

## RESUMEN

En nuestro medio en casi todo proyecto de aguas no se dispone de caudales aforados que son datos necesarios para el diseño de obras hidráulicas. Esta falencia es cubierta con cierto grado de confiabilidad mediante la simulación de caudales a partir de datos de precipitación.

De los muchos métodos que existe para generar caudales máximos de crecida se hacen cada vez más populares los modelos hidrológicos matemáticos; este tipo de modelos simplifican los fenómenos hidrológicos de manera que se puedan representar en ecuaciones matemáticas y que al ser programadas reducen el tiempo de cálculo de las mismas.

En el presente trabajo se estudia el modelo HEC-HMS y se probaron las capacidades del programa de simulación HEC- HMS, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, con el fin de generar hidrogramas de crecida y caudales punta, para la cuenca del río Tolomosa, ubicada en la provincia Cercado del departamento de Tarija, esta cuenca tiene mucha importancia por ser la que alimenta la represa San Jacinto la cual da vida a gran parte de los viñedos de la zona.

EL HEC – HMS requiere como principal dato de entrada la precipitación, tiene varias opciones para la simulación del proceso precipitación - escorrentía; el método utilizado en el presente trabajo es de la Soil Conservation Service (Curve Number) SCS el cual requiere calibrar 34 parámetros o coeficientes que representan las características propias de la cuenca; los parámetros de este tipo de modelos deben ser calibrados mediante el contraste entre caudales simulados por el modelo con caudales aforados correspondientes a un mismo periodo de estudio; una vez calibrados los parámetros del modelo y si existe una buena semejanza entre caudales simulados y observados se pueden emplear para generar caudales máximos de crecida que servirán en el diseño de obras hidráulicas.

Se aplicó el modelo hidrológico HEC - HMS en la cuenca del río Tolomosa con la finalidad de calibrar sus parámetros en la generación de caudales máximos. En el proceso de calibración/validación se utilizaron 6 periodos continuos de medición de lluvias y caudales a escala mensual (1978 -1984) correspondientes a la estación de San Jacinto.

Para la determinación de las abstracciones iniciales se utilizó el método del número de curva de la SCS.

Para el proceso de transformación de la precipitación en esorrentía el programa aplica el método Hidrograma Unitario de la SCS.

El modelo representa con claridad la influencia de las precipitaciones en el escurrimiento, se introducen la precipitación como dato inicial, se asume inicialmente valores de los tres parámetros a calcular; número de curva, abstracciones iniciales y tiempo de retardo, el programa HEC-HMS genera el hidrograma de crecida el cual se compara con el hidrograma de crecida observado, se hace variar los parámetros hasta hallar una similitud entre los valores pico del hidrograma simulado con el hidrograma observado.

Se analizaron 8 tormentas, de los cuales se descartó tres que proporcionaban valores que no corresponden con las condiciones que debe existir para que se generen caudales máximos extremos, los restantes valores correspondían plenamente con las condiciones hidrológicas de que generan caudales máximos extremos en una cuenca. Los valores finales de los parámetros calibrados son:

#### Valores Calibrados Para Condiciones de Suelo Saturado

NÚMERO DE CURVA CN	86.21
ABASTRAC. INICAL (mm)	13.06
TIEMPO DE RETARDO (min)	146.57

La validación se lo realizó mediante la comparación de los parámetros con los valores obtenidos mediante métodos tradicionales.

Como resultado final, es recomendable el uso del programa HEC-HMS para la generación de valores de caudales punta, en la cuenca del río Tolomosa, pero se debe tener mucha cautela en la simulación de hidrogramas de crecida ya que para esto se necesita más datos y análisis en el proceso de calibración.

# Capítulo I

## INTRODUCCIÓN

# CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HEC – HMS, EN LA CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA

## I.1. INTRODUCCIÓN

La ausencia de información hidrológica es un grave problema, cuando se desea diseñar obras civiles y más aún cuando se espera que estas obras no colapsen nunca por motivos de mal diseño. Para esto, se debe tener un completo conocimiento de las variables naturales que generarán demandas sobre la obra, como es la relación **Precipitación – Escorrentía**, que es un factor clave en el diseño de obras hidráulicas.

Para abordar esta problemática, una opción válida es la simulación hidrológica, que es uno de los elementos de uso continuo fundamental para la generación de información numérica sobre cuencas con información insuficiente, lo que representa una alternativa de importancia para obtener un análisis detallado del área que estará bajo estudio. En esta línea, la computación ha resultado ser una herramienta eficaz para efectuar simulaciones, ya que al procesar una mayor cantidad de variables, escenarios y alternativas en un corto lapso, permite reducir los tiempos de planeación y ejecución de obras.

Por otra parte y en teoría, un modelo de simulación, entre más detallado sea y más variables consideren para su simulación, más cercanos a la realidad serán los resultados que éste entregue.

Bajo este marco, con el presente trabajo de titulación probaremos las bondades del programa desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineer, HEC – HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) aplicado en nuestra región en la cuenca del río Tolomosa . En esta región sólo se tiene información de caudales en un periodo muy corto de observación (1980-1986), de ahí en adelante carece de información detallada sobre sus comportamientos hidrológicos en el marco de la relación precipitación – escorrentía. La importancia de analizar esta cuenca radica en la Importancia de la Represa de San Jacinto que tiene una gran influencia económica en la región, lo que obliga a monitorear y establecer posibles escenarios futuros de la forma más precisa posible y en donde la simulación hidrológica surge como una alternativa eficaz.

## **I.2. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. Análisis del Problema**

Al no disponer de una serie de datos de caudales medidos en ríos y quebradas, no es factible el diseño de obras hidráulicas, ya que no se podrá asegurar la cantidad de agua superficial existente en los cauces, no se podrá asegurar si el agua excederá a las dimensiones de una estructura hidráulica; todo esto deriva en una incertidumbre sobre el funcionamiento hidráulico de las estructuras hidráulicas. La ausencia de registros numéricos dentro de la relación hidrológica precipitación - escorrentía, puede representar un impedimento, o en ocasiones un grave problema en el buen diseño en las obras civiles.

### **1.2.2. Descripción del Problema**

En el diseño de obras hidráulicas se requiere saber con cierta seguridad la cantidad de agua que pasará en un río en un determinado tiempo y en un determinado lugar, esto se puede solucionar mediante la medición periódica de los caudales que pasan por un periodo de tiempo suficientemente largo en el que se tome en cuenta periodos de sequía y periodos de mucha lluvia; sin embargo por lo general las cuencas presentan una gran cantidad de ríos, por lo que se necesitaría personal, equipo y herramientas de medición para aforar caudales todos los días; estas condiciones no se cumplen en nuestro medio por falta de recursos económicos y poco apoyo de las autoridades de turno; por lo que se recurre al cálculo de caudales mediante ecuaciones matemáticas que reproducen los fenómenos hidrológicos, específicamente mediante la relación que existe entre la precipitación y la escorrentía; pero para la aplicación correcta de estas ecuaciones matemáticas denominado modelos hidrológicos de precipitación escorrentía es necesario conocer, o sea calibrar sus parámetros o coeficientes que dependen de las características particulares de cada cuenca hidrológica.

El desconocimiento de los valores de los parámetros de estos modelos para poder ser aplicados en la simulación de caudales con cierta confiabilidad es una causa de

la no aplicación en nuestro medio; en el presente trabajo será tarea principal solucionar este problema mediante la calibración de estos parámetros para los cuales se dispone de caudales aforados, además de la validación y comparación entre ambos podremos emitir recomendación para su uso.

Los sistemas de pronóstico hidrológico suelen ser extremadamente complejos y difíciles de cuantificar debido a que hay fenómenos en la naturaleza que quizás nunca se entiendan en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento acabado, pueden representarse en forma simplificada por medio de modelos conceptuales que traten de dar respuesta a cada una de las partes del sistema hidrológico. En este sentido, un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo (Chow, et.al. 1994). Desde este punto de vista, el ciclo hidrológico puede considerarse como un todo, compuesto por precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y otras fases de este ciclo. Este sistema global a la vez puede agrupar parte de sus elementos, conformando subsistemas menores que faciliten su comprensión. El objetivo del análisis de un sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir sus salidas (Chow, et al., 1988). Una de las herramientas utilizadas en el mundo, que intentan disminuir la exposición de las personas que ocupan zonas propensas a inundaciones, son los llamados sistemas de alerta temprana, apoyados en modelos matemáticos, que simulan fenómenos hidrológicos y meteorológicos, de tal manera que se puedan estimar de manera anticipada, valores probables de las avenidas y sus niveles de agua, antes de que se rebase la capacidad del cauce y utilizar estas previsiones como elementos de apoyo a los tomadores de decisiones para emprender acciones y prevenir daños ante las amenazas de inundaciones.

Conforme a lo anterior, se pretende realizar la modelación hidrológica de una cuenca con la información más reciente disponible, en cuanto a la infraestructura y a la red de medición. La modelación hidrológica tendrá como fin el pronóstico de avenidas o crecientes que puedan afectar a la propia infraestructura y a la población

### **I.3. JUSTIFICACIÓN**

Existe una necesidad de cuantificar el agua que pasa por los ríos para el dimensionamiento de obras hidráulicas: presas, riegos, agua potable, etc.

Escasés de datos medidos, si existen son discontinuos y de periodos muy cortos.

Existencia de datos de entrada para la aplicación de modelos hidrológicos: lluvias y temperatura y otros medidos directamente en forma continua y durante varios años; y no así sus parámetros.

Con el paso del tiempo las redes de medición hidrometeorológica, la infraestructura hidráulica para el manejo y control de los escurrimientos en las cuencas e incluso el clima, pueden variar, por lo que las modelaciones hidrológicas realizadas en cuencas, podrían dejar de ser representativas al cambiar tanto los parámetros utilizados en la modelación hidrológica, estaciones hidrometeorológicas base de medición, han sufrido cambios en los últimos años. Por lo que existe la necesidad de revisar y actualizar los sistemas de pronóstico hidrológico que actualmente se encuentran en operación, y contar con herramientas de simulación que reflejen las condiciones hidrometeorológicas más actuales que ayuden a prevenir de forma anticipada sobre la ocurrencia de avenidas en los ríos que pudieran causar afectaciones en sitios de particular interés.

Una vez calibrado y validado el modelo se podrá simular con confianza caudales para cualquier periodo en que se disponga de precipitaciones y temperaturas en cuencas con similitud hidrológica.

### **I.4. OBJETIVOS**

#### **I.4.1. Objetivo general**

Calibrar los parámetros del modelo y validar el uso del modelo de simulación computacional HEC – HMS del U.S. Army Corp of Engineers empleando precipitaciones máximas en 24 horas y registro de caudales diarios aforados en la cuenca del río Tolomosa .

#### **I.4.2. Objetivos específicos**

Generar hidrogramas de crecida y caudales punta, para la cuenca del río Tolomosa .

Establecer elementos de carácter numérico, para el modelo HEC - HMS, que representen el comportamiento hidrológico de la cuenca y permitan satisfacer las demandas del modelo.

Proporcionar caudales actualizados para la modelación del comportamiento de las actuales obras hidráulicas de la represa San Jacinto.

#### **I.5. ALCANCE**

- Análisis hidrológico de la cuenca en estudio.
- Análisis de precipitaciones.
- Análisis de los componentes principales del ciclo hidrológico correspondientes con el modelo.
- Calibración del modelo HEC-HMS.
- Validación del modelo.
- Generación de caudales máximos decrecida con HEC-HMS para diferentes periodos de retorno.
- Emitir conclusiones y recomendaciones para el uso del modelo.



# Capítulo II

## FUNDAMENTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA

## **II.- FUNDAMENTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA**

### **II.1. Definición de hidrología**

La Hidrología (del griego hydor-, agua) es la disciplina científica dedicada al estudio de las aguas de la Tierra, incluyendo su presencia, distribución y circulación a través del ciclo hidrológico, y las interacciones con los seres vivos. También trata de las propiedades químicas y físicas del agua en todas sus fases.

El objetivo primario de la hidrología es el estudio de las interrelaciones entre el agua y su ambiente. Ya que la hidrología se interesa principalmente en el agua localizada cerca de la superficie del suelo, se interesa particularmente en aquellos componentes del ciclo hidrológico que se presentan ahí--esto es, precipitación, evapotranspiración, escorrentía y agua en el suelo. Los diferentes aspectos de estos fenómenos son estudiados en sus varias subdisciplinas. La hidrometeorología, por ejemplo, se concentra en el agua localizada en la capa fronteriza inferior de la atmósfera, mientras que la hidrometría se encarga de las mediciones del agua superficial, especialmente precipitación y flujo de las corrientes. La hidrografía involucra la descripción y la confección de mapas de los grandes cuerpos de agua, tales como lagos, mares interiores y océanos. Por el otro lado, la hidrología del suelo se centra en el agua que se encuentra en la zona saturada debajo de la superficie del suelo, y en la física suelo-agua en la zona no saturada.

La hidrología se nutre de disciplinas como la geología, química, edafología y fisiología vegetal, empleando muchos de sus principios y métodos. Los investigadores en el campo usan mucho (y cada vez más) las simulaciones computarizadas de los sistemas hidrológicos naturales y las técnicas de detección remota, como, por ejemplo, el uso de satélites que orbitan el planeta equipados con cámaras infrarrojas para detectar cuerpos de aguas contaminadas o para seguir el flujo de manantiales termales.

La investigación hidrológica es importante para el desarrollo, gestión y control de los recursos de agua. Sus aplicaciones son muchas, incluyendo el desarrollo de sistemas de irrigación, control de inundaciones y erosión de suelos, eliminación y tratamiento de aguas usadas,

disminución de la contaminación, uso recreacional del agua, la conservación de los peces y vida silvestre, la generación hidráulica, y el diseño de estructuras hidráulicas.

## II.2. EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el término que se usa para describir la circulación general del agua desde el océano hacia la atmósfera, hacia el subsuelo y nuevamente hacia el océano.

El ciclo hidrológico o del agua no tiene principio ni fin. El agua de la superficie del océano se evapora hacia la atmósfera. Este vapor se condensa por varios procesos y cae a la tierra como precipitación. Una parte de esta precipitación cae sobre el océano y otra sobre el terreno. Una porción de la que cae en la tierra es retenida temporalmente en depresiones superficiales, vegetación y otros objetos (intercepción) y retorna a la atmósfera por evaporación y transpiración. La restante, moviéndose por intrincadas superficies hacia ríos, lagos y el mar, está igualmente sujeta a la evaporación y transpiración durante todo su trayecto y, además, puede infiltrarse en el terreno. El agua infiltrada puede percolar hasta zonas más profundas o ser almacenada como agua subterránea, que puede más tarde fluir como manantiales o incorporarse a los ríos, lagos o mar. De esta manera, el ciclo hidrológico sufre varios complicados procesos de evaporación, precipitación, intercepción, transpiración, infiltración, precolación, almacenamiento y escorrentía (Fig. N°1).



Fig. N°1: El ciclo hidrológico

En el (Cuadro N°1) se presentan las cantidades estimadas de agua que existen sobre la Tierra, discriminadas según la fuente y distinguiendo entre agua dulce y agua salada. Según Wolman (1962), el 97% del agua del mundo (unos 1,3 x 10<sup>9</sup> km<sup>3</sup>) está en los océanos. Del 3% restante (unos 3,6 x 10<sup>7</sup> km<sup>3</sup>), el 75% se encuentra en los polos y los glaciares, el 25% como agua subterránea, de la cual, el 14% está a profundidades mayores a 800, el 0,3% en lagos, el 0,06% como humedad del suelo, el 0,035% en la atmósfera y el 0,03% en los ríos. Mientras el contenido de agua en la atmósfera es relativamente pequeño en cualquier momento, inmensas cantidades de agua pasan a través de ella anualmente. Según Reichel (1952), la precipitación media anual sobre toda la tierra es de unos 860 mm, lo que bajo condiciones estacionarias es equilibrado por una cantidad igual de evaporación. De esta manera, la evaporación promedio global sería de 2,36 mm/día.

Ésta es una descripción del ciclo hidrológico sumamente simplificada. En la realidad todas las fases del ciclo ocurren simultáneamente. A escala global, la cantidad de agua involucrada en cada una de las fases del ciclo son relativamente constantes, pero vistas en términos de un área limitada, como por ejemplo una cuenca fluvial, las cantidades involucradas en cada parte del ciclo varían entre amplios límites. Esas variaciones son objeto de estudio en hidrología. Por ejemplo, un desequilibrio temporal del ciclo en el cual un gran volumen de agua se concentra en un río, da por resultado una avenida. Por el contrario, pequeñas o despreciables cantidades de agua en la fase de precipitación, conducen a una sequía.

**Cuadro N° 1**

Tabla 1.1: Estimación de cantidades globales de agua, según World Water Balance and Water Resources of the Earth, UNESCO, 1978.

	<i>Agua Salada</i> <i>Km<sup>3</sup></i>	<i>Agua Dulce</i> <i>Km<sup>3</sup></i>	<i>Agua Salada</i> <i>%</i>	<i>Agua Dulce</i> <i>%</i>
Océanos	1.338.000.000		96,5	
Agua subterránea dulce		10.530.000		0,76
Agua subterránea salada	12.870.000		0,929	
Humedad del suelo		16.500		0,0012
Hielo polar		24.023.500		1,73
Hielo no polar y nieve		340.600		0,0246
Lagos dulces		91.000		0,0066
Lagos salinos	85.400		0,0062	
Embalses		11.470		0,0008
Ríos		2.120		0,0002
Agua biológica		1.120		0,0001
Agua atmosférica		12.900		0,0009
Agua Salada Total	1.350.955.400		97,5	
Agua Dulce Total		35.029.210		2,53
Agua Total	1.385.984.610			

## II.2.1. Fases del Ciclo Hidrológico

### II.2.1.1. Precipitación

Cuando por condensación las partículas de agua que forman las nubes alcanzan un tamaño superior a 0,1 mm comienza a formarse gotas, gotas que caen por gravedad dando lugar a las precipitaciones (en forma de lluvia, granizo o nieve).

Existen distintos tipos de precipitación: lluvia, nieve, granizo y nevisca. La precipitación requiere la elevación de una masa de aire húmedo en la atmósfera, de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los mecanismos de elevación pueden ser:

- Elevación frontal: el aire caliente se eleva sobre el aire frío.
- Elevación orográfica: la masa de aire se eleva para pasar sobre una cadena montañosa.
- Elevación convectiva: el aire se arrastra hacia arriba por acción convectiva. Las celdas convectivas se originan por calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostienen por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa.

La formación de la precipitación se ilustra en la (Fig. N°2), cuando el aire se eleva y se enfría el agua se condensa pasando al estado líquido. Si la temperatura se encuentra por debajo del punto de congelamiento, se forman cristales de hielo en vez de agua. El proceso de condensación requiere una semilla llamada *núcleo de condensación*, alrededor del cual las moléculas se pueden adherir o juntar. Partículas de polvo flotando en el aire pueden actuar como núcleos de condensación. Partículas que contienen iones son efectivos núcleos de condensación porque atraen a las moléculas de agua. Los iones de la atmósfera incluyen las partículas de sal proveniente de la evaporación del agua de mar y compuesta de sulfuro y de nitrógeno provenientes de la combustión. Los diámetros de estas partículas suelen estar entre 0.001 y 10  $\mu\text{m}$  y son

conocidas como *aerosoles*. Dado que un átomo tiene un tamaño de  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$ , los aerosoles más pequeños pueden estar compuestos de unas pocas decenas de átomos.

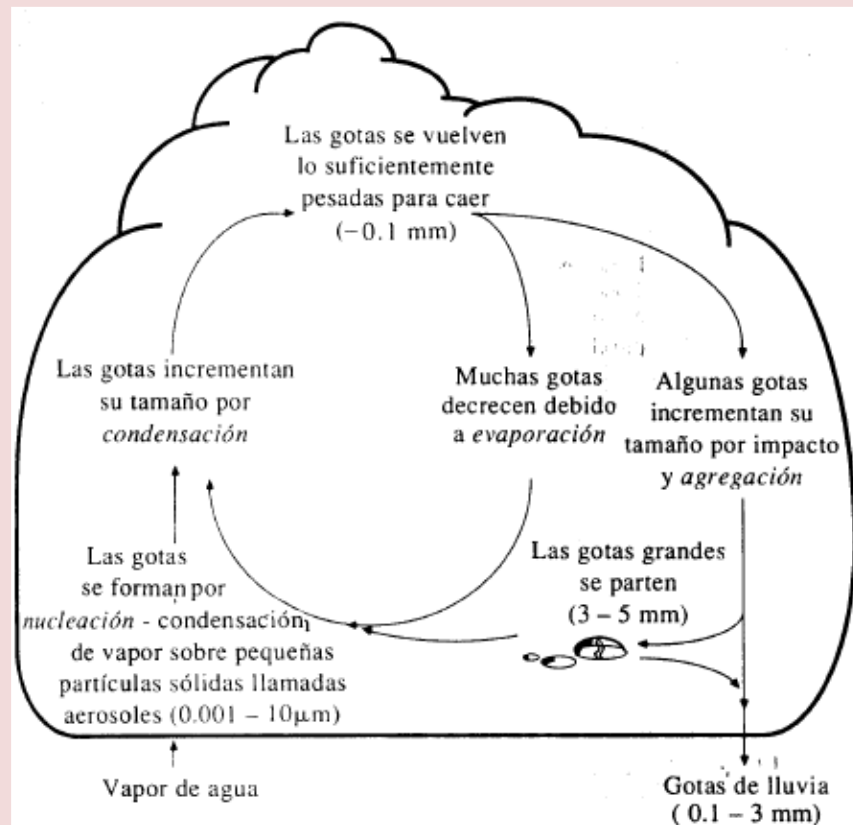


Fig. N°2. Esquema del proceso de formación de las gotas de lluvia (Fuente: Chow et al. 1994).

Las pequeñas gotitas formadas de esta manera crecen por condensación e impactan con otras vecinas transportadas por el movimiento del aire, hasta que se hacen lo suficientemente grandes como para que la fuerza de la gravedad sea mayor que la de fricción y comienzan a caer. Al caer, la gota puede incrementar su tamaño por impacto con otras gotas en su camino. Sin embargo, cuando la gota cae también puede disminuir su tamaño por evaporación, tanto hasta llegar a convertirse de nuevo en un aerosol y ser transportada nuevamente hacia arriba de la nube por acción de la turbulencia. Una corriente ascendente de sólo  $0,5 \text{ cm/s}$  es suficiente para transportar una gota de  $10 \mu\text{m}$ . Cristales de hielo del mismo peso, debido a su forma y a su mayor tamaño, pueden ser transportados por corrientes con velocidades aún menores. El ciclo

de condensación, caída, evaporación y elevación puede ocurrir un promedio de 10 veces antes de que la gota alcanza el tamaño crítico de aproximadamente 0,1 mm, que es el tamaño suficiente para que caiga a través de la base de la nube.

Hasta un tamaño de 1 mm de diámetro, las gotas se mantienen de forma esférica, pero con tamaños mayores, empiezan a deformarse hasta que se dividen en gotas más pequeñas. Las gotas que caen por la base de la nube tienen de 0,1 a 3 mm de diámetro.

Algunas observaciones indican que las gotas de agua pueden existir en las nubes a temperaturas menores a  $-35^{\circ}\text{C}$ . A esta temperatura las gotas súper enfriadas pueden congelarse incluso sin núcleos de condensación. La presión de vapor de saturación es menor sobre el hielo que sobre el agua, de manera que si las partículas de hielo se mezclan con gotas de agua, las partículas de hielo crecerán por evaporación de las gotas de agua y condensación sobre los cristales de hielo.

Por colisión y coalescencia, los cristales de hielo se agrupan y caen como copos de nieve. Sin embargo, los cristales de hielo pueden hacerse tan grandes que pueden llegar a la superficie como granizo.

La siembra de nubes es el proceso mediante el cual se nuclean artificialmente las nubes para inducir la precipitación. Generalmente se usa yoduro de plata.

### **Variabilidad de la Precipitación**

La precipitación tiene una gran variabilidad en el espacio y en el tiempo debido al patrón general de circulación atmosférica y a factores locales. La precipitación media global es de 800 mm/año, pero pueden encontrarse medias locales desde 0,5 mm/año, en el desierto de Arica, Chile, hasta 11680 mm/año en el Mt. Waialeale, Hawaii.

A continuación se presentan los registros máximos de precipitación en el mundo en función de la duración:

- 1 min: 17 mm (1020 mm/h). Opid's Camp, California
- 5 min: 76 mm (912 mm/h). Porto Bello, Panamá

- 15 min: 203 mm (812 mm/h). Plumb Point, Jamaica
- 40 min: 305 mm (457 mm/h). Holt, Montana
- 3 horas: 508 mm (169 mm/h). D'Hanis, Texas
- 1 día: 1270 mm (53 mm/h). Baguio
- 2 días: 2032 mm (42 mm/h). Cherrapunji, India (6/1876)
- 4 días: 3800 mm (40 mm/h). Cherrapunji, India (8/1841)
- 30 días: 9900 mm (14 mm/h). Cherrapunji, India (1861)
- 1 año: 23000 mm (2,7 mm/h). Cherrapunji, India (1886)

Puede verse que a medida que el intervalo analizado aumenta, la intensidad media disminuye.

### **II.2.1.2. Las pérdidas hidrológicas**

El agua proveniente de la precipitación que no se transforma en escorrentía directa se denomina pérdidas de la precipitación. El agua que constituye las pérdidas, lo hace mediante la participación de varios fenómenos: la evaporación, la evapotranspiración, la interceptación, el almacenamiento en depresiones y la infiltración.

#### **Evaporación**

Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde un cuerpo de agua son el suministro de energía para proveer de calor latente de vaporización, la que es provista por la radiación solar y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación, la que depende de la velocidad del viento y el gradiente de humedad específica del aire.

El ciclo se inicia sobre todo en las grandes superficies líquidas (lagos, mares y océanos) donde la radiación solar favorece que continuamente se forme vapor de agua. El vapor de agua, menos denso que el aire, asciende a capas más altas de la atmósfera, donde se enfría y se condensa formando nubes.



## **Evapotranspiración**

La evapotranspiración es la suma de la evaporación que se produce en las superficies abiertas de agua sobre la tierra y la vegetación y la transpiración que se produce desde las estomas de las hojas. Los factores que influyen son los mismos que los de la evaporación más uno adicional que es el suministro de humedad hacia la superficie de evaporación.

En casi todas las formaciones geológicas existe una parte superficial cuyos poros no están saturados en agua, que se denomina “zona no saturada”, y una parte inferior saturada en agua, y denominada “zona saturada”. Una buena parte del agua infiltrada nunca llega a la zona saturada sino que es interceptada en la zona no saturada. En la zona no saturada una parte de esta agua se evapora y vuelve a la atmósfera en forma de vapor, y otra parte, mucho más importante cuantitativamente, se consume en la “transpiración” de las plantas. Los fenómenos de evaporación y transpiración en la zona no saturada son difíciles de separar, y es por ello por lo que se utiliza el término “evapotranspiración” para englobar ambos términos.

## **Retención**

Pero no toda el agua que precipita llega a alcanzar la superficie del terreno. Una parte del agua de precipitación vuelve a evaporarse en su caída y otra parte es retenida (“agua de intercepción”) por la vegetación, edificios, carreteras, etc., y luego se evapora.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcas, lagos y embalses (“almacenamiento superficial”) volviendo una gran parte de nuevo a la atmósfera en forma de vapor.

## **Intercepción**

La intercepción es un fenómeno muy mal conocido y difícil de estudiar. La intercepción es producida por la cubierta vegetal y sus efectos son el de retener un

cierto volumen de agua, que luego se transforma en evaporación y el de modificar la intensidad de precipitación en función del tiempo.

Los factores que influyen en la intercepción son: las características de la cubierta vegetal, las características de la superficie vegetada, el tipo de tormenta, ya que si es débil y corta el efecto es mayor y el clima en general.

Algunos valores estimativos son: en prados, del 5 al 10% de la precipitación anual, en bosques espesos, un 25% de la precipitación anual. Además, si la lluvia es menor a 1 mm puede considerarse que será interceptada en su totalidad y si es mayor a 1 mm, dicha intercepción puede ser de un 10 a un 40%.

### **Almacenamiento en Depresiones**

El volumen almacenado en las depresiones del terreno (charcos) finalmente se convierte en pérdidas, ya que es un volumen que se infiltra, o bien, si la depresión es impermeable, se evapora.

En zona urbana, se estima que el volumen que se puede perder por este concepto es del 5 al 8 % de la precipitación total.

### **Infiltración**

Ocurre cuando el agua que alcanza el suelo, penetra a través de sus poros y pasa a ser subterránea. La proporción de agua que se infiltra y la que circula en superficie (escorrentía) depende de la permeabilidad del sustrato, de la pendiente y de la cobertura vegetal. Parte del agua infiltrada vuelve a la atmósfera por evaporación o, más aún, por la transpiración de las plantas, que la extraen con raíces más o menos extensas y profundas. Otra parte se incorpora a los acuíferos, niveles que contienen agua estancada o circulante. Parte del agua subterránea alcanza la superficie allí donde los acuíferos, por las circunstancias topográficas, intersectan (es decir, cortan) la superficie del terreno.

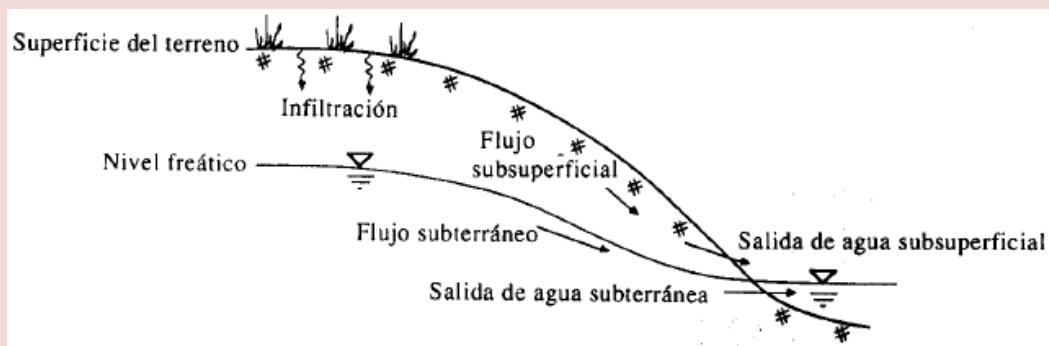
***Flujo no saturado.***- Los procesos que se desarrollan bajo la superficie de la tierra son la *infiltración*, el *flujo subsuperficial* y el *flujo subterráneo* (Fig. N°3). El agua que se

infiltra se transforma en humedad del suelo. El flujo subsuperficial es el que se produce como *flujo no saturado* a través del suelo. El flujo subterráneo es el que se produce como *flujo saturado* a través de los estratos de suelo o roca. Los estratos de suelo y roca que permiten la circulación del flujo a su través se denomina *medio poroso*. El flujo es no saturado cuando el medio poroso tiene sus huecos ocupados por aire y es saturado cuando los huecos están completamente ocupados por agua. El *nivel freático*, es la superficie donde el agua en el medio poroso saturado se encuentra a presión atmosférica. Por debajo del nivel freático, el agua está a una presión mayor que la atmosférica.

Por encima del nivel freático, las fuerzas capilares pueden saturar el medio poroso en un espesor no muy grande de suelo llamado *franja capilar*. Por encima de esta capa, el medio poroso suele estar no saturado excepto inmediatamente después de una lluvia, cuando se producen condiciones de saturación en forma temporal.

El flujo subsuperficial y el subterráneo, bajo ciertas condiciones, pueden salir a la superficie transformándose en escorrentía, bien como un manantial, bien directamente fluir a un río.

La humedad del suelo es extraída por medio de la evaporación y de la evapotranspiración a través de las raíces de las plantas.



**Fig. N°3: Zonas del agua subsuperficial y procesos que se desarrollan en ellas.**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Los factores que influyen en la tasa de infiltración son:

- El estado de la superficie del suelo.
- El estado de la cubierta vegetal.
- Las propiedades del suelo: porosidad y conductividad hidráulica.
- El contenido de humedad presente en el suelo.

Estratos de suelo con diferentes propiedades físicas pueden estar situados unos sobre otros formando horizontes. Además, los suelos presentan una gran variedad espacial, incluso en pequeñas áreas. Como resultado de esta variabilidad espacial y debido a que las propiedades de los suelos también varían en función de la humedad que contienen, la infiltración es un proceso extremadamente complejo que sólo puede describirse aproximadamente a través de ecuaciones matemáticas.

La distribución de la humedad dentro del perfil de suelo se esquematiza en la (Fig. N°4), en ella pueden distinguirse 4 zonas:

- Zona saturada: cerca de la superficie.
- Zona de transmisión: de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme.
- Zona de mojado: la humedad decrece con la profundidad.
- Frente de mojado: el cambio de contenido de humedad con la profundidad es tan grande que tiene la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco abajo.

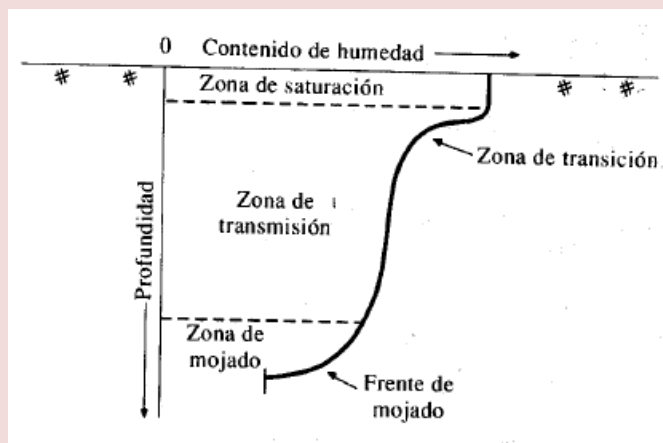


Fig. N°4. Esquema de la distribución de humedad dentro del perfil de suelo (Fuente: Chow et al. 1994)

Se define la *tasa de infiltración*,  $f$  [cm/hora] como la tasa a la cual el agua entra al suelo en la superficie. Si existe encharcamiento en la superficie, la tasa de infiltración es igual a la tasa de infiltración potencial. La mayor parte de las ecuaciones de infiltración describen la tasa de infiltración potencial.

### ***Tiempo de encharcamiento.-***

El *tiempo de encharcamiento*,  $tp$  es el tiempo que pasa desde el inicio de la lluvia hasta que el agua comienza a encharcarse en el terreno. En todo momento anterior a  $tp$  toda el agua se infiltra, es decir, la intensidad de lluvia,  $i$  es menor que la tasa de infiltración,  $f(t)$ . A partir del instante  $t = tp$  comienza la escorrentía, es decir, que la intensidad de lluvia es mayor que la tasa de infiltración.

### **Abstracciones Iniciales**

Porción de la precipitación que ocurre antes de que inicie el escurrimiento, estas pérdidas son: intercepción, depresiones e infiltración.

### **II.2.1.3. Escorrentía**

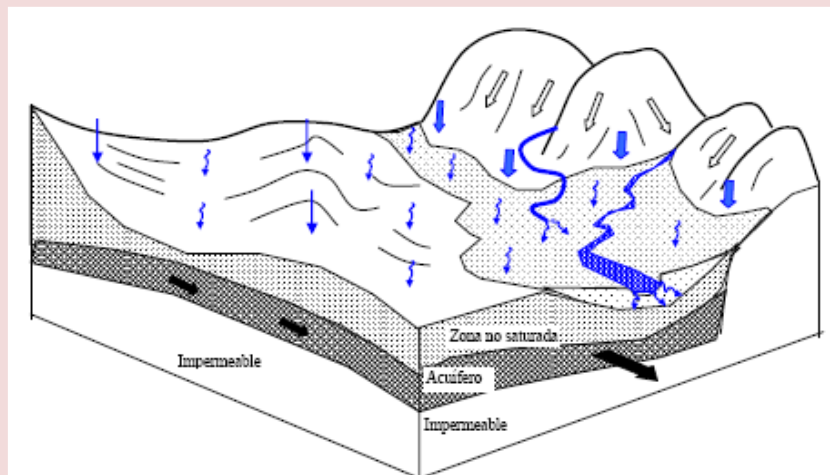
#### **Escorrentía superficial**

El agua que no es pérdida hidrológica circula sobre la superficie y se concentra en pequeños cursos de agua, que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos “escorrentía superficial”. Esta agua que circula superficialmente irá a parar a lagos o al mar, donde una parte se evaporará y otra se infiltrará en el terreno.

#### **Escorrentía subterránea**

El agua subterránea está localizada en la zona saturada del subsuelo, es decir en la región donde todos los poros están llenos de agua. Esta agua tiene su origen en la infiltración del agua superficial, lo cual hace que varíe su composición química,

enriqueciéndose de elementos minerales y empobreciéndose de materia orgánica. Gracias a ello, el agua subterránea, usualmente, es de gran calidad para el consumo.



**Fig. 5. El agua subterránea en el ciclo hidrológico**

El agua que desciende, por gravedad-percolación y alcanza la zona saturada constituye la “recarga de agua subterránea.

El agua subterránea puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno. Otras veces, se produce la descarga de las aguas subterráneas, la cual pasará a engrosar el caudal de los ríos, rezumando directamente en el cauce o a través de manantiales, o descarga directamente en el mar, u otras grandes superficies de agua, cerrándose así el ciclo hidrológico.

**El proceso del ciclo hidrológico se repite y así no se pierde nunca el agua.**

### **II.3. TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA**

La escorrentía se puede definir como la cantidad de agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo. Cuando se produce, fluye a los cauces incrementando su volumen; a medida que llega agua de las partes más lejanas comienza suavemente a decrecer el caudal al poco tiempo de terminada la lluvia. La erosión hídrica del suelo es un proceso producido por la escorrentía que ocasiona el empobrecimiento de los mismos y grandes pérdidas económicas. El agua de las lluvias que no alcanza a infiltrar en el suelo y escurre

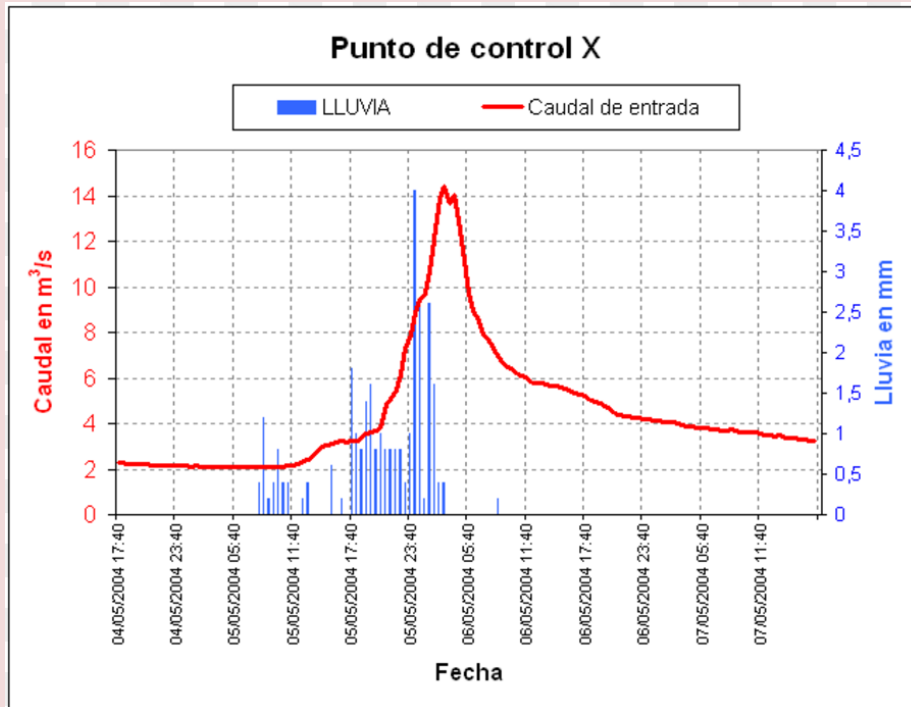
sobre la superficie de la tierra corre a velocidades diferentes ocasionando los mayores problemas en el manejo de cuencas. Es en esta parte del ciclo hidrológico en la cual se debe intervenir activamente para evitar que el agua ocasione graves daños; se pueden prescribir y aplicar diferentes prácticas de conservación de suelos que controlen el agua para evitar sus efectos negativos.

Los métodos para estimar la escorrentía a partir de la precipitación tratan de descontar de la lluvia caída sobre una cuenca todas aquellas pérdidas que se deben a factores tales como la infiltración, la evapotranspiración, la intercepción y el almacenamiento superficial. El procedimiento más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región es el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972). Este método se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal (5). A partir de la representación de la precipitación (P) y precipitación efectiva (Pe) se obtuvo una familia de curvas que fueron estandarizadas para definir un número adimensional de curvas NC, que varía de 1 a 100 según sea el grado de escurrimiento directo. El NC igual a 1 indica que toda la lluvia infiltra y un NC de 100 representa el escurrimiento total de la precipitación. Los números de curva se aplican para diferentes condiciones de humedad antecedente, siendo la condición II la que corresponde a humedad media del suelo. Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado de acuerdo con lluvias precedentes en el período de 5 días anteriores, se supone un aumento de la escorrentía (condición III); por el contrario, si el suelo está seco la infiltración será predominante (condición I). Mintegui Aguirre et al. (7) utilizaron este método para determinar las escorrentías directas en el Arroyo del Partido (Parque Nacional de Doñana, España) a partir del estudio de las tormentas representativas del área y de la elaboración de mapas por medio de Sistema de Información Geográfico (SIG).

#### **II.4. HIDROGRAMA**

El **Hidrograma** es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, etc. para un río, arroyo o canal, si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo; esto es equivalente a decir que es el gráfico de la descarga ( $L^3/T$ ) de un flujo en función del tiempo.

Éstos pueden ser hidrogramas de tormenta e hidrogramas anuales, los que a su vez se dividen en perennes y en intermitentes.



