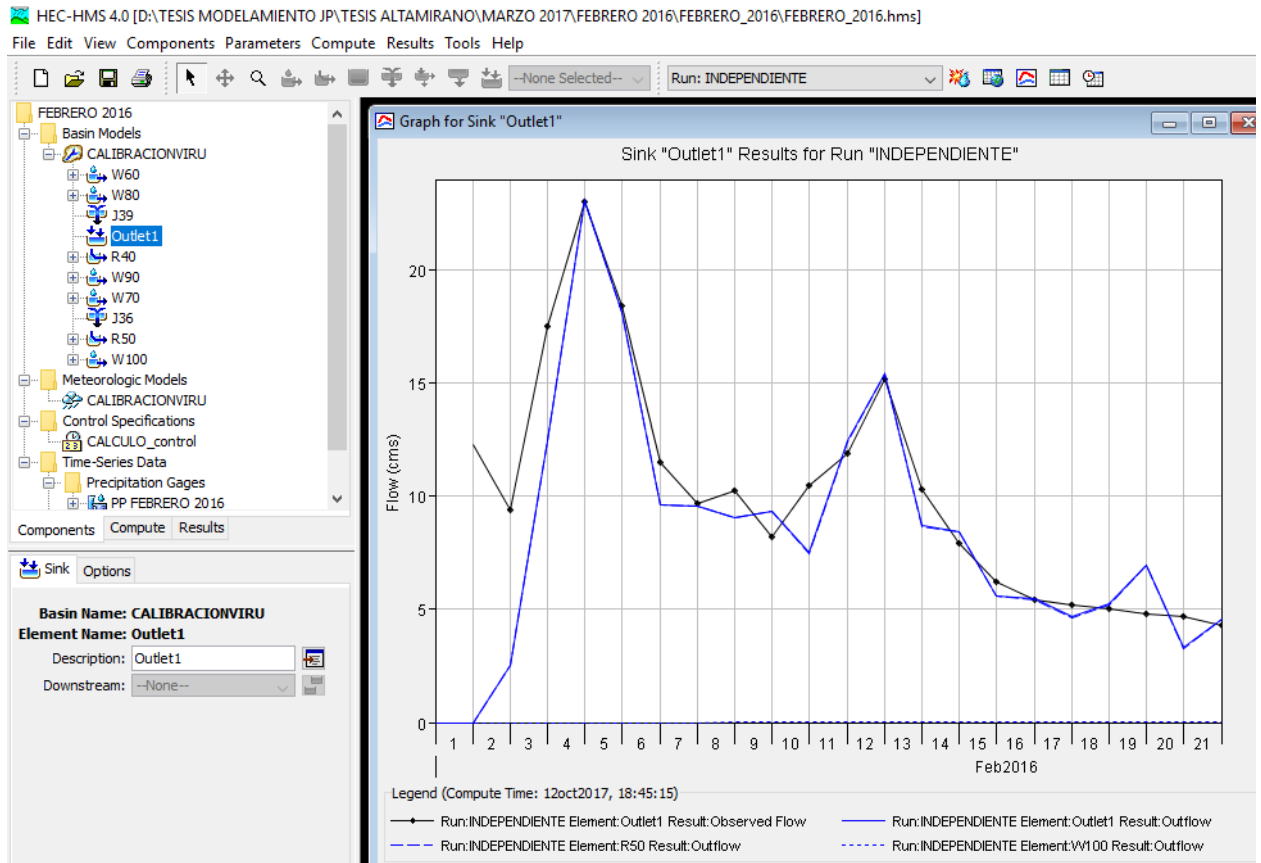
4.4.2.7. SIMULATION RUN MANAGER

En esta etapa creamos la simulación de las lluvias con su evento precipitación promedio y corremos el programa.

Nos muestra la simulación de las lluvias del mes de Febrero 2016.



En este grafico nos brinda información sobre el comportamiento de las Precipitaciones Promedios (PP) vs Caudales máximos.

