

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**



**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

**Carrera:** Ingeniería Civil

**TÍTULO:**

***“CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA HÍDRICA DE LAS CUENCAS  
ALUVIONALES DE LOS DIQUES CATINI Y ROCA, UBICADAS EN GENERAL ROCA,  
RÍO NEGRO”***

**ALUMNOS:** Ramos Williams, Cintia Anahí (LEGAJO 121.346)

Ventura, Maximiliano Daian (LEGAJO 84.340)

**DIRECTOR ACADÉMICO:** Mg. Ing. Rapacioli Raúl

**CO- DIRECTOR ACADÉMICO:** Prof. Ing. Gustavo Franke

Neuquén, Diciembre de 2017.

## RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio hidrológico y sedimentológico del sistema de defensa aluvional Roca-Catini, con el fin de evaluar el estado actual del mismo y, en caso de que corresponda, proponer medidas para mantener la obra del lado de la seguridad. En términos generales se determinó la escorrentía superficial y la degradación de los suelos de las cuencas Roca y Catini, y se estableció si ambos diques se encuentran en condiciones de soportar una precipitación intensa de baja probabilidad de ocurrencia. También se evaluó la importancia de los volúmenes de sedimentos producidos con respecto a los volúmenes de los embalses.

El desarrollo del trabajo contempló la obtención de las variables que se ven involucradas en un fenómeno pluvioaluvional (características morfométricas de cuencas, índice CN distribuido y tormentas de diseño para distintos tiempos de recurrencia). Dicha información se estableció como datos de entrada para el modelo lluvia-escorrentía, y sus resultados permitieron abastecer de información al modelo de producción de sedimentos.

Los resultados obtenidos determinaron que las escorrentías son considerables y la producción de sedimentos generadas moderadas. Se constató que el nivel de agua de los embalses se encuentra muy próximo a los niveles de coronamiento de los diques y, por consiguiente, sus estados son críticos. Por ello se propuso elevar la cota de los diques y un mantenimiento constante de las obras de evacuación existentes.

**Palabras clave:** escorrentía, erosión, sistema de información geográfica.

## ABSTRACT

In this work, a hydrological and sedimentological study of the Roca-Catini alluvial defense system was carried out, in order to evaluate the current state of the system and, if applicable, propose measures to maintain the work on the safety side. In general terms, surface runoff and soil degradation of the Roca and Catini basins were determined, and it was established if both dams are able to withstand intense precipitation with low probability of occurrence. The importance of the volumes of sediments produced with respect to the volumes of the reservoirs was also evaluated.

The development of the work contemplated the obtaining of the variables that are involved in a pluvioaluvial phenomenon (morphometric characteristics of basins, distributed CN index and design storms for different recurrence times). This information was established as input data for the rainfall-runoff model, and its results allowed supplying information to the sediment production model.

The obtained results determined that the runoffs are considerable and the production of moderate generated sediments. It was found that the water level of the reservoirs is very close to the leveling levels of the dams and, therefore, their states are critical. Therefore it was proposed to raise the level of the levees and a constant maintenance of existing evacuation works.

**Keywords:** runoff, erosion, geographic information system

## RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

A mi **familia, mi novio, amigos y compañeros de estudio**, por su ayuda y compañía para poder culminar con éxito esta meta.

A mi tutor académico **Mg. Ing. Raúl A. Rapacioli**, por haberme guiado en la confección del presente proyecto.

A mi co Director, **Ing. Gustavo Franke** por su predisposición y conocimiento.

Ramos Williams, Cintia Anahí.

A mi familia, **a mi viejo y a mi hermana** por el aguante en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mis **amigos** y compañeros, por la ayuda y por su aporte con el conocimiento aportado.

Al **Ing. Raúl A. Rapacioli**, por el tiempo dedicado y por el conocimiento aportado a este trabajo como Tutor Académico, pero por sobre todo por el aporte académico en el uso de nuevas metodologías.

Al **Ing. Gustavo Franke** (co Director), por su colaboración en el presente proyecto y en otros momentos de mi carrera.

**Y a mi compañera de tesis**, por el conocimiento, por la paciencia, pero por sobre todo por mostrarme que el esfuerzo lo vale.

Ventura, Maximiliano Daian

## Índice General

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Contenidos.....	2
<b>2. Marco teórico.....</b>	<b>4</b>
2.1. Definición y objetivo de la hidrología.....	4
2.2. El ciclo hidrológico.....	4
2.3. La cuenca hidrológica.....	5
2.3.1. Definición de cuenca.....	5
2.4. Parámetros morfométricos.....	5
2.4.1. Parámetros morfométricos principales.....	5
2.4.2. Parámetros físicos de forma.....	6
2.4.3. Parámetros físicos de relieve.....	7
2.4.4. Parámetros relativos a la red hidrográfica.....	10
2.5. Precipitación.....	12
2.5.1. Definición.....	12
2.5.1. Clasificación de la precipitación.....	12
2.5.2. Instrumentos de medición.....	13
2.5.3. Tormenta.....	13
2.5.3.1. Definición.....	13
2.5.3.2. Elementos fundamentales del análisis de las tormentas.....	13
2.5.4. Análisis de frecuencia de las tormentas.....	14
2.5.4.1. Series de información hidrológica.....	14
2.5.4.2. Posición de graficación.....	15
2.5.4.3. Distribución GEV.....	15
2.5.5. Tormenta de Diseño.....	16
2.5.5.1. Precipitación diaria máxima.....	16
2.5.5.2. Intensidad media máxima de la lluvia de 24 horas.....	16
2.5.5.3. Método de la intensidad contigua.....	17

---

2.5.5.4.	Hietograma de Huff.....	17
2.5.5.5.	Hietograma acumulado porcentual y discreto.....	19
2.6.	Infiltración.....	19
2.6.1.	Definiciones.....	20
2.6.2.	Factores que intervienen en la capacidad de infiltración.....	20
2.6.3.	Medición de la capacidad de infiltración.....	21
2.6.4.	Ecuación de la curva de capacidad de infiltración.....	21
2.7.	Escurrecimiento.....	22
2.7.1.	Definición.....	22
2.7.2.	Fuentes y tipos de escurrecimientos.....	22
2.7.3.	Escurrecimiento superficial.....	23
2.7.3.1.	Método SCS o Método de número de curva.....	24
2.8.	Modelación Hidrológica con HEC-HMS.....	29
2.8.1.	Hidrograma Unitario Sintético.....	30
2.8.1.1.	Hidrograma unitario Sintético de Snyder.....	30
2.8.2.	Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave).....	32
2.8.2.1.	Ecuaciones Diferenciales del Modelo.....	33
2.9.	Producción de sedimentos en cuencas aluvionales - Modelo MUSLE.....	34
2.9.1.	Erodabilidad del suelo. Factor K.....	35
2.9.2.	Topografía. Factor LS.....	38
2.9.3.	Cubierta vegetal y manejo. Factor C.....	39
2.9.4.	Prácticas de conservación. Factor P.....	40
2.9.5.	Producción anual de sedimentos.....	41
2.10.	Resumen del Capítulo.....	42
<b>3.</b>	<b>Desarrollo.....</b>	<b>43</b>
3.1.	Características general del área de estudio.....	44
3.2.	Determinación de la red de drenaje, cuencas aluvionales y su caracterización.....	44
3.2.1.	Zona de Análisis - ZDA.....	44
3.2.2.	Implementación del MDT de la ZDA.....	45

---

3.2.3.	Delimitación de cuencas aluvionales. ....	46
3.2.4.	Caracterización de cuencas aluvionales. ....	50
3.3.	Determinación del potencial de escorrentía - Índice CN. ....	52
3.3.1.	Mapa de cobertura y usos del suelo (MCUS). ....	52
3.3.2.	Mapa del Grupo Hidrológico de Suelo (MGHS).....	57
3.3.3.	Algebra de Mapas. Tabulación Cruzada. ....	60
3.3.4.	Mapa de Pendientes. ....	60
3.3.5.	Mapa del Potencial de Escorrentía. Índice CN. ....	60
3.4.	Precipitaciones Intensas. Tormentas de Proyecto. ....	64
3.4.1.	Recopilación y tratamiento de la información. ....	64
3.4.2.	Umbral de precipitación.....	64
3.4.3.	Ajuste estadístico mediante distribución de probabilidad.....	64
3.4.4.	Cálculo de $P_{d_{máx}}$ para distintos TR.....	65
3.4.5.	Cálculo de precipitación de una hora de duración ( $P_{24}$ ) y de la Intensidad media máxima de lluvia de 24 hs ( $I_{24}$ ). ....	66
3.4.6.	Determinación del coeficiente adimensional “n” y cálculo de Intensidades. ....	66
3.4.7.	Intensidades para distintos tiempos de recurrencia TR. Curvas IDF. ....	67
3.4.8.	Duración de Tormenta. ....	68
3.4.9.	Tormentas de Proyectos Adoptadas.....	68
3.5.	Modelo hidrológico de la zona de análisis.....	70
3.5.1.	Modelación del Sistema Hidrológico.....	71
3.5.1.1.	Modelo de Cuenca. ....	71
3.5.1.2.	Modelo de Diques y Canales. ....	72
3.5.1.3.	Tormenta de Diseño.....	79
3.5.1.4.	Modelo Meteorológico. ....	79
3.5.2.	Simulación del Modelo Hidrológico-Generalidades.....	80
3.5.3.	Resultados de la Simulación- 500 y 1000 años.....	80
3.5.3.1.	Resultados Cuenca Roca.....	81
3.5.3.2.	Resultados Dique Roca.....	83

---

3.5.3.3. Resultados de Canal Trasvase. ....	85
3.5.3.4. Resultados de la Cuenca Catini. ....	88
3.5.3.5. Resultados del Dique Catini. ....	90
3.5.3.6. Resultados del Canal de salida (desagüe). ....	92
3.6. Determinación de la producción de sedimentos en las cuencas aluvionales. ....	94
3.6.1. Erodabilidad del suelo. Factor K. ....	94
3.6.2. Topografía. Factor LS. ....	96
3.6.3. Cubierta Vegetal y Manejo. Factor C. ....	98
3.6.4. Prácticas de conservación. Factor P. ....	100
3.6.5. Factor de Escorrentía. ....	101
3.6.6. Cálculo de sedimentos. ....	101
3.6.6.1. Producción anual de escorrentía y sedimentos. ....	102
3.7. Resumen del Capítulo. ....	103
<b>4. Análisis de resultados. ....</b>	<b>104</b>
<b>5. Conclusiones. ....</b>	<b>106</b>
<b>6. Recomendaciones. ....</b>	<b>108</b>
<b>7. Anexo. ....</b>	<b>109</b>
7.1. Serie de precipitaciones diarias. ....	109
7.2. Ajuste estadístico con la función de distribución GEV. ....	110
7.3. Pruebas de bondad ajuste. ....	112
7.4. Hietogramas de diseño para TR de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años. ....	113
7.5. Estado del Sistema al 17 de Marzo de 2017. ....	114
<b>8. Bibliografía. ....</b>	<b>119</b>

### Índice de Figuras.

Figura 2.1. Esquema del ciclo hidrológico.....	5
Figura 2.2.- Curvas hipsométricas guías. ....	8
Figura 2.3.-Curvas hipsométricas esquemáticas de dos cuencas, cuyas superficies y cotas extremas son proporcionales. Ambas cuencas poseen igual $C_m$ , pero distintas $H_m$ .....	10
Figura 2.4.- Precipitación por Convección.....	13
Figura 2.5.- Porcentaje de lluvias acumuladas en el tiempo para los distintos grupos.....	18
Figura 2.6.- Curva de Capacidad de infiltración (f). ....	20
Figura 2.7.- Relación entre la precipitación y el escurrimiento total. ....	23
Figura 2.8.- Infiltración y exceso de precipitación bajo lluvia de intensidad variable. ....	24
Figura 2.9.- Variables en el método de abstracciones de precipitaciones del SCS. ....	25
Figura 2.10.- Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS .....	26
Figura 2.11.- Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en GIS. Cálculo de índice CN distribuido. ....	29
Figura 2.12.- Hidrograma unitario sintético de Snyder. a) Hidrograma unitario estándar ( $t_p=5.5t_r$ ). b) Hidrograma unitario requerido ( $t_{pR} 5.5t_{rR}$ ). ....	30
Figura 2.13.- Esquema para una cuenca simple.. ....	33
Figura 2.14.- Idealización del flujo superficial. ....	33
Figura 2.15.- Nomograma de Erodabilidad del Suelo. ....	36
Figura 3.1 - Imagen Satelital de la ciudad de General Roca y los diques Roca y Catini. ....	43
Figura 3.2.- Imagen LANDSAT 8 (P231 R087) .....	45
Figura 3.3.- Modelo Digital del Terreno de la ZDA. ....	46
Figura 3.4.- Relleno de celdas y eliminación de picos. ....	47
Figura 3.5.- Dirección de Flujo. Modelo D8.....	47
Figura 3.6 - Proceso de quemado y obtención de la red de drenaje. ....	48
Figura 3.7- Mapa altimétrico, cuencas aluvionales y red de drenaje. ....	49
Figura 3.8.-Curvas hipsométricas cuencas. ....	51
Figura 3.9 - Mapa Imagen Satelital LANDSAT 8 de la ZDA (RGB 543) en ERDAS.IMAGINE V.14. ....	54
Figura 3.10 - Mapa de Coberturas y Usos del Suelo (MCUS). ....	56
Figura 3.11- Mapa de Texturas de Suelos.....	57
Figura 3.12- Mapa de Grupo Hidrológico del Suelo (MGHS).....	59
Figura 3.13.- Mapa Índice CN I. ....	61
Figura 3.14- Mapa del Índice CN II pendiente.....	62
Figura 3.15- Mapa de Potencial de Escorrentía.....	63
Figura 3.16.- Ajuste GEV de la Probabilidad de $Pd_{máx}$ para la Estación Cipolletti.....	65
Figura 3.17.- Curvas IDF Cipolletti. ....	68

---

Figura 3.18.- Hietograma adimensional de Huff.....	69
Figura 3.19.- Tormentas de Proyecto. ....	69
Figura 3.20.- Hietogramas porcentuales – D: 5h 500 años. ....	70
Figura 3.21.- Tormentas de proyecto- D: 5h 1000 años.....	70
Figura 3.22.- Sistema hidrológico. ....	71
Figura 3.23.- Fotografía Cuenca Catini 2018.....	72
Figura 3.24.- Fotografía Dique Roca 2018.....	74
Figura 3.25.- Altura vs Volumen Dique Roca.....	75
Figura 3.26.- Fotografía Canal de Trasvase 2018 a.....	76
Figura 3.27.- Fotografía Canal de Trasvase 2018 b. ....	76
Figura 3.28.- Fotografía Canal de Trasvase 2018 c.....	76
Figura 3.29.- Fotografía Dique Catini 2018. ....	77
Figura 3.30.- Altura vs Volumen Dique Catini .....	78
Figura 3.31.- Fotografía del Canal de Desagüe 2018.....	79
Figura 3.32.- Hidrograma de tormentas acumuladas. 500 años .....	79
Figura 3.33.- Hidrograma de tormentas acumuladas.1000 años. ....	79
Figura 3.34.- Resultados generales. (500 años).....	80
Figura 3.35.- Resultados generales.(1000 años).....	80
Figura 3.36.- Resultados generales Cuenca Roca. (500 años).....	81
Figura 3.37.- Hidrograma de crecida cuenca Roca. (1000 años). ....	81
Figura 3.38.- Resultados generales Cuenca Roca. (1000 años).....	82
Figura 3.39.- Hidrograma de crecida cuenca Roca. (1000 años). ....	82
Figura 3.40.- Resultados Dique Roca. (500 años).....	83
Figura 3.41.- Resultados generales dique Roca. (500 años).....	83
Figura 3.42.- Resultados generales dique Roca. (1000 años).....	84
Figura 3.43.- Resultados generales dique Roca. (1000 años).....	84
Figura 3.44.- Resultados generales Canal de Trasvase. ....	85
Figura 3.45.- Resultados generales Canal de Trasvase. (500 años). ....	85
Figura 3.46.- Resultados generales Canal de Trasvase. (1000 años). ....	86
Figura 3.47.- Curva de transito de hidrograma en el canal trasvase.....	86
Figura 3.48.- Curva de velocidad del flujo en el canal trasvase. (500 años). ....	87
Figura 3.49.- Curva de velocidad del flujo en el canal trasvase.(1000 años). ....	87
Figura 3.50.- Resultados generales Cuenca Catini. (500 años). ....	88
Figura 3.51.- Hidrograma de crecida cuenca Catini. (500 años). ....	88
Figura 3.52.- Resultados generales Cuenca Catini. (1000 años). ....	89
Figura 3.53.- Hidrograma de crecida cuenca Catini. (1000 años).....	89
Figura 3.54.- Resultados generales Dique Cattini. ( 500 años). ....	90

---



Caracterización de la Dinámica Hídrica de las Cuencas Aluvionales  
diques Catini y Roca, ubicadas en General Roca, Río Negro.

---

Figura 3.55.- Resultados generales Dique Catini. (500 años). .....	90
Figura 3.56.- Resultados generales Dique Catini. (1000 años). .....	91
Figura 3.57.- Resultados generales Dique Catini. (1000 años). .....	91
Figura 3.58.- Resultados generales Canal de Desague. (500 años). .....	92
Figura 3.59.- Resultados generales Canal de Desague. (500 años). .....	92
Figura 3.60.- Resultados generales Canal de Desague. (1000 años). .....	93
Figura 3.61.- Resultados generales Canal de Desague. (1000 años). .....	93
Figura 3.62.- Mapa del Factor K distribuido. ....	95
Figura 3.63.- Mapa del Factor LS. ....	97
Figura 3.64.- Mapa de NDVI distribuido. ....	99
Figura 3.65.- Mapa del Factor C distribuido. ....	100

### Índice de Tablas.

Tabla 2.1.-Clasificación según el tamaño de la cuenca.....	6
Tabla 2.2.- Valores interpretativos del coeficiente de Compacidad.....	7
Tabla 2.3.- Coeficiente de ajuste k.....	16
Tabla 2.4.- Clasificación de la precipitación según la regularidad de la intensidad.....	17
Tabla 2.5 - Valores del índice CN para áreas aluvionales semiáridas.....	27
Tabla 2.6 - Grupos Hidrológicos de Suelo.....	27
Tabla 2.7- Grupos hidrológicos del suelo.....	28
Tabla 2.8.-Valores del parámetro de estructura E.....	36
Tabla 2.9.-Valores del parámetro de permeabilidad P.....	36
Tabla 2.10.- Valores del Factor de Erodabilidad de Suelos, K ( $T_n * H_s / N * Ha$ ).....	37
Tabla 2.11.- Resumen de ecuaciones para la estimación del factor LS.....	39
Tabla 2.12.- Valores del Factor P. (Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978).....	41
Tabla 3.1 - Coordenadas extremas de la ZDA.....	44
Tabla 3.2.- Coordenadas de los puntos de cierre de las cuencas aluvionales.....	48
Tabla 3.3- Parámetros morfométricos principales.....	50
Tabla 3.4- Parámetros de forma.....	50
Tabla 3.5- Valores de integral hipsométrica.....	51
Tabla 3.6- Parámetros físicos de relieve.....	51
Tabla 3.7- Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica.....	52
Tabla 3.8.- Coberturas y Usos del Suelo.....	53
Tabla 3.9.- Áreas de entrenamiento.....	55
Tabla 3.10.-Grupos hidrológicos de suelo según el SCS (USDA).....	58
Tabla 3.11 - Clasificación para el cálculo del Índice CN.....	60
Tabla 3.12- Clasificación del Potencial de Escorrentía en función del índice CN.....	60
Tabla 3.13 - Valores del índice CN.....	64
Tabla 3.14.- Parámetros de la función GEV.....	65
Tabla 3.15.- Precipitaciones Diarias Máximas para distintos TR.....	66
Tabla 3.16.- Precipitaciones e Intensidades medias máximas de 24 hs. para cada TR.....	66
Tabla 3.17.- Intensidades de precipitación en mm/hs para cada tiempo de recurrencia TR.....	67
Tabla 3.18.- Precipitaciones totales para tormentas de 5 horas de duración.....	68
Tabla 3.19.- Parámetros adoptados cuenca Roca.....	72
Tabla 3.20.- Parámetros adoptados cuenca Catini.....	72
Tabla 3.21.- Parámetros adoptados dique Roca.....	73
Tabla 3.22.- Altura vs Volumen Dique Roca.....	74
Tabla 3.23.- Parámetros adoptados canal de trasvase.....	75

---

Tabla 3.24.- Parámetros adoptados dique Catini.....	77
Tabla 3.25.- Altura vs Volumen Dique Catini. ....	77
Tabla 3.26.- Parámetros adoptados dique Catini.....	78
Tabla 3.27.- Factor de Erodabilidad K. ....	94
Tabla 3.28.- Valores del Factor LS para cada cuenca. ....	96
Tabla 3.29.- Valores de C medios ponderados.....	98
Tabla 3.30.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 2, 5 y 10 años. ....	101
Tabla 3.31.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 25, 50 y 100 años. ....	101
Tabla 3.32.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 500 y 1000 años. ....	101
Tabla 3.33.- Sedimentos producidos a la salida de las cuencas en toneladas (Tn).....	101
Tabla 3.34.- Cantidad de sedimentos producidos en toneladas/hectárea (Tn/ha).....	101
Tabla 3.35.- Producción anual promedio de escorrentía. ....	102
Tabla 3.36.- Producción anual de sedimentos. ....	102
Tabla 3.37.- Degradación por erosión hídrica. ....	102
Tabla 3.38.- Tiempo que tarda en colmatarse cada cuenca. ....	102

## **1. Introducción.**

El presente trabajo tiene como finalidad conocer y analizar el funcionamiento hidrológico del sistema de protección aluvional de la Ciudad de General Roca - Provincia de Río Negro, entendiendo su importancia por proteger a la misma de inundaciones, y conservar así zonas densamente pobladas con grandes áreas dedicadas a la agricultura, fruticultura e industria.

Para el desarrollo del trabajo es necesario conocer en detalle las características morfométricas de las cuencas, su grado de impermeabilidad y las precipitaciones de diseño; así poder evaluar mediante un estudio hidrológico: los volúmenes de agua generados, los volúmenes de sedimentos, el estado de las obras de contención existentes y las posibilidades de inundación.

La hidrología es la ciencia que nos permitirá realizar el estudio hidrológico de una región y caracterizar su clima, vegetación, topografía, el ciclo del agua, la fauna y actividad isotrópica.

Mediante el uso de herramientas tecnológicas se ha logrado un aumento en la precisión de la descripción de las características hidrológicas de la zona, lo cual mejora notablemente las estimaciones permitiendo resultados más precisos y confiables.

En el presente trabajo se incorporaron las herramientas tecnológicas para mejorar el cálculo realizado hace 40 años en los diques Roca y Catini, y con ello reevaluar las obras a realizar y las mejoras sobre las ya existentes.

Principalmente se usaron imágenes satelitales procesadas por el software Arc-Gis para una descripción detallada de las cuencas de aporte, indicando los parámetros necesarios para describir la escorrentía que se podría generar sobre la cuenca ante una lluvia de envergadura considerable.

Las características climatológicas de la zona de estudio fueron aportadas por el servicio Meteorológico Nacional, INTA, AIC, que permitieron trabajar con las series históricas de precipitaciones, dando lugar a una posterior simulación de tormentas con el software HEC-HMS.

Con los datos obtenidos se simuló todo el sistema en el software HEC-HMS (software desarrollado por la armada de Estados Unidos), y se logró evaluar el funcionamiento del sistema ante una tormenta milenaria.

Dado las características de las cuencas, se consideró la generación de sedimentos, la cual también se expone para una mejor evaluación del sistema de protección aluvional.

### **1.1. Objetivos.**

El objetivo principal del trabajo es la evaluación del sistema Roca-Catini como sistema de protección aluvional. Con el fin de evaluar el funcionamiento de los diques ante la escorrentía superficial generada por precipitaciones de gran volumen.

En pos de cumplir con el objetivo principal se establecieron objetivos secundarios, entre los cuales se destacan:

- Procesamiento de datos georeferenciados en un sistema de información geográfica, con el fin de caracterizar las cuencas del sistema mediante sus parámetros morfométricos de manera precisa.
- Elaborar un modelo de precipitaciones intensas mediante datos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona, y confeccionar una tormenta de diseño que permita evaluar el sistema.
- Elaborar un modelo hidrológico que integre los datos obtenidos de la caracterización de las cuencas con las tormentas de diseño y presente como resultado los volúmenes de escorrentía generados.
- Elaborar un modelo que permita caracterizar la geometría y el comportamiento de los diques ante la escorrentía superficial.
- Simular el funcionamiento de los diques Roca y Catini integrando los volumen de escorrentía generados en situaciones extremas.
- Elaborar un modelo que permita evaluar la producción de sedimentos generada por la escorrentía superficial.
- Evaluar el efecto de la producción de sedimentos en los diques de protección aluvional a través de los años.

## 1.2. Contenidos.

La estructura de la siguiente tesis se desarrolla a continuación:

- El **capítulo 1**, es una introducción de la temática de la tesis donde establecen los objetivos principales y se explicitan los secundarios necesarios.
- En el **capítulo 2**, se proporciona una base teórica para la comprensión de los temas a tratar, entre ellos se dan los conceptos necesarios utilizados para las caracterizaciones morfométricas de las cuencas, sus características hidrológicas, el tratamiento mediante Arc-Gis y las herramientas necesarias para el procesamiento de datos. También se manifiesta la metodología utilizada para la recopilación y procesamiento de datos pluviométricos. Se exponen en este capítulo métodos de transformación de lluvia en escorrentía, modelos de transito de hidrogramas, modelos de generación y evaluación de sedimentos (MUSLE).
- En el **capítulo 3**, se establecen las metodologías utilizadas, las secuencias de aplicación, se concatena el sistema y se simula en separado cada sistema para luego simularlo en conjunto.

Entre los procedimientos más importantes encontramos:

1. Se obtiene un modelo digital del terreno mediante fotos satelitales.
2. Se procesan las imágenes satelitales con el software Arc-Gis y se confecciona cartas topográficas
3. Se procesan los datos georeferenciados.
4. Se recopila información pluviométrica y se elaboran tormentas de diseño
5. Se simulan la tormenta de diseño y se evalúa la escorrentía generada.

6. Se simula el comportamiento del sistema en su conjunto.
7. Se calcula la producción de sedimentos anual y se evalúa su efecto sobre el sistema.

- En el **capítulo 4**, se analizan los datos obtenidos de cada una de las simulaciones del capítulo 3, se comparan los resultados obtenidos en varias iteraciones y se exponen las conclusiones particulares y generales del trabajo.

Se proponen varias alternativas a los problemas encontrados, basados en las conclusiones obtenidas.

- En el **capítulo 5**, se presentan la bibliografía utilizada como referencia, y el índice de imágenes para la elaboración de la presente tesis.

## 2. Marco teórico.

Con el objetivo de presentar los fundamentos básicos en que se basa el presente PIP, en este apartado se abordarán los conceptos y teorías de:

- Hidrología.
- Cuencas Aluvionales.
- Precipitaciones Intensas.
- Modelación Hidrológica.
- Producción de Sedimentos.
- Conceptos generales de Hidrología.

El objetivo primordial de esta sección es destacar conceptos de gran importancia para la hidrología superficial; ellos son la definición y objetivo de la hidrología, y una descripción del ciclo hidrológico.

### 2.1. Definición y objetivo de la hidrología.

La Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas, físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.

La parte de la hidrología que se estudia en la ingeniería se llama ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, que incluye el diseño y la operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua. Estos diseños requieren, sin excepción, de análisis hidrológicos cuantitativos para la selección de los eventos de diseño. Por consiguiente, el objetivo de la hidrología aplicada, es la determinación de esos eventos.

### 2.2. El ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el concepto fundamental desde el cual se inicia el estudio de la hidrología. Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin.

En la **Figura 2.1** se muestra en forma esquemática cómo el agua se *evapora* desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y *precipita* sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser *interceptada* por la vegetación, convertirse en *flujo superficial* sobre el suelo, *infiltrarse* en él, correr a través del suelo como *flujo subsuperficial* y descargar en los ríos como *escorrentía superficial*. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos **componentes** son: precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo. Estos componentes se agrupan en subsistemas del sistema “ciclo

hidrológico”, lo que permite analizarlos por separado y luego obtener resultados a partir de las interacciones entre los mismos.

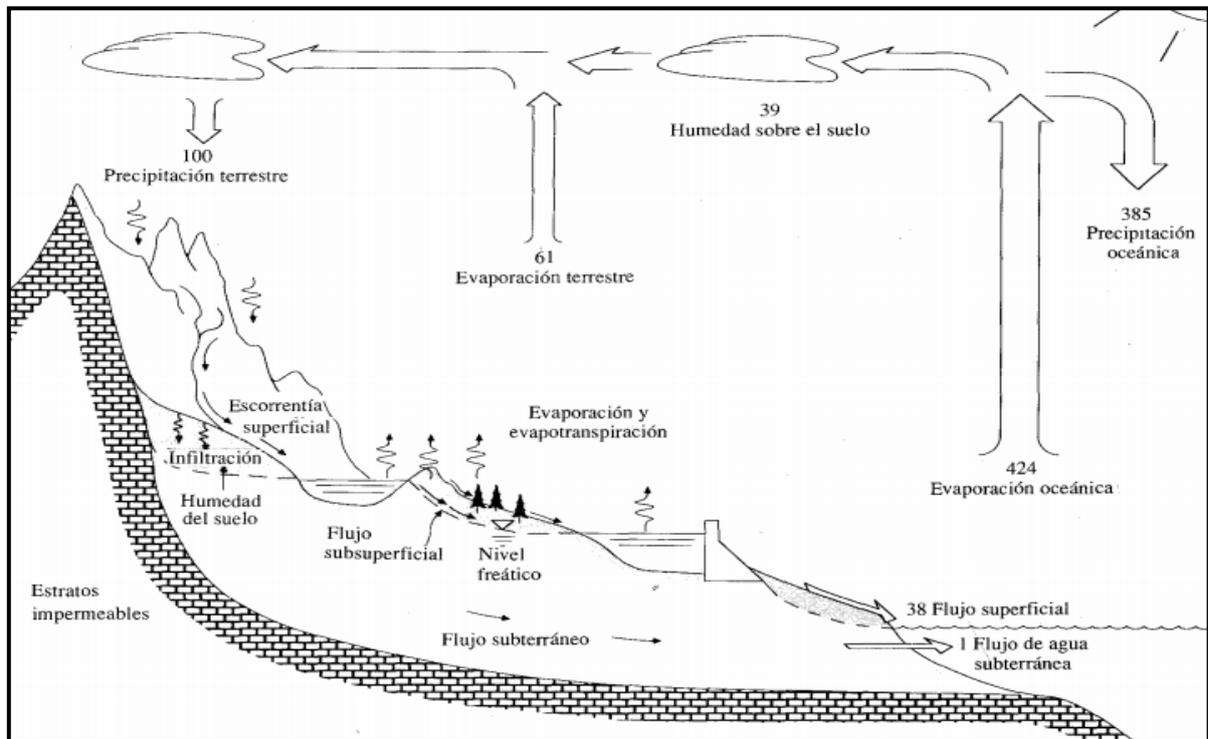


Figura 2.1. Esquema del ciclo hidrológico. (Chow, Maidment, Mays, 1994)

### 2.3. La cuenca hidrológica.

Así como el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología, la cuenca hidrológica es su unidad básica de estudio. El objetivo de esta sección es estudiar este concepto, y algunos parámetros morfométricos que permitan tener una idea de su comportamiento hidrológico.

