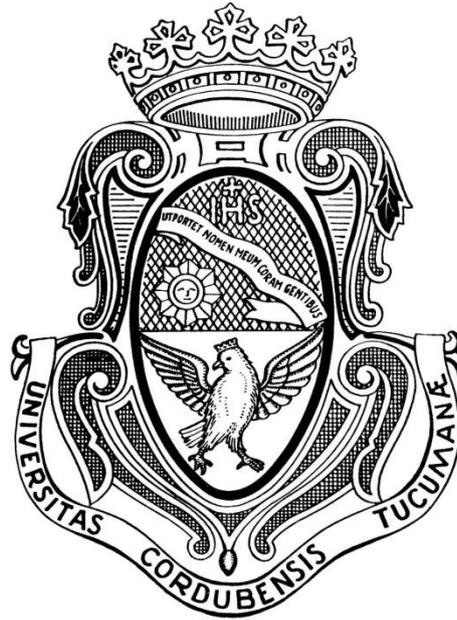


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



## FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

### PRACTICA SUPERVISADA

### **MAPA DE RIESGO HIDRICO DE LA LOCALIDAD DE**

### **"EL PUEBLITO".**

**AUTOR:** DURANTE, MARCOS PABLO

**TUTOR:** ING. CIVIL AMBROSINI, ALEJANDRO

**SUPERVISOR EXTERNO:** ING. CIVIL ACTIS DANNA, RUBEN

NOVIEMBRE 2015

## RESUMEN

En el presente informe se desarrolla el Mapa de Amenaza Hídrica de El Pueblito, ubicado en la localidad de Salsipuedes de la Provincia de Córdoba.

Se comenzó con una modelación digital del terreno, en base a un relevamiento topográfico y utilizando el software AutoCAD Civil 3D. Luego se determinó la lluvia de diseño, para lo cual se utilizó el modelo DIT 3p. Posteriormente se calculó el caudal que es conducido por el río, por medio del software HEC-HMS. Con dicho caudal se obtuvieron los niveles de inundación en el terreno por medio del método propuesto por Hermanneck.

Como tarea final de la Práctica Profesional Supervisada, los resultados obtenidos en las etapas anteriores fueron contrastados con el parcelario de El Pueblito para determinar cuáles eran las parcelas afectadas por las lluvias, generándose los planos y planillas correspondientes.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCION .....</b>	<b>5</b>
1.1 PLANTEO DE LA PROBLEMÁTICA .....	5
1.2 CASO DE ESTUDIO .....	6
1.3 MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	9
1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	9
1.4.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	9
1.4.2 <i>Objetivos Particulares</i> .....	9
1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO EMPLEADA .....	10
<b>CAPITULO 2: DELIMITACION Y DETERMINACION DE PARAMETROS DE CUENCA.....</b>	<b>10</b>
2.1 INTRODUCCION.....	10
2.2 DELIMITACION DE LAS CUENCAS DE APORTE.....	11
2.3 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FISICOS .....	12
2.4 TIEMPOS DE CONCENTRACION .....	13
2.4.1 <i>Dificultades y limitaciones de los métodos para predecir tc</i> .....	14
2.4.2 <i>Fórmulas consideradas para estimar el tiempo de concentración</i> .....	15
2.4.3 <i>Estimación de los tiempos de concentración</i> .....	15
<b>CAPITULO 3: PRECIPITACIONES .....</b>	<b>16</b>
3.1 INTRODUCCION.....	16
3.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA .....	16
3.3 PREDICCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO.....	19
3.4 ESTIMACIÓN DE LÁMINAS: MODELO DIT.....	20
3.5 TRANSPOSICIÓN DE PARÁMETROS.....	21
3.6 FUNCIÓN I-D-T EN EL PUEBLITO.....	22
3.7 DISTRIBUCION ESPACIAL.....	23
3.8 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL: HIETOGRAMA TIPO .....	25
<b>CAPITULO 4: PROCESO DE TRANSFORMACION LLUVIA-CAUDAL .....</b>	<b>26</b>
4.1 INTRODUCCION.....	26
4.1.1 <i>Conceptos de Modelos Hidrológicos:</i> .....	26
4.1.2 <i>Características del modelo HEC – HMS</i> .....	27
4.1.3 <i>Descripción del Modelo de simulación empleado HEC-HMS</i> .....	27
4.2 FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS METODOS ADOPTADOS DE PRODUCCION Y TRANSFERENCIA: .....	30
4.2.1 <i>Transformación Lluvia-Caudal:</i> .....	30
4.2.2 <i>Separación del Escurrimiento</i> .....	33
<b>CAPITULO 5: RESULTADOS DE LA MODELACION HIDROLOGICA.....</b>	<b>41</b>
5.1 ELECCIÓN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN.....	41
5.2 RESULTADOS DE LA MODELACION .....	41

<b>CAPITULO 6: NIVELES DE INUNDACION.....</b>	<b>43</b>
6.1 RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	43
6.2 ESTIMACION DE LOS NIVELES DE INUNDACION – FORMULA DE HERMANNECK.....	46
6.3 DETERMINACION DE PARCELAS EN RIESGO .....	49
<b>CAPITULO 7: CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>CAPITULO 8: ANEXOS.....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>69</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.2-1: UBICACIÓN DE EL PUEBLITO.....</b>	<b>7</b>
<b>FIGURA 1.2-2: ROTURA DE MEDIANERA.....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 1.2-3: ROTURA DEL ACCESO AL CENTRO DE APOYO AL NIÑO Y LA FAMILIA.....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 1.2-4: ALCANTARILLA RECONSTRUIDA DESPUES DE LA CRECIDA.....</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 2.2-1: IMAGEN DE CUENCA A LA QUE PERTENECE EL PUEBLITO.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 2.2-2: SECTOR DE LA CUENCA EN ESTUDIO.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 3.2-1: DISTRIBUCION DE LA LLUVIA MEDIA ANUAL EN LA PROVINCIA DE CORDOBA.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 3.5-1: DIVISION EN ZONAS DE LA PROVINCIA DE CORDOBA EN FUNCION DE LOS SIETE PLUVIOGRAFOS.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 3.6-1: CURVAS I-D-T SEGÚN MODELO DIT.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3.7-1: TRAZAS DE LA SUPERFICIE DE ATENUACION AREAL MODELO CoDA.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 3.8-1: HIETOGRAMA ADIMENSIONAL DURACION DE LLUVIA 120 MINUTOS.....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 3.8-2: HIETOGRAMA DIMENSIONALIZADO PARA 5 AÑOS DE RECURRENCIA.....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 4.2-1: HIDROGRAMAS SINTETICOS DEL SCS.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 4.2-2: RELACION PRECIPITACION TOTAL VS PRECIPITACION</b>	

EFFECTIVA USANDO VALORES DE CN.....	35
FIGURA 4.2-3: VARIABLES DEL METODO SCS.....	36
FIGURA 5.2-1: MODELACION HIDROLOGICA CON CUBIERTA VEGETAL.....	42
FIGURA 5.2-2: MODELACION HIDROLOGICA SIN CUBIERTA VEGETAL.....	43
FIGURA 6.1-1: CURVAS DE NIVEL DE LA CUENCA EN ESTUDIO.....	44
FIGURA 6.1-2: TRAMO DE RIO ANALIZADO.....	44
FIGURA 6.1-3: UBICACIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES.....	45
FIGURA 6.1-4: PERFIL TRANSVERSAL N° 1.....	45
FIGURA 6.2-1: ESQUEMA DE PERFILES PARA FORMULACION DE HERMANNECK.....	46
FIGURA 6.2-2: MANCHA DE INUNDACION.....	48

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2.3-1: PARAMETROS FISICOS DE LA CUENCA.....	13
TABLA 2.4-1: TIEMPOS DE CONCENTRACION.....	16
TABLA 4.2-1: VALORES DE CN PARA DIFERENTES COMBINACIONES HIDROLOGICAS PARA CUENCAS EN CONDICION II .....	37
TABLA 4.2-2 Y TABLA 4.2-3: TABLA ADICIONAL DE VALORES DE CN PARA LAS CUENCAS EN CONDICION II.....	38
TABLA 4.2-4: CONDICIONES DE HUMEDAD PARA LA DETERMINACION DEL CN.....	38
TABLA 4.2-5: TRANSFORMACION DE CN PARA DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE DEL SUELO.....	39
TABLA 4.2-6: CN PARA DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD DEL SUELO, GRADO DE URBANIZACION Y COBERTURA VEGETAL...40	
TABLA 6.2-2: RESUMEN METODOLOGIA HERMANNECK.....	47
TABLA 6.2-3: RESULTADOS DE HERMANNECK.....	48
TABLA 6.3-1: PARCELAS AFECTADAS POR PRECIPITACION DE	

57mm.....49

## **CAPITULO 1: INTRODUCCION**

### **1.1 PLANTEO DE LA PROBLEMÁTICA**

El crecimiento de las urbanizaciones es un proceso mundial, pero se acentúa más en América del Sur. En la actualidad, el 80 % de la población de América Latina se concentra en las ciudades. Esa tendencia, que también se registra en Argentina, genera la continua búsqueda de espacios y la necesidad de una planificación urbana.

Si bien el crecimiento poblacional en la Argentina es de alrededor del 2% anual, la falta de un ordenamiento territorial de las ciudades hace que se ocupen áreas no aptas para el asentamiento, debido a que son afectados por fenómenos naturales. Ejemplo de esto es la ocupación de terrenos en las márgenes de los ríos, arroyos y cuerpos de agua.

Se hace necesario definir superficies que pueden ser habitadas permanentemente, de dominio público o privado y otras en las cuales se puede restringir el uso. Para ello debe hacerse un estudio de la dinámica de los cursos permanentes y no permanentes que se encuentren en las proximidades de poblaciones o aquellas que queden contempladas en un plan de urbanización, considerando aspectos hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos, abarcando áreas rurales y urbanizadas.

Los desastres originados por fenómenos naturales provocan miles de víctimas en todo el planeta.

El termino desastre hace referencia a un evento que ocurre, por lo general, en forma repentina e inesperada, causando perjuicios severos a una comunidad, una región o un país, sea por muerte o enfermedad en la población, destrucción o pérdida de sus bienes, efectos adversos sobre el ambiente, etc.

La mención de desastres lleva a considerar la idea de riesgo, entendido como el resultado de relacionar la amenaza que entraña al fenómeno con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Rodríguez 2004).

El desastre asociado a las crecientes de los cursos de agua, por ejemplo, es la inundación de áreas urbanas, en las riberas de arroyos y lagos.

Evaluar la amenaza es tener en cuenta la posibilidad de ocurrencia del fenómeno, analizando la magnitud con los estudios y herramientas propuestas, planteando la necesidad de registrar eventos en el tiempo.

Las catástrofes hídricas responden a las amenazas que no pueden ser neutralizadas, aunque algunas veces es posible controlar parcialmente sus efectos.

Las tareas de prevención de amenazas hídricas involucran estrategias de planificación del uso del suelo, medidas técnicas y legales. Una de las medidas necesarias es la accesibilidad a los cursos de agua por ambas márgenes del mismo a través de caminos, los cuales permiten el uso de los recursos naturales que no son privados sino que pertenecen a todos los habitantes, además de convertirse en una barrera

física que impide la apropiación de terrenos antes mencionados.

## 1.2 CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Salsipuedes se localiza en el Departamento Colón, 35 kilómetros al norte de la ciudad capital de la provincia de Córdoba; inserta en el complejo geológico conocido como Sierras Chicas. El municipio forma parte del conglomerado urbano del Gran Córdoba y, por su población, es la sexta localidad de este conjunto territorial. El crecimiento poblacional de la localidad presenta un fuerte ascenso en lo que fueron los dos últimos períodos intercensales; entre 1991 y 2001 el crecimiento fue de 56% y en el período 2001-2010 el porcentaje es de 52,86% mientras que a nivel nacional esa cifra representaba para el primer corte el 10,8% y para el segundo 10,6%. Dicho crecimiento no responde a un aumento de la natalidad, sino a la incorporación de nuevos habitantes provenientes de la Ciudad de Córdoba en su gran mayoría.

El proceso de importante inmigración provocó no sólo el crecimiento poblacional recién mencionado sino también modificaciones en los ámbitos urbanístico y ambiental, lo cual a su vez trajo aparejado cambios en la dinámica socio-cultural de la localidad. A esto se suma la crisis ambiental que experimenta la zona como producto del crecimiento demográfico, del mal uso y ocupación del suelo sobre áreas no preparadas para ello (a causa de la proliferación de construcciones irregulares), de la deforestación, de la pérdida de biodiversidad, del cambio climático global, etc. Esta situación afecta a la vegetación autóctona, dificultando su incidencia sobre la conservación de otros recursos naturales al establecer la estructura del ecosistema, proveer de hábitat para la fauna, proteger las cuencas hídricas de la erosión, regular el régimen hidrológico e intervenir en procesos naturales a mayor escala. A su vez, las zonas adyacentes se encuentran cíclicamente afectadas por la falta de agua para consumo humano, ya que sufren un clima semiárido con lluvias concentradas en verano y otoño, siendo escasas o nulas durante el resto del año, debido a lo cual experimentan períodos prolongados de sequías.

El Pueblito es un barrio de Salsipuedes, ubicado a cuatro (4) kilómetros de dicha ciudad, continuando por la Ruta E-53 (en la Figura 1.2-1 se muestra la ubicación de El Pueblito). Su principal inconveniente es, como se menciona anteriormente, el asentamiento de la población en los márgenes del cauce del río.

En las lluvias ocurridas en el verano del 2015, periodo comprendido entre Febrero y Marzo, las mismas fueron de una gran magnitud, produciendo serios daños a la comunidad, de los que podemos mencionar: inundación y rotura de casas para lo cual los habitantes debieron evacuarse por sus propios medios y corte de la Ruta E-53 al romperse las alcantarillas de cruce. En la Figura 1.2-2 se puede ver unas de las construcciones afectadas por la crecida, en la Figura 1.2-3 se muestra el acceso al centro de apoyo al Niño y la Familia arrasado por el río y en la Figura 1.2-4 podemos ver como se reconstruyó la alcantarilla de cruce de la Ruta E-53 que dejó sin acceso a El Pueblito desde Salsipuedes.

MAPA DE RIESGO HIDRICO DE LA LOCALIDAD DE "EL PUEBLITO"

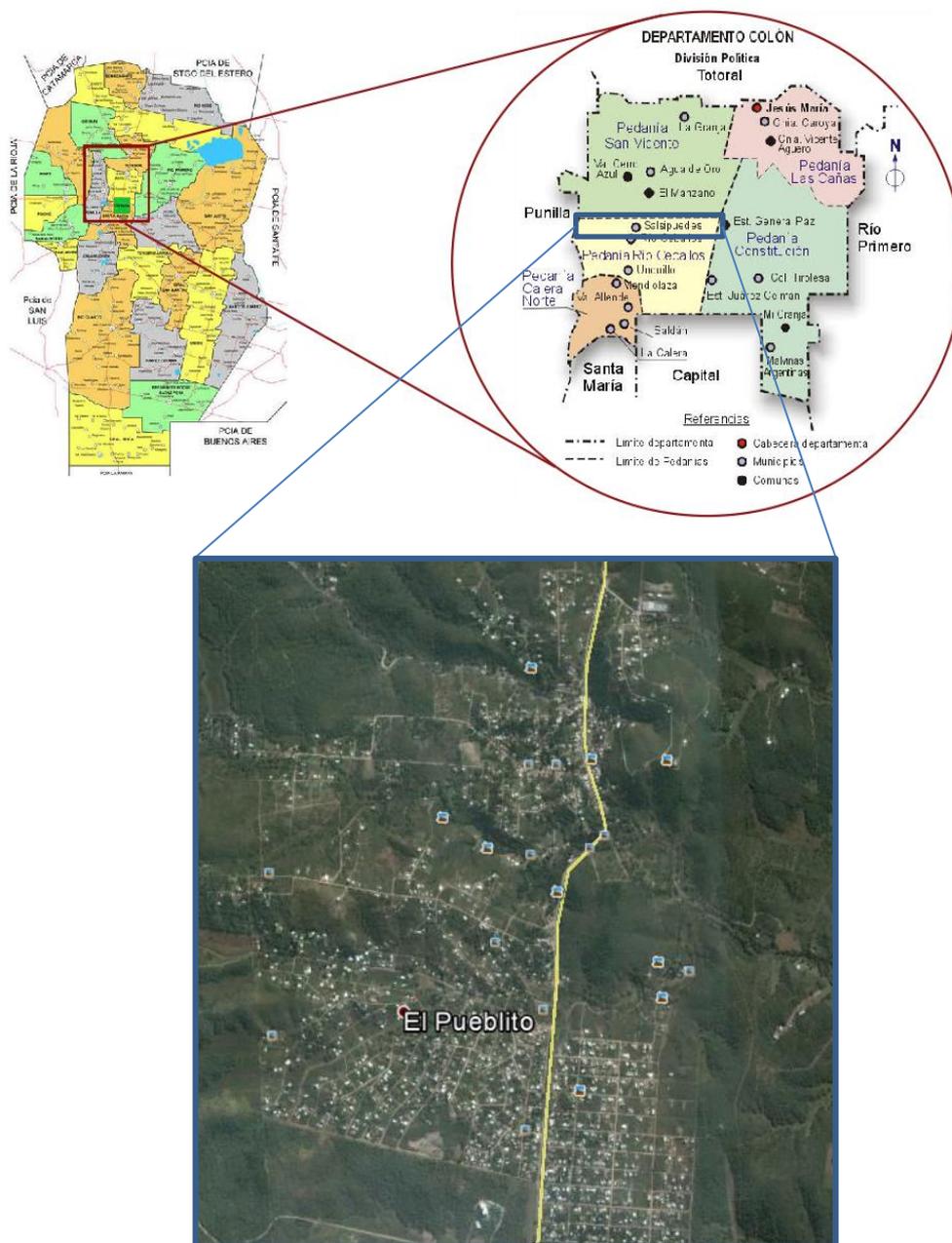


Figura 1.2-1 Ubicación de El Pueblito



**Figura 1.2-2:** Rotura de Medianera



**Figura 1.2-3:** Rotura del acceso al centro de Apoyo al Niño y la Familia



**Figura 1.2-4:** Alcantarilla reconstruida después de la crecida

### **1.3 MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

El presente trabajo conforma el informe técnico correspondiente a la asignatura denominada Práctica Profesional Supervisada, de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales dependiente de la Universidad Nacional de Córdoba.

El informe que se presenta contiene toda la información sobre las tareas desarrolladas por el alumno. A toda esa información se le ha dado el marco teórico correspondiente, que integra los conceptos aprendidos durante el desarrollo de la carrera de grado con los obtenidos durante el desarrollo de la práctica.

### **1.4 OBJETIVOS DEL TRABAJO**

#### **1.4.1 Objetivos Generales**

- ✓ Elaborar el Mapa de Riesgo Hídrico en la Localidad de El Pueblito, que sirva de base para la Planificación y Ordenamiento Territorial.
- ✓ Brindar una herramienta para la toma de decisiones a los diferentes organismos encargados de la defensa civil, para resguardar la seguridad de sus habitantes.

#### **1.4.2 Objetivos Particulares**

- ✓ Obtener experiencia práctica, aplicando y profundizando los conceptos adquiridos durante los años de estudio de la carrera.
- ✓ Aprender sobre el uso y manejo de software específicos de aplicación.
- ✓ Desarrollar habilidades para un mejor desenvolvimiento en el ámbito laboral,

profesional y de trabajo multidisciplinario.

- ✓ Elaborar un informe de utilidad para estudios posteriores y/o análisis relacionados con la temática expuesta.
- ✓ Lograr integración en un grupo de investigación y exponer los avances de esta práctica ante ellos.
- ✓ Brindar soluciones a diferentes problemáticas causadas por excedentes hídricos en dicha Localidad.

## 1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO EMPLEADA

Para cumplimentar con los objetivos propuestos, las actividades que se desarrollaron fueron:

1. Definición del área de estudio.
2. Recopilación de antecedentes.
3. Relevamiento topográfico de la zona de interés.
4. Delimitación de las cuencas de aporte
5. Localización espacial de las estaciones pluviográficas y pluviométricas disponibles.
6. Determinación de lluvias de diseño.
7. Modelo hidrológico para caracterizar la transformación Lluvia-Caudal en la cuenca (HEC-HMS).
8. Determinación de los hidrogramas a la salida de cada cuenca.
9. Determinación de la mancha de inundación por medio de Hermanneck.
10. Elaboración de mapa de riesgo hídrico.
11. Elaboración de conclusiones y análisis de resultados.