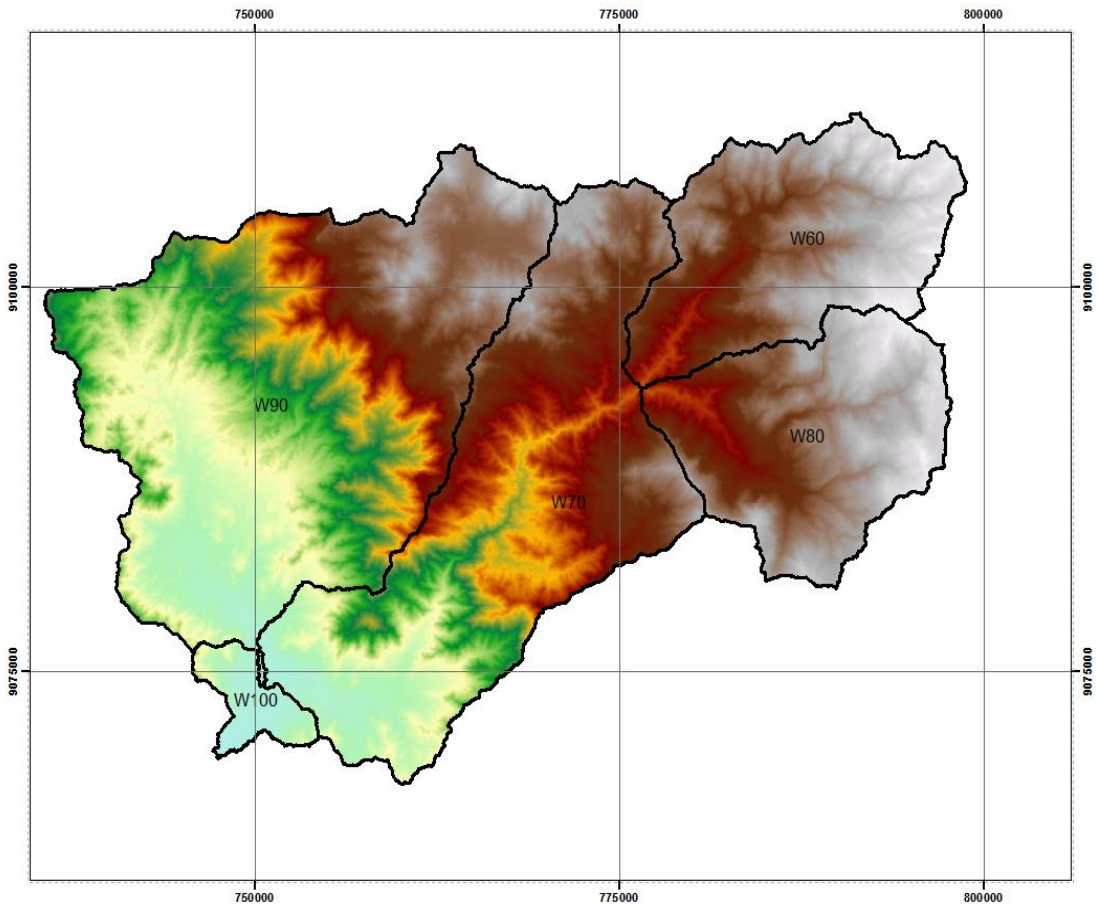


V. RESULTADOS

5.1. Análisis topográfico y relieve para la delimitación del Río Virú.

Figura 01

Cuenca del Río Virú en formato Raster



Para la delimitación de la cuenca se ha descargado Raster de la página <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, donde se ha tenido que ubicar el área que le corresponde a la cuenca del río Virú, en un formato 12.5 x 12.5 m. El Raster mostrado contiene el relieve topográfico bien definido. Con esta información se ha procedido a realizar la delimitación de la cuenca con el software Hec-Geo Hms obteniéndose la cuenca y sus subcuencas.

Tabla 01

Relación de las subcuencas y su área.