#### 2.3.1. Definición de cuenca.

La cuenca hidrológica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que el caudal efluente es descargado a través de una salida simple.

### 2.4. Parámetros morfométricos.

El ciclo hidrológico visto al nivel de una cuenca se puede esquematizar como un estímulo constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren dentro de la cuenca varios fenómenos que modifican esta última. Estos fenómenos en gran parte están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca. Los parámetros morfométricos intentan reflejar dichas características y sus influencias en la respuesta ante las precipitaciones. (Gámez Morales, 2009)

#### 2.4.1. Parámetros morfométricos principales.

Los parámetros morfométricos principales constituyen información básica de la cuenca, ellos

son: Superficie (S), Perímetro (P), Altura Máxima (H<sub>máx.</sub>), Altura Mínima (H<sub>mín.</sub>) y Desnivel (ΔH). Estos conforman una base de datos para calcular los parámetros posteriores que dependen de ellos. A continuación se realiza un análisis breve de los mismos:

### 1. Área de la cuenca (A o S):

Es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica; generalmente se reporta en kilómetros cuadrados o bien en hectáreas cuando las cuencas son pequeñas. Sin embargo, otros autores, entre ellos los I-Pai Wu y R. Springall, han elevado el límite superior de una cuenca pequeña a los 250 km<sup>2</sup>. Con fines prácticos se propone la clasificación de las cuencas indicada en la **Tabla 2.1**, en base a su magnitud. (Campos Aranda, 1998)

Tamaño de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Pequeña-Intermedia
500 a 2500	Intermedia - Grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy Grande

Tabla 2.1.-Clasificación según el tamaño de la cuenca. (Campos Aranda, 1998)

### 2. Perímetro de la cuenca de drenaje (P):

Es la longitud total de la divisorias de aguas, desde el inicio del punto de estudio hasta finalizar el mismo, se mide en kilómetro u otra unidad de longitud.

### 3. Densidad (ΔH):

Es el valor de la diferencia entre la cota más alta y más baja de la cuenca. Se relaciona con la variabilidad climática y ecológica, una cuenca con mayor cantidad de pisos altitudinales puede albergar más ecosistemas al presentarse variaciones importantes en su precipitación y temperatura.

#### 2.4.2. Parámetros físicos de forma.

Los parámetros morfométricos principales permiten efectuar relaciones área-longitud y área-perímetro, obteniéndose así los denominados parámetros físicos de forma de la cuenca. La forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de una corriente, particularmente en los eventos de avenidas máximas y está relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca.

#### 1. Factor de forma adimensional de Horton (R<sub>f</sub>):

(Horton, 1932) sugirió un factor adimensional de forma “R<sub>f</sub>”, dicha variable intenta evaluar la elongación de una cuenca de drenaje:

$$R_f = \frac{A}{L_b^2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde A el área de la cuenca y Lb la longitud de la misma, medida desde la salida hasta el límite de la hoya, cerca de la cabecera del cauce más largo siguiendo una línea recta.

La **Ecuación 2.1** no implica una suposición especial de la forma de la cuenca. Para un círculo  $R_f = \pi/4 = 0,79$ ; para un cuadrado con la salida central  $R_f = 1$ , para el cuadrado con la salida en una esquina  $R_f = 0,5$  y si es rectangular  $>1$  (Linsley, Kohler, Paulus, 1977). Un valor de  $R_f$  superior a la unidad indica un grado de achatamiento del área o un curso principal corto, y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando grandes crecidas. Una cuenca estrecha y larga, con  $R_f$  bajo, presenta menor posibilidad de ocurrencia de lluvias intensas, cubriendo simultáneamente toda su extensión y por consiguiente, menor posibilidad de que se generen grandes crecidas. De acuerdo con la magnitud del factor de forma, las cuencas se clasifican en tres grupos: baja, media y alta susceptibilidad a las inundaciones con factor de forma bajo, medio y alto respectivamente. (Rapacioli R., 2007)

## 2. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Cg):

Coeficiente adimensional definido como la relación entre el perímetro de la cuenca, y la circunferencia del círculo que contenga la misma superficie que la misma.

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Siendo P el perímetro de la cuenca, y S su superficie.

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando entonces que la cuenca es circular; conforme su valor crece indicará una mayor distorsión de su forma, es decir, se vuelve alargada o asimétrica. La **Tabla 2.2** establece la forma de la cuenca según el valor de Cg que posea la misma.

Cg	Forma de la Cuenca
1.00 - 1.25	Casi redonda a oval redonda (compacta)
1.25 - 1.50	Oval oblonga.
1.50 - 1.75	Rectangular oblonga
1.50 - 3.00	Casi rectangular (alargada)

Tabla 2.2.- Valores interpretativos del coeficiente de Compacidad. (Mármol, 2008)

El factor de forma de Horton y el coeficiente de Gravelius son congruentes, es decir, si el coeficiente de Horton establece que la cuenca es alargada, entonces el coeficiente de Gravelius no puede tomar un valor cercano a 1.

### 2.4.3. Parámetros físicos de relieve.

La topografía o relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma. Numerosos parámetros para describir el relieve de la hoya han sido desarrollados,

algunos de los más destacados son los siguientes:

### 1. Curva hipsométrica o hipsográfica:

Es frecuente definir el relieve de una cuenca por medio de su llamada curva de área-elevación (o curva hipsométrica), representa en una gráfica el área acumulada por encima de cierta elevación, en función de dicha elevación. Con propósitos de comparación entre varias cuencas, es conveniente utilizar el porcentaje del área total ( $a/A$ ) en lugar de su magnitud y la altura relativa ( $h/H$ ), como se ilustra en la **Figura 2.2**. Al valor de cota mayor encontrada corresponde el cero por ciento del porcentaje del área acumulada, y al valor de cota mínima corresponde el ciento por ciento del porcentaje de área acumulada.

La curva superior (curva 1) de la **Figura 2.2**, es la curva que posee mayor cantidad de área relativa a mayor altura con respecto a la curva 2 y 3, por consiguiente es la tiene mayor potencial erosivo. La curva intermedia (curva 2) es característica de una cuenca en equilibrio, y la curva inferior (curva 3) es típica de una cuenca sedimentaria.

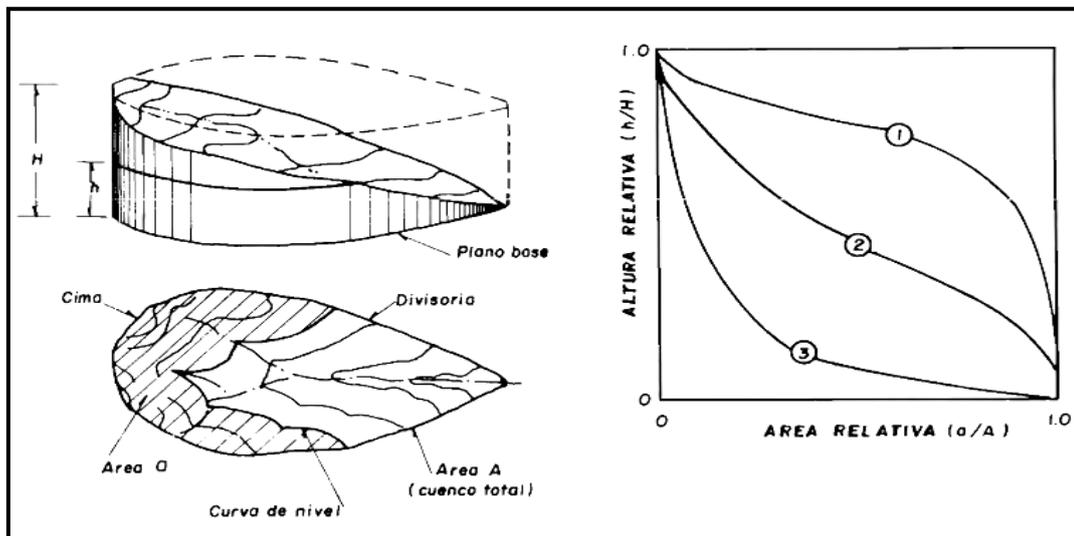


Figura 2.2.- Curvas hipsométricas guías. (Campos Aranda, 1998)

Por otro lado el área bajo la curva hipsométrica constituye la **Integral Hipsométrica (IH)**, que se utiliza como un indicador del “ciclo de erosión “. El ciclo de erosión puede dividirse en tres etapas: **vieja** ( $IH < 0.35$ ), en el cual la cuenca está completamente estabilizada, etapa de **madurez** o equilibrio ( $IH$  entre 0.35 a 0.6) y etapa **juventud** o desequilibrio ( $IH > 0.6$ ), donde la cuenca es altamente susceptible a la erosión. (Strahler, 1952)

### 2. Altura Media (Hm):

Se calcula como el cociente entre el volumen de la cuenca (superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie.

$$H_m = \frac{V}{S}; \quad V = \sum h_i S_i \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Siendo:

$H_m$ : altura media (m);

$V$ : volumen de relieve que da la superficie del gráfico ( $m^3$ );

$S$ : superficie de la cuenca ( $m^2$ );

$h_i$ : altitud media de cada área parcial comprendida entre dos curvas de nivel (m); y

$S_i$ : área parcial entre curvas de nivel ( $m^2$ ).

### 3. Pendiente media de la cuenca (Im):

Parámetro muy importante en el estudio de toda cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene importancia directa en la relación con la magnitud de las crecidas.

Existen diversos criterios para evaluar la pendiente de una cuenca, entre los que se pueden citar: el criterio de Alvord, criterio de Horton, criterio de Nash y el criterio del rectángulo equivalente. Nos centraremos en el primero ya que es el que se utilizó en la presente tesis. Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante.

$$Im = \frac{D}{A} \cdot \left( \frac{l_0}{2} + \sum_1^{n-1} l_i + \frac{l_n}{2} \right) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Siendo:

$D$ : diferencia de alturas entre curvas de nivel (m);

$l_0$ : longitud de la curva de nivel de menor cota (m);

$\sum l_i$ : suma de las longitudes de las curvas de nivel intermedias (m);

$l_n$ : longitud de la curva de nivel de mayor cota (m), y

$A$ : área de la cuenca ( $m^2$ ).

Conforme aumenta la pendiente media de las cuencas, crece la velocidad media del escurrimiento y disminuye la infiltración, creciendo con toda seguridad las magnitudes de las avenidas y la erosión; en condiciones homogénea de suelos, aumentará la turbidez del agua y la concentración de sedimentos. (Campos Aranda, 1998)

### 4. Coeficiente de masividad (CM):

Se representa por “tan  $\alpha$ ” y fue establecido por Martonne, su expresión es la siguiente:

$$CM = \tan \alpha = \frac{H_m}{A} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

donde CM es el coeficiente de masividad ( $m^{-1}$ ),  $H_m$  es la altura media de la cuenca (m), y A es la superficie de la cuenca ( $m^2$ ).

El coeficiente de masividad toma valores muy grandes para cuencas pequeñas que presentan grandes desniveles, y por el contrario, toma valores muy pequeños para grandes cuencas de relieve poco acentuado. Además  $CM$  puede ser el mismo para cuencas con procesos erosivos muy diferenciados, ello ocurre siempre que se consideren cuencas con superficies y alturas medias que ambas aumenten en la misma proporción. Por ejemplo, si  $A$  es la superficie de una cuenca y  $H_m$  su altura media entonces  $CM = H_m/A$ , pero este mismo valor se obtendría para toda la serie de relaciones de la forma  $(m \cdot H_m)/(m \cdot A)$  como muestra la **Figura 2.3**. Cabe destacar de que el hecho que  $CM$  posea dimensión, invita al empleo de coeficientes adimensionales que permitan efectuar comparaciones.

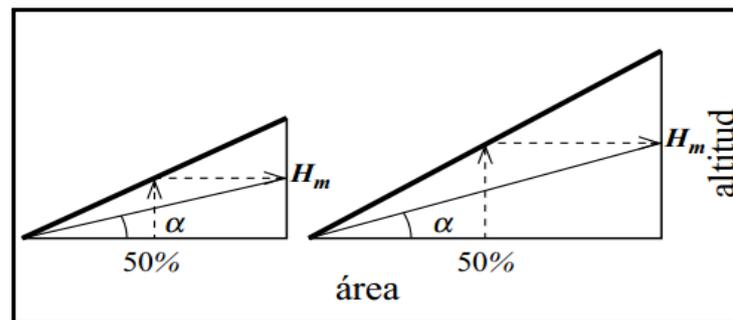


Figura 2.3.-Curvas hipsométricas esquemáticas de dos cuencas, cuyas superficies y cotas extremas son proporcionales. Ambas cuencas poseen igual  $C_m$ , pero distintas  $H_m$  (Vich, 1999)

### 5. Coeficiente orográfico o de Fournier (CO):

Este parámetro *adimensional* representa la relación entre el cuadrado de la altura media del relieve  $H_m$  y la superficie proyectada sobre un plano horizontal  $A$ . Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca; crece mientras que la altura media de relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón toma valores grandes para cuencas pequeñas y montañosas, disminuyendo en cuencas extensas y de baja pendiente.

$$CO = H_m \cdot C_m = H_m \cdot \tan \alpha = \frac{H_m^2}{A} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Este coeficiente caracteriza eficazmente el relieve de dos cuencas distintas. Fournier sostiene que si este parámetro es mayor que  $6.0 \cdot 10^{-3}$  el relieve es acentuado, y si es menor que  $6.0 \cdot 10^{-3}$  es poco acentuado. (Vich, 1999). Es conveniente multiplicar el valor adimensional del  $CO$  por 1000, con el fin de poder comparar con 6 para establecer el tipo de relieve.

#### 2.4.4. Parámetros relativos a la red hidrográfica.

La red de drenaje de una cuenca se refiere a las trayectorias o al arreglo que guardan entre sí los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Es otra característica importante en su estudio debido a que manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante; es decir, la rapidez con que desaloja la cantidad de agua que recibe. La forma de drenaje proporciona también indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca. A continuación se presentan parámetros que caracterizan la red de drenaje:

### 1. Densidad de drenaje (Dd):

La longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida por el área total de drenaje, define la densidad de drenaje o longitud de canales por unidad de área.

$$D_d = \frac{\sum l_i}{A} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

$D_d$ : Densidad de drenaje (km/km<sup>2</sup>);

$\sum l_i$ : Suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km), y

$A$ : Área total de la cuenca (km<sup>2</sup>).

La densidad de drenaje,  $D_d$ , usualmente toma valores entre 0.5 km/km<sup>2</sup> para cuencas con drenaje pobre, hasta 3.5 km/km<sup>2</sup> para cuencas excepcionalmente bien drenadas. (Fattorelli S., Fernández P., 2011)

### 2. Pendiente media del cauce principal (Jc):

Se calcula mediante la expresión de Taylor y Schwarz (1952), los cuales proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de viaje que el colector principal de la cuenca.

$$J_c = \left[ \frac{L_c}{\sum_{l=1}^m \left( \frac{L_{ci}}{\sqrt{J_{ci}}} \right)} \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

$J_c$ : pendiente media del cauce principal (m/m);

$L_c$ : longitud total del cauce principal (m);

$m$ : número de tramos a lo largo del cauce principal;

$L_{c1}; L_{c2}; \dots; L_{cm}$ : longitud de cada tramo del cauce principal (m), y

$J_{c1}; J_{c2}; \dots; J_{cm}$ : pendiente de cada tramo del cauce principal (m/m).

La pendiente del cauce principal tienen influencia notoria en la características de las avenidas, como son el tiempo promedio de pico y la duración promedio total de los hidrogramas respectivos. Asimismo a mayor pendiente mayor capacidad de erosión y transporte. (Campos Aranda, 1998)

### 3. Tiempo de concentración (Tc):

Es el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Se utiliza la ecuación de empírica de Témez (1987):

$$T_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L_c}{J_c^{0,25}} \right)^{0,76} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

$T_c$ : tiempo de concentración (hrs);

$L_c$ : longitud del cauce principal de la cuenca (km), y

$J_c$ : Pendiente media del cauce principal (m/m).

## 2.5. Precipitación.

La precipitación es uno de los componentes del ciclo hidrológico. Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer su definición, su clasificación y los tipos de instrumentos para su medición; también el análisis de una tormenta y la determinación de una tormenta de diseño.

### 2.5.1. Definición.

La precipitación, es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de: lluvias, granizadas, garúas y nevadas.

#### 2.5.1. Clasificación de la precipitación.

La formación de la precipitación, requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera, de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Atendiendo al factor que provoca la elevación del aire en la atmósfera, la precipitación se clasifica en orográfica, ciclónica y convectiva.

##### 1. Precipitación orográfica.

Se produce cuando el vapor de agua que se forma sobre la superficie del mar es empujada por el viento hacia las montañas, aquí las nubes siguen la ladera de la montaña y ascienden. En este ascenso el vapor de agua se condensa produciéndose precipitaciones en la ladera de barlovento, luego el aire baja sin humedad generando que la ladera de sotavento sea un lugar seco.

##### 2. Precipitación ciclónica o frontal.

Se produce cuando hay un encuentro de dos masas de aire con diferente temperatura y humedad, las nubes más calientes son violentamente impulsadas a las partes más altas donde produce condensación y precipitación.

##### 3. Precipitación convectiva.

Cuando una masa de aire próxima a la superficie del terreno aumenta su temperatura la densidad disminuye, la masa de aire trata de ascender y de ser reemplazada por otra de aire más densa. Este proceso es bastante lento si las masas de aire están en calma y no hay turbulencia. En cambio, en regiones tropicales donde estas precipitaciones son muy típicas, el calentamiento desigual de la superficie terrestre provoca el surgimiento de estratos de aire con densidades diferentes, y genera una estratificación térmica de la atmósfera en equilibrio inestable. Si ese equilibrio es roto por cualquier motivo, provoca una ascensión brusca y violenta del aire menos denso, formando nubes de desarrollo vertical (cúmulos y cumulonimbos). Esta precipitación es de gran intensidad y corta duración, y se concentran en pequeñas áreas. (Monsalve Sáenz, 1999)

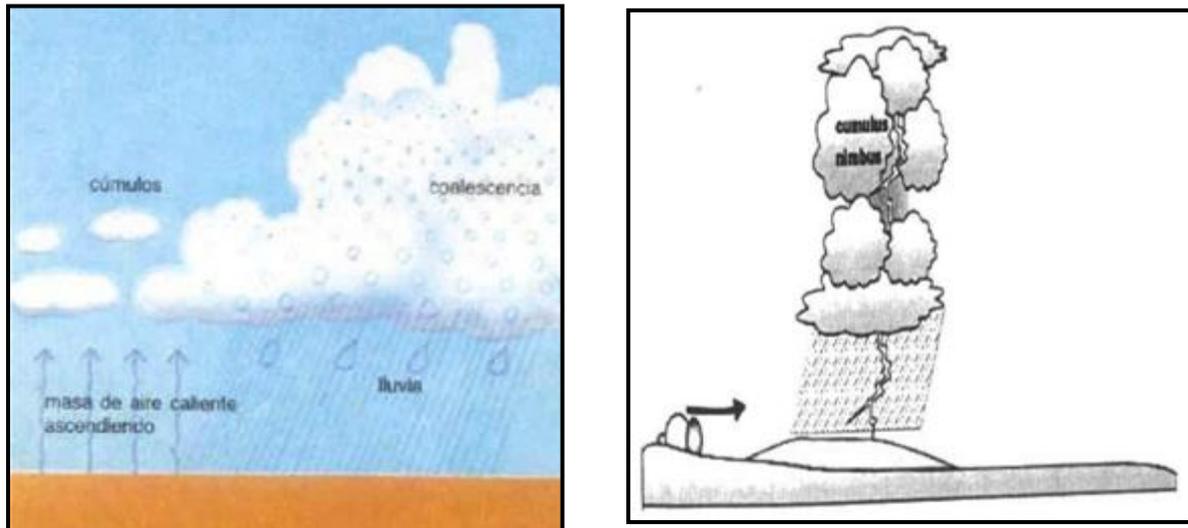


Figura 2.4.- Precipitación por Convección. (Villón Béjar, 2002)

### 2.5.2. Instrumentos de medición.

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua, es la altura del agua que se acumularía en un superficie horizontal, si la precipitación no se filtrara o escurriera.

Existen dos tipos de instrumentos que registran la cantidad e intensidad de la lluvia, el pluviógrafo y el pluviómetro. El pluviógrafo, es un aparato que registra automáticamente la profundidad de lluvia en intervalos tan pequeños como un minuto de duración; es por ello que se puede obtener la intensidad que ella adquiere en el transcurso de la precipitación. En cambio, el pluviómetro a diferencia del pluviógrafo registra la cantidad de lluvia caída sin brindar información acerca de la intensidad; se emplea generalmente para la medición de la altura de precipitación diaria, que es la suma de las lecturas observadas en un día.

### 2.5.3. Tormenta.

#### 2.5.3.1. Definición.

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de característica bien definidas. De acuerdo a esta definición, una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días, y puede abarcar extensiones de terrenos muy variable, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones.

#### 2.5.3.2. Elementos fundamentales del análisis de las tormentas.

Durante el análisis de las tormentas hay que considerar:

- **La intensidad**, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta es la intensidad máxima que haya presentado, ella es la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. De acuerdo a esto la intensidad se expresa así:

$$i_{m\acute{a}x} = \frac{P}{t} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

donde  $i_{m\acute{a}x}$  es la intensidad máxima que se mide en mm/hs,  $P$  es la precipitación en altura de agua se mide en mm, y  $t$  es el tiempo en horas.

- **La duración**, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta.
- **La frecuencia**, es el número de veces que se repite una tormenta de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.
- **Período de retorno**, es el intervalo de tiempo promedio dentro del cual un evento de magnitud  $x$ , puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Representa el inverso de la frecuencia, es decir:

$$TR = \frac{1}{f} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

#### 2.5.4. Análisis de frecuencia de las tormentas.

Los sistemas hidrológicos son afectados algunas veces por eventos extremos, tales como: tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su *frecuencia de ocurrencia*, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. (Chow, Maidment, Mays, 1994)

##### 2.5.4.1. Series de información hidrológica.

Una serie de información hidrológica es un conjunto de magnitudes de eventos de la misma índole, las cuales se miden y almacenan con el fin de efectuarle un posterior análisis estadístico. En general, se disponen de series de tiempo porque los instrumentos de medición sólo miden la precipitación en un punto específico.

Las series más utilizadas son:

- **Serie de duración completa**, está compuesta por toda la información disponible de un determinado parámetro.
- **Serie de duración parcial**, es una serie de datos seleccionados de tal manera que su magnitud es mayor que un valor base predefinido.
- **Serie de valor extremo**, incluye el valor máximo o mínimo que ocurre en cada uno de los intervalos de tiempo de igual longitud del registro. La longitud del intervalo de tiempo usualmente se toma como un año, y una serie seleccionada de esta manera se conoce como serie anual. Si se utilizan los valores máximos anuales es una **serie anual máxima**, y la selección de los valores mínimos anuales produce una **serie anual mínima**.

#### 2.5.4.2. Posición de graficación.

Es el valor de la probabilidad que se le asigna a cada uno de los datos de una serie que va a graficarse y su valor se encuentra en función de la posición del dato en la lista. En el caso de tener una serie anual máxima, los datos se reordenan de mayor a menor y se le asigna la mayor probabilidad de ocurrencia al menor valor, y la menor probabilidad al valor máximo.

Se han propuesto numerosos métodos para la determinación de las posiciones de graficación, la mayoría empíricos. Hazen propuso en 1930 la **Ecuación 2.12**, que especifica la probabilidad de que la precipitación diaria supere un determinado valor:

$$P(X \geq x_m) = \frac{2m - 1}{2n} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

$X$ : variable aleatoria, corresponde a la precipitación diaria registrada “Pd” (mm);

$x_m$ : valor específico de precipitación diaria “Pd” (mm),

$m$ : índice de orden de la precipitación, y

$n$ : número total de precipitaciones diarias registradas.

Una vez que la serie de datos ha sido identificada, ordenada y las posiciones de graficación calculadas, puede elaborarse una gráfica de dispersión de probabilidad ( $P(X \geq x)$ ,  $P(X < x)$  o  $T$ ) vs. magnitud y luego ajustar la dispersión con una función de distribución de probabilidad. Con ello se logra que una gran cantidad de información probabilística se resuma en forma compacta mediante dicha función.

#### 2.5.4.3. Distribución GEV.

El estudio de eventos hidrológicos extremos incluye la selección de una secuencia de observaciones máximas o mínimas de un conjunto de datos. Debido a que estas observaciones se localizan en la cola extrema de la distribución de probabilidad de todas las observaciones de la cual se extraen (la población matriz), no es sorprendente que su distribución de probabilidad sea diferente a aquella de la población matriz.

La función de distribución de probabilidad GEV (*General Extreme Values - General de Valores Extremos*) es una de las más utilizadas para el análisis de eventos extremos, ya que se ajusta para cualquier nivel de significancia  $\alpha$ . Fue introducida por Jenkinson en 1955, y posee la siguiente expresión:

$$F(z) = \exp \left\{ - \left[ 1 + k \left( \frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{k}} \right\} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

donde  $z = P_{d\text{máx}}$ , que es la precipitación diaria máxima en mm. El modelo tiene tres parámetros:  $\mu$ , es el valor medio de la precipitación en mm;  $\sigma$ , es el desvío estándar de precipitación en mm; y  $\kappa$ , que es el

parámetro de forma.

## 2.5.5. Tormenta de Diseño.

### 2.5.5.1. Precipitación diaria máxima.

La función GEV expresada en la **Ecuación 2.13**, es una distribución de probabilidad fácilmente invertible. Es decir, dado un valor para TR o  $F(P_{d_{máx}}) = TR / (TR - 1)$ , el correspondiente valor de  $P_{d_{máx}}$  puede determinarse. La inversa de la función GEV, **Ecuación 2.14**, nos permite por interpolación y extrapolación obtener  $P_{d_{máx}}$  para distintos TR..

$$P_{d_{máx}} = \mu + \frac{\sigma}{k} * \left\{ \left[ \frac{-1}{\ln \left( 1 - \frac{1}{TR} \right)} \right]^k - 1 \right\} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Siendo:

$TR$ : tiempo de recurrencia (años);

$k$ : parámetro de forma;

$\mu$ : valor medio de precipitación diaria (mm), y

$\sigma$ : desviación estándar de precipitación diaria (mm).

### 2.5.5.2. Intensidad media máxima de la lluvia de 24 horas .

Antes de determinar la Intensidad Media Máxima ( $\bar{I}_{24}$ ), se deben ajustar las Precipitaciones Diarias Máximas ( $P_{d_{máx}}$ ) a Precipitaciones Máximas en 24 horas ( $P_{24}$ ) para distintas recurrencias. Esta transformación se lleva a cabo debido a que la duración de la precipitación diaria es aleatoria y puede suceder en cualquier intervalo de tiempo, por ello se uniformizará a una precipitación de 24 horas de duración con la **Ecuación 2.15**.

$$P_{24} = k \cdot P_{d_{máx}} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

siendo  $k$  un factor de conversión. En la siguiente tabla se dan los valores de este parámetro para distintos TR:

TR (años)	2	5	10	25	50	100	500	1000
Relación $P_{24}/P_{d_{máx}}$	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,15

Tabla 2.3.- Coeficiente de ajuste  $k$ . (Rapacioli y D'Amico, Julio 2013)

Luego las Intensidades Medias Máximas asociadas a cada  $P_{24}$ , se encuentran dadas por la siguiente relación:

$$I_{24} = \frac{P_{24}}{24} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

### 2.5.5.3. Método de la intensidad contigua.

La finalidad del Método de Intensidad Contigua (MIC) es analizar la variación de la Intensidad Media Máxima en un registro de precipitación, permitiendo clasificar la regularidad o irregularidad de la precipitación respecto al tiempo. El método establece que la intensidad media se atenúa en función del tiempo promedio; por lo tanto, el cociente entre dos intensidades medias máximas,  $I_1/I_2$ , será igual al cociente entre las duraciones cambiadas,  $D_2/D_1$ , pero elevado a un número n. Donde n varía entre 0 y 1.

$$\bar{I}_1 / \bar{I}_2 = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^n \quad \text{Ecuación 2.17}$$

La representación gráfica de la **Ecuación 2.17** se conoce como Curva de Intensidad Media Máxima (IMM). La misma se interpreta mediante el número n, que se muestra en la siguiente tabla.

n	Tipo de curva	Distribución temporal de la Precipitación	Intensidad	Tipo de precipitación
0.00 - 0.20	Muy Suave	Muy regular	Prácticamente constante	Muy predom, Adventiva
0.20 - 0.40	Suave	Regular	Débilmente variable	Predom. Adventiva.
0.40 - 0.60	Normal	Irregular	Variable	Efectiva
0.60 - 0.80	Dura	Muy irregular	Moderadamente variable	Predom. Convectiva
0.80 - 1.00	Muy Dura	Casi instantáneo	Fuertemente variable	Muy predom. Convectiva

Tabla 2.4.- Clasificación de la precipitación según la regularidad de la intensidad. (Moncho Agud, 2008)

Una vez definidos el coeficiente n y los valores de  $I_{24}$ , haciendo uso de la **Ecuación 2.18**, se procede al cálculo de las intensidades de precipitación para distintas duraciones (D) y distintos tiempos de recurrencia (TR). Obteniendo las **curvas IDF** de la zona.

$$I_D = I_{24} \left( \frac{24}{D} \right)^n \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Donde:

$I_D$ : Intensidad de precipitación para una duración D, (mm/hs) y

$I_{24}$ : Intensidad de precipitación para una duración de 24 hs, (mm/hs).