## CAPITULO 2: DELIMITACION Y DETERMINACION DE PARAMETROS DE CUENCA

### 2.1 INTRODUCCION

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un impacto positivo si se la considera como recurso hídrico y se tienen en cuenta los efectos benéficos, como son su uso doméstico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Mientras que, también se puede tener un impacto negativo si se habla de los fenómenos como amenazas hídricas; tal es el caso de los efectos nocivos producidos sobre seres vivos, suelos, infraestructura, seguridad, tránsito, etc.

Dentro de estos efectos nocivos se busca prevenir un desastre, el cual será todo evento o suceso, que generalmente ocurre de manera repentina e inesperada, provocando daños severos a una colectividad, región o país. Los desastres van a responder a amenazas, y evaluar las mismas implica pronosticar o predecir la ocurrencia y magnitud del fenómeno, con referencia en el mecanismo generador y el monitoreo y/o registro de eventos en el tiempo. Cuando se pronostica se determina un monto y tiempo de ocurrencia breve (dadas las incertidumbres) para el suceso. Es decir que el pronóstico es un anticipo de lo que va a ocurrir, para poder avisar a la población amenazada sobre el fenómeno peligroso. En resumen, los modelos de

pronóstico constituyen sistemas de alerta y se utilizan en situaciones de emergencia.

En cambio, en lo que respecta a la predicción, la misma no determina cuándo se producirá el evento hipotético, sino cuál será la magnitud del mismo, en función de su duración y recurrencia (con base en información probabilística); o bien, en el largo plazo, cuál será el evento máximo probable. Se asume que ocurrirá en algún momento de un período plurianual, relacionado con la planificación y dimensionamiento de obras en el área potencialmente afectable, con lo que resulta desacertado asignarle fecha u hora. En este ámbito de la predicción está incluido el tema de lluvias para diseño hidrológico.

“El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo”

La variable más relevante y requerida es el caudal, “Q”; que se predice con una estimación estadística, considerando la estacionariedad del fenómeno, y usando datos históricos, con una longitud de serie suficiente. Con esto se asegura que una muestra sea larga y representativa, con lo que se tendrá menos incertidumbre.

Lamentablemente los registros históricos de caudal no son habituales en Argentina, por ello se recurre a la información de lluvia, proceso físico generador del escurrimiento, y modelos de transformación lluvia-caudal.

Con la información de lluvias, para predecir la lámina para distintas duraciones, se necesitan registros continuos (pluviografía), y como la misma es escasa espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información pluviométrica habitualmente disponible. La misma es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un período de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización de la información pluviométrica, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

## **2.2 DELIMITACION DE LAS CUENCAS DE APORTE**

La delimitación y subdivisión de las cuencas se realizó sobre la base de cartas topográficas I.G.M (Instituto Geográfico Militar), geo referenciadas y con la utilización de imágenes satelitales con diferentes composiciones de bandas y fechas. Todos los datos definidos con estas bases cartográficas, fueron verificados in-situ mediante relevamientos de campaña.



Figura 2.2-1 Imagen de cuenca a la que pertenece el Pueblito



Figura 2.2-2: Sector de la cuenca en estudio

### 2.3 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FISICOS

Un fenómeno natural de características hidrológicas está regido, en general, por una determinada cantidad de variables que interactúan entre sí, las que generan un evento meteorológico complejo cuya discretización se hace extremadamente complicada y compleja.

El reconocimiento de estas variables es el primer paso para lograr la representación numérica de este tipo de fenómenos constituyéndose en una de las tareas con mayor importancia.

El modelo matemático está basado en una esquematización simplificada del contexto

hidrológico, enmarcando no solo la cuenca sino también los eventos meteorológicos relevados y, posteriormente, la asignación de los distintos procesos involucrados para la representación del mismo. En esta concepción la cuantificación de las variables que actúan dentro del fenómeno es totalmente relevante.

La estructura hidrográfica se resolvió identificando las subcuencas que aportan a los cursos principales, determinando para cada una de ellas los parámetros que las caracterizan a nivel fisiográfico e hidrológico. Este estudio más detallado fue necesario frente al objetivo planteado al momento de definir las características que tendría el modelo numérico a realizar.

Para la cuenca hidrográfica se determinó el área de la misma, la longitud del curso principal y la pendiente del mismo.

- ✓ *Área de la cuenca (A)*: el área de la cuenca es sin duda una de las características geomorfológicas más importantes para el análisis hidrológico. La misma constituye el "factor de escala" en la relación de transformación lluvia-caudal, obteniendo valores que permitieron estudiar de modo detallado toda la zona de influencia del área bajo estudio. La determinación del área fue empleada en este estudio para analizar los parámetros fisiográficos fundamentales de la cuenca como así también para el desarrollo del modelo hidrológico.
- ✓ *Longitud del cauce principal (L)*: Se determina por medición directa de la longitud del cauce más importante de la cuenca. En la elección de dicho cauce, se tiene en cuenta en cada caso, tanto la longitud del mismo, como su desnivel, buscando siempre el curso que presenta en lo posible, el máximo para ambos valores.
- ✓ *Pendiente Media (Sm)*: Relación entre la altura total del cauce principal (cota de máxima menos cota de mínima) y la longitud del mismo.

La Tabla 2.3-1 muestra los parámetros físicos de la cuenca en estudio.

CUENCA	PARAMETROS FISICOS			
	AREA (A) [Ha]	LONGITUD (L) [km]	DESNIVEL (H) [m]	PENDIENTE (Sc) [%]
El Pueblito	5.55	3.95	165	4.18

**Tabla 2.3-1:** Parámetros Físicos de la cuenca

## 2.4 TIEMPOS DE CONCENTRACION

El tiempo de concentración es uno de los parámetros del tiempo de respuesta característicos de una cuenca hídrica.

La mayoría de los métodos de función de transferencia consideran parámetros de

tiempo característicos del escurrimiento de una cuenca.

El tiempo de concentración  $T_c$ , es uno de los parámetros utilizados con mayor frecuencia y constituye un ingrediente vital para la estimación de respuestas máximas en cuencas urbanas. La utilización del mismo sin embargo, se extiende también a aplicaciones que persiguen otros objetivos tales como la simulación de eventos y el pronóstico de caudales. Los modelos utilizados para estos fines suelen utilizar técnicas de calibración o actualización de sus parámetros.

En la práctica existen tres alternativas básicas para estimar el valor de  $T_c$  en una cuenca:

1. A partir de pares de valores observados de lluvia-caudal;
2. Mediante el uso de fórmulas empíricas, y
3. Utilizando el enfoque físico basado en la ocurrencia de flujo cinemático.

Existe un gran número de fórmulas empíricas descritas en la literatura. Las mismas por lo general provienen de los países desarrollados y han sido deducidas para condiciones de caudales máximos. Aunque las fórmulas varíen entre sí, la mayoría relaciona  $T_c$  a diversos parámetros de la cuenca como la superficie, la longitud del curso, la pendiente del terreno, las condiciones de resistencia al flujo, etc. La aplicación de este tipo de fórmulas es simple, hecho que ha extendido su uso en el mundo. Sin embargo, la naturaleza empírica de las mismas, y la falta de una real diversidad en los datos utilizados en su ajuste limitan su valor.

#### **2.4.1 Dificultades y limitaciones de los métodos para predecir $t_c$**

Pese a su influencia sobre la incertidumbre total en la estimación de caudales no existe en la práctica un método único para predecir con exactitud  $T_c$ . Los métodos basados en la definición clásica del  $T_c$  tienden a contemplar las características de la cuenca. Se basa en hipótesis simplificadoras tales como: comportamiento lineal de la cuenca, ocurrencia de un flujo uniforme, unicidad del valor del coeficiente de resistencia, unicidad del valor del radio hidráulico, distribución homogénea de la lluvia, etc. Por otra parte un mismo método utilizado por usuarios diferentes puede arrojar resultados diferentes debido a la subjetividad en la adopción de los valores de algunos coeficientes. Los métodos basados en las características del conjunto hietograma-hidrograma también presentan limitaciones. Las principales de ellas se asocian a la inexistencia de métodos universales consagrados tanto para realizar la separación del hidrograma como para establecer la distribución temporal exacta de la lluvia neta. Por consiguiente, la combinación de distintos métodos conduce a la estimación de distintos valores de  $T_c$ . Otras limitaciones asociadas al hietograma corresponde a su heterogeneidad espacial y a la variación de su frecuencia o tiempo de retorno.

Es preciso considerar también que no existe una definición única y universal de cada uno de los parámetros de tiempo característicos del escurrimiento. Las diferencias residen en los instantes que son considerados por cada autor para describir el inicio y o fin de cada período.

## 2.4.2 Fórmulas consideradas para estimar el tiempo de concentración

### 1. Formula de Temez (M.O.P.U)

Recomendada en España

$$T_c = \frac{0.3 * L^{0.76}}{S_c^{0.19}}$$

Donde Tc es el tiempo de concentración en horas; L es la longitud del cauce principal en Km; Sc es la pendiente media del cauce principal en m/m.

### 2. Formula de Kiprich

Recomendada en España

$$T_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Donde Tc es el tiempo de concentración en minutos; L es la longitud del cauce principal en metros; H la diferencia de nivel de la cuenca en metros.

### 3. Formula de Carter

Utilizada para Áreas menores a 1800 Ha, Pendientes del cauce principal menores a 0.5% y Longitudes del cauce principal menores a 11 Km.

$$T_c = \frac{1.7 * (L * 10)^{0.6}}{S_c^{0.30}}$$

Donde Tc es el tiempo de concentración en minutos; L es la longitud del cauce principal en Km; Sc es la pendiente media del cauce principal en m/m.

### 4. Formula de Pilgrim

Desarrollada para cuencas rurales de Australia (Pilgrim y Cordery, 1993).

$$T_c = 0.76 * (A)^{0.38}$$

Donde Tc es el tiempo de concentración en horas; A es el Área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

## 2.4.3 Estimación de los tiempos de concentración

Se han calculado los tiempos de concentración teniendo en cuenta las distintas variables que involucran cada una de las formulaciones antes mencionadas. En la tabla 2.4-1 se presenta el tiempo de concentración calculado según las formulas descritas en la sección 2.4.2, realizando un promedio y adoptando un valor.

CUENCA	TIEMPO DE CONCENTRACION				
	FORMULA 1 [hs]	FORMULA 2 [hs]	FORMULA 3 [hs]	FORMULA 4 [hs]	PROMEDIO [hs]
El Pueblito	1.48	2.27	0.67	1.46	1.47

**Tabla 2.4-1:** Tiempos de Concentración

## CAPITULO 3: PRECIPITACIONES

### 3.1 INTRODUCCION

Para numerosos propósitos ingenieriles es necesario conocer las precipitaciones máximas para distintas duraciones asociadas a su probabilidad de ocurrencia, a fin de poder realizar estimaciones de los caudales resultantes en los escurrimientos superficiales.

La información requerida depende del objetivo perseguido y en parte de la técnica de inferencia a emplear. La estimación de crecientes de proyecto incluye combinaciones de intensidad y persistencia extremas de la lluvia para cada probabilidad de ocurrencia o recurrencia (Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia o I- D-T), así como la estructura interna o el patrón de distribución temporal medio de la altura de agua caída en la tormenta (hietograma tipo).

Este tipo de información solo puede extraerse de registros de alta frecuencia, analógicos o cuasi continuos, normalmente fajas pluviográficas, y no se cuenta con él en cualquier lugar. Es en cambio habitual otro dato provisto por pluviómetros: la lámina diaria total. Se hace necesario entonces regionalizar la estadística de esta variable y asociarla al análisis pluviográfico para poder transferir el conocimiento que este aporta a cada punto de interés.

Para superar esta situación se elaboró en el pasado un Proyecto del cual formaron parte la Dirección Provincial de Hidráulica (actualmente Subsecretaría de Recursos Hídricos), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida (CIRHSA) cuyo objetivo general fue desarrollar la tecnología necesaria para la estimación de tormentas de proyecto con alcance regional y específicamente llevar a cabo la tarea de regionalizar las lluvias máximas diarias para un gran número de puestos pluviométricos provinciales, deducir las relaciones entre intensidades duraciones y frecuencias así como las distribuciones temporales internas de las tormentas y finalmente proponer un mecanismo para evaluar hietogramas de proyecto de cualquier lugar de la Provincia.

### 3.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Según la carta de precipitaciones, que se muestra en la Figura 3.2-1, se ponen de manifiesto cinco áreas fundamentales de lluvias. En general la precipitación degrada desde el este-sudeste al noroeste de 800 a 400 mm anuales, mientras que las

temperaturas aumentan en igual sentido.

En primer lugar la del este, con lluvias entre 900 y 800 mm con dos focos de más de 900 mm, uno alrededor de San Francisco y el otro al norte de Arias. Esta área lluviosa se debe al mayor alcance y eficiencia de las masas de aire subtropical marítimo. La orientación meridional de esta franja es consecuencia de la elevada concentración estival de las precipitaciones, época durante la cual el anticiclón subtropical alcanza su máximo desplazamiento hacia el sur.

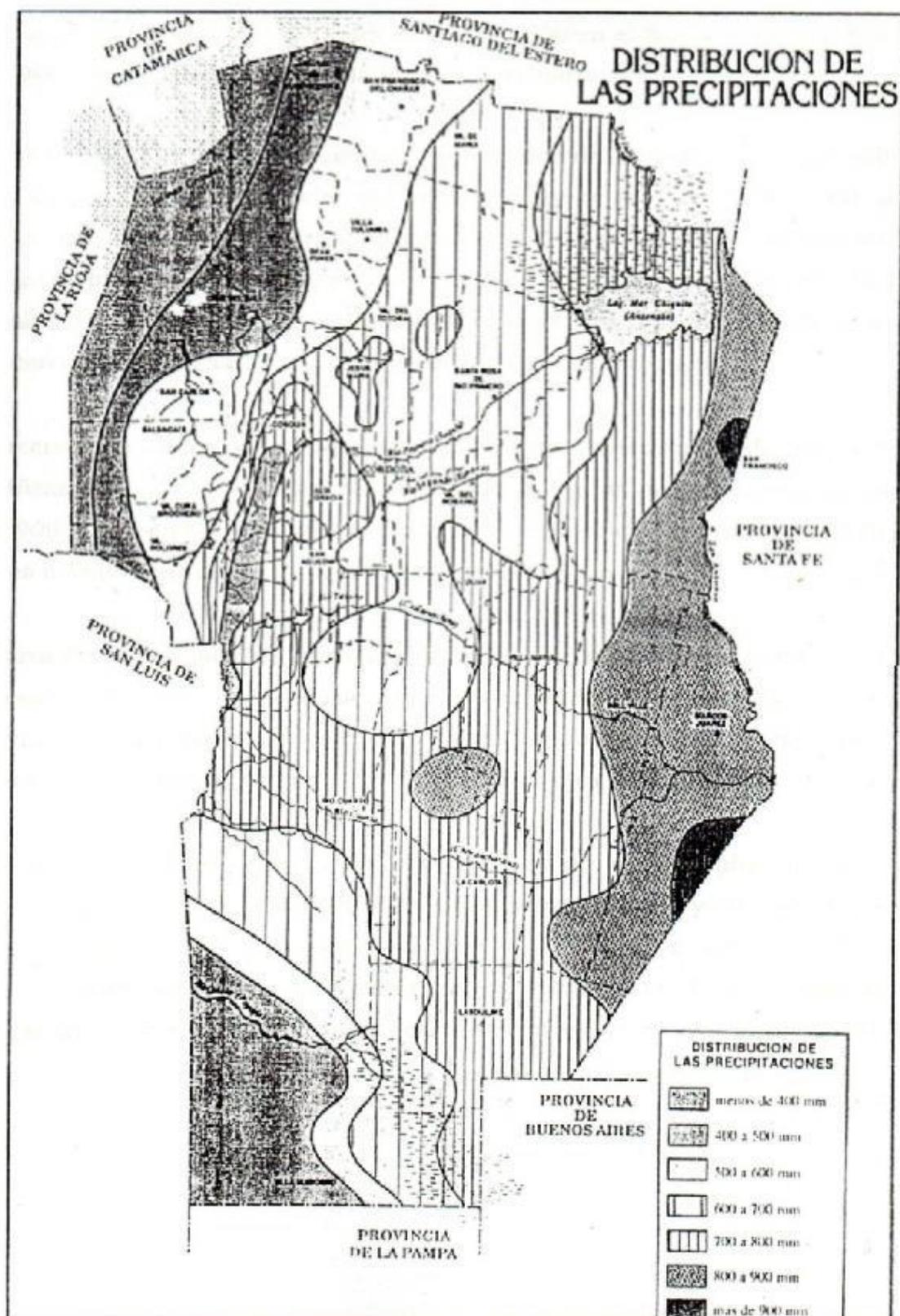


Figura 3.2-1 Distribución de la lluvia media anual en la provincia de Córdoba (Fuente:

Tesis de Maestría "Lámina de lluvia puntual para diseño Hidrológico").

Una segunda área es la diagonal de sentido SO - NE, a occidente de la anterior, con lluvias que oscilan entre los 800 mm en el NE y 500 en el SO, con un pequeño foco de 800 a 900 mm equidistantes de Villa María y Río Cuarto.

Se pone de manifiesto aquí el progresivo agotamiento de la humedad del aire subtropical de E a O, por un lado, y la acción del frente frío que se desplaza de SO al NE por otro. Además hay un aumento de precipitaciones a medida que el choque de aire frío con el caliente se produce más al N, es decir, donde este conserva mejor su condición original o sea cálida y húmeda. Finalmente, la extensión de área hacia el occidente, junto con el relieve, es una consecuencia de la excitación orográfica.

La tercera área, estrecha y larga es también una consecuencia de las excitaciones orográficas. En los niveles inferiores de las montañas las precipitaciones oscilan entre 800 y 900 mm, y en los altos niveles pasan estas cifras para producir los valores propios del área más lluviosa de la provincia (San Francisco y Arias).

La cuarta área corresponde a la planicie del NO, donde la tensión de vapor es baja y las temperaturas son elevadas. A causa del escaso contenido de agua de las masas de aire, la lluvia disminuye desde el borde de las montañas, donde llega a 600 mm, hacia el NO, en que alcanza menos de 400 mm. Es la región más seca de la provincia.

Por ultimo existe un área entre la anterior y la segunda, con precipitaciones inferiores a esta pero superiores a la planicie del NO. Oscilan entre los 600 y 700 mm. Su inserción puede explicarse por el agotamiento, hacia el O, de las masas húmedas del anticiclón tropical, efectos orográficos atenuados por la menor altitud de la montaña y la propagación, hacia el este, de la incidencia de las masas de aire cálido y seco del NO.

### **3.3 PREDICCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO.**

Las lluvias de diseño son eventos pluviales idealizados para reflejar las exigencias de origen hidrometeorológicas a las que se verían sometidas las obras y los planes de ocupación del suelo.

Los rasgos o componentes que caracterizan a una lluvia de diseño son:

- Magnitud: valor que alcanzaría la intensidad o la altura precipitada en un punto.
- Persistencia: duración del intervalo de lluvia para la cual se predice.
- Probabilidad: frecuencia futura estimada o periodo de retorno anual del evento.
- Ubicación: patrón de valor temporal interna de la lluvia de diseño (hietogramas tipo).
- Atenuación: reducción de la lluvia local a escala de cuenca, para predecir descargas.

La metodología para obtener las lluvias de diseño comprende básicamente tres aspectos: a) La estimación de láminas y transposición de parámetros.

b) La atenuación espacial de las lluvias para ser utilizadas a nivel de cuenca y c) La

distribución temporal interna o hietogramas tipo de la lluvia.