Subcuenta	Área (km ²)
W100	32.78
W90	656.86
W80	240.17
W70	487.7
W60	247.86
TOTAL	1665.37

En la tabla 01 se muestra las cinco (5) subcuencas con sus respectivas áreas medidas en km². Las subcuencas son identificadas como W100 con un área de 32.780 km², W90 con un área de 656.86 km², W80 con un área de 240.17 km², W70 con un área de 487.70 km² y W60 con un área de 247.86 km², siendo un total de 1665.37 km²

Tabla 02

Análisis de la cuenca mediante el método KIRIPICH

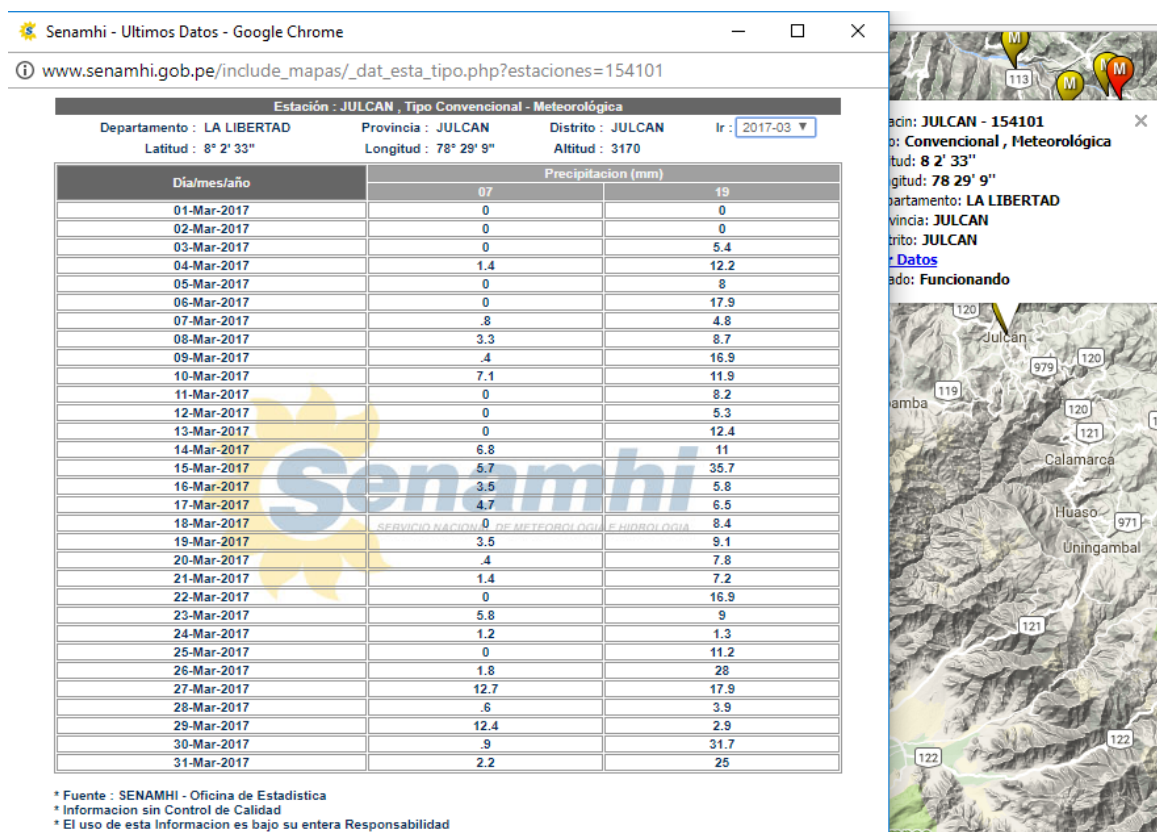
L (m)	RIO	S	KIRIPICH	
			TC (horas)	Tlag (min)
35120.09	6	0.06	3.08	65.00
64500.37	7	0.06	4.98	104.00
34797.07	8	0.06	3.09	65.00
57233.54	9	0.07	4.26	89.00
12392.73	10	0.05	1.43	30.00

En la tabla 02 por cada subcuenca se ha calculado su área, y también se ha determinado la longitud del río y la longitud más larga lo cual fue necesario para el cálculo del tiempo de concentración, se calculó por el método: Kiripich. La longitud más larga de la subcuenca es 64500.37 m y la más pequeña llega a tener una longitud de 12392.73 m.

5.2. Recopilación de data de Precipitación de estaciones cercanas a la cuenca del río Virú.

Se ha trabajado con la data de precipitaciones descargada de la página de SENAMHI(<http://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>).