**Fig. 6. Hidrograma de tormenta debido a la lluvia recibida en la cuenca.**

Permite observar:

- Las variaciones en la descarga a través de una tormenta, o a través del año hidrológico.
- El pico de escorrentía (caudal máximo de la avenida); El **flujo de base** o aporte de las aguas subterráneas al flujo; o, las variaciones estacionales de los caudales si se grafica un periodo de tiempo de uno o varios años.
- Los hidrogramas son útiles, entre otras cosas, para comparar los tiempos de descarga y caudales pico de varias corrientes o cuencas hidrográficas, para así conocer las diferencias entre sus capacidades de respuesta ante avenidas.

### Concepto de Tiempo de Concentración (Tc)

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, punto de desagüe o



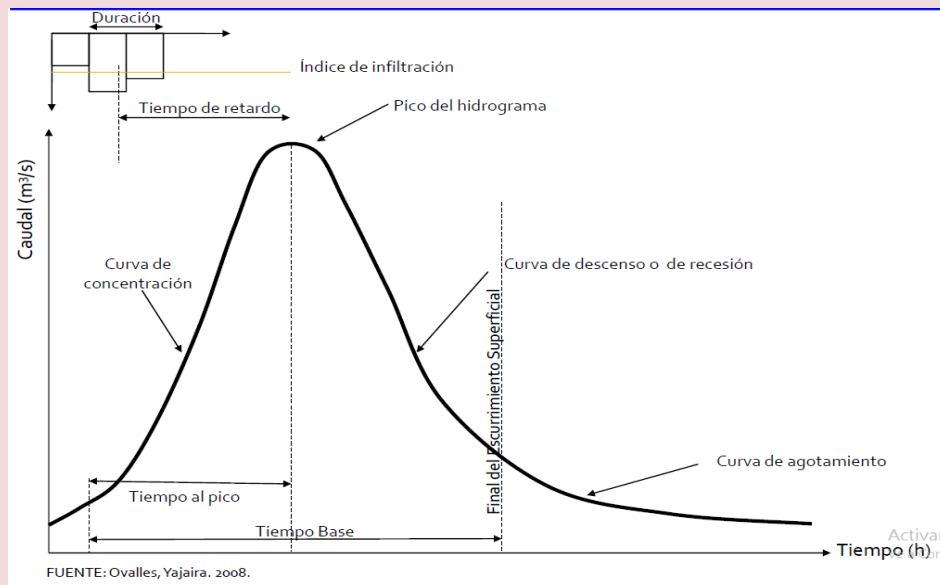
punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

El cálculo del tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica es uno de los aspectos básicos a determinar a la hora de gestionar los recursos agua y suelo, ya sea para su mejor aprovechamiento como para mejorar su manejo y conservación.

Su cálculo se realiza mediante la aplicación de algunos de las gráficas o ecuaciones determinadas empíricamente a partir de la toma de datos en campo, la mayoría de las veces en climas y situaciones topográficas diferentes a las condiciones mediterráneas de nuestro entorno. Únicamente el método de la Dirección General de Carreteras está específicamente desarrollado para nuestras características ambientales particulares.

## Tiempo de Retardo

Es el tiempo entre la mitad de la duración de la lluvia efectiva y el tiempo al pico del hidrograma.

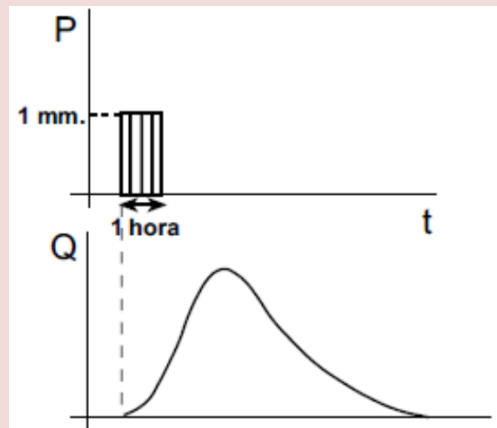


**Fig. 7. Partes del Hidrograma**

## Hidrograma Unitario

El método del hidrograma unitario es uno de los métodos utilizados en hidrología, para la determinación del caudal producido por una precipitación en una determinada cuenca hidrográfica.

Un hidrograma unitario es un hidrograma ( $Q = f(t)$ ) resultante de un escurrimiento correspondiente a un volumen unitario (1 cm, mm, plg,... de lluvia por la cuenca) proveniente de una lluvia con una determinada duración y determinadas características de distribución en la cuenca hidrográfica.



**Fig. 8. Partes del Hidrograma**

Propuesto por Sherman en el año 1932, este método tiene por objetivo la determinación del hidrograma de aguas superficiales de una cuenca a partir de los pluviogramas correspondientes a las tormentas de la cuenca. Su uso se extiende principalmente para el cálculo de los caudales de crecida (Remenieras, 1971).

De este modo Chow et al., (1998) define al hidrograma unitario de una cuenca como el resultante de 1 mm de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje, a una tasa constante, a lo largo de una duración efectiva. Originalmente, Sherman utilizó la palabra unitario para expresar un tiempo unitario, pero desde entonces se ha interpretado habitualmente como una profundidad unitaria de exceso de lluvia.

## **Hidrograma Unitario Sintético**

En el estudio de cauces torrenciales, y en general en casi todos los estudios hidrológicos, el cálculo de caudales máximos se afronta con una importante escasez de datos meteorológicos y de datos de aforo. En estos casos lo habitual es que no se disponga de datos de precipitaciones y escorrentía, lo cual ha llevado a obtener relaciones entre características fácilmente medibles en las cuencas y unos coeficientes que permitan estimar el hidrograma unitario. Es así, como a esta clase de hidrogramas se les denomina sintéticos, ya que no provienen de datos reales, sino que de formulaciones obtenidas utilizando datos de otras cuencas (Almansa et al., 1994).

Según Aparicio (1997), se define como hidrograma unitario sintético al obtenido usando únicamente datos de características generales de la cuenca. Estos métodos son utilizados cuando no existen registros de una estación hidrométrica.

“Cuando no existe ningún registro de caudales sobre una cuenca, es posible simular las formas del hidrograma considerando únicamente las características físicas de la cuenca (Llamas, 1993).”

El hidrograma más conocido y usado en nuestro medio es el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos.

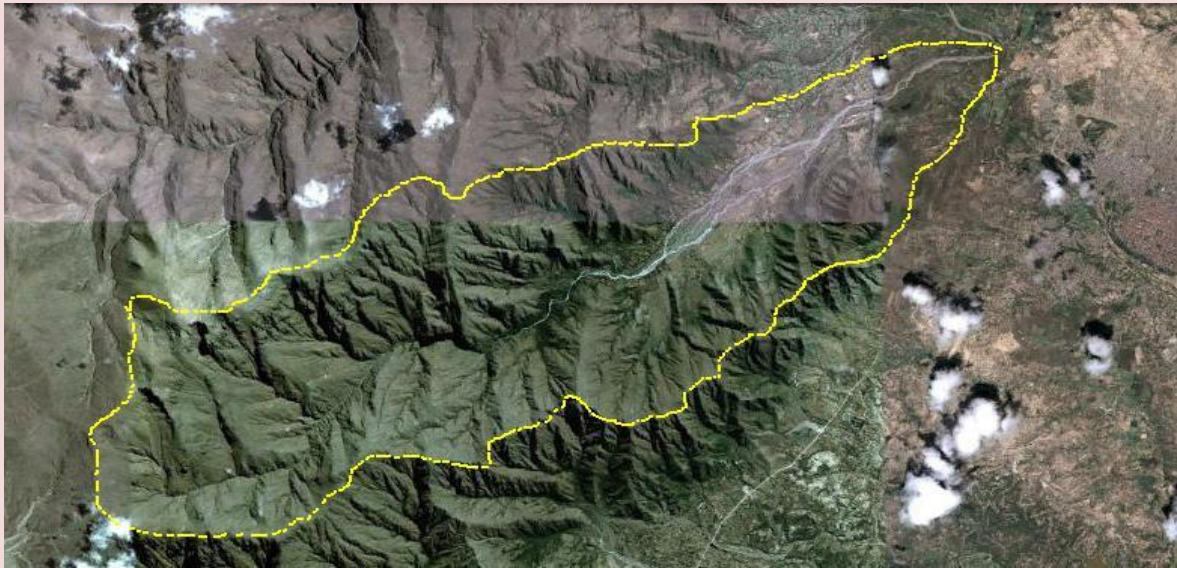
## **II.5. CUENCA HIDROGRÁFICA**

Según Aparicio (1997), la cuenca hidrográfica se define como una superficie terrestre, en donde las gotas de lluvia que caen, son drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

El mismo autor señala que la definición entregada se refiere a una cuenca superficial, y que a su vez ésta se encuentra asociada a una cuenca subterránea. De esta manera y dependiendo de la salida que tenga, existen dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. Las primeras presentan sus límites de salida dentro de la cuenca y habitualmente corresponde a un lago, mientras que las segundas presentan su punto de salida en los límites de la cuenca y los cuales pueden ser una corriente externa, o el mar.

Por su parte, Llamas (1993) indica que la cuenca es un espacio geográfico que recibe aportes hídricos, esencialmente de las precipitaciones, y que los excedentes que presenta en agua y sólidos transportados por la corriente, toman lugar en una sola desembocadura.

Una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrológica se diferencian en que la cuenca hidrográfica se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la cuenca hidrológica incluye las aguas subterráneas (acuíferos).



**Fig. N°9. Cuenca hidrográfica delimitada en imagen satelital**

### **II.5.1. Divisoria de Aguas**

La divisoria de aguas o *divortium aquarum* es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos. También llamado *Divortium aquarum*. Otro término utilizado para esta línea se denomina *parteaguas*.

El *divortium aquarum* o línea divisoria de vertientes, es la línea que separa a dos o más cuencas vecinas. Es la divisoria de aguas, utilizada como límite entre dos espacios geográficos o cuencas hidrográficas.

## **II.5.2. Características Físicas de una Cuenca**

Las características físicas de una cuenca dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, etc.), los tipos de suelo, la cubierta vegetal, la geología, los usos del suelo, etc. Estas características influyen de manera decisiva en la respuesta hidrológica de la cuenca.

### **II.5.2.1. Área de Drenaje**

El área de drenaje ( $A$ ) es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas.

La divisoria de aguas es una línea imaginaria que pasa por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de estudio de otras cuencas vecinas. Debe tenerse en cuenta que esta línea no es en general el contorno real de la cuenca, ya que la influencia de la geología puede hacer que el contorno de aportación de aguas subterráneas y sub-superficiales sea distinto del superficial.

### **II.5.2.2. El Río Principal**

El río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje, aunque hay notables excepciones como el río Misisipi. Tanto el concepto de río principal como el de nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

En el curso de un río se distinguen tres partes:

- curso superior, ubicado en lo más elevado del relieve, en donde la erosión de las aguas del río es vertical. Su resultado: la profundización del cauce;
- curso medio, en donde el río empieza a zigzaguear, ensanchando el valle;

- curso inferior, situado en las partes más bajas de la cuenca. Allí, el caudal del río pierde fuerza y los materiales sólidos que lleva se sedimentan, formando las llanuras aluviales o valles.

### II.5.2.3. Forma de la Cuenca

Dos cuencas que tengan la misma área, podrán tener respuestas hidrológicas completamente diferentes en función de su forma, ya que ésta condicionará el tiempo de concentración. Los parámetros que miden la forma de la cuenca son el índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) y el factor de forma ( $K_f$ ).

- ***Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad***

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área igual a la de la cuenca.

$$K_c = \frac{\text{Per.Cuenca}}{\text{Per.Círculo}} = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Siendo:

$P$  = Perímetro de la cuenca (Km)

$A$  = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1.

- ***Factor de Forma***

Es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal.

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Siendo:

$B$  = Ancho medio de la cuenca (Km)

$A$  = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

$L$  = Longitud del cauce principal de la cuenca (Km).

Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma.

### II.5.3. Características del Relieve

#### II.5.3.1. Pendiente Media de la Cuenca

La pendiente media puede estimarse a través de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{DL_L}{A}$$

Siendo:

$L_L$  = Longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas dentro de la cuenca (Km).

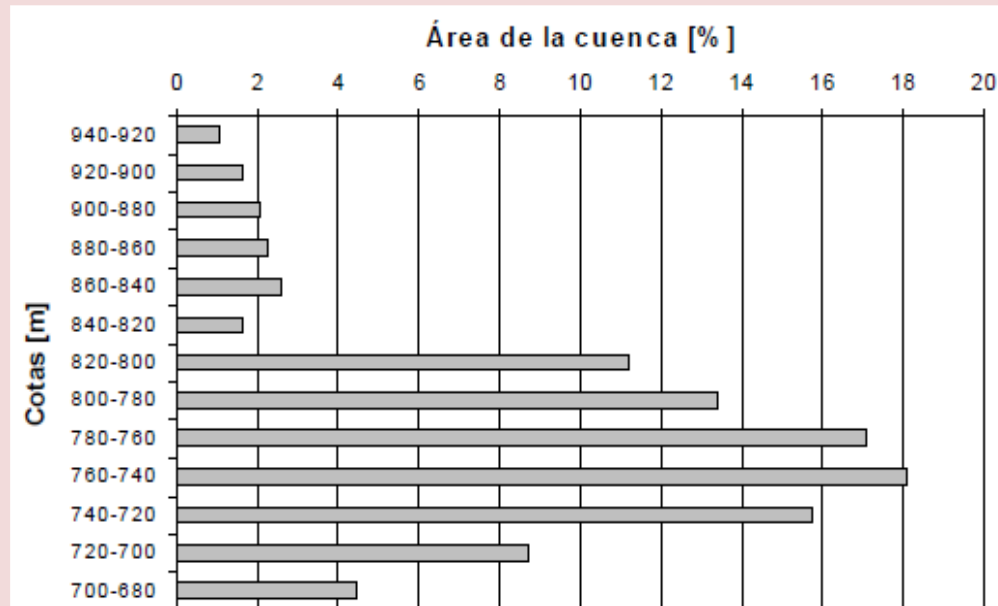
$D$  = Equidistancia entre curvas de nivel del mapa topográfico (Km).

$A$  = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

#### II.5.3.2. Histograma de Frecuencias Altimétricas

Es un histograma que indica el porcentaje de área comprendida entre dos alturas determinadas.

Puede obtenerse calculando el área que existe entre las curvas de nivel de la cuenca. En la (Fig. N°10) puede verse un ejemplo:



**Fig. N°10. Histograma de Frecuencias Altimétricas de una Cuenca**

### II.5.3.3. Curva Hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Es una curva que indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca en ( $\text{Km}^2$ ) que existe por encima de una cota determinada. Puede hallarse con la información extraída del histograma de frecuencias altimétricas. En la (Fig. N°11) se presenta la curva hipsométrica correspondiente al histograma de la (Fig. N°10).

Una curva hipsométrica puede darnos algunos datos sobre las características fisiográficas de la cuenca. Por ejemplo, una curva hipsométrica con concavidad hacia arriba indica una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas y lo contrario indicaría valles profundos y sabanas planas.



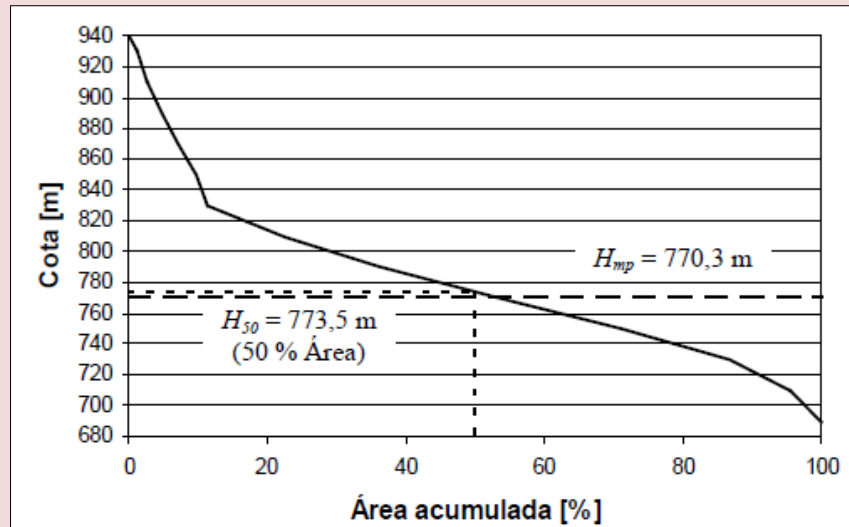


Fig. N°11. Curva hipsométrica

#### II.5.3.4. Alturas Características

A partir de la curva hipsométrica pueden definirse varias alturas características: la altura media, la altura media ponderada, la altura más frecuente y la altura mediana.

- La *altura media* ( $H_m$ ) es la ordenada media de la curva hipsométrica.
- La *altura media ponderada* ( $H_{mp}$ ) es la altura de un rectángulo de igual área que la que encierra la curva hipsométrica (Fig. N° 11).
- La *altura más frecuente* es la altura correspondiente al máximo del histograma de frecuencias altimétricas.
- La *altura mediana* ( $H_{50}$ ) es la altura para la cual el 50% del área de la cuenca se encuentra por debajo de la misma.

#### II.5.3.5. Pendiente del Cauce Principal

Se pueden definir varias pendientes del cauce principal, la pendiente media, la pendiente media ponderada y la pendiente equivalente.

- **La Pendiente Media ( $S_m$ ):** es la relación entre la altura total del cauce principal (Cota máxima menos cota mínima) y la longitud del mismo (Figura 12).

$$S_m = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L}$$

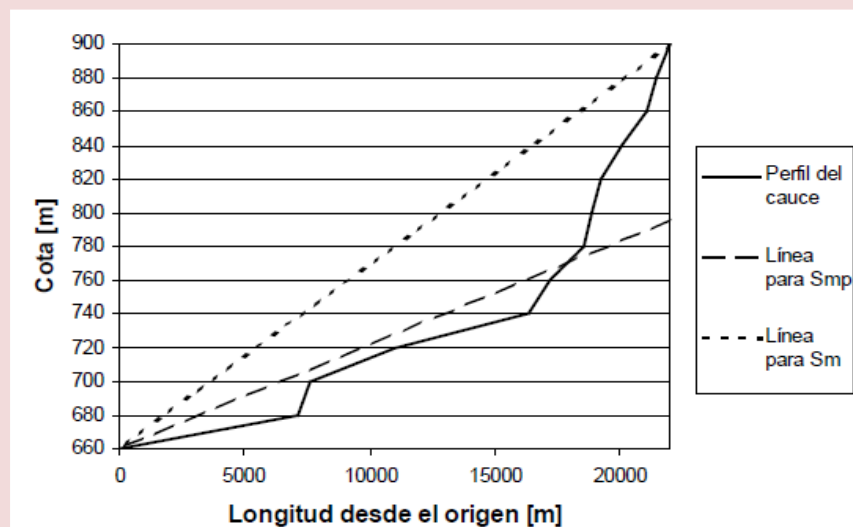
Siendo:

$S_m$  = Pendiente media del cauce principal

$H_{m\acute{a}x}$  = Cota Máxima del Cauce Principal

$H_{m\acute{i}n}$  = Cota Mínima del Cauce Principal

- **La Pendiente Media Ponderada ( $S_{mp}$ ):** es la pendiente de la hipotenusa de un triángulo cuyo vértice se encuentra en el punto de salida de la cuenca y cuya área es igual a la comprendida por el perfil longitudinal del río hasta la cota mínima del cauce principal, como se indica en la (Fig. No12).



**Fig. No12. Perfil longitudinal del cauce para el cálculo de pendiente media ponderada**

- **La Pendiente Equivalente Constante ( $S_{eq}$ )** es la pendiente de un canal de sección transversal uniforme de la misma longitud que el cauce principal y que posee la misma velocidad media o tiempo de recorrido que el cauce principal.

Como la velocidad del flujo en régimen permanente es proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente,  $S_{eq}$  se puede obtener ponderando los segmentos en el cual se divide el cauce de acuerdo a la raíz cuadrada de sus pendientes. Así:

$$\frac{L}{\sqrt{S_{eq}}} = \sum_1^n \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}$$

Siendo:

$S_{eq}$  = Pendiente equivalente constante

$L$  = Longitud del cauce principal (Km).

$l_i$  = Longitudes de los  $n$  tramos del cauce principal considerados.

$S_i$  = Pendientes de dichos tramos.

Despejando  $S_{eq}$ :

$$S_{eq} = \left[ \frac{L}{\sum \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2$$

### II.5.3.6 Rectángulo Equivalente

El rectángulo equivalente de una cuenca es un rectángulo que tiene igual superficie, perímetro, coeficiente de compacidad y distribución hipsométrica que la cuenca en cuestión (Fig. N°13).

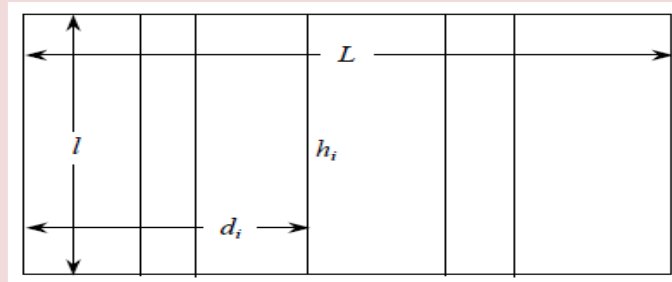
$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16A}}{4} \quad l = \frac{A}{L}$$

$L$  = lado mayor

$l$  = lado menor

$A = L * l$  = área del rectángulo equivalente = área de la cuenca

$P = 2(L+l)$  = perímetro del rectángulo equivalente = perímetro de la cuenca.



**Fig. N°13. Ejemplo de rectángulo equivalente.**

### II.5.3.7 Tiempo de Concentración ( $T_c$ )

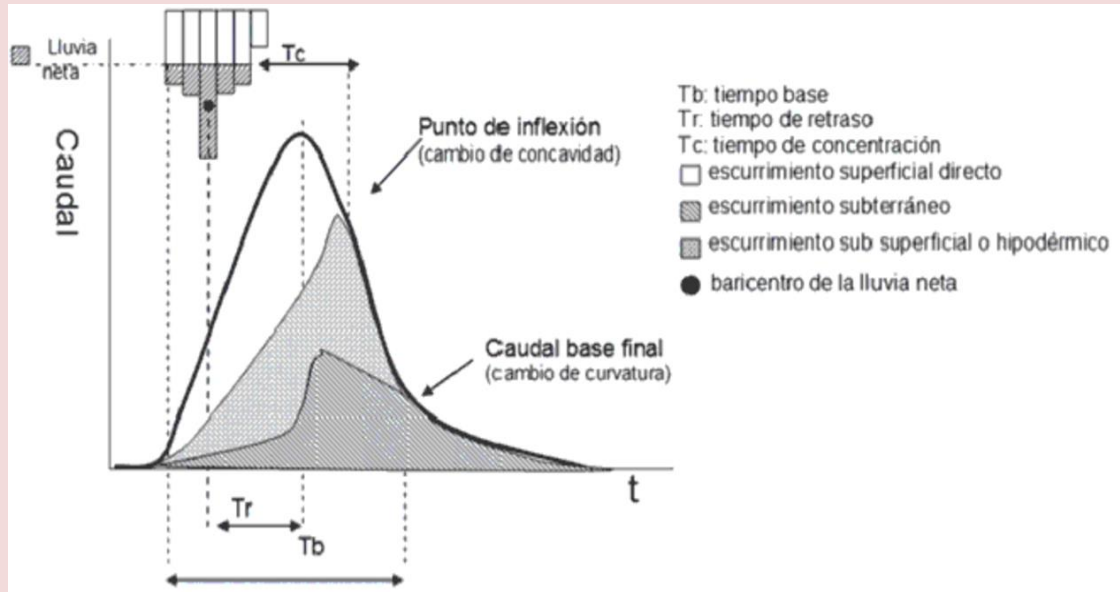
Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que el caudal es máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

Para entender bien el concepto de tiempo de concentración pensemos un poco en el siguiente ejemplo (figura 1): en un instante dado comienza a llover de forma uniforme y constante sobre un canal de riego; inmediatamente comenzará a circular agua hacia el punto de salida del canal (pto. B), pero en el instante inicial ( $t_0$ ), únicamente saldrá del canal el agua que cae directamente sobre el punto de salida o en sus inmediaciones, puesto que el agua precipitada en la parte alta del canal tardará cierto tiempo en recorrer la distancia que separa los puntos A y B como se ve en la (Fig. N°14):



**Fig. N° 14 Figura Ilustrativa**

El **Tiempo de Concentración Tc** de una determinada cuenca hidrográfica es el tiempo necesario para que el caudal saliente se estabilice, cuando la ocurrencia de una precipitación con intensidad constante sobre toda la cuenca, ver (Fig. N°15).



**Fig. N°15 (Hidrograma) se Visualiza del Tiempo de Concentración (Tc)**

Desde el punto de vista empírico, en la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, desarrolladas por diferentes autores para diferentes regiones del mundo, pero en nuestro caso particular la que se adecua de acuerdo a sus características es **la fórmula de Kirpich desarrollada para cuencas montañosas:**

$$T_c(\text{horas}) = \left[ \frac{11.9 \times L^3}{H} \right]^{0.385}$$

Siendo:

Tc= Tiempo de Concentración, en horas.

L = longitud del curso de agua más largo, en millas.

H = diferencia de elevación, en pies.

## II.5.4. Características de la Red de Drenaje

La red de drenaje de una cuenca está formada por el cauce principal y los cauces tributarios.

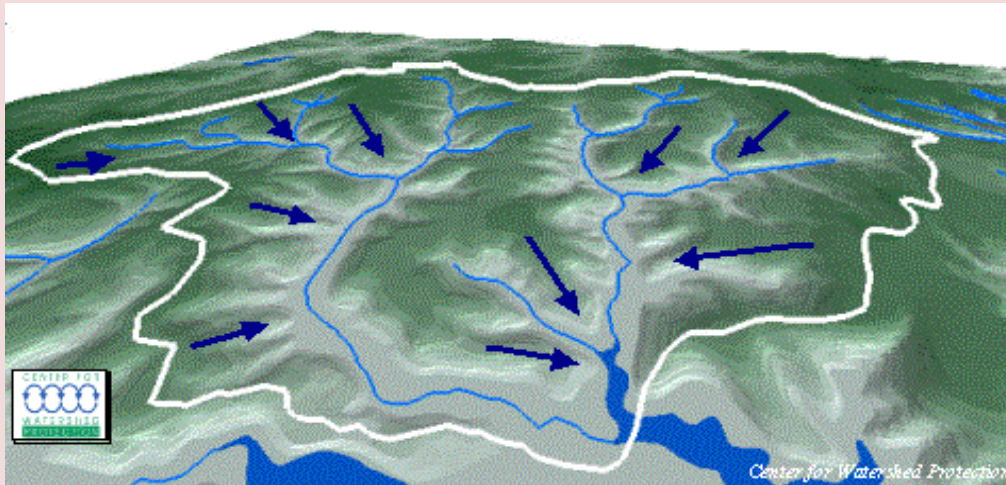


Fig. N°16 Red de drenaje en una cuenca

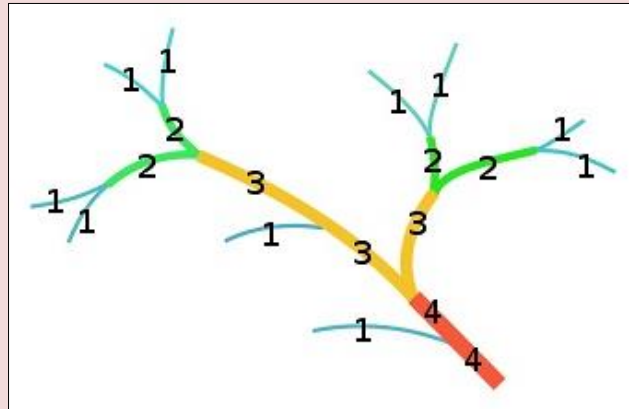
### II.5.4.1. Orden de la Cuenca

Es un número que refleja el grado de ramificación de la red de drenaje. La clasificación de los cauces de una cuenca se realiza a través de las siguientes premisas:

- Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
- Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y, en general, los cauces de orden  $n$  se forman cuando dos cauces de orden  $n-1$  se unen.
- Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.
- El orden de la cuenca es el mismo del su cauce principal a la salida.

En la (Fig. N°17) puede verse un ejemplo de esta clasificación. En relación al número de orden de los cauces, Horton (1945) encontró 3 leyes, llamadas Leyes de Horton: la ley de los números de cauces, la ley de las longitudes de los cauces y la ley de las áreas drenantes a los cauces.

Dichas leyes dicen que la relación de bifurcación, la relación de longitud y la relación de áreas permanecen constantes de un orden a otro de una cuenca.



Número de orden	Numero de corrientes
1	10
2	4
3	3
4	2

Fig. N° 17. Determinación del orden de los cauces de una cuenca (Sistema Strahler)

#### II.5.4.2. Relación de Bifurcación (RB)

Se define como la relación entre el número  $N_i$  de cauces de orden  $i$  y el número  $N_{i+1}$  de cauces de orden  $i+1$ . Horton encontró que esta relación es relativamente constante de un orden a otro.

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

Siendo  $N_i$  el número de cauces de orden  $i$ . El valor teórico mínimo para  $RB$  es 2 y Strahler encontró un valor típico entre 3 y 5 en cuencas donde la estructura geológica no distorsione el patrón de drenaje natural.

#### II.5.4.3. Relación de Longitud (RL)

Se define como la relación entre las longitudes promedio de cauces de órdenes sucesivos.

$$R_L = \frac{L_{i+1}}{L_i}$$

Donde  $L_i$  es la longitud promedio de los cauces de orden  $i$ .

#### II.5.4.4. Relación de Áreas (RA)

Se define como la relación entre las área promedio que drenan a cauces de órdenes sucesivos.

$$R_A = \frac{A_{i+1}}{A_i}$$

Donde  $A_i$  es el área promedio que drena a los cauces de orden  $i$ .

#### II.5.4.5. Densidad de Drenaje (D)

La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total:

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

Donde  $\sum L_i$  es la longitud de todos los cauces y tributarios de la cuenca. Strahler (1952) encontró en Estados Unidos valores de  $D$  desde 0,2 Km/Km<sup>2</sup> para cuencas con drenaje pobre hasta 250 Km/Km<sup>2</sup> para cuencas muy bien drenadas.



# Capítulo III

## RELACIÓN PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA

### III.1. INTRODUCCIÓN

El corazón de la Hidrología Superficial es calcular la escorrentía que se va a generar si se produce una precipitación determinada. El tema es muy complejo y se plantean actuaciones diversas:

- **Un evento concreto o el proceso continuo:** A veces estudiamos qué caudales generará cierta precipitación, o bien queremos conocer el proceso de un modo continuo, por ejemplo, el funcionamiento de la cuenca a lo largo de un año.
- **Precipitaciones reales o supuestas:** Podemos desear calcular los caudales generados por unas precipitaciones reales o bien trabajamos con una *tormenta de diseño* para calcular el *hidrograma de diseño*. Si se va a construir una obra (canal, presa,...) debe hacerse sobre caudales teóricos que calculamos que se producirán por unas precipitaciones teóricas que se producirán una vez cada 500 años.

En el estudio de una cuenca real con datos reales es necesario utilizar un modelo en ordenador, en el que se introducen las características físicas de la cuenca. En otras ocasiones es posible abordar el problema manualmente.

### III.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Los métodos más usados para estimar el escurrimiento a partir de la relación precipitación – escorrentía son:

- Método racional
- Hidrograma Sintético (unitario)
- Número de curva
- Modelación matemática

#### III.2.1. Método racional

Recibe este nombre la primera aproximación, la más sencilla, para evaluar el caudal que producirá una precipitación.

La fórmula básica del método racional es:

$$Q_p = C \cdot i \cdot A_d$$

Dónde:

$Q_p$  = Caudal máximo expresado en m<sup>3</sup>/s

$C$  = Coeficiente de escurrimiento (o coeficiente de escorrentía)

$i$  = Intensidad de la precipitación en m/s en un período igual al tiempo de concentración  $t_c$

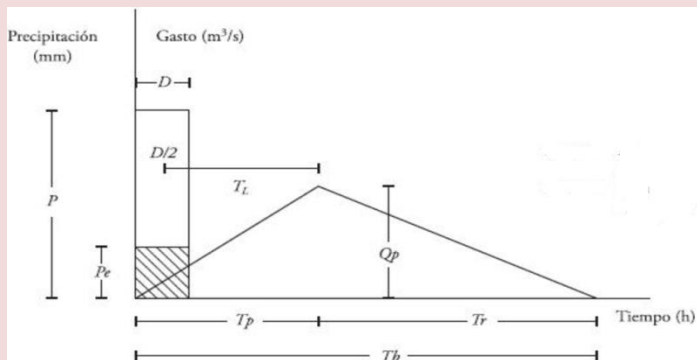
$A_d$  = Área de la cuenca hidrográfica en m<sup>2</sup>.

Esta fórmula empírica, por su simplicidad, es aun utilizada para el cálculo de alcantarillas, galerías de aguas pluviales, estructuras de drenaje de pequeñas áreas, a pesar de presentar algunos inconvenientes, superados por procedimientos de cálculo más complejos. También se usa en ingeniería de carreteras para el cálculo de caudales vertientes de la cuenca a la carretera, y así poder dimensionar las obras de drenaje necesarias, siempre que la cuenca vertiente tenga un tiempo de concentración no superior a 6 horas.

### III.2.2. Hidrograma sintético

Para tener una idea aproximada de la respuesta de una *cuenca pequeña* a unas *precipitaciones cortas y homogéneas*, podemos utilizar algunas fórmulas empíricas que, basándose en características físicas de la cuenca (superficie, pendiente media, longitud del cauce,...) proporcionan una idea del hidrograma resultante. Entre las numerosas aproximaciones que encontramos en la bibliografía, vamos a referir resumidamente la del S.C.S. (Soil Conservation Service) 1 que forma parte de la normativa del Ministerio de Obras Públicas (1990) en España para los estudios previos a la construcción de carreteras.

### III.2.2.1. Hidrograma Triangular del SCS



**Fig. N°18 Hidrograma Triangular**

En primer lugar simplifica la forma del hidrograma con la forma de un triángulo como se muestra en la figura anterior, lo que a pesar de su simplicidad, nos proporciona los parámetros fundamentales del hidrograma:

Siendo:

$(Q_p)$  = Caudal punta (Pico)

$(t_b)$  = Tiempo base

$(t_p)$  = Tiempo punta (Pico)

<p>Tiempo de la punta (horas):</p> $t_p = 0,5 \cdot D + 0,6 \cdot t_c$ <p>Tiempo base (horas):</p> $t_b = 2,67 \cdot t_p \quad (3)$ <p>Caudal de la punta (<math>m^3 / \text{seg.}</math>):</p> $Q_p = \frac{0,208 \cdot P \cdot A}{t_p} \quad (4)$	<p>Donde:</p> <p><math>t_c</math> = tiempo de concentración (horas)</p> <p><math>D</math> = Duración de la precipitación efectiva (horas)</p> <p><math>P</math> = precipitación efectiva (mm.)</p> <p><math>A</math> = superficie de la cuenca (<math>km^2</math>)</p>
---	--

Estas características se obtuvieron estudiando hidrogramas de crecida provocados por unas precipitaciones cortas y uniformes en numerosas cuencas.

### III.2.2.2. Hidrograma Adimensional del SCS

Se observó que al estudiar una gran cantidad de hidrogramas, si se representan tomando el caudal de la punta ( $Q_p$ ) como unidad de caudal y el tiempo al que se presenta la punta ( $t_p$ ) como unidad de tiempo, la mayoría de los hidrogramas de crecida tenían una forma similar a la de la (Fig. N°18) y cuyas coordenadas se reflejan en la tabla de la (Fig. N°19) Para convertir cualquier hidrograma a este tipo, habrá que dividir los caudales por  $Q_p$  y los tiempos por  $t_p$ . Por esto en el Hidrograma adimensional del SCS los caudales están como  $Q/Q_p$  y los tiempos como  $t/t_p$ . Inversamente, si disponemos de los datos de la punta del hidrograma (sus coordenadas:  $t_p$  y  $Q_p$ ), con la tabla adjunta podremos dibujar el hidrograma resultante en toda su extensión y con una forma similar a la que se puede esperar en una cuenca real, en lugar de un geométrico triángulo.

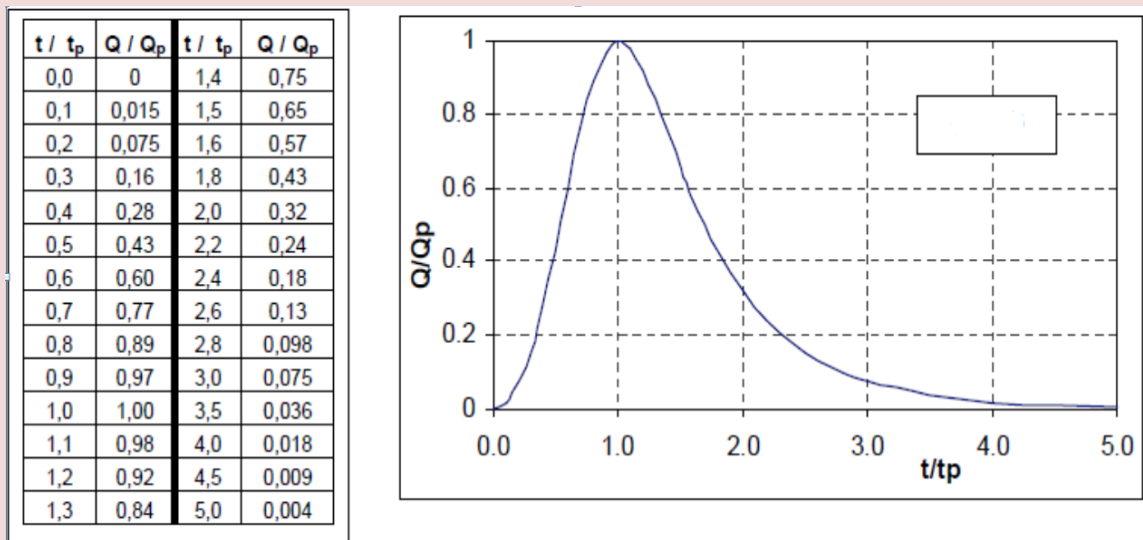


Fig. 19. Hidrograma SCS

Estas técnicas solamente son válidas para considerar los hidrogramas producidos por precipitaciones cortas y homogéneas. Para precipitaciones cuya intensidad varía a lo largo del hietograma considerado, es necesario utilizar el hidrograma unitario.

### III.2.2.3. Hidrograma Unitario

Se trata de un concepto fundamental al abordar el problema de calcular la escorrentía que producirán unas precipitaciones determinadas. Fue propuesto por Sherman en 1932.

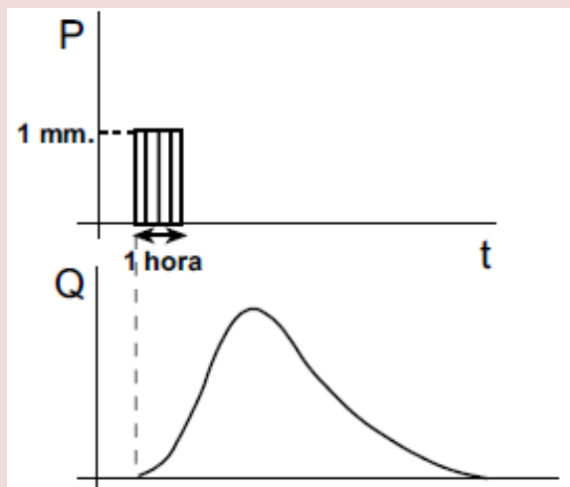


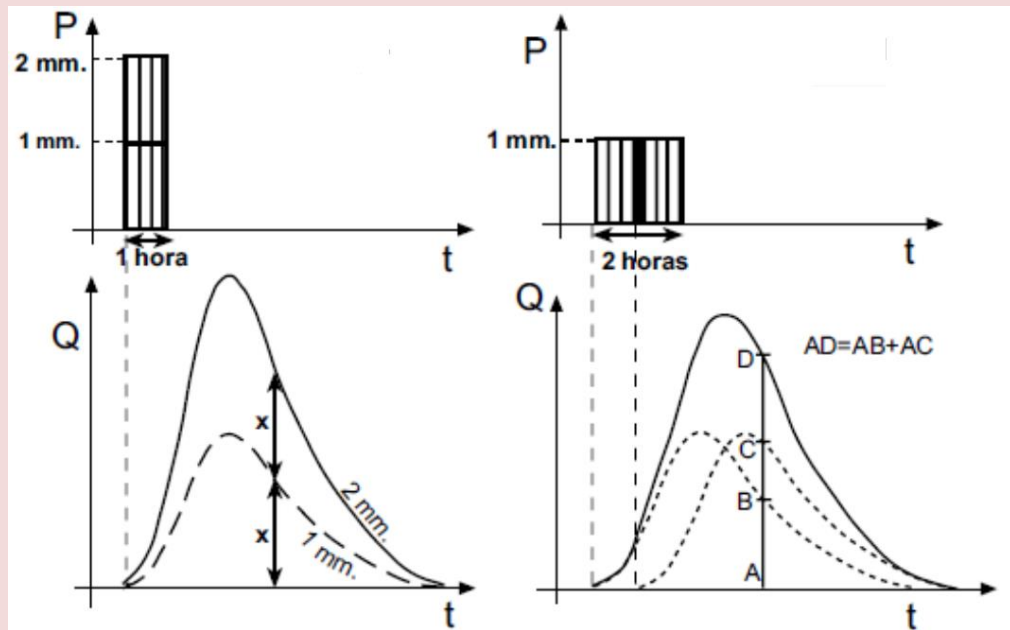
Fig. N°20. Hidrograma Unitario

*El Hidrograma Unitario de una cuenca es el Hidrograma de escorrentía directa que se produciría en la salida de la cuenca si sobre ella se produjera una **precipitación neta** unidad de una duración determinada (por ejemplo, 1 mm. durante 1 hora) (Fig. N° 20).*

Esa precipitación debe producirse con intensidad constante a lo largo del periodo considerado y repartida homogéneamente en toda la superficie de la cuenca.