### 3.4 ESTIMACIÓN DE LÁMINAS: MODELO DIT

La estimación de láminas de diseño demanda conocer una función que relacione la intensidad (i), la duración (d) y la recurrencia (T) de las lluvias, conocida como función i-d-T. Caamano Nelli y Garcia (1999), desarrollaron un algoritmo conceptual denominado MODELO DIT, que permite encontrar la relación i-d-T a partir de series de lluvias máximas diarias. Fue calibrado utilizando información de más de 150 estaciones de lluvia de la Provincia de Córdoba.

El algoritmo parametriza el rol de la lluvia diaria en el vínculo i-d-T y permite transponer este como una superficie tridimensional continua. El modelo asume distribución probabilística log normal de las láminas máximas anuales de cualquier duración y se calibra sobre ternas i-d-T extraídas de funciones de distribución log normales (FDP) de las duraciones elegidas. El modelo se basa en la ecuación, en forma logarítmica:

$$\ln(i)_{d,T} = A \cdot \phi_y - B \cdot \delta_y + C \quad (3.1)$$

Donde  $\phi_y$  es el factor de frecuencia normal y  $\delta_y$  es el factor de persistencia, que depende a su vez de las variables independientes, es decir, la recurrencia y la duración de la lluvia. La aproximación algebraica del primero es:

$$\phi_y = 2,584458 \times (\ln T)^{0,375} - 2,252573 \quad (3.2)$$

$$\text{en tanto que } \delta_y = [\ln(d)]^q \quad (3.3)$$

DIT tiene 4 parámetros: *A*, *B* y *C* de la ecuación (3.1) y *q* de la ecuación (3.3). Los exponentes *q* y *B* son parámetros de cada zona, mientras que *A* y *C* dependen de las características locales. Estos últimos fueron deducidos como sumas, entre cuyos términos se encuentran, respectivamente,  $\mu$  y  $\sigma$ , la media y el desvío estándar de los logaritmos de la serie de láminas máximas diarias anuales.

Para los pluviómetros, la información local sobre lluvias máximas está contenida en esa serie y se expresa a través de sus estadísticos en la función. Esa propiedad permite transponer la i-d-T a cada puesto, sustituyendo los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  para incorporar sus rasgos específicos.

Calibrado DIT para un pluviógrafo, la transposición a los puestos pluviométricos asociados es muy sencilla: Basta con sustituir dos estadísticos (de los logaritmos de láminas diarias máximas), la media ( $\mu$ ) y del desvío estándar ( $s$ ) de la primer serie, por los de la segunda,  $\mu'$  y  $s'$ .

El reemplazo se efectúa en los parámetros *C* y *A* de la ecuación (3.1), ajustada para el pluviógrafo, y se obtienen los correspondientes *C'* y *A'* del pluviómetro sin nueva calibración:

$$A' = A - \sigma + \sigma' \quad C' = C - \mu + \mu'$$

Tal proceder es válido debido a que el significado conceptual de los parámetros (y la forma modular resultante de la ecuación), permite identificar que cambia de un sitio a

otro, además de incorporar valiosa información local.

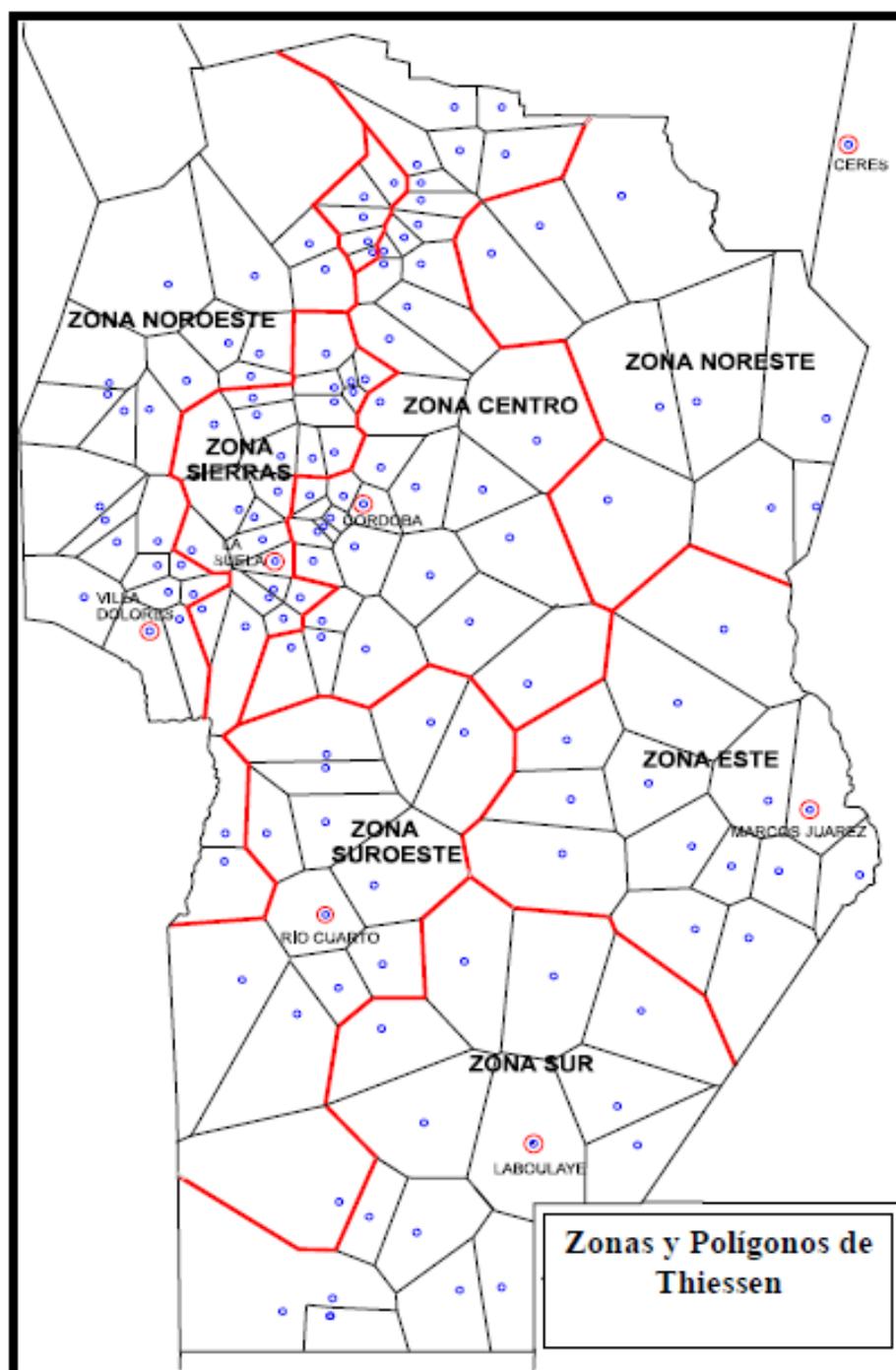
Tal como está planteado el modelo, su aplicabilidad está sujeta a cuatro requisitos:

- Las láminas de lluvias máximas, de duración dada, son representables por funciones de densidad log normales.
- La expresión no paramétrica de  $\phi_y$  permite sustituir en forma biunívoca el factor de frecuencia normal por el periodo de retorno.
- Las relaciones entre láminas (para  $d$  y  $T$ ) se mantienen en la zona de cada pluviógrafo base, lo que permite transponer la función  $i$ - $d$ - $T$  a los pluviómetros satélites.
- Por la forma en que está planteado el factor de persistencia, es válido estimar en conjunto todos los términos afectados por la duración de la lluvia.

### **3.5 TRANSPOSICIÓN DE PARÁMETROS**

Los datos transferidos deben someterse a técnicas racionales de adaptación de los valores desde el lugar de medición al lugar de utilización, lo que se conoce como métodos de transposición.

Para el estudio de las Lluvias de Diseño (Caamano Nelli, Dasso, 2003) la provincia de Córdoba fue dividida en siete zonas, en función de 141 estaciones pluviométricas existentes, representada cada zona con una estación base pluviográfica. A cada estación base se le asignó representatividad sobre los pluviómetros satélites existentes en cada zona. La Figura 3.5-1 muestra las siete zonas en que fue dividida la provincia y la ubicación de los 141 pluviómetros y los 7 pluviógrafos base.



**Figura 3.5-1:** División en zonas de la Provincia de Córdoba en función de los siete Pluviómetros (Caamaño Nelli, Dasso, 2003)

### 3.6 FUNCIÓN i-d-T EN EL PUEBLITO

Para la obtención de una i-d-T que provea las láminas de diseño propias para este estudio se requieren series pluviográficas largas, ausentes en la cuenca. Para suplir este inconveniente, se transpone regionalmente la función i-d-T de un pluviógrafo, en

este caso La Suela, a un pluviómetro ubicado dentro de la zona meteorológicamente homogénea, donde B y q son constantes. Esta transposición consiste en sustituir la media ( $\mu$ ) y el desvío estándar ( $\sigma$ ) de los logaritmos de la serie pluviográfica diaria, por los homólogos de la pluviométrica ( $\mu'$ ) y ( $\sigma'$ ). De la estación base pluviográfica se obtuvieron los parámetros calibrados que requiere el DIT y cuyos valores son:

$$A = 0.3650$$

$$B = 0.1363$$

$$C = 4.9551$$

$$q = 1.67$$

$$\mu = 4.1863$$

$$\sigma = 0.4166$$

Con los parámetros transpuestos y las ecuaciones se obtuvo la i-d-T en El Pueblito para periodos de recurrencia de 5 a 100 años. En la Figura 3.6-1 se muestran las curvas i-d-T para las recurrencias de interés en este estudio.

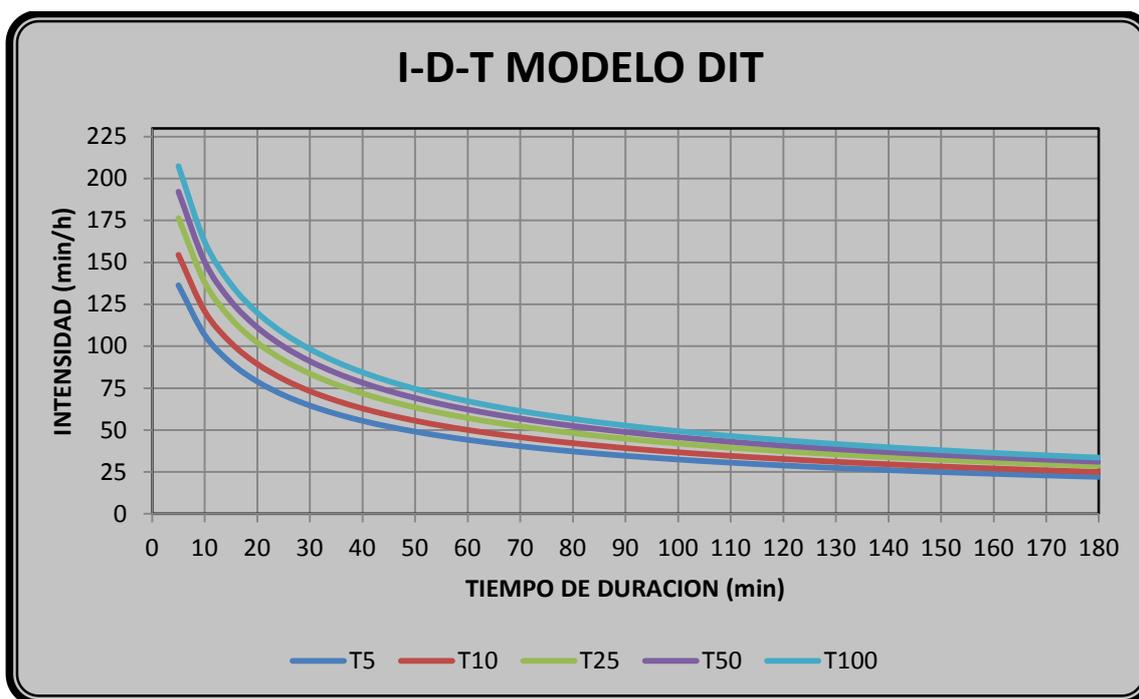


Figura 3.6-1: Curvas i-d-T según modelo DIT

### 3.7 DISTRIBUCION ESPACIAL

Uno de los aspectos más importantes al predecir caudales de proyecto a partir de precipitaciones, es la distribución espacial característica de la lluvia en la zona. Tal estimación requiere asumir un valor medio de lluvia (sea sobre la cuenca completa o

sobre cada subcuenca o sector dividida) con base en registros puntuales, de limitada representatividad espacial. Se asume que las láminas locales son válidas en áreas de 2.5 hasta 25 km<sup>2</sup>. Para áreas mayores a 25 km<sup>2</sup> el valor de la precipitación puntual debe ser reducido mediante coeficientes asociados, para cada región, a la superficie abarcada y a la duración de la tormenta.

Para Córdoba se desarrolló un algoritmo de atenuación denominado Modelo CoDA, especialmente para cuencas de las Sierras de Córdoba. El modelo permite determinar las láminas de lluvia a ingresar, en cada subcuenca utilizada por la modelación hidrológica, para predecir caudales asociados a distintas recurrencias.

El modelo de atenuación logrado es una función potencial del área y responde a la expresión:

$$CDA = 25^{-k} \cdot A^k \quad \text{o bien} \quad \ln CDA = k \cdot \ln A - k \cdot \ln 25 \quad (1)$$

Dónde:

CDA: es el coeficiente de decaimiento areal

A: es el área de la cuenca

k : es el parámetro del modelo, ajustado en función de la duración de la lluvia (d):

$$-k = 2,1438 \cdot d^{-0,4774}$$

La Figura muestra trazas de la superficie tridimensional de la ecuación (1), utilizadas para reducir la altura de lluvia puntual, a media areal, en cuencas serranas de la provincia de Córdoba. Indican el porcentaje de lluvia local a tomar como promedio sobre la cuenca, según la duración.

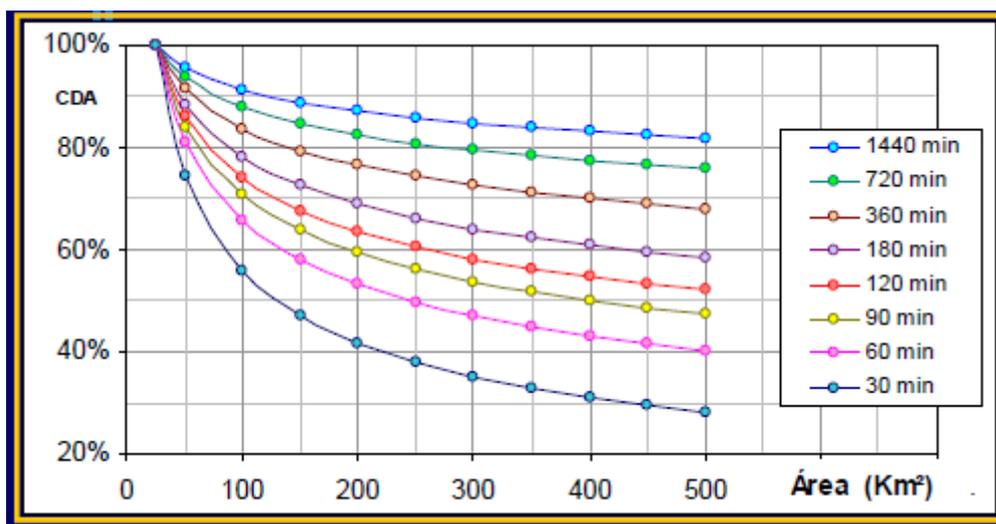


Figura 3.7.1: Trazas de la superficie de atenuación areal del modelo CoDA

Como conclusión, debido a que la cuenca tiene una superficie de 5,5 km<sup>2</sup>, se asume que la lámina puntual obtenida mediante las curvas I-D-F es representativa de la

precipitada en toda el área y no necesita ser atenuada.

### 3.8 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL: HIETOGRAMA TIPO

Para los eventos críticos de lluvia de diseño, resulta de interés modelar la distribución temporal interna (hietograma tipo) por su incidencia en la forma del hidrograma de proyecto, ya que de éste interesa conocer su máximo, su volumen y su permanencia.

En este estudio se adoptaron hietogramas tipo sintetizados con la técnica de Pilgrim, a partir de Intervalos de Máxima Intensidad Anual registrados en la estación pluviográfica base La Suela (Zona Sierras).

Existen distintas metodologías para establecer la duración de las tormentas intensas en una determinada cuenca para propósitos de diseño, entre las que se destacan la utilización de una duración levemente superior al tiempo de concentración de la cuenca, o aprovechando información pluviográfica disponible en el lugar de interés.

La duración de una tormenta de diseño se adopta en general igual o levemente superior al tiempo de concentración ( $t_c$ ) de la cuenca, permitiendo este criterio la contribución de toda el área de aporte con la consecuente determinación del caudal máximo. Es en base a este criterio que se adoptó como duración de la tormenta 120 minutos, que resulta superior al tiempo de concentración calculado (88.2 minutos).

En la figura 3.8-1 se observa el hietograma tipo adimensional adoptado, para una lluvia de 120 minutos de duración. En la figura 3.8-2 se muestra el hietograma dimensionalizado para un periodo de retorno de 5 años. En el Anexo N° 1 se pueden consultar los hietogramas dimensionalizados para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

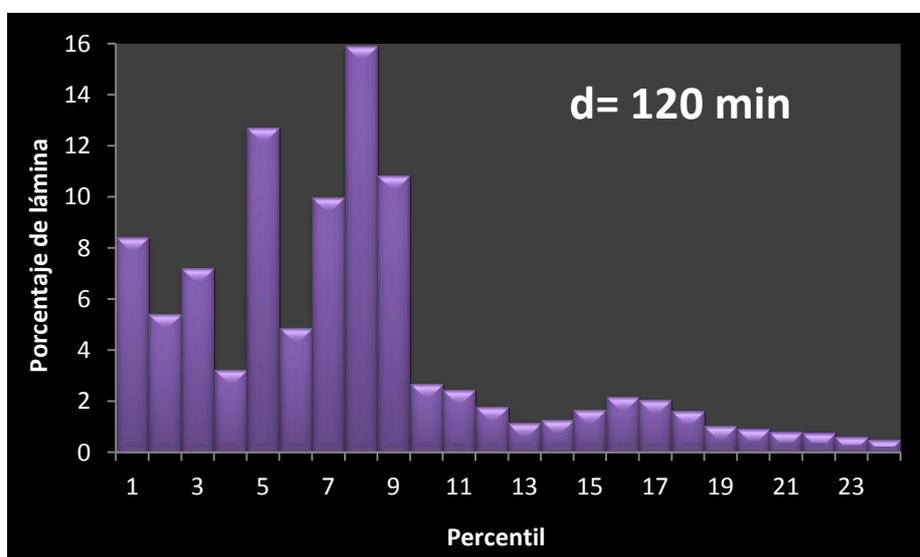


Figura 3.8-1: Hietograma Adimensional duración de lluvia 120 minutos

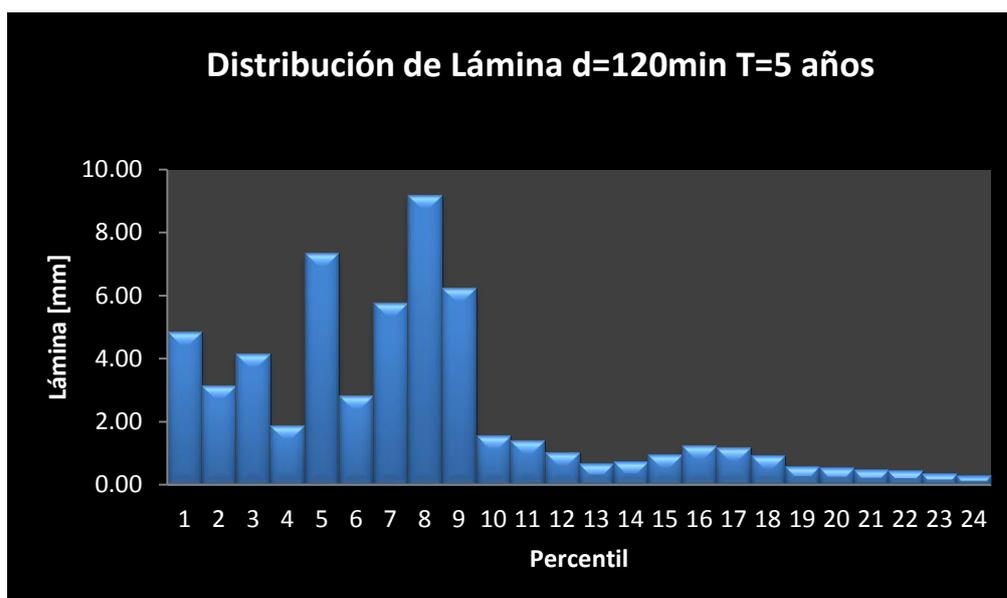


Figura 3.8-2: Hietograma dimensionalizado para 5 años de recurrencia

## CAPITULO 4: PROCESO DE TRANSFORMACION LLUVIA-CAUDAL

### 4.1 INTRODUCCION

#### 4.1.1 Conceptos de Modelos Hidrológicos:

Un modelo matemático es aquel sistema de ecuaciones que representa la respuesta de los componentes de un sistema, frente a cambios en las condiciones del mismo. Un modelo de simulación hidrológica tiene como objetivo básico reproducir, en la mejor forma posible, total o parcialmente el ciclo hidrológico.