Figura 02



Los Datos fueron las precipitaciones máximas en 24 horas de las siguientes estaciones:

- Julcán
- Quiruvilca
- Huancamarcanga
- Laredo
- Virú

Gráfico 01

Caudales Vs Precipitación - Febrero 2016

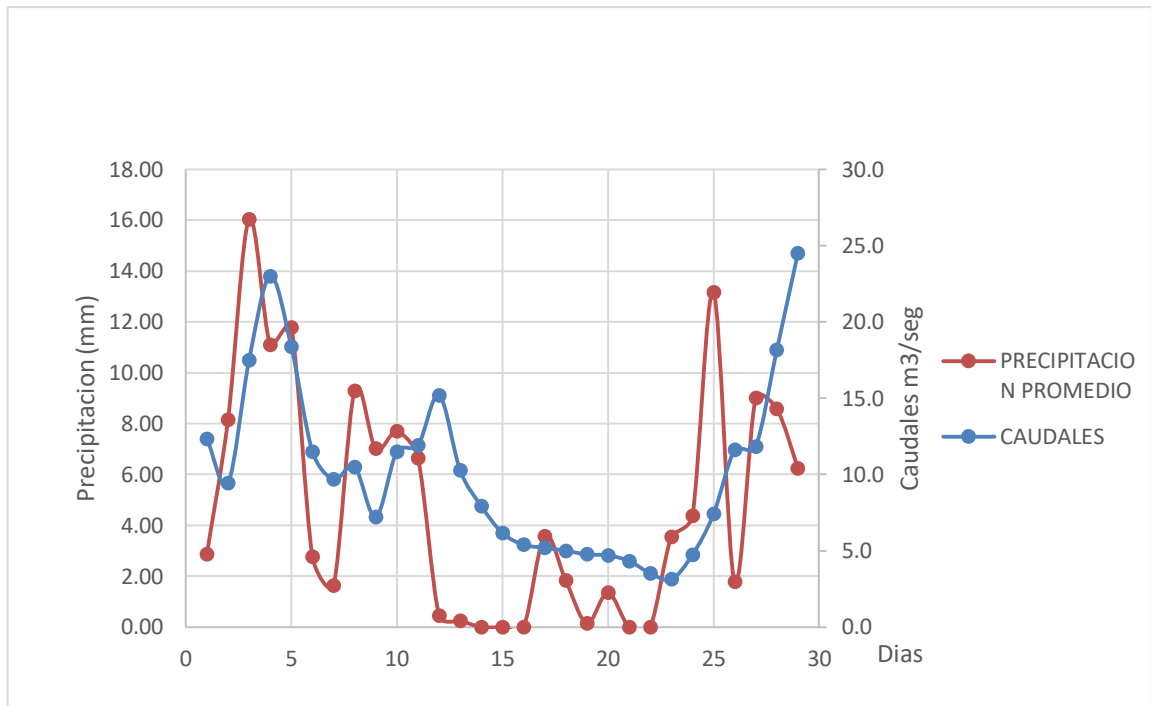
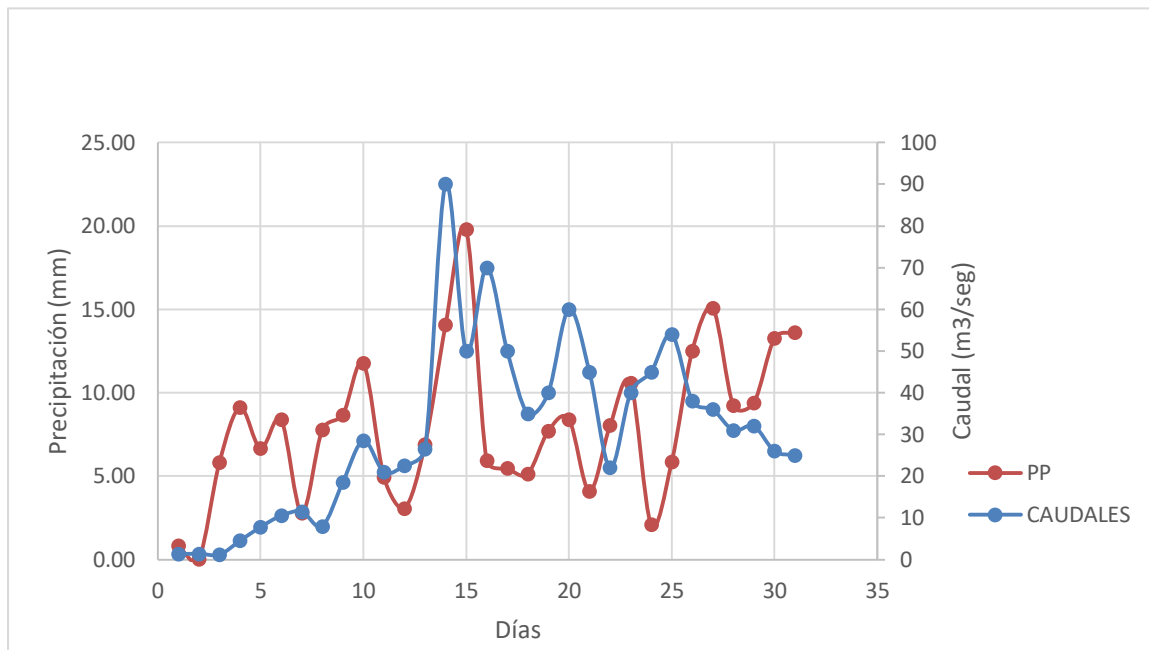