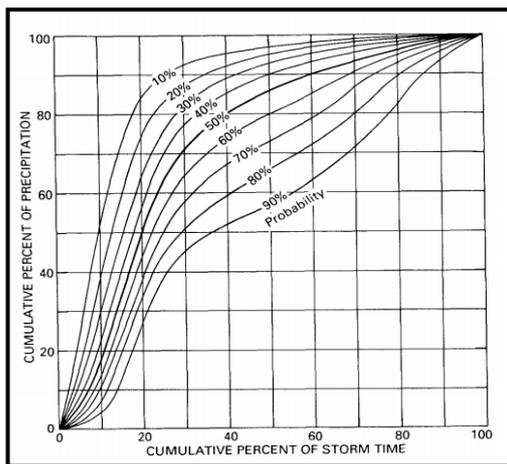
### 2.5.5.4. Hietograma de Huff.

Huff en 1967 investigó la distribución en el tiempo de 261 tormentas fuertes, ubicadas en un área de 400 mi<sup>2</sup> (≈1036 km<sup>2</sup>) en el estado de Illinois, Estados Unidos. Clasificó las tormentas en cuatro grupos, dependiendo del intervalo de tiempo en que se presentó la mayor precipitación, ya sea en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total de la tormenta. Para cada grupo, derivó una familia de curvas que proporcionan una medida cuantitativa de la variabilidad entre tormentas que se espera que ocurra dentro de ese grupo. La variabilidad entre tormentas se expresó en términos de probabilidad. Se muestran niveles de probabilidad del 10% al 90%, pero el nivel del 50% (mediana) se indica resaltada ya que es la estadística más útil.

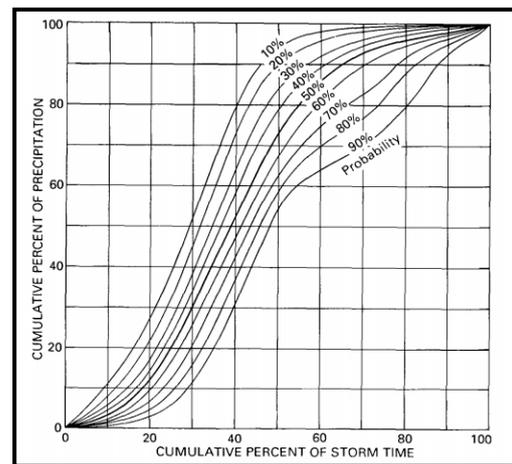
La interpretación de las curvas se puede ilustrar haciendo referencia a las distribuciones de tormentas del primer cuartil en la **Figura 2.5-a**.

La curva del 10% es típica de las tormentas en las que la precipitación se concentra en una porción inusualmente corta de una tormenta. Indica que, en promedio, una de cada diez tormentas del primer cuartil tendrá por lo menos el 89% de su precipitación en el primer cuarto del período de tormenta y más del 95% de esta ocurrirá en la primera mitad de la tormenta.

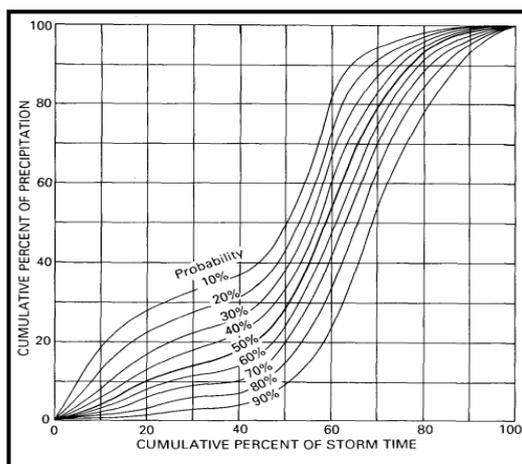
- La curva del 50% muestra que el 63% y 86% de la precipitación cae en el 25% y 50% del período de tormenta, respectivamente.
- La curva del 90% refleja una distribución inusualmente uniforme para las tormentas del primer cuartil, la misma ocurre en el 10% o menos de las tormentas. Por lo tanto, esta curva muestra que en el 10% de las tormentas, el 39% o menos de la lluvia ocurrirá en el primer cuarto de la tormenta y el 57% en la primera mitad de la tormenta.



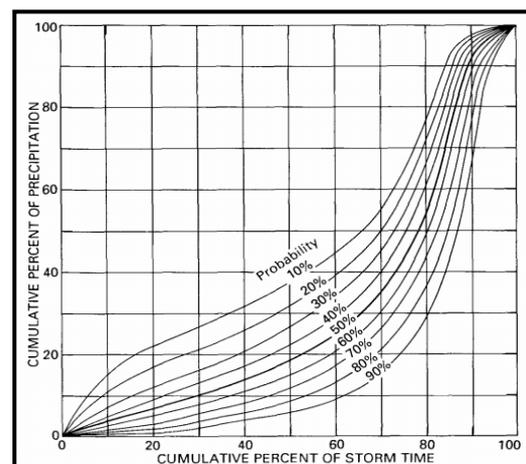
a - Grupo I.



b - Grupo II.



c - Grupo III.



d - Grupo IV.

Figura 2.5.- Porcentaje de lluvias acumuladas en el tiempo para los distintos grupos. (Huff, 1967)

### 2.5.5.5. Hietograma acumulado porcentual y discreto.

En el presente estudio las tormentas de diseño se definirán mediante Hietogramas Acumulados Porcentuales para distintos tiempos de recurrencia, estos brindan la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta de determinada duración. La confección de las tormentas de proyecto se llevará a cabo con la metodología de Huff, haciendo uso de las intensidades de precipitación ( $I_D$ ) obtenidas previamente.

Al usar la metodología de Huff, se debe tener en consideración que las tormentas con una duración de 6 horas o menos tienden a asociarse más a menudo con distribuciones del primer cuartil, y aquellas que duran de 6.1 a 12 horas fueron más comúnmente del tipo de segundo cuartil. Las tormentas de lluvia con una duración de 12,1 a 24 horas ocurrieron con mayor frecuencia con el tipo de distribución del tercer cuartil, y aquellas con una duración superior a 24 horas se asociaron con mayor frecuencia a la distribución del cuarto cuartil.

Las duraciones de tormenta a utilizar en principio surgen de analizar los tiempos de concentración “ $T_c$ ” de la cuencas. Una vez definidas, se las subdivide en intervalos de 5 minutos y luego para cada tiempo “ $t$ ” se obtiene la precipitación  $P_t$  con la **Ecuación 2.19**. El factor  $P_t/P_T$  se obtiene del diagrama de Huff, y la precipitación total  $P_T$  se obtiene como el producto entre la duración de la tormenta de proyecto  $D$  y la intensidad  $I_D$  para dicha duración (extraídas de las curvas IDF para cada TR).

$$P_t = \frac{P_t}{P_T} * P_T \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde:

$P_t$ : precipitación para cada tiempo “ $t$ ” (mm);

$P_t/P_T$ : Factor adimensional dado por Huff para cada tiempo “ $t$ ”;

$P_T = I_D .D$ : precipitación total para cada tiempo de recurrencia TR (mm);

$D$ : Duración de tormenta (h), e

$I_D$ : Intensidad de precipitación para una duración de tormenta  $D$  (mm/h)

Luego mediante la **Ecuación 2.20** se determinan los hietogramas discretos, los mismos obtienen las Tormentas de Proyecto mediante hietogramas, los mismos constituyen uno de los componentes de entrada al sistema para la modelación hidrológica.

$$\Delta P_t = P_t - P_{t-1} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

## 2.6. Infiltración.

El análisis de este componente del ciclo hidrológico es de vital importancia para la comprensión y cuantificación de la relación lluvia-escorrentía. Es decir, las cuencas de baja infiltración presentarán un régimen de escorrentía caracterizado por fuertes avenidas y gastos bajos o nulos en estiaje; en cambio,

en cuencas muy permeables y donde no hay estratos impermeables arriba del nivel freático, el escurrimiento será muy uniforme durante el año. Por consiguiente, en ésta sección se brindarán definiciones básicas de infiltración, los factores que influyen en la misma, formas de medirla y de representarla matemáticamente.

### 2.6.1. Definiciones.

#### 1. Infiltración.

Proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie y queda retenida en él, o alcanza un manto acuífero incrementando su volumen. Presenta un valor inicial alto, el cual disminuye durante las lluvias continuas, hacia una magnitud reducida y prácticamente constante, como se indica en la **Figura 2.6** siguiente.

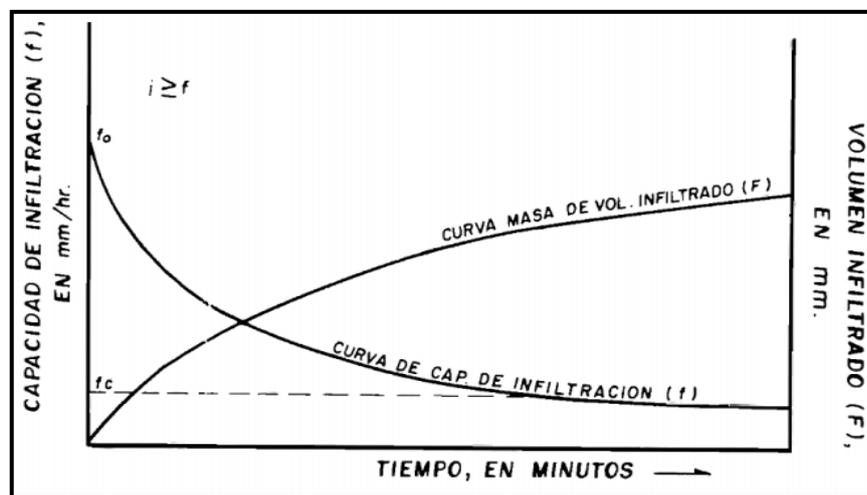


Figura 2.6.- Curva de Capacidad de infiltración (f). (Campos Aranda, 1998)

#### 2. Capacidad de infiltración o tasa de infiltración (f).

Velocidad máxima por unidad de superficie y en ciertas condiciones, a la que el agua puede ser absorbida por el suelo. Durante las tormentas solamente se alcanza la capacidad de infiltración si ocurre escurrimiento superficial (lluvia en exceso) y está gobernada por el suelo y otras propiedades asociadas; en cambio, antes o después de la lluvia en exceso, la capacidad de infiltración está determinada por la intensidad de lluvia y se denomina: **velocidad de infiltración**.

#### 3. Volumen infiltrado (F).

Es el área bajo la curva de capacidad de infiltración para cualquier intervalo. Representa el tirante o lámina de agua infiltrada durante dicho lapso.

#### 4. Percolación.

Agua que se filtra por debajo de la zona de raíces, y que eventualmente alcanzará la capa freática.

### 2.6.2. Factores que intervienen en la capacidad de infiltración.

La forma precisa en que se realiza el proceso de infiltración depende de un gran número de

factores, entre los que se destacan: textura del suelo, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de saturación, cobertura vegetal, uso del suelo, aire atrapado, lavado de material fino, compactación y temperatura, sus cambios y diferencias.

### 2.6.3. Medición de la capacidad de infiltración.

La descripción de los factores que afectan a la infiltración han puesto de manifiesto su carácter local; por ello los métodos para medir la capacidad de infiltración tienen un valor relativo. En la actualidad existen cuatro métodos generales para la determinación de la capacidad de infiltración: uso de infiltrómetros, análisis de hidrogramas naturales en parcelas o cuencas pequeñas, análisis de tormentas en cuencas grandes, y ensayos en lisímetros. En nuestro estudio nos concentraremos en los primeros.

Los infiltrómetros permiten determinar la capacidad de infiltración para pequeñas áreas cerradas, aplicando artificialmente el agua al terreno. La construcción de la curva de capacidad de infiltración se realiza llevando a las ordenadas los valores calculados de la velocidad de infiltración (mm/hs), y en el eje de las abscisas los tiempos acumulados (hs o min.). Resulta así una curva (f) del tipo presentado en la **Figura 2.6.**

### 2.6.4. Ecuación de la curva de capacidad de infiltración.

Los intentos empíricos para ajustar o representar los datos experimentales, han dado por resultado la propuesta de muchas ecuaciones algebraicas de la infiltración, como por ejemplo, las de A.N. Kostiakov, R.E. Horton, W.H. Green-G.A. Ampt, D. Kirkham-C.L. Feng, J.R. Philip y H.N. Holtan. A continuación se desarrollará la de Horton.

Horton en 1940, encontró que las curvas de capacidad de infiltración pueden ser representados mediante la **Ecuación 2.21**, cuando  $i > f$ :

$$f = f_c + (f_o - f_c) * e^{-k*t} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Siendo:

- $f$ : capacidad de infiltración en el tiempo (mm/hrs);
- $f_c$ : capacidad de infiltración final (mm/hrs);
- $f_o$ : capacidad de infiltración inicial cuando  $t=0$  (mm/hrs);
- $k$ : constante empírica (1/min.), y
- $t$ : tiempo de duración de la lluvia (min).

El volumen infiltrado (F), en milímetros correspondiente a cualquier tiempo t, es igual a:

$$F = \int_0^t \frac{f}{60} * dt = \frac{f_c * t}{60} + \frac{(f_o - f_c)}{60 * k} * (1 - e^{-k*t}) \quad \text{Ecuación 2.22}$$

## 2.7. Escurrimiento.

El objetivo de esta sección abarca el estudio general de la componente más importante del ciclo hidrológico, el escurrimiento. Su estudio comprenderá una descripción de sus fuentes, y tipos de escurrimientos que estas originan. Dentro de los tipos de escurrimientos se hará hincapié en el superficial, ya que la mayoría de los estudios hidrológicos están ligados al aprovechamiento del agua superficial y a la protección contra los fenómenos provocados por su movimiento. Finalmente se establece el proceso del Método de Número de Curva, para obtener el valor de CN de una cuenca e implícitamente su precipitación en exceso.

### 2.7.1. Definición.

El escurrimiento es el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (estación de aforo).

### 2.7.2. Fuentes y tipos de escurrimientos.

Si se analiza un corte esquemático de la superficie terrestre, se tiene que la precipitación cuando llega a la superficie, se comporta de la siguiente manera:

1. Una parte de la precipitación se infiltra.
  - Un parte de ésta, satisface la humedad del suelo, de las capas que se encuentran sobre el nivel freático del agua.
  - Una vez que estas capas se han saturado, el agua subterránea es recargada, por la parte restante del agua que se infiltra.
2. Otra parte de la precipitación, tiende a escurrir sobre la superficie terrestre; a la precipitación que ocasiona este escurrimiento, se llama altura por precipitación en exceso.
3. Una pequeña proporción se pierde.

Con base en lo anterior, en escurrimiento se clasifica en tres tipos: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

1. **Escurrimiento superficial**, es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el escurrimiento total es inmediato, y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine. La parte de la precipitación total que da lugar a este escurrimiento, se denomina precipitación en exceso (hp).
2. **Escurrimiento subsuperficial**, es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada. El efecto sobre el escurrimiento total, puede ser inmediato o retardado. Si es inmediato se le da el mismo tratamiento que al escurrimiento superficial, en caso contrario, como escurrimiento subterráneo.

3. **Escorrimento subterráneo**, es aquel que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo ha saturado.

Con base en la forma en que contribuyen al escurrimento total, el escurrimento se clasifica en: *escurrimento directo* cuando su efecto es inmediato, y en *escurrimento base* si su efecto es retardado. El hecho de presentarse una precipitación, no implica que haya escurrimento superficial, y en algunos casos tampoco escurrimento subterráneo, esto depende de una serie de factores.

En la **Figura 2.7**, se muestra un esquema donde se indica la relación entre la precipitación y el escurrimento total.

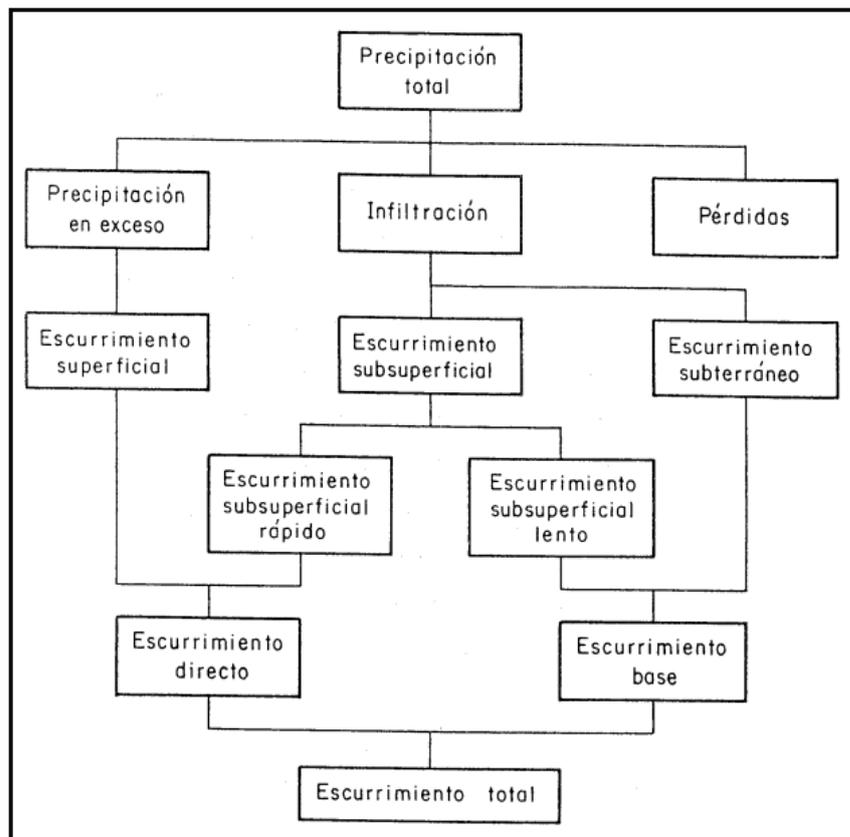


Figura 2.7.- Relación entre la precipitación y el escurrimento total.

### 2.7.3. Escurrimento superficial.

Despreciando la intercepción por vegetación, la escurrencia superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración. Si el suelo tiene una capacidad de infiltración  $f$  que se expresa en centímetros absorbidos por hora, entonces cuando la intensidad de la lluvia  $i$  es menor que  $f$ , la lluvia es absorbida completamente y no existe escurrencia superficial. Se puede decir como una primera aproximación que si  $i$  es mayor que  $f$ , la escurrencia superficial ocurrirá a una tasa  $(i-f)$ . Al valor de  $(i-f)*\Delta t$ , se le dio el nombre de *exceso de precipitación* y se mide en cm. La lluvia en exceso después de fluir a través de la superficie de la cuenca, se convierte en escurrencia directa.

La diferencia entre el hietograma de lluvia total y el hietograma de exceso de precipitación, se

conoce como ABSTRACCIONES o pérdidas. Las abstracciones incluyen la intercepción de precipitación por la vegetación del terreno, el almacenamiento en depresiones del suelo, e infiltración de agua en el suelo. En un tormenta grande las primeras dos se suponen despreciables, y por lo tanto las pérdidas quedan supeditadas a la **infiltración**. Esto implica que, dado un hietograma de precipitación y la curva de capacidad de infiltración, quedan definidas las pérdidas, y por consiguiente el “exceso de precipitación o escurrimiento directo”. Ver **Figura 2.8**.

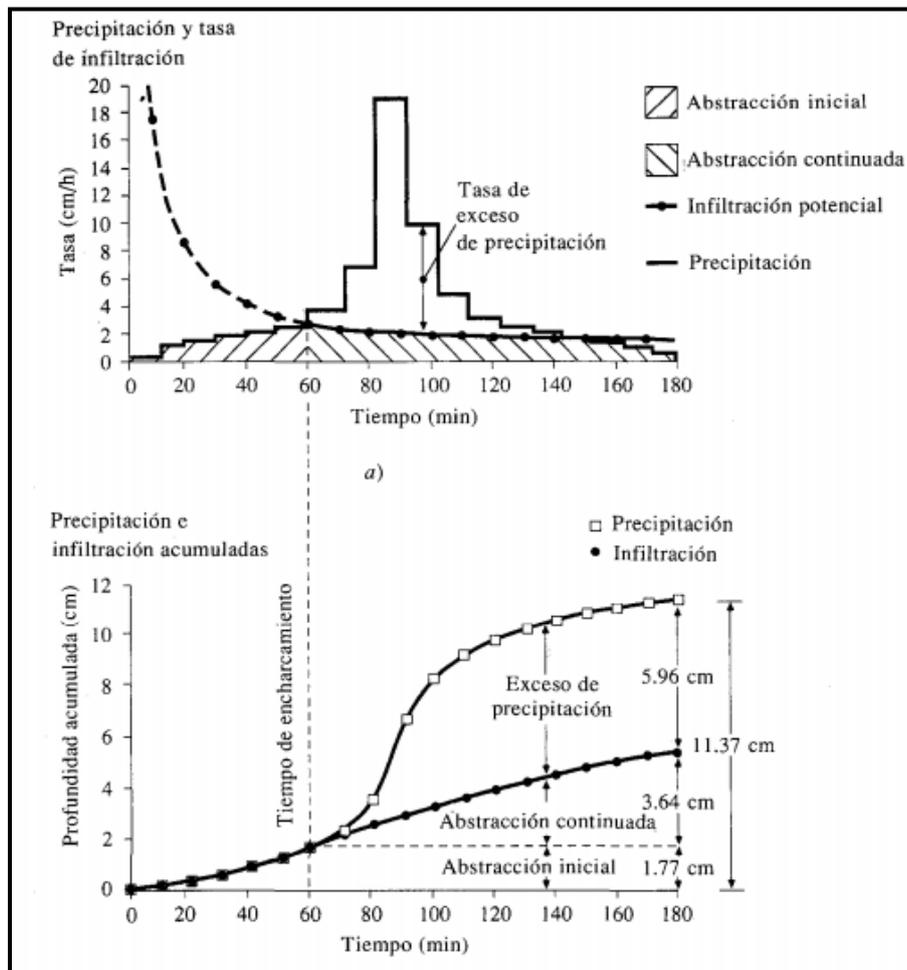


Figura 2.8.- Infiltración y exceso de precipitación bajo lluvia de intensidad variable.

(Chow, Maidment, Mays, 1994)

### 2.7.3.1. Método SCS o Método de número de curva.

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escurrimiento directo  $P_e$ , es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación  $P$ ; de manera similar, después de que la escurrimiento se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca  $F_a$ , es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$  (véase la **Figura 2.9**). Existe una cierta cantidad de precipitación  $I_a$  (abstracción inicial antes del encharcamiento), para la cual no ocurrirá escurrimiento, luego la escurrimiento potencial es  $P - I_a$ .

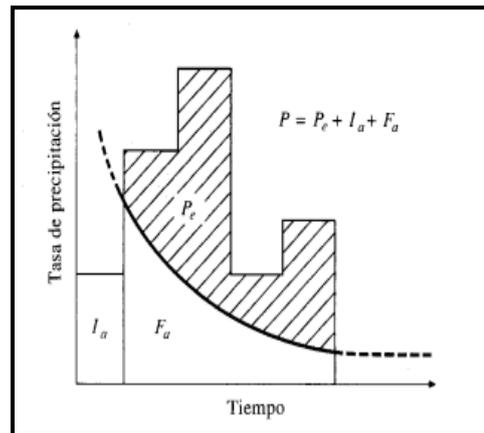


Figura 2.9.- Variables en el método de abstracciones de precipitaciones del SCS.

(Chow, Maidment, Mays, 1994)

A continuación se presenta la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta en función de la abstracción inicial, utilizando el método SCS:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + 4 I_a} \quad P > I_a \quad \text{Ecuación 2.23}$$

$$P_e = 0; \quad P \leq I_a$$

$$I = P - P_e \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Siendo:

$P_e$ : escurrimiento (mm);

$P$ : precipitación (mm);

$I_a$ : abstracción inicial o umbral de escorrentía (mm), y

$I$ : Infiltración (mm).

De la **Ecuación 2.23**, se puede observar que la precipitación en un dato y la clave está en determinar el valor de la precipitación inicial que no produce escorrentía directa, es decir, la abstracción inicial o umbral de escorrentía. Para su evaluación se utilizan tablas en función del tipo de suelo (A, B, C ó D, de más arenoso y permeable a más arcilloso e impermeable), de su uso (bosque, cultivos, urbano, etc.) y su pendiente. Finalmente hay que modificarlo según las condiciones precedentes de humedad.

### Solución gráfica de la ecuación de escorrentía SCS.

Como el método es universalmente conocido como “Método de Número de Curva”, es evidente que tiene que existir una solución gráfica con curvas numeradas. Dicha solución se presenta en la **Figura 2.10** y se obtiene como se indica a continuación.

El método supone que la abstracción inicial ( $I_a$ ) es aproximadamente el 20% de la abstracción total ( $S$ ), al sustituir en la **Ecuación 2.23** resulta:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Para expresar gráficamente el cálculo, se consideró conveniente el siguiente cambio de variable, donde S está en pulgadas.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Reemplazado:

$$P_e = \frac{(P + 2 - 200/CN)^2}{P - 8 + 800/CN} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Representando gráficamente la **Ecuación 2.27** para diversos valores de CN, se obtienen las curvas que dan nombre al método.

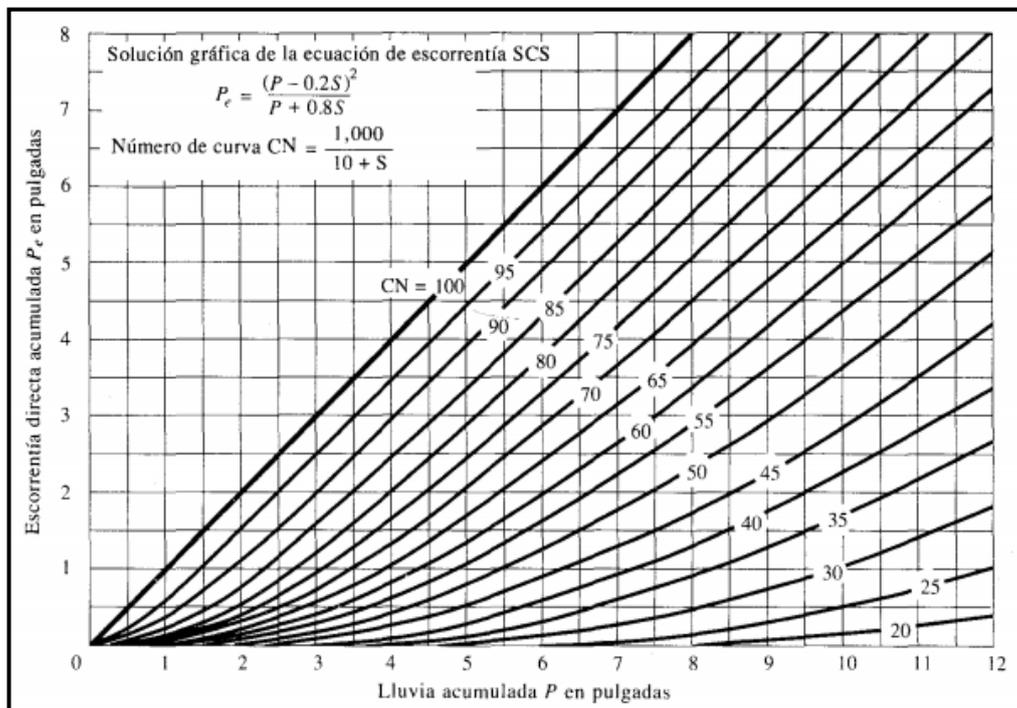


Figura 2.10.- Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS (Service, 1972)

Los números de curva que se muestran en la **Figura 2.10**, se aplican para *condiciones antecedentes de humedad* (AMC, por sus siglas en inglés) normales (AMC II).

El índice CN expresa el potencial de escorrentía de un terreno en función de la humedad antecedente del suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico del suelo y el uso del mismo. Puede tomar valores de 0 a 100; para superficies impermeables y superficies de agua CN=100, indicando que todo lo que llueve escurre en superficie y CN será menor a 100 para superficies naturales.

#### Evaluación de *Ia* o CN.

Hemos visto que el método es muy simple y que la única dificultad es la obtención del umbral de

escorrentía *Ia* o su valor equivalente de *CN*. Estos valores se consultan en tablas. Las tablas españolas facilitan *Ia*, mientras que las americanas proporcionan los valores de *CN*.

La **Tabla 2.5** permite obtener un valor estimativo del índice *CN* en función de la coberturas y uso del suelo, el grupo hidrológico del mismo, la pendiente y para una condición de humedad antecedente media (antecedent moisture condition: AMCII).