Esta reproducción va desde la precipitación hasta la llegada de la escorrentía al sitio final de descarga, etapa que comprende en general los siguientes pasos:

- Precipitación en forma de lluvia o nieve.
- Intercepción por parte de la vegetación, evaporación, infiltración y retención en pequeñas depresiones de la superficie.
- Inicio del flujo superficial.
- Modificación del flujo superficial, por almacenamiento, en su tránsito hacia los cursos naturales o artificiales.
- Inicio del flujo canalizado y tránsito a lo largo canales naturales o artificiales.
- Descarga en el cuerpo de agua de recepción final.

Existen dos tipos de modelos de simulación:

- Modelos de simulación continua:* reproducen o generan los elementos de un ciclo hidrológico, para un periodo de tiempo prolongado. Este tipo de modelo realiza cálculos en detalle utilizando algoritmos, para simular la humedad del suelo y el movimiento del agua subterránea, incluyendo el efecto de almacenamiento y las variaciones de la evaporación.
- Modelos de simulación de eventos:* son aquellos concebidos para el estudio de un solo evento, por ejemplo, la generación del hidrograma ocasionado por una tormenta. Al estudiar un periodo de tiempo corto, utiliza menos tiempo de cálculo

que los de simulación continua y requiere menos información de entrada.

#### **4.1.2 Características del modelo HEC – HMS**

El sistema de modelación hidrológica fue diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas. Es aplicable a un amplio rango de áreas geográficas, resolviendo una gran variedad de problemas.

Esto incluye, problemas como el suministro de agua y anegamientos en grandes cuencas, hasta el escurrimiento en pequeñas cuencas rurales o urbanas. Los hidrogramas producidos por el programa son utilizados directamente, o en combinación, con otro programa para el estudio de la disponibilidad de agua, drenaje urbano, predicciones de crecientes, impacto de urbanización, diseño de vertederos de reservorios, reducción del daño causado por el caudal, regulación de caudales, y operación de sistemas.

El programa trabaja bajo un sistema completamente integrado, que incluye una base de datos, utilidades para la entrada de datos, la herramienta computacional, y las herramientas de reporte de resultados. Una interfase gráfica permite al usuario moverse con libertad entre las diferentes partes del programa. Su funcionalidad y apariencia son las mismas bajo cualquiera de las plataformas soportadas.

Los datos se almacenan en Data Storage System HEC-DSS (HEC, 1994). El almacenamiento y la lectura de los datos son manejados por el programa y es generalmente transparente para el usuario. La información sobre precipitación y descarga puede ser ingresada manualmente, o puede ser cargada desde un archivo DSS previamente creado. Los resultados almacenados en la base de datos son accesibles por otros programas HEC.

Los datos pueden ser ingresados en forma individual a cada elemento o simultáneamente a todos los elementos de un mismo componente. Las tablas y las formas para los datos de entrada son ingresadas desde un esquema visual de la cuenca.

La herramienta computacional cuenta con más de 30 años de experiencia en programas de simulación hidrológica. Muchos algoritmos desde HEC-1 (HEC, 1998) HEC-1F (HEC, 1989), PRECIP (HEC, 1989), y HEC-IFH (HEC, 1992) han sido modernizados y combinados con nuevos algoritmos para formar una completa librería de rutinas de simulación.

Los resultados de la modelación son visualizados en el esquema de la subcuenca. Los sumarios (tablas) globales o de cada elemento incluyen información sobre el caudal pico, tiempo al pico y volumen total. Las tablas series-tiempo y los gráficos están disponibles para cada elemento.

#### **4.1.3 Descripción del Modelo de simulación empleado HEC-HMS**

La obtención de los hidrogramas de escorrentía para lluvias de distintas recurrencias se obtuvo a través del Modelo HEC-HMS. Este modelo permite simular la transformación de lluvias históricas o hipotéticas en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos para encontrar la lluvia en exceso, transformarla en caudal y transitarla por los cauces. Las siglas HEC significan

Hidrologic Engineering Center (Centro de Ingeniería Hidrológica), del Centro de Investigación del U. S. Army Corps of Engineers, en Davis, California, donde fue desarrollado.

El planteamiento del modelo consiste en esquematizar conceptualmente el sistema hidrológico en estudio, poniendo de manifiesto los procesos involucrados en el fenómeno de transformación lluvia – caudal mediante una simplificación de la realidad.

La ejecución de una simulación con el programa operativo HEC-HMS (versión 3.4), requiere de las siguientes especificaciones:

- El primer conjunto, llamado Modelo de Cuenca (Basin Model), contiene parámetros y datos conectados para elementos hidrológicos.
- El segundo conjunto llamado Modelo Meteorológico, consiste en datos meteorológicos en especial la precipitación y de la información requerida para procesarlos.
- El tercer conjunto, llamado Especificaciones de Control, con el cual se especifica información para efectuar la simulación.

### **Modelo de Cuenca:**

Con objeto de poder representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma, que refleje de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En dicha representación esquemática se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los procesos hidrológicos. En este sentido, el programa HEC-HMS incluye los siguientes elementos:

- **Subcuenca:** Este tipo de elemento se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en la subcuenca a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base. Se utiliza para representar cuencas vertientes de muy variado tamaño.
- **Tramo de cauce:** Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente. Este tipo de elementos se suele utilizar para representar tramos de ríos o arroyos en los que se produce el tránsito de un determinado hidrograma.
- **Embalse:** Es un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos, y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente. Se utiliza para poder representar fenómenos de laminación de avenidas en lagos y embalses.
- **Confluencia:** Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da

lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

- **Derivación:** Este tipo de elemento se caracteriza porque da lugar a dos flujos salientes, principal y derivado, procedentes de uno o más flujos entrantes. Se puede utilizar para representar la existencia de vertederos laterales que derivan el agua hacia canales o zonas de almacenamiento separadas del cauce propiamente dicho.
- **Fuente:** Junto con la subcuenca, es una de las dos maneras de generar caudal en el modelo de cuenca. Se suele utilizar para representar condiciones de contorno en el extremo de aguas arriba, y el caudal considerado puede proceder del resultado del cálculo efectuado en otras cuencas.
- **Sumidero:** Recibe uno o varios flujos entrantes y no da lugar a ningún flujo saliente. Este tipo de elemento puede ser utilizado para representar el punto más bajo de una cuenca endorreica o el punto de desagüe final de la cuenca en cuestión.

La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total.

#### **Modelo Meteorológico:**

**Precipitación:** por lo general la entrada a un sistema de cálculo es la precipitación ya sea de un evento histórico o uno hipotético con una probabilidad asociada.

**Cuantificación de las pérdidas de agua:** contempla diferentes alternativas:

- Establecimiento de un umbral de precipitación, por debajo del cual no se produce escorrentía superficial, y una tasa constante de pérdidas por encima del citado umbral.
- Utilización del concepto de número de curva (CN), desarrollado por el U.S. Soil Conservation Service (SCS), teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de suelo y el contenido de humedad previo al episodio lluvioso que se considera.
- Método de Green y Ampt, que tiene en cuenta, entre otros, aspectos tales como la permeabilidad del suelo y el déficit inicial de humedad del mismo.
- Modelo SMA (Soil Moisture Accounting), que permite simular el movimiento del agua a través del suelo y del subsuelo, su intercepción y almacenamiento en diferentes zonas, y el escurrimiento superficial del exceso.

En cuanto a la evapotranspiración no se requiere de información cuando se simula eventos ya que este proceso se considera despreciable mientras ocurre una precipitación.

**Determinación del hidrograma Unitario:** El programa HEC-HMS contempla dos posibles alternativas, basadas en modelos de tipo empírico o conceptual, respectivamente. Entre los modelos de tipo empírico, basados todos ellos, en mayor o menor medida, en el concepto de hidrograma unitario, propuesto originalmente por

Sherman en 1932, el programa permite seleccionar uno de los siguientes:

- Hidrograma unitario definido por el usuario.
- Hidrograma sintético de Snyder.
- Hidrograma del Soil Conservation Service (SCS).
- Hidrograma de Clark (original y modificado).

### **Control del Modelo:**

Además de establecer un modelo de cuenca y un modelo meteorológico, es preciso definir, previamente a la ejecución del programa un conjunto de variables de control:

- Fecha y hora del comienzo del período de tiempo que se pretende analizar.
- Fecha y hora del final del período de tiempo que se pretende analizar.
- Incremento de tiempo de cálculo.

Es importante resaltar que esta estructuración del programa en tres bloques independientes es muy versátil, ya que permite representar diferentes situaciones de manera muy sencilla, sin más que realizar modificaciones en alguno de los bloques. Así, por ejemplo, se pueden tener diferentes modelos de cuenca, con distintos valores de parámetros, o modelos meteorológicos, correspondientes a distintas lluvias, o bien conjuntos de variables de control, con distintos períodos de tiempo o incrementos de tiempo de cálculo, todos susceptibles de ser combinados entre sí.

Con respecto al tiempo de cálculo, su valor está definido por el usuario y determina la resolución del modelo, es decir, el intervalo de tiempo en el que se proporcionan los resultados correspondientes a una determinada ejecución.

Aunque el rango de valores posibles se sitúa, en principio, entre 1 minuto y 24 horas, pueden existir restricciones directas o indirectas, en función del modelo concreto que se considere en la representación de algunos de los procesos.

## **4.2 FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS METODOS ADOPTADOS DE PRODUCCION Y TRANSFERENCIA:**

### **4.2.1 Transformación Lluvia-Caudal:**

#### **4.2.1.1 Hidrograma Unitario (SCS):**

El hidrograma unitario es la función respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal. Se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una unidad de medida de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva. Solo puede ser utilizado con la escorrentía superficial.

Este puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Las suposiciones básicas en este modelo son:

- El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.

- El exceso de precipitación está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje.
- El tiempo base (duración de la escorrentía directa) resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
- Las ordenadas de todos los hidrogramas de escorrentía directa de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.
- Para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca.
- El hidrograma unitario se considera único para una cuenca dada e invariable con respecto al tiempo. Este es el principio de invarianza temporal, que junto con los principios de superposición y proporcionalidad es fundamental para el método del hidrograma unitario. Estos se aplican solamente cuando las condiciones del canal permanecen sin cambio y las cuencas no tienen almacenamiento apreciable.

#### 4.2.1.2 Hidrograma unitario sintético.

El hidrograma unitario se aplica solamente para la cuenca y para el punto de la corriente donde se midió la información de caudales. Los procedimientos de Hidrogramas Unitarios Sintéticos se utilizan para desarrollar hidrogramas unitarios para otros puntos en la corriente dentro de la misma cuenca, o para cuencas de características hídricas similares.

Los Hidrogramas Unitarios Sintéticos sirven para obtener hidrogramas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca. A continuación se describen los Hidrogramas Unitarios Sintéticos utilizados más generalizados.

#### 4.2.1.3 Hidrograma Unitario Triangular

Mockus (1957) desarrolló un Hidrograma Unitario Sintético de forma triangular. De la geometría del Hidrograma Unitario se deduce el gasto pico como:

$$q_p = \frac{0,555 \cdot A}{t_b}$$

Donde A= área de la cuenca en km<sup>2</sup>; t<sub>p</sub>= tiempo del pico en horas y q<sub>p</sub> = caudal del pico en m<sup>3</sup>/seg/mm.

Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base t<sub>b</sub>, y el tiempo del pico, t<sub>p</sub>, se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2,67 \cdot t_p$$

A su vez el tiempo del pico se expresa como:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

Donde  $d_e$  es la duración en exceso y  $t_r$  el tiempo de retraso, el cual se estima mediante el tiempo de concentración  $t_c$ , como:

$$t_r = 0,6 \cdot t_c$$

Además, la duración en exceso con la que se tiene mayor caudal del pico, a falta de mejores datos, se puede calcular aproximadamente como:

$$d_e = 2\sqrt{t_c}$$

Para cuencas grandes, o bien,  $d_e = t_c$  para las pequeñas. Todos los tiempos y la duración en exceso están en horas. Sustituyendo se obtiene:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A}{t_p}$$

Dónde:

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0,6 \cdot t_c$$

A partir de las expresiones anteriores, el SCS propuso un hidrograma unitario sintético en el cual el caudal se expresa por la relación del caudal  $q$  con respecto al caudal pico  $q_p$  y el tiempo por la relación del tiempo  $t$  con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario,  $T_p$ .

Dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional (Figura 4.2-1) para la cuenca dada. Los valores de  $q_p$  y de  $T_p$  pueden estimarse utilizando un hidrograma unitario triangular.

En base a la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse como  $1,67 T_p$ . Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una escorrentía directa de 1 cm, puede demostrarse que:

$$q_p = \frac{C \cdot A}{T_p}$$

donde  $C = 2,08$  y  $A$  es el área de drenaje.

Un estudio de los hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo  $t_p \approx 0,6 \cdot T_c$  (Mijares, 1996), donde  $T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca. Por medio del hidrograma unitario triangular el

tiempo de ocurrencia del pico es:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

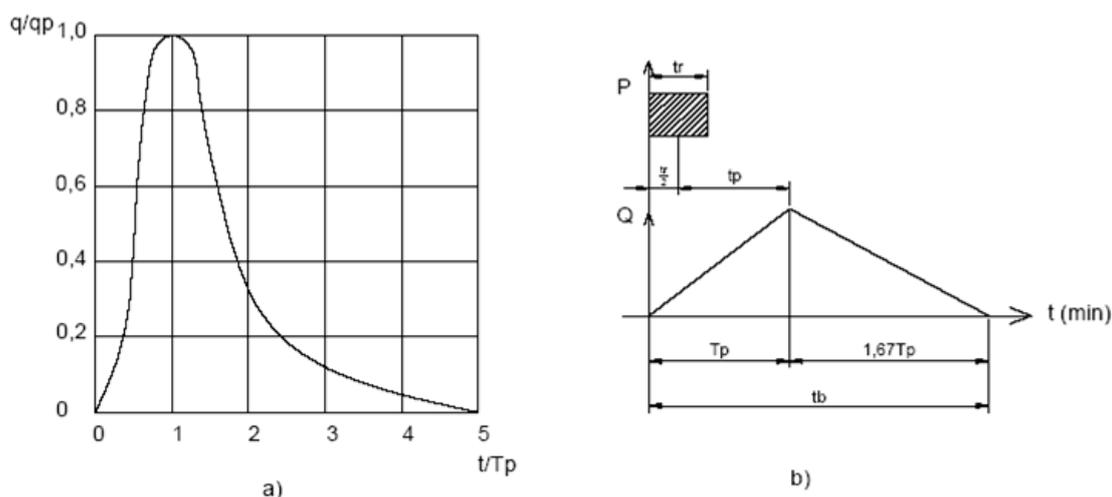


Figura 4.2-1 - Hidrogramas sintéticos del SCS

## 4.2.2 Separación del Escurrimiento

### 4.2.2.1 Método del servicio de conservación de suelos (SCS-CN):

Este método permite estimar el escurrimiento directo a partir de los complejos hidrológicos suelo-vegetación. Cada tipo de suelo se basa en la premisa de que los suelos con perfiles de características semejantes (especialmente su espesor, textura, contenido de materia orgánica y grado de saturación) responden a una forma prácticamente semejante bajo el efecto de una tormenta de larga duración y de intensidad apreciable.

Los grupos principales de suelos hidrológicos son:

- A.** Suelos con potencial de escurrimiento mínimo, incluyen a las arenas profundas con poco limo y arcilla y también a los loess, muy permeables.
- B.** Suelos arenosos menos profundos que los del grupo A, y loess menos profundo o menos compacto que los del grupo A, que poseen una infiltración media superior después de haberse mojado completamente.
- C.** Comprende los suelos poco profundos y los que contienen arcillas y coloides. En general poseen infiltración inferior a la promedio después de la saturación.
- D.** Son los suelos que poseen el mayor potencial de escurrimiento. Este grupo incluye a la mayoría de las arcillas que aumentan su volumen al mojarse y también a los suelos poco profundos que poseen subhorizontes casi impermeables cerca de la

superficie.

Las clases de usos y tratamientos de suelos son factores importantes en la determinación del escurrimiento directo.

La combinación de los grupos de suelos, el uso y tratamiento de los mismos determinan el complejo hidrológico suelo-vegetación. Se han utilizado tormentas para construir curvas para los distintos complejos de suelos en función del escurrimiento directo. Los números (CN) muestran el valor relativo de los complejos hidrológicos como productores directos del escurrimiento. Cuanto más elevado es el número, mayor es el volumen de escurrimiento directo que puede esperarse de una tormenta. El método del Servicio de Conservación de Suelos permite entonces determinar el escurrimiento directo a través de tres variables: la precipitación, la humedad anterior y el complejo hidrológico suelo-vegetación. El algoritmo de cálculo se basa en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{P - Q}{S}\right) = \frac{Q}{P}$$

Dónde: S es la pérdida potencial máxima al inicio de la tormenta [mm], P es la precipitación acumulada [mm], (Q) es el escurrimiento directo [mm].

Esta relación es válida solamente en el caso de que la lluvia produzca escurrimiento. Se considera una pérdida inicial de la precipitación acumulada P en la expresión anterior y despejando Q se obtiene:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{[(P - I_a) + S]}$$

Como S incluye a  $I_a$ , se puede obtener una relación empírica entre ambas variables. Datos obtenidos en las cuencas de diferentes partes de EE.UU. indican que se pueden considerar a como el 20% de las pérdidas potenciales máximas (S).

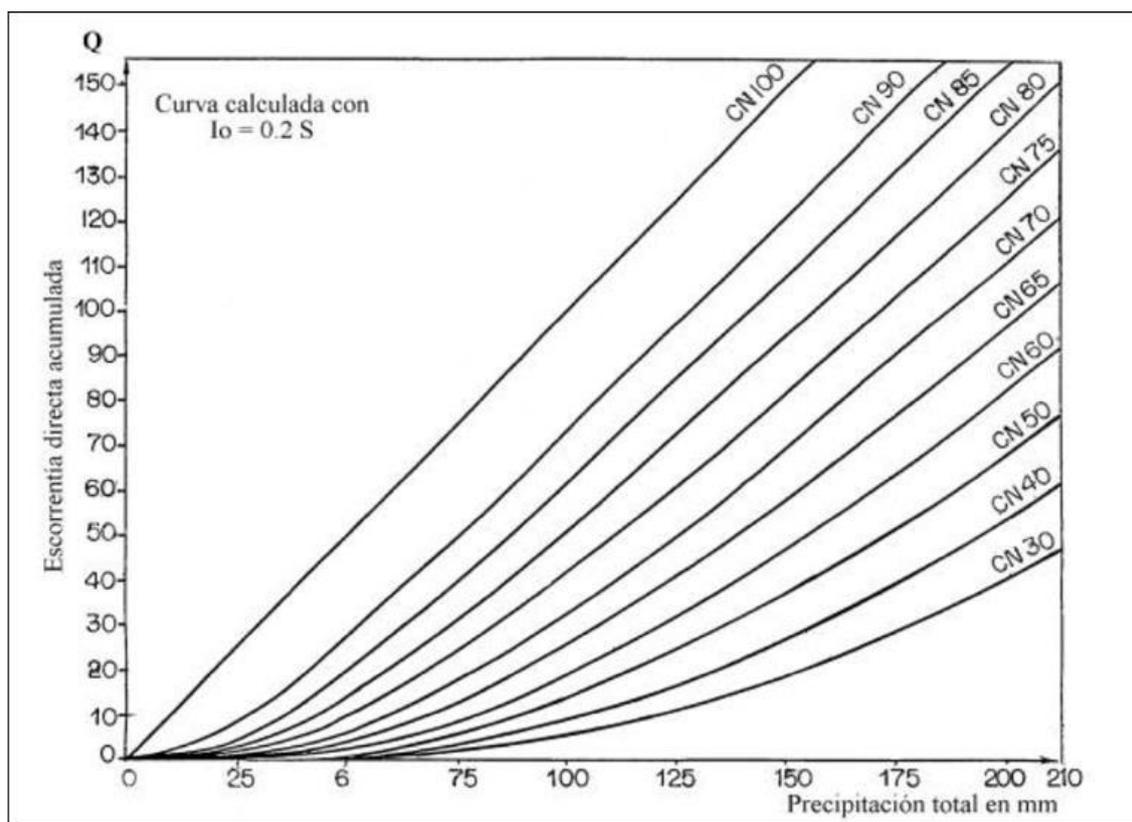
$$I_a = 0.2 * S$$

Substituyendo la expresión anterior por en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$P < I_a \rightarrow Q = 0$$

$$P > I_a \rightarrow Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{(P + 0.8 * S)}$$

Con esta ecuación podemos trazar curvas como se muestra en la Figura 4.2-2, que relaciona el escurrimiento directo acumulado con la precipitación total.