También podríamos considerar el producido por una precipitación de 1 pulgada durante 2 horas, o cualesquiera otras unidades de altura de precipitación y de tiempo, aunque la definición clásica siempre habla de una precipitación **unidad**.

Si disponemos de ese hidrograma para una cuenca determinada, podremos construir el hidrograma producido por cualquier precipitación. Por ejemplo, si llueve 2 mm. durante 1 hora, bastará multiplicar por 2 las ordenadas de todos los puntos del hidrograma (Fig. N°21).



**Fig. N°21. Aplicación el Hidrograma Unitario**

Análogamente, si disponemos del Hidrograma unitario de esa cuenca y llueve 1 mm. durante 2 horas, bastará dibujar dos hidrogramas unitarios desplazados 1 hora en sentido horizontal y sumar las ordenadas de sus puntos (Fig. N°21)

Estas dos propiedades, expresadas en las (Fig. N°21) se conocen, respectivamente, como *propiedad de afinidad* y *propiedad de aditividad* del hidrograma unitario.

#### **III.2.2.4. Cálculo de la Precipitación Neta o Efectiva**

Aunque dispongamos del hidrograma unitario de una cuenca, no podremos evaluar el hidrograma que producirá una precipitación determinada si primero no sabemos separar qué parte de esa precipitación va a generar escorrentía directa (P neta o efectiva). El resto de la precipitación se ha infiltrado (una pequeña parte puede haber quedado retenida en depresiones superficiales).

El cálculo de la P efectiva puede abordarse a partir del estudio de la infiltración: medidas, ecuaciones y modelos que reflejan la capacidad de infiltración y su evolución con el tiempo.

Más sencilla es la evaluación del S.C.S., que, mediante tablas y ecuaciones sencillas, evalúa el porcentaje de precipitaciones que produce escorrentía directa, en función de los siguientes factores: (1) Tipo de suelo; distingue sólo 4 tipos. (2). Utilización de la tierra: pastizal, cultivo, bosque, urbanizado,...(3) Pendiente (4) Humedad previa del suelo, basada en las precipitaciones producidas durante los 5 días anteriores (ver "Cálculo de la Precipitación Eficaz con el método del S.C.S." en la sección "Prácticas").

### **III.2.3. Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos**

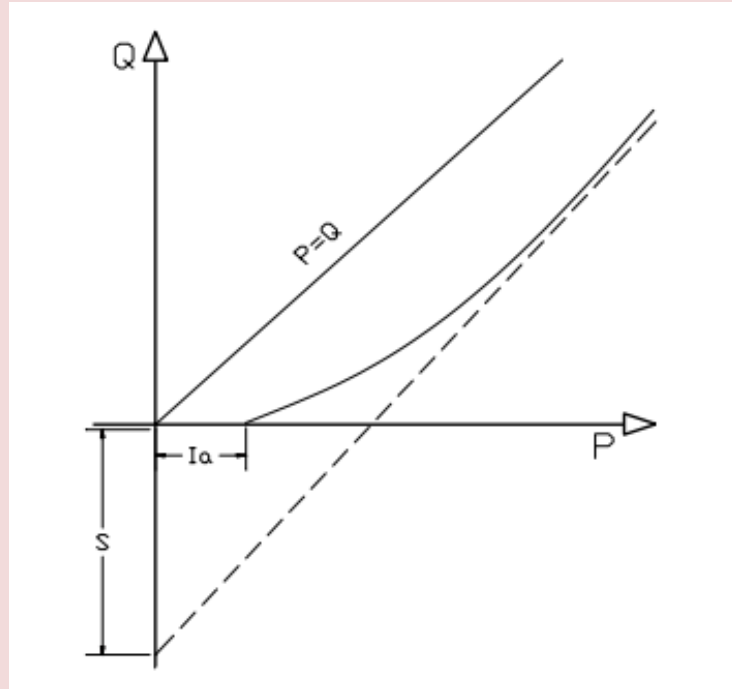
El procedimiento más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región es el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972). Este método se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal (5). A partir de la representación de la precipitación (P) y precipitación efectiva (Pe) se obtuvo una familia de curvas que fueron estandarizadas para definir un número adimensional de curvas NC, que varía de 1 a 100 según sea el grado de escurrimiento directo.

Este método consta de dos partes. En la primera de ellas se hace una estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación - escurrimiento directo, en la segunda se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta.

La estimación del escurrimiento correspondiente a una lluvia, se hace con el siguiente procedimiento:

Los datos de lluvia más generalmente disponibles son los totales medidos en pluviómetros y para tales datos se ha desarrollado la relación lluvia - escorrentía. Esos datos son los totales de una o más tormentas que ocurren en un día del calendario, y nada se sabe acerca de su distribución en el tiempo, por eso es que la relación excluye al tiempo como la variable explícita. Relacionando el escurrimiento con la lluvia se obtiene generalmente una relación como la que indica la (Fig. N°22):





**Fig. N°22. Relación Precipitación - Escorrentía**

Para precipitaciones (P) menores que  $I_a$ , no tiene lugar el escurrimiento superficial (Q).  $I_a$  consiste principalmente en pérdidas por intercepción, almacenamiento en depresiones e infiltración, antes de que se produzca el escurrimiento.

Para cantidad de lluvia en aumento, la curva Q en relación con P se aproxima asintóticamente a una línea recta paralela (S) se llama retención potencial máxima, que es la máxima cantidad de lluvia que la cuenca puede absorber. Como hay muchas curvas que cumplen la condición de pasar por el punto  $(I_a, Q)$  y aproximarse asintóticamente a  $Q = P - S$ , se necesita definir otra condición para establecer la forma de la curva.

Esto se hace estableciendo que la relación entre la retención real  $(P - I_a - Q)$ , y la retención potencial máxima (S) es igual a la relación entre la escorrentía real (Q) y la escorrentía potencial máxima  $(P - I_a)$  :

$$\frac{P - I_a - Q}{S} = \frac{Q}{P - I_a}$$

La experiencia práctica ha demostrado que  $I_a$  es aproximadamente el 20% de la retención potencial máxima, así  $I_a = 0.2 S$ , por lo que la ecuación de escurrimiento puede escribirse como:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

El valor de  $S$  (en pulgadas) se relaciona con el número de curva de escurrimiento (CN) por la definición:

$$CN = \frac{1000}{10 + S}$$

de lo cual se deduce que para zonas pavimentadas  $S$  será igual 0 y  $CN = 100$ , mientras que las condiciones en que no se produce escurrimiento superficial  $S$  se hace infinito y  $CN = 0$ .

Para determinar el volumen de escurrimiento, debe hacerse una estimación del valor de  $CN$ , el cual depende de características de la cuenca tales como uso de la tierra, condiciones del suelo y condiciones de humedad de la cuenca en el momento de ocurrir, la precipitación.

Se conocen y aceptan tres clases de condiciones de humedad antecedentes para una cuenca, según el SCS, como se muestra en (Cuadro N°2).

Clases de condiciones de humedad antecedentes	Lluvia total de los 5 días anteriores (milímetros)	
	Estación sin desarrollo vegetativo	Estación de crecimiento vegetativo
I	menos de 12,7mm	menos de 35,6mm
II	12,7 a 27,9mm	35,6 a 53,3mm
III	más de 27mm	más de 53,3mm

**Cuadro N°2. Condición de Humedad Antecedente para una Cuenca**

Para la influencia de las características de la cuenca (uso de la tierra, condiciones del suelo) en el valor de CN, se utiliza la (Tabla N°1).

En dicha Tabla, además de la utilización de la tierra, cubierta vegetal y práctica de cultivo se hace una distinción entre condiciones hidrológicas deficientes, regulares y buenas y para cuatro grupos hidrológicos de suelos. Las condiciones hidrológicas se determinan en primer lugar por la densidad de la vegetación: praderas naturales muy pastadas se clasifican por ejemplo como “deficientes”; praderas permanentes no pastadas se clasifican como “buenas”.

Los grupos hidrológicos de suelo se clasifican según su capacidad para transmitir agua (infiltración): el grupo A tiene una intensidad alta de transmisión de agua, el grupo B moderada, el C lenta, y el D muy lenta.

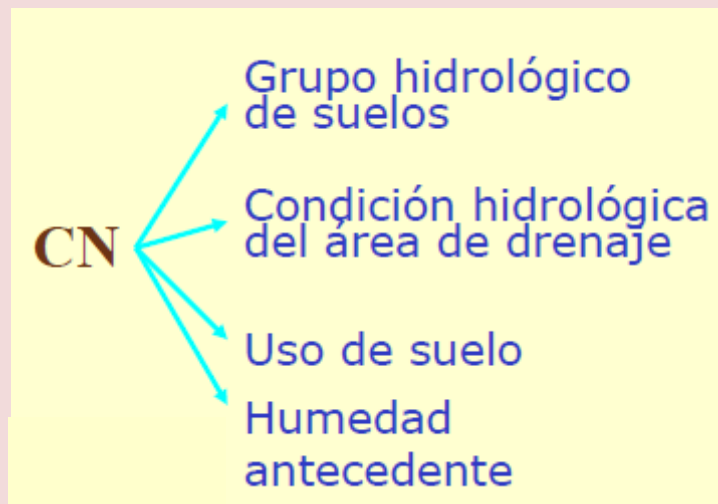
Con ayuda de la (Tabla N°1) y de datos experimentales de la cuenca, el número de curva para humedad precedente Clase II puede estimarse para un punto particular o para toda la cuenca de drenaje y así, utilizando la figura 1 se obtiene la cantidad de escurrimiento correspondiente a una cantidad de lluvia dada.

Luego, con la utilización de la (Tabla N°2) pueden transformarse los valores de CN de humedad precedente del suelo de Clase II a humedad precedente de suelo de Clase I o III, para los casos en que ello resulte necesario.

**Tabla N°1** Números de curva CN de escorrentía para complejos hidrológicos suelo - cubierta (para las condiciones de una cuenca II e  $I_a = 0,25 S$  (según SCS de los EEUU.1964)

Uso del suelo	Cobertura		Grupo de suelos			
	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
			Curva numérica			
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Camino de tierra		Buena	72	82	87	89
Camino pavimentados		Buena	74	84	90	92

**Valores de CN para estimar Q bajo diferentes complejos suelo-manejo y cobertura (CN<sub>II</sub>, I<sub>a</sub>=0.2S)**



**Tabla N° 2:** Número de curva de escorrentía (CN), conversiones y constantes según el SCS de los EEUU, 1964).

CN para la condición II	CN para AMC		Valores de S (pul.)	La curva empieza donde P (pul.)
	I	II		
100	100	100	0.000	0.00
98	94	99	0.204	0.04
96	89	99	0.417	0.08
94	85	98	0.638	0.13
92	81	97	0.870	0.17
90	78	96	1.11	0.22
88	75	95	1.36	0.27
86	72	94	1.63	0.33
84	68	93	1.90	0.38
82	66	92	2.20	0.44
80	63	91	2.50	0.50
78	60	90	2.82	0.56
76	58	89	3.16	0.63
74	55	88	3.51	0.70
72	53	86	3.89	0.78
70	51	85	4.28	0.86
68	48	84	4.70	0.94
66	46	82	5.15	1.03
64	44	81	5.62	1.12
62	42	79	6.16	1.23
60	40	78	6.67	1.33
58	38	76	7.21	1.45
56	36	75	7.86	1.57
54	34	73	8.52	1.70
52	32	71	9.23	1.85
50	31	70	10.0	2.00
48	29	68	10.8	2.16
46	27	66	11.7	2.34
44	25	64	12.7	2.54
42	24	62	13.8	2.76
40	22	60	15.0	3.00
38	21	58	16.3	3.26
36	19	56	17.8	3.56
34	18	54	19.4	3.88
32	16	52	21.2	4.24
30	15	50	23.3	4.66
25	12	43	30.0	6.00
20	9	37	40.0	8.00
15	6	30	56.7	11.34
10	4	22	90.0	18.00
5	2	13	190.0	38.00
0	0	0	Infinito	Infinito

## Grupos hidrológicos de suelos

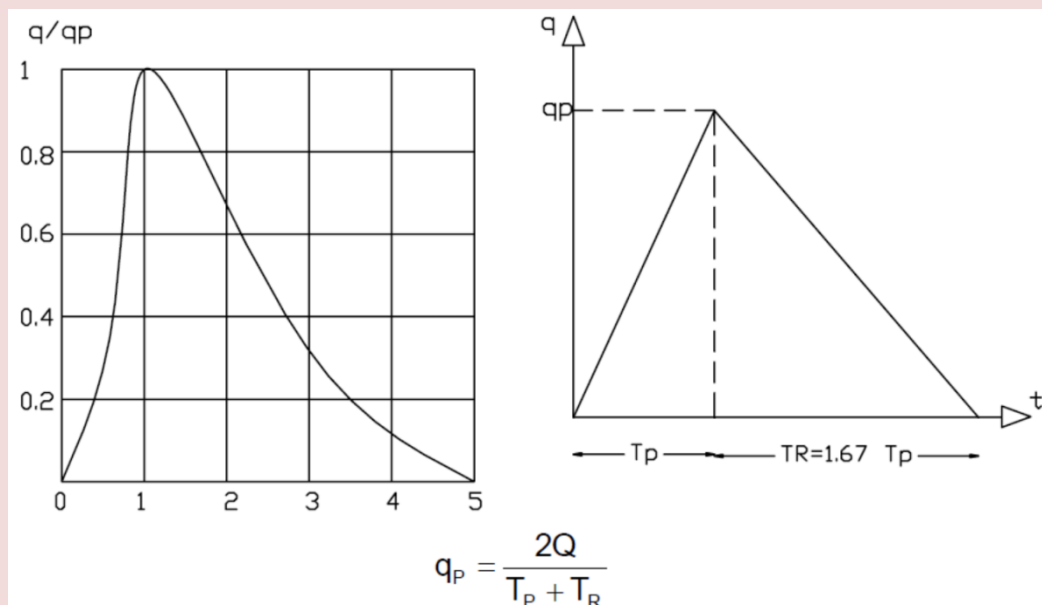
Grupo de suelos	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil. Infiltración básica 8-12 mm hr <sup>-1</sup> .
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando húmedo. Ejemplos: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm hr <sup>-1</sup> .
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Son suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm hr <sup>-1</sup> .
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menor 1 mm hr <sup>-1</sup> .

## Condición hidrológica por uso de suelo

Uso del suelo	Condición hidrológica
Pastos naturales	Pastos en condiciones malas, dispersos, fuertemente pastoreados con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal. Pastos en condiciones regulares, moderadamente pastoreados con la mitad o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. Pastos en buenas condiciones, ligeramente pastoreados y con mas de las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal.
Áreas boscosas	Áreas en condiciones malas, tienen árboles dispersos y fuertemente pastoreados sin crecimiento rastrero. Áreas de condiciones regulares, son moderadamente pastoreadas y con algo de crecimiento. Áreas buenas, están densamente pobladas y sin pastorear.
Pastizales mejorados	Pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo. Son considerados como buenas condiciones hidrológicas.
Rotación de praderas	Praderas densas, moderadamente pastoreadas, usadas en una bien planeada rotación de cultivos y praderas son considerados como que están en buenas condiciones hidrológicas. Áreas con material disperso, sobrepastoreado son considerados como malas condiciones hidrológicas.
Cultivos	Condiciones hidrológicas buenas se refieren a cultivos los cuales forman parte de una buena rotación de cultivos (cultivos de escarda, praderas, cultivos tupidos). Condiciones hidrológicas malas se refiere a cultivos manejados basándose en monocultivos.

Para la distribución en el tiempo de la escorrentía, se procede así: se hace uso del hidrograma unitario adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos cuya forma está predeterminada. La escala de tiempo del hidrograma se expresa en unidades del período de ascenso ( $T_p$ ) del mismo y los caudales de escurrimiento se expresan en unidades del caudal de escurrimiento de punta ( $q_p$ ).

Para convertir las ordenadas adimensionales del hidrograma en valores reales, debe conocerse el período de elevación ( $T_p$ ) y el caudal pico o de punta ( $q_p$ ). Este último se obtiene utilizando la relación obtenida del hidrograma triangular sintético, como se muestra en el paso siguiente:



**Fig. 23. Hidrograma Triangular Estilizado de la SCS**

Siendo:

$q_p$  = Caudal pico o de punta.

$Q$  = Volumen de escurrimiento directo (mm)

$T_p$  = Período de elevación o tiempo hasta el caudal pico.

$T_R$  = Tiempo desde el caudal pico hasta el final del escurrimiento directo - recesión.

Analizando un gran número de hidrogramas se encontró que en general se verifica:

$$\mathbf{T_R = 1,67 T_p}$$

De manera que si se lo introduce en la ecuación anterior, queda:

$$q_p = 0.75 \frac{Q}{T_p}$$

Introduciendo el área de aporte en (Km<sup>2</sup>), de manera de llevar el valor puntual a un valor representativo para toda la cuenca, el escurrimiento directo en mm, el tiempo de elevación en horas, el caudal de punta queda expresado en m<sup>3</sup>/s, de la siguiente forma:

$$q_p = 0,208 \frac{A \times Q}{T_p} (m^3 / s)$$

Dentro, de esta metodología, se toma normalmente como período de tiempo unitario:

$$t_u = \frac{T_p}{4}$$

El periodo de elevación puede estimarse a partir del tiempo de concentración, según la relación empírica

$$T_p = 0.7 \times T_c$$

Mientras que el tiempo de concentración se propone calcularlo por la fórmula de **Kirpich desarrollada para cuencas montañosas:**

$$T_c(\text{horas}) = \left[ \frac{11.9 \times L^3}{H} \right]^{0.385}$$

Siendo:

T<sub>c</sub>= Tiempo de Concentración, en horas.

L = longitud del curso de agua más largo, en millas.

H = diferencia de elevación, en pies.



Con todos los valores ya calculados, se gráfica finalmente el hidrograma de escurrimiento directo producido por la tormenta dato, quedando una representación como la siguiente:

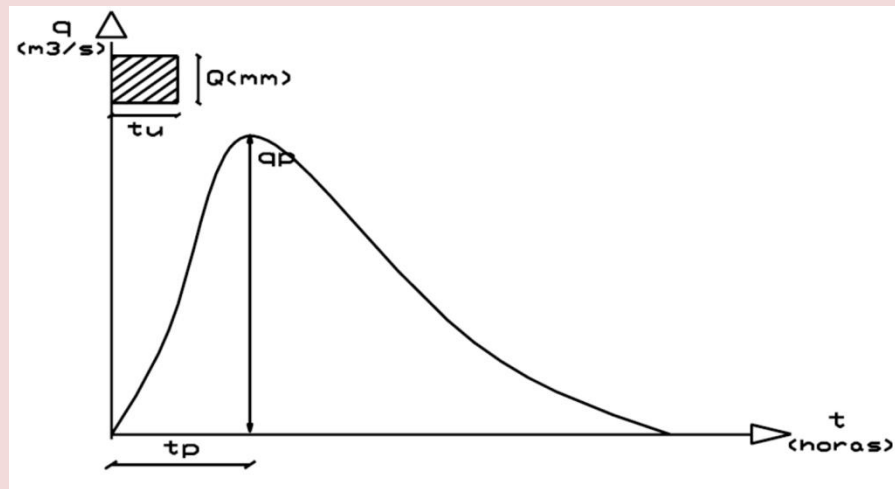


Fig. N°24. Hidrograma de Crecida

#### III.2.4. Modelos

El proceso completo de calcular la escorrentía que producirá una precipitación determinada es mucho más complejo que los conceptos básicos esbozados aquí.

Como se indicaba en la introducción, para afrontar este tipo de problemas en casos reales, hemos de acudir a modelos de ordenador. Básicamente, hay dos familias de modelos que hacen la tarea de calcular el hidrograma generado en una cuenca:

- a) *Modelos que simulan un suceso puntual.* Por ejemplo el HEC-1, HEC-HMS (del Hydrologic Engineering Center), TR-20 (del antiguo Soil Conservation Service, hoy NRCS).
- b) *Modelos de simulación continua,* por ejemplo el HPFS (elaborado por la EPA, Environmental Protection Agency).

Los primeros necesitan datos de la precipitación de interés, más las características físicas de las diversas subcuencas. Los segundos, además de necesitar la serie continua de precipitaciones, deben computar la evapotranspiración, fusión de la nieve, flujo subsuperficial en la zona no saturada, etc.

Todos estos modelos se pueden conseguir gratuitamente en Internet de los organismos citados.

Existen programas comerciales que implementan los cálculos de los modelos citados y cuya utilización es relativamente más simple.

### **Simulación Computacional**

Por su parte Jones (1997), dice que los modelos de simulación han sido llevados con el tiempo a los computadores y éstos se han transformado en modelos determinísticos. Los paquetes computacionales y de computadoras portátiles, permiten efectuar pronósticos en el estudio de los fenómenos hidrológicos, sobre el flujo de los ríos y la apertura de los embalses, y no solamente desde la oficina, sino también desde otros sitios en terreno, y en tiempo real. Estos modelos procuran simular procesos del mundo real, a niveles razonables de exactitud, y son generalmente capaces de simular acontecimientos no sólo de una tormenta, sino también de flujos de hidrogramas continuos.

Bedient y Huber (2002), describen que los modelos de simulación hidrológica pueden ser clasificados según una gran variedad de características, como se muestra en la Tabla N°3. Para el análisis de cuencas, las principales categorías tienen como interés modelos integrados versus distribuidos, y estocásticos versus determinísticos.

**Tabla N°3. Modelos hidrológicos.**

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Ejemplo del modelo</b>
Integrado	Snyder o Clark Hidrograma unitario
Distribuido	Onda cinemática
Eventuales	HEC-1, HEC-HMS, SWMM, SCS TR-20
Continuos	Modelo Stanford, SWMM, HSPF, STORM
Basados físicamente	HEC-1, HEC-HMS, SWMM, HSPF
Estocásticos	Flujo sintético de la corriente
Numéricos	Modelos de onda cinemática o dinámica
Analíticos	Método racional, Nash IUH

(Fuente: Bedient y Huber 2002)

Una ventaja principal de los modelos de simulación es su comprensión y la organización de los datos requeridos como entrada, para satisfacer los algoritmos matemáticos que

comprenden en conjunto el modelo del sistema. Este ejercicio, a menudo puede guiar la recolección de los datos adicionales o directos que mejoran la formulación matemática, para una mejor representación de la cuenca. Otra ventaja es la gran cantidad de alternativas y esquemas, pues el desarrollo o el control de las crecidas pueden ser rápidamente probadas y comparadas con el modelo de simulación, en algunas ocasiones.

La limitación principal de los modelos de simulación, es la incapacidad para calibrarse correctamente y verificar aplicaciones en las cuales los datos de entrada faltan. Una sobre confianza en los modelos sofisticados de computadora, que fallaron en operación entre 1970 y 1981, ha conducido a un acercamiento más escéptico para modelar en estos últimos años. La norma corriente da por supuesto que, debería ser usado el modelo más simple que satisfactoriamente describa el sistema para los datos de entrada dados. La exactitud del modelo es mayormente determinada por los datos de entrada y las observaciones disponibles de salida (Bedient y Huber, 2002).

A pesar de sus limitaciones, los modelos de simulación todavía proveen el acercamiento más lógico y científicamente adelantado para entender el comportamiento hidrológico de las cuencas y de los sistemas de recursos de agua. El desarrollo de modelos y sus aplicaciones, han hecho una nueva época en la ciencia de la hidrología y han conducido a muchos nuevos diseños y políticas operativas nunca antes realizadas o experimentadas. Hace casi 25 años, varias revisiones de excelentes modelos de hidrología han sido publicadas, incluyendo a Kibler (1982), Stephenson y Prados (1986), Maidment (1993), De Vries y Hromadka (1993), Hoggan (1997), James y James (1998), y McCuen (1998).

# **Capítulo IV**

## **MODELOS HIDROLÓGICOS DE PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA**

## IV.- MODELOS HIDROLÓGICOS DE PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA

### IV.1. INTRODUCCIÓN

Ciertas aplicaciones de la ingeniería hidrológica pueden requerir análisis complejos que involucran variaciones temporales y-o espaciales de precipitación, abstracciones hidrológicas y escurrimiento.

Típicamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora digital. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación de cuencas. La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo, por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos ya sea de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real.

**“Un modelo de cuenca (cuenca de río) es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento”.** En principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados). En la práctica, sin embargo, las aplicaciones de la modelación son generalmente confinadas al análisis de cuencas para el cuales la descripción de variaciones espaciales temporales y-o variaciones espaciales de precipitación está garantizada. Usualmente éste es el caso para cuencas de tamaño medio y grande.

Una aplicación típica de la modelación de cuencas consiste en lo siguiente: (1) selección del tipo de modelo, (2) formulación del modelo y construcción, (3) prueba del modelo, y (4) aplicación del modelo. Los modelos de cuencas comprensivos incluyen todas las fases relevantes del ciclo hidrológico, y, como tales, están compuestos de una o más técnicas para cada fase. En la práctica, el ingeniero hidrológico debería (1) seleccionar un modelo disponible, con conocimiento de su estructura, operación, capacidades, y limitaciones, o (2) desarrollar un modelo o modificar uno ya existente, basado en necesidades percibidas, disponibilidad de datos, y restricciones presupuestarias.

La mayoría de las aplicaciones rutinarias son del primer tipo, en cuyo caso es necesario familiarizarse con las características del modelo y su composición. Los modelos probados tienen manuales que describen la interacción entre el usuario y el modelo. Además, algunos modelos pueden tener manuales de referencia que proveen información adicional sobre la estructura interna del modelo.

Para investigación y proyectos de desarrollo, la construcción de un nuevo modelo podría estar garantizada. En este caso, el ingeniero hidrólogo tiene una amplia variedad de métodos y técnicas, pero los costos del desarrollo de un modelo son comparativamente más altos.

## **IV.2. CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE CUENCA**

### **IV.2.1. Modelos Materiales Versus Modelos Formales**

Los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías generales: (1) material y (2) formal.

Un modelo material es una representación física del prototipo, más simple en estructura pero con propiedades que reúnen las del prototipo. Los ejemplos de modelos de cuencas materiales son simuladores de lluvia y cuencas experimentales.

Un modelo formal es una abstracción matemática de una situación idealizada que preserva las propiedades estructurales importantes del prototipo. Ya que los modelos formales son invariablemente matemáticos en naturaleza, es costumbre referirse a ellos como **modelos matemáticos**. Los modelos matemáticos que se usan con la ayuda de una computadora se denominan modelos computacionales. Muchos modelos computacionales de cuenca han sido desarrollados a lo largo de las últimas tres décadas.

Los modelos materiales de cuenca son caros y de aplicabilidad limitada. Por el contrario, los modelos formales están rápidamente disponibles, son altamente flexibles, y comparativamente económicos para utilizar. De allí que no resulte una sorpresa que los modelos formales (matemáticos) sean la herramienta preferida en la solución de los problemas del modelado de cuencas.

#### IV.2.2. Tipos de Modelos Matemáticos de Cuencas

Un modelo matemático de cuenca consiste en varios componentes, cada uno describe cierta fase o fases del ciclo hidrológico. Un modelo matemático puede ser de tres tipos: (1) teórico, (2) conceptual, o (3) empírico. Los modelos teóricos y empíricos son exactamente opuestos en significado, con modelos conceptuales que se ubican entre ellos. En suma, un modelo matemático puede ser determinístico o probabilístico, lineal o no lineal, invariable en el tiempo o variable en el tiempo, global o distribuido, continuo o discreto, analítico o numérico, evento guiado o proceso continuo.

En la práctica del modelado de cuenca, cuatro tipos generales de modelos matemáticos se reconocen comúnmente: (1) **determinísticos**, (2) **probabilísticos**, (3) **conceptuales**, y (4) **paramétricos**. Los modelos determinísticos son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.

**Un modelo determinístico**, es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Un modelo determinístico implica una relación causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones. Idealmente, un modelo determinístico debería proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. En la práctica, sin embargo, la aplicación de modelos determinísticos está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo o del modelador de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficientemente pequeños.

**Los modelos probabilísticos**, son exactamente lo opuesto en significado a los modelos determinísticos. Un modelo probabilístico se formula siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (1) estadísticos, y (2) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales - por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requieren invariablemente el uso de datos; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos.

**Los modelos conceptuales**, son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos.

**Los modelos paramétricos**, (esto es: empírico, o caja negra) son los más simples de todas las propuestas de modelado. Como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está restringida al rango de datos utilizados en la determinación de los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros.

Los ejemplos de tipos de modelos matemáticos de cuencas y los componentes del modelo pueden hallarse en una variedad de aplicaciones hidrológicas. Por ejemplo, la técnica del ruteo de onda cinemática es determinística, fundada en principios básicos de conservación de masa y momentum. Una vez que los parámetros de la curva de valor cinemático han sido determinados, las soluciones analíticas de las ondas cinemáticas llevan a soluciones predecibles.

Las soluciones numéricas, sin embargo, están sujetas a la difusión y dispersión causadas por la naturaleza finita de la malla. De allí que, evaluaciones cuidadosas son necesarias para asegurarse que todos los procesos relevantes estén siendo cuantificados apropiadamente.

El método de Gumbel para el análisis de frecuencia de inundación (creciente) es un ejemplo típico del uso de los métodos probabilísticos en hidrología. El método de



Gumbel es estadístico, ya que los parámetros de la distribución de la frecuencia son evaluados a partir de los datos medidos. Los métodos estocásticos (por ejemplo la simulación Monte Carlo) ha sido utilizada primeramente en la generación sintética de series hidrológicas temporales, tales como flujos diarios de corriente de cuencas de tamaño medio, las cuales muestran componentes sustanciales del azar.

La cascada de reservorios lineales es un ejemplo típico de modelo conceptual. En este caso, los procesos físicos de la concentración del escurrimiento y la difusión del mismo están siendo simulados en el medio por la difusión inherente en la solución matemática de un reservorio lineal. Dos o más reservorios en serie producen suficiente difusión de modo que la traslación (concentración del escurrimiento) y el almacenaje (difusión del escurrimiento) son simuladas efectivamente. Como en cualquier modelo conceptual, los datos de lluvia-escurrimiento medidos son necesarios para determinar los valores apropiados de los parámetros del modelo.

El análisis regional es un ejemplo típico de proyecto paramétrico para el modelado de cuencas hidrológicas. En este caso, las técnicas de regresión estadística son utilizadas para desarrollar ecuaciones predictivas que tengan aplicabilidad regional. Los parámetros de la ecuación de regresión tienen significancia regional, por ello, la extrapolación más allá de la región de definición no está garantizada.

#### **IV.2.3. Modelos Lineales Versus Modelos no Lineales**

La elección entre modelos lineales y no lineales tiene implicaciones prácticas. En la naturaleza, los procesos físicos son generalmente no lineales, en el modelado, sin embargo, los modelos lineales están sustituidos frecuentemente por procesos no lineales en interés de la propiedad o aptitud matemática. La simplicidad de los modelos lineales es una ventaja definida, aunque se logra a costo de la pérdida de detalle. Los modelos no lineales son más complejos pero generalmente mejores para proveer detalles en la simulación de los procesos físicos.

Un modelo lineal es formulado en términos de ecuaciones lineales y procesos, por el contrario, un modelo no lineal está descrito por ecuaciones y procesos no lineales. Un

ejemplo típico de un modelo lineal es el clásico hidrograma unitario. Ejemplos de ecuaciones no lineales utilizadas para modelar los procesos hidrológicos hay muchos, por ejemplo, las técnicas de regresión no lineal utilizadas en el análisis regional.

La cascada de reservorios lineales es otro ejemplo del uso de modelos lineales en la práctica del modelado hidrológico. Ya que el modelo es conceptual, sus parámetros deben ser determinados por calibración (utilizando datos de lluvia-escorrentía) antes de intentar utilizarlo en un modo predictivo. Los parámetros son constantes con lo cual el modelo no garantiza la extrapolación en regiones que no se usaron para la calibración. En la práctica, es necesario calibrar el modelo conceptual para cada uno de los niveles de flujo (esto es: bajo, medio, alto) y usar los grupos de parámetros calibrados en concordancia.

Los modelos determinísticos pueden ser complejos en sí mismos. Las ecuaciones diferenciales parciales pueden ser lineales o casi lineales, dependiendo de que los coeficientes de varios términos se asuman como constantes o variables. Los modelos lineales tienen parámetros constantes, por el contrario, los modelos casi lineales tienen parámetros variables. Donde la simplicidad está en riesgo, se justifica el uso de parámetros constantes-por ejemplo, el parámetro constante del método de propagación de Muskingum-Cunge.

Para mayor detalle en la simulación de un amplio rango de flujos, un modelo de parámetro variable es la elección lógica, esto es: el parámetro variable del método de propagación Muskingum- Cunge.

#### **IV.2.4. Modelos de Tiempo Invariable versus Modelos de Tiempo Variable**

En los modelos de tiempo invariable, el parámetro o parámetros permanecen constantes en el tiempo. Por el contrario, en los modelos de tiempo variable, los parámetros varían. Un ejemplo típico es aquel del modelo conceptual de un reservorio lineal. Un modelo de tiempo invariable es  $\mathbf{S} = \mathbf{K} \times \mathbf{O}$  , mientras que un modelo de tiempo variable es  $\mathbf{S} = \mathbf{K}(t) \times \mathbf{O}$  , en el cual la constante  $\mathbf{K}$  de almacenaje del reservorio

es una función de tiempo. En la práctica, la mayoría de las aplicaciones han sido restringidas a modelos de tiempo invariable.

#### **IV.2.5. Modelos Globales (no distribuido) versus Modelos Distribuidos**

El término modelo de parámetro global -en forma corta modelos globales- es utilizado para referirse a un modelo en el cual los parámetros no varían espacialmente dentro de la cuenca. De allí que la respuesta de la cuenca es evaluada sólo a la salida, sin tener en cuenta explícitamente la respuesta de las subcuencas individuales. Un ejemplo típico de un modelo de parámetro global es el hidrograma unitario. El término modelo de parámetro distribuido - en forma corta, modelo distribuido - es utilizado para referirse a un modelo en el cual se permite que los parámetros varíen espacialmente dentro de la cuenca. Esto permite el cálculo no sólo de la respuesta de toda la cuenca sino también la respuesta de las subcuencas individuales. El mayor detalle con el que pueden hacerse las simulaciones en un modelo distribuido rinde mejor computacionalmente que un modelo global.

Esto permite el modelado de características especiales tales como abstracciones de lluvia e hidrológicas que varían espacialmente. Sin embargo, para que los resultados del modelado distribuido sean significativos, la calidad y la cantidad de datos disponibles deben ser proporcionados con gran nivel de detalle.

Los conceptos del modelado global y del distribuido, aunque opuestos en significado, no son necesariamente exclusivos. Los modelos de cuenca globales pueden ser utilizados como componentes de modelos distribuidos de cuencas. En una aplicación típica, un modelo global (esto es: el hidrograma unitario) es utilizado para generación de hidrogramas de subcuencas individuales. Subsecuentemente, estos hidrogramas son combinados y guiados a través de una red de canales de corriente y reservorios. Ya que los parámetros varían de subcuenca a subcuenca y los hidrogramas pueden ser evaluados en cualquier locación deseada dentro de la red de canal, el modelo de la red retiene esencialmente una estructura distribuida.

#### **IV.2.6. Modelos Continuos versus Modelos Discretos**

Los modelos continuos y los discretos son opuestos en significado. Matemáticamente, una función continua es la que posee derivada en cualquier punto de su dominio. Por el contrario, una función discreta carece de esta propiedad. Ejemplos del uso de funciones discretas y continuas son comunes en la ingeniería hidrológica. Por ejemplo, un hidrograma de corriente es continuo, pero un hietograma de lluvia es discreto. El modelado, el término continuo es utilizado para referirse a modelos cuyas soluciones pueden ser obtenidas en cualquier punto. En los modelos discretos, sin embargo, las soluciones pueden ser obtenidas sólo en ciertos puntos predeterminados.

Un ejemplo típico de la diferencia entre modelos continuos y discretos es proporcionado por la teoría del reservorio. La ecuación diferencial de almacenaje es una ecuación diferencial ordinaria, y de allí que una solución continua puede obtenerse por medios analíticos. La misma ecuación, sin embargo, puede ser discernible en el plano  $xt$  y resuelta por un método tal como la indicación de almacenaje usando procedimientos numéricos. En general, las funciones descriptas analíticamente llevan a un modelado continuo. Por el contrario, las funciones de forma arbitraria son mejor manejadas con modelos discretos.

#### **IV.2.7. Modelos analíticos versus modelos numéricos**

La diferencia entre modelos analíticos y modelos numéricos es casi similar a la que existe entre modelos discretos y modelos continuos. Las funciones y modelos continuos pueden usualmente ser resueltos por medios analíticos, las funciones discretas y los modelos llevan a solucionarlos utilizando procedimientos numéricos. Una solución analítica utiliza las herramientas de la matemática clásica- por ejemplo, la teoría de la perturbación, transformaciones de Laplace, y así sucesivamente. Una solución numérica utiliza diferencias finitas, elementos finitos, el método de las características, o cualquier otro método basado en el discernimiento del dominio de la solución.

En general, las soluciones analíticas pueden ser obtenidas sólo por problemas altamente simplificados, particularmente aquéllos para los cuales las condiciones iniciales y de borde pueden ser expresadas en forma analítica. Los modelos numéricos se adaptan mejor para las aplicaciones reales, para las cuales las condiciones iniciales y de borde pueden ser especificadas arbitrariamente.

Los modelos numéricos, esquemas, y algoritmos son frecuentemente utilizados como parte integral de modelos computacionales que simulan todas las fases relevantes del ciclo hidrológico.

Dado el amplio uso de las computadoras, parece cierto que los modelos numéricos continuarán jugando un rol importante en la práctica del modelado de cuencas.

#### **IV.2.8. Modelos de Eventos Aislados versus Modelos de Procesos Continuos**

Los modelos de cuenca pueden ser (1) de eventos aislados o (2) proceso continuo. Como sus nombres lo implican, los modelos de eventos aislados son de corto plazo, diseñados para simular eventos individuales de lluvia-escorrentamiento. Su énfasis está en la filtración y en el escurrimiento de superficie, su objetivo es la evaluación del escurrimiento directo. Los modelos de evento son aplicables para el cálculo de flujo de inundación, particularmente en los casos donde el escurrimiento directo es el mayor contribuyente al escurrimiento total. Típicamente, los modelos de evento no tienen en cuenta la recuperación de humedad entre eventos de tormenta y, por ello, no se ajustan para la simulación de flujos de tiempo seco (esto es: diariamente).

Distinto de los modelos de evento, los modelos de procesos continuos toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo el escurrimiento directo (flujo de superficie) y el escurrimiento indirecto (flujo subterráneo e interflujo). Los modelos de proceso continuo se focalizan en la evapotranspiración y en otras abstracciones hidrológicas de largo plazo responsables del valor de recuperación de humedad durante los períodos en que no hay precipitación. El objetivo de los modelos de proceso continuo es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca. Los modelos de proceso continuo se adaptan a la simulación de flujos diarios, mensuales o

estacionales, usualmente para el volumen a largo plazo del escurrimiento y estimaciones de la producción de agua.

### **IV.3. COMPONENTES DEL MODELO**

Los componentes del modelo de cuenca son: (1) precipitación, (2) abstracción hidrológica, y (3) escurrimiento. Usualmente la precipitación es el dato de entrada al modelo, las abstracciones hidrológicas son determinadas por las propiedades de la cuenca, y el escurrimiento es la salida del modelo.

#### **IV.3.1. Precipitación**

La precipitación, ya sea como lluvia o como nieve, es el proceso que guía el modelado de una cuenca. El escurrimiento de superficie es una consecuencia directa del exceso de lluvia y-o del deshielo de la nieve. La lluvia puede ser descrita en los siguientes términos: (1) intensidad, (2) duración, (3) profundidad, (4) frecuencia, (5) distribución temporal, (6) distribución espacial, y (7) corrección de área.

La intensidad de la lluvia varía ampliamente en el tiempo y en el espacio. En la práctica, es necesario hacer uso de promedios espaciales y temporales de modo de proveer descripciones útiles de lluvia. Para cuencas pequeñas, la intensidad de lluvia promedio durante un período igual al tiempo de concentración es usualmente el parámetro de lluvia primario. Para las cuencas de tamaño medio, el énfasis va desde la intensidad de la lluvia a la profundidad de la tormenta, la duración de la tormenta, y una distribución temporal de la lluvia conveniente. Para las cuencas grandes (esto es: cuencas de ríos) la distribución espacial de la lluvia se vuelve el factor de control.

Las tormentas de alta intensidad son usualmente de corta duración y cubren áreas relativamente pequeñas. Por el contrario, las tormentas de baja intensidad son típicamente de larga duración y cubren áreas grandes. Dependiendo del tamaño de la cuenca, de las condiciones de humedad antecedente, y cobertura de área de la tormenta, ambos tipos de tormentas, las de alta y baja intensidad; pueden producir eventos de escurrimiento de magnitud comparable. De allí que, una descripción de lluvia que

recaiga exclusivamente en la intensidad constante de la lluvia está limitada a pequeñas cuencas.

### **Duración de la lluvia**

La duración del evento de lluvia o tormenta varía ampliamente, oscilando entre unos pocos minutos a varios días. La propiedad de concentración del escurrimiento indica que todas las cuencas, más allá de su tamaño, alcanzan eventualmente una condición de equilibrio en el escurrimiento cuando están sujetos a una lluvia efectiva constante. En la práctica, esto implica que es más probable que las cuencas chicas alcancen condiciones de equilibrio en el escurrimiento más rápidamente que las cuencas de mediano tamaño y gran tamaño. Ésta es la razón que hace que las cuencas pequeñas sean analizadas asumiendo el flujo concentrado, esto es, una condición de equilibrio del escurrimiento. El método racional es un ejemplo típico de la suposición de la concentración del escurrimiento.