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO Y CUBIERTA	TIPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
- Suelo Desnudo	77	86	91	94
- Estepa Arbustiva:				
<b>a)</b> Con menos del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 – 20%	72	81	88	91
Cobertura entre el 20 – 30%	70	80	87	90
Cobertura entre el 30 – 40%	68	79	86	89
Cobertura mayor del 40%	51	70	80	84
<b>b)</b> Con más del 5% de cobertura herbácea				
Cobertura entre el 5 – 20%	71	80	87	90
Cobertura entre el 20 – 30%	68	78	85	88
Cobertura entre el 30 – 40%	66	77	84	87
Cobertura mayor del 40%	49	68	78	82
- Estepa halófito	70	80	87	89
- Estepa halófito – higrófito	51	70	80	84

Tabla 2.5 - Valores del índice *CN* para áreas aluvionales semiáridas. (INCYTH, 1980)

El complejo hidrológico suelo-cobertura es muy importante para el cálculo de la precipitación efectiva o escorrentía directa. Los grupos de suelos hidrológicos identificados en la tabla anterior son:

GHS	DESCRIPCIÓN
<b>A</b>	Tienen alta velocidad de infiltración, aún cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta velocidad de transmisión.
<b>B</b>	Tienen moderadas velocidades de infiltración cuando están bien húmedos. Consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Con moderada velocidad de transmisión.
<b>C</b>	Tienen infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el descenso del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Tienen lenta transmisión de agua.
<b>D</b>	Tienen infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten principalmente en suelos de arcilla con alto potencial de expansión. Tienen lenta transmisión de agua.

Tabla 2.6 - Grupos Hidrológicos de Suelo.

En la **Tabla 2.7**, se detallan los grupos hidrológicos de suelo (GHS) y sus correspondientes texturas.

Grupo Hidrológico del suelo	Tipo de suelo según textura
<b>A</b>	Arenoso
	Areno-Limoso
<b>B</b>	Franco-arenoso
	Franco
	Franco-arcilloso-arenoso
	Franco-limoso
<b>C</b>	Franco-arcilloso
	Franco-arcillo-limoso
	Arcillo-arenoso
<b>D</b>	Arcilloso

*Tabla 2.7- Grupos hidrológicos del suelo.*

*(Bradbury, K.R.; Dripps, W.; Hankley, C; Anderson, M.; Potter, K., 2000)*

Los valores del índice CN de las tablas, como se expresó, se refieren a la condición media de humedad en el suelo (AMCII). El SCS define tres condiciones de humedad, estos son:

*AMCI. Seca:* suelo que permite una capacidad de infiltración alta, asociada con intensidades desde 0 a 635 mm/año.

*AMCII. Media:* suelo que permite una capacidad de infiltración normal, asociada con intensidades desde 635 a 1270 mm/año.

*AMCIII. Húmeda:* suelo que permite una capacidad de infiltración baja, con intensidades mayores de 1270 mm/año.

Para la obtención de índice CN para las condiciones seca (AMCI) o húmeda (AMCIII), se utilizan la **Ecuación 2.8** y **Ecuación 2.9**, respectivamente:

$$CN(AMCI) = \frac{4,2 \text{ CN } (AMCII)}{10 - 0,058 \text{ CN } (AMCII)} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

$$CN(AMCIII) = \frac{23 \text{ CN } (AMCII)}{10 + 0,13 \text{ CN } (AMCII)} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Donde:

$CN(AMCI)$ : valor de CN para la condición de humedad antecedente I o seca.

$CN(AMCII)$ : valor de CN para la condición de humedad antecedente II o media, éste valor es el obtenido de tablas.

$CN(AMCIII)$  : valor de CN para la condición de humedad antecedente III o húmeda.

### Diagrama de flujo para la obtención de CN.

La determinación del índice CN se realiza de manera distribuida mediante reclasificaciones, tabulaciones y álgebra de mapas. Las operaciones a realizar se pueden vislumbrar en la **Figura 2.11** mediante un diagrama de flujo.

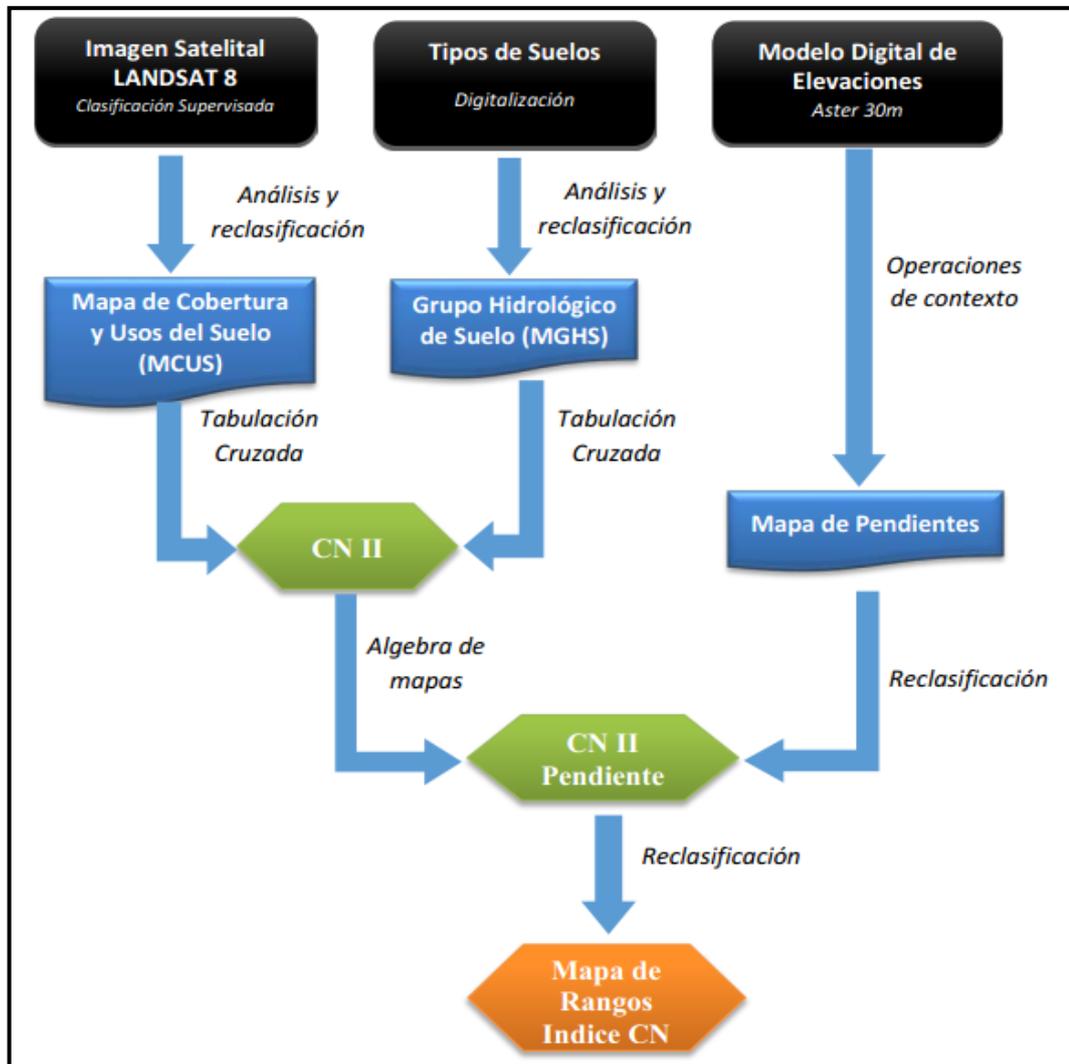


Figura 2.11.- Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones en GIS. Cálculo de índice CN distribuido.

### 2.8. Modelación Hidrológica con HEC-HMS.

HEC-HMS es un software desarrollado por el centro hidrológico de la armada de Estados Unidos, este software está diseñado para simular procesos hidrológicos completos de sistemas en cuencas hídricas. (Hydrologic Engineering Center, 2017)

Para la aplicación del modelo se adopta el Modelo de cuenca (Basic Model), el cual requiere información de las pérdidas por infiltración, el método de transformación de lluvia en escorrentía, y Base flow para cada una de las cuencas. En el caso de los diques se requiere el método de almacenamiento, la función almacenamiento-altura y definir los métodos de salida de caudal. Para el canal de trasvase es

necesario definir el método de corrida y las pérdidas. Cada uno de los componentes del modelo debe estar concatenado con los otros componentes, de modo de armar la red hidrográfica de la cuenca.

HEC-HMS solicita un modelo de precipitación (Meteorologic Model) al cual se le deben ingresar las precipitaciones de las tormentas de diseño según las recurrencias establecidas.

En el Control de especificación (Control Specification) se define el periodo de simulación y el intervalo de tiempo en el cual se desea obtener el hidrograma de escurrimiento.

### 2.8.1. Hidrograma Unitario Sintético.

El hidrograma unitario de una cuenca es el hidrograma de escurrimiento directa resultante de 1 pulg (usualmente tomado como 1 cm en SI) de exceso de lluvia. Generado uniformemente sobre el área de drenaje una tasa constante a lo largo de una duración efectiva. Permite evaluar una crecida en función de las precipitaciones y de las características del hidrograma de crecida, esto obliga a contar con un hidrograma de salida, el cual no existe en la mayoría de las cuencas. La solución a este problema es usar métodos que permitan obtener hidrogramas unitarios usando datos de características generales de la cuenca. Estos hidrogramas son llamados sintéticos. (Aparicio Mijares, 1992)

#### 2.8.1.1. Hidrograma unitario Sintético de Snyder.

En un estudio de cuencas en los montes Apalaches y con cuencas que varían desde 30 a 300 km<sup>2</sup>, encontró relaciones sintéticas para algunas características de un hidrograma unitario estándar. A partir de las relaciones, pueden calcularse 5 características de un hidrograma unitario requerido para una duración de exceso de lluvia dado. (Snyder, 1938)

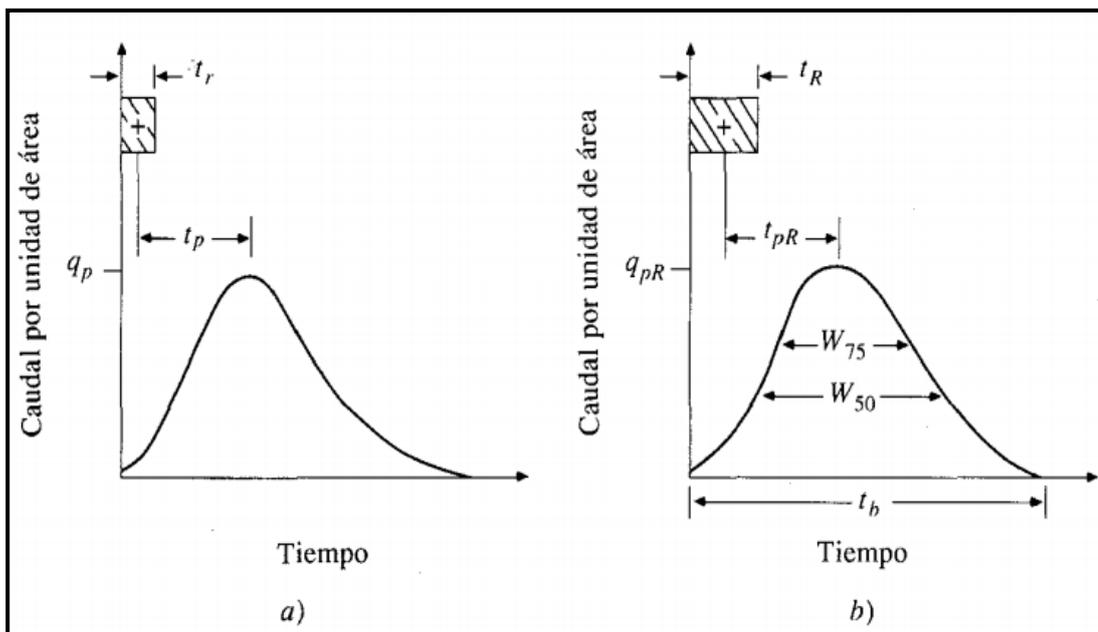


Figura 2.12.- Hidrograma unitario sintético de Snyder. a) Hidrograma unitario estándar ( $t_p=5.5t_r$ ).  
b) Hidrograma unitario requerido ( $t_{pR} 5.5t_r$ ). (Chow, Maidment, Mays, 1994)

Snyder definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración  $t$ , está relacionada con el retardo de cuenca  $t_p$  por:

$$t_p = 5.5 t_r \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Para un hidrograma unitario estándar encontró que el retardo de la cuenca es:

$$t_p = C_1 C_t (L L_c)^{0.3} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Donde:

$t_p$ : tiempo de retardo (hrs).

$L$ : longitud de la corriente principal (km) desde la salida de la cuenca hasta la divisoria de aguas arriba.

$L_c$ : distancia (km) desde la salida de la cuenca hasta el punto de la corriente más cercana al centroide del área de la cuenca.

$C_1$ : 0.75 en SI (1.0 para el sistema inglés de unidades).

$C_t$ : coeficiente basado en cuencas instrumentadas en la misma región.

El caudal pico por unidad de drenaje en ( $m^3/s.km^2$ ) del hidrograma unitario estándar es:

$$q_p = \frac{C_2 C_p}{t_p} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

donde:

$C_2$ : vale 2.75 en SI (640 para el sistema inglés de unidades), y

$C_p$ : coeficiente basado en cuencas instrumentadas en la región, y se mide sobre el mapa de la cuenca.

A partir de un hidrograma unitario deducido en la cuenca, es decir medido, se obtienen los valores de su duración efectiva  $t_R$  (hs), su tiempo de retardo en la cuenca  $t_{pR}$  (hs) y su caudal pico por unidad de área de drenaje,  $q_{pR}$ , en ( $m^3/s.km^2.cm.$ )

Si  $t_{pR} = 5.5 t_R$ , entonces  $t_R = t_r$  y  $q_{pR} = q_p$ , donde  $C_t$  se calcula utilizando la **Ecuación 2.33** y  $C_p$  se encuentra mediante calibración.

$$C_t = \frac{0.6}{\sqrt{S}} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

Si  $t_{pR}$  es muy diferente de  $5.5 t_R$ , el retardo de cuenca estándar es:

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Cuando una cuenca no instrumentada parece ser similar a una cuenca instrumentada, los coeficientes  $C_t$  y  $C_p$  para la cuenca instrumentada pueden utilizarse en las ecuaciones anteriores para deducir el hidrograma unitario sintético requerido para la cuenca no instrumentada.

La relación entre  $q_p$  y el caudal pico por unidad de área de drenaje  $q_{pR}$  del hidrograma unitario requerido es:

$$q_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}} \quad \text{Ecuación 2.35}$$

El tiempo base  $t_b$  en horas del hidrograma unitario puede determinarse utilizando el hecho de que el área bajo el hidrograma unitario es equivalente a una escorrentía directa de 1 cm. Suponiendo una forma triangular para el hidrograma, el tiempo base puede estimarse mediante la **Ecuación 2.36**.

$$t_b = \frac{C_3}{q_{pR}} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

donde  $C_3 = 5.56$  en SI (1290 para el sistema inglés).

El ancho en horas de un hidrograma unitario a un caudal igual a cierto porcentaje del caudal pico  $q_{pR}$  está dado por la **Ecuación 2.37**, donde  $C_w=1.22$  para el ancho del 75% y 2.14 para el ancho de 50%.

$$W = C_w q_{pR}^{-1.08} \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Usualmente un tercio de este ancho se distribuye antes del momento en que ocurre el pico del hidrograma unitario y dos tercios después de dicho pico.

### 2.8.2. Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave).

La teoría de la onda cinemática (Lighthill et al., 1955; Henderson et al., 1964; Wooding, 1965; Woolhiser et al., 1967; Schaake, 1971; Morris et al., 1980) es una buena aproximación para describir el flujo superficial en muchas situaciones reales. El modelo aplica dos tipos de simplificaciones: geométrica y de procesos. La primera consiste en aproximar la complejidad geométrica del flujo de agua superficial sobre una cuenca por medio de una cascada de segmentos simples, tales como planos de escurrimiento (flujo superficial) y segmentos de canal (flujo en canal), que en conjunto describen las características del drenaje. La segunda, consiste en despreciar los términos de inercia y de presión en la ecuación dinámica.

Una cuenca simple puede ser aproximada como uno o más planos de escurrimiento que aportan lateralmente a un segmento de canal.

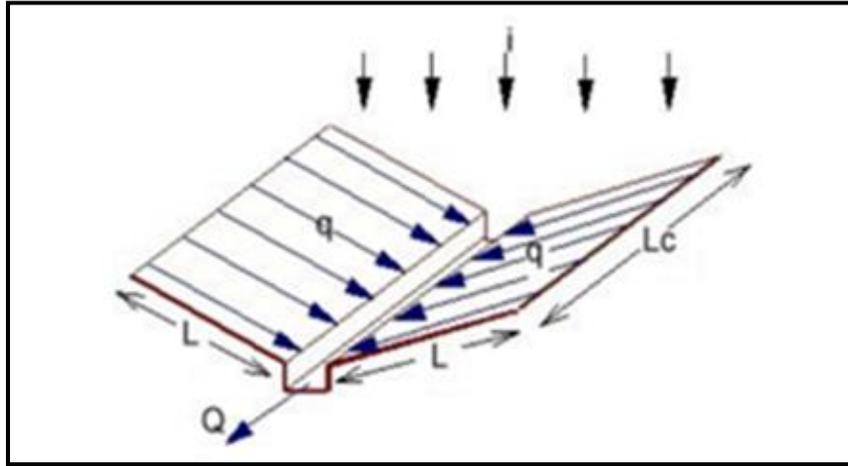


Figura 2.13.- Esquema para una cuenca simple. (Tesis doctoral, Ingeniero Raul A Pedraza).

donde:  $i$ : intensidad de lluvia en exceso,  $L$ : longitud del flujo sobre el plano,  $L_c$ : longitud del canal receptor,  $q$ : caudal lateral específico (para un ancho unitario del plano),  $Q$ : caudal a la salida de la cuenca

### 2.8.2.1. Ecuaciones Diferenciales del Modelo

Se basan en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (simplificada) de Saint Venant para flujo gradualmente variado y en ecuaciones que describen la pendiente de fricción. El flujo superficial se idealiza como un flujo unidimensional en un canal ancho poco profundo. El flujo se analiza sobre una faja de ancho unitario, con un caudal de entrada lateral proveniente de la lluvia en exceso  $i$ . Para un plano uniforme, sobre el cual cae una lluvia en exceso de intensidad constante, la ecuación de continuidad se expresa:

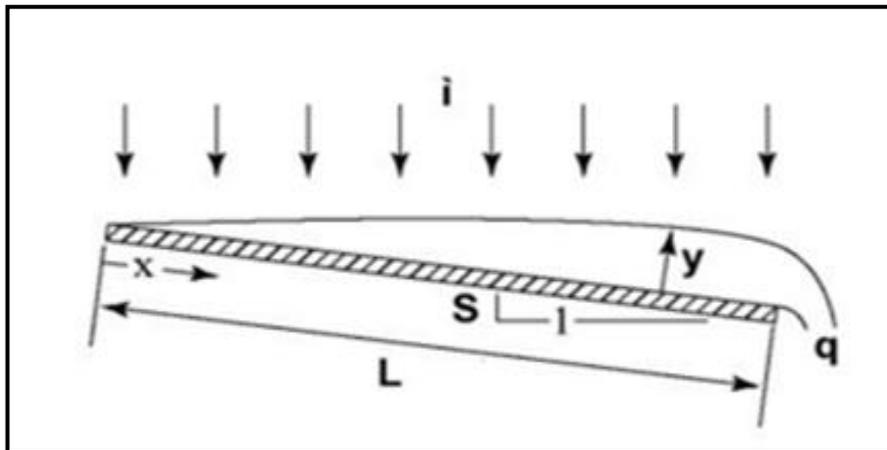


Figura 2.14.- Idealización del flujo superficial. (Tesis doctoral, Ingeniero Raul A Pedraza).

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = i$$

Ecuación 2.38

Donde:  $q$ : caudal por unidad de ancho,  $y$ : tirante,  $x$ : distancia en el sentido del flujo,  $t$ : tiempo,  $i$ : intensidad de lluvia en exceso.

Para una onda cinemática, los términos de inercia y de presión en la ecuación dinámica son despreciables con respecto a los de gravedad y fricción; el nombre “cinemática” se refiere al movimiento sin tener en cuenta la influencia de la masa y la fuerza.

En el método el caudal específico se puede expresar:

$$Q = V * y \quad \text{Ecuación 2.39}$$

$$Q = C * \sqrt{S_o} * Y^{3/2} \quad \text{Ecuación 2.40}$$

Esto implica asumir que existe una relación biunívoca entre  $q$  e  $y$ , del tipo:

$$q = \alpha * y^m \quad \text{Ecuación 2.41}$$

donde:  $\alpha$  y  $m$ : coeficientes cinemáticos, dependen de la forma, pendiente y rugosidad del plano y del régimen del flujo. Si se tiene en cuenta la variabilidad de  $f$  y  $C$  con el régimen del flujo, se tiene para flujo completamente turbulento:  $f$  es independiente del Número de Reynolds (\*) ( $Re$ ) y es válida la ecuación de Manning.

Operando se llega a :

$$\alpha = \frac{1}{N} * \sqrt{S_o} \quad \text{Ecuación 2.42}$$

$$m = \frac{3}{5} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

$N$ : coeficiente de rugosidad para flujo superficial.

Henderson (1966) determinó que el flujo es completamente turbulento si se cumple la condición:

$$\Omega = n^6 * \sqrt{RS_f} \geq 1.1 \cdot 10^{-13} \quad \text{Ecuación 2.44}$$

## 2.9. Producción de sedimentos en cuencas aluvionales - Modelo MUSLE.

Para la cuantificación de los sedimentos se hace uso del modelo empírico de producción de sedimentos, MUSLE, basado en la hidrología de la cuenca hidrográfica presentado por (Williams, J.R. y Berndt, H.D., 1977); el cual se basa en una modificación a la ecuación universal de pérdida de suelo, USLE. Los sedimentos producidos se refieren al sedimento a la salida de la cuenca hidrográfica considerada.

El modelo MUSLE responde a la siguiente ecuación:

$$Y = 11,8 \cdot (V_{TR} Q_{TR})^{0,56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

*Ecuación 2.45*

Siendo:

*Y*: Producción de sedimentos por un evento individual (Tn);

*V<sub>TR</sub>*: Volumen de escorrentía del evento considerado (m<sup>3</sup>);

*Q<sub>TR</sub>*: Caudal máximo del evento (m<sup>3</sup>/s);

*K*: Factor de erodabilidad del suelo (Tn.Hs/N.Ha);

*LS*: Factor topográfico (ad.);

*C*: Factor cobertura y manejo (ad.), y

*P*: Factor prácticas de conservación (ad.).

El Factor  $(V_{TR} Q_{TR})^{0,56}$  se denomina Factor de Escorrentía. Tanto *V<sub>TR</sub>* como *Q<sub>TR</sub>*, se obtienen con la modelación hidrológica considerando las tormentas de proyecto definidas para la zona de análisis.

### 2.9.1. Erodabilidad del suelo. Factor K.

La erodabilidad de los suelos es la susceptibilidad de éstos a la acción de agentes erosivos. Es una característica inherente a los mismos que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como su manejo. La textura es el factor principal que afecta al factor K, pero la estructura, la materia orgánica y la permeabilidad también contribuyen. Su valor varía entre 0.02 a 0.69. (Goldman S.J., Jackson K., Bursztynsky T.A., 1986)

Wischmeier et al. (1971) determina la erodabilidad por medio de un simulador de lluvia, un valor medio que incluye una variabilidad apreciable de tormentas y antecedente de humedad del suelo.

$$100 K = [10^{-4} \cdot 2,71 \cdot T^{1,14} \cdot 12 - MO + 4,2 \cdot E - 2 + 3,2 \cdot P - 3]$$

*Ecuación 2.46*

donde:

*T*: Parámetro de textura de los 15 cm superficiales.

$$T = [100 - A_c \cdot (L + Armf)]$$

*Ecuación 2.47*

*L + Armf*: limo más arena fina (0,1 – 0,002 mm),

*A<sub>c</sub>*: arcilla (< 0,002 mm),

*MO*: contenido en materia orgánica (%),

*E*: parámetro de estructura,

*P*: parámetro de permeabilidad,

Los valores del parámetro físico de estructura y de permeabilidad se dan en las **Tabla 2.8** y **Tabla 2.9**, respectivamente.

Parámetro de estructura para los 15 – 18 cm superficiales	
1	Granular muy fina (< 1mm)
2	Granular fina (1 - 2 mm)
3	Granular media (2 – 5 mm) a gruesa (5 – 10 mm)
4	Laminar, maciza y cúbica (> 10 mm)

Tabla 2.8.-Valores del parámetro de estructura E.

Parámetro de permeabilidad referido a todo el perfil	
1	Rápida a muy rápida (12,5 a 25 cm/hr)
2	Moderadamente rápida (6,2 a 12 cm/hrs)
3	Moderada (2 a 6,2 cm/hrs)
4	Moderadamente lenta (0,5 a 2cm/hrs)
5	Lenta (0,12 a 0,5 cm/hrs)
6	Muy lenta (< 0,12 cm/hrs)

Tabla 2.9.-Valores del parámetro de permeabilidad P.

A partir de la **Ecuación 2.46** se construye el nomograma, **Figura 2.15**, que permite determinar de manera rápida y sencilla el factor K (unidades inglesas). (Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978)

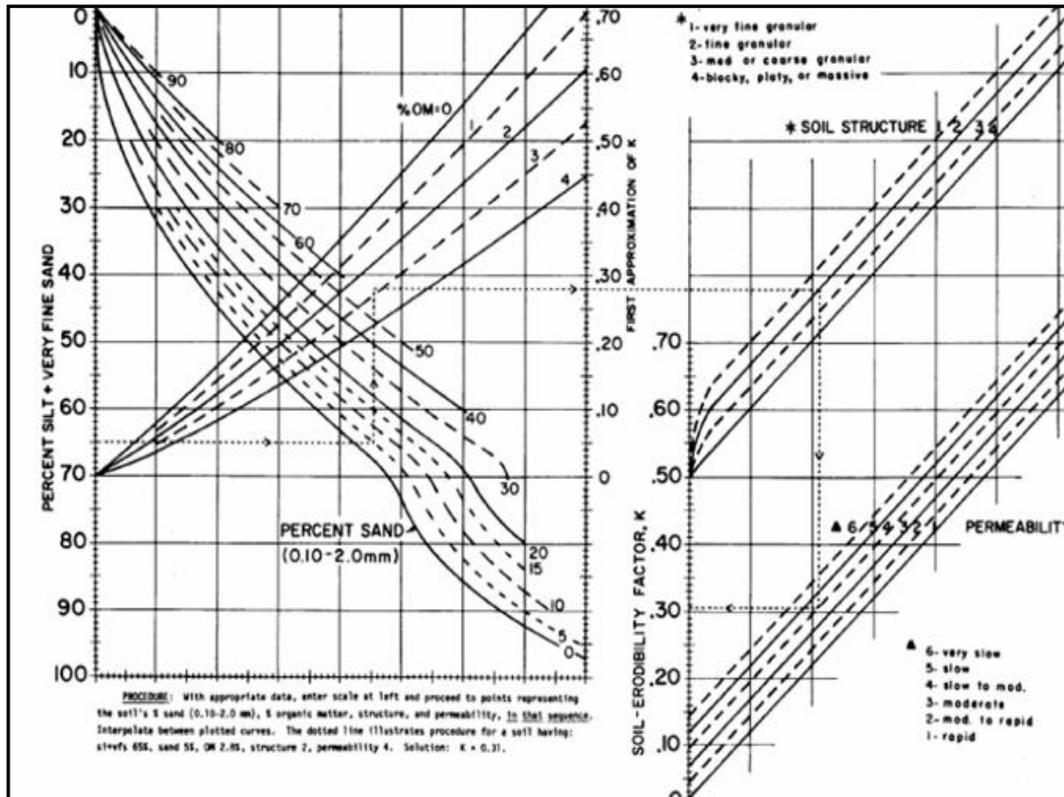


Figura 2.15.- Nomograma de Erodabilidad del Suelo.(Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978)

El coeficiente de erodabilidad también puede ser obtenido por la multiplicación de factores que consideran los porcentajes de arena, arcilla, limo y materia orgánica. (Williams, 1995)

$$K = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad \text{Ecuación 2.48}$$

$$f_1 = \left( 0,2 + 0,3 \exp \left[ -0,256 m_s \left( 1 - \frac{m_{\text{silt}}}{100} \right) \right] \right) \quad \text{Ecuación 2.49}$$

$$f_2 = \left( \frac{m_{\text{silt}}}{m_c + m_{\text{silt}}} \right)^{0,3} \quad \text{Ecuación 2.50}$$

$$f_3 = \left( 1 - \frac{0,25 \text{ orgC}}{\text{orgC} + \exp[3,72 - 2,95 \text{ orgC}]} \right) \quad \text{Ecuación 2.51}$$

$$f_4 = \left( 1 - \frac{0,7 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ -5,51 + 22,9 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad \text{Ecuación 2.52}$$

Donde:

$m_s$ : porcentaje de contenido de arena (0,05 - 2 mm),

$m_{\text{silt}}$ : porcentaje de contenido de limo (0,002 - 0,05 mm),

$m_c$ : porcentaje de contenido de arcilla (< 0,002 mm),

$\text{org.C}$ : porcentaje de contenido de carbón orgánico del horizonte.

De la aplicación del método anterior, se ha confeccionado la **Tabla 2.10**, que da los distintos valores de  $K$  en función de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica.