**Figura 4.2-2** - Relación precipitación total vs precipitación efectiva usando valores de CN.

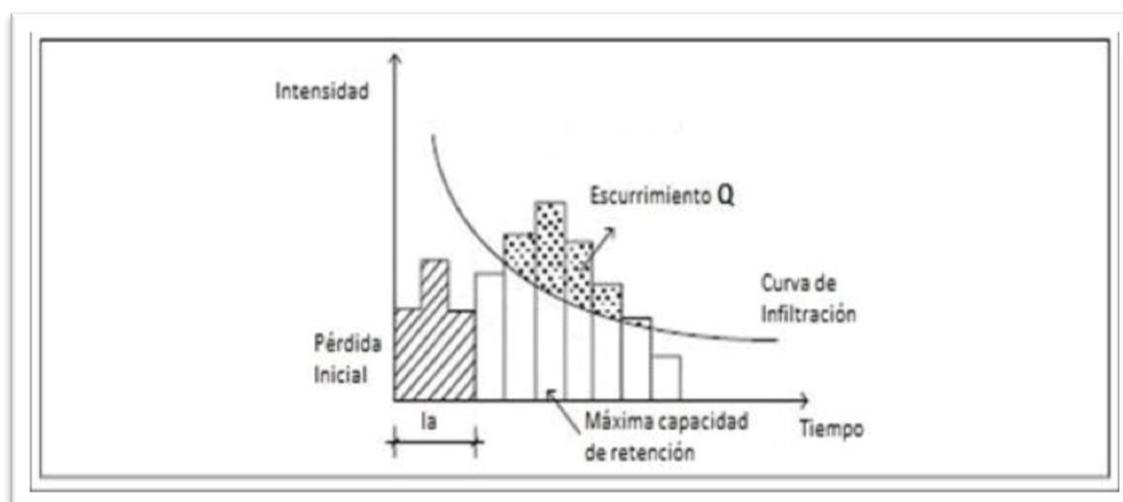
El parámetro CN (número de curva de escorrentía o complejo hidrológico suelo y cobertura vegetal) es en realidad una transformación empírica del parámetro S. La ecuación de CN en milímetros es:

$$Q = \frac{25400}{S + 254}$$

Las gráficas del escurrimiento directo Q, en función de la precipitación de la tormenta P en las cuencas naturales, demuestran que Q se aproxima a P, mientras P aumenta en la tormenta. Los mismos datos muestran que (P-Q) se aproximan a una constante mientras que P continúa aumentando. La constante S es la diferencia máxima (P-Q) que podría ocurrir para la tormenta dada en las condiciones de la cuenca.

La variable S es, entonces, un potencial máximo (P-Q) real que ocurre y está limitado por el agua almacenada en el suelo o por la intensidad de la infiltración al aumentar P.

En la Figura 4.2-3 se muestra que  $I_a$  es igual a la precipitación que ocurre antes que comience el escurrimiento. Físicamente  $I_a$ , consta principalmente de: interceptación, infiltración y almacenamiento superficial.



**Figura 4.2-3 - Variables del método SCS**

Los tipos de usos de la tierra y los tratamientos se clasifican con respecto a las avenidas que puede producir el escurrimiento. Cuanto más un uso de la tierra o un tratamiento aumenten la retención total, tanto más descenderá en la escala de producción de avenidas por el escurrimiento. De la Tabla 4.2-1 a la Tabla 4.2-3 se indica un resumen de los números de las curvas (CN) de escurrimiento para las diferentes combinaciones hidrológicas suelo-vegetación. Estos números corresponden para las cuencas en condiciones II e  $I_a = 0.2 * S$ .

El volumen de precipitación en un período de 5 a 30 días anteriores a una tormenta determinada se llama precipitación antecedente y las condiciones que se producen en la cuenca con respecto al escurrimiento potencial, se denominan condiciones precedentes. En general cuanto mayor es la precipitación precedente mayor será el escurrimiento directo que ocurre en una tormenta dada.

Los efectos de la infiltración y la evapotranspiración durante el período precedente también son importantes, porque pueden aumentar o disminuir el efecto de la lluvia precedente. Debido a las dificultades para determinar las condiciones precedentes producida por la lluvia a partir de los datos normalmente disponibles las condiciones se reducen en los tres casos que muestra la Tabla 4.2-4.

Uso del Suelo y Cubierta	Tratamiento ó Método	Condición para la Infiltración	Grupo Hidrológico del Suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivos en hileras	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	CyT	Mala	66	74	80	88
	CyT	Buena	62	71	78	88
Granos pequeños	SR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	CyT	Mala	61	72	79	82
	CyT	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas o rotación de pradera	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	CyT	Mala	63	73	80	83
	CyT	Buena	51	67	76	80
Pradera o pastizal		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Buena	10	35	70	79
	C	Regular	25	59	75	83
Pradera (permanente)			30	58	71	70
Bosques (lotes de bosques)		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Cascos de estancias			59	74	82	86
Caminos (revestidos)			72	82	87	89
(Con pavimentos duros)			74	84	90	92

SR son hileras rectas. T son terrazas.  
 C son líneas de nivel. CyT son terrazas a nivel.

**Tabla 4.2-1** - Valores de CN para las diferentes combinaciones hidrológicas suelo-vegetación para las cuencas en Condición II

Uso y Cubierta del Suelo	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Suelo desnudo	77	85	91	93
Pasto (matas de pasto o baja densidad de siembra)	51	70	80	84
Cultivos menores (jardines o huertas)	45	66	77	83
Caña de azúcar (quema de residuos)	43	65	77	82
Caña de azúcar (surcos en contorno)	42	58	72	79
Vegetación natural	25-30	41-45	57-63	66
Matorral de hoja caduca (roble o natural con piso de gramilla)	29-33	43-48	69-65	67
Pasturas irrigadas	32-37	46-51	62-68	70
Frutales con verdeo anual	37-41	50-55	64-69	71
Pastos anuales	46-49	57-60	68-72	74
Cereales de cosecha fina	61-64	69-71	76-80	81
Cereales de cosecha gruesa	67-69	74-76	80-83	84

Tabla 4.2-2 - Tabla adicional de valores de CN, para las cuencas en Condición II

Areas urbanas	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Baja densidad (15 al 18% de la sup.)	69-71	75-78	82-84	86
Media densidad (21 al 27% de la sup.)	71-73	77-80	84-86	88
Alta densidad (50 al 75% de la sup.)	73-75	79-82	86-88	90

Tabla 4.2-3 - Tabla adicional de valores de CN, para las cuencas en Condición II

Condición	Tipo suelo	Descripción
I	Suelo seco	Los suelos están secos, pero no hasta el punto de marchitamiento.
II	Suelo con capacidad de campo	Condición promedio. Normalmente es la condición que se considera en el diseño como precedente a las crecientes (suelo en capacidad de campo)
III	Suelo en saturación	Cuando ha llovido mucho el suelo está con muy baja infiltración inicial (sólo es posible la infiltración básica)

Tabla 4.2-4 - Condiciones de humedad para la determinación del CN

Los CN de una condición pueden convertirse a otra usando la Tabla 4.2-5.

CN para la Condición <b>II</b>	CN correspondientes para las Condiciones	
	<b>I</b>	<b>III</b>
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

**Tabla 4.2-5** - Transformación de CN para diferentes condiciones de humedad antecedente del suelo

➤ **Tareas de Campaña para determinar el número de curva (CN):**

Para la estimación del número de curva CN de la cuenca se establecieron semejanzas entre los valores de estas tablas y los estimados en base a recorridas de la zona en estudio, imágenes satelitales y con información disponible en cartas de suelo.

Los resultados se presentan en la Tabla 4.2-6 donde se puede observar los valores de CN para las condiciones antecedentes II y III de humedad de la cuenca (la condición I no es relevante ya que arrojará valores inferiores de escorrentía), para diferentes coberturas vegetales (pueden variar por condiciones naturales de acuerdo a la estación del año o por condiciones antrópicas como deforestación o incendios) y para diferentes grados de urbanización.

Condición de Humedad	Grado de Urbanización		Cubierta Vegetal		CN Adoptado
		CN		CN	
Capacidad de campo	Baja	83	Desnudo	91	87
			Vegetación natural, pradera	70	77
	Media	85	Desnudo	91	88
			Vegetación natural, pradera	70	78
	Alta	87	Desnudo	91	89
			Vegetación natural, pradera	70	79
Saturado	Baja	83	Desnudo	98	91
			Vegetación natural, pradera	81	82
	Media	85	Desnudo	98	92
			Vegetación natural, pradera	81	83
	Alta	87	Desnudo	98	93
			Vegetación natural, pradera	81	84

**Tabla 4.2-6** - CN para diferentes condiciones de humedad antecedentes del suelo, grado de urbanización y cubierta vegetal.

## CAPITULO 5: RESULTADOS DE LA MODELACION HIDROLOGICA

### 5.1 ELECCIÓN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN

Para llevar a cabo la simulación hidrológica de la cuenca analizada en este trabajo, se adoptó la siguiente alternativa de modelación:

Modelo de Cuenca:

- *Transformación lluvia-caudal*: Hidrograma Unitario Sintético Adimensional SCS.
- *Pérdidas*: el método utilizado para considerar las pérdidas de la precipitación, (infiltración, interceptación vegetal y almacenamiento superficial) es el SCS para abstracciones, número de curva (CN).

*Modelo Meteorológico*:

Asignación de la lluvia: se aplicaron los eventos con las duraciones, recurrencias y distribución temporal adoptadas en la sección 3.7.

*Especificaciones de Control*:

En función de las duraciones de lluvia y el grado de respuesta de la cuenca, se adoptaron diferentes tiempos de control, y un intervalo de tiempo para el cómputo de los resultados de 30 minutos.

### 5.2 RESULTADOS DE LA MODELACION

A continuación se presentan los hidrogramas correspondientes a tormentas de 120 minutos de duración, 5 años de recurrencia, condición de humedad del suelo saturado con un grado de urbanización medio y con cubierta vegetal (Figura 5.2-1) y sin cubierta vegetal (Figura 5.2-2). En el Anexo N° 2 se pueden consultar otros hidrogramas para distintas condiciones de humedad, de cobertura vegetal y periodos de retorno.

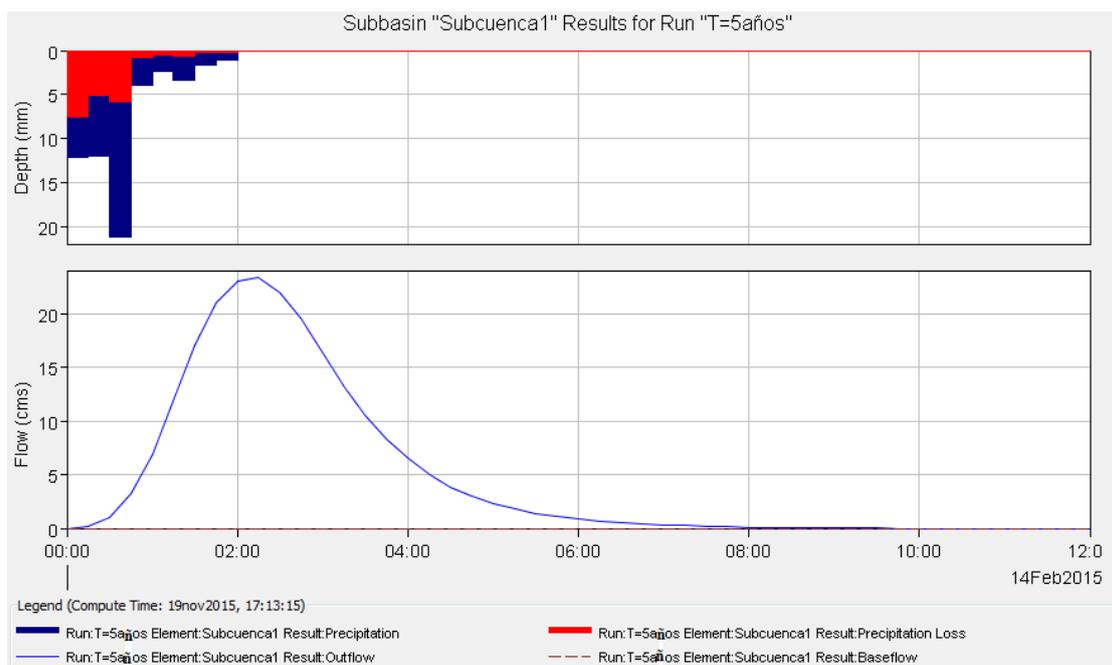


Figura 5.2-1: Modelación hidrológica con cubierta vegetal

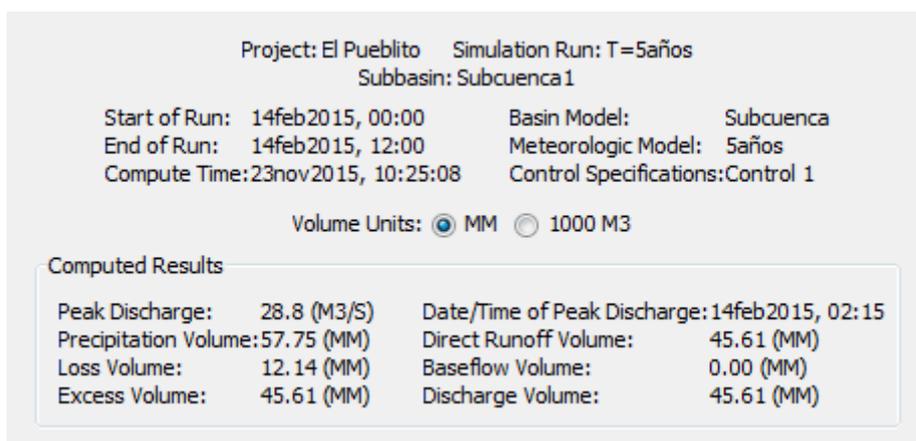
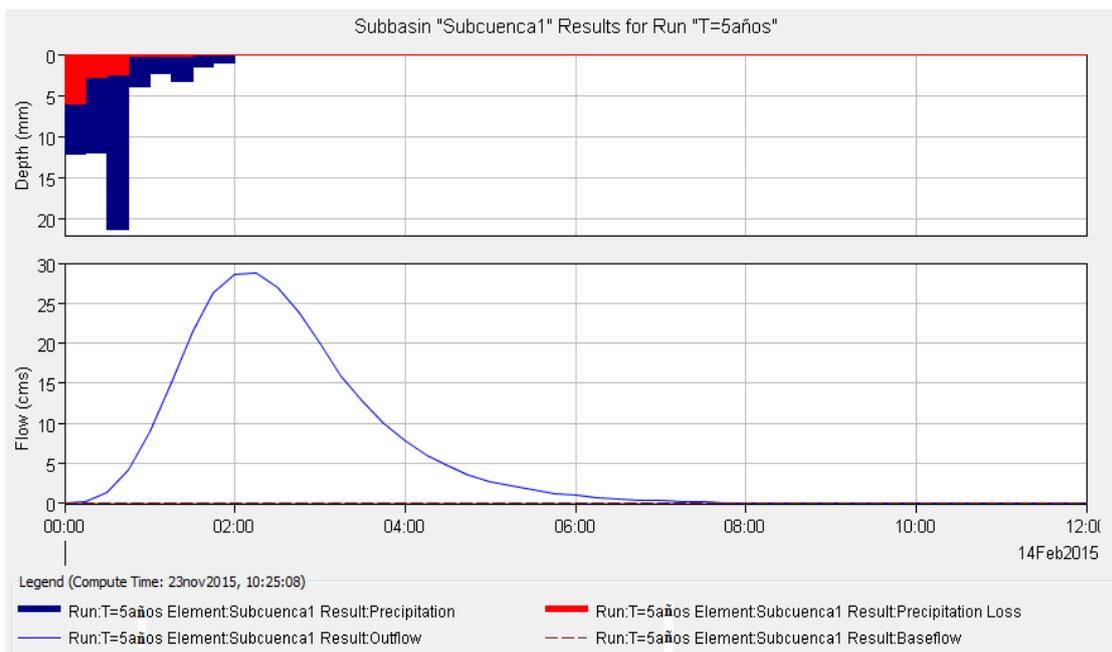


Figura 5.2-2: Modelación hidrológica sin cubierta vegetal

## CAPITULO 6: NIVELES DE INUNDACION

### 6.1 RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para determinar el nivel de inundación se requiere de un modelo digital del terreno para ello se ha realizado un relevamiento topográfico de detalle del cauce, de sus planicies de inundación, de la ubicación de obras de arquitectura (como viviendas, plaza, etc.) e ingeniería (como alcantarillas y rutas) y de perfiles transversales al cauce del río. En la figura 6.1-1 se observan las curvas de nivel correspondiente a la cuenca en estudio. En la Figura 6.1-2 se muestra el tramo de río analizado, en la Figura 6.1-3 se encuentran la ubicación de los perfiles transversales y en la figura 6.1-4 se muestra uno de los mismos. En el Anexo N°3 se pueden consultar los restantes perfiles.