Para las cuencas de tamaño mediano, la respuesta está en función de la altura acumulada de lluvia y de la distribución temporal aplicada. En este caso, la respuesta de la cuenca es usualmente de tipo subconcentrado, con una duración de tormenta corta con respecto al tiempo de concentración. La duración de la tormenta de diseño, a ser determinada por prueba y error, es aquélla que produce el valor de caudal pico más alto para una profundidad de lluvia dada y una distribución temporal. Dado que los caudales picos están directamente relacionados a la intensidad de lluvia, y la intensidad de lluvia decrece con un incremento en la duración de la tormenta, concluimos que una tormenta de larga duración no lleva necesariamente a un caudal pico mayor.

Para cuencas grandes, la distribución espacial de la tormenta se vuelve importante, a pesar de que la duración de la tormenta continúa jugando su parte. Esto es porque las tormentas de larga duración pueden ser vistas frecuentemente como constituidas de dos partes (esto es una tormenta dual). La primer parte produce usualmente poco escurrimiento, el volumen de ella incrementa el contenido total de humedad de la cuenca. La segunda parte, que ocurre inmediatamente después de la primera con condición de humedad antecedente mayor, es convertida casi enteramente en

escurrimiento, resultando en flujos de pico anormalmente altos. Este mecanismo de la tormenta dual es usualmente responsable de las mayores inundaciones experimentadas en cuencas grandes.

### **Altura de lluvia**

Para cuencas pequeñas la altura de lluvia implica asumir una intensidad de lluvia constante durante una cierta duración. La altura de lluvia se vuelve importante en el análisis de cuencas de tamaño medio, donde es utilizada junto con una tormenta de distribución adimensional elegida para desarrollar un hietograma.

Para proyectos grandes especialmente aquéllos donde la falla estructural debido a razones hidrológicas (esto es llenado del embalse) puede resultar en pérdida de vida, el concepto de precipitación máxima probable, o PMP, es utilizado en lugar de frecuencia-duración-altura. En la práctica, la PMP es utilizada como una entrada al modelo de cuenca para obtener el flujo máximo probable, o PMF.

### **Frecuencia de lluvia**

En general, cuanto más grande es la altura de la tormenta, más infrecuente es su ocurrencia.

Relacionado íntimamente a la frecuencia está el concepto del período de retorno, definido como el promedio de tiempo que transcurre entre los acaecimientos de dos eventos de tormenta de la misma frecuencia. Los períodos de retorno normalmente usados en la práctica del diseño varían de 5 a 10 años para pequeñas obras de drenaje, de 50 a 100 años para estructuras más importantes.

La elección de la frecuencia de lluvia está usualmente basada en la práctica local y experiencia individual. Para proyectos importantes, especialmente aquéllos donde el fallo puede resultar en pérdida de vida, la PMP es usada en vez de la frecuencia como la base para las determinaciones de flujo.



## Distribución Temporal

La distribución temporal de una tormenta tiene un rol importante en la respuesta hidrológica de cuencas de tamaño medio. Para una altura de lluvia dada y una duración, la elección de la distribución temporal la de lluvia adimensional permite el desarrollo del hietograma de una tormenta de diseño.

Para una cierta altura de lluvia y una duración, una distribución temporal uniforme (Fig. N°25) producirá una respuesta lenta, con un pico relativamente bajo y un tiempo de base largo. Por el contrario, una distribución temporal altamente no uniforme (Fig. N°25) producirá una respuesta rápida, con un pico relativamente alto y un tiempo de base corto. En la práctica, una elección juiciosa de la distribución temporal (o alternativamente, una tormenta diseño) es necesaria para el cálculo seguro de picos de flujo usando técnicas de modelado de cuencas.

Una distribución temporal de diseño puede ser derivada localmente o regionalmente. Las distribuciones de lluvia temporal adimensionales están expresadas en porcentaje de duración de la lluvia en las abscisas y porcentaje de altura de lluvia en las ordenadas. Alternativamente, la duración puede ser fijada a valores establecidos y solamente las ordenadas expresadas como porcentaje de gravedad de lluvia.

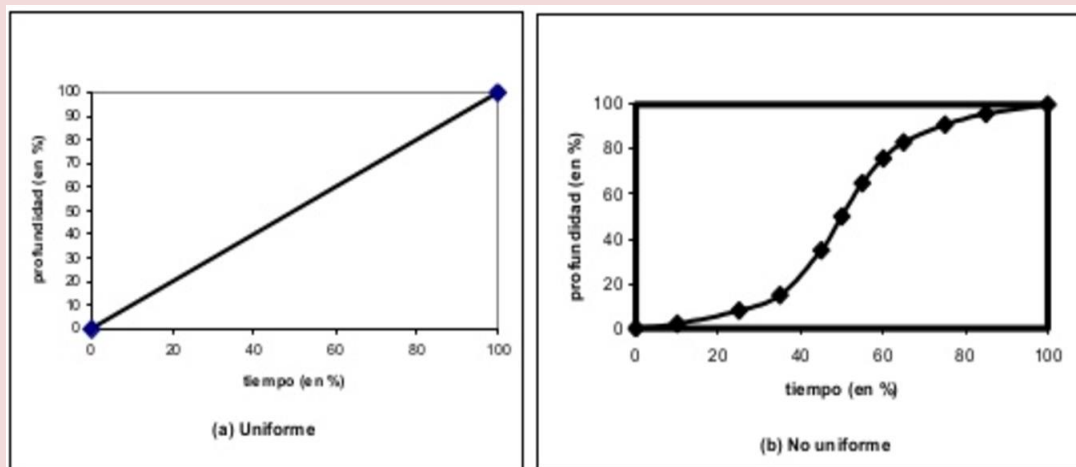


Fig. N°25. Tipos de distribuciones de lluvia temporal Uniforme – Temporal No Uniforme

## **Distribución Espacial**

Para cuencas grandes, la modelación gira alrededor de la distribución espacial de la tormenta. Las tormentas que cubren áreas grandes tienden a tener formas elípticas, con un ojo de alta intensidad ubicado en el medio de la elipse, rodeado por lluvias de intensidades y alturas decrecientes. Más aún, el ojo de la tormenta tiende a moverse en dirección paralela a los vientos prevalentes.

En ciertos casos puede ser necesario considerar las tormentas locales y generales. Para cuencas grandes, las tormentas locales son típicas tormentas de alta intensidad (esto es, tormentas eléctricas) que cubren solamente una fracción de área de la cuenca. Por el contrario, las tormentas generales cubren el área entera de la cuenca con lluvias de larga duración, aunque de baja intensidad.

Para cuencas grandes, las tormentas locales y generales pueden producir escurrimiento e inundación de magnitud comparable.

## **Corrección del Área**

Hay una cantidad limitada de humedad precipitable en la atmósfera, por ello, cuanto mayor la cobertura del área de tormenta menor la altura promedio de la tormenta. Para explicar esta tendencia natural las alturas de la tormenta mostradas en los mapas ipsopluviales del Servicio Meteorológico Nacional son expresadas como alturas puntuales, esto es alturas de tormenta aplicables a áreas menores que 25 km<sup>2</sup>.

Para cuencas de más de 25 (Km<sup>2</sup>) se necesita una corrección del área de modo de reducir la altura del punto del mapa a un valor menor que tenga en cuenta la cobertura del área. Las relaciones generalizadas altura-área han sido desarrolladas por el Servicio Meteorológico Nacional.

### **IV.3.2. Abstracciones hidrológicas**

Las abstracciones hidrológicas son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva. Eventualmente, la precipitación efectiva va

a constituir el escurrimiento de superficie. Hay varios procesos por los cuales la precipitación es abstraída por la cuenca. Entre ellos, aquéllos que interesan a la ingeniería hidrológica son los siguientes: (1) intercepción, (2) infiltración, (3) almacenaje de superficie, (4) evaporación y (5) evapotranspiración.

Los objetivos del modelado determinan una gran extensión cuyas abstracciones hidrológicas son importantes en una aplicación cierta. Para modelos de eventos, el énfasis está en la infiltración.

Por ejemplo, el método del número de curva de escurrimiento SCS, que es ampliamente usado en modelos de eventos, tiene en cuenta en forma explícita la infiltración. Todas las otras abstracciones están agrupadas en un parámetro inicial de abstracción, definida como una fracción de la retención potencial máxima  $I_a = 0.2 \times S$ .

Los modelos de proceso continuo difieren de los modelos de eventos aislados en que son diseñados para simular flujos diarios, con o sin la presencia de precipitación. Concordantemente, su énfasis está en la evapotranspiración, y apunta a proveer un detalle de la humedad de la cuenca en todo momento.

La intercepción es un tema importante en la modelación de tormentas de baja intensidad y de alta intensidad. Generalmente, las tormentas que tienen una frecuencia alta de ocurrencia son sustancialmente abstraídas por intercepción. Por el contrario, para las tormentas de alta intensidad y baja frecuencia de ocurrencia, la intercepción generalmente es una fracción muy pequeña del total de la lluvia. La modelación detallada de la intercepción usualmente está garantizada en modelos de proceso continuo. Para los modelos de eventos aislados, la intercepción es pequeña comparada con la infiltración.

### **Infiltración**

La infiltración está vista como el mecanismo de abstracción primario en los modelos de eventos aislados. Los valores y las cantidades de infiltración determinan en gran parte las cantidades de escurrimiento superficial. Tanto los modelos determinísticos,

como los conceptuales, o los paramétricos son usados en el modelado del proceso de infiltración. Por ejemplo, un modelo determinístico es la fórmula de Green y la Ampt (sección 2.2), que está basada en la física del proceso de infiltración. Un ejemplo típico de un modelo conceptual es el método de la curva de escurrimiento SCS, que está basada en asumir la proporcionalidad entre la retención y el escurrimiento. Los modelos paramétricos son también ampliamente usados, vea, por ejemplo, la función general de tasa de pérdida del HEC.

Los valores de infiltración varían ampliamente en el tiempo y el espacio, lo que hace del modelado distribuido de infiltración una tarea muy compleja. Para cuencas grandes, y particularmente para grandes inundaciones, los modelos prácticos de infiltración están basados en el concepto de índice de infiltración, que agrupa los valores de infiltración en el tiempo y el espacio. Estos índices pueden ser estimados u obtenidos del análisis de datos de lluvia-escurrimiento.

### **Almacenamiento Superficial**

La cantidad de almacenamiento superficial está en función del relieve de la cuenca. En cuencas pequeñas y montañosas, el almacenamiento superficial es usualmente despreciable. Sin embargo, en desagües urbanos y de tierras bajas (pantanos, ciénagas) es bastante compleja, de allí que el almacenamiento de superficie es usualmente simulado con modelos empíricos o conceptuales.

### **Evaporación**

En el modelado de cuencas, un componente de evaporación es utilizado para cuantificar la pérdida de agua de lagos y reservorios. El proceso es particularmente importante para modelado continuo en regiones áridas y semiáridas. En este caso, la evaporación de lagos y reservorios puede representar una contribución sustancial al balance de agua de la cuenca.

La evaporación de los cuerpos de agua puede ser estimada de varios modos. Las distintas propuestas se clasifican como (1) balance de agua (2) balance de energía, (3)

técnicas de transferencia de masa, y (4) métodos de pan–evaporación. Dada la naturaleza empírica de las estimaciones de evaporación, el uso de dos o más métodos es garantizado generalmente para proveer una base para la comparación.

### **Evapotranspiración**

La evapotranspiración se ve como el mecanismo abstractivo primario de modelos de proceso continuo. La evapotranspiración es tomada en cuenta ya sea como evapotranspiración potencial (ETP) o evapotranspiración real (ETR). La ETP es modelada de forma similar a la evaporación. Los métodos para calcular la ETP están clasificados en: (1) modelos de temperatura, (2) modelos de radiación, (3) modelos combinados (balance energético con transferencia de masa), y (4) modelos de pan evaporación. Las fórmulas empíricas u otras estimaciones de evapotranspiración son utilizadas en la modelación de procesos continuos.

### **IV. 3.3. Escurrimiento**

Se reconocen dos modos diferentes de escurrimiento con propósitos de modelación: (1) escurrimiento en la cuenca y (2) escurrimiento en el canal de corriente. El escurrimiento de cuenca tiene características tridimensionales, pero eventualmente este tipo de escurrimiento se concentra a la salida de la cuenca. Después de abandonar la cuenca el escurrimiento entra la red del canal donde se vuelve un flujo corriente del canal. A diferencia del escurrimiento de cuenca, la marcada orientación longitudinal del flujo de la corriente del canal generalmente justifica asumirlo unidimensional.

En la práctica, el escurrimiento de cuenca se modela usando ya sea una aproximación distribuida o concentrada. La concentrada está basada en la convolución del hidrograma unitario con un hietograma efectivo de tormenta. La aproximación distribuida está basada en el flujo terrestre que utiliza técnicas de ondas de difusión o cinemáticas. (Ambas formas tienen ventajas y desventajas. El hidrograma unitario es relativamente fácil de implementar, a pesar de que toma en cuenta explícitamente los

detalles físicos del interior de la cuenca. El ruteo de onda cinemática es teóricamente más aplicable que el hidrograma unitario, y a diferencia de este último, puede proveer información detallada del escurrimiento de superficie en toda la cuenca. Sin embargo, ruteo de onda cinemática es generalmente más complejo, difícil de implementar y requiere cantidades sustanciales de datos físicos para que su operación resulte exitosa.

Más aún, el nivel de la abstracción geométrica requerida por modelos de onda cinemática operacional (ej: representación del libro abierto) puede en ciertos casos comprometer el rigor teórico de la técnica.

Una aproximación alternativa para la modelación del escurrimiento es el concepto del área de fuente variable. Esta aproximación es particularmente aplicable a la hidrología de montaña, por ejemplo, el estudio del escurrimiento desde las tierras altas y - o cuencas forestales.

Este concepto de modelado se basa en asumir que el patrón preferido de la lluvia es por infiltración a través de suelo forestal sin cambios, migración colina abajo, y mantenimiento de niveles de saturación o cercanos a la saturación en los declives bajos. A medida que la lluvia continúa, la zona de flujo de la subsuperficie saturada se expande, con las capas de suelo saturadas contribuyendo con cantidades sustanciales de flujo subsuperficial para el escurrimiento.

El grado en el cual la saturación y la subsecuente expansión lateral ocurre es una función de las condiciones de humedad antecedentes, intensidad de lluvia y duración. El modelado del área de fuente variable difiere del modelado superficial en que en el flujo subsuperficial la pendiente inferior es considerada como la primera instancia para el escurrimiento.

En el modelado de cuencas, la salida del escurrimiento de la cuenca es el flujo de entrada al canal.

El cálculo del flujo del canal se lleva a cabo armando camino a través de la red del canal. Se hace una distinción entre subcuencas de tierras altas, que contribuyen al flujo

de entrada a la red de corriente aguas arriba, y alcanza las subcuencas, que contribuyen al flujo de entrada local a las varias distancias constituyendo la red de la corriente. Cuando se usan modelos globales, el escurrimiento de las subcuencas es concentrado en el punto corriente abajo. Por el contrario, con los modelos distribuidos, el escurrimiento de las subcuencas puede ser distribuido lateralmente a lo largo de la extensión.

El camino o ruta a través de la corriente se lleva a cabo por técnicas de tránsito hidráulico o hidrológico. Las técnicas hidrológicas se solucionan directamente para valores de descarga, si se lo desea los estados pueden ser determinados indirectamente a través del uso de una curva de valor apropiada. Las técnicas hidráulicas de ruteo de río generalmente se resuelven para descargas y estados simultáneamente, aunque con un incremento sustancial en complejidad comparada con las técnicas hidrológicas.

Los modelos distribuidos requieren una descripción topológica de la red de la corriente. Un sistema lógico de cuenca y numeración de tramos se necesita para una combinación hidrográfica apropiada en las confluencias de la red.

#### **IV.4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y APLICACIÓN**

La construcción de un modelo de cuenca comienza con la selección de los componentes del modelo. Una vez que éstos han sido elegidos, se unen como partes del todo del modelo, siguiendo una secuencia lógica que recuerda a la del proceso natural. La lluvia y la nieve son consideradas primero, seguidas por las abstracciones hidrológicas, la generación del hidrograma de la subcuenca, reservorio y ruteo de la corriente en el canal, y combinación hidrográfica en las confluencias de la red.

La resolución de la salida del modelo debe ser solicitada al inicio de la construcción y aplicación del modelo. La resolución se refiere a la capacidad del modelo de representar con seguridad ciertas escalas de problemas. La resolución está relacionada a la escala de la cuenca y el objetivo del modelado. La modelación del escurrimiento de cuencas pequeñas requiere una resolución clara, con pasos de tiempo típicos en el orden de los minutos y correspondiente a subcuencas pequeñas y tramos cortos de canal. Por el otro lado, la modelación del

escurrimiento de cuencas de tamaño medio requiere una resolución promedio, con pasos de tiempo típicos en el orden de horas y correspondientes a subcuencas mayores y tramos de canal más largos. Más aún, la modelación del escurrimiento de cuencas grandes (esto es, cuencas de ríos) puede requerir una resolución amplia, con pasos de tiempo del orden de uno o más días y tamaño de subcuenca y longitudes de tramos del canal concordantes.

El objetivo del modelado puede tener influencia en la elección de la resolución del modelo. Los modelos de evento son de término corto por definición y, de allí que, estén sujetos a cambios rápidos en las variables del modelo. Los modelos de evento requieren una resolución fina, usualmente con pasos de tiempo que van desde varios minutos a unos pocas horas, dependiendo del tamaño de la cuenca. Los modelos de proceso continuo están diseñados para procesos de largo plazo, con fluctuaciones menores en las variables de modelo. De allí que en los modelos de proceso continuo es posible una resolución mayor.

#### **IV.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO Y VERIFICACIÓN**

Los ingredientes esenciales de cada modelo son las variables y los parámetros. Las variables son cantidades físicas en sí mismas, esto es: descarga, estado, área de flujo, profundidad de flujo, velocidad media, etc. Los parámetros son cantidades que controlan el comportamiento de las variables. Cada componente del modelo puede tener una o más variables y parámetros.

Los parámetros pueden ser de naturaleza determinística, conceptual, o empírica. Los parámetros de los modelos determinísticos están basados en leyes de procesos físicos, usualmente en conexión con aplicaciones del modelado distribuido, para los cuales los cálculos se realizan en los dominios temporales y espaciales. Los parámetros conceptuales son parte de los modelos conceptuales es decir, aquéllos que simulan procesos físicos en un modo simple y práctico. Los parámetros empíricos son calculados directamente, basados en datos medidos o indirectamente, basados en la experiencia (como en el caso de la regionalización de parámetros de modelos).

En la práctica, es más probable que un cierto modelo de cuenca tenga más de un tipo de componente y, entonces, más de un tipo de parámetro. Generalizando, un modelo de cuenca se denomina determinístico, conceptual o empírico dependiendo de si la mayoría de sus



componentes y parámetros tienen bases determinísticas, conceptuales o empíricas. El uso y la interpretación de los modelos de cuenca, en particular los procesos de calibración, verificación y análisis de sensibilidad, son una función del tipo de modelo.

La calibración del modelo es el proceso por el cual los valores de los parámetros del modelo son identificados para su uso en una aplicación particular. Consiste en el uso de datos de lluvia escurrimiento y un procedimiento para identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los flujos simulados y los registrados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente, por prueba y error, o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática.

La calibración implica la existencia de datos de caudales, para cuencas no medidas, la calibración simplemente no es posible. La importancia de la calibración varía con el tipo de modelo. Por ejemplo, un modelo determinístico es observado generalmente como altamente predictivo, por ello, debería requerir poca o ninguna calibración. En la práctica, sin embargo, los modelos determinísticos no son enteramente determinísticos, y por ello, un cierto modo de calibración es necesario frecuentemente.

La modelación conceptual, la calibración es extremadamente importante, ya que los parámetros no muestran una relación directa con los procesos físicos. Por ello, la calibración es requerida de modo de determinar valores apropiados de estos parámetros. Las estimaciones prácticas de los parámetros de modelo conceptual, basados en la experiencia local, son usados algunas veces en lugar de la calibración. Sin embargo, tal práctica es riesgosa y puede llevar a cometer errores groseros. La calibración también juega un rol importante en la determinación de parámetros en modelos empíricos.

La calibración necesita de procesos de tiempo invariable y tiempo variable y los modelos son bastante diferentes. Para evaluar la seguridad predictiva de un modelo de tiempo invariable es costumbre dividir el proceso de calibración en dos etapas diferentes: (1) calibración y (2) verificación. Para este propósito, dos grupos independientes de datos de lluvia-caudal son reunidos. El primer grupo es utilizado en la calibración por sí mismo, mientras que el segundo grupo es usado en la verificación del modelo, esto es: una medición de la seguridad de la

calibración. Una vez que el modelo ha sido calibrado y los parámetros verificados, está listo para ser utilizado en el etapa predictiva de la modelación.

La calibración está bastante implicada con los procesos de tiempo variable y modelos. Ya que los parámetros varían en el tiempo (y con las variables del modelo), una calibración y una verificación en el sentido lineal es sólo posible dentro de un rango estrecho de la variable. Una alternativa práctica es seleccionar varios rangos de la variable, esto es, flujo mínimo, flujo promedio, y flujo máximo, y realizar una calibración y una verificación para cada nivel de flujo. De esta manera se puede identificar un grupo de parámetros para cada rango de la variable. Un ejemplo típico de calibración multinivel (multiestado) es la del ruteo en canales. Los parámetros de ruteo para flujo encauzado son bastante diferentes de aquéllos de flujo desbordado. Por ello, son necesarias varias calibraciones, que abarquen un amplio rango de niveles de flujo.

Para ciertos procesos y modelos, particularmente aquellos de naturaleza determinística, los parámetros de modelo pueden ser explícitamente relacionados a las variables del modelo. En este caso, la necesidad de la calibración de los parámetros (en el sentido lineal) es engañosa. Los modelos variable-parámetro, son, por ello, altamente predictivos.

Los modelos distribuidos y concentrados poseen problemas de calibración diferente. Los modelos concentrados tienen un número relativamente pequeño de parámetros comparados con los modelos distribuidos. Para los modelos conceptuales globales, la calibración en el sentido lineal es posible. En este caso, las estimaciones de parámetro pueden ser obtenidas frecuentemente con técnicas de calibración automática.

A diferencia de los modelos concentrados, los modelos distribuidos tienen un gran número de parámetros, de los cuales la mayoría mantienen relación con los procesos físicos. Este gran grupo de parámetros suministra una calibración automática poco práctica y algunas veces errónea. En físicamente realistas y realizar calibraciones de prueba y error.

## **Análisis de sensibilidad**

Las inseguridades en la práctica del modelado de cuencas ha llevado a una confianza “in crescendo” en el análisis de sensibilidad, el proceso por el cual un modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo. Este tipo de análisis es un complemento necesario para el ejercicio del modelado, especialmente porque provee información sobre el nivel de certeza (o no) para asegurar los resultados del modelado. Los resultados del análisis de sensibilidad para las variaciones de parámetro es particularmente importante en el caso de modelos determinísticos que tienen algunos componentes conceptuales. Debido a los componentes conceptuales, las calibraciones son estrictamente válidas sólo dentro de rangos estrechos de las variables, de allí que, los errores en la estimación de los parámetros necesitan ser determinados de manera cualitativa.

La sensibilidad es analizada usualmente aislando el efecto de cierto parámetro. Si un modelo es altamente sensible a un parámetro dado, pequeños cambios en el valor de ese parámetro podría producir cambios grandes en el rendimiento del modelo. Por ello, es necesario concentrar el esfuerzo del modelado en obtener buenas estimaciones de este parámetro. Por otro lado, los parámetros poco sensibles pueden ser relegados a un rol secundario.

En el modelado de cuencas, la elección de parámetros para el análisis de sensibilidad es función de la escala de problema. Por ejemplo, en pequeñas cuencas, el rendimiento del modelo es altamente sensible al parámetro abstracción, esto es el coeficiente de escurrimiento en el método racional.

Por ello, es imperativo que el coeficiente de escurrimiento sea estimado de la mejor manera posible. Para eventos de baja frecuencia, valores altos del coeficiente de escurrimiento están generalmente justificados.

En el modelado de cuencas de tamaño medio, la sensibilidad del modelo usualmente gira sobre la distribución temporal de la lluvia, los parámetros de infiltración, y la forma del hidrograma unitario.

La selección de la distribución de la lluvia es crucial desde el punto de vista del diseño. Los modelos de cuencas son usualmente muy sensibles a los parámetros de infiltración, lo cuales necesitan ser evaluados cuidadosamente, con particular atención a los procesos físicos. Por ejemplo, una tormenta de corta duración y alta intensidad podría resultar en un pico de flujo alto, debido primariamente a una alta intensidad de lluvia. Sin embargo, una tormenta de baja intensidad y larga duración podría también resultar en un pico alto de flujo, esta vez debido a una larga duración de la lluvia, lo que provoca que las abstracciones hidrológicas se reduzcan a un mínimo.

En el modelado de cuencas grandes, la sensibilidad del modelo se focaliza en la distribución espacial de la tormenta, a pesar de que la distribución temporal y los parámetros de infiltración continúan jugando un rol significativo. De cualquier modo, una evaluación cuidadosa de la sensibilidad del modelo es necesaria para incrementar la confianza en los resultados del modelado.

Los análisis proveen medios efectivos de muestra con las complejidades inherentes del modelado de desagües, incluyendo las incertidumbres de los parámetros asociados. En este sentido, los modelos distribuidos, mientras son vistos ampliamente como determinísticos pueden frecuentemente mostrar una cualidad distintiva pirolástica diferente.

#### **IV.6. MODELOS PARA ESTIMAR CAUDALES MAXIMOS**

Los modelos de evento son (1) HEC-1, desarrollado y respaldado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), Armada de Estados Unidos, Cuerpo de Ingenieros, (2) TR-20, respaldado por el Servicio de Conservación de Suelos USDA, y (3) SWMM (Modelo de Gestión de Agua de Tormenta), desarrollado bajo los auspicios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. El HEC-1 y el TR-20 son utilizados para la generación de hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo. El SWMM se adapta a los análisis y las aplicaciones de diseño que involucran determinaciones simultáneas de cantidad y calidad de agua. Bedient y Huber (2002), describen que el Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC – HMS), está basado en el modelo hidrológico HEC-1, pero actualmente este programa trabaja sobre la plataforma de Windows, y contiene muchas

mejoras sobre su predecesor en la parte gráfica y en la forma de diseñar los proyectos, a través de elementos prediseñados para la entrada de los datos y las salidas de sus resultados. La diferencia más notable entre HEC - HMS y HEC - 1, es su fácil utilización gracias a la interfaz gráfica para el usuario (GUI, por sus siglas en inglés), que permite la manipulación de elementos hidrológicos de una cuenca como los ríos y la mejora en la entrada de datos para la cuenca. El GUI también permite la visualización rápida de los resultados de cualquier objeto en el modelo esquemático. Puede accederse a un mapa de fondo que contiene los límites de la cuenca y los cursos de agua, desde una base de archivos SIG, como referencia visual, aunque no es utilizado en los cálculos.

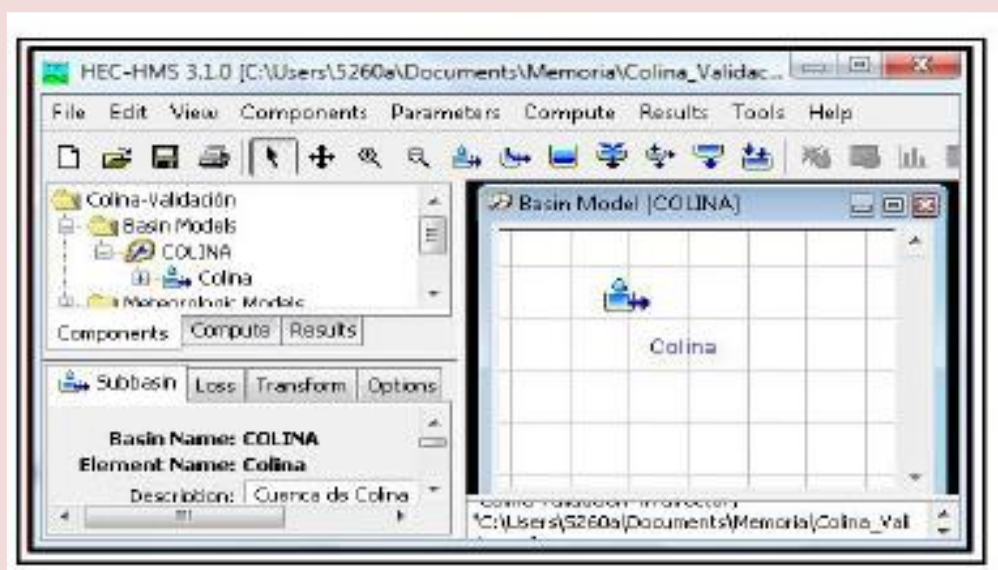
Los modelos de proceso continuo son: (1) SSARR, desarrollado y respaldado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos División Pacífico Norte, (2) Modelo de Cuenca Stanford (SWM) desarrollado en la Universidad de Standford, y (3) el Modelo Sacramento desarrollado conjuntamente por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de California de Recursos Hídricos. Estos modelos han sido utilizados para diseño hidrológico, predicción de volumen de escurrimiento a largo plazo, y predicción de flujo en tiempo real.

# Capítulo V

## MODELO HIDROLÓGICO HEC - HMS

## V.1. INTRODUCCIÓN

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 hidrógramas 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.



**Figura 26. Ventana principal del programa HEC – HMS**

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos. El HMS, incluye la mayor parte de las rutinas de HEC-1 (algunas parecen haber sido obviadas) e incorpora como elementos adicionales:

Un método de transformación lineal de la escorrentía (basado en una modificación del hidrograma unitario de Clark) que puede utilizarse en una representación de la cuenca a través de celdas, con datos distribuidos de precipitación obtenidos por ejemplo de registros de radar (una opción tecnológica que no tiene aún aplicación en nuestro país).

Una opción de pérdida distribuida de humedad en suelos que aplica el mismo principio de las celdas y puede utilizarse en simulaciones sobre períodos largos (de días o meses) y una opción de optimización, un poco más versátil que la del HEC-1.

La versión es atractiva porque trabaja en un ambiente de ventanas mucho más agradable que en HEC-1 y porque permite visualizar los resultados de las simulaciones en forma gráfica, tabulada y más expedita para el usuario.

## **V.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

El programa incluye una interfaz gráfica para el usuario (GUI) que le permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. El documento de ayuda incorporado en el programa aclara la utilización de las opciones del programa.

Los archivos de extensión DSS (Data Storage System) se utilizan para almacenar y trabajar con series de tiempo, funciones emparejadas y datos de grilla en una forma muy transparente para el usuario.

Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos (ver las indicaciones de la ayuda del programa):

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

Con estos siete componentes, el usuario puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que está tratando y como permita la información de campo disponible.



Si se cuenta con información digital de campo, el HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo.

Los elementos anteriores se disponen en forma de redes dendríticas con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos desde las subcuencas que conforman las cabeceras aguas arriba hasta el punto de salida de todo el caudal aguas abajo. El usuario debe prestar atención a este criterio, ya que los cálculos siguen rigurosamente esta secuencia (por ejemplo si tienen en cuenta una derivación no pueden entregar las aguas derivadas en un punto aguas arriba, aunque técnicamente esto sea factible). Por tal motivo, el primer paso en la preparación de la información consiste en definir correctamente la estructura de la cuenca que se pretende simular.

El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

Módulo de precipitación: permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño (ver las indicaciones de la ayuda del programa).

Módulo de la cuenca: permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrógrafa total de salida (ver las indicaciones de la ayuda del programa).

Módulo de control: incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos (ver las indicaciones de la ayuda del programa)

Estos tres módulos deben definirse completamente antes de iniciar la corrida de la simulación.

### **V.3. SITUACIONES HIDROLÓGICAS QUE PUEDEN MODELARSE EN HEC-HMS**

El programa HEC-HMS permite simular eventos aislados de crecientes asociados con un patrón de tormenta de diseño para un cierto período de retorno. La suposición de que el período de retorno de la tormenta es coincidente con el período de retorno de la creciente respectiva ha despertado muchas controversias entre los investigadores en hidrología, haciendo evidente que el tratamiento probabilístico de los dos fenómenos, aunque no es mutuamente excluyente si depende de otros factores, entre ellos el área de la cuenca considerada, las condiciones antecedentes de humedad en los suelos para períodos largos y los cambios introducidos por el hombre en el uso y conservación de los suelos. Pensando en ello, el programa permite en la actualidad considerar las condiciones antecedentes de humedad para un registro de precipitación de muchos días a partir de unas condiciones iniciales, lo que puede asemejarse en parte a un modelo continuo y distribuido de humedad en los suelos, ya que se trabaja con un modelo tipo celdas.

Los resultados arrojados por HEC-HMS permiten:

- Dimensionar obras de control de inundaciones como pondajes, piscinas de amortiguamiento de crecientes y embalses.
- Establecer dimensiones preliminares de ponederos, alcantarillas viales y sistemas de drenaje pluvial.
- Estudiar el impacto ambiental de las crecientes, causado por la transformación del uso de los suelos en cuencas rurales y urbanas.

Por otro lado, los resultados de HEC-HMS NO permiten:

- Establecer un balance hidrológico confiable de la cuenca.
- Hacer estudios de calidad de agua, erosión ni sedimentación.

Trabajar con flujos diferentes al agua, v.gr. flujos de lodos o de detritos, que pueden estar asociados directamente con las crecientes pero que tienen diferentes comportamientos hidrológicos.

En el ejercicio de aplicación preparado para este taller, se exploran algunas de las posibilidades de cálculo antes mencionadas.

#### V.4. TIPO DE INFORMACIÓN QUE REQUIERE EL PROGRAMA

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

- Información acerca de la precipitación histórica o de diseño.
- Información acerca de las características del suelo.
- Información morfométrica de las subcuencas.
- Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
- Información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito).
- Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan:
- Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrógrafas).
- Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr).
- Información acerca de la precipitación histórica o de diseño.

A continuación se resume la información que solicita HEC-HMS según el método seleccionado para definir la tormenta histórica o de diseño:

**Cuadro N°3. Información que requiere HEC - HMS**

MÉTODO	INFORMACIÓN REQUERIDA
<i>Hietograma especificado por el usuario</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de tormentas (día de inicio y finalización e intervalo de medición en minutos) en las estaciones pluviográficas localizadas dentro de la cuenca.</li> <li>2. Identificación de las estaciones y sus correspondientes subcuencas.</li> </ol>
<i>Datos de estaciones, ponderados por el usuario</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de tormentas (día de inicio y finalización e intervalo de medición en minutos) y precipitaciones totales en las estaciones pluviográficas y pluviométricas</li> </ol>

	<p>localizadas dentro de la cuenca.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Ponderación espacial y temporal de los datos de las estaciones para cada subcuenca (p.ej. polígonos de Thiessen o inversos de la distancia).</li> <li>3. Índice de precipitación para cada subcuenca.</li> </ol>
<b>Ponderación con el inverso de la distancia</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Localización coordinada de las estaciones dentro de la cuenca (latitud y longitud de cada una).</li> <li>2. Especificación de los nodos para cada subcuenca.</li> <li>3. Para cada uno de los nodos, definición del índice de precipitación, la ponderación y su localización coordinada (latitud y longitud).</li> </ol>
<b>Precipitación no uniforme, evaluada en celdas o grillas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de precipitación codificados por celdas en un archivo DSS.</li> <li>2. Determinación del tiempo local (opcional).</li> </ol> <p><i>Nota: requiere información detallada de la distribución de la precipitación, no siempre disponible (p.ej. registros de radar).</i></p>
<b>Tormenta hipotética basada en análisis de frecuencias</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Probabilidad de excedencia de la lluvia (entre el 50% y el 1%).</li> <li>2. Área de cubrimiento de la tormenta.</li> <li>3. Origen de los datos (serie anual o parcial).</li> <li>4. Intervalo de tiempo de cálculo para la máxima intensidad de la lluvia (entre 5 minutos y 6 horas).</li> <li>5. Duración de la tormenta (entre 1 hora y 10 días).</li> <li>6. Registro de la tormenta con período de retorno de un año.</li> </ol>
<b>Tormenta estándar de proyecto (E.U.) Sin precipitación</b>	<p>Este método sólo es aplicable en los Estados Unidos. No requiere información alguna, y se aplica sólo para evaluar el comportamiento de fuentes, sumideros, uniones, tramos de canal, embalses o derivaciones. La estructura de la cuenca en este caso no debe contener subcuencas que son las que requieren la información relativa a la precipitación.</p>

El usuario debe prestar atención a las unidades que se le solicitan en cada ventana, ya que aunque el programa asegura que todos los cálculos se realizan en SI, algunos datos se trabajan en pulgadas o millas cuadradas.

### **Información acerca de las Condiciones de Humedad del Suelo:**

A continuación se resume la información que solicita HEC-HMS según el método seleccionado para determinar las infiltraciones durante eventos de tormenta:

**Cuadro N°4. Información para determinar la Infiltración**

MÉTODO	INFORMACIÓN REQUERIDA
<b>Pérdidas iniciales y constantes</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Tasa de infiltración constante <math>\phi</math>.</li> <li>3. Porcentaje de área impermeabilizada (zonas urbanas, cubiertas de invernaderos).</li> </ol>
<b>Número de Curva</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Número de curva, calculado como promedio sobre la subcuenca respectiva.</li> <li>3. Porcentaje de área impermeabilidad.</li> </ol>
<b>Números de curva asociados a celdas o grillas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relación de abstracción inicial S derivada del mismo método del SCS.</li> <li>2. Factor de escala para la retención potencial (representa las condiciones antecedentes de humedad AMC).</li> </ol> <p><i>Nota: cada celda tiene su propio CN y pérdidas iniciales diferentes, relacionadas con su condición antecedente de humedad AMC.</i></p>
<b>Green &amp; Ampt</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Volumen de déficit de humedad.</li> <li>3. Succión del frente húmedo (mm).</li> <li>4. Conductividad hidráulica (mm/h).</li> <li>5. porcentaje de área impermeable.</li> </ol> <p><i>Nota: requiere información detallada de la distribución de la precipitación, no siempre disponible (p.ej. registros de radar).</i></p>
<b>Déficit y pérdidas constantes en simulaciones continuas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Déficit inicial de humedad en el suelo (mm) para simulación continúa.</li> <li>2. Máximo déficit de humedad del suelo en períodos sin lluvia (mm).</li> <li>3. Tasa de pérdida constante (mm/h) cuando el déficit es cero.</li> <li>4. Tasas de recuperación mensual del déficit en (mm/día).</li> <li>5. Porcentaje del área impermeable.</li> </ol>
<b>Ninguna pérdida</b>	Considera que toda la subcuenca es impermeable.

## V.5. INFORMACIÓN ACERCA DE LA MORFOMETRÍA DE LAS SUBCUENCAS

Algunas de las características morfométricas que requiere HEC-HMS para realizar los cálculos no están explícitas en las ventanas. Por ejemplo, las pendientes y longitud del cauce principal y de las laderas son necesarias para calcular los tiempos de concentración y los diagramas área-forma que son datos de entrada para los métodos de hidrogramas unitarios

sintéticos. Las características morfométricas que deben considerarse para cada subcuenca son las siguientes:

**Cuadro N°5. Información Morfométrica requerida por HEC - HMS**

CARACTERÍSTICA	NECESARIA PARA
<b>Área de las subcuencas</b>	Definir todos los cálculos de capacidad y conversión de los volúmenes de lluvia en escorrentía. Es el factor morfométrico de mayor importancia en hidrología.
<b>Longitud y pendientes del cauce principal</b>	Calcular los tiempos de concentración de las subcuencas y los tiempos de viaje en el método de la onda cinemática.
<b>Curvas de nivel y diagramas área-tiempo y área forma</b>	Determinar la concentración de caudales en función del tiempo y de la forma de la cuenca en el método del HU de Clark
<b>Secciones transversales de los canales, longitudes de cauces principales y secundarios, pendientes, formas, rugosidades de lecho y superficie</b>	Realizar los cálculos de tránsito por el método de la onda cinemática.

### La Información Hidrológica del Proceso de Transformación de Lluvia en Escorrentía

La parte más importante del modelo de simulación de HEC-HMS la constituyen los métodos para estimar la forma en que la lluvia se convierte en escorrentía. En la tabla siguiente se enlista la información requerida según el método de transformación seleccionado:

**Cuadro N°6. Métodos De Transformación Precipitación - Escorrentía**

Método	Tipo	Información requerida
<i>Hidrograma unitario definido por el usuario</i>	<i>Hidrológico, empírico</i>	Abscisas y ordenadas del hidrograma unitario de entrada cuya duración no necesariamente debe coincidir con la del intervalo de cálculo del programa, pero debe ser constante.
<i>Hidrograma unitario sintético de Clark</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de concentración (h)</li> <li>2. Coeficiente de almacenamiento R(h)</li> <li>3. Diagrama área tiempo estándar o definido por el usuario.</li> </ol>
<i>Hidrograma unitario sintético modificado de Clark</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de concentración (h) general para cada subcuenca.</li> <li>2. Coeficiente de almacenamiento R(h) general para cada subcuenca.</li> <li>3. Archivo con los parámetros asociados a cada celda o grilla como sus coordenadas</li> </ol>

		y el índice de tiempo de viaje. El tránsito se hace en forma lineal hasta la salida de cada celda y los valores se van acumulando hasta llegar a la salida de toda la cuenca.
<i>Hidrograma unitario sintético de Snyder</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de retardo Tlag (h)</li> <li>2. Coeficiente al pico función del caudal pico, el tiempo al pico y el área de la subcuenca Cp(h)</li> <li>3. Diagrama área tiempo estándar o definido por el usuario.</li> </ol>
<i>Hidrograma unitario sintético del SCS</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	Tiempo de retardo Tlag (h, minutos).
<i>Onda cinemática y Muskingum-Cunge</i>	<i>Hidráulico, físico</i>	El hidrograma de salida de la subcuenca se define en tres planos: uno de sobreflujo (longitud, pendiente y rugosidad del terreno) que conduce a otro de colectores secundarios (longitud, pendiente, n de Manning, forma y ancho del canal y talud lateral xH:1V) y de estos a un canal principal, definido por los mismos factores de los colectores.