Grafico 02

Caudales Vs Precipitación - Marzo 2017



Los datos de caudal se obtuvieron de los reportes de la Autoridad Nacional del Agua(ANA), de la estación Virú. Los datos obtenidos (precipitación y Caudales) fueron de Febrero 2016 y Marzo 2017. Con esta data se generó para los días de cálculo la precipitación promedio por el método de los Polígonos de Thiessen.

5.3. Desarrollo del Mapa de Numero de Curva que contenga los valores del tipo de suelo

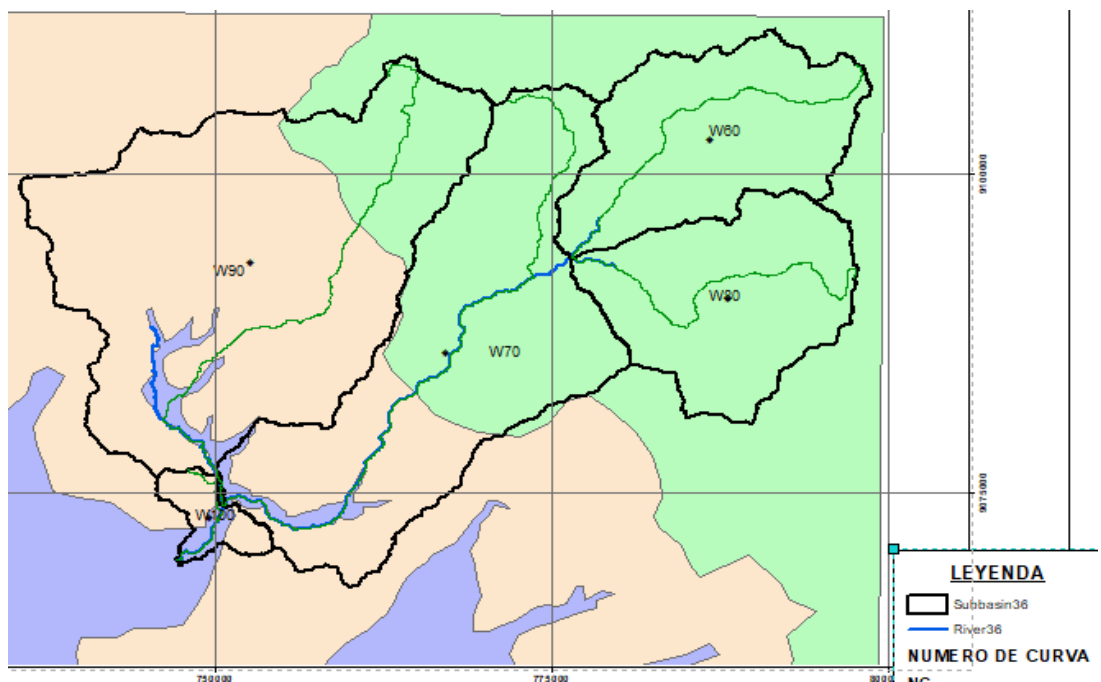
Tabla 03

Métodos para el proceso de calibración

CALCULO	METODO
Perdidas por infiltración	SCS
Transformación	SCS
Propagación	MUSKINGUM