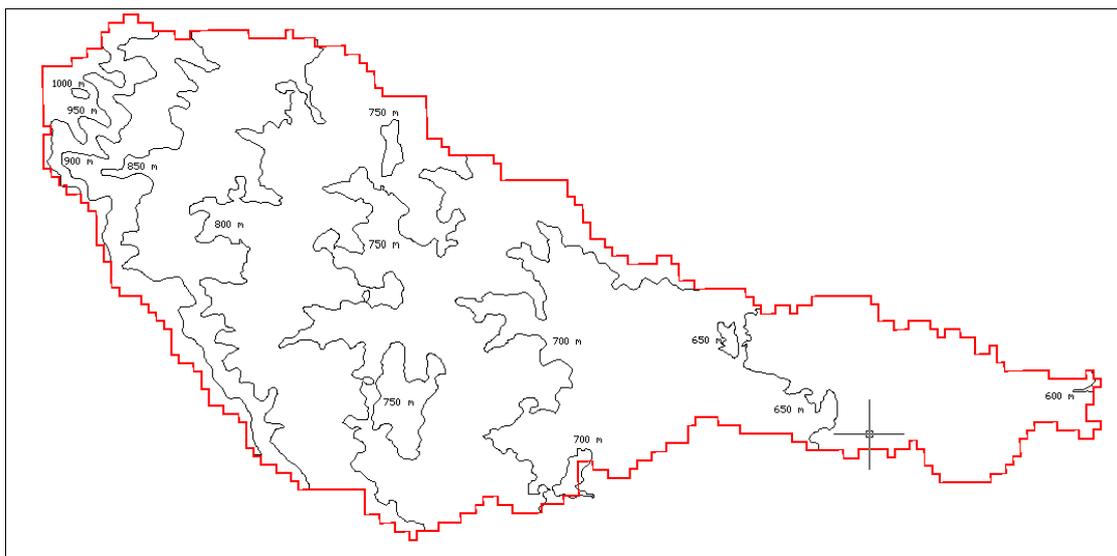


Figura 6.1-1: Curvas de Nivel de la cuenca en estudio



Figura 6.1-2: Tramo de Rio analizado

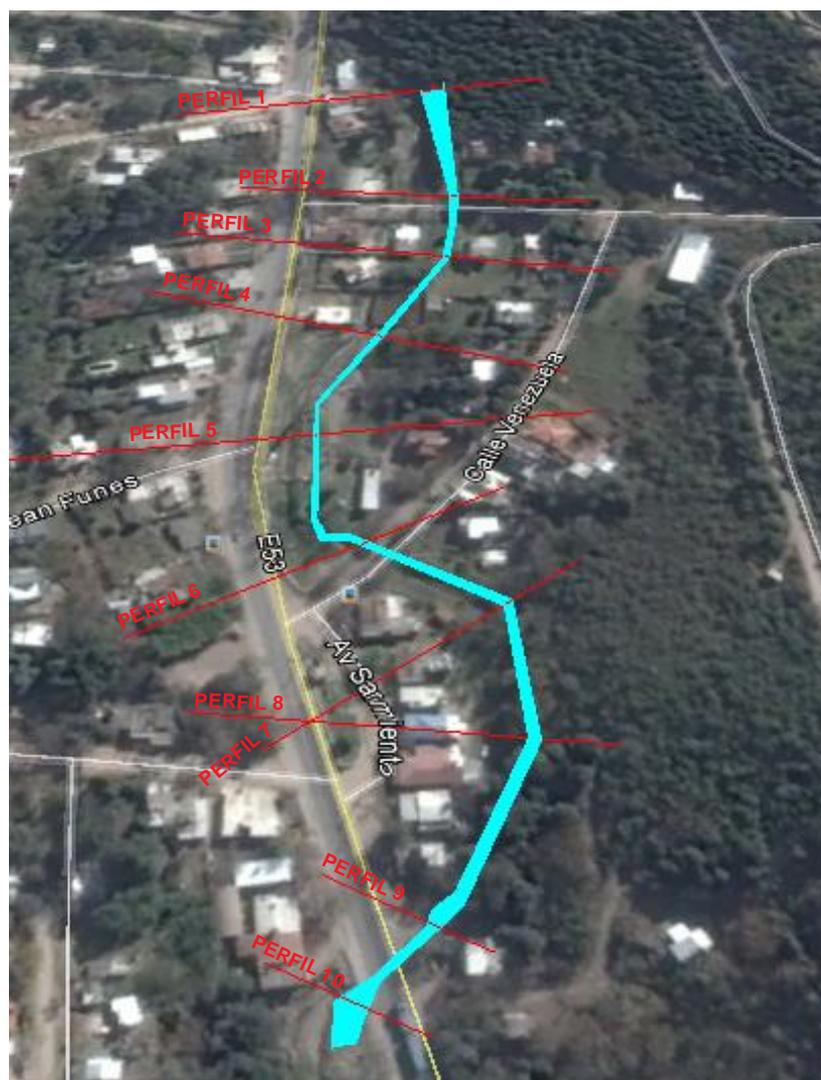


Figura 6.1-3: Ubicación de los perfiles Transversales relevados

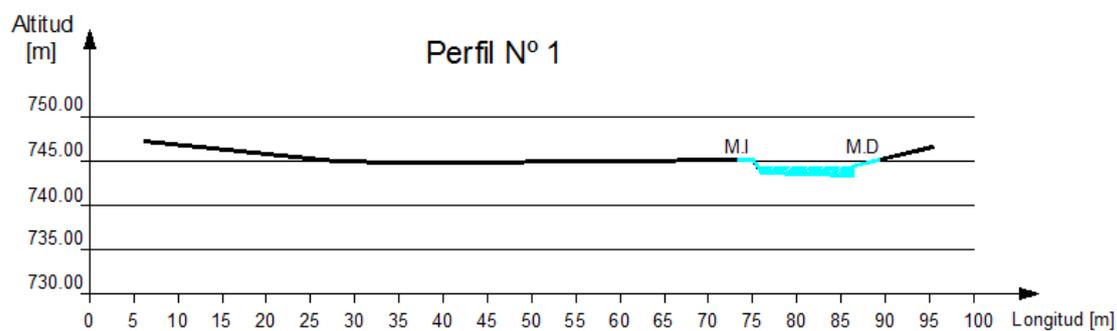


Figura 6.1-4: Perfil transversal N° 1

Las tareas fueron realizadas con GPS de doble frecuencia marca TOPCON GR-5.

## 6.2 ESTIMACION DE LOS NIVELES DE INUNDACION – FORMULA DE HERMANNECK

Con la información obtenida y desarrollada, se puede calcular los niveles de inundación para los caudales estimados con distinta recurrencia. La fórmula propuesta por Di.P.A.S para esta metodología, es la denominada fórmula de Hermanneck y se describe su procedimiento a continuación:

- Las variables son:

$A_i$  = Area de paso inicial en  $m^2$

$A_f$  = Area de paso final en  $m^2$

$B$  = Ancho de pelo libre en m

$i$  = Pendiente media de pelo de agua y eje de vaguada

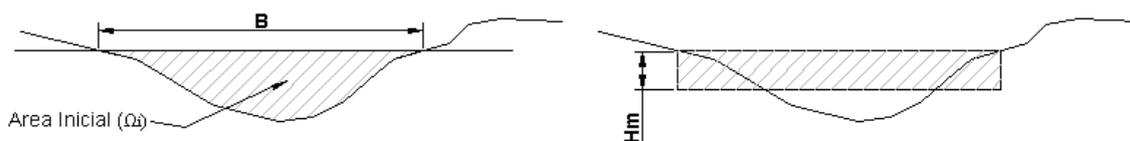
$H_m$  = Altura media en cada perfil transversal, en m

$V$  = Velocidad, en m/seg

$Q$  = Caudal en  $m^3/seg$

Entre las hipótesis que toma como válida esta fórmula, se encuentra:

- ✓ El caudal es la única variable considerada constante entre dos perfiles transversales consecutivos.
- ✓ La pendiente media adoptada es la del pelo de agua, considerándola paralela a la pendiente media del eje de vaguada. Se asume que el flujo es uniforme.



**Figura 6.2-1** Esquema de perfiles para formulación de Hermanneck

- Se calcula:

$$H_m \leq A_r / B$$

Luego existen tres fórmulas distintas para calcular la velocidad ( $V$ ) con la que el flujo atraviesa el área final ( $A_f$ ) teniendo en cuenta los valores que pueden tomar  $H_m$  para la pendiente ( $i$ ) del tramo.

- a) Para  $Hm \leq 1,50$  m  $V = 30,7 \times Hm \times i.$
- b) Para  $1,50$  m <  $Hm \leq 6,00$  m  $V = 34 \times Hm^{1/3} \times i.$
- c) Para  $6,00$  m >  $Hm$   $V = 44,5 \times Hm^{0,6} \times i^{1/2}$
- d) También se puede utilizar  $V = (50,2 + Hm/2) \times Hm^{1/2} \times i^{1/2}$

Luego se calcula el área de paso final ( $A_f$ ) con el caudal ( $Q$ ) y la velocidad ( $V$ ) antes obtenida. De esta forma quedaría:

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg)} = A_f \text{ (m}^2\text{)} \times V \text{ (m/seg)} \quad \rightarrow \quad A_f = Q/V$$

Si  $A_i = A_f$ , se considera que el perfil está calculado. En caso contrario se aumenta o disminuye el nivel del pelo de agua y se comienza nuevamente a calcular  $Hm$ .

Repetiendo este procedimiento tramo a tramo se obtiene en cada perfil transversal el nivel de agua correspondiente al caudal y recurrencia establecida en este procedimiento (Ver tabla 6.2-1)

Pendiente  $i =$   
Caudal  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) =

Perfil	B	$\Omega_i$	Hm	Velocidad			Q de paso	Diferencia
1	Ancho de Boca de la Sección Propuesta	Area inicial de la Sección Propuesta	Altura media = $Hm = \Omega_i / B$	$Hm \leq 1,50$ m.; $V = 30,7 \times Hm \times i^{1/2}$	$1,50$ m. < $Hm \leq 6,00$ m.; $V = 34 \times Hm^{3/4} \times i^{1/2}$	$Hm > 6,00$ m.; $V = 44,5 \times Hm^{0,6} \times i^{0,5}$	$Q_{(paso)} = \Omega_i \times V$	$Q_{(paso)} - Q \leq 0,01 Q$
2								
3								
n								

**Tabla 6.2-2:** Resumen metodología Hermanneck

De la aplicación de esta fórmula surgen los niveles de agua en los perfiles para una lluvia de 57 mm, como se muestran en la Tabla 6.2-3 y Figura 6.2-2. En el Anexo N° 4 se encuentran los cálculos de los niveles de inundación para lluvias de 65.41 mm, 74.70 mm y 81.39 mm.

METODO DE HERMANECK								
Perfil N°	B [m]	Ai [m2]	Hm [m]	Pendiente	Velocidad [m/seg]	Caudal de Paso [m3/seg]	Caudal Teórico [m3/seg]	Diferencia
1	10.80	9.10	0.84	0.01	2.59	23.54	23.30	0.24
2	64.52	13.31	0.21	0.08	1.76	23.39	23.30	0.09
3	63.18	18.48	0.29	0.02	1.26	23.35	23.30	0.05
4	55.78	17.29	0.31	0.02	1.37	23.61	23.30	0.31
5	60.40	19.43	0.32	0.01	1.20	23.27	23.30	-0.03
6	47.57	17.88	0.38	0.01	1.32	23.52	23.30	0.22
7	36.77	13.70	0.37	0.02	1.70	23.24	23.30	-0.06
8	48.20	19.67	0.41	0.01	1.20	23.57	23.30	0.27
9	12.60	9.02	0.72	0.01	2.60	23.46	23.30	0.16
10	7.82	4.56	0.58	0.08	5.12	23.33	23.30	0.03

Tabla 6.2-3: Resultados de Hermaneck

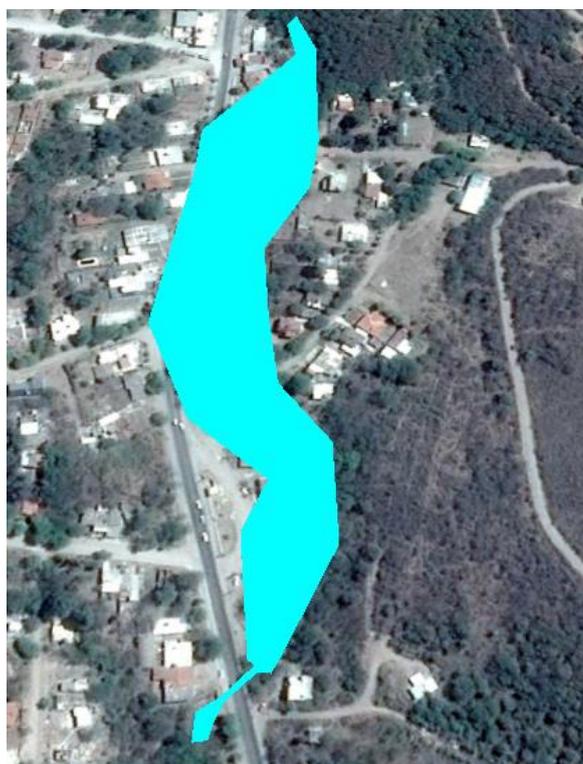


Figura 6.2-2: Mancha de Inundación

### 6.3 DETERMINACION DE PARCELAS EN RIESGO

De acuerdo al relevamiento y de la información disponible del parcelario de El Pueblito en la Dirección General de Catastro de la Provincia, se ha podido determinar cuáles son las parcelas afectadas por lluvias de distinta magnitud calculadas durante el desarrollo del informe. En la Tabla 6.3-1 se observan las parcelas en riesgo para una lluvia de 57 mm. En el Anexo N° 5 se puede observar el plano de dichas parcelas.

PARCELAS AFECTADAS			
MANZANA	PARCELA	MANZANA	PARCELA
59	25	62	23
	26		22
	27		21
	29		20
	30		19
	31		18
	32		17
	33		16
	34		15
	35		14
	36		13
63	12	8	

PARCELAS AFECTADAS	
MANZANA	PARCELA
60	18
	19
	22
	23
	24
	25
	27
	28
	29
	30
	31
	32
	34
	35
	37
	38
	40
	41
45	
46	
50	
52	
53	
54	
55	

**Tabla 6.3-1:** Parcelas afectadas por precipitación de 57 mm

## **CAPITULO 7: CONCLUSIONES**

### **7.1 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

Luego de haber realizado todas las tareas estipuladas previamente y haber llegado a la determinación de la mancha de inundación para una lluvia de diseño dada, considero que este trabajo tiene un valor importante para la gestión de un plan de alerta para salvaguardar la seguridad de las personas que potencialmente estarían siendo vulnerables a las crecidas del río.

En este trabajo se realizaron los cálculos de tirantes mediante un método hidráulico (Hermanneck). Se podría haber calculado con otro método o software como HEC-RAS, pero a los fines de determinar las parcelas en riesgo, resultó apropiada la modelación.

Se realizó el cálculo de la mancha de inundación para distintas precipitaciones pero para la misma condición de cuenca, obteniéndose como resultado que las parcelas afectadas eran las mismas. En un futuro se va a continuar determinando las parcelas potencialmente afectadas para las restantes condiciones de cuencas tratadas durante el desarrollo de este informe para brindar información más amplia a los organismos encargados de la defensa civil.

### **7.2 CONCLUSIONES PERSONALES**

Durante los meses en los que estuve trabajando en esta práctica, puedo decir que es de suma importancia su realización, ya que constituye los primeros pasos en el abordaje de un tema de carácter profesional con todo lo que ello implica.

Obtuve experiencia práctica valiosa en esta temática, para lo cual necesite aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera, como así también tuve que incorporar nuevos conocimientos relacionados con el uso de software específicos. Considero que es el primer trabajo donde me enfrenté a una realidad sumamente distinta a la que estaba acostumbrada, lo que me permitió desarrollar habilidades para un mejor desenvolvimiento en el ámbito laboral profesional.

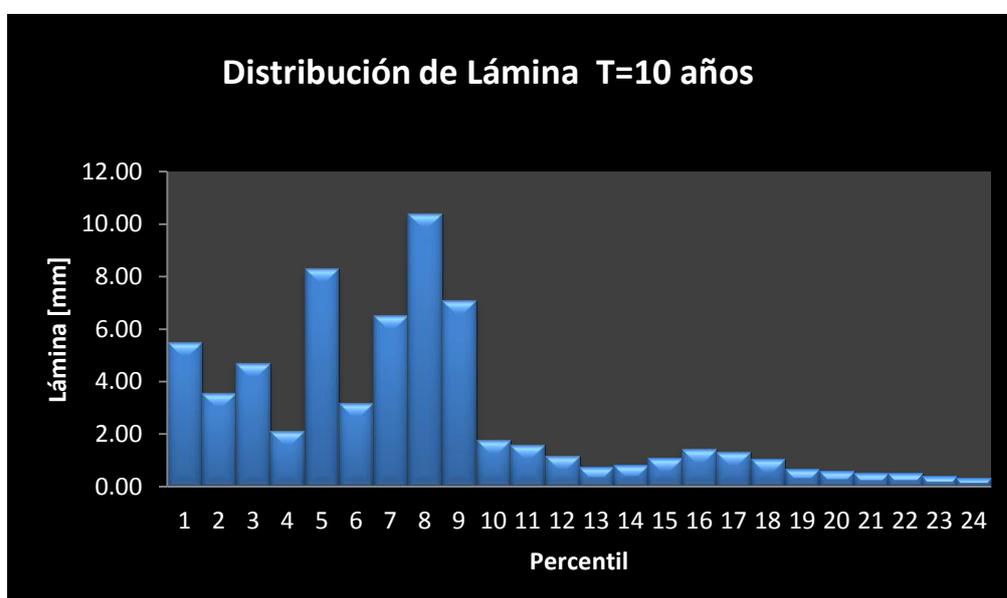
Como consideración final puedo decir que es muy valioso poder contar para un futuro con un informe de utilidad para estudios posteriores y/o análisis relacionados con la temática tratada.

## CAPITULO 8: ANEXOS

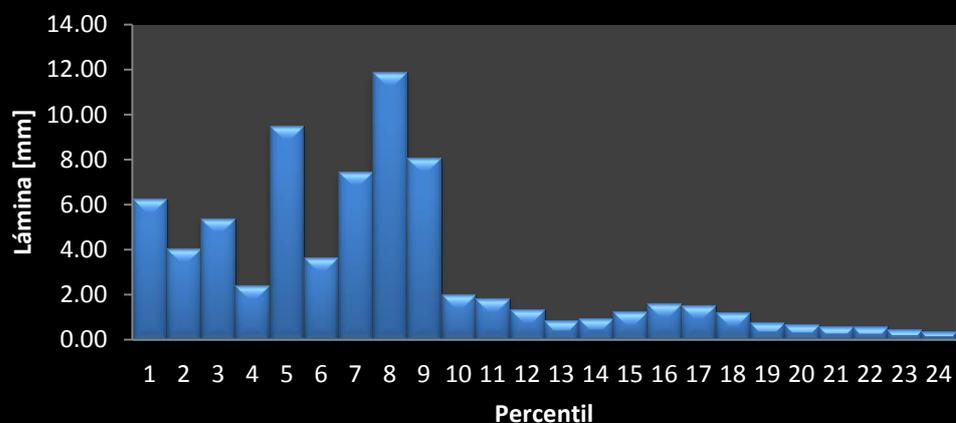
Los anexos están estructurados de la siguiente manera:

- ANEXO N° 1: Hietogramas dimensionalizados
- ANEXO N° 2: Hidrogramas para distintas condiciones de cuencas
- ANEXO N° 3: Perfiles transversales
- ANEXO N° 4: Niveles de inundación para diferentes lluvias de diseño
- ANEXO N° 5: Planos de parcelas afectadas

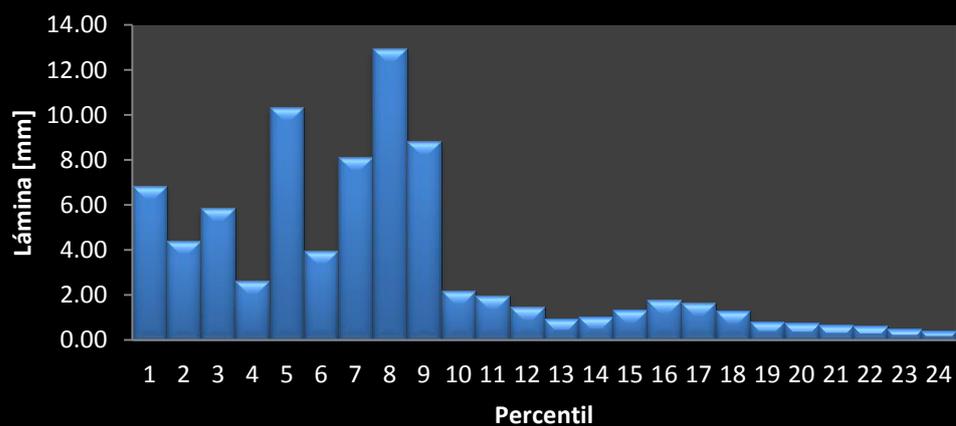
### ANEXO N° 1: HIETOGRAMAS DIMENSIONALIZADOS