### Información Acerca del Tránsito de los Caudales a través de Canales y Embalses

El tránsito de los caudales a través de canales y embalses es otro de los puntos críticos de la simulación con el programa HEC-HMS. En la tabla siguiente se resume el tipo de información necesaria según el método escogido para calcular el tránsito:

**Cuadro N°7. Métodos para Cálculo del Tránsito de Avenidas.**

MÉTODO	TIPO	INFORMACIÓN REQUERIDA
<i>Muskingum</i>	<i>Hidrológico, empírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Factor de tiempo de viaje K(h), constante para todo el tramo.</li> <li>2. Factor adimensional de ponderación del amortiguamiento o retardo (entre 0 y 0.5).</li> <li>3. Número de subdivisiones para los tramos.</li> </ol>
<i>Puls modificado</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Número de subdivisiones para cada tramo.</li> <li>2. Condición inicial de flujo (entradas=salidas o definición del caudal de salida).</li> <li>3. tabla de valores del almacenamiento (en miles de</li> </ol>

		m <sup>3</sup> ) en función de la descarga (m <sup>3</sup> /s).
<i>Muskingum-Cunge</i>	<i>Hidrológico, semiempírico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tipo de sección transversal (prismática o circular).</li> <li>2. Longitud del tramo del canal (m).</li> <li>3. Pendiente de la línea de energía en el tramo.</li> <li>4. Ancho del fondo (m).</li> <li>5. Coeficiente de rugosidad n de Manning (si se trabaja con el método M-C de 8 puntos, entonces se definen los valores de los coeficientes de rugosidad para las dos márgenes y el fondo en 8 puntos del tramo).</li> </ol>
<i>Onda cinemática</i>	<i>Hidráulico, teórico</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tipo de sección transversal (prismática, trapezoidal o circular).</li> <li>2. Longitud del tramo del canal (m).</li> <li>3. Pendiente de la línea de energía en el tramo.</li> <li>4. Ancho del fondo (m).</li> <li>5. Talud lateral de la sección transversal (xH:1V).</li> <li>6. Coeficiente de rugosidad de Manning.</li> <li>7. Número mínimo de tramos o subdivisiones para realizar los cálculos</li> </ol>

*Preparado por Julio Eduardo Cañón Barriga UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA POSGRADO EN RECURSOS HIDRÁULICOS TALLER DE APLICACIÓN DE HEC-HMS*

Cuando se consideran derivaciones dentro de la estructura de la cuenca, los caudales derivados se especifican en términos de la relación tabulada entre el flujo de entrada y el flujo a ser derivado. La hidrógrafa de las derivaciones puede ser recuperada aguas abajo dentro del mismo sistema, o bien puede salir sin retornar, a través de un sumidero (en este caso el sumidero sería un artificio para indicar que el caudal derivado se trasvasa a otra cuenca).

### **Tipo de Simulación realiza HEC-HMS**

El HEC-HMS es un modelo tipo evento, lineal y semidistribuido. Por lo tanto, una corrida de simulación del programa consiste en calcular la componente de escorrentía directa como una función del tiempo, producto de un evento de lluvia de duración variable (entre algunos minutos y varios días) que se produce a la salida de las subcuencas. Las hidrógrafas resultantes



se combinan según la estructura de la cuenca, definida por el usuario en sentido estricto de aguas arriba hacia aguas abajo, hasta hallar el hidrograma resultante a la salida de toda la cuenca. Las simulaciones en HEC-HMS son de dos tipos:

- Convencionales: se obtienen las hidrógrafas de salida y combinadas para un evento de tormenta supuesto.
- De optimización: Las hidrógrafas resultantes se comparan con un registro histórico en un cierto punto de la cuenca.

Éstos son los resultados que debe esperar el usuario después de una corrida del programa:

**Cuadro N° 8. Resultados que entrega el HEC - HMS**

Simulación	Resultados	Tipo de presentación
Convencional	Hidrógrafas de salida en cada subcuenca	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Hidrógrafas transitadas en los tramos de unión.	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Combinación de hidrógrafas en los puntos de unión	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Caudal pico y tiempo al pico, volumen de escorrentía	Tabla resumen
Optimización	Ajuste a la hidrógrafa observada	Gráficas de ajuste de datos (cuatro formatos), tabla principal
	Valores óptimos de los parámetros ajustados	Tabla principal

## V.6. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS CON HEC – HMS

Como en todo modelo, para que los resultados de la simulación en HEC-HMS representen con algún grado de confiabilidad el comportamiento de la cuenca que se está analizando, es necesario someterlos a pruebas de calibración, validación y análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados.

La calibración o estimación de parámetros y la validación se basan en dos o más registros históricos de precipitación y caudales para un mismo evento. Estos registros son escasos en la mayoría de las cuencas, así que no se puede hacer mucho juego con las posibilidades. Si se cuenta sólo con dos registros lluvia-caudal por ejemplo, entonces uno debe ser usado en la calibración y el otro en la validación. En la medida en que el número aumente, se deben

discriminar los dos grupos de datos para que la validación no resulte viciada con los datos de la calibración.

En HMS la estimación de los parámetros se hace automáticamente a partir de una selección inicial de todos los valores por parte del usuario, hasta producir un ajuste óptimo de los valores calculados con los observados. El programa permite calibrar los parámetros asociados con:

- Las pérdidas por infiltración
- Los métodos de transformación de la lluvia en escorrentía
- El flujo base y
- El tránsito de caudales desde las subcuencas localizadas aguas arriba del sitio de donde proviene el registro.

Las funciones objetivo que utiliza HMS para la calibración son las siguientes (consultar la ayuda del programa):

- Ajuste ponderado por mínimos cuadrados
- Sumatoria del cuadrado de los residuos (no ponderada)
- Suma de los valores absolutos de los residuos
- Porcentaje de error respecto al caudal pico

HMS emplea dos métodos de búsqueda y aproximación a los valores óptimos: El método del gradiente univariado que cambia un parámetro por iteración y el método de Nelder & Mead que los cambia todos en una misma iteración. Aunque el segundo suele ser más dispendioso, por lo general parece aproximar a un mejor valor del óptimo. Por otro lado, existen restricciones o rangos para los valores de los parámetros con el fin de evitar que se produzcan respuestas poco razonables en la optimización (consultar la ayuda del programa).

Para evaluar la confiabilidad de los resultados de la calibración se utiliza una medida de la sensibilidad de la función objetivo respecto a los parámetros. La función objetivo se calcula cambiando el valor de uno de los parámetros ya optimizados entre 0.995 y 1.005 veces su óptimo, mientras todos los demás se conservan invariantes. La medida de sensibilidad es el

cambio en porcentaje del valor de la función objetivo como resultado del cambio en 1% del óptimo del parámetro.

La validación de los resultados del modelo después de calibrados los parámetros se hace directamente con la simulación del programa al cual se le introduce un registro de precipitación de verificación y se compara la hidrógrafa de salida calculada con la registrada para el mismo evento.

## **V.7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS QUE OFRECE EL HEC-HMS**

Los resultados más importantes del programa HEC-HMS son:

- Los caudales máximos de la hidrógrafa considerada.
- Los tiempos al pico de dichos caudales.
- La forma general de la hidrógrafa considerada.

La interpretación de los resultados depende de la confiabilidad misma de la información suministrada al programa. Si se cuenta con poca información, no es posible decidir si los valores de caudales y tiempos se subestiman o se sobreestiman y esto repercute directamente en la confiabilidad de la forma de la hidrógrafa de salida.

Cuando se modelan situaciones futuras que incluyen proyectos de ingeniería como presas o derivaciones, entonces los resultados deben estar apoyados en un trabajo previo de optimización y validación con base en la información disponible. Una vez alcanzado este punto, los resultados se deben interpretar a la luz de los efectos que tendrían diferentes configuraciones de las obras proyectadas dentro de la cuenca (simulación de múltiples escenarios).

Ante todo se debe tener presente que el modelo simula una condición extrema de máximos caudales liberados en corto tiempo (hablando en términos de horas o pocos días) para un patrón de tormenta definido como crítico. Así que sus resultados no dicen mucho acerca del comportamiento diario de la corriente o de los caudales de la cuenca (es decir que no se pueden utilizar para definir reglas de operación de obras de ingeniería o para predecir los

efectos de inundación causados por lluvias de moderada o baja intensidad actuando de continuo por varias semanas o meses).

Son útiles en cambio para hacerse a una idea de las magnitudes de caudal que puede llegar manejar una corriente en cortos períodos, de los tiempos de respuesta para sistemas de alerta contra inundaciones o desbordamientos aguas abajo (en poblaciones o distritos de riego), y de los volúmenes libres que deben mantenerse en los embalses para amortiguar los efectos de las crecientes.

# **Capítulo VI**

## **CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO HEC – HMS EN LA CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA**

## VI.- CALIBRACIÓN Y APLICACIÓN

### VI.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA TOLOMOSA

#### VI.1.1. Ubicación Geográfica de la Cuenca de Aporte

Geográficamente la cuenca principal de aporte se ubica en las comunidades de San Jacinto Sud, Pinos, Calderillas y Tolomosa próximas a la ciudad de Tarija, a una distancia media de 15 km de la ciudad de Tarija.

El punto de estudio para la calibración del modelo corresponde al cierre de la presa San Jacinto, ubicado en las siguientes coordenadas:

LATITUD= 21°35'53.55''S	LONGITUD= 64°44'25.93'' w	GOOGLE EARTH
LATITUD= 21°35'53.2''S	LONGITUD= 64°43'10.03''O	CARTA IGM

Altura: 1,860 m.s.n.m.

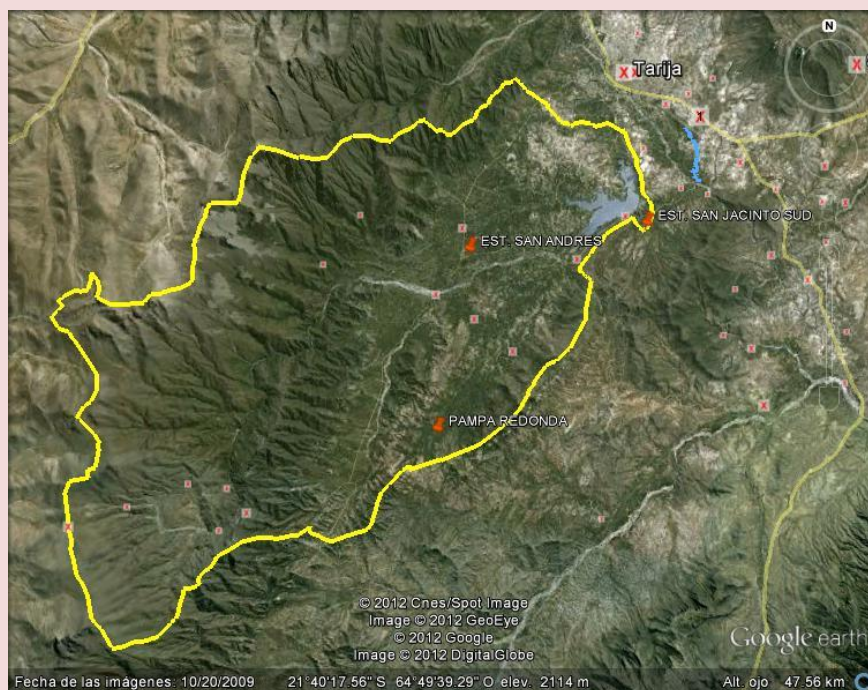
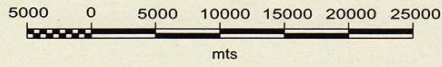
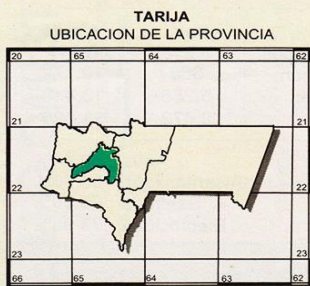
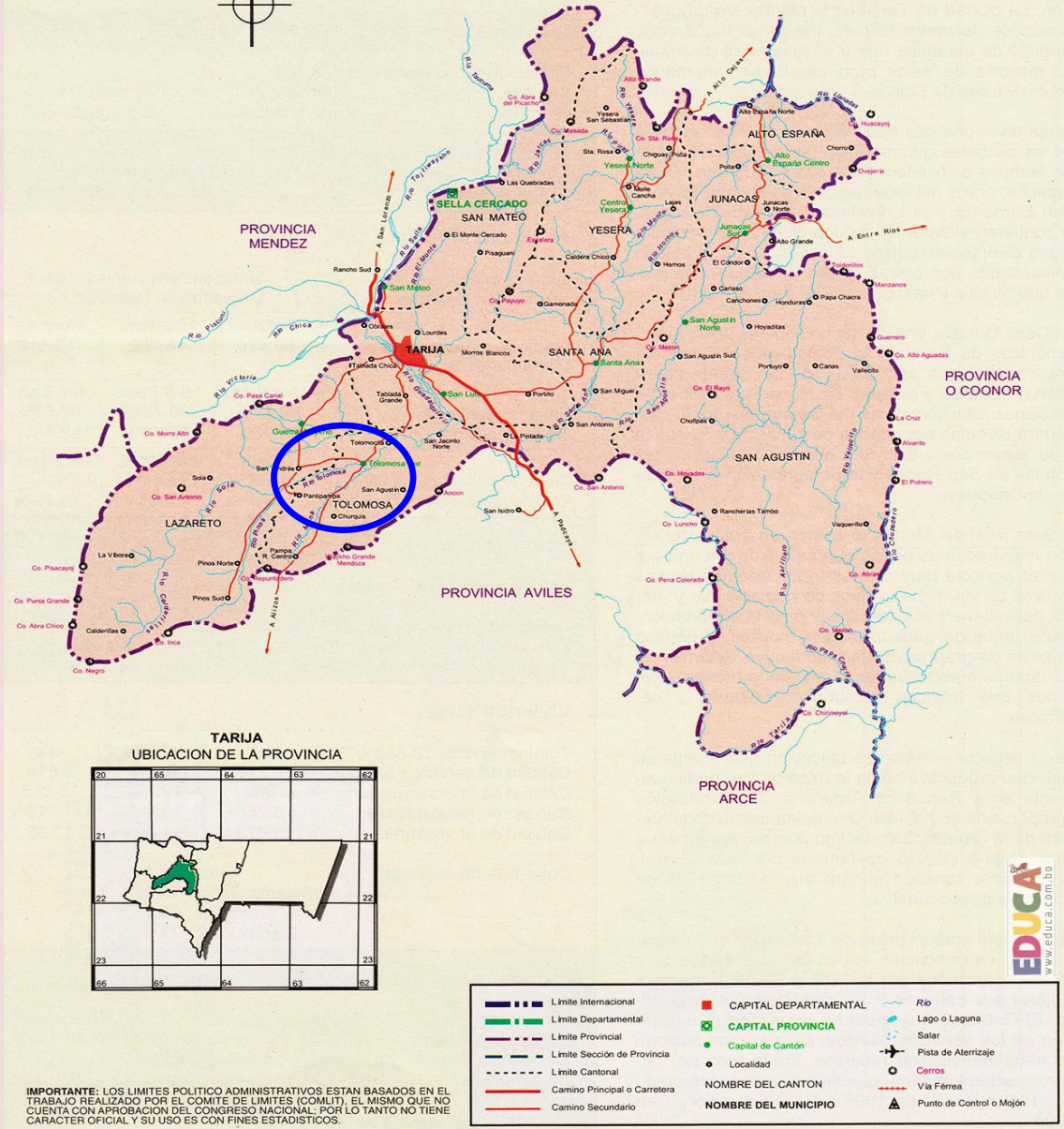
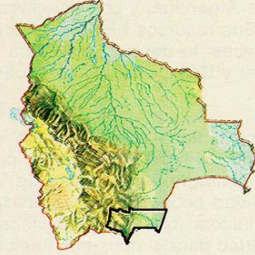


Fig. N°27. Ubicación cuenca hidrología Tolomosa

# Provincia CERCADO



BOLIVIA  
UBICACION DEL DEPARTAMENTO



**IMPORTANTE:** LOS LIMITES POLITICO ADMINISTRATIVOS ESTAN BASADOS EN EL TRABAJO REALIZADO POR EL COMITÉ DE LIMITES (COMLIT), EL MISMO QUE NO CUENTA CON APROBACION DEL CONGRESO NACIONAL, POR LO TANTO NO TIENE CARACTER OFICIAL Y SU USO ES CON FINES ESTADISTICOS.

	Límite Internacional		CAPITAL DEPARTAMENTAL		Río
	Límite Departamental		CAPITAL PROVINCIA		Lago o Laguna
	Límite Provincial		CAPITAL DE CANTÓN		Salar
	Límite Sección de Provincia		Localidad		Pista de Aterrizaje
	Límite Cantonal		NOMBRE DEL CANTÓN		Cerros
	Camino Principal o Carretera		NOMBRE DEL MUNICIPIO		Vía Férrea
	Camino Secundario				Punto de Control o Mojón



Fig. N°28. Ubicación de la Zona de Estudio



**Fig. N°29. Ubicación**

La cuenca del LAGO SAN JACINTO, constituye uno de los principales afluentes de la cuenca del río Guadalquivir, desembocando sus aguas en la parte baja del Valle Central de Tarija.

La cuenca limita al norte con el río Tolomosa, al Sud con la 2da Sección de Avilés, al este con la 1° Sección de Avilés y al oeste con la 2° Sección de Avilés.

La cuenca del río Tolomosa es un afluente del Río Guadalquivir, ésta a su vez conduce sus aguas hasta la confluencia con el Río Tarija.

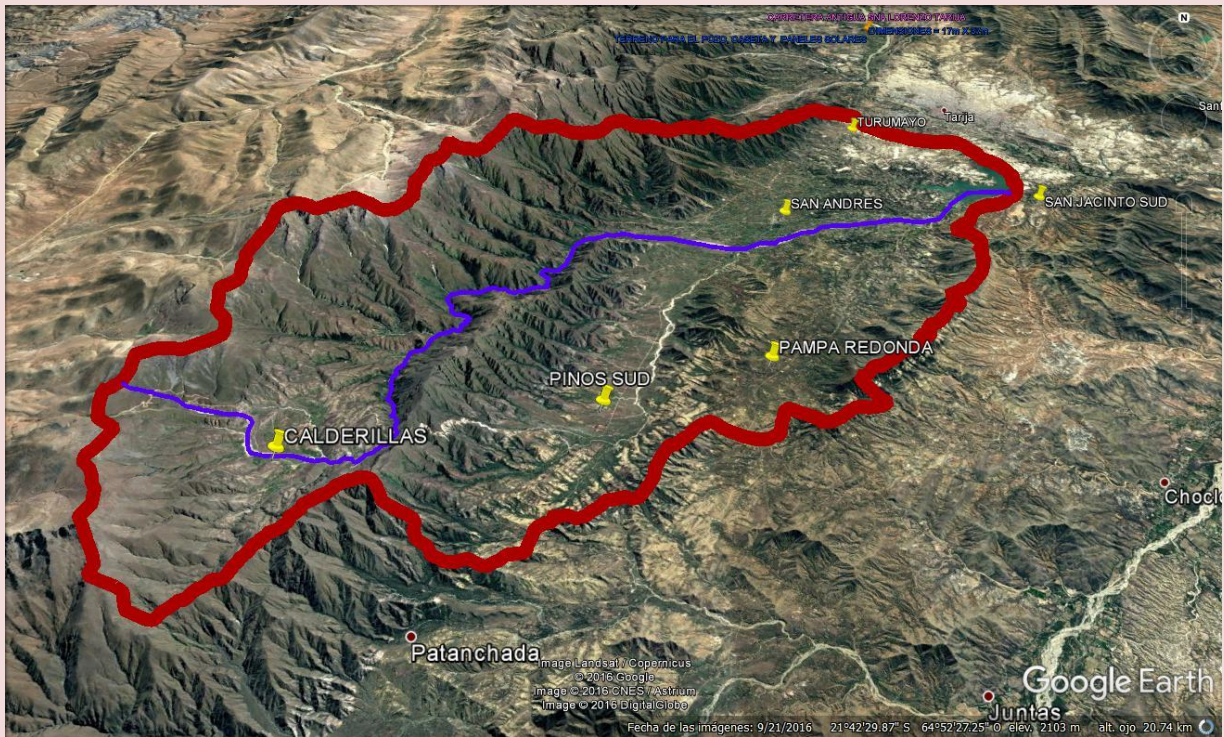
### **VI.1.2. Delimitación de la Cuenca de Aporte**

Se delimitó las cuencas en base a imágenes satelitales Google Earth, se eligió como punto de control la ubicación de cierre de la presa.

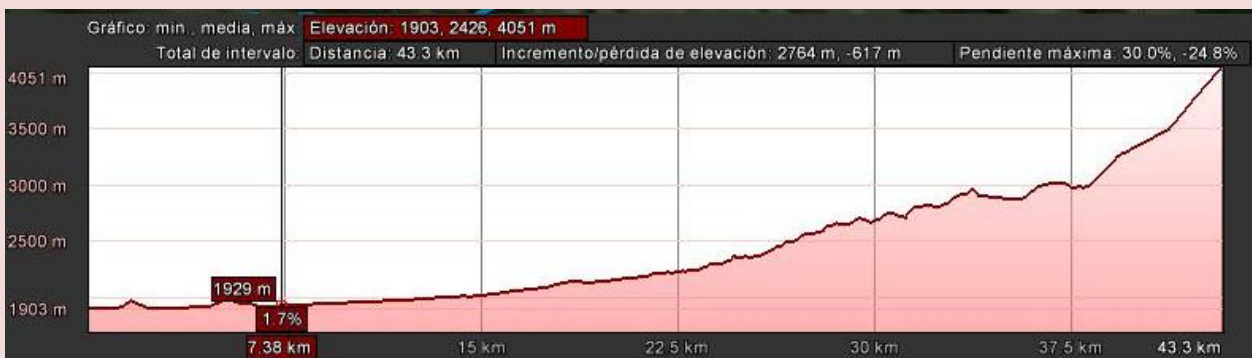
La delimitación de la cuenca también se la realizó un una carta topográfica ubicando los puntos más altos mediante las curvas de nivel siguiendo las cotas más altas y observando que todas las aguas caigan dentro de la cuenca a ser delimitada. La cuenca del río



Tolomosa se encuentra en las cartas **6629 II, 6629 III y 6628 IV** correspondiente a la comunidad de Tolomosa.



**Fig. N°30. Cuenca de Aporte**



**Fig. N°31. Perfil Longitudinal del Río Principal**



Fig. N°32. Delimitación de la cuenca en carta IGM

### VI.1.3. Caracterización Climática

Para la caracterización climática se dispone de las estaciones meteorológicas ubicada en la zona de estudio: Estación de San Andrés, Turumayo, Pampa Redonda, San Jacinto Sud, Pinos Sud, Calderillas y San Jacinto Embalse, esta última tiene pocos años de medición por lo que no es representativa; y como estación patrón se utilizaron los datos del Aeropuerto ciudad de Tarija, todas pertenecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

Los datos que se puede contar para la caracterización climática son los que se muestran en las siguientes Tablas N° 4 al N° 9.

**Tabla N° 4**

**RESUMEN CLIMATOLOGICO**

Período Considerado: 1975 - 2016

Estación: SAN ANDRES  
Provincia: CERCADO  
Departamento: TARIJA

Latitud S.: 21° 37' 24"  
Longitud W.: 64° 48' 54"  
Altura: 1.987 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	26.0	25.8	25.3	25.0	24.3	25.5	25.3	26.8	26.7	26.8	26.4	26.0	25.8
Temp. Min. Media	°C	14.0	13.6	13.5	10.8	6.1	3.2	3.1	5.2	7.2	10.9	12.3	13.5	9.5
Temp. Media	°C	20.0	19.7	19.4	17.9	15.2	14.3	14.2	16.0	16.9	18.9	19.4	19.8	17.6
Temp.Max.Extr.	°C	36.0	36.0	36.0	39.0	39.0	37.0	37.0	39.0	39.0	38.0	39.0	37.0	39.0
Temp.Min.Extr.	°C	8.0	7.0	5.0	1.0	-4.0	-8.0	-10.0	-5.0	-5.0	0.0	2.0	4.0	-10.0
Dias con Helada		0	0	0	0	2	6	7	3	2	0	0	0	20
Humed. Relativa	%	71	72	73	70	62	54	51	52	53	63	67	69	63
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	4	3	2	2	2	3	4	4	5	4
Evapo. Media	mm/dia	4.06	3.98	3.30	2.87	2.63	2.56	2.97	4.11	4.56	4.56	4.54	4.17	3.69
Precipitación	mm	208.2	196.2	179.3	43.2	9.0	1.6	2.3	7.3	16.3	81.4	135.3	206.9	1087.1
Pp. Max. Diaria	mm	88.0	108.5	98.0	43.0	19.5	11.5	10.6	25.0	30.4	150.3	81.0	106.5	150.3
Dias con Lluvia		15	15	14	6	2	1	1	2	3	8	11	14	92

## Tabla N° 5

### RESUMEN CLIMATOLOGICO

Período Considerado: 1990 - 1999

Estación: SAN JACINTO EMBALSE  
 Provincia: CERCADO  
 Departamento: TARIJA

Latitud S.: 21° 36'  
 Longitud W.: 64° 42'  
 Altura: 1.800 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	23,7	22,8	21,9	21,4	21,6	20,9	21,0	22,0	22,8	24,4	23,0	23,9	22,4
Temp. Min. Media	°C	14,8	14,0	12,7	9,9	6,4	3,5	2,9	5,3	8,4	12,3	13,4	14,1	9,8
Temp. Media	°C	19,2	18,4	17,3	15,7	14,0	12,2	11,9	13,6	15,6	18,3	18,2	19,0	16,1
Temp.Max.Extr.	°C	31,0	32,0	29,0	31,5	31,5	30,5	32,0	35,0	37,0	38,0	35,0	33,0	38,0
Temp.Min.Extr.	°C	9,0	5,5	1,0	-5,0	-3,5	-8,0	-7,0	-6,0	-5,0	4,0	5,0	1,0	-8,0
Dias con Helada		0	0	0	1	2	7	8	4	1	0	0	0	23
Humed. Relativa	%	80	81	81	78	72	69	71	71	75	74	79	79	76
Evapo. Media	mm/día	5,09	4,91	4,08	4,41	4,01	3,70	3,90	4,98	5,90	6,44	5,75	5,51	4,89
Precipitación	mm	104,2	77,7	93,5	14,1	2,2	0,4	0,5	0,1	4,1	42,8	67,4	86,8	493,8
Pp. Max. 24 hrs.	mm	56,5	47,3	54,7	22,6	5,3	3,4	4,3	0,5	12,5	32,5	41,4	44,5	56,5
Dias con Lluvia		14	10	13	3	1	0	0	0	1	6	8	11	67
Velocidad del viento	km/hr	2,7	2,7	2,6	2,5	2,7	2,7	3,1	3,1	3,3	3,3	3,2	2,9	3,3
Direccion del viento		SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE

### RESUMEN PLUVIOMETRICO ( mm )

Periodo considerado 1966 - 1994

Estación: PAMPA REDONDA  
 Provincia: CERCADO  
 Departamento: TARIJA

Lat. S.: 21° 42'  
 Long. W.: 64° 49'  
 Altura: 1,950 m.s.n.m.

VALOR	PRECIPITACION (mm)			PREC.MAX. Diaria (mm)		DIAS CON LLUVIA		
	MAXIMA	MEDIA	MINIMA	MAXIMA	MEDIA	MAXIMA	MEDIA	MINIMA
ENERO	306,0	169,0	77,5	129,0	40,3	25	14	6
FEBRERO	277,5	170,4	71,3	81,0	37,8	24	14	6
MARZO	350,0	138,0	14,5	95,0	36,8	29	12	2
ABRIL	180,0	56,1	9,0	144,0	27,3	10	5	2
MAYO	37,5	8,1	0,0	36,0	6,5	4	2	0
JUNIO	20,0	3,3	0,0	20,0	2,8	4	1	0
JULIO	22,5	2,6	0,0	13,5	1,8	4	1	0
AGOSTO	84,0	9,5	0,0	33,5	5,6	6	2	0
SEPTIEMBRE	65,0	12,5	0,0	22,0	6,1	6	3	0
OCTUBRE	165,5	61,5	5,5	76,0	25,2	15	7	2
NOVIEMBRE	180,0	98,9	7,0	85,5	33,4	14	9	2
DICIEMBRE	263,5	175,2	58,0	85,0	43,3	24	13	2
TOTAL		<b>905,3</b>				165	<b>82</b>	22
MAXIMA				<b>144,0</b>				
MEDIA								

### Tabla N° 6

#### RESUMEN CLIMATOLOGICO

Período Considerado: 1975 - 2016

Estación: SAN JACINTO SUD  
Provincia: CERCADO  
Departamento: TARIJA

Latitud S.: 21° 36' 37"  
Longitud W.: 64° 43' 12"  
Altura: 1.820 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	27.4	27.4	27.5	27.2	26.9	25.9	25.7	27.0	26.8	27.9	27.8	27.9	27.1
Temp. Min. Media	°C	13.8	13.2	12.8	10.2	5.6	2.1	1.9	3.8	6.7	10.7	12.6	13.6	8.9
Temp. Media	°C	20.6	20.3	20.2	18.7	16.2	14.0	13.8	15.4	16.8	19.3	20.2	20.8	18.0
Temp.Max.Extr.	°C	39.5	40.0	45.5	43.0	42.5	38.0	39.0	42.0	41.5	42.0	39.0	40.0	45.5
Temp.Min.Extr.	°C	5.0	1.0	4.0	0.0	-5.0	-8.0	-10.0	-12.5	-5.0	0.5	2.0	1.5	-12.5
Dias con Helada		0	0	0	0	2	9	10	6	1	0	0	0	29
Humed. Relativa	%	70	74	73	68	60	56	55	55	57	59	63	68	63
Nubosidad Media	Octas	6	5	5	5	3	3	3	3	4	5	5	5	4
Evapo. Media	mm/dia	4.98	5.15	4.71	4.43	3.80	3.46	4.32	5.03	6.04	6.91	6.28	5.83	5.08
Precipitación	mm	113.8	107.3	99.5	19.9	2.6	0.2	0.8	2.9	9.5	43.5	78.3	117.0	595.3
Pp. Max. Diaria	mm	110.5	82.0	100.0	48.5	21.5	3.4	15.1	21.0	32.5	59.0	80.5	71.0	110.5
Dias con Lluvia		12	10	10	3	1	0	0	1	2	6	9	11	65
Velocidad del viento	km/hr	12.0	12.5	12.0	12.4	12.8	12.8	14.1	14.2	14.4	15.3	13.3	13.3	13.3
Direccion del viento		E	E	S	S	E	E	E	E	E	E	E	S	E

### Tabla N° 7

#### RESUMEN CLIMATOLOGICO

Período Considerado: 1999 - 2015

Estación: TURUMAYO  
Provincia: CERCADO  
Departamento: TARIJA

Latitud S.: 21° 33' 24"  
Longitud W.: 64° 46' 42"  
Altura: 1.978 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	26.7	26.5	26.3	25.7	24.9	25.2	25.1	26.9	27.2	27.6	27.4	27.3	26.4
Temp. Min. Media	°C	14.5	14.4	14.2	11.7	7.0	4.1	3.3	5.2	7.9	12.7	13.3	14.6	10.3
Temp. Media	°C	20.6	20.4	20.3	18.7	15.9	14.7	14.2	16.1	17.6	20.2	20.4	21.0	18.3
Temp.Max.Extr.	°C	36.0	37.0	37.0	36.0	37.0	35.0	37.0	38.0	39.0	40.0	38.0	38.0	40.0
Temp.Min.Extr.	°C	8.0	8.5	6.0	1.0	-4.0	-8.0	-9.0	-5.0	-2.5	2.0	3.0	5.0	-9.0
Dias con Helada		0	0	0	0	1	5	7	4	1	0	0	0	18
Humed. Relativa	%	71	73	74	72	66	58	56	57	59	63	65	71	65
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	5	3	3	3	3	3	4	4	5	4
Evapo. Media	mm/dia	3.88	3.37	2.99	2.56	2.15	2.13	2.38	3.30	3.95	4.14	4.61	3.95	3.28
Precipitación	mm	170.9	163.7	128.8	26.5	3.9	1.5	0.6	1.6	10.8	55.0	93.3	153.9	810.6
Pp. Max. Diaria	mm	99.0	102.1	80.8	24.0	12.0	5.5	4.2	4.0	28.0	62.0	61.5	71.5	102.1
Dias con Lluvia		15	13	11	5	1	1	0	1	2	8	10	13	80
Velocidad del viento	km/hr	8.0	7.4	8.0	7.7	8.1	8.0	8.3	8.8	9.3	9.2	8.6	8.5	8.3
Direccion del viento		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

## Tabla N° 8

### RESUMEN PLUVIOMETRICO ( mm )

Periodo considerado 1965 - 2016

Estación: PINOS SUD  
 Provincia: CERCADO  
 Departamento: TARIJA

Lat. S.: 21° 44'  
 Long. W.: 64° 53'  
 Altura: 2,100 m.s.n.m.

VALOR	PRECIPITACION (mm)			PREC.MAX. Diaria (mm)		DIAS CON LLUVIA			NUBOSIDAD MEDIA
	MAXIMA	MEDIA	MINIMA	MAXIMA	AÑO	MAXIMA	MEDIA	MINIMA	
ENERO	549.7	232.0	80.2	146.0	2000	26	16	7	4
FEBRERO	416.4	229.7	32.3	84.0	2007	23	15	4	4
MARZO	421.8	188.5	27.3	102.0	1980	26	14	3	4
ABRIL	134.2	48.9	10.0	72.0	2004	12	6	1	3
MAYO	62.3	10.1	0.0	29.5	1996	8	2	0	2
JUNIO	32.0	3.5	0.0	32.0	1972	4	1	0	1
JULIO	26.4	2.2	0.0	12.0	1979	6	1	0	1
AGOSTO	55.2	7.5	0.0	40.7	1979	5	2	0	1
SEPTIEMBRE	54.8	18.5	0.0	26.0	2004	8	3	0	2
OCTUBRE	172.7	60.0	13.1	60.4	1978	17	7	2	3
NOVIEMBRE	340.4	126.0	26.8	88.7	1993	17	11	3	3
DICIEMBRE	381.0	191.9	58.1	135.2	1991	24	14	6	4
TOTAL	2646.9	<b>1118.8</b>	247.8			176	<b>91</b>	26	
MAXIMA				<b>146.0</b>					
MEDIA									3

**Tabla N° 9**

**RESUMEN CLIMATOLOGICO**

Período Considerado: 1962 - 2016

Estación: AEROPUERTO  
 Provincia: CERCADO  
 Departamento: TARIJA

Latitud S.: 21° 32' 48"  
 Longitud W.: 64° 42' 39"  
 Altura: 1.849 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	27.0	26.7	26.3	25.6	24.7	24.0	23.8	25.3	26.0	27.5	27.5	27.3	26.0
Temp. Min. Media	°C	14.4	13.9	13.4	10.8	6.0	2.6	2.4	4.7	7.6	11.4	13.0	14.1	9.5
Temp. Media	°C	20.7	20.3	19.9	18.2	15.3	13.3	13.1	15.0	16.8	19.5	20.2	20.7	17.8
Temp.Max.Extr.	°C	36.0	37.4	37.0	37.4	36.2	34.2	36.0	36.5	39.0	39.3	39.0	38.8	39.3
Temp.Min.Extr.	°C	6.0	4.0	5.0	-2.0	-5.2	-7.7	-7.8	-9.5	-4.2	1.0	3.0	5.0	-9.5
Dias con Helada		0	0	0	0	2	9	9	4	1	0	0	0	24
Humed. Relativa	%	67	68	68	65	59	54	52	50	50	54	59	63	59
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	4	3	3	2	2	3	5	5	6	4
Insolación Media	Hrs	5.2	6.0	6.0	6.6	6.7	7.8	8.1	8.5	8.0	6.7	5.9	4.7	6.7
Presion Barometrica	hPa	813.8	814.3	814.2	814.1	814.4	814.1	814.3	814.3	814.2	813.7	813.5	813.5	814.0
Precipitación	mm	134.9	112.2	84.6	21.3	2.3	0.7	0.6	2.0	7.2	37.0	70.4	131.7	604.8
Pp. Max. Diaria	mm	97.8	74.7	83.3	50.0	25.6	22.0	20.0	34.0	23.0	59.0	125.0	106.0	125.0
Dias con Lluvia		13	11	9	4	1	0	0	1	2	5	9	12	67
Velocidad del viento	km/hr	5.6	5.2	5.2	5.3	4.6	4.1	5.0	6.5	8.1	8.3	7.7	6.5	6.0
Direccion del viento		SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE

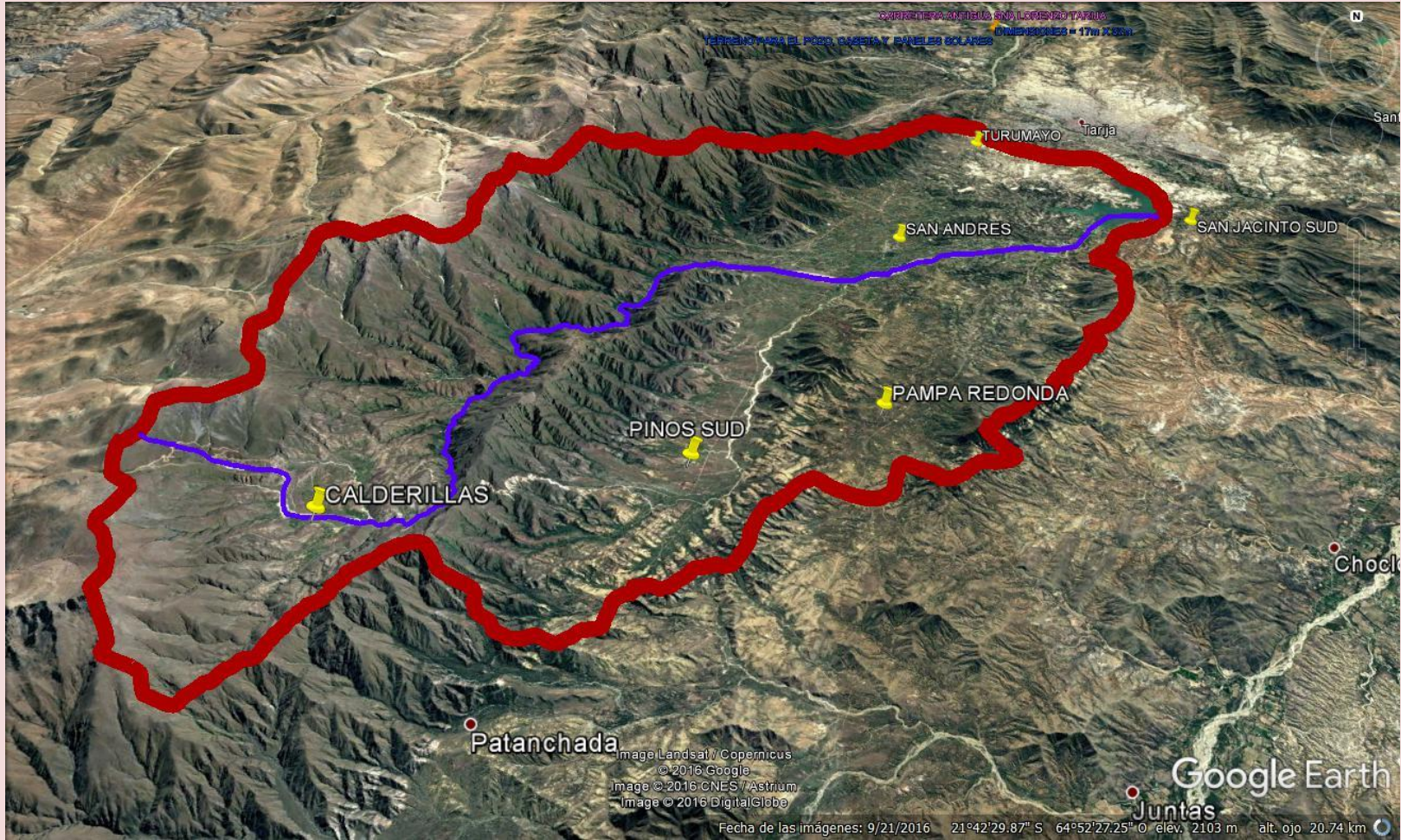


Fig. N°33. Ubicación De Estacione Pluviométricas y Climatológicas



## VI.1.4. PROPIEDADES DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

### VI.1.4.1. Área

El área de la cuenca está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

#### CUENCA PRINCIPAL HASTA EL PUNTO DE ESTUDIO

<b>CUENCAS EN ESTUDIO</b>	<b>AREA Km2</b>	<b>AREA Ha</b>
<b>CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA HASTA EL PUNTO DE CONTROL</b>	437,61	43.761,34

### VI.1.4.2. Perímetro

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca, usualmente este parámetro físico es simbolizado por la mayúscula P.

El perímetro medida para las cuencas de aporte es:

	<b>PERÍMETRO Km</b>
<b>CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA HASTA EL PUNTO DE CONTROL</b>	<b>101,61</b>

### VI.1.4.3. Longitud del Río Principal

La longitud, L, de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (punto de control) y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

La longitud del río principal para la cuenca de aporte es:

CUENCAS EN ESTUDIO	LONGITUD DEL RÍO PRINCIPAL km
CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA HASTA EL PUNTO DE CONTROL	44.80

### VI.1.4.5. Índice de Compacidad o Gravelius

Determina la forma de la cuenca y su influencia en la mayor o menor facilidad que tiene una cuenca para evacuar las aguas de lluvia.

$$K_C = 0.28 * \frac{P_{est.}}{\sqrt{A}}$$

Kc =

**Índice de Compacidad o Gravelius**

Pest = 101,61 km

Perímetro estilizado de la cuenca

A = 437,61 km<sup>2</sup>

Área de la cuenca

**Kc = 1,36**

### VI.1.4.6. Índice de Pendiente Global

Nos indica la pendiente media del río principal.