Textura	Contenido de Materia Orgánica		
	0,5 % K	2% K	4% K
Arena	0,056585	0,033951	0,022634
Arena Fina	0,181072	0,158438	0,113170
Arena Muy Fina	0,475314	0,407412	0,316876
Franco Arenoso	0,135804	0,113170	0,090536
Franco Arenoso Fino	0,271608	0,226340	0,181072
Franco Arenoso Muy Fino	0,497948	0,430046	0,181072
Arenoso Franco	0,305559	0,271608	0,215023
Arenoso Franco Fino	0,396095	0,339510	0,271608
Arenoso Franco Muy Fino	0,531899	0,463997	0,373461
Franco	0,430046	0,384778	0,328193
Franco Limoso	0,543216	0,475314	0,373461
Limo	0,679020	0,588484	0,475314
Franco Arcillo Arenoso	0,305559	0,282925	0,237657
Franco Arcilloso	0,316876	0,282925	0,237657
Franco Limo Arcilloso	0,418729	0,362144	0,294242
Arcillo Arenoso	0,169755	0,147121	0,135804
Arcillo Limoso	0,282925	0,260291	0,215023
Arcilla		0,147121 0,328193	

Tabla 2.10.- Valores del Factor de Erodabilidad de Suelos,  $K$  ( $Tn^*Hs/N^*Ha$ )

En una cuenca hidrográfica existen varios tipos de suelos y cada uno de ellos tendrá su respectivo factor  $K$ . El valor del factor  $K$  a usar con la MUSLE para cada cuenca, se pondera de acuerdo a la superficie de la cuenca con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i S_i}{S} \quad \text{Ecuación 2.53}$$

Siendo:

$K$ : Factor de erodabilidad promedio para la cuenca considerada;

$K_i$ : Factor de erodabilidad que ocupa la superficie  $S_i$  ( $\text{km}^2$ ) dentro de la cuenca, y

$S$ : Superficie de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

### 2.9.2. Topografía. Factor LS.

Los efectos de la topografía e hidrología sobre la pérdida de suelo están representados por el factor LS. Este factor se refiere al efecto combinado de la longitud y el gradiente de la pendiente, y se obtiene multiplicando el subfactor longitud,  $L$ , por el subfactor gradiente,  $S$ .

Subfactor  $L$  (longitud de la pendiente) representa el efecto de la longitud de la pendiente en la erosión (adimensional). Es la razón entre la pérdida de suelo en la longitud de pendiente en campo con respecto a la longitud de una parcela de 22,13 m en el mismo tipo de suelo y gradiente. La longitud de la pendiente es la distancia desde el origen de la escorrentía superficial a lo largo de su vía de flujo a la localidad donde se concentra el flujo o donde se deposita el suelo desprendido.

Subfactor  $S$  es el grado de inclinación de la pendiente. Representa los efectos de la inclinación en la erosión. La pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con pendientes muy escarpadas en comparación con el incremento en longitud de la pendiente. Se define como el cociente de la pérdida de suelo en el campo entre la que ocurre en una parcela de 9% de inclinación bajo idénticas condiciones.

El factor LS aparece por primera vez formando parte de la "USLE" de (Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978), y se conoce como factor topográfico.

Por más de 50 años se han efectuado investigaciones que han demostrado que la pérdida de suelo es mucho menos sensible a los cambios en la longitud que a los cambios en la inclinación de pendiente. Es por ello que las ecuaciones empíricas desarrolladas para la estimación del factor LS difieren en la forma de estimar la longitud de pendiente. (ver **Tabla 2.11**)

Modelo	Factor <i>LS</i>		Exponentes	
	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
USLE (1978)	$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m$	$S = (65,41 \cdot \text{sen}^2 \theta + 4,56 \cdot \text{sen} \theta + 0,065)$	$m = 0,5$ para $\theta > 5\%$ ; $m = 0,4$ para $3,5\% < \theta \leq 5\%$ $m = 0,3$ para $1 < \theta \leq 3,5$ ; $m = 0,2$ para $\theta \leq 1$	
RUSLE (1997)	$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m$	$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \cdot \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m^* = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3 \cdot \text{sen}^{0,8} \theta + 0,56}$	
Hickey (2004)	$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m$	$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \cdot \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	La metodología utiliza los valores de <i>m</i> expresados en la Tabla 3 del presente trabajo para un $\beta$ moderado.	
Mintegi-Barrios (2000)	$LS = 0,009 \cdot s^2 + 0,0798 \cdot s$ para $s \leq 30\%$ $LS = 0,2558 \cdot s + 3,248$ para $s > 30\%$			
Moore y Burch (1986)	$L = \left(\frac{A_e}{22,13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	0,4	1,3
Moore y Wilson (1992)	$L = \left(\frac{A_e}{22,13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	0,6	1,3
Desmet y Govers (1996)	$L = \frac{(A_{i,j,m} + D^2)^{m-1} - A_{i,j,m}^{m-1}}{D^{m+2} \cdot A_{i,j}^m (22,13)^m}$	$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \cdot \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m^* = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3 \cdot \text{sen}^{0,8} \theta + 0,56}$	
Griffin <i>et al.</i> (1988)	$L = (m+1) \left(\frac{A_e}{22,13}\right)^m$	$S = 10,8 \cdot \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \cdot \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m^* = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3 \cdot \text{sen}^{0,8} \theta + 0,56}$	
Mitasova (1996) RUSLE-3D	$L = (m+1) \left(\frac{A_e}{22,13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	$m = 0,4-0,6$ ( $m^*$ elegido = 0,5)	$n = 1-1,3$ ( $n^*$ elegido = 1,15)
Mitasova (2001) USPED	$L = A_e^m$	$S = (\text{sen} \theta)^n$	$m = 1-1,6$ ( $m^*$ elegido = 1,3)	$n = 1-1,3$ ( $n^*$ elegido = 1,15)

Tabla 2.11.- Resumen de ecuaciones para la estimación del factor *LS*. (Giménez, Suárez, 2008)

Los primeros modelos desarrollados no son capaces de diferenciar aquellas partes del paisaje que experimentan erosión neta de aquellas con deposición. Para solucionarlo fue necesario incorporar el impacto de la convergencia del flujo, reemplazando la longitud de pendiente “ $\lambda$ ” por el área de contribución aguas arriba “*A*”, permitiendo extender la estimación de la pérdida de suelo a la complejidad de los terrenos reales en 3D.

Moore y Burch (1986) plantearon la primera ecuación relacionada con la estimación del área de contribución aguas arriba, *A*. Sus investigaciones estuvieron basadas en el concepto de la teoría de unidad de fuerza de corriente (unit stream power,  $\omega$ ), la cual se define como la tasa de energía potencial disipada por unidad de peso de agua. La ecuación propuesta es la que se encuentra en la fila 5 de la **Tabla 2.11**, donde *A<sub>e</sub>* es el área específica de captación (área de contribución aguas arriba “*A*” por unidad de longitud de curva de nivel), y  $\theta$  es la pendiente en grados.

### 2.9.3. Cubierta vegetal y manejo. Factor *C*.

Representa o mide el grado de protección ejercida por los cultivos y la vegetación natural en el proceso de erosión. Los valores que pueden tomar, varían en función de la clase y calidad de estas coberturas, oscilando desde un mínimo de 0.001 o 0.006 para coberturas densas, hasta un valor de 1 para suelo desnudo. Su estimación es de suma importancia, ya que puede ser modificado a fin de minimizar las pérdidas de suelo por erosión.

El valor del Factor C a usar con la expresión MUSLE para cada cuenca, se pondera de acuerdo a la superficie de la misma con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i S_i}{S} \quad \text{Ecuación 2.54}$$

Siendo:

C: Factor de cubierta vegetal y manejo promedio para la cuenca considerada;

$C_i$ : Factor de cubierta vegetal y manejo que ocupa la superficie  $S_i$  ( $\text{km}^2$ ) dentro de la cuenca;

S: Superficie de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

El factor C se determina usualmente mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) (Chao-Yuan Lin, Wen-Tzu Lin, Wen-Chieh Chou, 2002). Este índice muestra alta correlación con la biomasa sobre el terreno y varía entre -1 y 1; los valores más altos son para la vegetación verde y los valores bajos para otros materiales superficiales comunes, el suelo desnudo se representa con valores de NDVI más cercanos a 0 y los cuerpos de agua se representan con valores de NDVI negativos. Se obtiene con la **Ecuación 2.55** en base a la banda roja y infrarroja cercana obtenida por el satélite LANDSAT 8 de la zona de análisis.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{Ecuación 2.55}$$

Donde:

NIR: Banda del infrarrojo cercano (banda 5);

R: Banda roja (banda 4).

La ecuación vinculante entre el Factor C y el NDVI es la siguiente:

$$\text{Factor C} = \frac{(1 - NDVI)}{2} \quad \text{Ecuación 2.56}$$

#### 2.9.4. Prácticas de conservación. Factor P.

El factor P representa la relación entre la erosión producida con prácticas conservacionistas y la producida sin ellas, por consiguiente sin prácticas de conservación el valor de P se considera la unidad. Su valor depende del tipo de práctica y de la pendiente del terreno, las prácticas que más se efectúan son modificaciones en la topografía del terreno, tales como: cultivo en contorno, cultivos en franjas y terrazas.

En la **Tabla 2.12**, Wischmeier y Smith (1978) presentan los valores más comunes del factor P.

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno	Cultivo en franjas de contorno y surcos	Terrazas
1 - 2	0,60	0,30	0,12
3 - 8	0,50	0,25	0,10
9 - 1	0,60	0,30	0,12
13 - 16	0,70	0,35	0,14
17 - 20	0,80	0,40	0,16
21 - 25	0,90	0,45	0,18

Tabla 2.12.- Valores del Factor P. (Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978)

El valor del “Factor P promedio” para una cuenca hidrográfica, se pondera de acuerdo a la superficie de la cuenca con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i S_i}{S} \quad \text{Ecuación 2.57}$$

Siendo:

$P$ : Factor prácticas de conservación promedio para la cuenca considerada,

$P_i$ : Factor de prácticas de conservación que ocupa la superficie  $S_i$  ( $\text{km}^2$ ) dentro de la cuenca;

$S$ : Superficie de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

### 2.9.5. Producción anual de sedimentos.

Para computar la producción de sedimentos anual de cada cuenca se utiliza la siguiente ecuación Simons, D. B., et al.,(1992):

$$A_s = \frac{V_a \cdot (0,01 Y_{100} + 0,01 Y_{50} + 0,02 Y_{25} + 0,06 Y_{10} + 0,4 Y_2)}{(0,01 V_{100} + 0,01 V_{50} + 0,02 V_{25} + 0,06 V_{10} + 0,4 V_2)} \quad \text{Ecuación 2.58}$$

Siendo:

$A_s$ : producción de sedimentos anual (Tn),

$V_a$ : producción anual promedio de escorrentía ( $\text{m}^3$ ),

$Y_{100}$ ,  $Y_{50}$ ,  $Y_{25}$ ,  $Y_{10}$ ,  $Y_2$ : producción de sedimentos (Tn), para las recurrencias de 100, 50, 25, 10 y 2 años, respectivamente,

$V_{100}$ ,  $V_{50}$ ,  $V_{25}$ ,  $V_{10}$ ,  $V_2$ : escorrentía en ( $\text{m}^3$ ), para las recurrencias de 100, 50, 25, 10 y 2 años, respectivamente.

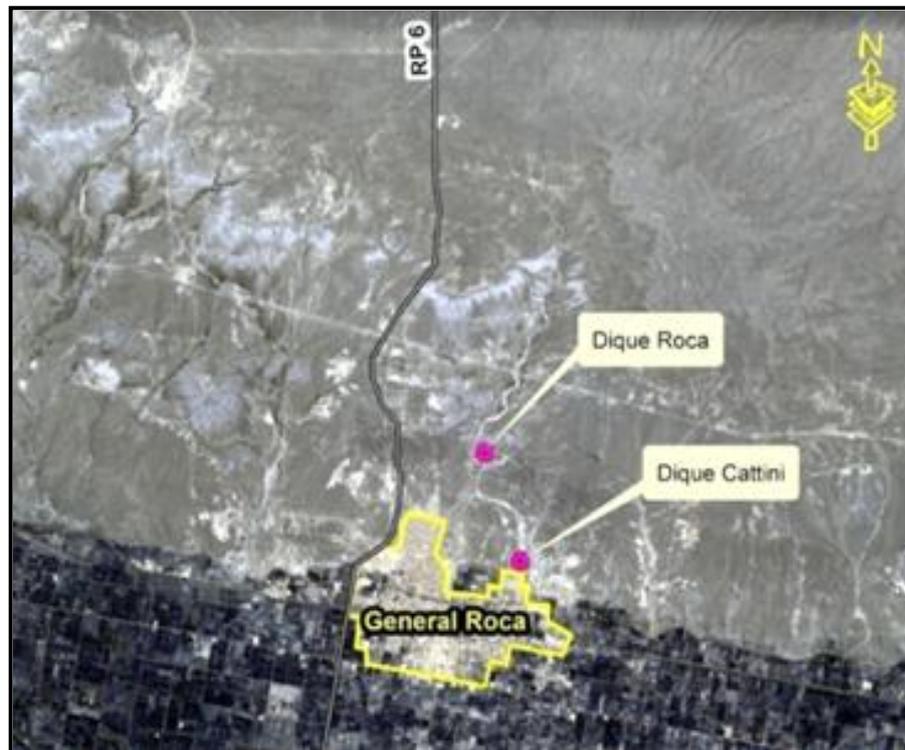
La producción anual promedio de escorrentía de cada cuenca,  $V_a$ , se obtiene mediante el Método del Número de Curva, considerando una lluvia promedio anual según el área de estudio ( $P_a$ ).

## 2.10. Resumen del Capítulo.

- En el presente capítulo se propone una metodología para la evaluación de la dinámica hídrica de cuencas aluvionales. La metodología se basa en el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS y del modelo de producción de sedimentos EUPSM o MUSLE.
- Se brindan conceptos generales de hidrología, entre ellos el del Ciclo Hidrológico y sus componentes, como también el concepto de cuenca y los parámetros morfométricos principales, físicos de forma y de Relieve, y los relativos a la red hidrográfica. Dichos parámetros permiten determinar características aluvionales de las cuencas.
- Se analizan algunos de los componentes del ciclo hidrológico, ellos son: Precipitación e Infiltración, y a partir de estos dos primeros el componente Escurrimiento. En el desarrollo del componente precipitación se detallan todos los conceptos necesarios para determinar una tormenta de diseño mediante hietogramas acumulados. Luego en el componente Infiltración se presenta la Curva de Capacidad de Infiltración (f), dicha curva establece que parte de una precipitación infiltra y que parte escurre por superficie. Finalmente en el apartado de Escurrimiento se describe el Método del Número de Curva para la obtención del potencial de escorrentía de la zona de análisis de la presente tesis, y se presenta un modelo cartográfico para la determinación de un mapa del índice CN, que se basa en la aplicación de álgebra de mapas y reclasificaciones en el SIG.
- Se describe el modelo HEC-HMS, el cual permite calcular la escorrentía adoptando el Modelo de Intensidad de Precipitación para la región del Alto Valle del Río Negro, el Método del Número de Curva y el Método del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder.
- Por último se presentan los distintos factores intervinientes en el modelo de producción de sedimentos MUSLE, y los procedimientos para su cálculo. También se detalla la metodología presentada por Simons, la cual permite el cálculo de la producción anual de sedimentos para cada una de las cuencas.

### 3. Desarrollo.

El objetivo principal de la presente tesis es la caracterización hidrológica de las cuencas aluvionales ubicadas al Norte de la ciudad de General Roca, que con su dinámica hídrica han afectado a la misma provocando serios inconvenientes de anegamiento, es por ello que se han construido los diques Roca y Catini para contener los aluviones que provocaban dichos inconvenientes.



*Figura 3.1 - Imagen Satelital de la ciudad de General Roca y los diques Roca y Catini.*

Por consiguiente, en el desarrollo del trabajo se determinarán:

- Los parámetros morfométricos principales, de forma, de relieve, hidrológicos e hidráulicos, de las cuencas cuyo cierre son los diques Roca y Catini. Para ello, se hace uso de un modelo digital del terreno (MDT) y de una imagen Landsat 8 de la zona de análisis (ZDA); a partir de ellos se procede a la obtención de la red de drenaje de la zona que permite la delimitación de las cuencas aluvionales y su posterior análisis. (ArcGis).
- El índice CN para cada cuenca, el mismo establece el potencial de esorrentía de las mismas; para obtenerlo se lleva a cabo reclasificación y cruzamientos de mapas.
- Además se efectúa un tratamiento estadístico a las precipitaciones de la zona, obteniendo las respectivas curvas IDF mediante un modelo de intensidad de precipitación elaborado para la región del Alto Valle de Río Negro. Luego al establecer la duración de la tormenta para el proyecto, haciendo uso de las curvas IDF y el hietograma porcentual de Huff para el primer cuartil, se define las tormentas de proyecto para los tiempos de recurrencia de: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.
- Posteriormente se procederá, mediante modelación matemática, al cálculo de las

escorrentías que generan las precipitaciones adoptadas, utilizando para ello el modelo hidrológico HEC-HMS (2004).

- Finalmente mediante el modelo paramétrico MUSLE (Williams, 1975), se estimarán los sedimentos que se movilizan en cada evento lluvioso analizado.

### 3.1. Características general del área de estudio.

Los diques Catini y Roca forman parte del sistema de protección aluvional de la localidad de general roca, departamento del mismo nombre, Provincia de Rio Negro.

La zona se caracteriza por una ocupación poblacional estimada en 90.000 personas que se encuentran relacionadas con el sistema de protección aluvional de forma directa, debido a la importancia del sistema en las zonas aguas abajo del mismo.

Desde principios de siglo, gracias a la construcción del canal principal de riego, la localidad desarrollo como principal actividad económica la fruticultura, ocupando la mayor parte de su territorio por plantaciones de peras y manzanas.

La localización del sistema de protección aluvional se encuentra en el sector Norte del ejido de la Ciudad, donde ya no se encuentran presente la vegetación producida por la fruticultura, sino una vegetación característica de la estepa patagónica, achaparrada entre las cuales se pueden encontrar alpatacos, jarillas, pastizales, etc.

La fauna característica del ambiente son roedores de pequeño tamaño en su mayoría, y en menor medida, puma patagónico, guanacos, liebres y animales domesticados como chivos y vacas.

Su relieve está formado por planicies escalonadas cortadas por valles fluviales acompañado por un clima frio y seco.

### 3.2. Determinación de la red de drenaje, cuencas aluvionales y su caracterización.

#### 3.2.1. Zona de Análisis - ZDA.

Se obtuvo una imagen satelital LANDSAT 8, cuyo Path/Row es: 230/087, obtenida del portal *Earth Explorer* del *U.S. Geological Survey* (con fecha de captura en julio del 2017) y se retroproyectó al sistema de coordenadas POSGAR94– Faja 2. Mediante inspección visual, sobre la misma se determinó la Zona de Análisis (ZDA). Dicha zona será el área de estudio de la presente tesis, ver **Figura 3.2**. La misma tiene las coordenadas en el sistema mencionado y se detallan en la **Tabla 3.1**.

Punto	X	Y
1	2615442,87	5697862,81
2	2634600,17	5697862,81
3	2615442,87	5675383,55
4	2634600,17	5675383,55

Tabla 3.1 - Coordenadas extremas de la ZDA.

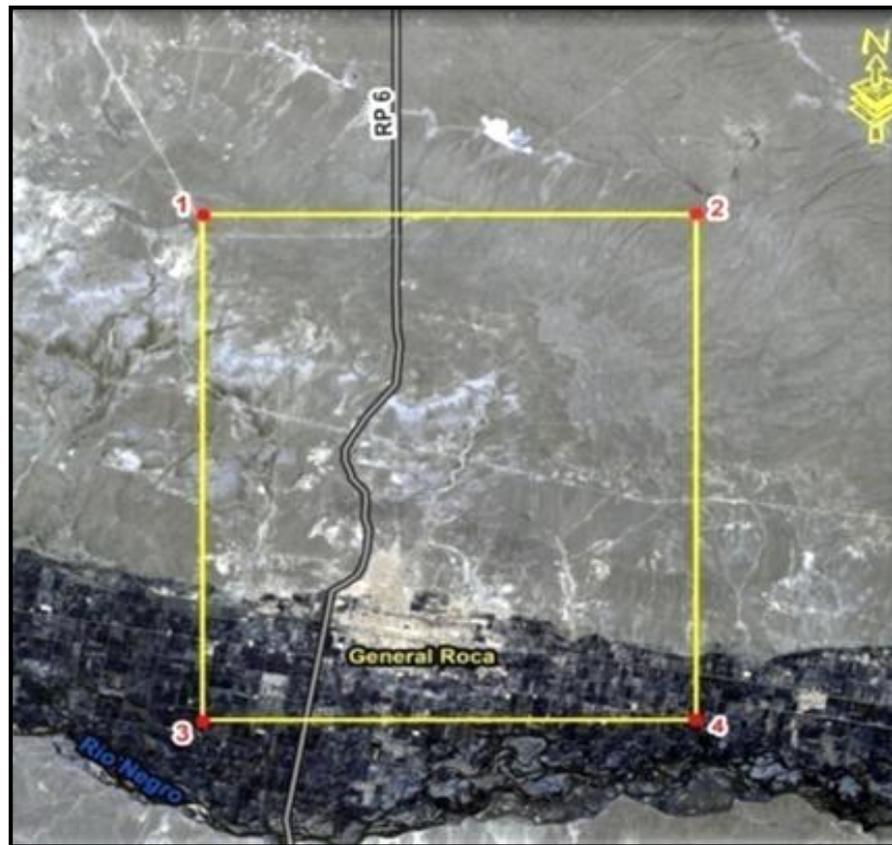


Figura 3.2.- Imagen LANDSAT 8 (P231 R087) - (U.S. Geological Survey)

### 3.2.2. Implementación del MDT de la ZDA.

Con el objetivo de delimitar las cuencas aluvionales vinculadas a la ZDA, se adaptó un Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN). Éste fue retroproyectado al sistema POSGAR94-Faja2, circunscripto a la ZDA con un tamaño de pixel de 30 x 30 metros y procesado con el software ArcGis.

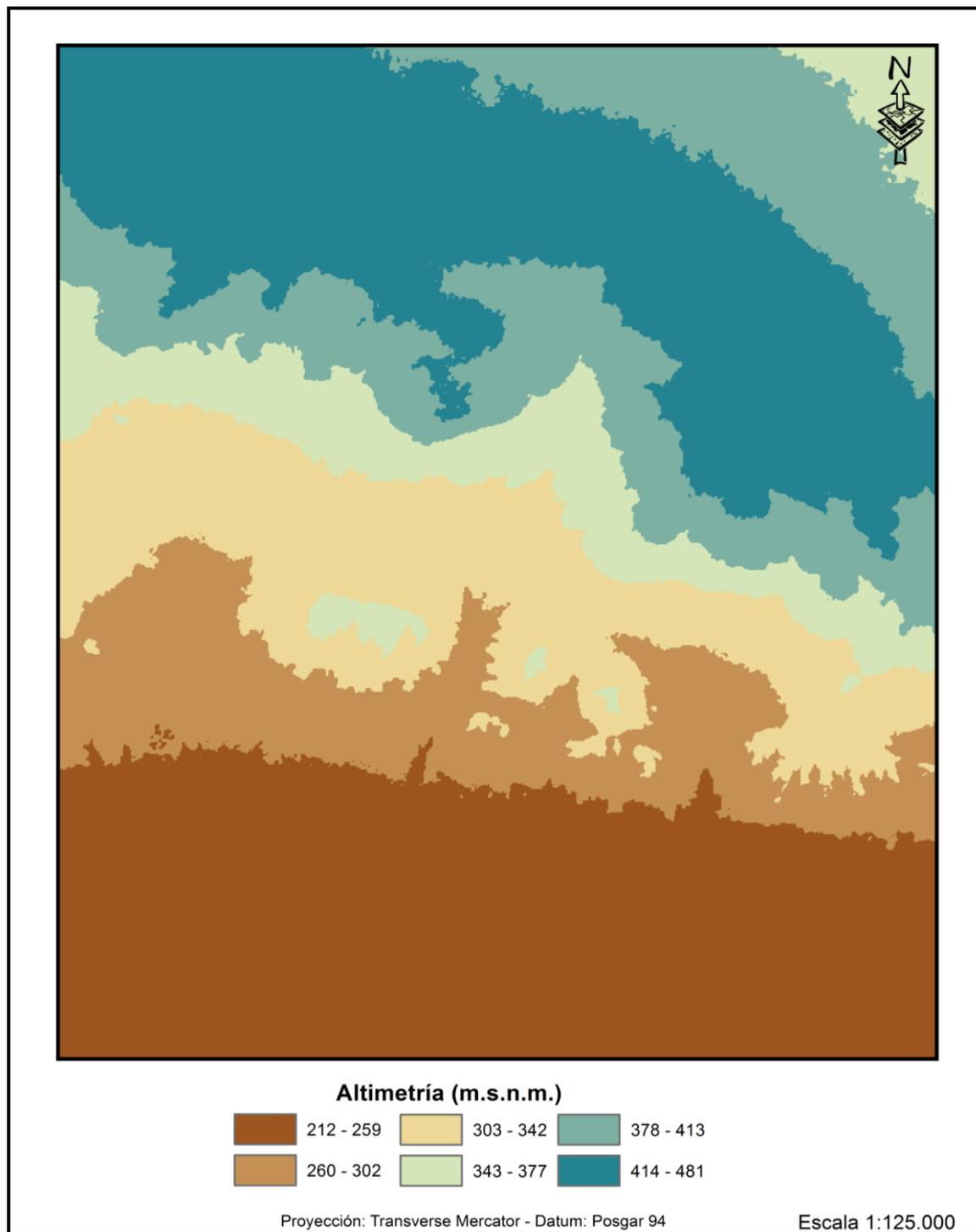


Figura 3.3.- Modelo Digital del Terreno de la ZDA. (Instituto Geográfico Nacional)

### 3.2.3. Delimitación de cuencas aluvionales.

Aplicando las herramientas de ArcToolbox (ArcGis), en particular la extensión Spatial Analyst sobre el MDT de la ZDA, se delimitaron e identificaron las cuencas Roca y Catini, y sus respectivas redes de drenaje. A continuación se describen las operaciones que se llevaron a cabo:

1. *Quemado del MDT.* El quemado es un mecanismo cuyo objetivo es el de mejorar el

delineamiento de la red de drenaje. Su procedimiento es el siguiente: se realiza una red hidrográfica manual sobre la Imagen Landsat de la ZDA en Gis, éste shape se transforma en raster para poder trasladarlo sobre el MDT y sustraerlo al mismo. La sustracción se ejecuta con la herramienta Raster Calculator.

2. *Aplicación de la herramienta fill.* La herramienta fill rellena celdas bajas y elimina picos del MDT quemado. La aplicación de esta herramienta permite evitar incompatibilidades en el proceso de escorrentía.

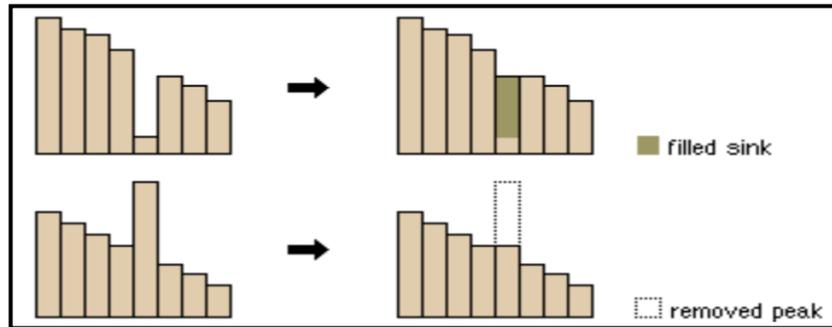


Figura 3.4.- Relleno de celdas y eliminación de picos.(ArcGIS)

3. *Determinación de la Dirección de Flujo.* Mediante el modelo D8, se identifica hacia donde fluye cada celda.

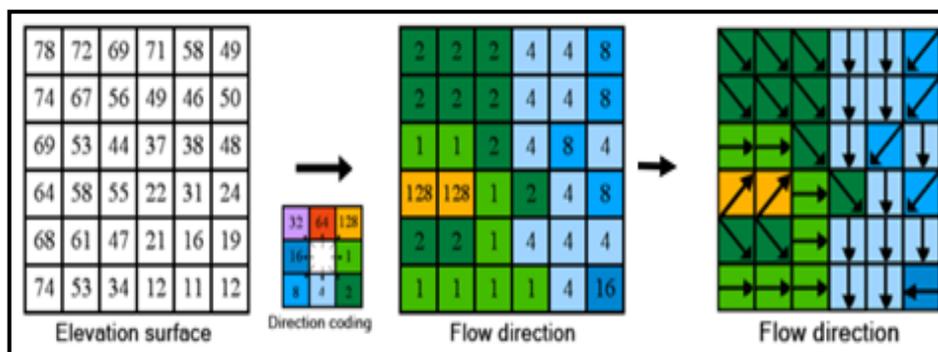
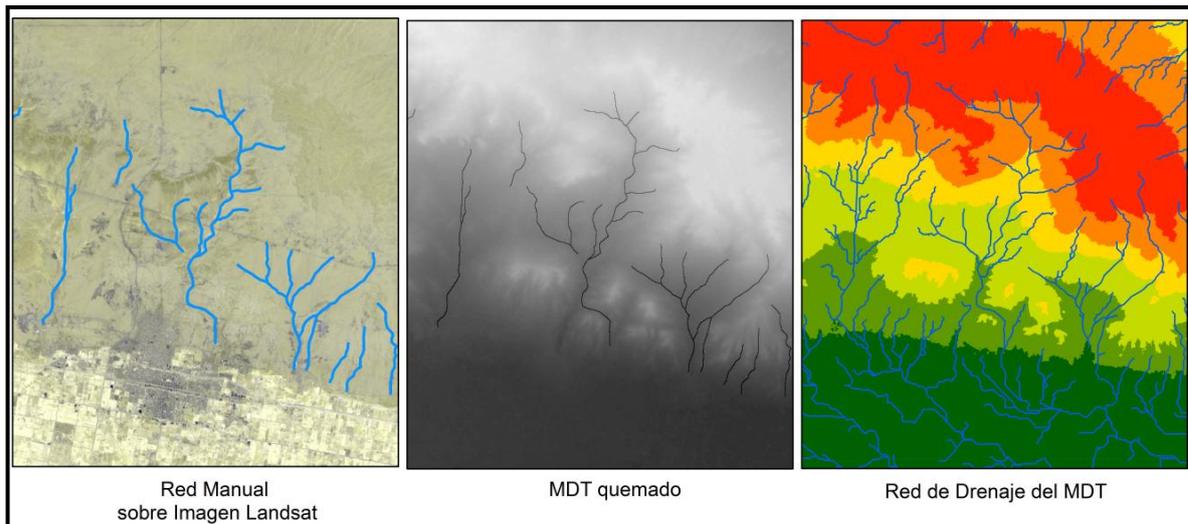


Figura 3.5.- Dirección de Flujo. Modelo D8.(ArcGIS)

4. *Cálculo de la Acumulación del Flujo.* Se evalúa el área de drenaje en áreas de celda.
5. *Identificación de las celdas de las corrientes.* Se determinan aquellas celdas con un valor de acumulación de flujo superior a un cierto umbral definido (en la siguiente tesis se considera un umbral de 1000 celdas).
6. *Identificación de los vínculos (o puntos de salida).* Se asigna un número a cada tramo o segmento de la red de drenaje.
7. Determinación de la red de drenaje.
8. Delineación de las cuencas aluvionales. Los puntos de cierre de cada cuenca se definieron al intersectar la red de drenaje resultante con los diques Roca y Catini, definiendo así los puntos críticos para el análisis.