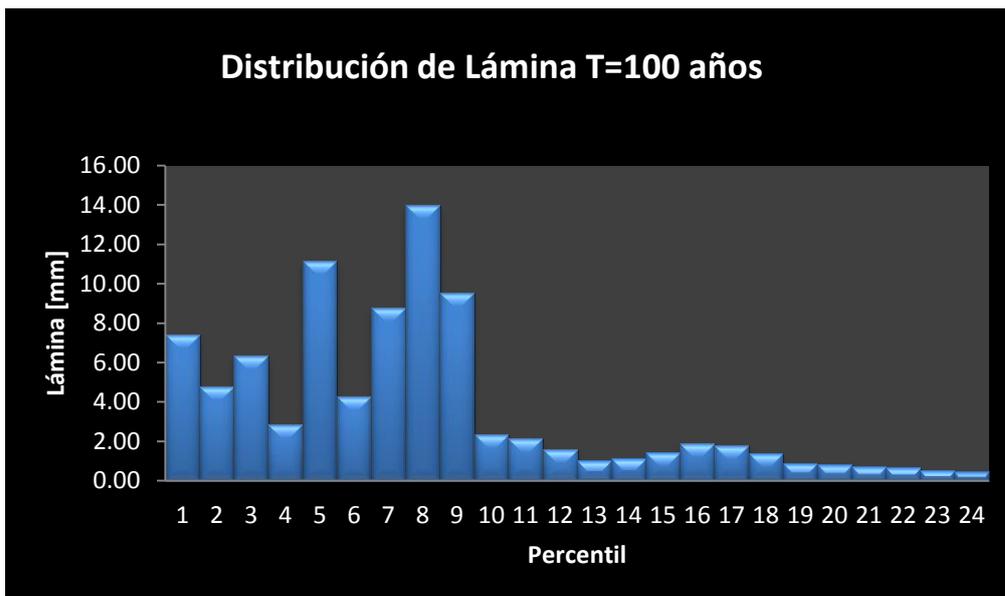


Distribución de Lámina T=25 años



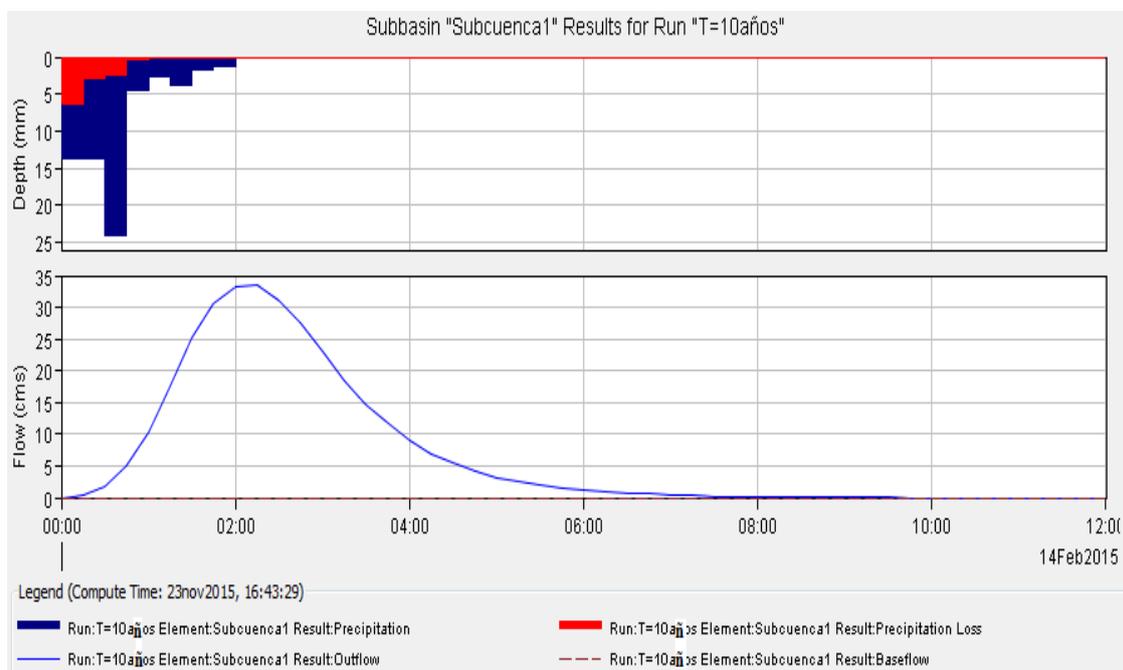
Distribución de Lámina T=50 años



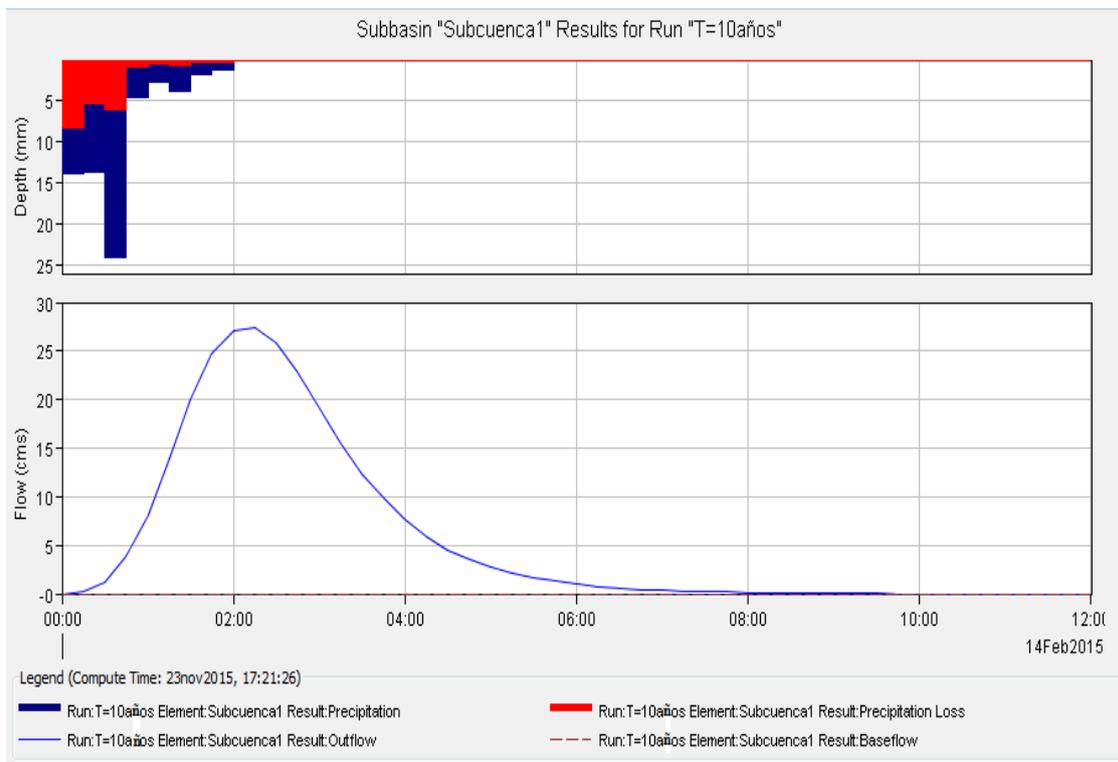


## ANEXO Nº 2: HIDROGRAMAS PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CUENCA

- Hidrograma para 10 años de recurrencia sin cubierta vegetal. CN=92



- Hidrograma para 10 años de recurrencia con cubierta vegetal. CN=83



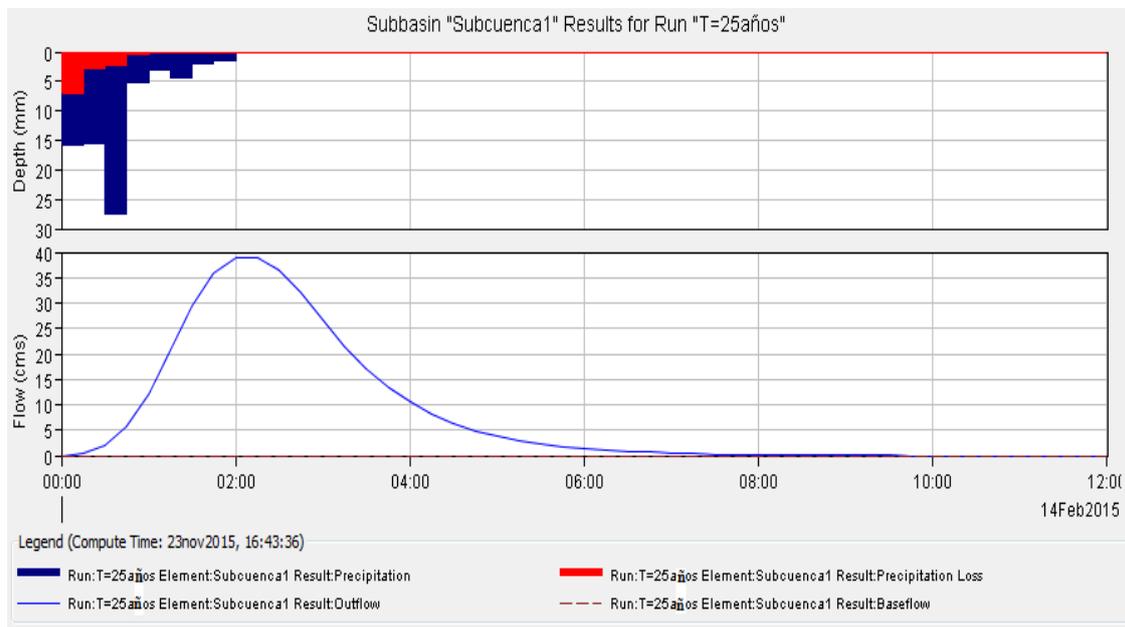
Project: El Pueblito Simulation Run: T=10años  
Subbasin: Subcuenca1

Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 10años
Compute Time: 23nov2015, 17:21:26	Control Specifications: Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results	
Peak Discharge: 27.4 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 14feb2015, 02:15
Precipitation Volume: 65.41 (MM)	Direct Runoff Volume: 43.39 (MM)
Loss Volume: 22.02 (MM)	Baseflow Volume: 0.00 (MM)
Excess Volume: 43.39 (MM)	Discharge Volume: 43.39 (MM)

- Hidrograma para 25 años de recurrencia sin cubierta vegetal. CN=92



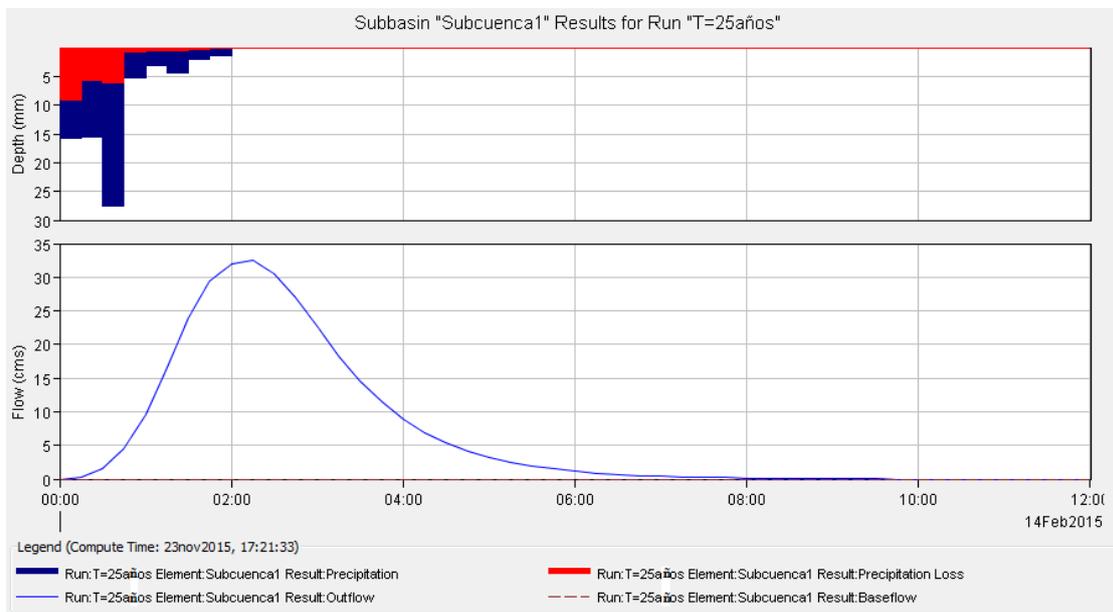
Project: El Pueblito Simulation Run: T=25años  
Subbasin: Subcuenca 1

Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 25años
Compute Time:23nov2015, 16:43:36	Control Specifications:Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results	
Peak Discharge: 39.0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:74.70 (MM)	Direct Runoff Volume: 61.74 (MM)
Loss Volume: 12.96 (MM)	Baseflow Volume: 0.00 (MM)
Excess Volume: 61.74 (MM)	Discharge Volume: 61.74 (MM)

- Hidrograma para 25 años de recurrencia con cubierta vegetal. CN=83



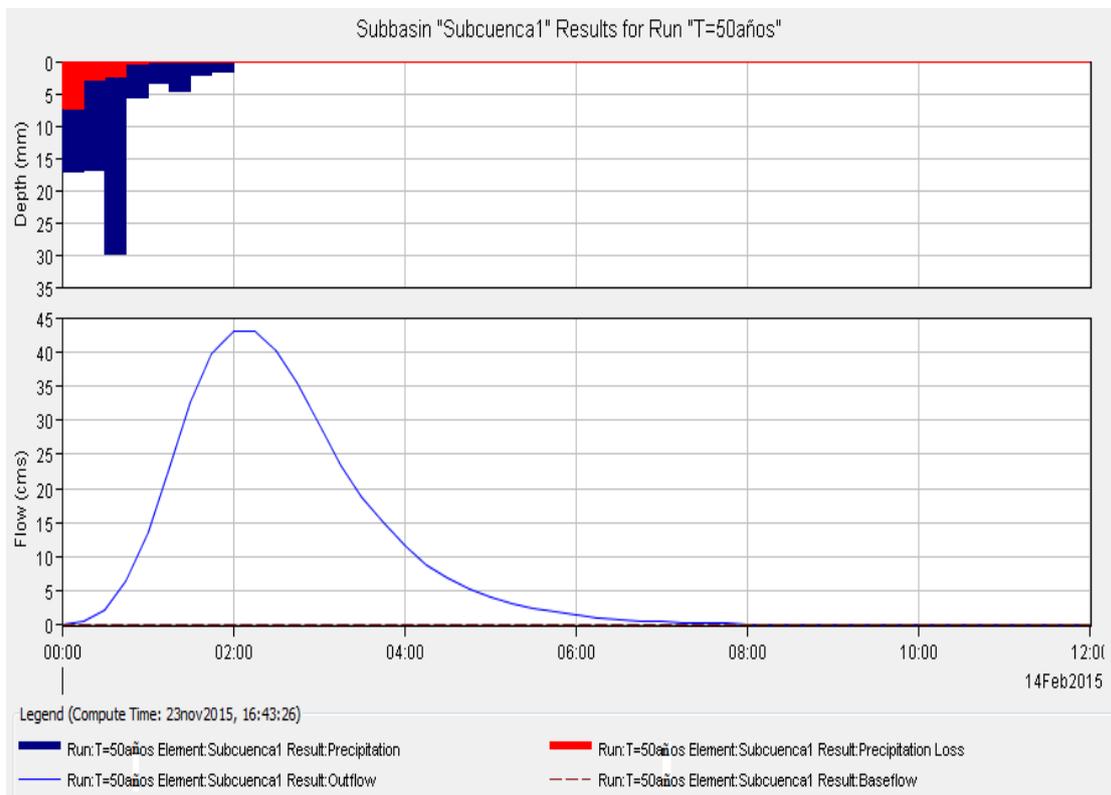
Project: El Pueblito Simulation Run: T=25años  
Subbasin: Subcuenca1

Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 25años
Compute Time:23nov2015, 17:21:33	Control Specifications:Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results			
Peak Discharge:	32.5 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:	74.70 (MM)	Direct Runoff Volume:	51.39 (MM)
Loss Volume:	23.31 (MM)	Baseflow Volume:	0.00 (MM)
Excess Volume:	51.39 (MM)	Discharge Volume:	51.39 (MM)

- Hidrograma para 50 años de recurrencia sin cubierta vegetal. CN=92



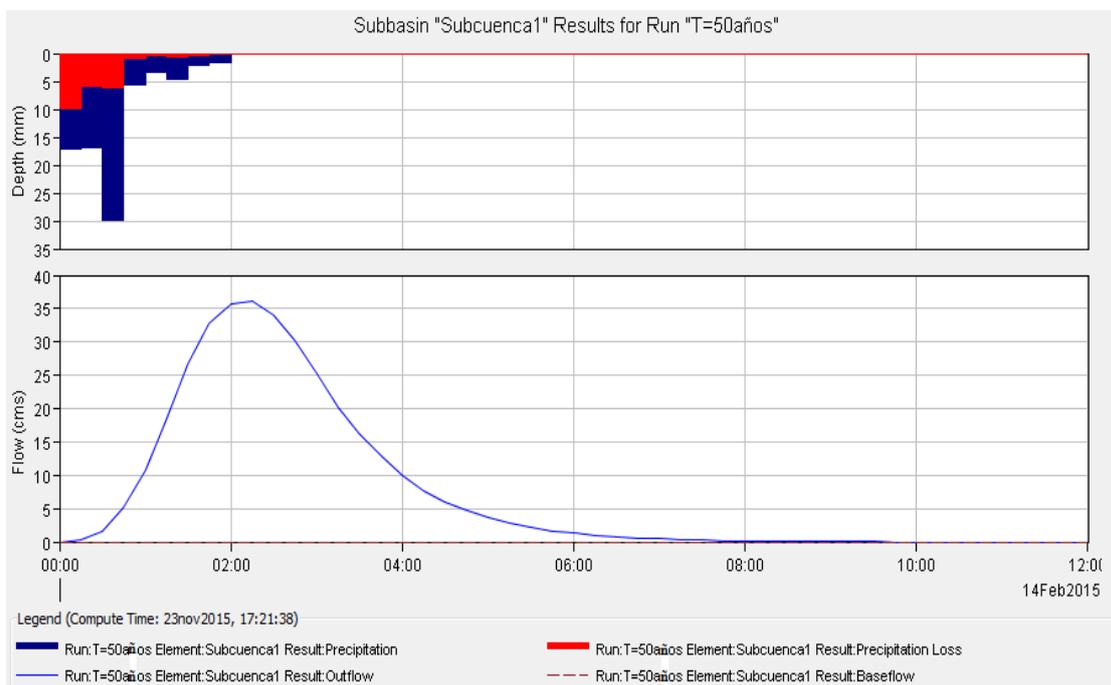
Project: El Pueblito Simulation Run: T=50años  
Subbasin: Subcuenca 1

Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 50años
Compute Time:23nov2015, 16:43:26	Control Specifications:Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results			
Peak Discharge:	43.1 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:	81.39 (MM)	Direct Runoff Volume:	68.19 (MM)
Loss Volume:	13.20 (MM)	Baseflow Volume:	0.00 (MM)
Excess Volume:	68.19 (MM)	Discharge Volume:	68.19 (MM)

- Hidrograma para 50 años de recurrencia con cubierta vegetal. CN=83



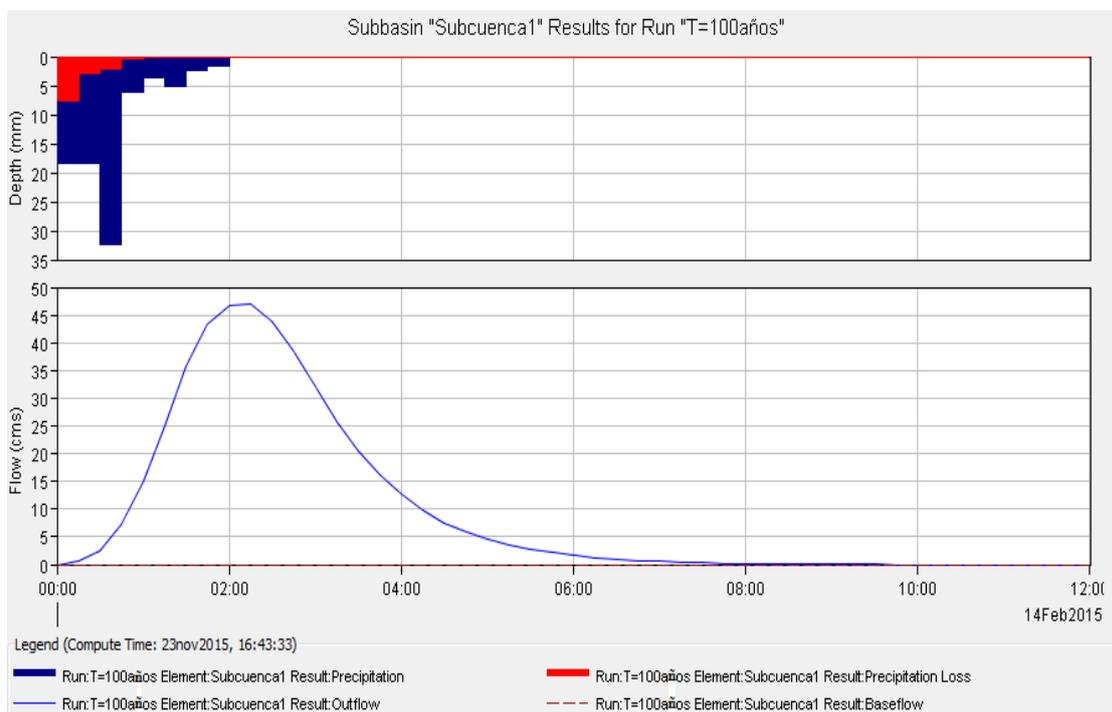
Project: El Pueblito Simulation Run: T=50años  
Subbasin: Subcuenca 1

Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 50años
Compute Time:23nov2015, 17:21:38	Control Specifications:Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results			
Peak Discharge:	36.2 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:	81.39 (MM)	Direct Runoff Volume:	57.27 (MM)
Loss Volume:	24.12 (MM)	Baseflow Volume:	0.00 (MM)
Excess Volume:	57.27 (MM)	Discharge Volume:	57.27 (MM)

- Hidrograma para 100 años de recurrencia sin cubierta vegetal. CN=92



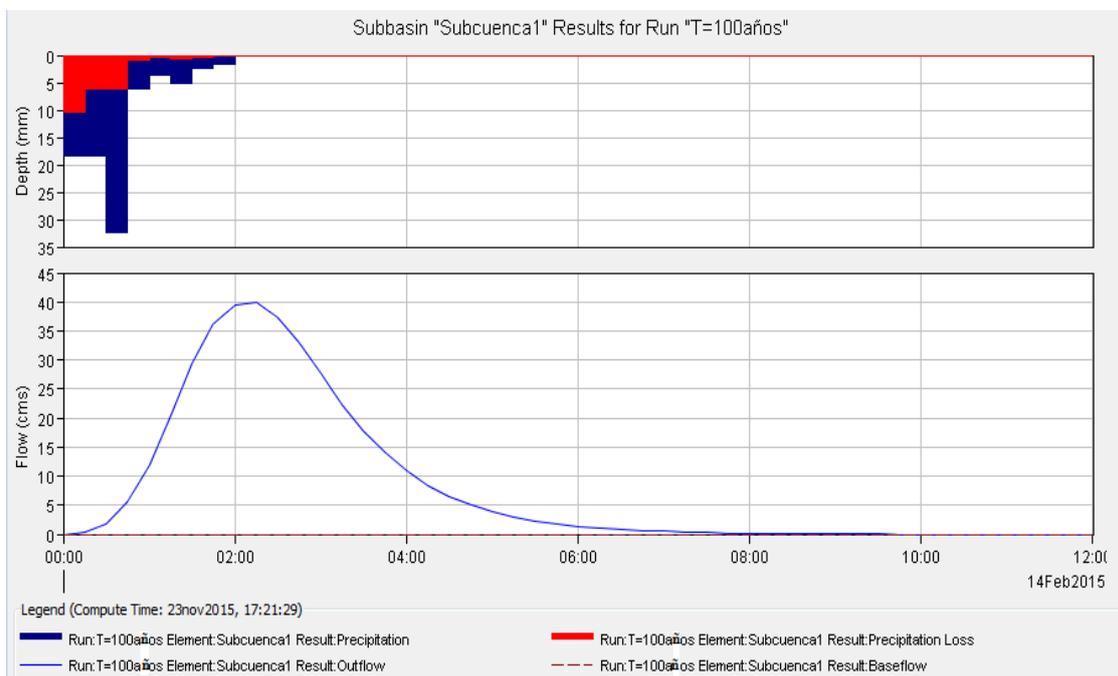
Project: El Pueblito Simulation Run: T= 100años  
Subbasin: Subcuenca 1

Start of Run: 14feb2015, 00:00 Basin Model: Subcuenca  
End of Run: 14feb2015, 12:00 Meteorologic Model: 100años  
Compute Time: 23nov2015, 16:43:33 Control Specifications: Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results			
Peak Discharge:	47.1 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:	87.85 (MM)	Direct Runoff Volume:	74.44 (MM)
Loss Volume:	13.41 (MM)	Baseflow Volume:	0.00 (MM)
Excess Volume:	74.44 (MM)	Discharge Volume:	74.44 (MM)

- Hidrograma para 100 años de recurrencia con cubierta vegetal. CN=83



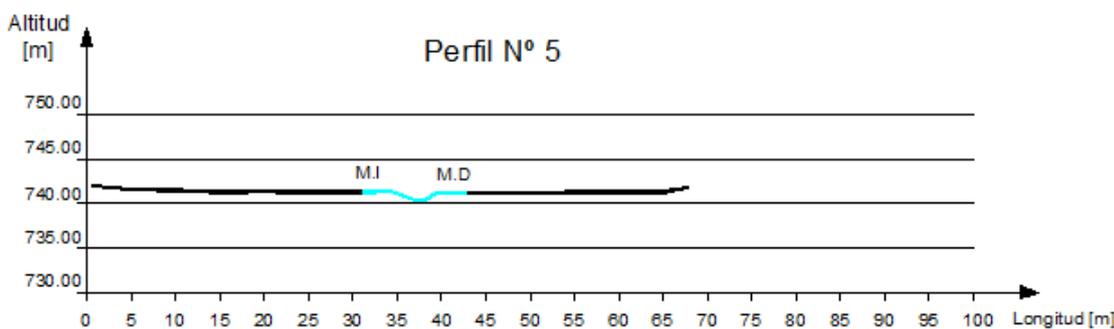
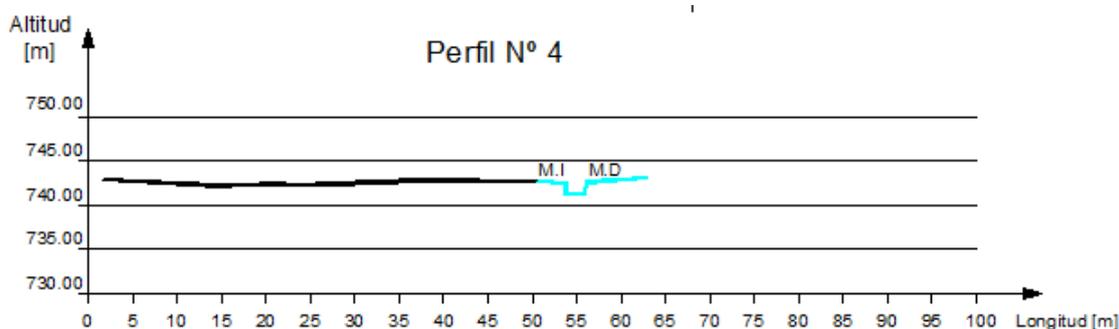
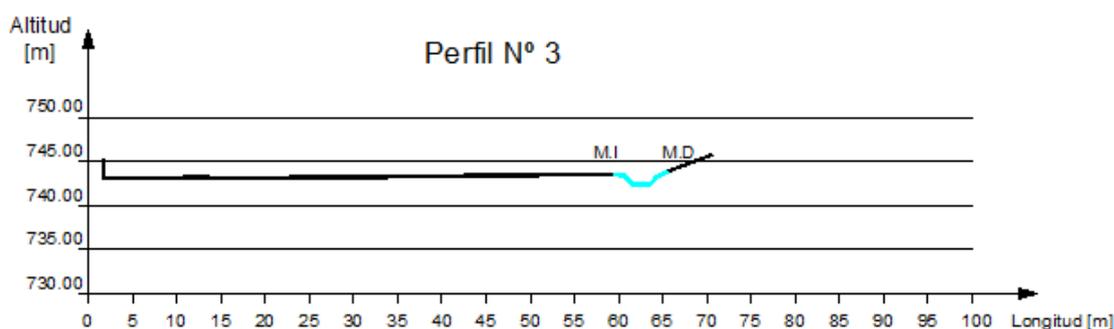
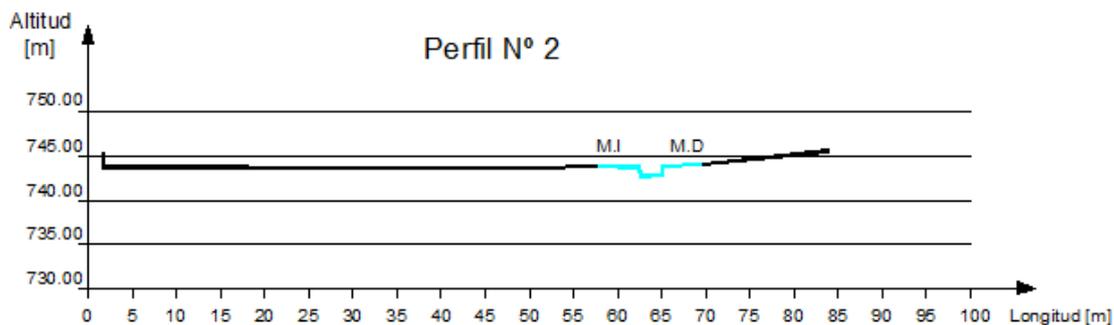
Project: El Pueblito Simulation Run: T = 100años  
Subbasin: Subcuenca1

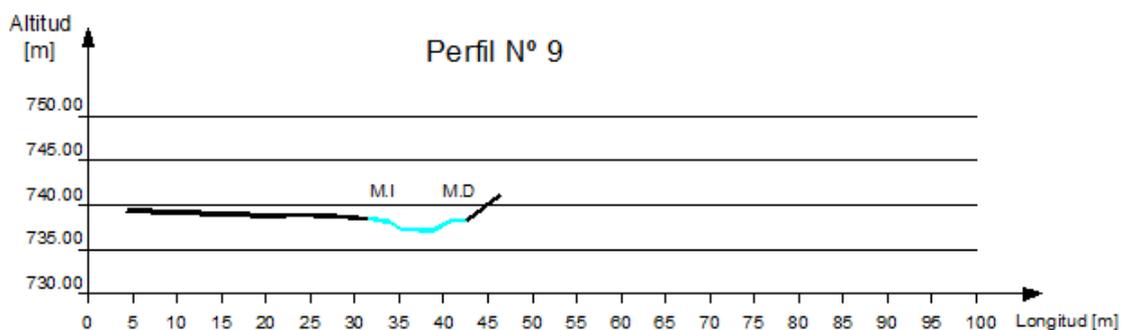
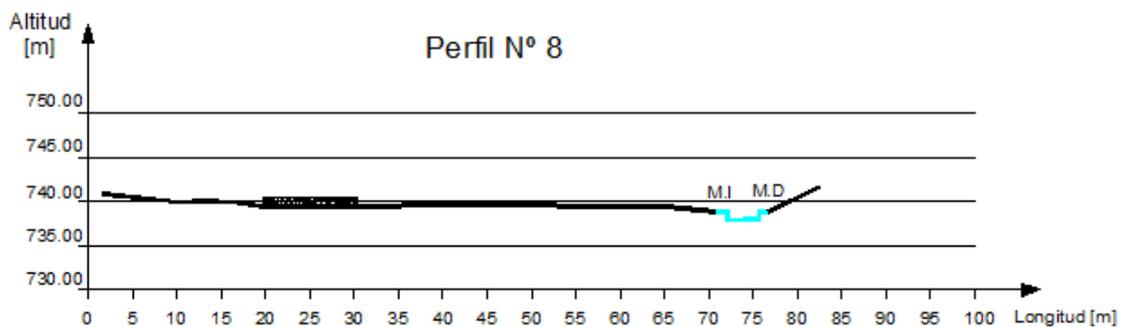
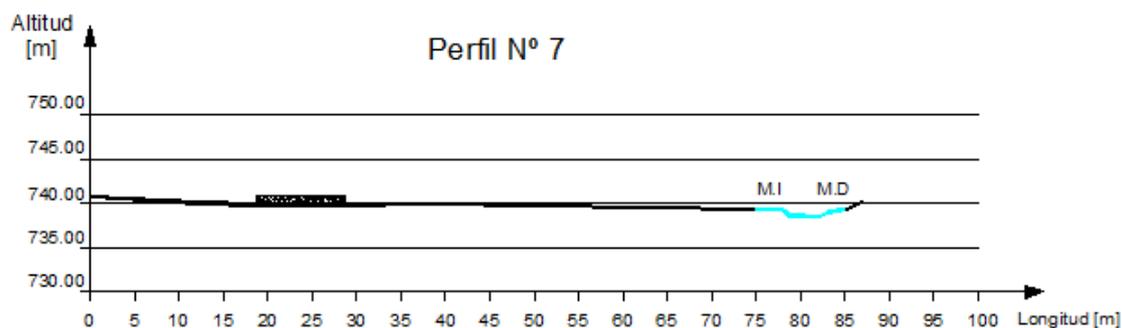
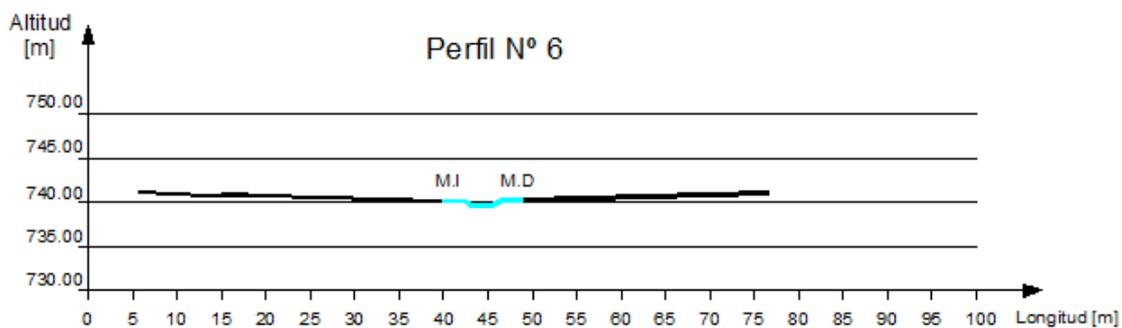
Start of Run: 14feb2015, 00:00	Basin Model: Subcuenca
End of Run: 14feb2015, 12:00	Meteorologic Model: 100años
Compute Time:23nov2015, 17:21:29	Control Specifications:Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results			
Peak Discharge:	39.8 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	14feb2015, 02:15
Precipitation Volume:	87.85 (MM)	Direct Runoff Volume:	63.02 (MM)
Loss Volume:	24.83 (MM)	Baseflow Volume:	0.00 (MM)
Excess Volume:	63.02 (MM)	Discharge Volume:	63.02 (MM)

**ANEXO N° 3: PERFILES TRANSVERSALES**





## ANEXO Nº 4: NIVELES DE INUNDACION PARA DIFERENTES LLUVIAS DE DISEÑO

- Niveles de inundación para lluvia de 65.41 mm.

METODO DE HERMANECK								
Perfil N°	B [m]	Ai [m2]	Hm [m]	Pendiente	Velocidad [m/seg]	Caudal de Paso [m3/seg]	Caudal Teórico [m3/seg]	DIFERENCIA
1	11.10	9.96	0.90	0.01	2.75	27.44	27.40	0.04
2	64.95	14.47	0.22	0.08	1.90	27.46	27.40	0.06
3	63.23	20.05	0.32	0.02	1.37	27.46	27.40	0.06
4	56.58	18.75	0.33	0.02	1.46	27.38	27.40	-0.02
5	61.62	21.32	0.35	0.01	1.29	27.46	27.40	0.06
6	50.35	19.84	0.39	0.01	1.38	27.36	27.40	-0.04
7	39.89	15.49	0.39	0.02	1.77	27.39	27.40	-0.01
8	48.27	21.22	0.44	0.01	1.29	27.39	27.40	-0.01
9	14.53	10.50	0.72	0.01	2.62	27.56	27.40	0.16
10	7.81	4.94	0.63	0.08	5.55	27.42	27.40	0.02



- Niveles de inundación para lluvia de 74.70 mm

METODO DE HERMANNECK								
Perfil N°	B [m]	Ai [m <sup>2</sup> ]	Hm [m]	Pendiente	Velocidad [m/seg]	Caudal de Paso [m <sup>3</sup> /seg]	Caudal Teórico [m <sup>3</sup> /seg]	DIFERENCIA
1	11.55	11.06	0.96	0.01	2.94	32.51	32.50	0.01
2	65.40	15.84	0.24	0.08	2.06	32.68	32.50	0.18
3	63.29	21.82	0.34	0.02	1.49	32.50	32.50	0.00
4	57.59	20.64	0.36	0.02	1.58	32.59	32.50	0.09
5	62.32	23.30	0.37	0.01	1.39	32.43	32.50	-0.07
6	53.69	22.34	0.42	0.01	1.46	32.54	32.50	0.04
7	43.23	17.56	0.41	0.02	1.85	32.48	32.50	-0.02
8	48.35	23.15	0.48	0.01	1.41	32.55	32.50	0.05
9	16.31	12.06	0.74	0.01	2.69	32.39	32.50	-0.11
10	7.82	5.38	0.69	0.08	6.04	32.48	32.50	-0.02



- Lluvia de 81.39 mm

METODO DE HERMANECK								
Perfil N°	B [m]	Ai [m2]	Hm [m]	Pendiente	Velocidad [m/seg]	Caudal de Paso [m3/seg]	Caudal Teórico [m3/seg]	DIFERENCIA
1	11.86	11.84	1.00	0.01	3.06	36.29	36.20	0.09
2	65.73	16.74	0.25	0.08	2.17	36.32	36.20	0.12
3	63.34	23.08	0.36	0.02	1.57	36.33	36.20	0.13
4	58.27	21.91	0.38	0.02	1.66	36.30	36.20	0.10
5	62.74	24.74	0.39	0.01	1.47	36.31	36.20	0.11
6	61.19	25.18	0.41	0.01	1.44	36.27	36.20	0.07
7	45.44	19.03	0.42	0.02	1.91	36.29	36.20	0.09
8	48.40	24.41	0.50	0.01	1.48	36.15	36.20	-0.05
9	28.05	16.74	0.60	0.01	2.17	36.29	36.20	0.09
10	7.82	5.68	0.73	0.08	6.37	36.20	36.20	0.00



## **ANEXO N° 5: PLANOS DE PARCELAS AFECTADAS**

**Plano N° 1: Parcelas Afectadas por lluvia de 57 mm**

**Plano N° 2: Parcelas Afectadas por lluvia de 65.41 mm**

**Plano N° 3: Parcelas Afectadas por lluvia de 74.70 mm**

**Plano N° 4: Parcelas Afectadas por lluvia de 81.39 mm**

## BIBLIOGRAFIA

- APARICIO MIJARES, F. J. (1989)**, "Fundamentos de Hidrología de Superficie", Limusa-Noriega Editores. México.
- CAAMAÑO NELLI G. ET. AL. (1993)**: Regionalización de Precipitaciones Máximas para la Provincia de Córdoba. INCYTH. CIHRSA. CONICET. SMN. DPH. CONICOR.
- CARLOS MARCELO GARCIA (2000)**, "Lámina de lluvia puntual para diseño hidrológico", Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos, UNC., Córdoba, Argentina.
- CHOW V. T., MAIDMENT, DR., MAYS, L. W. (1993)**. "Hidrología Aplicada". Editorial Mc. Graw Hill. Bogotá, Colombia.
- GABRIEL CAAMAÑO NELLI, CARLOS G. CATALINI, LAURA COLLADÓN, CLARITA MARIA DASSO, CARLOS MARCELO GARCIA, ERIK DANIEL ZIMMERMAN (2003)**, "Lluvias de Diseño, Conceptos, Técnicas y Experiencias", Universitas.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2010)**: HEC-HMS. User Manual, Version 3.5. US Army Corps of Engineers.
- SERGIO FATTORELLI – PEDRO C. FERNANDEZ (2011)**: Diseño Hidrologico
- TUCCI C.E.M. (ed.) (1993)**: Hidrologia: Ciência e Aplicação. Coleção ABRH, Brasil, Vol. 4, 943 p
- VEN TE CHOW (1994)**, "Hidráulica de Canales Abiertos", Mc. Graw Hill.