Se lo calcula con la siguiente expresión:

$$IG = H/L$$

IG = Índice de pendiente global

Cota máxima de la cuenca 3941,00 m.s.n.m.

Cota mínima de la cuenca 1887,00 m.s.n.m.

H = 2054,00 m Desnivel total de la cuenca

L = 4480,00 m Longitud del río principal

$$IG = 0,0458$$

$$IG = 4,58 \%$$

#### IV.1.4.7. Tiempo de Concentración (Tc)

**Datos:**

Area de la Cuenca  
 Longitud del rio o curso principal  
 Cota max =  
 Cota min =  
 Desnivel Máximo del curso de agua más largo  
 Pendiente media del rio

A =	437.61	Km2
L =	44.80	Km
Hmax =	3941.00	m.s.n.m.
H min =	1887.00	m.s.n.m.
H =	2054.00	m
J =	0.05	m/m

**FORMULA DE GIANDOTTI**

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * J * L}$$

Tc =	2.90	hrs
------	------	-----

**FORMULA CALIFORNIANA**

$$T_c = 0.066 \left( \frac{L}{\sqrt{J}} \right)^{0.77}$$

Tc =	4.04	hrs
------	------	-----

**FORMULA VENTURA Y HERAS**

$$T_c = 0.05 \left( \frac{A}{\sqrt{J}} \right)$$

Tc =	4.88	hrs
------	------	-----

**FORMULA CHEREQUE**

$$t_c = \left( 0.871 * \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Tc =	4.06	hrs
------	------	-----

**FORMULA DE KIRPICH**

tc = 

--

 hr  
 L = 

44800.00
----------

 m  
 S = 

0.05
------

 m/m

$$t_c = \left( 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)$$

Tc =	4.06	hrs
------	------	-----

**ANALISIS:**

Tomando el promedio de las formulas que dan resultados parecidos:

**PROMEDIO:**

<b>Tc = 4.05 Hrs.</b>
-----------------------

## Tiempo de Retardo

### c) Fórmula del Tiempo de Retardo

$$t_c = L^{0.3} * (d+1)^{0.7} / (735 * S^{-0.5})$$

donde:

$t_c$  = tiempo de retardo en horas

$L$  = longitud máximo recorrido del agua en metros.

$S$  = pendiente de la cuenca en %

$d$  = valor de sustración en pulgadas.

El tiempo de concentración está relacionado con el tiempo de retardo por medio de la siguiente fórmula:

$$t_r = 0.6 * t_c$$

$$Tr = 2.43 \text{ Hrs.}$$

$$Tr = 146 \text{ min}$$

## VI.1.5. Análisis de Precipitaciones

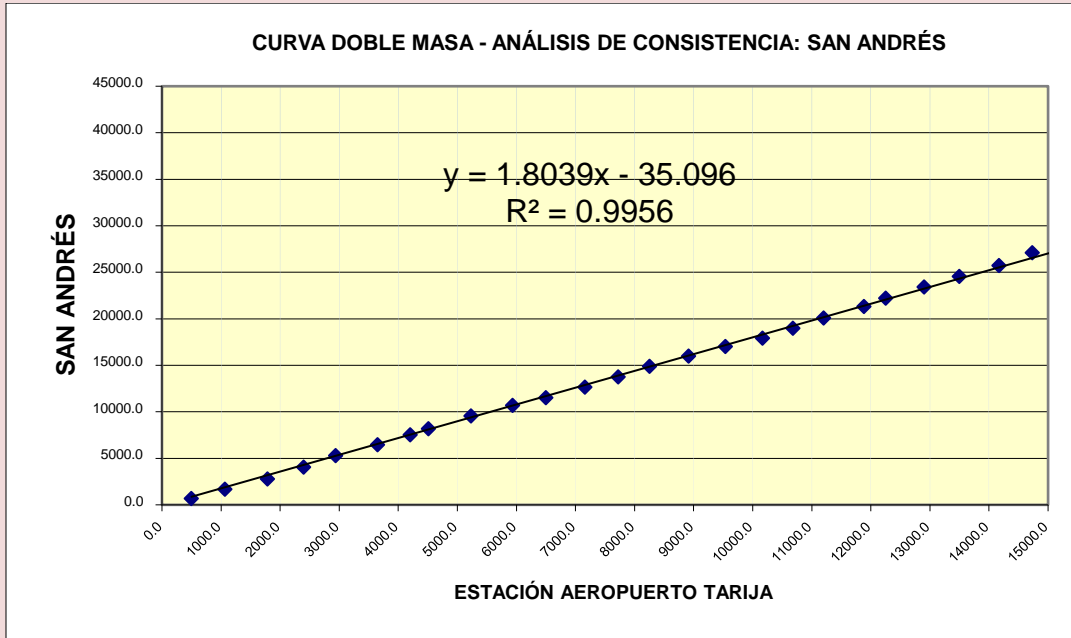
Se emplearán los datos de las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) más cercanas al lugar de estudio, de esta manera se tendrá una mayor representatividad de las lluvias en esta zona; las estaciones disponibles son:

Nº	ESTACIÓN	TIPO	PROVINCIA	Lat. S.	Long.W.	Altura m.s.n.m.	Periodo Reg.
1	San Andrés	CLI	CERCADO	21° 37' 24"	64° 48' 54"	1,987	1975-2014
2	San Jacinto Sud	PL	CERCADO	21° 36'	64° 43'	1,850	1975-2014
3	Pampa Redonda	PL	CERCADO	21° 42'	64° 49'	1,950	1966-1994
4	Pinos Sud	PL	CERCADO	21° 44'	64° 53'	2,100	1972-2014
5	Calderillas	PL	CERCADO	21° 45'	64° 57'	2800	1975-2003
6	Turumayo	CL	CERCADO	21° 33'	64° 46'	1978	1999-2016

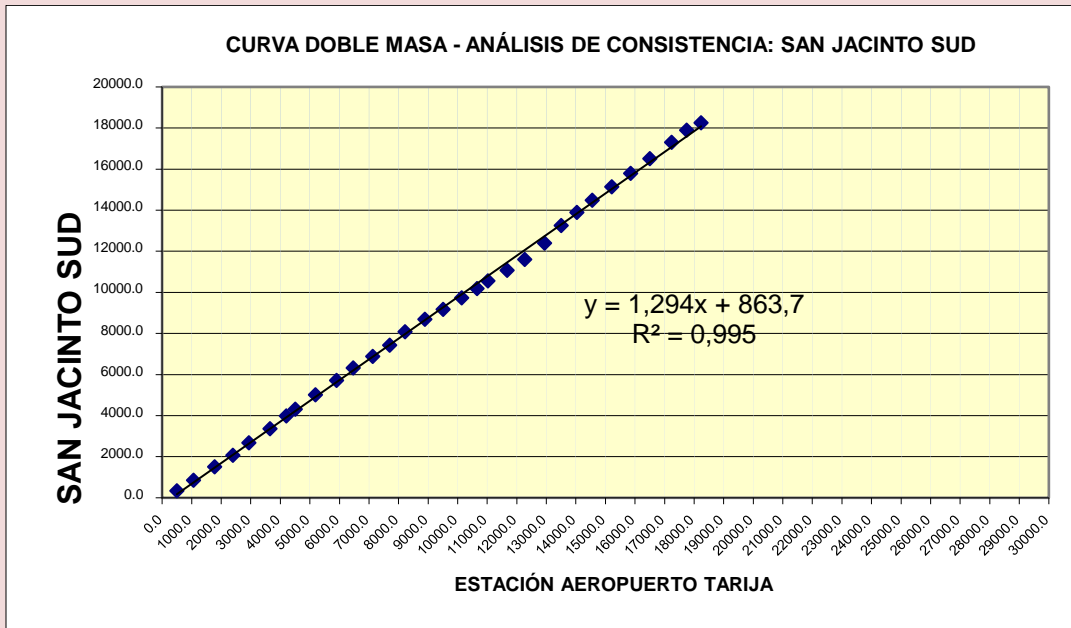
Los datos de la estación del Aeropuerto Tarija se emplearán sólo para realizar el análisis de consistencia.

### VI.1.5.1. Análisis de Consistencia

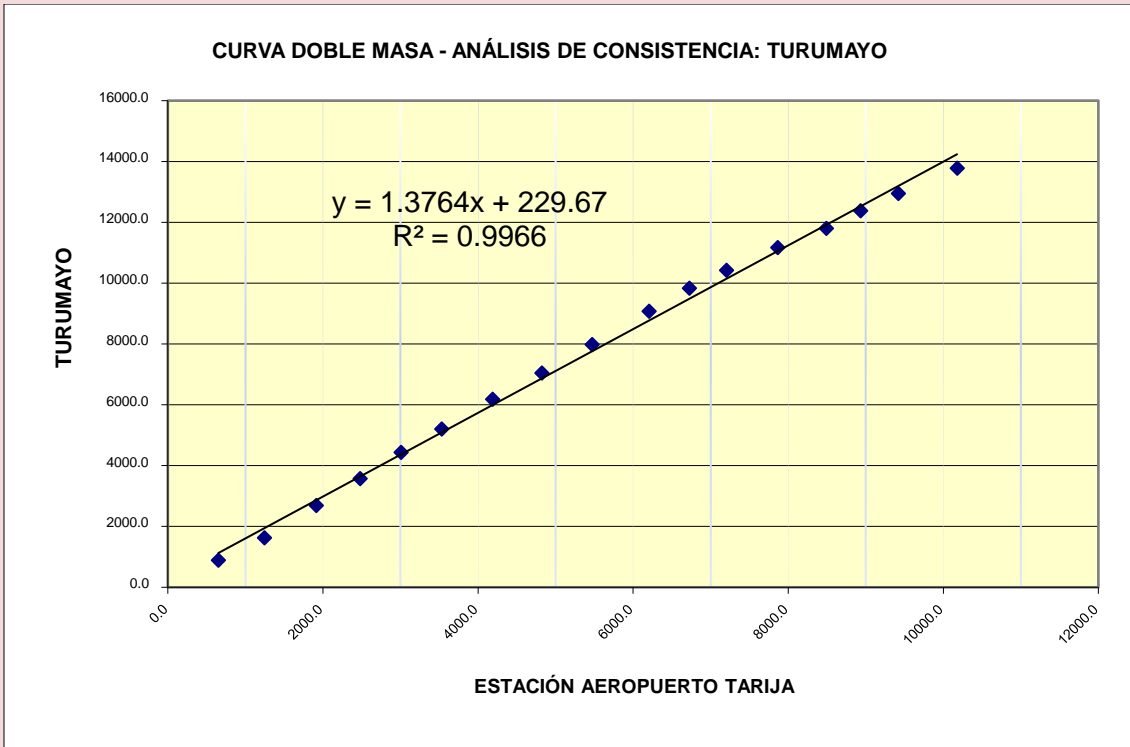
La estación Patrón es la del Aeropuerto Tarija por ser la más completa y confiable.



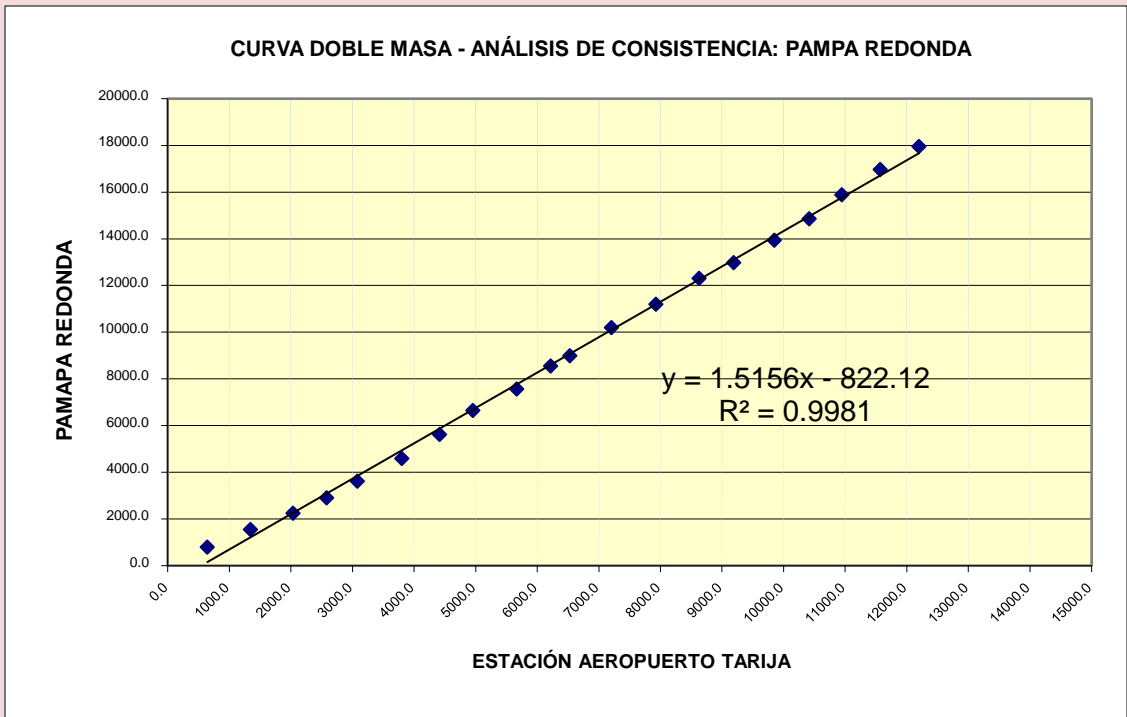
Es consistente

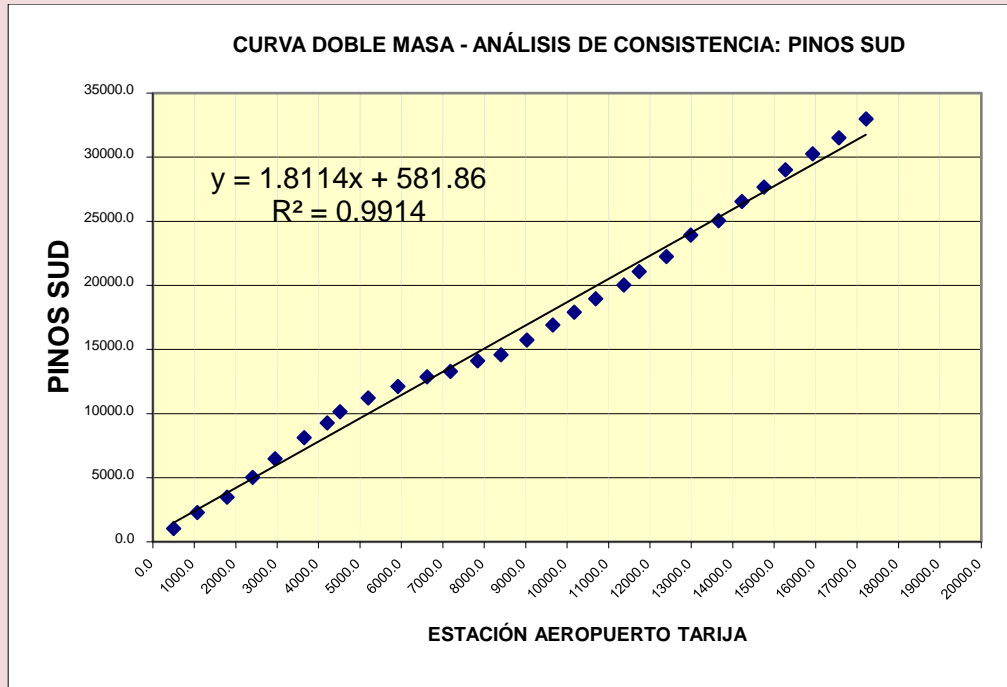


Es consistente

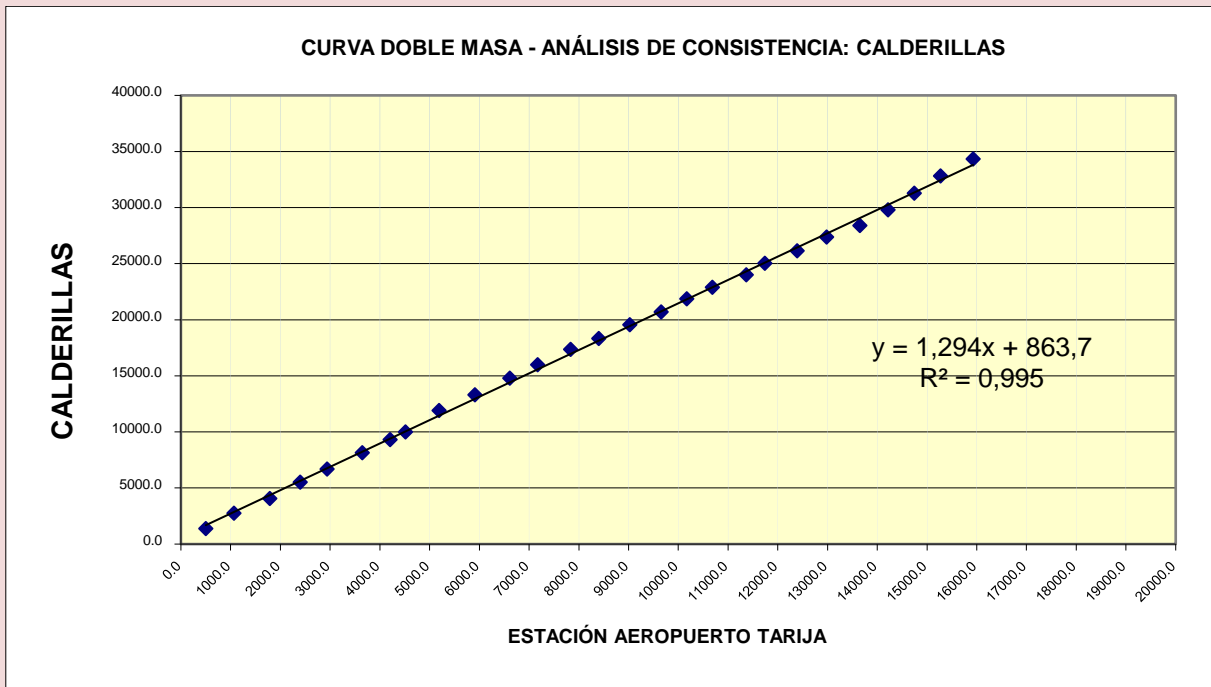


Es consistente





Es consistente

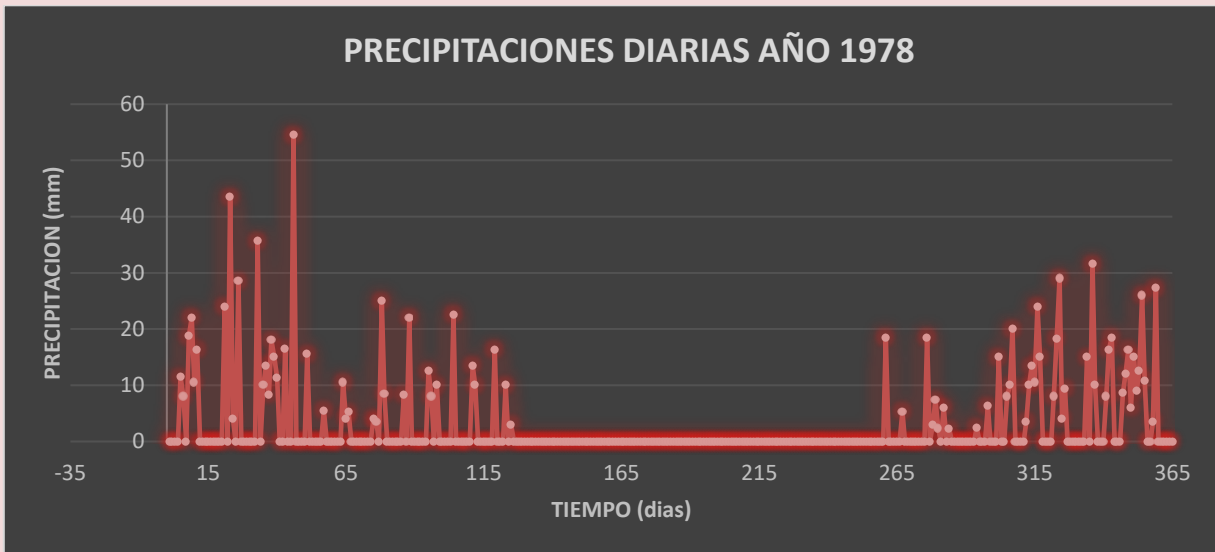


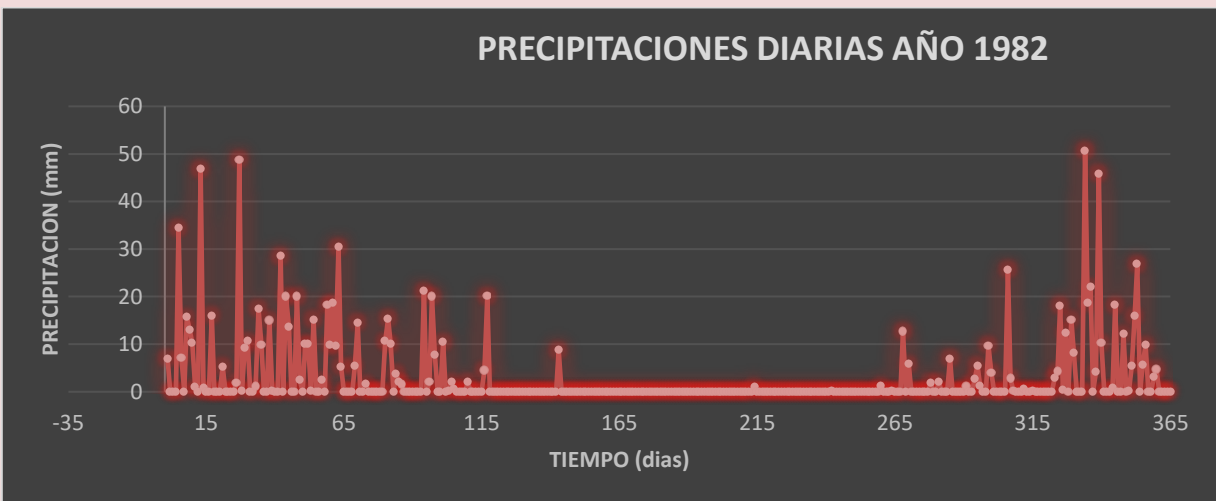
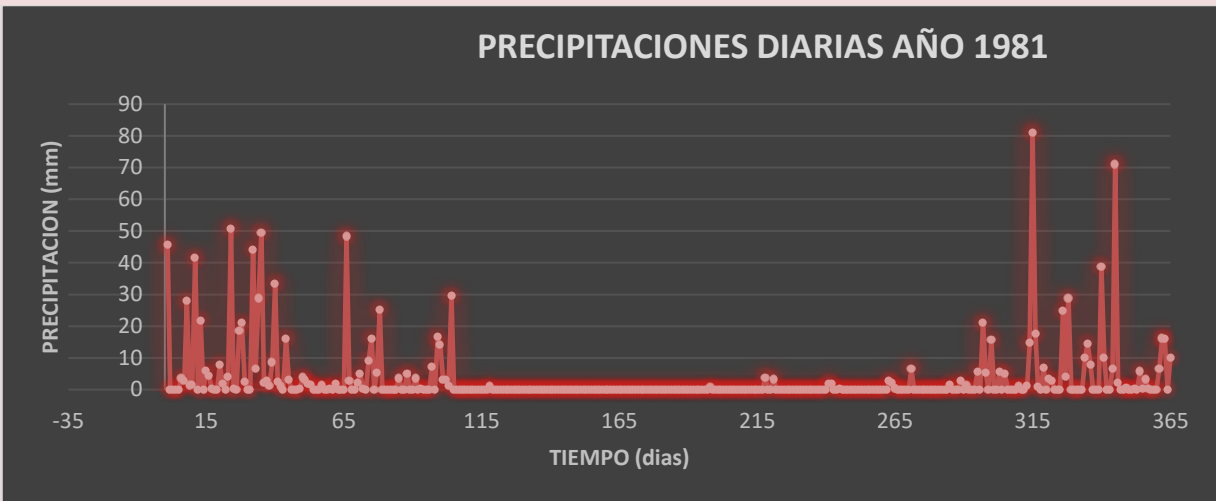
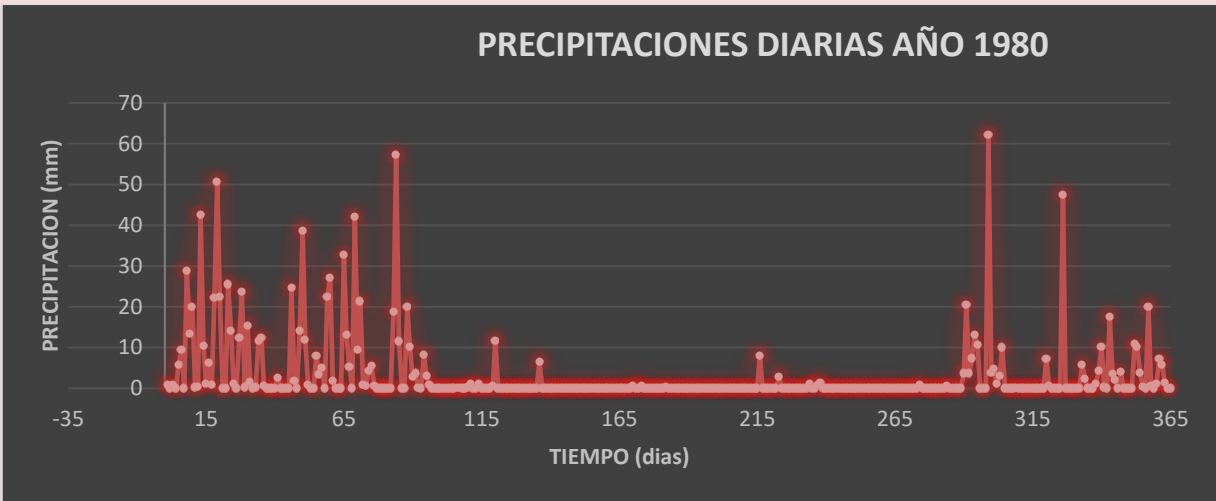
Es consistente



## VI. I.6. Precipitaciones Diarias

Se cuenta con registros de precipitaciones diarias medidas en la estación de San Andrés las cuales servirán para el proceso de calibración del modelo.





## VI.1.7. Cálculo de Precipitaciones Máximas

Para la aplicación del modelo una vez calibrado sus parámetros se calculará mediante HC – HMS caudales máximos para diferentes periodos de retorno y como dato de entrada se requiere las precipitaciones máximas para el tiempo de concentración.

### VI.1.7.1. Cálculo de Lluvias Máximas: Área de Influencia Estación San Andrés

#### MODA Y CARACTERÍSTICA

MODA:	Edp =	58.36	44.03896527	44.038965	<table border="1"> <tr> <td><math>Ed = hd - 0,45 Sd</math></td> </tr> <tr> <td><math>Kd = Sd / (0,557 * Ed)</math></td> </tr> </table>	$Ed = hd - 0,45 Sd$	$Kd = Sd / (0,557 * Ed)$
$Ed = hd - 0,45 Sd$							
$Kd = Sd / (0,557 * Ed)$							
CARACTERÍSTICA:	Kdp =	0.76	0.687833475	0.6878335			

#### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	hdT (mm)
2	71.66
5	89.24
10	102.53
20	115.83
50	133.41
100	146.71
200	160.01
500	177.58
1000	190.88

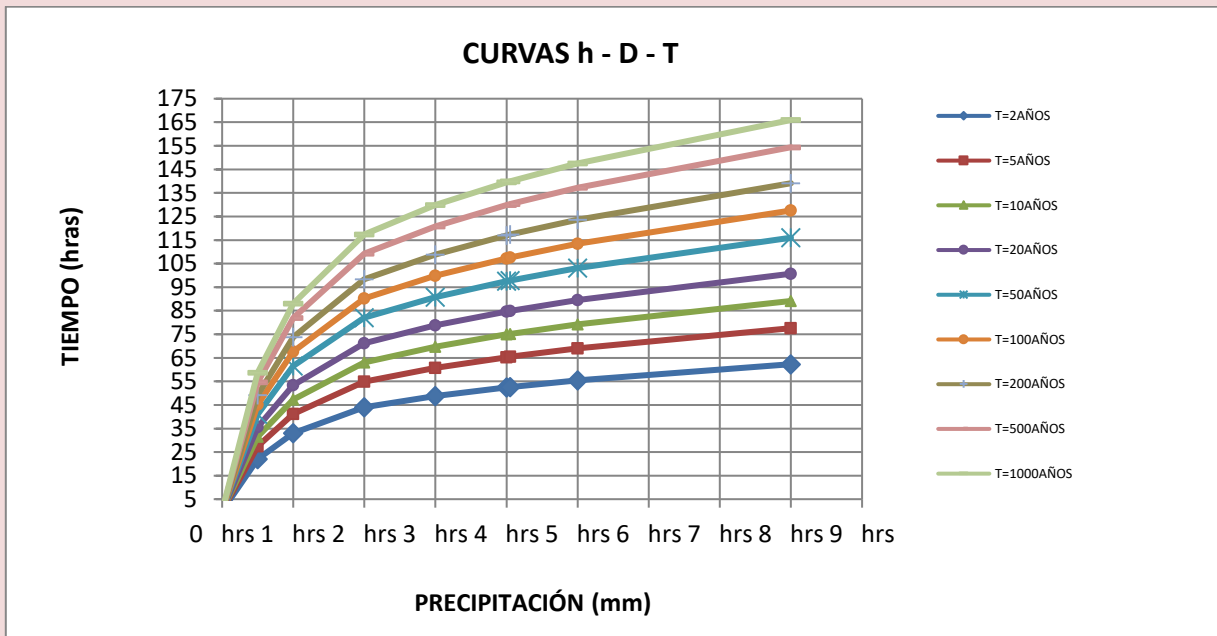
## ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	<b>14</b>	Duración de lluvia máxima característica
b =	<b>0.25</b>	Entre 0,20 a 0,3

### Altura de lluvia máxima horaria en (mm)

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)							
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs
2	0	22.03	33.04	44.05	48.75	52.39	52.55	55.39
5	0	27.43	41.15	54.86	60.71	65.24	65.44	68.98
10	0	31.52	47.28	63.04	69.76	74.96	75.20	79.26
20	0	35.61	53.41	71.21	78.81	84.69	84.95	89.54
50	0	41.01	61.51	82.02	90.77	97.54	97.84	103.13
100	0	45.10	67.65	90.19	99.82	107.26	107.59	113.41
200	0	49.18	73.78	98.37	108.86	116.98	117.35	123.69
500	0	54.59	81.88	109.18	120.82	129.83	130.24	137.28
1000	0	58.68	88.01	117.35	129.87	139.56	139.99	147.56



## VI.1.7.2. Cálculo de Lluvias Máximas: Área de Influencia Estación San Jacinto Sud

### MODA Y CARACTERÍSTICA PONDERADA

MODA:	Edp =	45.29	44.03896527	44.038965	<table border="1"> <tr> <td><math>E_d = h_d - 0,45 S_d</math></td> </tr> <tr> <td><math>K_d = S_d / (0,557 * E_d)</math></td> </tr> </table>	$E_d = h_d - 0,45 S_d$	$K_d = S_d / (0,557 * E_d)$
$E_d = h_d - 0,45 S_d$							
$K_d = S_d / (0,557 * E_d)$							
CARACTERÍSTICA:	Kdp =	0.74	0.687833475	0.6878335			

### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	hdT (mm)
2	55.42
5	68.80
10	78.92
20	89.04
50	102.42
100	112.55
200	122.67
500	136.05
1000	146.17

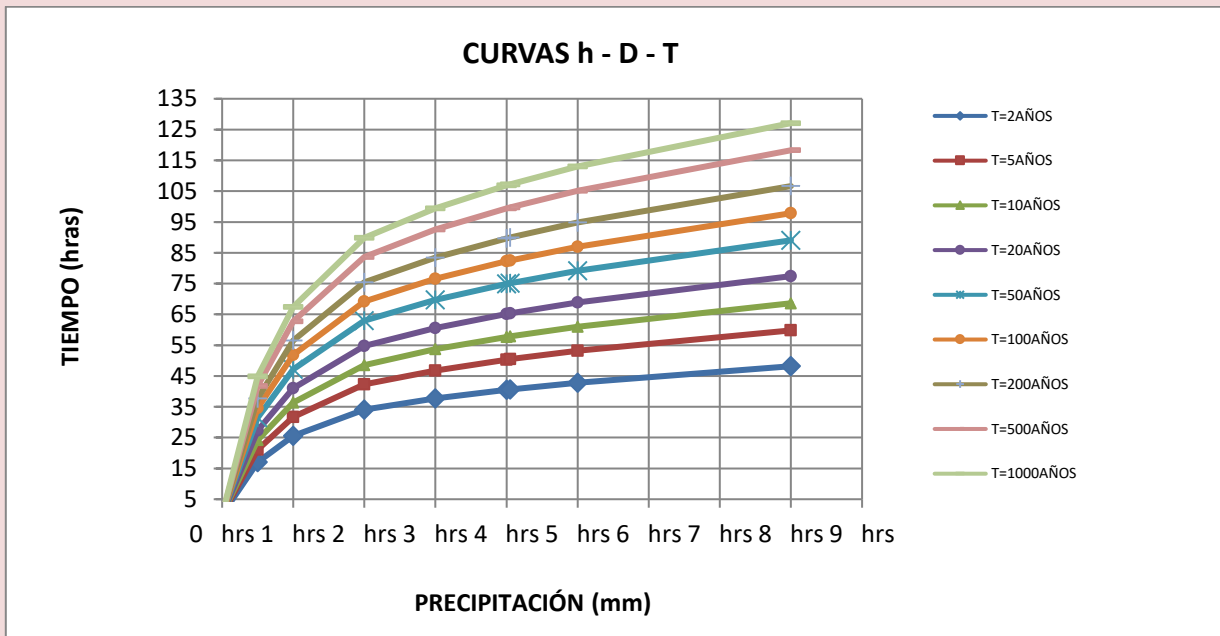
## ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	<b>14</b>	Duración de lluvia máxima característica
b =	<b>0.25</b>	Entre 0,20 a 0,3

Altura de lluvia máxima horaria en (mm)

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)							
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs
2	0	17.03	25.55	34.07	37.70	40.51	40.64	42.84
5	0	21.15	31.72	42.30	46.81	50.30	50.45	53.18
10	0	24.26	36.39	48.52	53.69	57.70	57.88	61.01
20	0	27.37	41.06	54.74	60.58	65.10	65.30	68.83
50	0	31.48	47.23	62.97	69.69	74.88	75.12	79.18
100	0	34.60	51.89	69.19	76.57	82.28	82.54	87.00
200	0	37.71	56.56	75.41	83.46	89.68	89.96	94.83
500	0	41.82	62.73	83.64	92.56	99.47	99.78	105.17
1000	0	44.93	67.40	89.86	99.45	106.87	107.20	113.00



### VI.1.7.3. Cálculo de Lluvias Máximas: Área de Influencia Estación Turumayo

#### MODA Y CARACTERÍSTICA

MODA: E<sub>dp</sub> = **59.77** 44.03896527 44.038965

CARACTERÍSTICA: K<sub>dp</sub> = **0.52** 0.687833475 0.6878335

$E_d = h_d - 0,45 S_d$
$K_d = S_d / (0,557 * E_d)$

#### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	$h_{dT}$ (mm)
2	69.12
5	81.49
10	90.84
20	100.19
50	112.55
100	121.90
200	131.25
500	143.61
1000	152.96

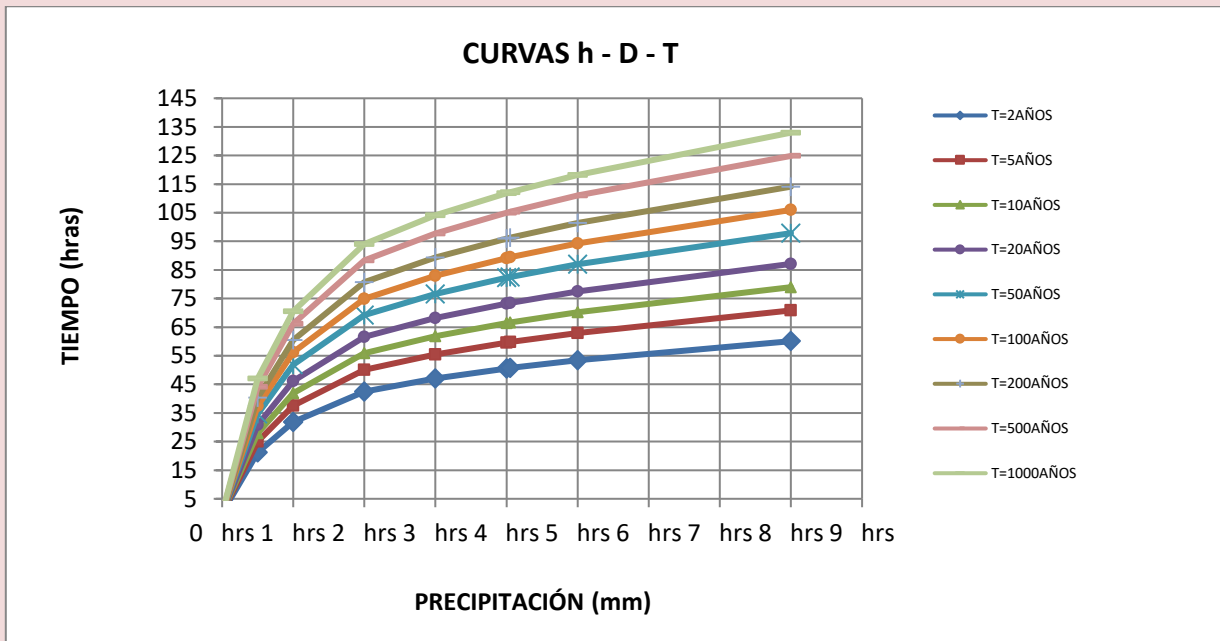
#### ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	<b>14</b>	Duracion de lluvia maxima caracteristica
b =	<b>0.25</b>	Entre 0,20 a 0,3

Altura de lluvia máxima horaria en (mm)

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)								
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs	
2	0	21.25	31.87	42.50	47.03	50.54	50.69	53.44	
5	0	25.05	37.57	50.10	55.44	59.57	59.76	62.99	
10	0	27.92	41.88	55.84	61.80	66.41	66.62	70.22	
20	0	30.80	46.20	61.59	68.16	73.25	73.48	77.45	
50	0	34.60	51.89	69.19	76.57	82.29	82.54	87.01	
100	0	37.47	56.21	74.94	82.94	89.12	89.40	94.23	
200	0	40.35	60.52	80.69	89.30	95.96	96.26	101.46	
500	0	44.15	66.22	88.29	97.71	105.00	105.32	111.02	
1000	0	47.02	70.53	94.04	104.07	111.83	112.18	118.25	





## VI.1.7.4. Cálculo de Lluvias Máximas: Área de Influencia Estación Pampa Redonda

### MODA Y CARACTERÍSTICA

MODA:	Edp =	51.82	44.03896527	44.038965	<table border="1"> <tr> <td><math>Ed = hd - 0,45 Sd</math></td> </tr> <tr> <td><math>Kd = Sd / (0,557 * Ed)</math></td> </tr> </table>	$Ed = hd - 0,45 Sd$	$Kd = Sd / (0,557 * Ed)$
$Ed = hd - 0,45 Sd$							
$Kd = Sd / (0,557 * Ed)$							
CARACTERÍSTICA:	Kdp =	1.38	0.687833475	0.6878335			

### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

#### Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	hdT (mm)
2	73.38
5	101.88
10	123.44
20	145.00
50	173.50
100	195.06
200	216.62
500	245.12
1000	266.68

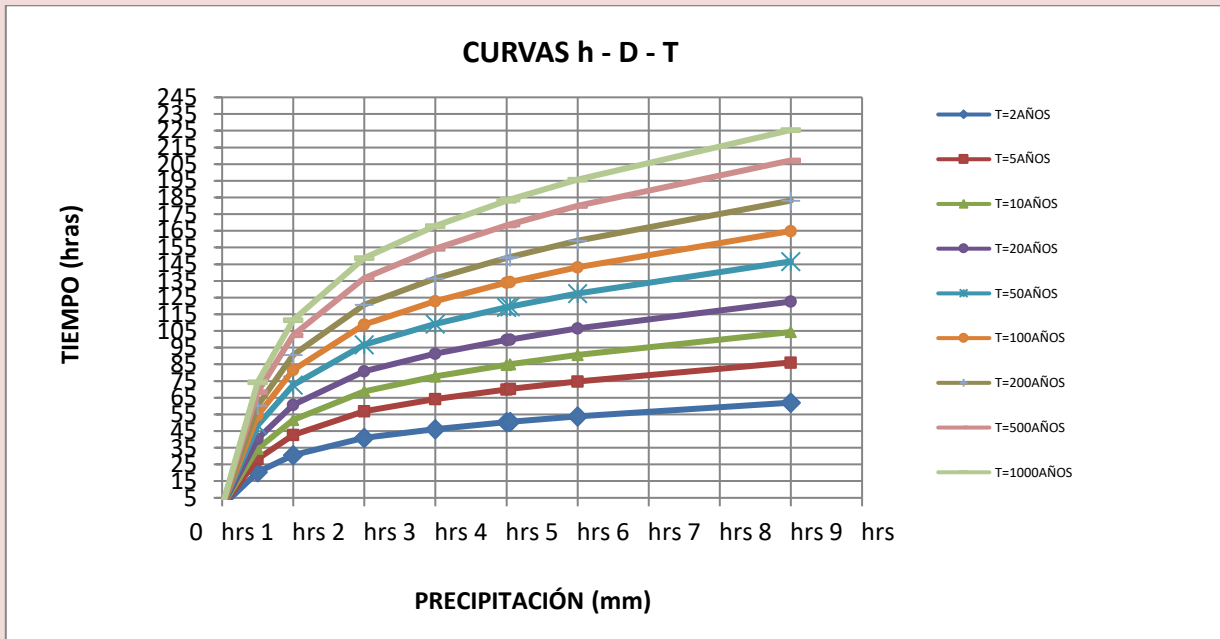
### ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	14	Duracion de lluvia maxima caracteristica Entre 0,20 a 0,3
b =	0.3	