En la **Figura 3.6** se vislumbra el proceso de quemado del MDT, y la red hidrográfica obtenida.



*Figura 3.6 - Proceso de quemado y obtención de la red de drenaje.*

En la **Tabla 3.2** se dan las coordenadas planas del cierre de cada cuenca, y en la **Figura 3.7** se muestran las cuencas aluvionales determinadas a través del procedimiento expuesto.

Cuencas	X	Y
1	2624501,74	5684627,4
2	2625642,19	5681294,84

*Tabla 3.2.- Coordenadas de los puntos de cierre de las cuencas aluvionales.*

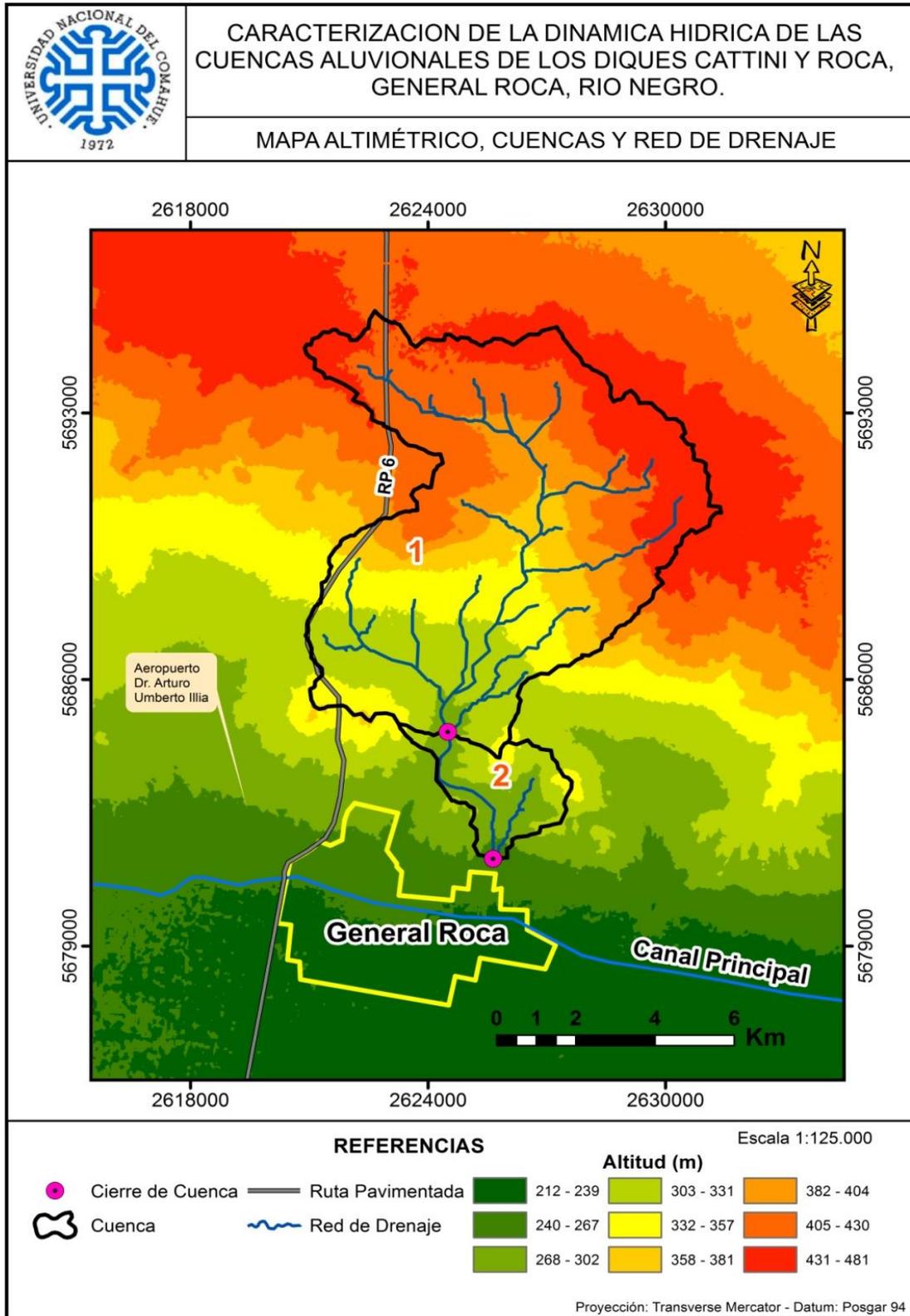


Figura 3.7- Mapa altimétrico, cuencas aluvionales y red de drenaje.

### 3.2.4. Caracterización de cuencas aluvionales.

Utilizando la tabla de atributos de los archivos obtenidos en ArcGis y el software Microsoft Excel, se realizó la determinación de los parámetros morfométricos que caracterizan las cuencas identificadas dentro de ambiente SIG.

En la **Tabla 3.3** se presentan los parámetros morfométricos principales de las cuencas identificadas:

Cuenca	Superficie (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Hmáx. (m)	Hmín. (m)	ΔH (m)
Roca	73,79	46,19	450	291	159
Catini	7,41	14,38	358	257	101

*Tabla 3.3- Parámetros morfométricos principales.*

Según lo establecido en el apartado 2.4.1 ambas cuencas son pequeñas, se observa que la cuenca Roca es 10 veces mayor que la Catini, y por lo tanto la de mayor interés en nuestro análisis.

A los efectos de obtener las características de las cuencas aluvionales, es necesario conocer los *Parámetros Físicos de Forma y de Relieve*, y los relativos a la *Red Hidrográfica*. Estos se obtienen a partir de los Parámetros Principales, el MDT y de la red de drenaje de cada cuenca.

#### 1. Parámetros físicos de forma.

En la **Tabla 3.4** se muestran los valores obtenidos para cada una de las cuencas consideradas.

Cuenca	Rf	Cg
Roca	0,36	1,52
Catini	0,39	1,49

*Tabla 3.4- Parámetros de forma.*

Siendo Rf: índice de la cuenca y Cg: índice de Gravelius. El factor Rf indica que ambas presentan baja susceptibilidad a las inundaciones. El factor Cg nos indica que la cuenca Roca posee forma rectangular oblonga y la cuenca Catini oval oblonga.

#### 2. Parámetros físicos de relieve.

La **Figura 3.8** muestra las curvas hipsométricas de las cuencas analizadas. Las curvas 1, 2 y 3 son las curvas hipsométricas guías. Su interpretación se detalla en el apartado 2.4.3.

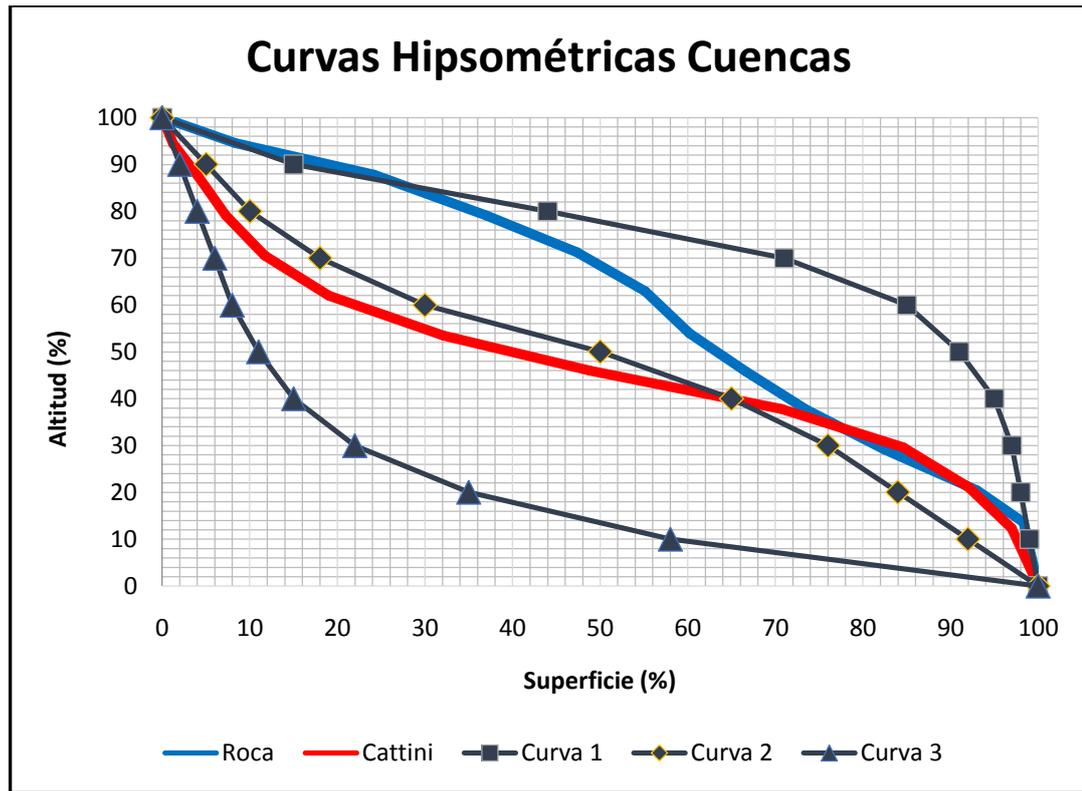


Figura 3.8.-Curvas hipsométricas cuencas.

En la **Tabla 3.5**, se encuentra determinada la Integral Hipsométrica (IH), que representa el área bajo la curva hipsométrica correspondiente.

Cuenca	IH	Etapas
Roca	0,62	Juventud
Catini	0,47	Madurez

Tabla 3.5- Valores de integral hipsométrica.

Se puede observar a partir de la **Figura 3.8** y del valor de IH, que la cuenca Roca se encuentra en su fase de juventud, y en consecuencia refleja una cuenca con potencial erosivo alto. Por otro lado la cuenca Catini, es característica de una cuenca en equilibrio.

Seguidamente en la **Tabla 3.6** se presentan los valores obtenidos de altura media (Hm), pendiente media (Im), coeficiente de masividad (Cm) y coeficiente orográfico (CO) de cada cuenca.

Cuenca	Hm (m)	Im (%)	CM (m <sup>-1</sup> )	CO
Roca	383.31	3.10	5.19E-06	1.99
Catini	300.68	5.54	4.06E-05	12.20

Tabla 3.6- Parámetros físicos de relieve.

El coeficiente orográfico (CO) indica que la cuenca Roca presenta un relieve poco acentuado, y la cuenca Catini un relieve acentuado.

### 3. Parámetros relativos a la red hidrográfica.

Los parámetros relativos a la red hidrográfica tales como: Densidad de drenaje (Dd), Pendiente media del cauce (Jc) y Tiempo de concentración (Tc), se indican en la **Tabla 3.7**.

Cuenca	Dd (km/km <sup>2</sup> )	Lc (km)	Jc (%)	Tc (hs)
Roca	0,74	14,32	2,66	4,52
Catini	0,96	4,36	4,22	1,68

Tabla 3.7- Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica.

En función de los valores obtenidos para la densidad de drenaje (Dd), se puede establecer que ambas cuencas poseen un drenaje media ante una precipitación.

Analizando los valores de la pendiente media del cauce principal para cada cuenca, se observó que ambas presentan un relieve llano a suave. (Campos Aranda, 1998)

#### 3.3. Determinación del potencial de escorrentía - Índice CN.

La determinación del índice CN se realizó siguiendo la metodología propuesta en la **Figura 2.11**, haciendo uso del software ArcMap 10.3. Primero se obtiene un Mapa “CN I” mediante la tabulación cruzada de los mapas de Cobertura y Uso del Suelo (MCUS), y el de Grupo Hidrológico de Suelos (MGHS), utilizando una tabla de clasificación que depende de ambos parámetros la cual fue elaborada para la zona de estudio. Luego se obtiene el mapa “CN II Pendiente” por medio de algebra de mapas, y finalmente el Mapa del Potencial de Escorrentía por medio de la reclasificación del Mapa de Rangos Índice CN.

##### 3.3.1. Mapa de cobertura y usos del suelo (MCUS).

La determinación del Mapa de Cobertura y Uso del Suelo, se realizó a través de una *clasificación supervisada* de la Imagen Landsat 8 de la ZDA obtenida previamente. El procesamiento digital de dicha imagen se llevó a cabo en el software ERDAS IMAGINE 14.0, haciendo uso de los módulos DRAWING y RASTER/SUPERVISED; de éste último se emplearon los comandos: SIGNATURE EDITOR y SUPERVISED CLASIFICATION.

Luego de componer la imagen usando 7 bandas espectrales de las 11 que posee el satélite LANDSAT 8 y del cambio de proyección al sistema POSGAR94-Faja2, se procedió a analizar distintas combinaciones de bandas espectrales con la finalidad de seleccionar aquellas que tuvieran mayor contraste entre sus niveles digitales (ND) y permitieran la mejor discriminación de las distintas coberturas y usos del suelo. Se generaron las composiciones color RGB (bandas 345), RGB (bandas 543) y RGB (bandas 245), con realces y contrastes visuales, según los objetivos temáticos planteados.

Se seleccionó la combinación RGB (bandas 543), por su capacidad de discriminar los elementos de interés (Ver **Figura 3.9**).

Luego se definieron las *clases* de coberturas y usos del suelo de la ZDA, **Tabla 3.8**; establecidas mediante el conocimiento previo del campo e interpretación visual de la imagen satelital.

Cobertura y Uso del suelo	Color
Cultivos (fruti-hortícola)	Verde
Estepa arbustiva	Amarillo
Suelo desnudo	Marrón
Área urbana	Gris

*Tabla 3.8.- Coberturas y Usos del Suelo.*

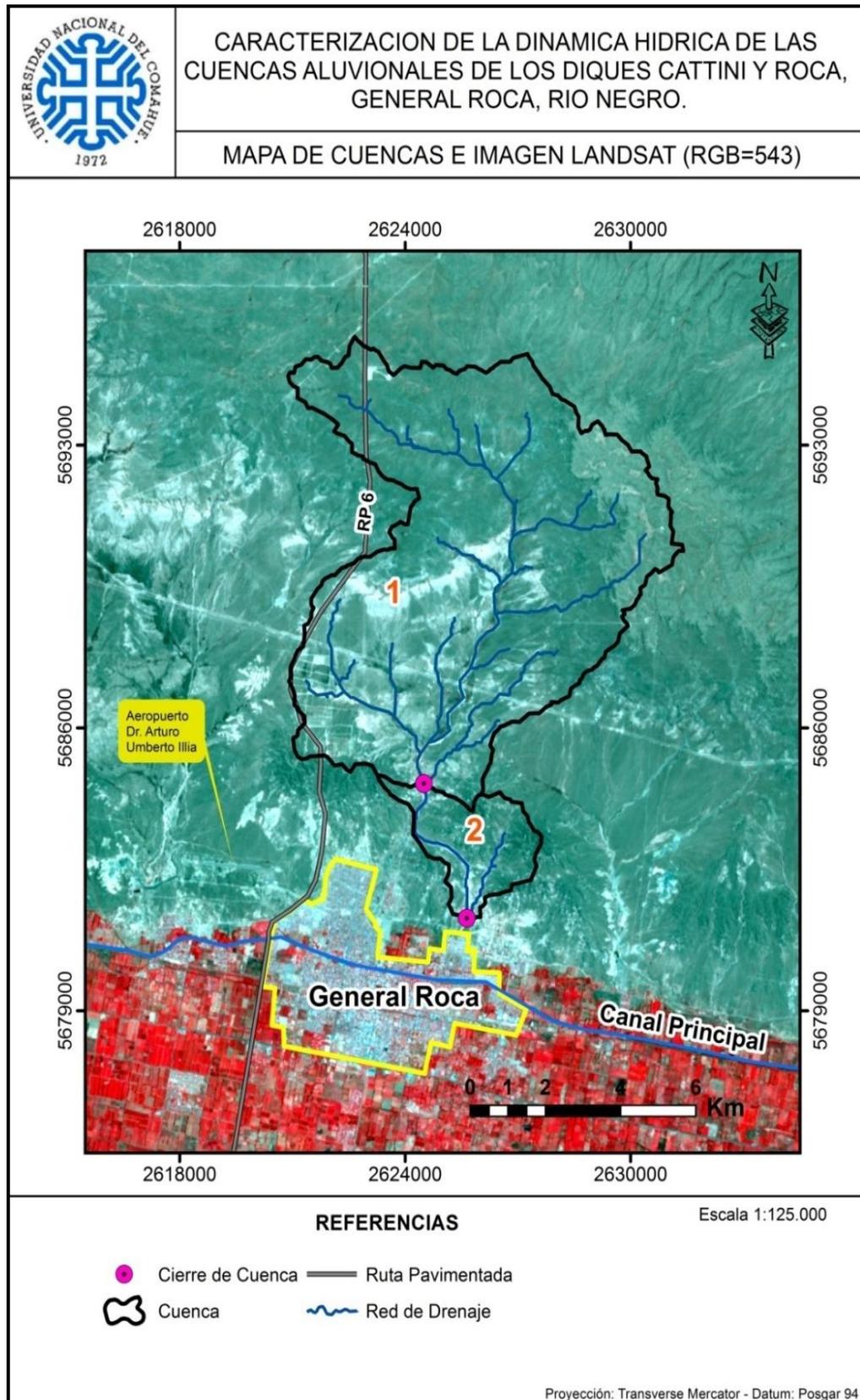


Figura 3.9 - Mapa Imagen Satelital LANDSAT 8 de la ZDA (RGB 543) en ERDAS.IMAGINE V.14.

Una vez definidas las clases, se hizo uso de la herramienta *drawing*, con la misma se establecieron sobre la imagen satelital las AOI “áreas de interés o entrenamiento” (**Tabla 3.9**); éstas se incluyeron en SIGNATURE EDITOR “*editor de firmas*”.

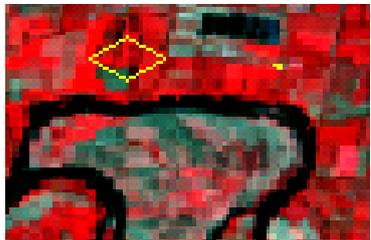
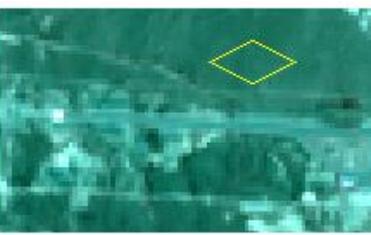
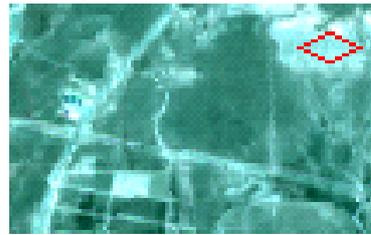
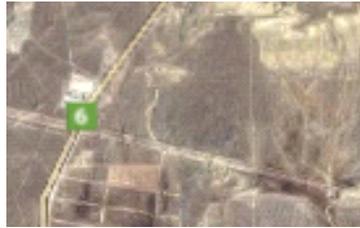
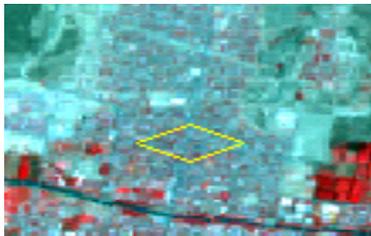
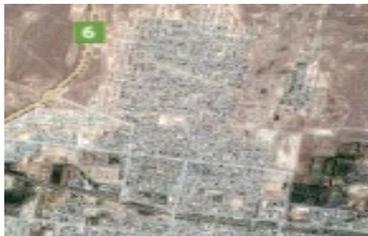
Cultivos (fruti-hortícola)		
Estepa Arbustiva		
Suelo Desnudo		
Área Urbana.		

Tabla 3.9.- Áreas de entrenamiento.(Google Maps)

Posteriormente se realizó la *Clasificación Supervisada* de la imagen con el método *Máxima Probabilidad*, y se revisó cada zona verificando la concordancia entre la cobertura asignada por el software y la que realmente existe, finalmente se *reclasificó* donde se hallaron discrepancias. El resultado obtenido es un mapa temático de Cobertura y Uso del Suelo (**Figura 3.10**), que se utilizó para la obtención de Mapa CN I.

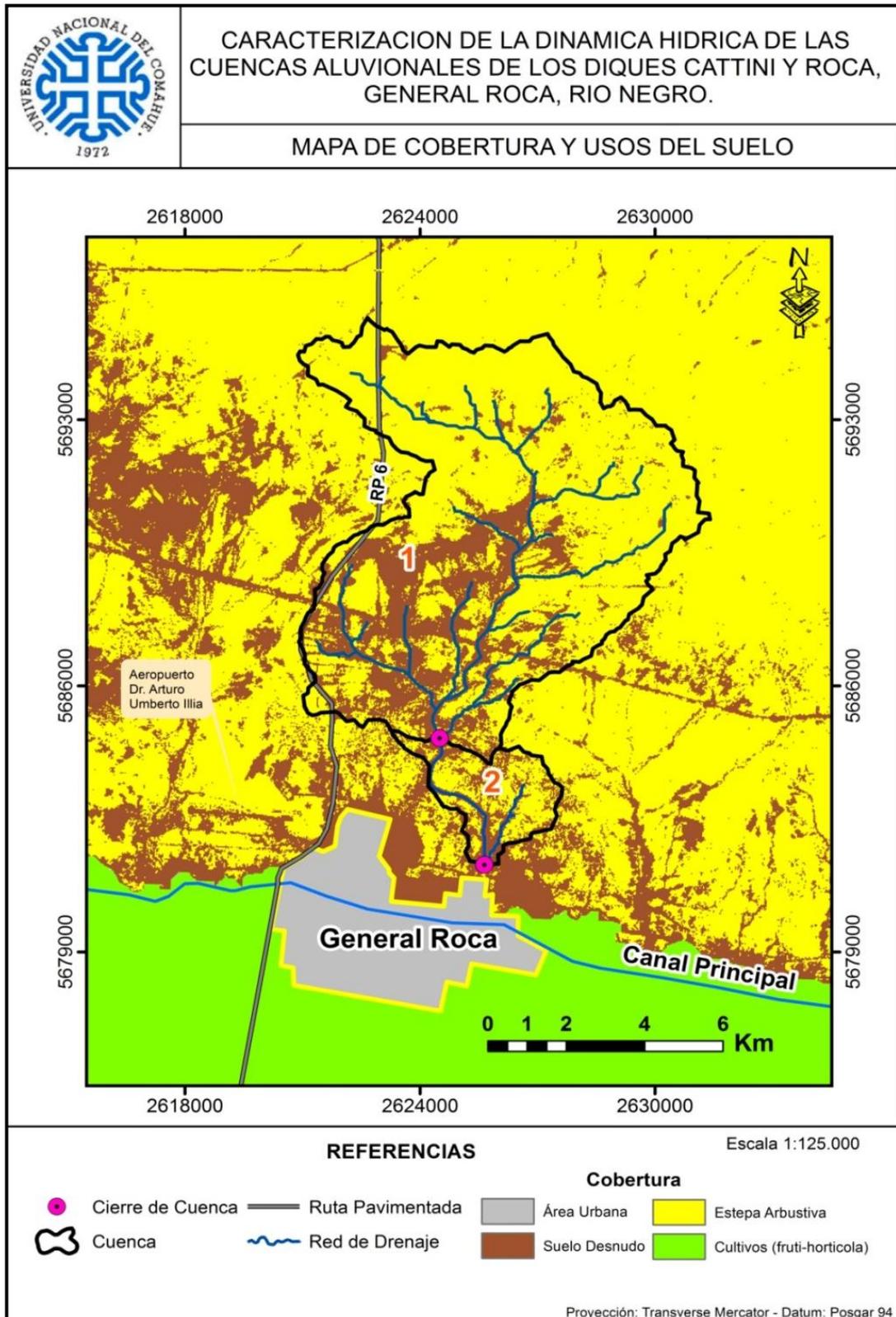


Figura 3.10 - Mapa de Coberturas y Usos del Suelo (MCUS).

### 3.3.2. Mapa del Grupo Hidrológico de Suelo (MGHS)

Del *Atlas de Suelos de la República Argentina* elaborado por el INTA, se obtuvieron las distintas texturas de los suelos presentes en la ZDA (**Figura 3.11**). Este Mapa de Texturas fue retroproyectado al sistema POSGAR94-Faja 2. Luego tomando los datos de la **Tabla 3.10**, y las características texturales de los suelos de las cuencas en análisis, se confeccionó el mapa de GHS (ver **Figura 3.12**).

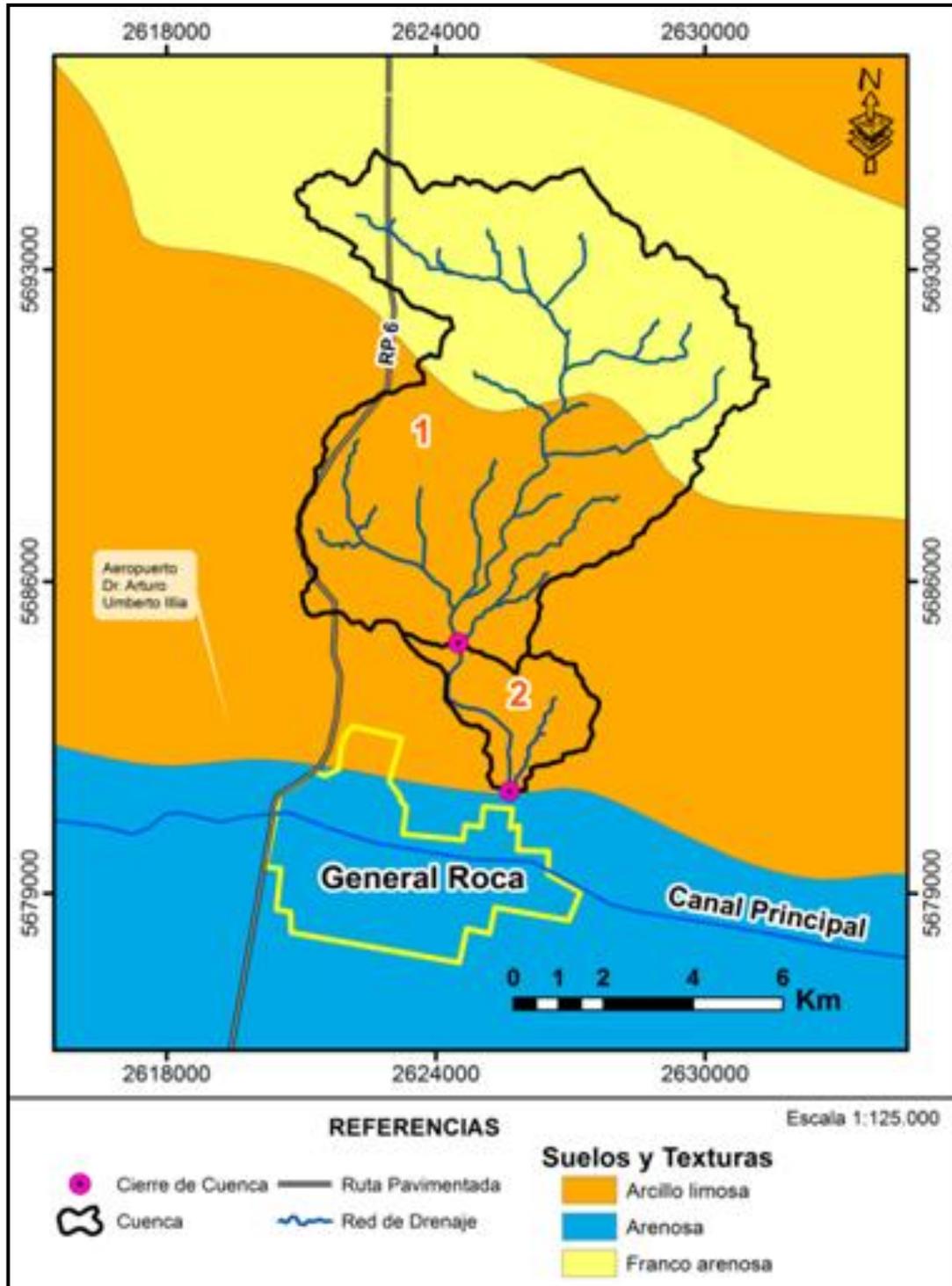
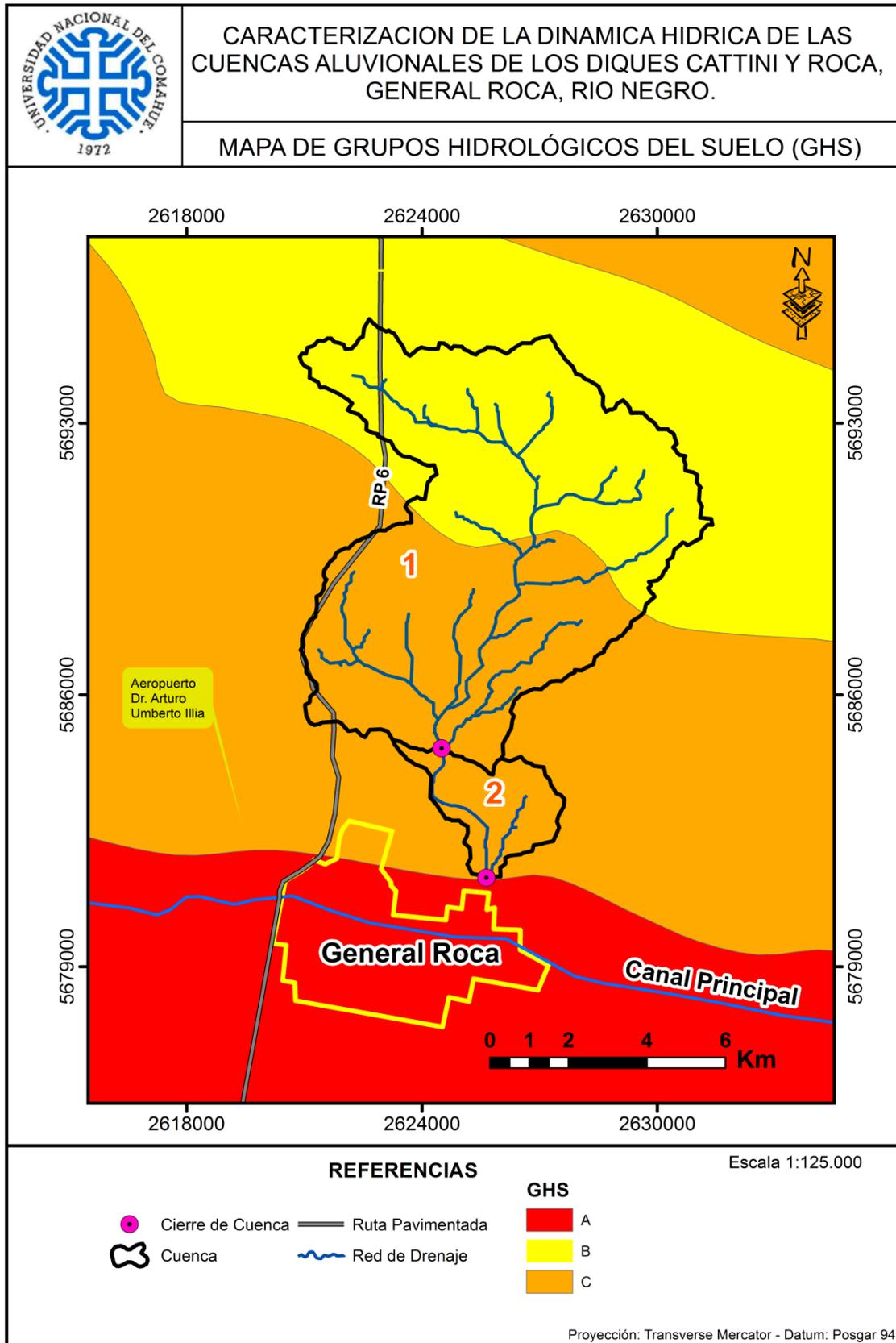


Figura 3.11- Mapa de Texturas de Suelos.