Figura 03

Raster de los tipos de Suelos – Curva Número



Para hacer la calibración de los parámetros se tuvo que generar un Raster del tipo de suelo, el cual sirve para determinar el valor de Numero de curva, ya que es un parámetro que mide la infiltración y determina las pérdidas del modelo hidrológico. El proceso de calibración se realizó con el software Hec Hms, donde se utilizó para los cálculos de los siguientes métodos (Tabla 03).

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el análisis topográfico de la cuenca Virú se tomó el criterio de buscar en diversas fuentes una data con mayor alcance y precisión; fueron descargados de la página de la NASA (servidor Alos Palsar), para evitar resultados alejados de la realidad en el proceso del modelamiento, por lo cual se consideró la creación de subcuencas donde el área menor es de 32 km², para no tener subcuencas muy pequeñas. Esto dio como resultado que la cuenca del río Virú tiene 05 subcuencas (Figura 01). Se tomó la decisión de trabajar con el método Kiripich porque éste modelo es recomendado para cuencas de la sierra donde la descarga es muy rápida. Los datos se utilizan en el modelo Hec Hms para la transformación lluvia – escorrentía por el método del Soil Conservation Service y el parámetro es el T_{Lag} (Tabla 03).

Para la recopilación de la data de Precipitaciones de las estaciones cercanas a la cuenca del río Virú se utilizó la data registrada en SENAMHI porque consideramos que realiza un mejor reparto de la precipitación diaria, mensual y anual a diferencia de otras fuentes ya que poseen reportes imprecisos (Figura 02).

En cuanto al desarrollo del Mapa de Numero de Curva de los tipos de suelo se ha visto que los caudales generados son mayores a los observados, para lo cual se modificó los valores de Numero de Curva de cada subcuenca, teniendo en algunas subcuencas valores muy bajos lo que representa que son suelos bastante permeables (Gráfico 01 y 02).

VII. CONCLUSIONES

1. Los datos topográficos utilizados en esta tesis para la delimitación de la cuenca del río Virú fueron descargados de la página de la NASA (servidor Alos Palsar), en formato Raster con una resolución de 12.5 x 12.5 m. de muy buena calidad para este tipo de estudios.

Aplicando estos valores para las diferentes subcuencas se determinó que tenían los valores siguientes:

N°	NOMBRE	AREA (%)	CN
1	W100	32.780	60.12
2	W90	656.86	77.81
3	W80	240.17	72.71
4	W70	487.70	78.69
5	W60	247.86	74.21

Se concluye que los valores calibrados del Numero de curva son los siguientes:

HEC-HMS 4.0 [D:\TESIS MODELAMIENTO JP\TESIS ALTAMIRANO\MARZO 2017\MARZO_2017\MARZO_2017.hms]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

Run: INDEPENDIENTE

Curve Number Loss [CALIBRACIONVIRU]