Altura de lluvia máxima horaria en (mm)

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)								
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs	
2	0	20.47	30.70	40.93	46.23	50.39	50.58	53.88	
5	0	28.41	42.62	56.83	64.18	69.96	70.23	74.81	
10	0	34.43	51.64	68.85	77.76	84.77	85.09	90.64	
20	0	40.44	60.66	80.88	91.34	99.58	99.95	106.47	
50	0	48.39	72.58	96.78	109.29	119.15	119.59	127.40	
100	0	54.40	81.60	108.80	122.88	133.95	134.45	143.23	
200	0	60.41	90.62	120.83	136.46	148.76	149.31	159.06	
500	0	68.36	102.54	136.72	154.41	168.33	168.96	179.98	
1000	0	74.38	111.56	148.75	167.99	183.13	183.82	195.81	



### VI.1.7.5. Cálculo de Lluvias Máximas: Área de Influencia Estación Pinos Sud

#### MODA Y CARACTERÍSTICA

	44.03896527	44.038965	
<b>MODA:</b>	<b>Edp =</b>	<b>54.89</b>	$Ed = hd - 0,45 Sd$
		0.687833475	$Kd = Sd / (0,557 * Ed)$
<b>CARACTERÍSTICA:</b>	<b>Kdp =</b>	<b>1.03</b>	

#### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	$hdT$ (mm)
2	71.92
5	94.42
10	111.44
20	128.46
50	150.96
100	167.99
200	185.01
500	207.51
1000	224.53

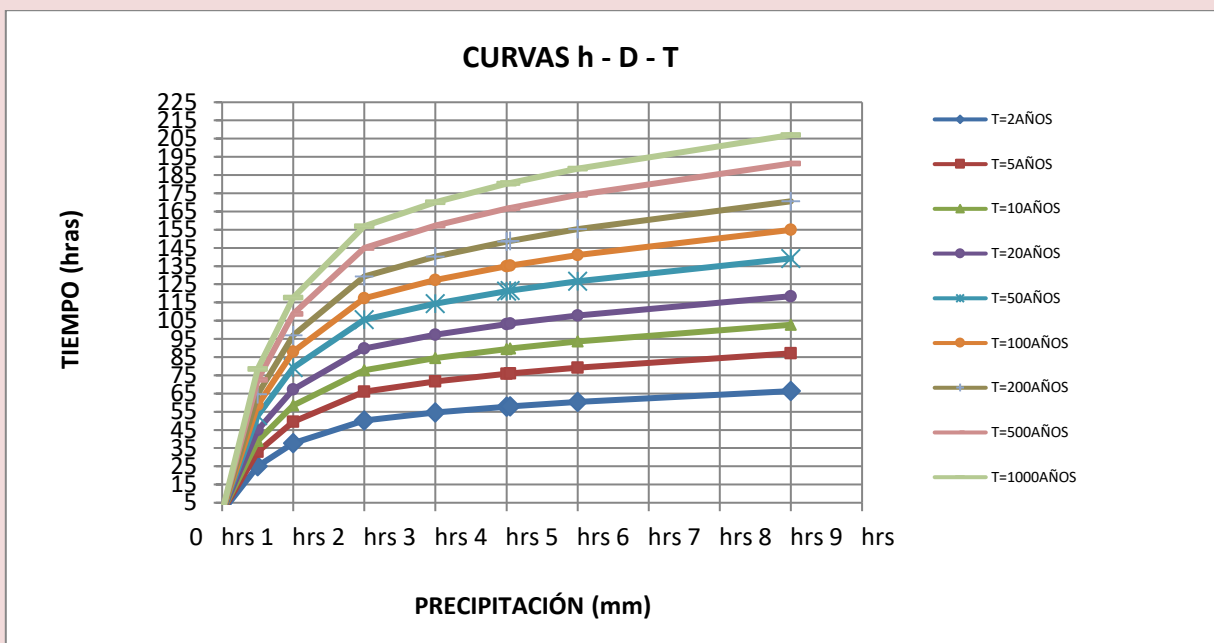
#### ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	<b>12</b>	Duracion de lluvia maxima caracteristica
b =	<b>0.2</b>	Entre 0,20 a 0,3

Altura de lluvia máxima horaria en (mm)

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)							
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs
2	0	25.13	37.69	50.26	54.50	57.73	57.87	60.36
5	0	32.99	49.49	65.98	71.56	75.79	75.98	79.25
10	0	38.94	58.41	77.88	84.46	89.46	89.68	93.54
20	0	44.89	67.33	89.77	97.36	103.12	103.38	107.83
50	0	52.75	79.12	105.50	114.41	121.19	121.49	126.72
100	0	58.70	88.04	117.39	127.31	134.85	135.18	141.00
200	0	64.64	96.97	129.29	140.21	148.51	148.88	155.29
500	0	72.51	108.76	145.01	157.26	166.58	166.99	174.18
1000	0	78.45	117.68	156.91	170.16	180.24	180.69	188.47



### VI.1.7.6. Cálculo de Lluvias Máximas: Calderillas

#### MODA Y CARACTERÍSTICA

	44.03896527	44.038965	
MODA:	<b>Edp = 63.66</b>		<i>Ed = hd -0,45 Sd</i>
		0.687833475	<i>Kd = Sd/(0,557*Ed)</i>
CARACTERÍSTICA:	<b>Kdp = 0.50</b>	0.6878335	

#### ALTURA DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

De acuerdo a la experiencia, las lluvias máximas registradas en una estación, se distribuyen de acuerdo a una ley cuyo mejor ajuste se obtiene con la ley de Gumbell.

$$h_{dT} = E_d * (1 + K_d * \log T)$$

Altura de lluvia máxima diaria

PERIODO DE RETORNO (años)	hdT (mm)
2	73.21
5	85.85
10	95.41
20	104.97
50	117.60
100	127.16
200	136.72
500	149.36
1000	158.92

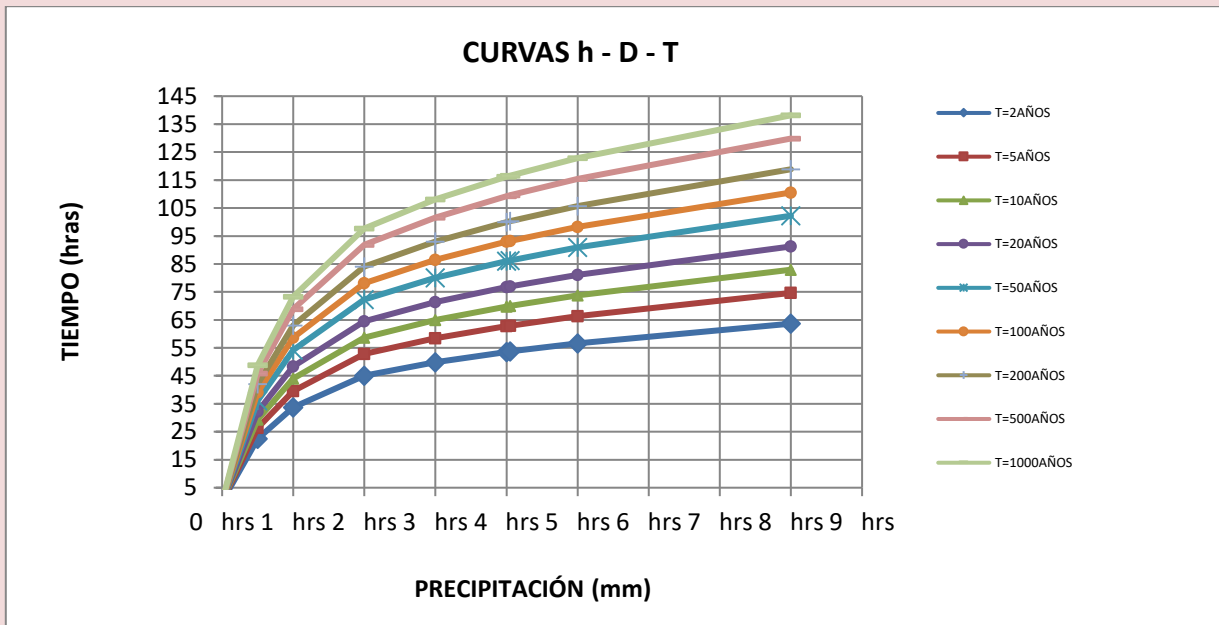
#### ALTURA DE LLUVIAS MENORES A LA DIARIA

$$h_{(t,T)} = h_{(d,T)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^b$$

a =	<b>14</b>	Duracion de lluvia maxima caracteristica
b =	<b>0.25</b>	Entre 0,20 a 0,3

**Altura de lluvia máxima horaria en (mm)**

PERIODO DE RETORNO T(años)	Periodos de duración de lluvias en horas (t)							
	0 hrs	0.50 hrs	1.00 hrs	2.00 hrs	3.00 hrs	4.00 hrs	4.05 hrs	5.00 hrs
2	0	22.51	33.76	45.01	49.81	53.53	53.69	56.60
5	0	26.39	39.58	52.78	58.41	62.77	62.96	66.37
10	0	29.33	43.99	58.66	64.91	69.75	69.97	73.76
20	0	32.27	48.40	64.53	71.42	76.74	76.98	81.15
50	0	36.15	54.23	72.30	80.01	85.98	86.25	90.91
100	0	39.09	58.63	78.18	86.52	92.97	93.26	98.30
200	0	42.03	63.04	84.05	93.02	99.96	100.27	105.69
500	0	45.91	68.87	91.82	101.62	109.20	109.54	115.46
1000	0	48.85	73.27	97.70	108.12	116.19	116.55	122.85



### VI.1.8. Polígonos de Thiessen para determinar la Precipitación Máxima de la Cuenca



FIG. 34. Áreas de influencia de cada Estación mediante polígonos de Thiessen

AREA DE INFLUENCIA DE CADA ESTACION PLUVIOMETRICA  
DETERMINADA MEDIANTE POLIGONOS DE THIESSEN

AREA	ESTACION					TOTALES
	SAN ANDRES	SAN JACINTO SUD	TURUMAYO	PAMPA REDONDA	CALDERILLA S	
Km <sup>2</sup>	126.15	28.86	43.39	98.04	141.16	437.61
Ha	12615.27	2886.27	4339.27	9804.27	14116.27	43761.34
Peso %	29%	7%	10%	22%	32%	1.00

Altura de lluvia máxima horaria de duracion igual al tiempo de concentracion (mm)

**Tc = 4,05 Hrs.**

PERIODO DE RETORNO T(años)	Estacion					Pmax ponderado
	SAN ANDRES	SAN JACINTO SUD	TURUMAYO	PAMPA REDONDA	CALDERILLAS	
2	52,55	40,64	50,69	50,58	53,69	51,51
5	65,44	50,45	59,76	70,23	62,96	64,16
10	75,20	57,88	66,62	85,09	69,97	73,73
20	84,95	65,30	73,48	99,95	76,98	83,31
50	97,84	75,12	82,54	119,59	86,25	95,96
100	107,59	82,54	89,40	134,45	93,26	105,53
200	117,35	89,96	96,26	149,31	100,27	115,10
500	130,24	99,78	105,32	168,96	109,54	127,75
1000	139,99	107,20	112,18	183,82	116,55	137,33

**Tc = 4,05 Hrs.**

Intensidad máxima de duracion igual al tiempo de concentracion (mm/hr)

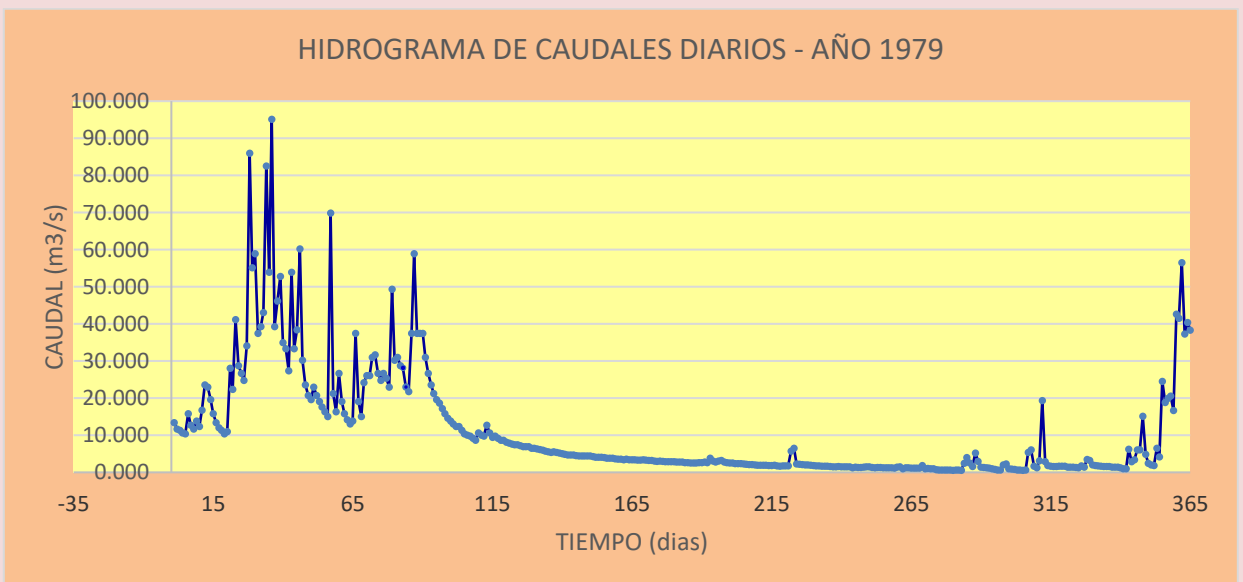
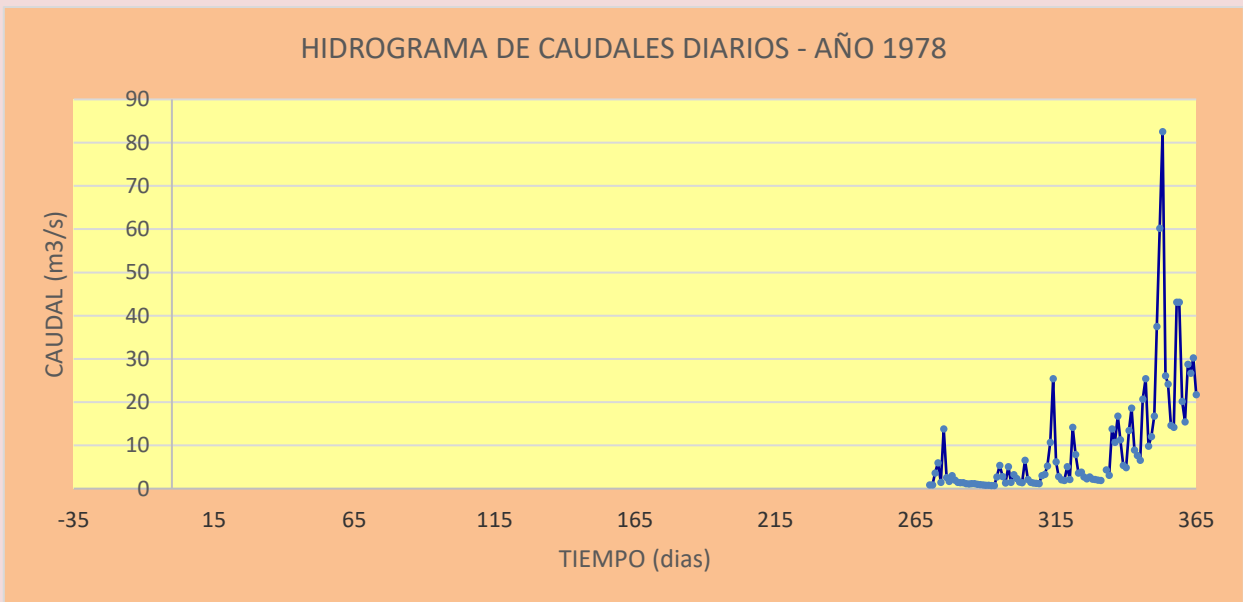
PERIODO DE RETORNO T(años)	Estacion					I <sub>max</sub> ponderado
	SAN ANDRES	SAN JACINTO SUD	TURUMAYO	PAMPA REDONDA	CALDERILLAS	
2	12,96	10,02	12,50	12,47	13,24	12,70
5	16,14	12,44	14,74	17,32	15,53	15,82
10	18,54	14,27	16,43	20,98	17,26	18,18
20	20,95	16,10	18,12	24,65	18,98	20,54
50	24,13	18,52	20,36	29,49	21,27	23,66
100	26,53	20,36	22,05	33,16	23,00	26,02
200	28,94	22,19	23,74	36,82	24,73	28,39
500	32,12	24,61	25,97	41,67	27,01	31,51
1000	34,52	26,44	27,66	45,33	28,74	33,87



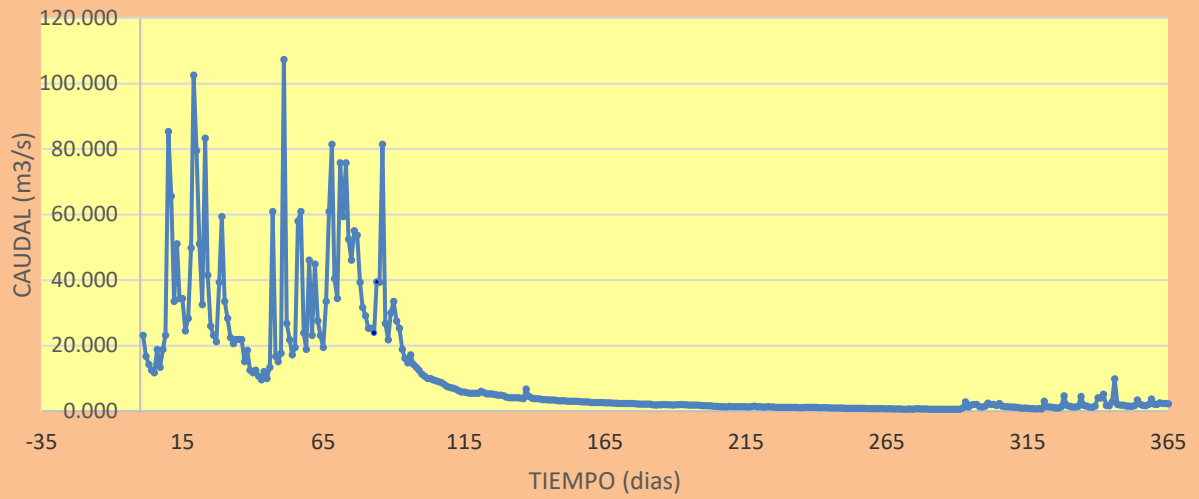
## VI.2. ANÁLISIS DE DATOS DE CAUDALES

Los datos de caudales aforados fueron medidos en la estación San Jacinto, corresponden a los periodos 1978 al 1984. Los datos con que se cuentan son caudales diarios (se detallan en anexos). Se empleará para la calibración de parámetros del HC – HMS.

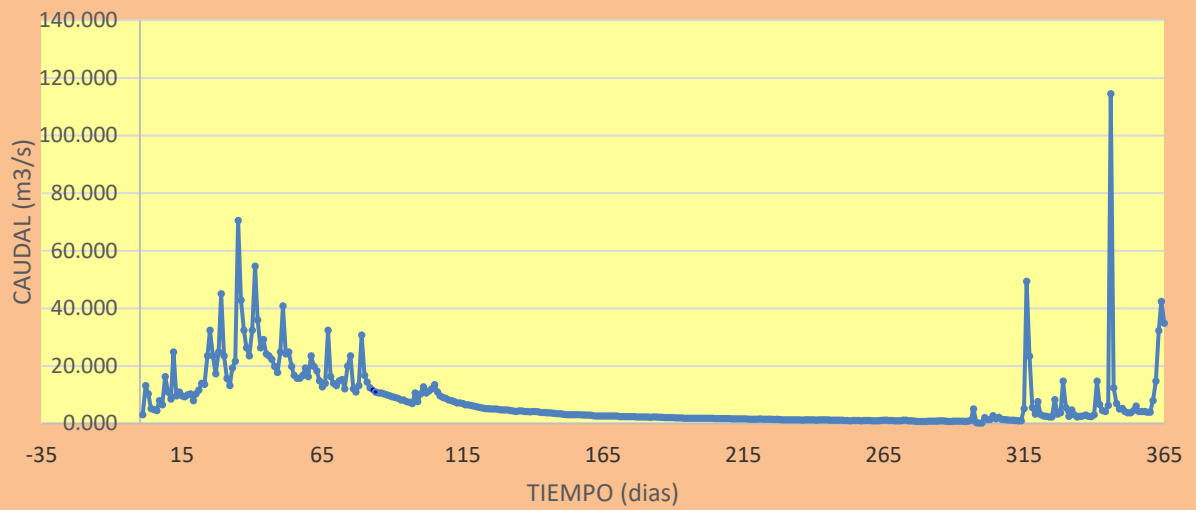
A continuación se muestra los hidrogramas de los caudales mencionados.



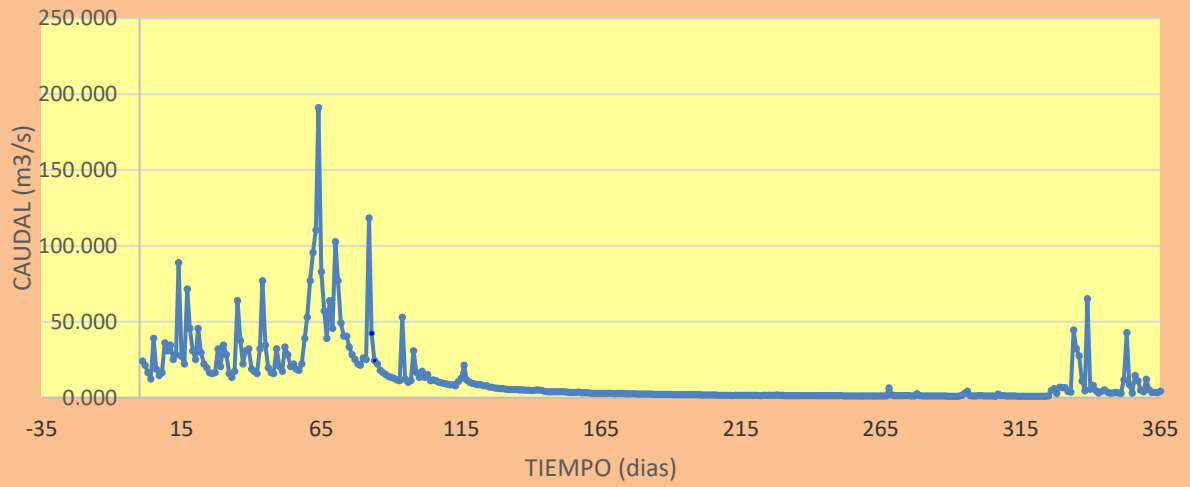
HIDROGRAMA DE CAUDALES DIARIOS - AÑO 1980



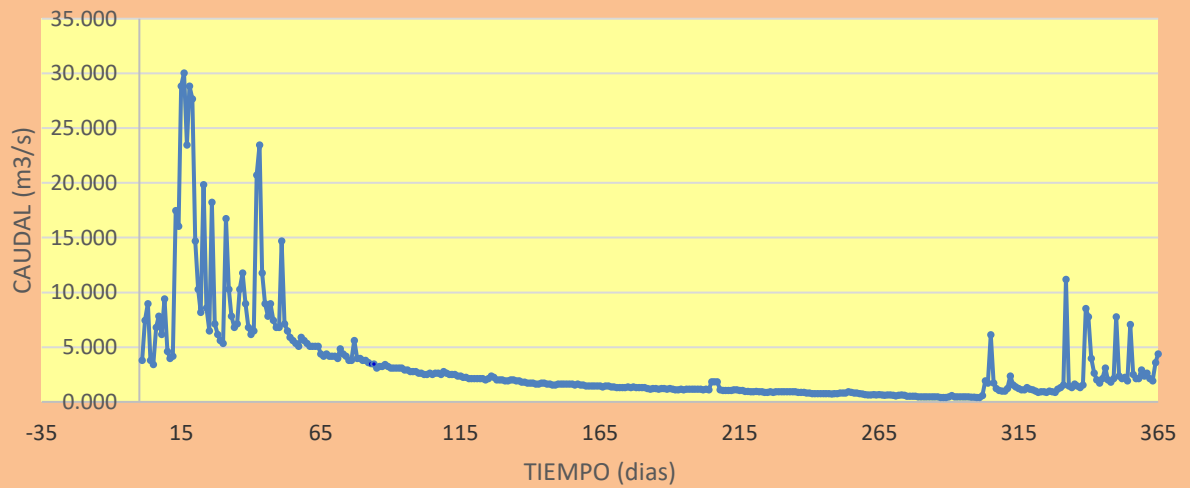
HIDROGRAMA DE CAUDALES DIARIOS - AÑO 1981

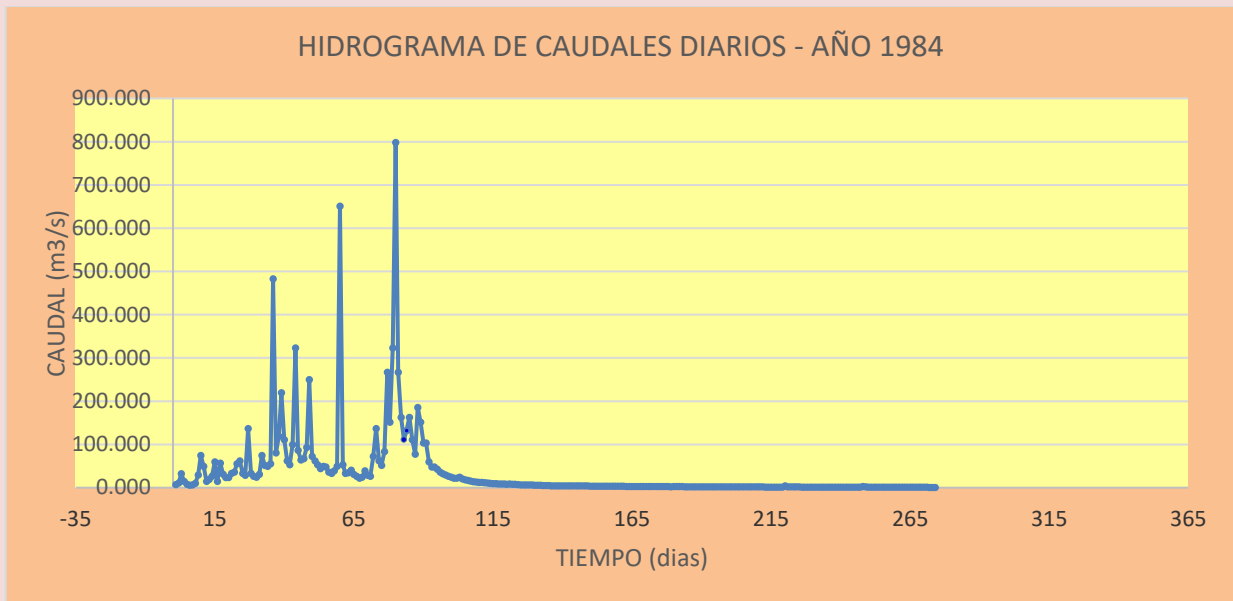


HIDROGRAMA DE CAUDALES DIARIOS - AÑO 1982



HIDROGRAMA DE CAUDALES DIARIOS - AÑO 1983





### VI.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

En esta tesis se usa el HEC – HMS 4.1

Para la calibración del modelo HEC – HMS trabajo con las precipitaciones diarias y caudales diarios del mismo periodo.

Para la determinación de las pérdidas iniciales se usara la opción que el programa tiene del Número de Curva de la SCS. Para la transformación de precipitación a escorrentía se usara la opción que tiene el programa del Hidrograma Unitario dela SCS. Se eligió estas opciones porque ambos métodos son conocidos y usados en nuestro medio.

De acuerdo a los métodos indicados los parámetros a calibrar son los siguientes:

- Número de Curva
- Pérdidas iniciales
- Tiempo de retardo

Para iniciar la calibración se debe introducir valores medios o estimados de estos parámetros los cuales se ajustaran en el proceso de calibración:

**Cuadro N° 9. Valores estimados para iniciar la iteración en la calibración**

Numero de Curva	71	adimensional
Pérdidas iniciales	20	mm
Tiempo de retardo	146	min

Para este trabajo de calibración se eligió 8 eventos con registros de precipitación y caudal del mismo día:

FECHA	EVENTO	Precipitación diaria (mm)	Caudal (obs) m <sup>3</sup> /s
20/12/1978	1	26.00	82.60
05/01/1979	2	20.00	95.20
19/01/1980	3	50.07	102.63
04/02/1981	4	49.50	70.52
17/01/1982	5	16.00	71.78
13/02/1982	6	20.00	77.23
04/03/1982	7	30.04	110.50
05/12/1982	8	45.90	65.46

Toda la calibración se lo realiza con el programa HEC-HMS.

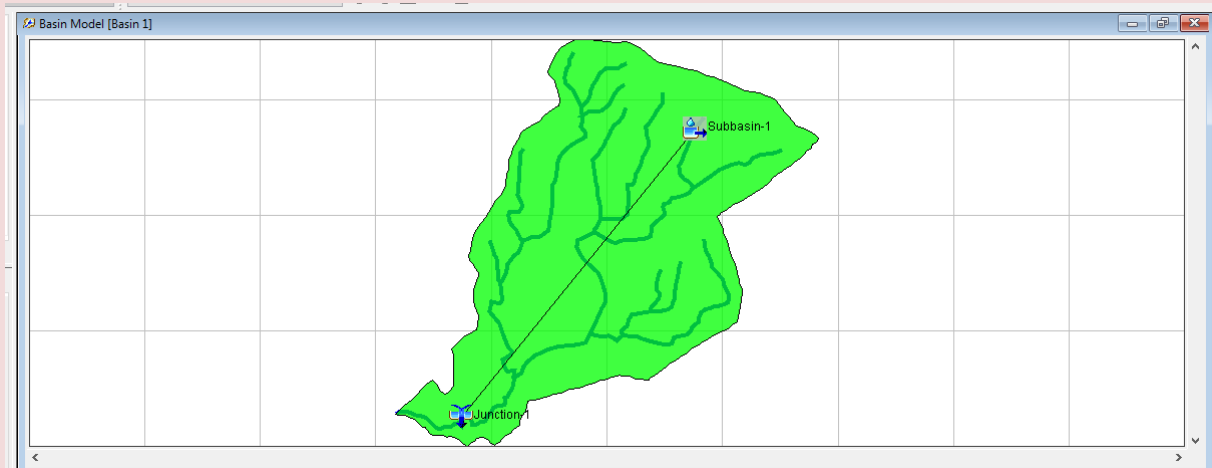
El programa automáticamente busca una combinación de los parámetros de manera que los hidrograma simulados se asemejen a los hidrogramas de caudales observados (aforados).

Se introducen en el programa datos de precipitación, área de la cuenca, los tres parámetros y caudales, el proceso paso a paso se lo puede revisar en el Manual en español del Ing. Máximo Villón Bejar titulado: HEC – HMS Ejemplos.

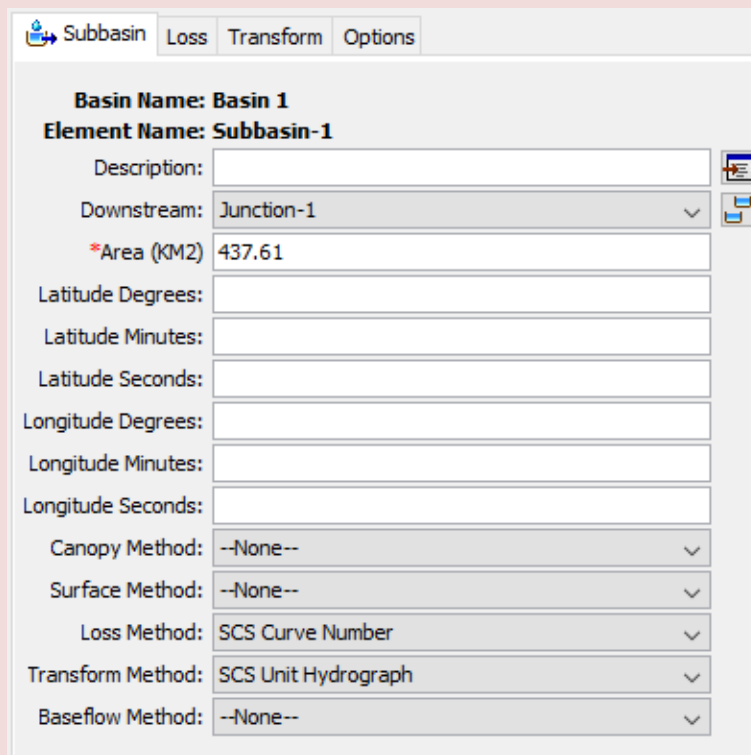
En el presente trabajo se muestra los pasos resumidos enfocándonos sobre todo en los resultados finales de cada evento.

## Simulación Evento 1

Se crea el modelo de la cuenca: se introduce un mapa de la cuenca y se define sus componentes:



Introducimos el ara de la cuenca y elegimos el método de cálculo de las abstracciones iniciales y método de transformación de la precipitación en escorrentía.

A screenshot of the Basin Model software interface showing the configuration options for a subbasin. The window title is 'Subbasin' and it has tabs for 'Loss', 'Transform', and 'Options'. The configuration is as follows:

Basin Name: Basin 1	
Element Name: Subbasin-1	
Description:	<input type="text"/>
Downstream:	Junction-1
*Area (KM2)	437.61
Latitude Degrees:	<input type="text"/>
Latitude Minutes:	<input type="text"/>
Latitude Seconds:	<input type="text"/>
Longitude Degrees:	<input type="text"/>
Longitude Minutes:	<input type="text"/>
Longitude Seconds:	<input type="text"/>
Canopy Method:	--None--
Surface Method:	--None--
Loss Method:	SCS Curve Number
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph
Baseflow Method:	--None--

Luego se introduce los valores estimados de los parámetros a calibrar:

Subbasin Loss Transform Options

**Basin Name: Basin 1**  
**Element Name: Subbasin-1**

Initial Abstraction (MM) 20.75

\*Curve Number: 71

\*Impervious (%) 0.0

Subbasin Loss Transform Options

**Basin Name: Basin 1**  
**Element Name: Subbasin-1**

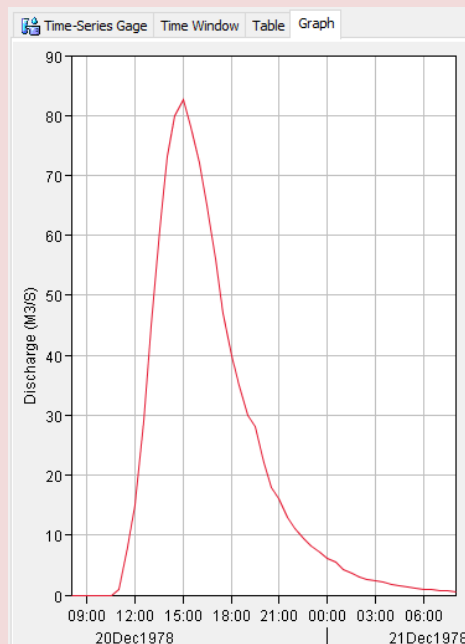
Graph Type: Standard (PRF 484)

\*Lag Time (MIN) 146

Se introducen los datos de precipitación y caudales:

Time-Series Gage Time Window Table Graph

Time (ddMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (MM)
20dic1978, 08:00	
20dic1978, 09:00	5.20
20dic1978, 10:00	5.20
20dic1978, 11:00	5.20
20dic1978, 12:00	5.20
20dic1978, 13:00	5.20



Se define el modelo meteorológico:

Meteorology Model Basins Options

**Met Name: Met 1**

Description:

Shortwave: --None--

Longwave: --None--

Precipitation: Specified Hyetograph

Evapotranspiration: --None--

Snowmelt: --None--

Unit System: Metric

Replace Missing: Set To Default

Se define las especificaciones de control:

Control Specifications

**Name: Control 1**

Description: Q.MAX

\*Start Date (ddMMYYYY) 20dic1978

\*Start Time (HH:mm) 08:00

\*End Date (ddMMYYYY) 21dic1978

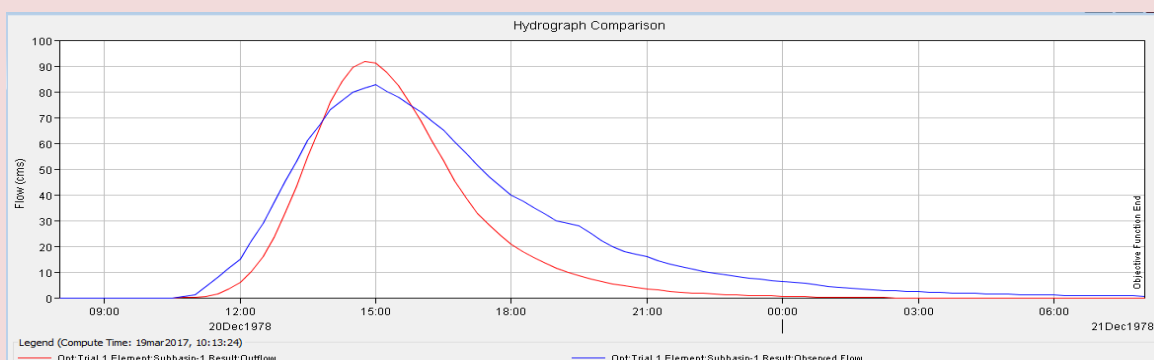
\*End Time (HH:mm) 08:00

Time Interval: 15 Minutes

Finalmente se hace correr el programa, primero de simulación y luego de calibración, después de este paso se puede ver los resultados.