<b>GHS</b>	<b>Potencial de Escorrentía</b>	<b>Infiltración</b>	<b>Suelos Típicos</b>	<b>Texturas</b>
A	Escaso	Alta	Arenas y gravas excesivamente drenadas.	Arenosa. Areno-limosa.
B	Moderado	Moderada	Texturas medias.	Franco Arenosa. Franca. Franco-arcillosa arenosa. Franco-limosa.
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo.	Franco-arcillosa. Franco-arcillosa limosa. Arcillo arenosa.
D	Elevado	Muy Lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables.	Arcillosa.

*Tabla 3.10.-Grupos hidrológicos de suelo según el SCS (USDA). (López Alonso, 2001)*



### 3.3.3. Algebra de Mapas. Tabulación Cruzada.

Siguiendo el esquema establecido en la **Figura 2.11**, se realizó la tabulación cruzada entre el Mapa de Cobertura y Usos del Suelo (MCUS) y el de Grupo Hidrológico de Suelo (MGHS), luego se lo clasificó mediante la **Tabla 3.11** y se agrupó en rangos convenientes, obteniéndose el “Mapa Índice CN”.

	CN			
	Clasificación Hidrológica de Suelos			
Cobertura	A	B	C	D
Cultivos (fruti-horticultura)	30	58	71	78
Estepa Arbustiva	60	70	80	84
Suelo Desnudo	72	82	87	90
Área Urbana	77	85	90	92

*Tabla 3.11 - Clasificación para el cálculo del Índice CN. (Rapacioli R. , 2007)*

El valor de CN distribuido que se obtuvo es para la condición de Antecedente de Humedad Media (AMCII), y es el que se muestra en la **Figura 3.13**.

### 3.3.4. Mapa de Pendientes.

El mapa de pendientes se obtuvo a partir del MDT de la ZDA, haciendo uso de la herramienta *Spatial Analyst* en ArcMap 10.3.

### 3.3.5. Mapa del Potencial de Escorrentía. Índice CN.

Obtenidos los mapas del modelo cartográfico se procede a la obtención del “Mapa CN II pendiente”, considerando el estado de humedad antecedente II (**Figura 3.14**). Al reclasificar este mapa de acuerdo a la **Tabla 3.12**, se obtiene el “Mapa de Potencial de Escorrentía” considerando el estado de humedad antecedente II (AMCII) (**Figura 3.15**).

Rango CN	Potencial Escorrentía
31-40	Bajo (1)
40-75	Medio (2)
75-93	Alto (3)

*Tabla 3.12- Clasificación del Potencial de Escorrentía en función del índice CN.*

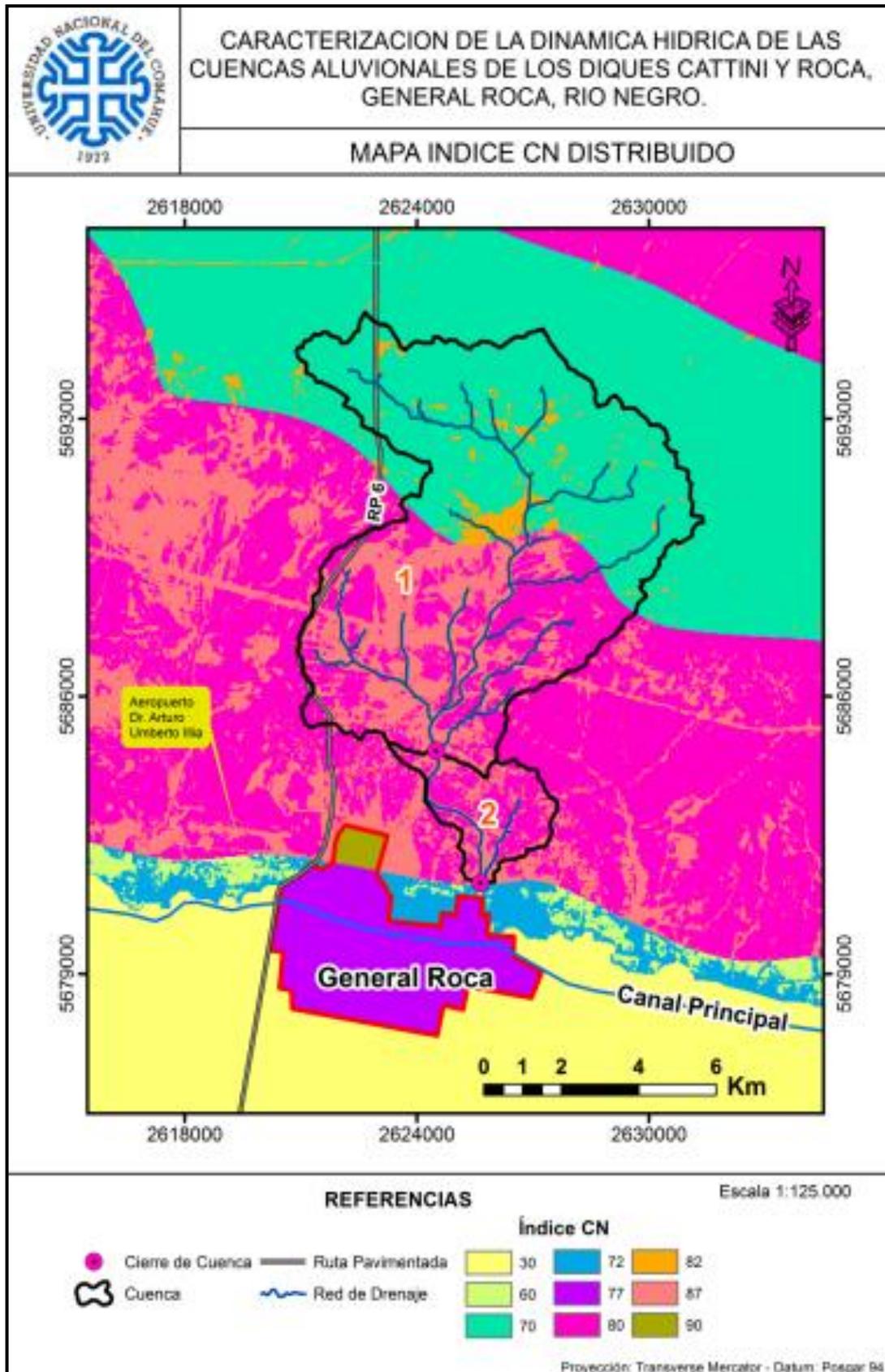


Figura 3.13.- Mapa Índice CN I.

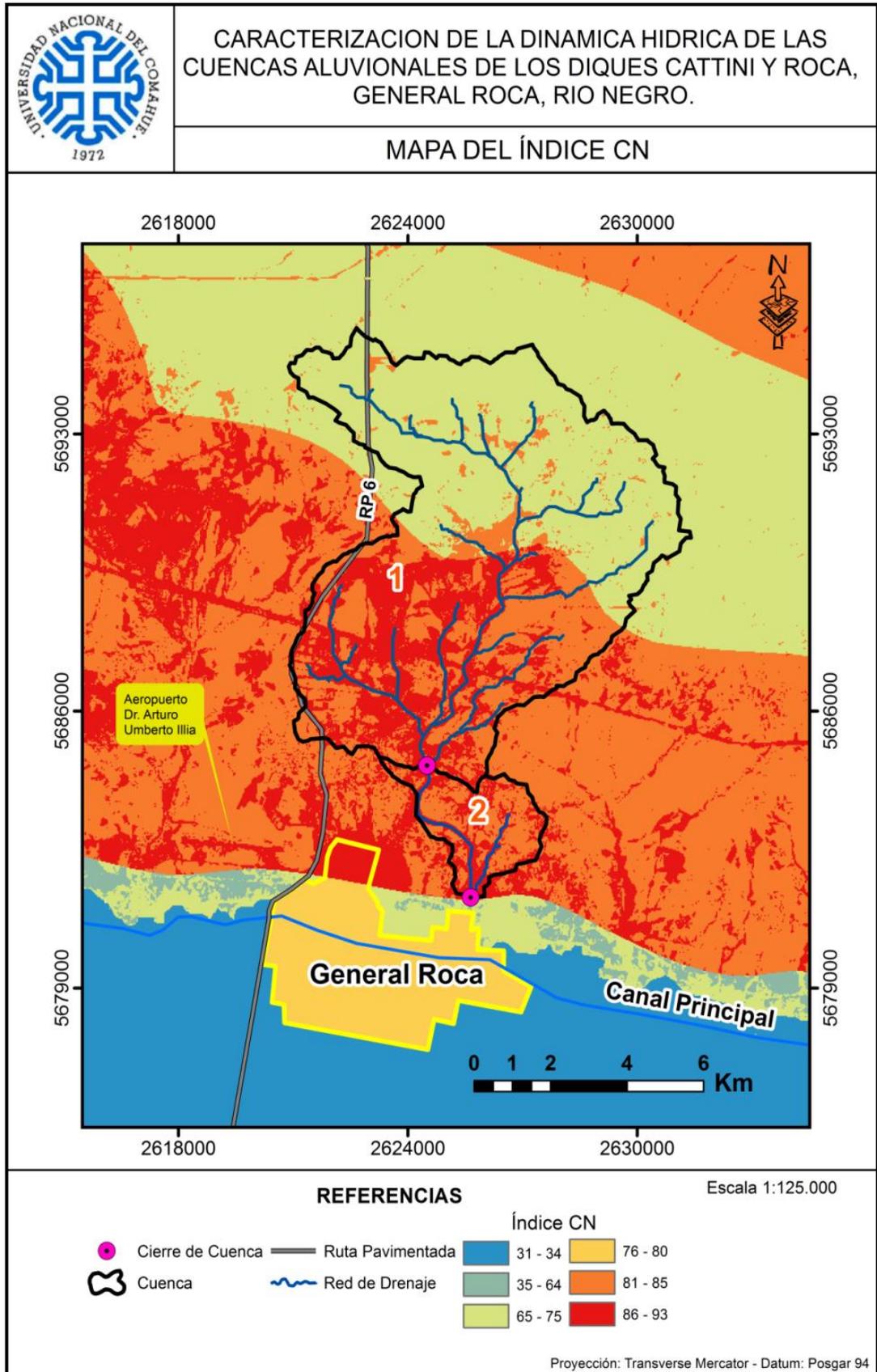


Figura 3.14- Mapa del Índice CN II pendiente.

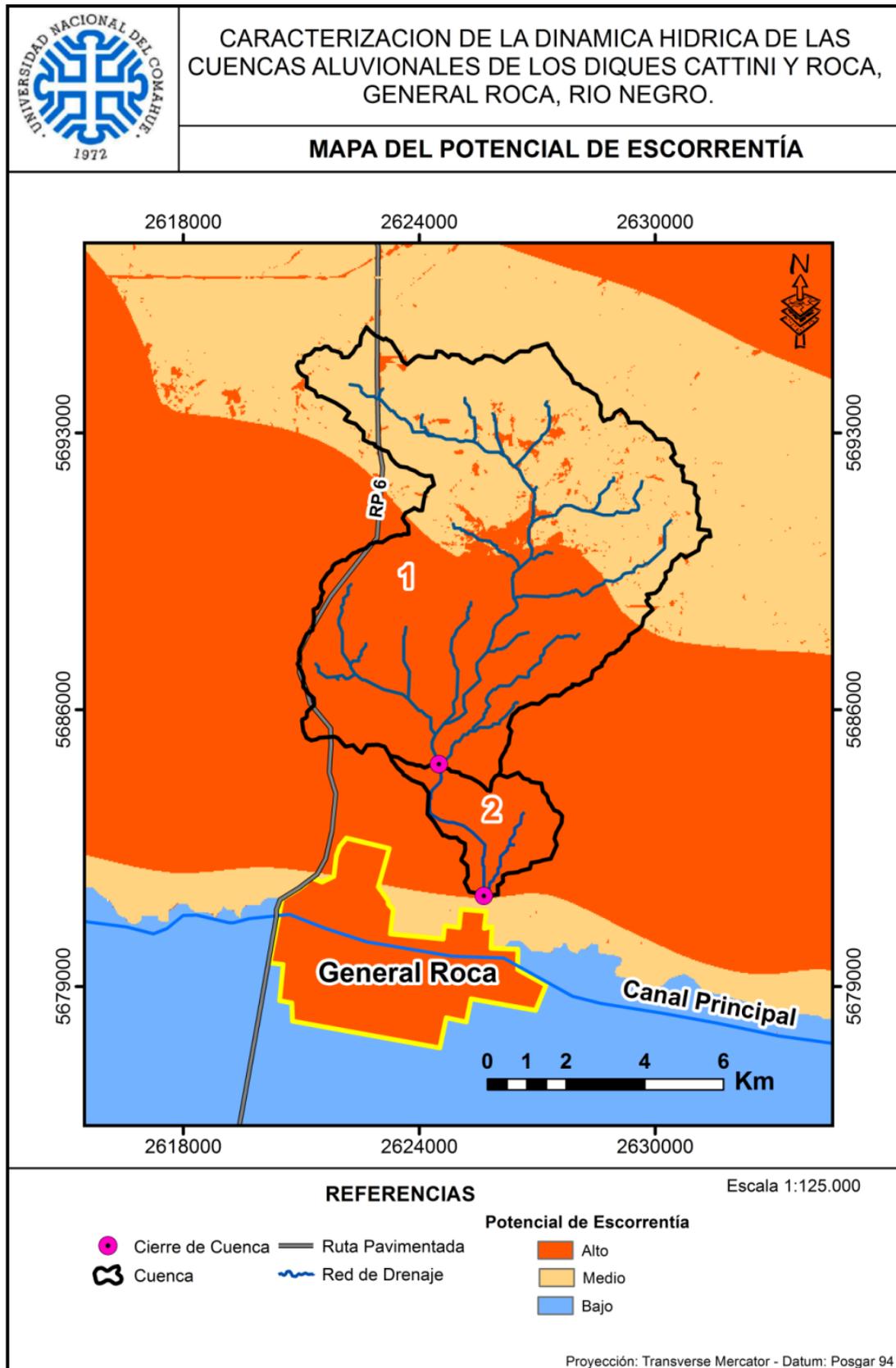


Figura 3.15- Mapa de Potencial de Escorrentía.

En la **Tabla 3.13** se dan los valores promedios del índice CN para los tres estados de humedad antecedentes (AMC) para las cuencas en análisis.

Cuenca	CN (AMC I)	CN (AMC II)	CN (AMC III)
Roca	61.66	79.29	89.80
Catini	71.42	85.61	93.19

*Tabla 3.13 - Valores del índice CN.*

De la tabla anterior se observa que los índices CN para los estados AMCII y AMCIII son elevados, indicando un nivel de permeabilidad de medio a elevado, lo que implica que escurrirá por superficie la mayor parte de las precipitaciones intensas que se produzcan sobre las cuencas.

### **3.4. Precipitaciones Intensas. Tormentas de Proyecto.**

Las tormentas de proyecto o diseño, son patrones de precipitación definidos para utilizarse en el cálculo de la escorrentía y el diseño de obras hidráulicas. Se construyen a partir de información histórica, teniendo en cuenta las características generales de la precipitación en la zona donde se aplicarán. Las tormentas de diseño en la presente tesis se definirán mediante HIETOGRAMAS ACUMULADOS de Huff, que especifican la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta de determinada duración.

#### **3.4.1. Recopilación y tratamiento de la información.**

Los datos de precipitaciones obtenidos y procesados en la presente tesis corresponden a la estación meteorológica de Cipolletti, perteneciente al servicio meteorológico nacional. La elección de esta estación meteorológica ubicada a 50 km de la zona de estudio, fue seleccionada por encima de las otras opciones debido a que presentaba gran cantidad de mediciones realizadas durante la vida útil del embalse y se encontraba a una distancia cercana de la zona de estudio.

De la documentación obrante en el Servicio Meteorológico Nacional dependiente actualmente de la Fuerza Aérea Argentina, surge que la Estación Meteorológica Cipolletti quedó instalada el 1 de noviembre de 1902. (Negro, 2003).

Actualmente la estación meteorológica se encuentra ubicada en las coordenadas Lat. -38.940955, Long -67.978544- A 265 msnm.

#### **3.4.2. Umbral de precipitación**

La serie de Pd se ordenó de mayor a menor, y se seleccionaron aquellas precipitaciones que superaran un umbral de **20 mm**. De dicha manera, quedó conformada una *serie de duración parcial* de 60 valores (apartado 2.5.4.1), dichos datos se encuentran tabulados en el **Anexo 7.1**.

#### **3.4.3. Ajuste estadístico mediante distribución de probabilidad.**

Una vez determinada y ordenada de modo decreciente la serie de duración parcial, se procedió al

cálculo de la posición de graficación mediante la fórmula de Hazen (**Ecuación 2.12**). Dichas probabilidades fueron ajustadas mediante la distribución de probabilidad GEV (*General Extreme Values - General de Valores Extremos*), luego de realizada la correspondiente prueba de bondad de ajuste. En el **Anexo 7.2**, se detallan los resultados de dicha prueba realizada mediante el software *EasyFit 5.5*.

Del ajuste se obtuvieron los siguientes parámetros de la función, resumidos en la siguiente tabla:

$\mu$ (mm)	$\sigma$ (mm)	k
25,392	6,5828	0,39091

Tabla 3.14.- Parámetros de la función GEV.

Por lo tanto, la función distribución de probabilidad acumulada GEV resulta:

$$F(x) = e^{\left[ -(1+0.39091.z)^{-\left(\frac{1}{0.39091}\right)} \right]} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En la **Figura 3.6** se puede vislumbrar el ajuste respectivo.

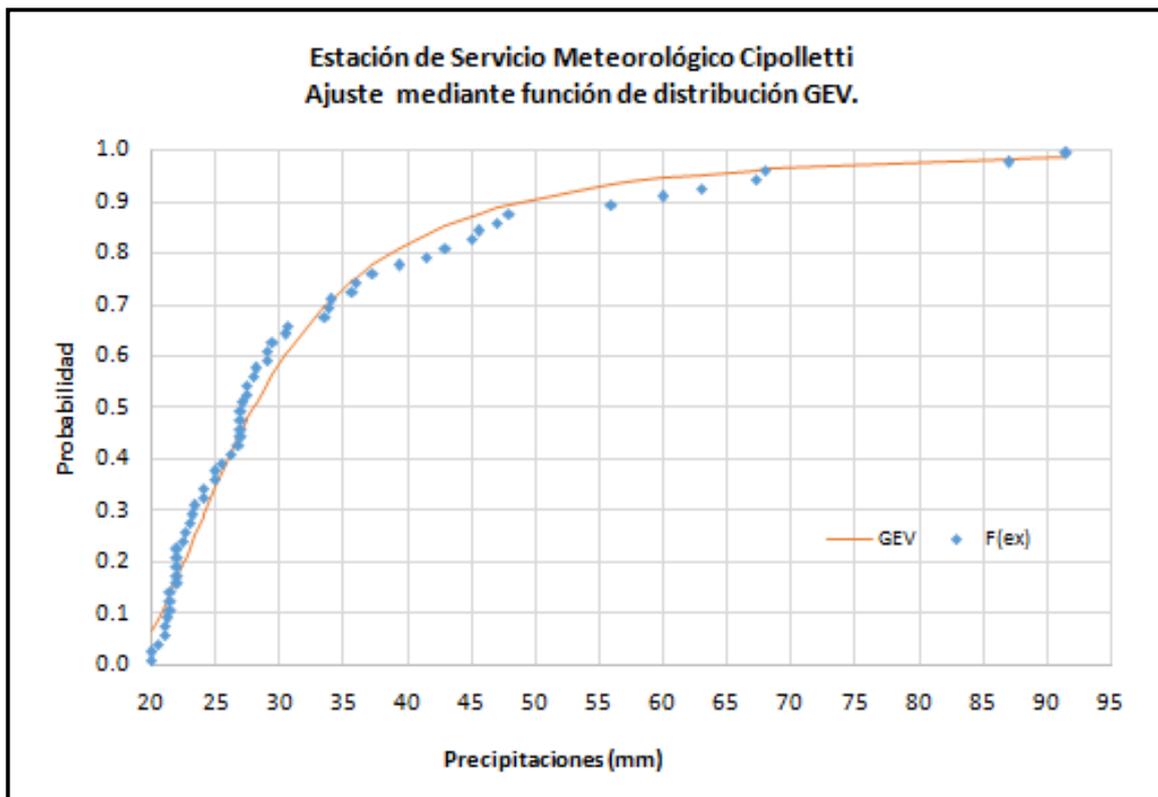


Figura 3.16.- Ajuste GEV de la Probabilidad de  $Pd_{máx}$  para la Estación Cipolletti.

#### 3.4.4. Cálculo de $Pd_{máx}$ para distintos TR.

Como la función de probabilidad GEV es invertible, es decir, dado un valor para TR o  $F(Pd_{máx} < Pd_{máx}^*) = TR/(TR-1)$ , entonces el valor de  $Pd_{máx}$  puede determinarse para distintos TR a través de la **Ecuación 2.14**.

En la **Tabla 3.15** se muestran los resultados obtenidos.

TR (años)	Pd <sub>max</sub> (mm)
2	27,99
5	38,82
10	49,14
25	67,35
50	85,96
100	110,25
500	199,63
1000	259,15

Tabla 3.15.- Precipitaciones Diarias Máximas para distintos TR.

### 3.4.5. Cálculo de precipitación de una hora de duración ( $P_{24}$ ) y de la Intensidad media máxima de lluvia de 24 hs ( $I_{24}$ ).

Con el fin de definir las Precipitaciones Máximas en 24 horas ( $P_{24}$ ) a partir de las Precipitaciones Diarias Máximas ( $P_{d\max}$ ), se hizo uso de la **Ecuación 2.15** y se aplicaron los “coeficientes k” dados para los distintos TR expresados en la **Tabla 2.6** (Apartado 2.5.5.2).

Luego, se obtuvieron las Intensidades medias máximas de la lluvia en 24 horas “ $I_{24}$ ” asociadas a cada  $P_{24}$ , dadas por la **Ecuación 2.16**. En la **Tabla 3.16** se adjuntan los resultados obtenidos.

TR (años)	k = $P_{24}/P_d$	Pd (mm)	$P_{24}$ (mm)	$I_{24}$ (mm/hs)
2	1,13	27,99	31,6	1,32
5	1,13	38,82	43,9	1,83
10	1,13	49,14	55,7	2,32
25	1,14	67,35	76,8	3,20
50	1,15	85,96	98,9	4,12
100	1,15	110,25	126,8	5,28
500	1,15	199,63	229,6	9,57
1000	1,15	259,15	298	12,42

Tabla 3.16.- Precipitaciones e Intensidades medias máximas de 24 hs. para cada TR.

### 3.4.6. Determinación del coeficiente adimensional “n” y cálculo de Intensidades.

De acuerdo con los estudios de precipitaciones intensas realizados en la zona de Alto Valle del Río Negro (Inconas - Latino Consult, 1988 - Rapacioli y Marizza, 1996-2000) y en la provincia del Neuquén (Rühle, 1986 - Rapacioli, 2010 - Rapacioli y D’Amico, 2013), las precipitaciones que se dan en la Región del Alto Valle Río Negro (RAVRN) son del tipo *efectiva a convectiva*. En base a esos estudios (Rapacioli y D’Amico, Julio 2013) utilizando el Método de la Intensidad Contigua (MIC) obtuvieron curvas generalizadas de intensidad de precipitación para la RAVRN, recomendando la utilización de la **Ecuación 2.17**, para duraciones de tormentas comprendidas entre  $0.5 \leq D \leq 24$  horas. Se puede observar que debido a que el tipo de precipitación es predominantemente convectiva, el valor de n adoptado será

de 0.7, una precipitación con intensidad moderadamente variable (ver **Tabla 2.4**). Al reemplazar los valores se obtiene la siguiente ecuación.

$$\frac{\bar{I}_D}{\bar{I}_{24}} = \left(\frac{24}{D}\right)^{0,7}; \quad I_D = 6.7 \bar{I}_{24} D^{0,7} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Siendo:

$I_D$ : intensidad media máxima de duración D (hrs.),

$\bar{I}_{24}$ : intensidad media máxima de la lluvia de 24 horas en mm/h, obtenida de la precipitación máxima de 24 horas de un determinado TR.

### 3.4.7. Intensidades para distintos tiempos de recurrencia TR. Curvas IDF.

Haciendo uso de la **Ecuación 3.2**, se calcularon las intensidades de precipitación para distintas duraciones D y distintos tiempos de recurrencia TR.

En la **Tabla 3.17**, se muestran los resultados obtenidos.

D	ID = Intensidades de Precipitación (mm/hs)							
Hrs.	TR 2 años	TR 5 años	TR 10 años	TR 25 años	TR 50 años	TR 100 años	TR 500 años	TR 1000 años
0.5	20,15	27,95	35,38	48,49	61,89	79,38	143,74	186,60
1	12,40	17,21	21,78	29,85	38,10	48,87	88,48	114,86
1.5	9,34	12,95	16,40	22,47	28,68	36,79	66,62	86,48
2	7,64	10,59	13,41	18,38	23,45	30,08	54,47	70,71
2.5	6,53	9,06	11,47	15,72	20,06	25,73	46,59	60,48
3	5,75	7,97	10,09	13,83	17,66	22,65	41,01	53,24
3.5	5,16	7,16	9,06	12,42	15,85	20,33	36,81	47,79
4	4,70	6,52	8,25	11,31	14,44	18,52	33,53	43,53
4.5	4,33	6,00	7,60	10,42	13,29	17,05	30,88	40,08
5	4,02	5,58	7,06	9,68	12,35	15,84	28,68	37,23
5.5	3,76	5,22	6,60	9,05	11,55	14,82	26,83	34,83
6	3,54	4,91	6,21	8,52	10,87	13,94	25,24	32,77

Tabla 3.17.- Intensidades de precipitación en mm/hs para cada tiempo de recurrencia TR.

En la **Figura 3.17** se muestran las curvas IDF obtenidas a partir de la tabla anterior para la Estación Meteorológica de Cipolletti.