Show Elements: All Elements Sorting: Hydrologic

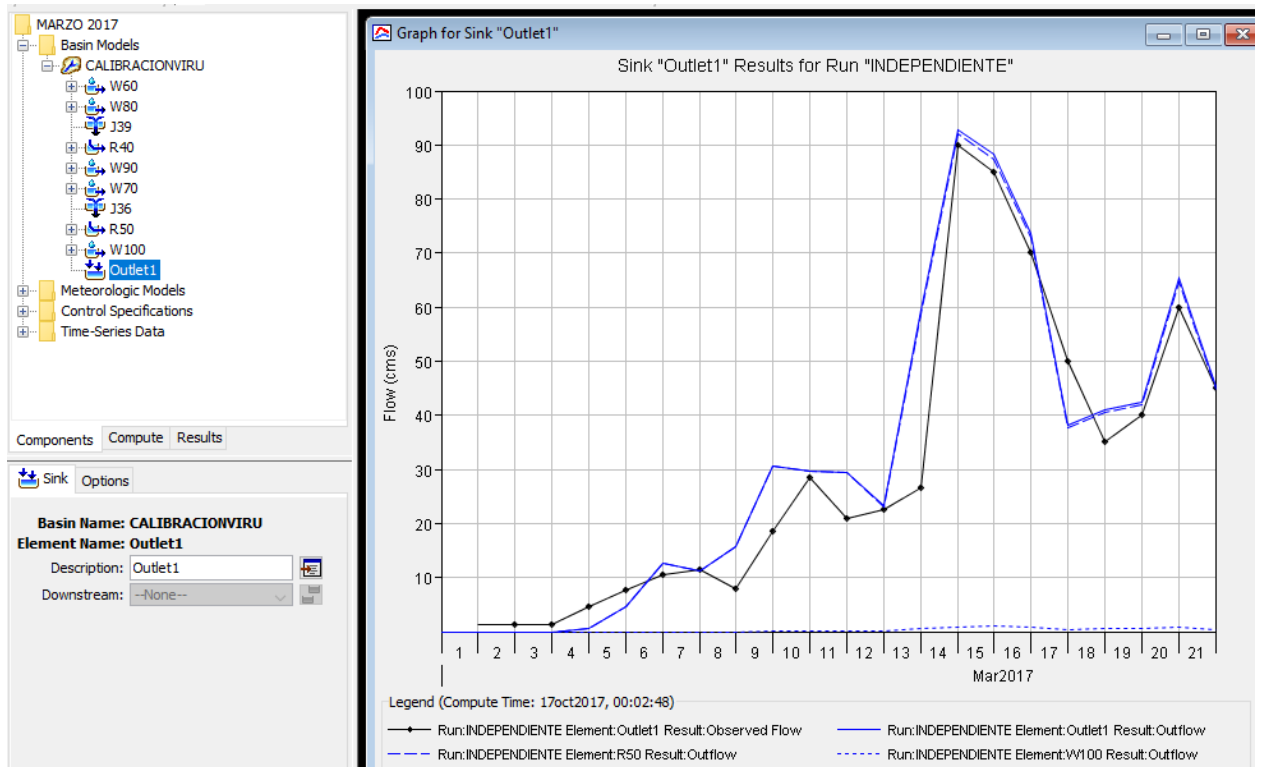
Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W60		81.1	0.0
W80		80.6	0.0
W90		51.3	0.0
W70		60.2	0.0
W100		50.9	0.0

Apply Close

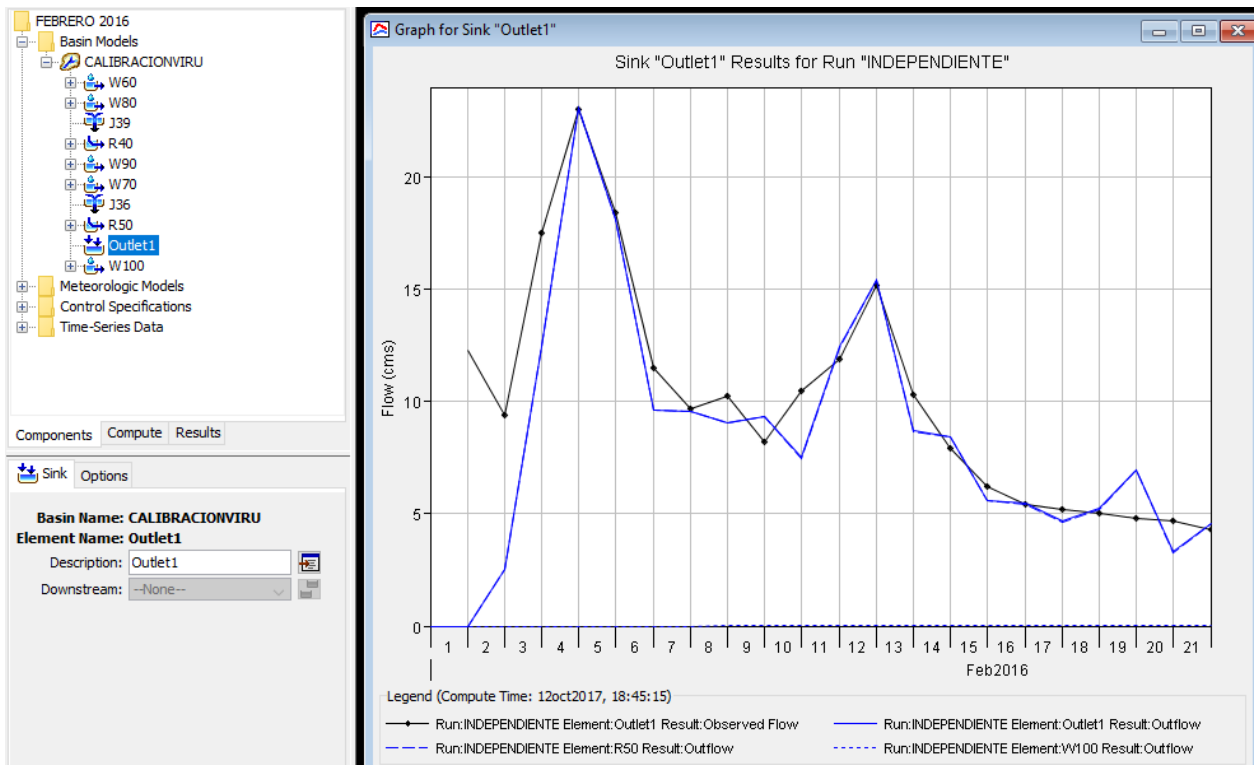
Por lo tanto, vemos que no se ajusta a la realidad.