### Resultados del Evento 1:

**Fig. 35. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**





**Tabla N°10. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 2)**

Project: CALIBRAT.1 Optimization Trial: Trial 1				
Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"		Type: Peak-Weighted RMS Error Value: 11		
Start of Trial: 20dic1978, 08:00		Basin Model: Basin 1		
End of Trial: 21dic1978, 08:00		Meteorologic Model: Met 1		
Compute Time: 19mar2017, 10:13:24				
Start of Function: 20dic1978, 08:00		End of Function: 21dic1978, 08:00		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3				
Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	2,95	4,07	-1,12	-27,43
Peak Flow (M3/S)	91,8	82,6	9,2	11,1
Time of Peak	20dic1978, 14:45	20dic1978, 15:00		
Time of Center of Mass	20dic1978, 15:29	20dic1978, 16:36		

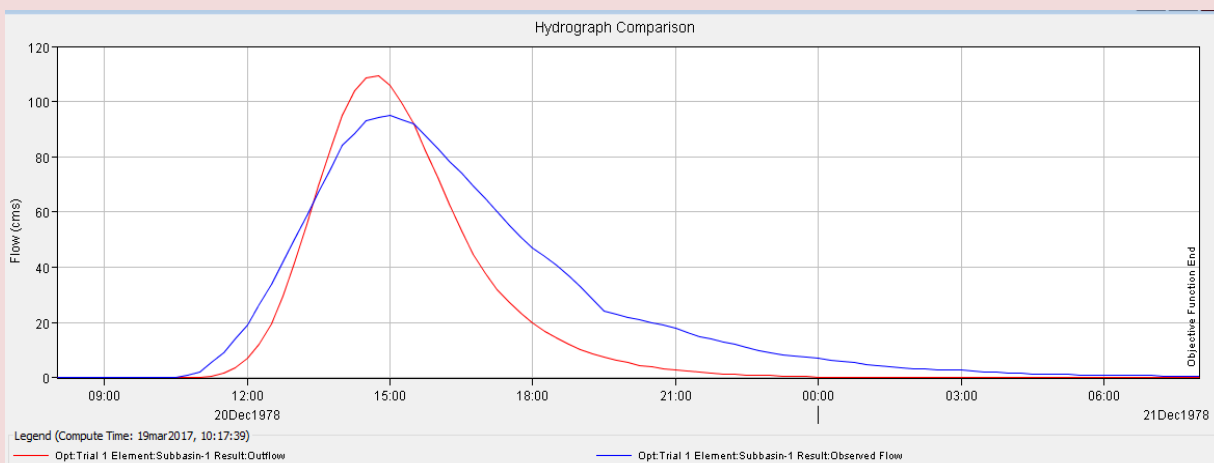
**Tabla N°11. Parámetros ajustados para (Evento 2)**

Project: CALIBRAT.1 Optimization Trial: Trial 1				
Start of Trial: 20dic1978, 08:00		Basin Model: Basin 1		
End of Trial: 21dic1978, 08:00		Meteorologic Model: Met 1		
Compute Time: 19mar2017, 10:13:24				
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	85
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	13
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	155

El proceso de introducción de datos y definición de cuenca, métodos y modelos hidrológicos es el mismo para los demás eventos; a continuación sólo se mostrarán los resultados para cada uno de éstos:

**Resultados del Evento 2:**

**Fig. 36. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**



**Tabla N°12. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 3)**

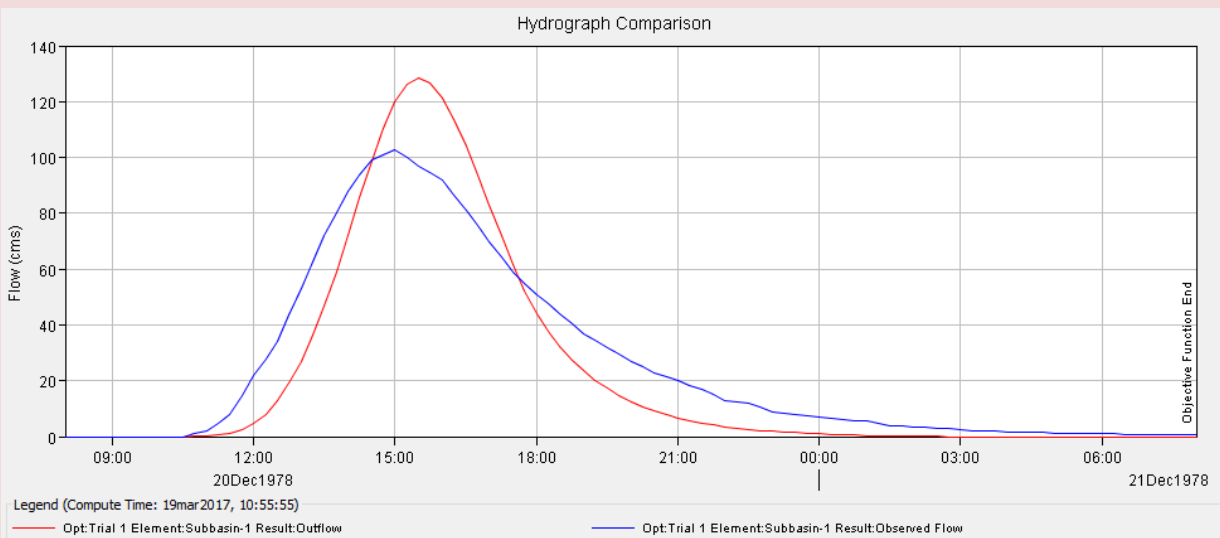
Project: CALIBRAT.2 Optimization Trial: Trial 1				
Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"		Start of Trial: 20dic1978, 08:00 Basin Model: Basin 1		
		End of Trial: 21dic1978, 08:00 Meteorologic Model: Met 1		
		Compute Time: 19mar2017, 10:17:39		
		Start of Function: 20dic1978, 08:00 Type: Peak-Weighted RMS Error		
		End of Function: 21dic1978, 08:00 Value: 14		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3				
Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	3,30	4,63	-1,33	-28,69
Peak Flow (M3/S)	109,2	95,2	14,0	14,7
Time of Peak	20dic1978, 14:45	20dic1978, 15:00		
Time of Center of Mass	20dic1978, 15:17	20dic1978, 16:32		

**Tabla N°13. Parámetros ajustados para (Evento 3)**

Project: CALIBRAT.2 Optimization Trial: Trial 1				
		Start of Trial: 20dic1978, 08:00 Basin Model: Basin 1		
		End of Trial: 21dic1978, 08:00 Meteorologic Model: Met 1		
		Compute Time: 19mar2017, 10:17:39		
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	90
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	13
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	144

**Resultados del Evento 3:**

**Fig. 37. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**



**Tabla N°14. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 4)**

Project: CALIBRAT.3 Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00 Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00 Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:55:55

Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"

Start of Function: 20dic1978, 08:00 Type: Peak-Weighted RMS Error  
 End of Function: 21dic1978, 08:00 Value: 16

Volume Units:  MM  1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	4,29	5,00	-0,70	-14,10
Peak Flow (M3/S)	128,4	102,6	25,8	25,1
Time of Peak	20dic1978, 15:30	20dic1978, 15:00		
Time of Center of Mass	20dic1978, 16:00	20dic1978, 16:34		

**Tabla N°15. Parámetros ajustados para (Evento 4)**

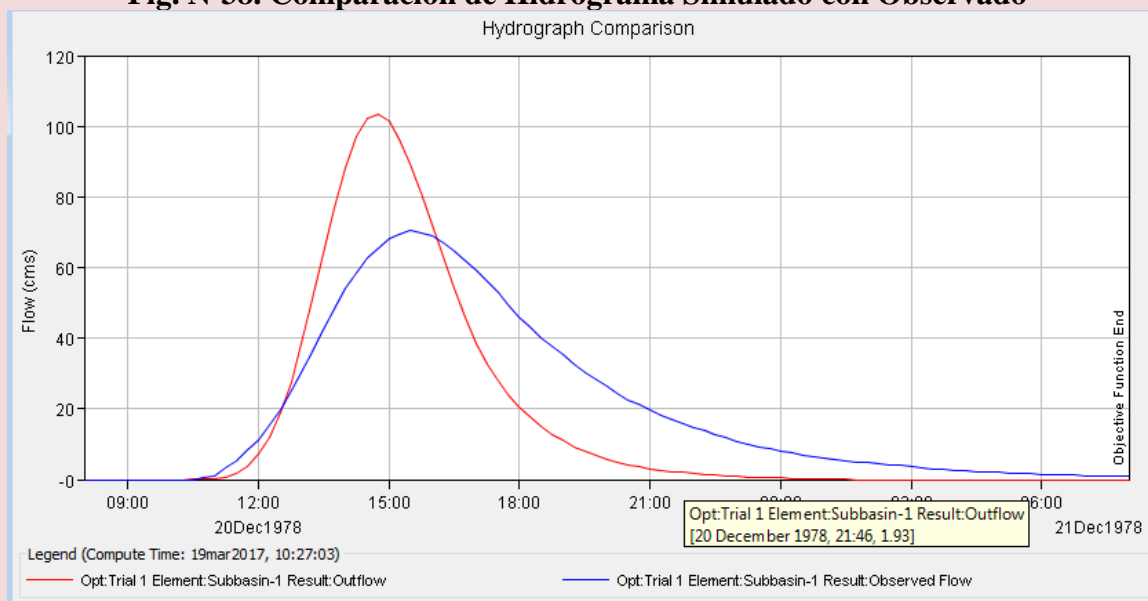
Project: CALIBRAT.3 Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00 Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00 Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:55:55

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	60
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	21
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	148

**Resultados del Evento 4:**

**Fig. N°38. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**



**Tabla N°16. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 5)**

Project: CALIBRAT.4    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:27:03

Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"

Start of Function: 20dic1978, 08:00    Type: Peak-Weighted RMS Error  
 End of Function: 21dic1978, 08:00    Value: 19

Volume Units:  MM  1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	3,21	3,92	-0,71	-18,16
Peak Flow (M3/S)	103,5	70,5	32,9	46,7
Time of Peak	20dic1978, 14:45	20dic1978, 15:30		
Time of Center of Mass	20dic1978, 15:21	20dic1978, 17:17		

**Tabla N°17. Parámetros ajustados para (Evento 5)**

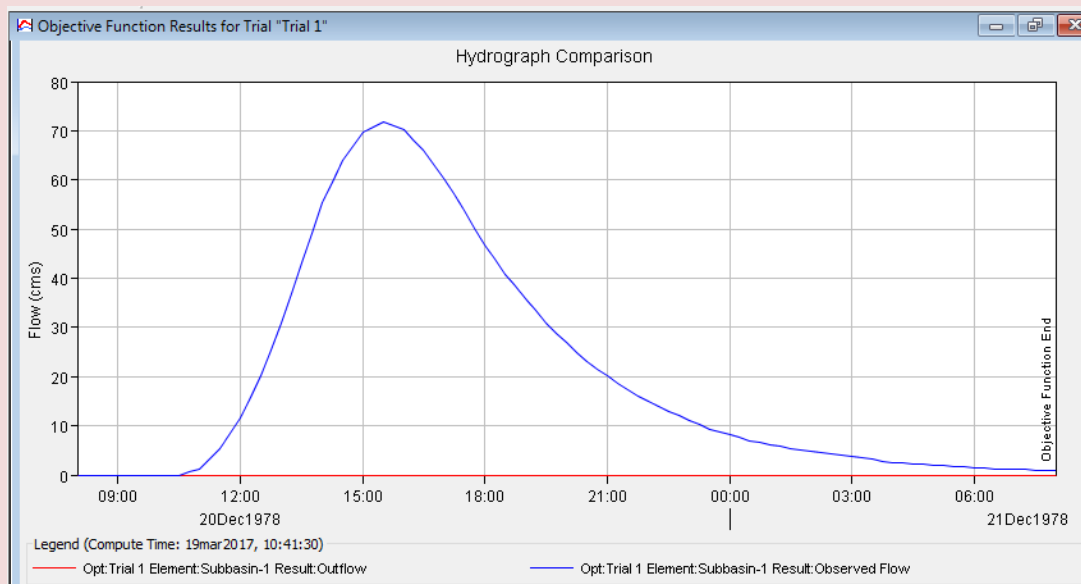
Project: CALIBRAT.4    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:27:03

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	60
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	25
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	148

**Resultados del Evento 5:**

**Fig. N°39. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**



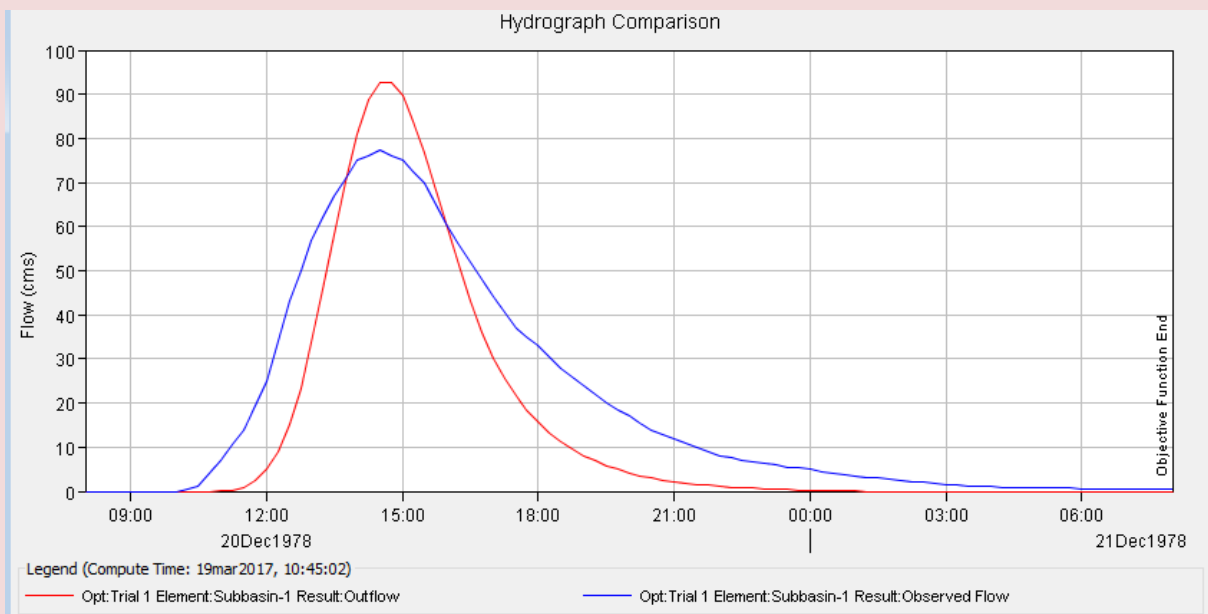
La precipitación de este evento no generó el hidrograma, es decir no generó escorrentía, puede explicarse esto debido a que de los 8 eventos éste es el de menor valor y toda la precipitación se convirtió en abstracción hidrológica; también puede ser que haya existido una mala medición de precipitación y caudal.

**Tabla N° 18. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 6)**

Project: CALIBRAT.5 Optimization Trial: Trial 1				
Start of Trial: 20dic1978, 08:00		Basin Model: Basin 1		
End of Trial: 21dic1978, 08:00		Meteorologic Model: Met 1		
Compute Time: 19mar2017, 10:41:30				
Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"				
Start of Function: 20dic1978, 08:00		Type: Peak-Weighted RMS Error		
End of Function: 21dic1978, 08:00		Value: 42		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3				
Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	0,00	3,99	-3,99	-100,00
Peak Flow (M3/S)	0,0	71,8	-71,8	-100,0
Time of Peak	20dic1978, 08:00	20dic1978, 15:30		
Time of Center of Mass	20dic1978, 08:00	20dic1978, 17:17		

**Resultados del Evento 6:**

**Fig. N°40. Comparación de hidrograma simulado con observado**



**Tabla N°19. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 7)**

Project: CALIBRAT.6    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:45:02

Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"

Start of Function: 20dic1978, 08:00    Type: Peak-Weighted RMS Error  
 End of Function: 21dic1978, 08:00    Value: 12

Volume Units:  MM  1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	2,73	3,78	-1,05	-27,79
Peak Flow (M3/S)	92,7	77,2	15,5	20,1
Time of Peak	20dic1978, 14:45	20dic1978, 14:30		
Time of Center of Mass	20dic1978, 15:15	20dic1978, 16:03		

**Tabla N°20. Parámetros ajustados para (Evento 7)**

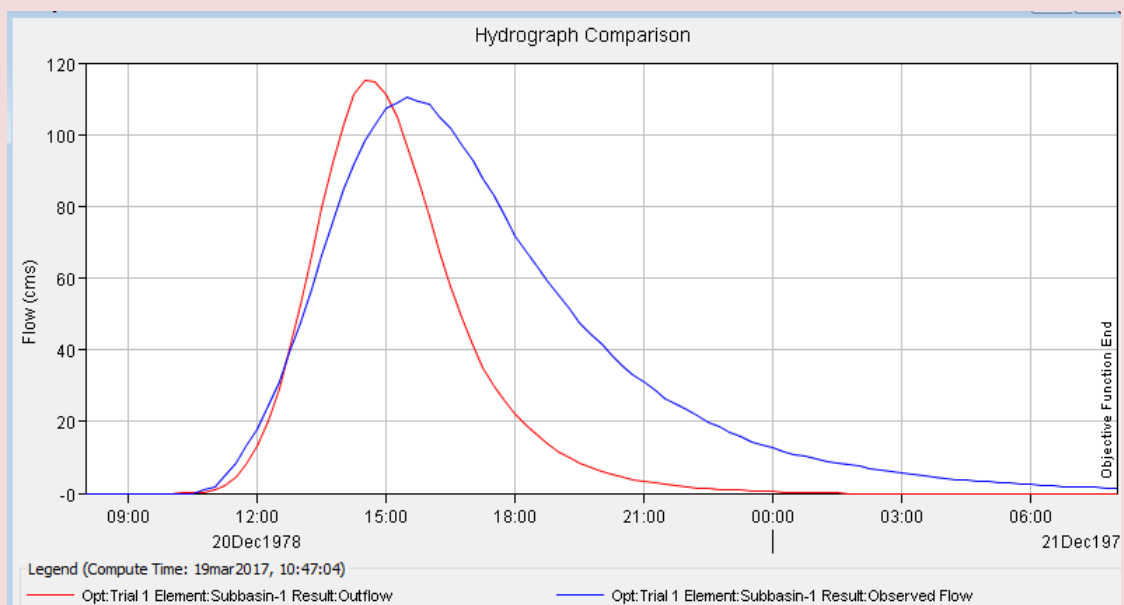
Project: CALIBRAT.6    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:45:02

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	89
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	13
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	141

**Resultados del Evento 7:**

**Fig. N°41. Comparación de hidrograma simulado con observado**



**Tabla N°21. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 8)**

Project: CALIBRAT.7    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:47:04

Objective Function at Basin Element "Subbasin-1"

Start of Function: 20dic1978, 08:00    Type: Peak-Weighted RMS Error  
 End of Function: 21dic1978, 08:00    Value: 27

Volume Units:  MM  1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	3,68	6,14	-2,47	-40,17
Peak Flow (M3/S)	115,1	110,5	4,6	4,1
Time of Peak	20dic1978, 14:30	20dic1978, 15:30		
Time of Center of Mass	20dic1978, 15:13	20dic1978, 17:17		

**Tabla N°22. Parámetros ajustados para (Evento 8)**

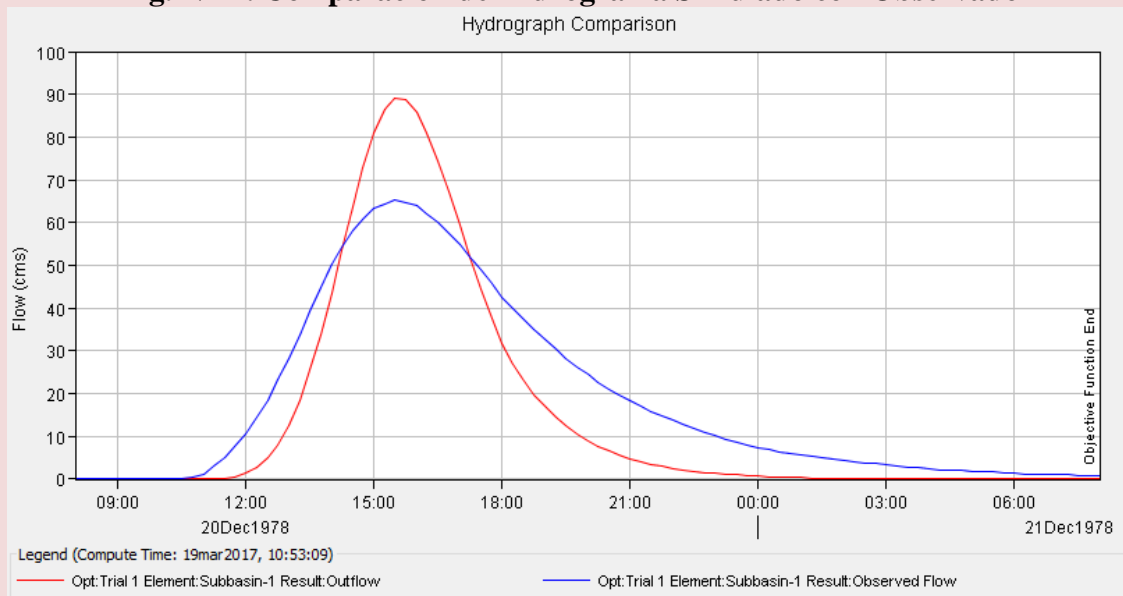
Project: CALIBRAT.7    Optimization Trial: Trial 1

Start of Trial: 20dic1978, 08:00    Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 21dic1978, 08:00    Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 19mar2017, 10:47:04

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	80
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	13
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	148

**Resultados del Evento 8:**

**Fig. N°42. Comparación de Hidrograma Simulado con Observado**



**Tabla N°23. Caudal punta Simulado y Observado (Evento 9)**

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	2,89	3,64	-0,75	-20,59
Peak Flow (M3/S)	89,2	65,5	23,8	36,3
Time of Peak	20dic1978, 15:30	20dic1978, 15:30		
Time of Center of Mass	20dic1978, 16:09	20dic1978, 17:17		

**Tabla N°24. Parámetros ajustados para (Evento 9)**

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		71	60	4
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	20.75	22	-2
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	146	148	-2

Visualmente se denota que en 5 de los 8 eventos hidrológicos existe una semejanza de los hidrograma simulados con los observados, 2 presentan mucha diferencia en sus caudales pico y uno ni siquiera genera caudal.

Lo que realmente se buscó con este trabajo es calibrar los parámetros para la obtención del caudal punta y no tanto la obtención de todo el hidrograma.

A continuación se muestra una tabla resumen con los valores encontrados:



**Tabla N°25. Resultados de la Calibración**

FECHA	EVENTO	P TOTAL (mm)	P PARCIAL (mm)	Qmax (obs) m3/s	Qmax (simul) m3/s	NC	ABSTRAC. INICAL (mm)	TIEMPO DE RETARDO (min)
20/12/1978	1	26.00	5.20	82.60	91.80	85.5	13.2	155.0
05/01/1979	2	20.00	4.94	95.20	109.20	89.6	13.0	144.2
19/01/1980	3	50.07	8.35	102.63	128.40	60.4	21.0	148.1
04/02/1981	4	49.50	9.90	70.52	103.50	60.4	24.7	148.2
17/01/1982	5	16.00	3.95	71.78	0.00	No escorrentia		
13/02/1982	6	20.00	4.94	77.23	92.70	89.5	13.0	140.5
04/03/1982	7	30.04	6.01	110.50	115.10	80.4	13.0	148.1
05/12/1982	8	45.90	7.65	65.46	95.00	60.4	22.1	148.2

Se puede observar 4 resultados que dan un número de curva alto que coincide con los fundamentos teóricos, a mayor número de curva mayor escurrimiento, como el objetivo es obtener parámetros para determinar caudales máximos de diseño nos quedaremos con el promedio de estos 4 valores altos.

NUMERO DE CURVA NC		ABSTRAC. INICAL (mm)		TIEMPO DE RETARDO (min)	
85.48	86.2	13.19	13.1	154.96	146.6
89.48		13.02		144.21	
89.48		12.96		140.53	
80.41		13.02		148.08	
60.40	60.4	21.00	22.6	148.11	148.2
60.40		24.73		148.17	
60.40		22.15		148.17	

Después de la comparación de caudales punta, hidrogramas y parámetros los valores que recomendamos son los siguientes:

**Cuadro N°10. Valores Calibrados Para Condiciones de Suelo Saturado**

NÚMERO DE CURVA CN	86.21
ABSTRACION INICAL (mm)	13.06
TIEMPO DE RETARDO (min)	146.57

## VI.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación se comparan los parámetros obtenidos de la calibración con valores obtenidos trabajosamente según recomendaciones de la bibliografía.

### VI.4.1. Obtención del Número de Curva (CN)

Se obtiene el número de curva para la cuenca del río Tolomosa según las indicaciones de la SCS.

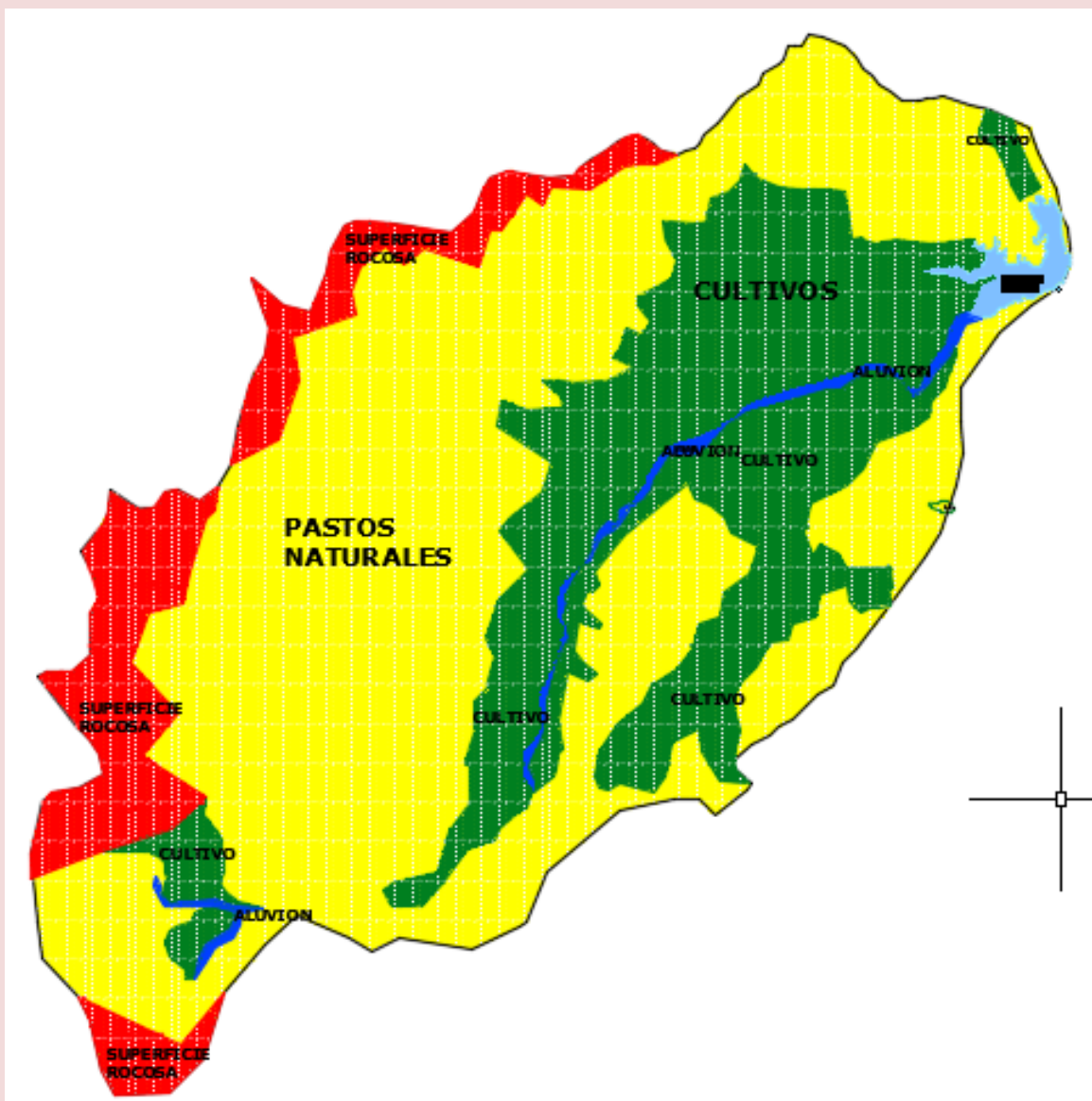


Fig. N°43. Área de la Cuenca según Usos Hidrológicos

**Tabla N°25. Condición hidrológica, uso y tipo de suelo para obtener el CN**

ZONA	USO DE SUELO	m2	km	Ha	%
1	CULTIVOS	119,241,270	119	11,924	27.25%
2	PASTOS NATURALES	265,166,811	265	26,517	60.59%
3	SUPERFICIE ROCOSA	43,842,149	44	4,384	10.02%
4	ALUVIAL	5,148,002	5	515	1.18%
5	LAGO	4,215,184	4	422	0.96%
<b>TOTAL</b>		<b>437,613,416</b>	<b>437.61</b>	<b>43,761</b>	<b>100.00%</b>

ZONA	AREA ha	USO DE SUELO	CONDIC HIDROL	GRUPO SUELO	NC II	NC III	NC(III) x Ai	NC ponder
1	11,924	CULTIVOS	BUENA	B	75	87.3	1041474	<b>88.2</b>
2	26,517	PASTOS NATURALES	REGULAR	C	79	89.6	2376952	
3	4,384	SUPERFICIE ROCOSA	BUENA	D	91	95.9	420346	
4	515	ALUVIAL	BUENA	A	25	43.4	22340	
5	422	LAGO	BUENA	C	90	95.4	40209	
	43761.3416						3861113	

#### VI.4.2. Obtención de las Abstracciones Iniciales

Según indicaciones de la SCS las abstracciones iniciales se pueden estimar con las siguientes fórmulas:

##### Potencial máximo de retención

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm)

CN = Curvas numéricas (adimensional)

<b>S =</b>	<b>103.75</b>	<b>mm</b>
------------	---------------	-----------

## Pérdidas Iniciales

$$I_a = 0.2 \times S$$

$$I_a = 20.75 \text{ mm}$$

### VI.4.3. Obtención del Tiempo de Retardo

Una fórmula más usada para estimar el tiempo de retardo en un hidrograma de crecida es la siguiente:

#### c) Fórmula del Tiempo de Retardo

$$t_c = L^{0.3} \cdot (d+1)^{0.7} / (735 \cdot S^{-0.5})$$

donde:

$t_c$  = tiempo de retardo en horas

$L$  = longitud máximo recorrido del agua en metros.

$S$  = pendiente de la cuenca en %

$d$  = valor de sustración en pulgadas.

El tiempo de concentración está relacionado con el tiempo de retardo por medio de la siguiente fórmula:

$$t_r = 0.6 \cdot t_c$$

$$T_c = 4.05 \text{ Hrs.}$$

$$T_r = 2.43 \text{ Hrs.}$$

$$T_r = 146 \text{ min}$$

#### VI.4.4. Análisis y Comparación de Parámetros

PARAMETROS	Valor obtenido mediante la calibración con HEC-HMS	Valor obtenido mediante mapas, formulas y tablas	Análisis comparativo de parámetros
Número de curva	86.21	88.2	Existe mucha semejanza, este número denota que el suelo está saturado, por lo tanto es más propenso a generar caudales máximos
Pérdidas Iniciales (mm)	13.21	20.75	Cuando el suelo está saturado las pérdidas iniciales son bajas, ambos valores denotan este suceso hidrológico
Tiempo de retardo (min)	146.21	146	La semejanza es del 100%

#### VI.5. Análisis de Resultados de la Calibración y Validación

Los valores calibrados salen de una solución matemática, se hace variar muchas combinaciones posibles de los tres parámetros hasta que los caudales simulados se asemejen a los caudales observados. Mientras que los valores obtenidos mediante mapas, tabla y formulas requieren más tiempo y son más trabajoso y depende del grado de detalle que se realice en el estudio de las características hidrológicas de la cuenca.

Los valores de los parámetros obtenidos están dentro de un rango de valores físicamente posibles de ocurrir, tanto en la calibración y por métodos tradicionales nos sale valores muy parecidos y coherentes con la teoría de la transformación de la precipitación en escorrentía; por lo tanto los valores de los parámetros calibrados son válidos.

Los parámetros del modelo que simulan caudales máximos con mayor similitud a los observados que resultaron del proceso de calibración son los siguientes:

NUMERO DE CURVA CN	86.21
ABSTRACION INICAL (mm)	13.06
TIEMPO DE RETARDO (min)	146.57

La capacidad del HEC - HMS para predecir el comportamiento del caudal en crecida es notable lo que se demuestra en la comparación de hidrogramas. Analizando los hidrogramas superpuestos de los caudales simuladas y observadas se puede ver que la diferencia entre éstos es mínima en 4 eventos, mientras que en los otros eventos existe diferencia significativa lo que indica que es muy difícil analizar o encasillar a un solo análisis la respuesta de una cuenca hidrológica ante una precipitación ya que también intervienen la humedad antecedente del suelo, la abstracciones iniciales, evapotranspiración, tipo de suelo, vegetación, etc.

De manera general empleando los parámetros calibrados del modelo HEC - HMS dan resultados parecidos a los caudales observados (aforados), por lo que pueden ser usados en la generación de caudales máximos en la zona de estudio.

## **VI. 6. Limitaciones Asociadas a la Implementación del Modelo**

El modelo HEC – HMS requiere conocer los parámetros hidrológicos que intervienen en el proceso de transformación de la precipitación en escorrentía, si no se los tiene calibrados deben obtenerse con otras metodologías ajenas al HEC - HMS, entonces la precisión de los hidrogramas y caudales punta simulados dependen mucho de la calidad con que fueron obtenidos el valor de los diferentes parámetros.

El modelo no pretende realizar una estructura conceptual de toda la cuenca ya que no se dispone de la información necesaria para realizar dicho acercamiento. Sin embargo, permite en zonas con escasa información meteorológica predecir el comportamiento de los caudales pico sobretodo.

Los parámetros del modelo no tienen una forma de relacionar sus valores con la variabilidad en las condiciones de la cuenca por separado sino que engloban varias de estas propiedades sin distinguirlas a cada una: tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, condición hidrología, pendiente del terreno, altitud, temperaturas, relieve, etc.

La escala de aplicación del modelo es para caudales máximo por evento.

La escala de la información, el completo desconocimiento del funcionamiento del sistema hidrológico hacen que los resultados de este modelo sean una aproximación a la predicción del comportamiento de los caudales en la cuenca objeto de estudio; dejando la puerta abierta a estudios más detallados que puedan involucrar un número mayor de variables y una análisis más detallado del funcionamiento de las diferentes componentes del modelo.

## VI.7. GENERACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARTIR DE PRECIPITACIONES

A continuación se determina caudales máximos de diseño usando los parámetros calibrados y precipitaciones máximas de diferentes periodo de retorno aplicando el modelo HEC – HMS.

HEC-HMS				
Periodo de retorno (año)	NC	ABASTRAC. INICIAL (mm)	TIEMPO DE RETARDO (min)	Qmax (m3/s)
2	86.0	13.0	146.6	565.80
5	86.0	13.0	146.6	842.00
10	86.0	13.0	146.6	1,063.60
20	86.0	13.0	146.6	1,289.20
50	86.0	13.0	146.6	1,592.30
100	86.0	13.0	146.6	1,825.20
200	86.0	13.0	146.6	2,058.50
500	86.0	13.0	146.6	2,609.70
1000	86.0	13.0	146.6	2,652.20

Los parámetros usados en este cálculo también pueden ser usados en sub cuencas y cuencas vecinas del área en estudio.

# Capítulo VII

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VII.1. CONCLUSIONES

En base a los resultados y análisis preparados para la calibración y validación del modelo HEC - HMS en la cuenca del río Tolomosa, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

#### **Respecto a los Resultados**

- Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que el modelo tiene la capacidad de simular el proceso de transformación de precipitación y escurrimiento, simula todo el hidrograma de crecida lo que puede ser un buen dato de entrada para el cálculo de laminación en presas.
- En muchos proyectos sólo se requiere conocer el caudal pico, con el HEC – HMS esta necesidad está cubierta, si ya se conocen los valores de los parámetros sólo se necesitará precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, el programa automáticamente calculará los caudales pico para los periodos de retorno indicados.
- En el proceso de comparación de los caudales simulados se pudo constatar que existe bastante semejanza a los valores observado (aforados), no se puede negar que existe diferencias pero están dentro de un rango aceptable, por lo que se puede decir que el modelo es aplicable en nuestro medio, los parámetros obtenidos se puede utilizar para la generación de caudales de diseño a partir de sus precipitaciones máximas con diferentes periodos de retorno.
- Haciendo uso de los parámetros se puede analizar cualquier tormenta de magnitud considerable para conocer su hidrograma de crecida.
- Los parámetros calibrados se pueden aplicar en zonas hidrológicas similares siempre.

#### **Respecto al uso de HEC – HMS en la Predicción de Caudales Máximos**

- En la modelación con HEC – HMS se pudo evidenciar que cuando la intensidad de precipitación es muy alta en un determinado tiempo de duración ( $t_c$ ) se produce que las pérdidas hidrológicas no tienen la capacidad de asimilar tanta agua por lo que el

valor de las abstracciones iniciales es mínimo comparado con el total escurrido. Pero si la intensidad es suave para el mismo tiempo de duración se produce que existe más pérdida hidrológica respecto al total escurrido.

- Cuando la intensidad de precipitación es muy alta casi todo escurre porque las plantas están empapadas, el suelo está saturando, la velocidad de infiltración es muy baja comparado con la intensidad de lluvia, la velocidad de evapotranspiración es muy baja comparada con la intensidad de lluvia, poca pérdida, mucha escorrentía.
- Un gran aporte del HEC-HMS es que nos brinda el hidrograma resultante de crecida donde se puede ver como varía el caudal desde el inicio al final del escurrimiento directo.
- Su uso es relativamente sencillo siguiendo una sucesión de pasos que concuerdan con la teoría y con el cálculo manual, pero de una manera más rápida y efectiva.
- El HEC – HMS brinda muchas opciones de métodos a emplear para el cálculo de la escorrentía directa y la generación del hidrograma de crecida lo que permite al usuario elegir en función de los datos disponibles.
- Este estudio confirma el potencial de los modelos hidrológicos calibrados en la predicción del comportamiento del caudal en cuencas con información limitada.

### **Limitaciones**

- En realidad los caudales en crecida no suben ni bajan tan rápido como sucede en los hidrogramas simulados. Los hidrogramas de los caudales observados indican que este proceso es más lento, sobre todo en la curva de agotamiento.
- El modelo HEC – HMS requiere conocer los parámetros hidrológicos que intervienen en el proceso de transformación de la precipitación en escorrentía, si no se los tiene calibrados deben obtenerse con otras metodologías ajenas al HEC - HMS, entonces la precisión de los hidrogramas y caudales punta simulados dependen mucho de la calidad con que fueron obtenidos el valor de los diferentes parámetros.
- Ningún modelo tiene una eficacia de 100%, menos los que simulan los procesos de transformación de precipitación a escorrentía porque interviene una combinación de

varios factores cambiantes en el espacio y en el tiempo, por tal motivo todo resultado debe ser usado con cautela.

- Los datos de caudales aforados (observados) son muy importantes para la validación del modelo, por lo cual éstos deberían ser de larga extensión, continuos y confiables; las dos primeras condiciones no se cumplen en la mayoría de los casos, esto aumenta la incertidumbre en la calibración de los parámetros, ya que al tomar un periodo muy corto de registro de caudales se puede estar omitiendo algún año muy lluvioso o muy seco. Incluso la tercera condición de confiabilidad de datos de caudales se pone en duda ya que por estudios que se han hecho sobre la determinación de curva de descarga para determinados puntos de aforo se conoce que para lecturas muy altas en el limnómetro estas curvas de descarga arrojan valores muy altos. Además está latente el cambio de sección que puede sufrir el punto de aforo sobre todo en crecida lo cual altera la lectura y por ende los caudales registrados.

## **VII.2. RECOMENDACIONES**

Las indicaciones que se pueden dar para futuros estudios o utilizaciones del HEC – HMS, a partir de los aciertos o problemas presentados en el desarrollo de esta memoria son los siguientes:

- Para una buena calibración lo ideal es que se cuente con los registros de tormentas cada una hora, como los que entregan las estaciones pluviográficas. A esto hay que agregar que si se contase con un mayor número de estaciones pluviográficas dentro de la zona de estudio, se podrían utilizar otras opciones que ofrece el programa para distribuir espacialmente las lluvias, como por ejemplo los polígonos de Thiessen. Por esta razón recomendamos que se promueva la instalación de más estaciones pluviográficas y más estaciones de aforo en todo el departamento de Tarija.
- Si bien lo ideal es contar con toda la cartografía para un proyecto, es aconsejable que ésta se encuentre en formato digital, ya que facilita de forma notable la serie

de cálculos de longitudes y áreas que se deben realizar para obtener algunos de los inputs que exige el HEC – HMS en sus rutinas.

- El U.S. Army Corps of Engineer, actualmente presenta nuevos programas como el HEC GEO – HMS que permite conectarse a programas cartográficos como el ArcView. Así resultaría de gran ayuda implementar esta nueva herramienta en el proceso de traspaso de información cartográfica al HEC – HMS.
- Se recomienda el uso de este modelo ya que en los gráficos se verifica que los resultados son parecidos a los observados (aforados).
- El modificar la estructura del modelo puede ser una posibilidad que permita mejor el desempeño del modelo, dado el desconocimiento del funcionamiento de la cuenca es difícil adaptar el modelo a las condiciones de funcionamiento de la cuenca, lo cual sería el caso ideal.
- Antes de simular los caudales con este modelo se debe realizar el análisis de consistencia de los datos de precipitación, sólo si la información de entrada es buena los datos de salida (caudales) serán confiables.
- Se debe promover la calibración del modelo en varias zonas del país a fin de tener información de comparación de cómo varían los parámetros con las diferencia de suelos, vegetación, altura sobre el nivel del mar, etc.
- Se recomienda a la instituciones gubernamentales y otras como la universidad a promover la instalación de estaciones meteorológicas con la finalidad de que los diseños de presas, riego, agua potable y otros cuenten con información de calidad.
- El proceso de transformación de precipitación a escorrentía depende de una combinación de factores variables en el tiempo y espacio, por tal motivo cada cierto tiempo se debe volver a calibrar con otros datos actuales diferentes al usado en la calibración inicial, más aun donde el cambio climático se sienta con mayor severidad.
- Los sistemas cuenca, suelo y vegetación, como parte de un ecosistema, pueden resultar casi irreproducibles en su totalidad bajo un sistema de simulación, como el que se ha empleado para este estudio, lo cual plantea cierta cautela para su aplicación masiva en zonas semiáridas de Tarija, sobre todo en la obtención de

los parámetros. A pesar de este antecedente, no se debe dejar de lado esta técnica como medio de representación artificial de ambientes, ya que aporta alternativas y escenarios que en terreno son difíciles de evaluar o dimensionar por costos o tiempo. Por esta razón se recomienda promover más estudios para la calibración de éstos y otros parámetros que den más certeza en el cálculo de caudales máximos haciendo uso del HEC – HMS.

- En base al trabajo realizado recomendamos el uso del programa HEC – HMS para la generación de caudales máximos, recomendamos el uso de los parámetros calibrados en cuencas y subcuencas cercanas y similares a la cuenca del río Tolomosa tomando en cuenta la recomendaciones emitidas en este documento.

## BIBLIOGRAFÍA

### Bibliografía

- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HEC – HMS, EN LA CUENCA DE HUECHÚN, REGIÓN METROPOLITANA - RAMÓN SEBASTIÁN BUSTAMANTE ORTEGA - TALCA – CHILE 2008.
- ANÁLISIS DEL MODELO HEC-HMS PARA LA SIMULACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO ARGÁ EN PAMPLONA - MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ, ANNA SCAINI, MIKEL GOÑI – 2010.
- MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON HEC-HMS EN CUENCAS MONTAÑOSAS DE LA REGIÓN ORIENTAL DE CUBA - VALENTINA ESTRADA SIFONTES MSC. ING. EMPRESA RAUDAL. INRH. HOLGUÍN. - 2012
- MODELOS HIDROLÓGICOS. “Engineering Hydrology”, Víctor M. PONCE, Editorial Prentice Hall, 1989.
- MÉTODOS DE TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA Y DE PROPAGACIÓN DE CAUDALES Prof. Leonardo S. Nanía Curso Académico 2002-03
- USO DE INFORMACIÓN REGIONAL PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN CRECIDAS PLUVIALES Autor: VARGAS M., HAYDEE. NOVIEMBRE, 1989.
- REGRESIONES REGIONALES PARA LA DERIVACIÓN DE INFORMACIÓN A PRIORI DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS Autor: VARGAS M., HAYDEE, CORREA DEL R., SERGIO. NOVIEMBRE, 1989.
- CURVAS DE FRECUENCIAS REGIONALES PARA LA VARIABLE VOLUMEN DE ESCORRENTÍA DIRECTA Autor: VARGAS M., HAYDEE, ANDREANI V., CARLOS, BROWN F., ERNESTO. NOVIEMBRE, 1989.

# **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

**REGISTRO DE CAUDALES DIARIOS AFORADOS**

## **ANEXO 2**

**REGISTRO DE PRECIPITACIONES DIARIAS**

## **ANEXO 3**

**CAUDALES DE DISEÑO MEDIANTE LA LEY LOG PEARSON III**

## **ANEXO 4**

**DELIMITACIÓN DE LA CUENCA RÍO TOLOMOSA**