Del análisis de las estaciones pluviométricas se determinó la precipitación promedio de la cuenca, elaborando un gráfico en Excel de los meses Febrero 2016 y Marzo 2017, este análisis fue realizado para todos los días de estos meses, obteniéndose los siguientes gráficos:

MARZO-2017



FEBRERO-2016



Se analizaron los caudales observados del río Virú obtenidos en la estación Virú, los cuales se asemejan a la precipitación promedio obtenidos en el modelamiento para FEBRERO 2016 y MARZO 2017.

2. La cantidad de estaciones cercanas a la cuenca del río Virú, son de escasa información para determinar las pérdidas por el método de curva número, induciendo a probables errores.
3. En la calibración de parámetros se ha obtenido valores muy bajos indicando que la precipitación promedio genera caudales altos, esto podría deberse a que en esta cuenca las estaciones pluviométricas se encuentran muy alejadas y según los métodos de precipitación promedio abarcan zonas muy extensas, las que multiplicadas por el valor correspondiente de precipitación generan volúmenes altos.

VIII. RECOMENDACIONES

Se debe realizar más investigaciones sobre calibración de cuencas en nuestro país porque estos métodos no se adaptan a nuestra realidad ya que la red de estaciones pluviométricas no está bien distribuida.

Los caudales observados sean tomados de forma automatizada ya que se ha podido apreciar que estos se recogen algunas veces por simple observación de personal de campo y al aplicar el modelamiento se obtiene resultados poco confiables.

La data de caudales y precipitación debe ser de fácil acceso para poderla utilizar en forma directa e inmediata debiendo hacer SENAMHI un análisis de precisión y consistencia antes de publicarlo.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, F. (2008). *Análisis espacial de hietogramas para la estimación de caudales de diseño* (tesis de pregrado), Chile.
- Armijos, J. (2012). *Implementación de un modelo lluvia escorrentía de evento en el laboratorio virtual de hidrología* (tesis de pregrado). Ecuador.
- Lopez, M. (2012). *Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de jequetepeque, cajamarca, peru.* (tesis de pregrado). Peru.
- Weber, J. (2010). *Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de una simulación mixta* (tesis de pregrado). Peru.
- Aparicio Mijares, Francisco. (1989) “*Fundamentos de Hidrología de Superficie*” (1ra Edición) México DF, México: Grupo Noriega Editores.
- Linsley, Kohler y Paulhus. (1977) “*Hidrología para Ingenieros*” (Segunda Edición). Bogota, Colombia: Editorial McGraw-Hill
- Fattorelli, Sergio y Fernández Pedro. (2011) “*Diseño Hidrológico*” (2da Edición) Zaragoza, España: Edición Digital WASA-GN