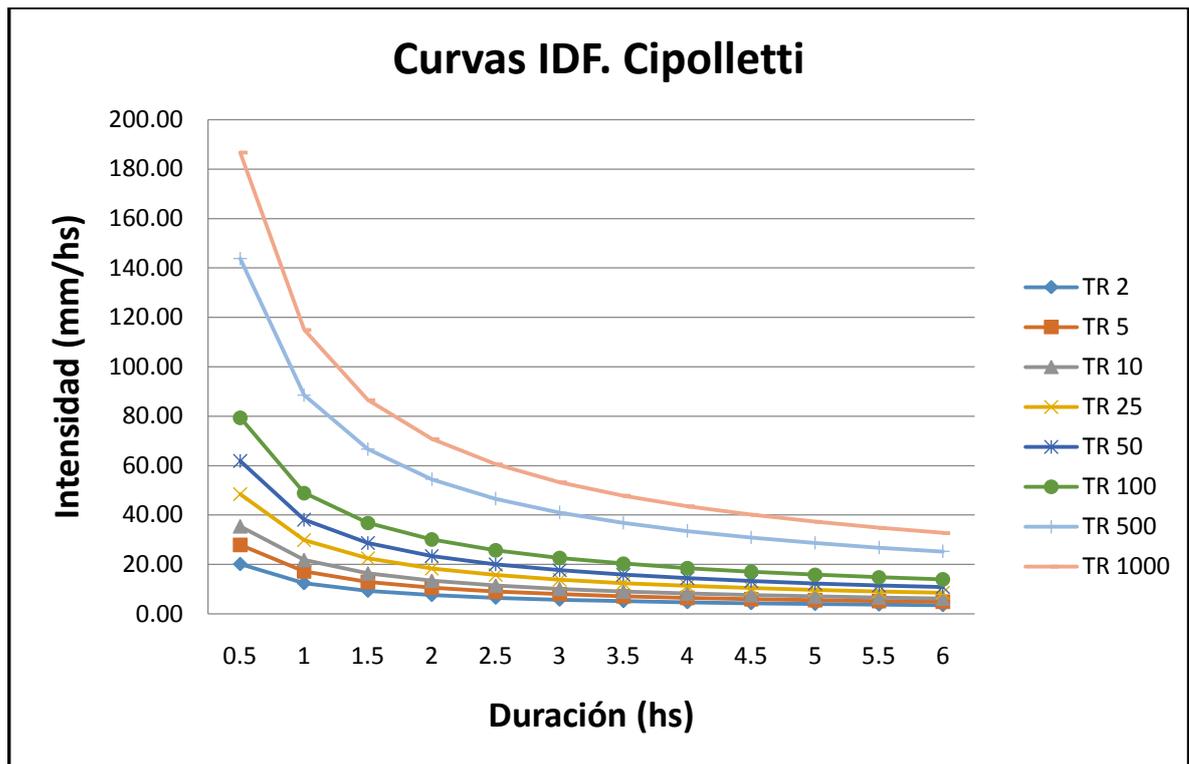


Figura 3.17.- Curvas IDF Cipolletti.

### 3.4.8. Duración de Tormenta.

Las duraciones a utilizar en principio surgen de analizar los tiempos de concentración ( $T_c$ ) de las cuencas. La cuenca Catini posee un  $T_c$  de 1.68 hs y la cuenca Roca un  $T_c$  de 4.52 hs, debido a que la cuenca Roca es la de mayor superficie, se adoptará una duración para la tormenta de proyecto de 5 horas. En base a lo anteriormente expuesto y analizando las curvas IDF, se tienen los siguientes montos de precipitación total para cada recurrencia.

TR (años)	TR2	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100	TR500	TR1000
P (mm)	20.10	27.89	35.30	48.38	61.75	79.19	143.40	186.16

Tabla 3.18.- Precipitaciones totales para tormentas de 5 horas de duración.

### 3.4.9. Tormentas de Proyectos Adoptadas.

La confección de las tormentas de proyecto se realizó con la metodología de Huff (1967, 1990), utilizando el hietograma porcentual correspondiente al primer cuartil, el cual es el adecuado para precipitaciones de duraciones menores o iguales a 6 hrs. (Figura 3.18)

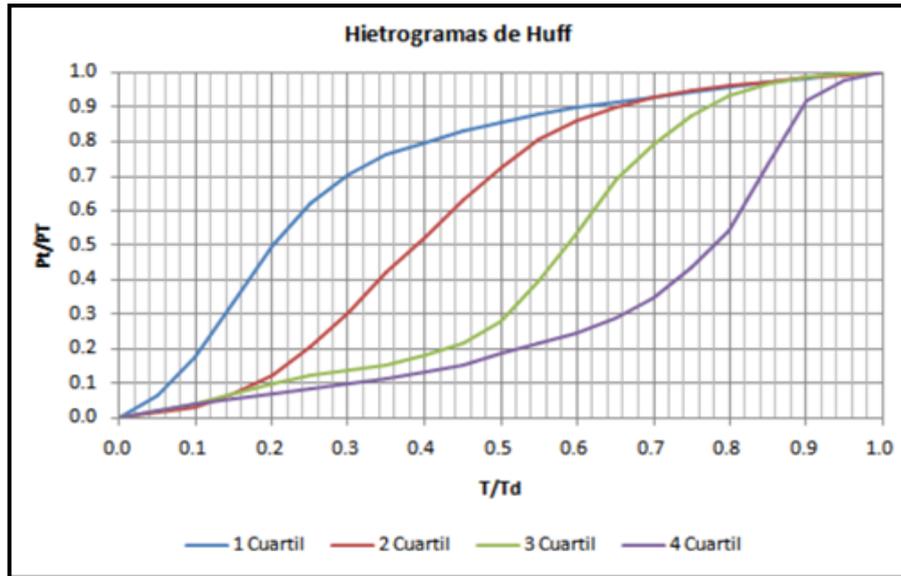


Figura 3.18.- Hietograma adimensional de Huff.(Huff, 1967)

En las siguientes figuras se da el hietograma porcentual obtenido para la duración de 5 horas aplicando la metodología de Huff, y las tormentas de proyectos obtenidas a partir del mismo y de la **Tabla 3.18**.

En el **Anexo 6.4**, se detallan los hietogramas acumulados restantes para cada tiempo de recurrencia y sus respectivos gráficos.

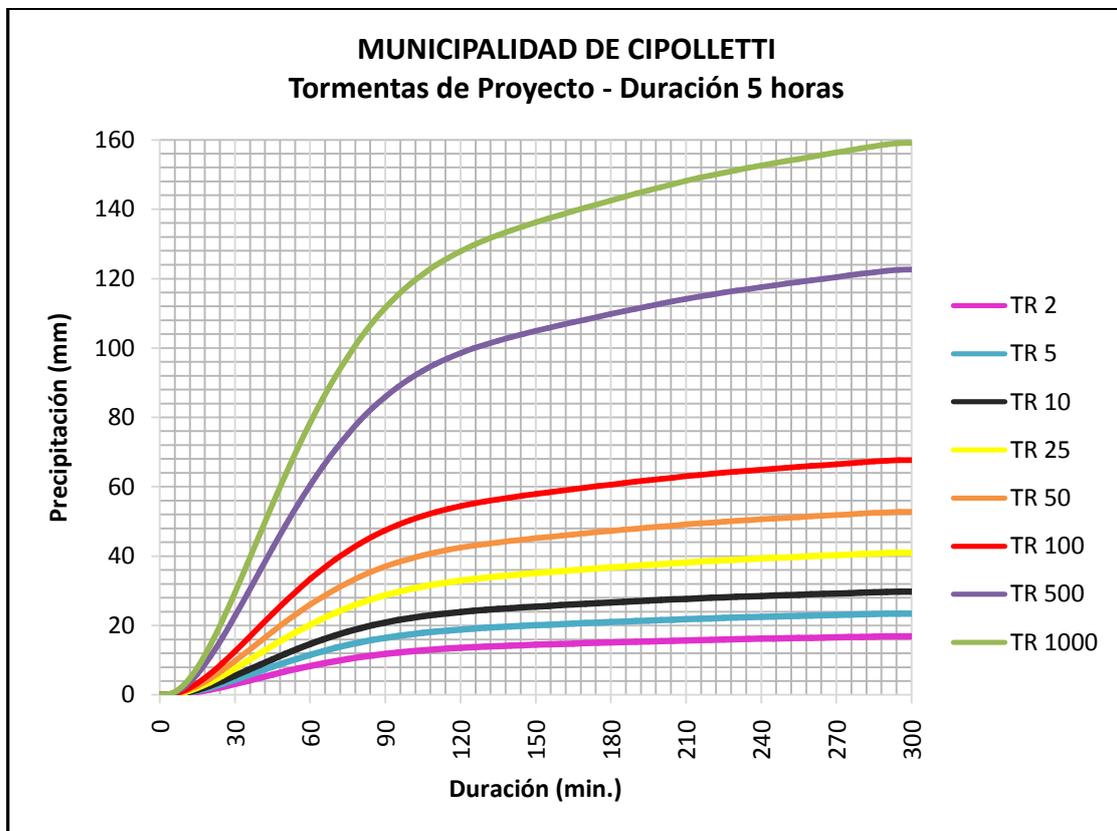


Figura 3.19.- Tormentas de Proyecto.

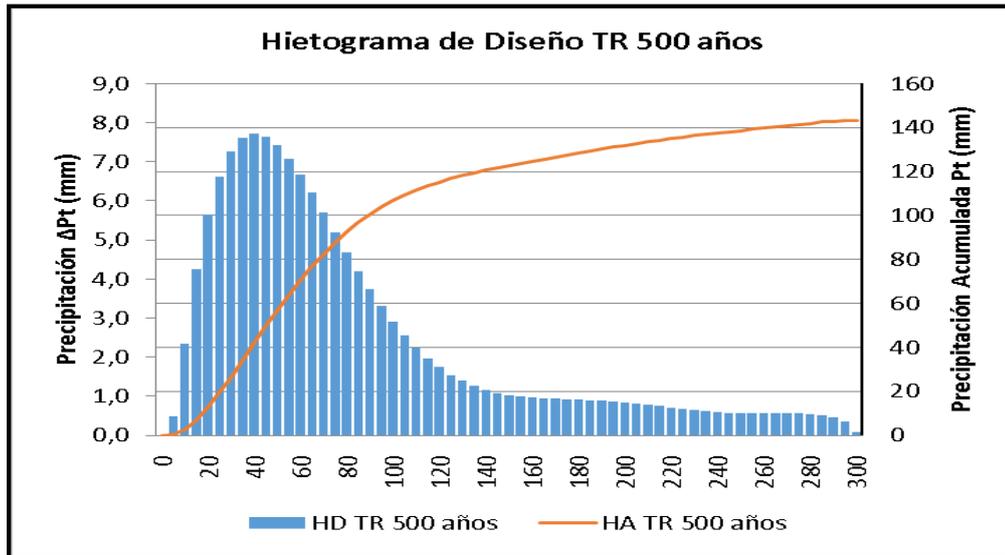


Figura 3.20.- Hietogramas porcentuales – D: 5h 500 años.

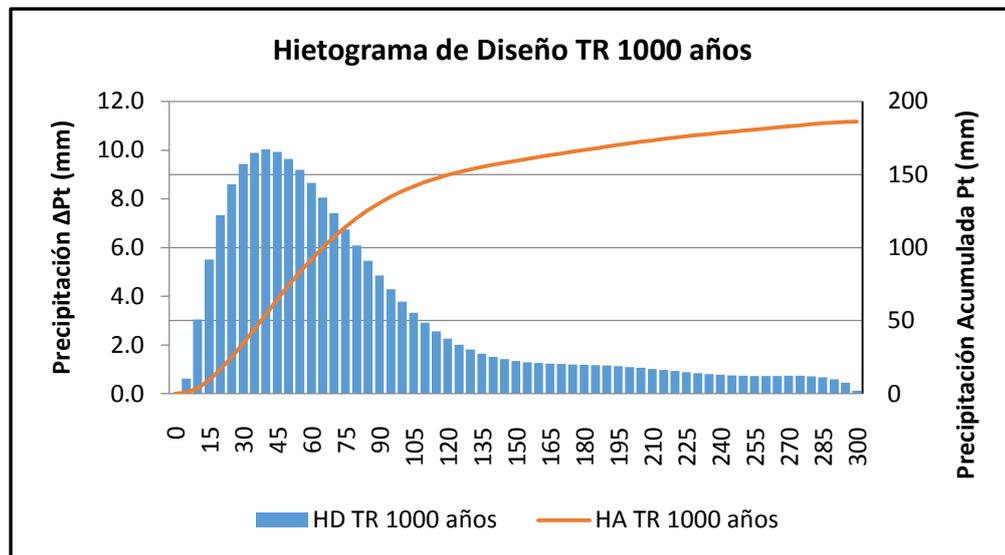


Figura 3.21.- Tormentas de proyecto- D: 5h 1000 años.

### 3.5. Modelo hidrológico de la zona de análisis.

El sistema de defensa aluvional Roca-Catini tiene como finalidad almacenar y laminar las crecidas aluvionales de las cuencas ubicadas al norte de la ciudad de General Roca. Las obras que componen el sistema son: Dique de contención aluvional Roca, Canal Trasvase, Dique de contención aluvional Catini, Canal de Salida (Desagüe). (Visita técnica al sistema de defensa aluvional de la Ciudad de Roca, Mayo de 2015, DPA-AIC)

Basados en los datos Morfométricos, de la red hídrica y del Índice de Curva Número de las cuencas aportantes a los diques Roca y Catini obtenidos en los apartados 3.2.4 y 3.3, se concatenó el sistema hidrológico. Esto permitió armar un esquema del sistema de protección aluvional con todos sus elementos según transita la precipitación caída.

Una vez obtenidos los datos de todo el sistema se los carga en el software HEC-HMS, dando como

resultado el Modelo de Cuenca de la **Figura 3.32**.

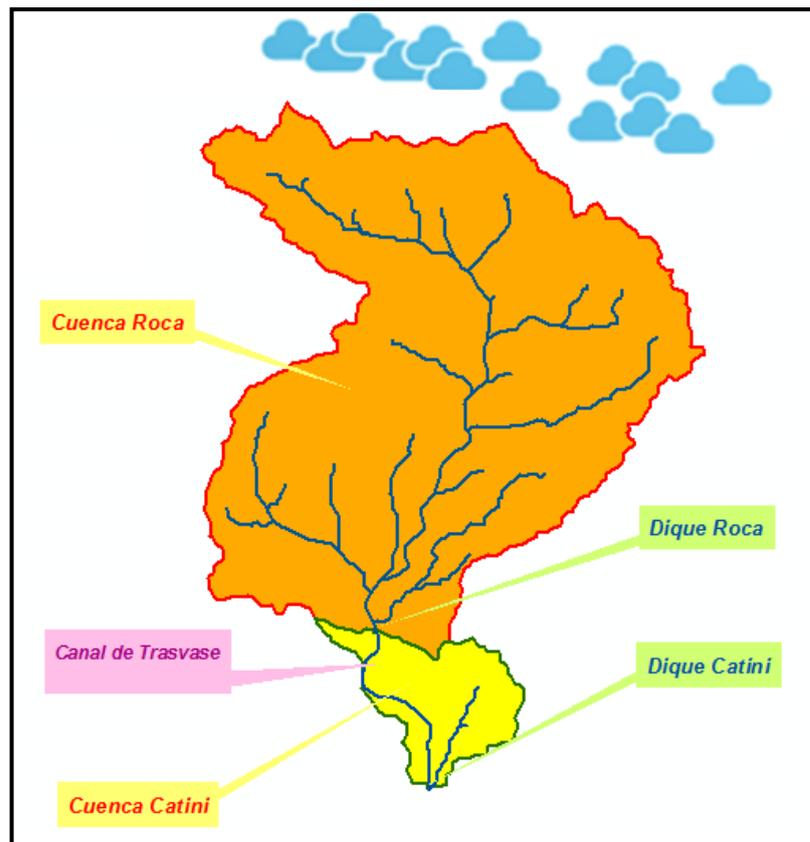


Figura 3.22.- Sistema hidrológico.

### 3.5.1. Modelación del Sistema Hidrológico.

La modelación del sistema consta de Cuatro partes básicas: Modelo de Cuenca, Modelo de Diques y Canales, Tormenta de Diseño, Modelo Meteorológico.

#### 3.5.1.1. Modelo de Cuenca.

Los componentes del modelo de cuenca son Cuenca Roca y Cuenca Catini. Para las pérdidas generales del sistema se consideraron el modelo Soil Conservation Service (Método del CN), sin considerar flujo de base o subterráneo y para el método de transformación se eligió el Hidrograma Sintético de Snyder (1938).

Se estimó el Tiempo de Retardo ( $T_r$ ) de cada cuenca, según la **Ecuación 2.31**, considerando el Tiempo de Concentración ( $T_c$ ) según la **Ecuación 2.9**.

Para el análisis del número de curva se siguió el procedimiento de la **apartado 3.3** y se realizaron los cálculos con los valores de la **Tabla 3.13**, adoptando el valor más conservador. Para la elección del valor más conservados se realizaron las simulaciones del modelo y se optó por el resultado que producida la mayor elevación del embalse aguas arriba de cada dique.

En la **Tabla 3.19** y **Tabla 3.20** se dan los valores adoptados para cada.

Cuenca Roca	
Conexión aguas abajo	Dique Roca
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	89.80
Método de Pérdida	SCS Curva Número
Método de transformación	Snyder Unit Hidrograma
Flujo base	Sin flujo
Curva Número	89.80
% de impermeabilidad	0
Tiempo de retardo (hrs.)	2,712
Coefficiente de Pico	0,75

Tabla 3.19.- Parámetros adoptados cuenca Roca.

Cuenca Catini	
Conexión aguas abajo	Dique Catini
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	7.41
Método de Pérdida	SCS Curva Número
Método de transformación	Snyder Unit Hidrograma
Flujo base	Sin Flujo
Curva Número	93.19
% de impermeabilidad	0
Tiempo de retardo (hrs.)	1
Coefficiente de Pico	0,75

Tabla 3.20.- Parámetros adoptados cuenca Catini.



Figura 3.23.- Fotografía Cuenca Catini 2018.

### 3.5.1.2. Modelo de Diques y Canales.

Para la modelación de los diques se consideraron los parámetros establecidos en los informes desarrollados por el DPA-AIC (Visita técnica al sistema de defensas aluvionales de la Ciudad de General Roca).

- **Dique Roca:**

La presa consiste en un dique de materiales sueltos de 960 metros de longitud, medidos por el

coronamiento, y su altura máxima es de 18 metros. El talud aguas arriba tiene pendiente 1:5 desde el nacimiento hasta una determinada cota que cambia de 1:3 para llegar al coronamiento. Está revestido en enrocado de espesor 0,75 metros sobre un filtro de grava de 0,3 metros. El talud de aguas abajo contiene dos bermas de 3 metros de ancho cada una y tiene una pendiente general igual a 1:2.5.

El dique está formado por un terraplén con núcleo central impermeable. Posee un canal vertedor de seguridad ubicado sobre su extremo izquierdo que comienza a funcionar cuando las aguas llegan a una cota de 302,30 m.s.n.m. Posee sección trapezoidal de 300 metros de longitud y una capacidad máxima de 20 m<sup>3</sup>/s.

El dique roca posee 2 descargadores centrales. El agua embalsada se evacua por 2 tomas de hormigón armado desde donde nacen dos conductos circulares que atraviesan la presa cuyas salidas se unen aguas debajo de la presa y conducen sus aguas hacia la cuenca Catini. (Visita técnica al sistema de defensas aluvionales de la Ciudad de General Roca).

<b>Presa de control Aluvional Roca</b>	
Tipo de dique	Materiales Suetos
Forma	Trapezoidal
Longitud	925 m
Área de Cuenca Regulada	73,79 km <sup>2</sup>
Cota de Coronamiento	305,00
Altura Máxima sobre el Lecho	18 m.
Altura Max desde Fundación	25 m.
Nivel Max. Normal	302,30
Toma Circular de Diámetro	75 cm
Cota Umbral de Toma izquierda	290,40
Cota Umbral de Toma derecha	293,60
Cota Umbral de Toma Promedio	292,00
Cota Umbral Vertedero (FUSIBLE)	302,30
Capacidad de descargadores	20 m <sup>3</sup> /s
Sección Vertedero	Trapezoidal
Solera de Vertedero	10 m.
Capacidad Máxima Estimada Vertedero	35 m <sup>3</sup> /s
Conexión aguas abajo	Canal Trasvase
Descarga Máxima Total Estimada a Nivel Máximo	55 m <sup>3</sup> /s

Tabla 3.21.- Parámetros adoptados dique Roca.



*Figura 3.24.- Fotografía Dique Roca 2018.*

Para la correcta simulación de los niveles de embalse de cada dique fue necesario estimar la curva Volumen-Altura. En el caso del dique Roca fue proporcionada por el Ing. Fernando Losano, y en el caso del dique Catini fue proporcionada por el Ing. Gustavo Franke.

<b>COTA (m. s. n. m )</b>	<b>VOLUMEN [Hm<sup>3</sup>]</b>
287,00	0
288,00	0,01
289,00	0,02
290,00	0,04
291,00	0,07
292,00	0,15
293,00	0,27
294,00	0,46
295,00	0,71
296,00	1,03
297,00	1,43
298,00	1,94
299,00	2,55
300,00	3,27
301,00	3,92
302,00	4,90
302,30	5,24
303,00	6,02
304,00	7,29
305,00	8,75

*Tabla 3.22.- Altura vs Volumen Dique Roca.*

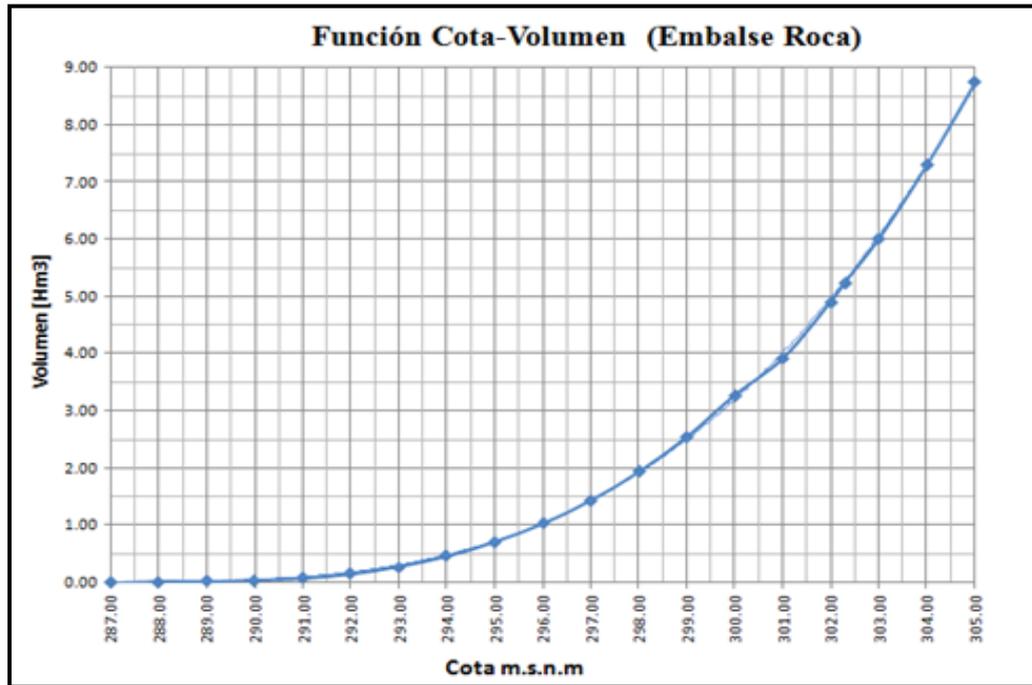


Figura 3.25.- Altura vs Volumen Dique Roca.

Este canal posibilita el desvíos de las descargas de la cuenca Roca hacia la cuenca Catini, como así también aportes directos de otras cuencas más pequeñas. El canal tiene una sección trapecial y una longitud total de 2.155 metros aproximadamente, ha sido construido en excavación y tiene una capacidad máxima de conducción de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , que coinciden con la máxima capacidad de descarga prevista para los descargadores de fondo del cierre Roca.

En su mayor parte, el canal ha sido construido en excavación, atravesando suelos limosos. Tiene sección trapecial con una ancho de solera de 4 metros, taludes con pendiente de 1V;1.5H, y pendiente longitudinal 0,0004. El tirante para el caudal de diseño se ha previsto en 3 metros. (Visita técnica al sistema de defensas aluvionales de la Ciudad de General Roca).

Canal Traslase	
Longitud	2.155 m.
Capacidad Máxima de Descarga	$20 \text{ m}^3/\text{s}$
Material	Suelo Natural (Limoso)
Sección	Trapecial
Ancho Solera	4 m.
Pendiente Longitudinal	0,0004
Conexión aguas a bajo	Dique Catini
Método de enrutamiento o conducción	Kinematic wave
No se consideraron perdidas	-----
Longitud del Tramo	2155 m.
Pendiente longitudinal	0.0004
Pendiente Lateral	1.5
Ancho de fondo	4 m.
Manning's	0.01

Tabla 3.23.- Parámetros adoptados canal de traslase.



*Figura 3.26.- Fotografía Canal de Trasvase  
2018 a.*



*Figura 3.27.- Fotografía Canal de Trasvase  
2018 b.*



*Figura 3.28.- Fotografía Canal de Trasvase 2018 c.*

- **Dique Catini:**

Esta presa que compone el sistema regula los caudales de su cuenca más los caudales trasvasados de la cuenca superior aluvional Roca. Es un terraplén de tipo zonificado, con núcleo impermeable y espaldones de mayor permeabilidad. Tiene una longitud de 900 metros y una altura máxima de 12,5 metros.

El talud aguas arriba tiene una pendiente 1:4 hasta una determinada cota y luego presenta un quiebre a 1: 2,5 hasta el coronamiento. Está revestido con enrocado de espesor 0.5 metros. El paramento de aguas abajo tiene una pendiente 1: 2,5 y presenta un filtro granular de 0,3 metros de espesor.

El canal vertedor lateral de seguridad está ubicado en el extremo izquierdo de la presa y evacua aguas arriba de la cota 265 m.s.n.m. Posee sección trapezoidal y tiene 300 metros de longitud. El mismo está proyectado para que una tormenta de 500 años no supere el coronamiento de la presa.

El agua embalsada pasa a través de un descargador de fondo sin control, cuya torre es de hormigón de diámetro 1.85 metros de diámetro y 5 metros de altura, con aberturas laterales en forma de ventana, excavando una trinchera bajo el nivel de fundación de la presa y es conducida, mediante un canal a cielo

abierto (canal de desagüe).

Presa de control aluvional Catini	
Tipo de dique	Materiales Suelos
Forma	Trapezoidal
Longitud	900 Metros
Área de Cuenca Regulada	7,41 km <sup>2</sup>
Cota de Coronamiento	267,50
Altura Máxima sobre el Lecho	12,50 m
Nivel Máximo Normal	267,5
Toma Circular de Diámetro	85 cm
Cota Umbral de Toma	259,25
Cota Umbral Vertedero (FUSIBLE)	265
Capacidad de descargadores	5,5 m <sup>3</sup> /s
Sección Vertedero	Trapezoidal
Solera de Vertedero	20 m.
Conexión aguas abajo	Canal de Salida

Tabla 3.24.- Parámetros adoptados dique Catini.



Figura 3.29.- Fotografía Dique Catini 2018.

COTA (m .s. n. m.)	VOLUMEN [Hm3]
256	0
257	0,003145
258	0,01286
259	0,0414
260	0,09931
261	0,18872
262	0,31018
263	0,45904
264	0,63838
265	0,85560
266	1,10918
267	1,39695
267,5	1,55479

Tabla 3.25.- Altura vs Volumen Dique Catini.

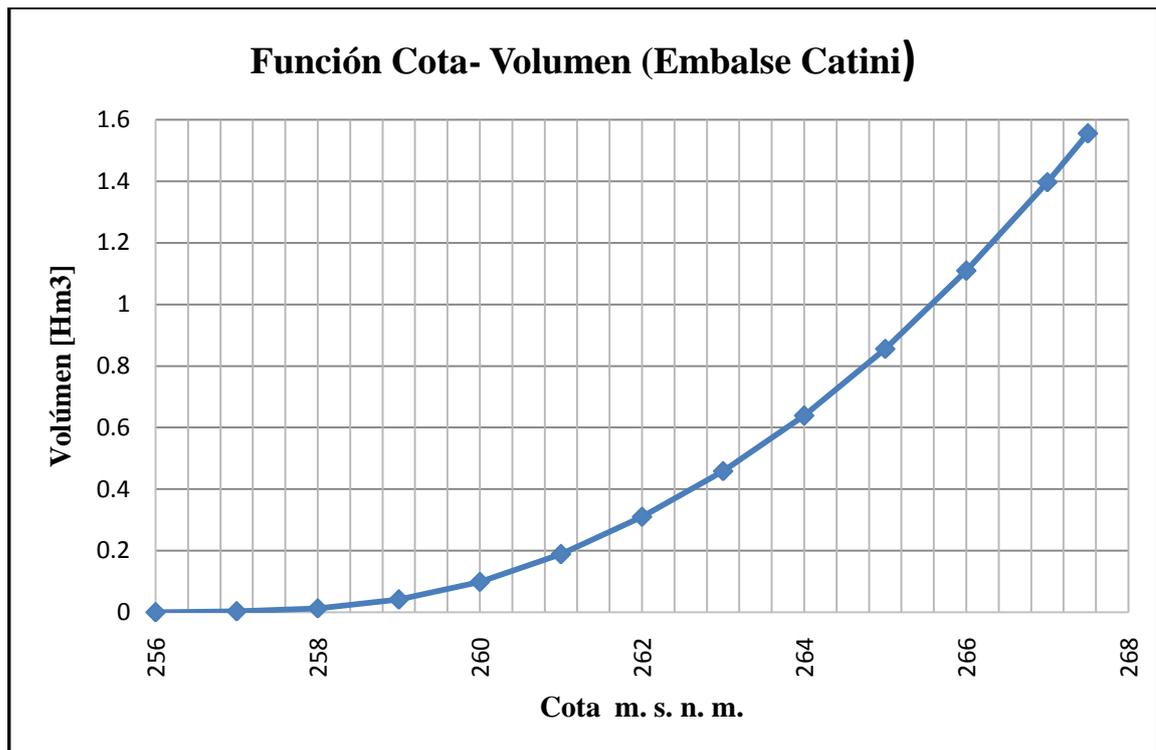


Figura 3.30.- Altura vs Volumen Dique Catini

- **Canal de Desagüe**

El canal de desagüe envía el flujo recibido por los descargadores del dique Catini y los conduce hacia la red de drenaje del sistema de riego denominado canal colector de torrentes aluvionales que desemboca en la margen izquierda del Río Negro. (Visita técnica al sistema de defensas aluvionales de la Ciudad de General Roca).

Canal de Desagüe	
Longitud	9.300 mts.
Capacidad Máxima de Descarga	12 m <sup>3</sup> /s
Material	Suelo Natural (Limoso) - Revestido por partes
Sección	Trapezoidal

Tabla 3.26.- Parámetros adoptados dique Catini.



Figura 3.31.- Fotografía del Canal de Desagüe 2018.

### 3.5.1.3. Tormenta de Diseño.

Para la simulación del modelo hidrológico fue necesario elegir una tormenta de diseño y adoptar el hietograma de dicha tormenta, para la cual se adoptó una recurrencia de 500 y 1000 años, y una duración de 5 hs estimada en la apartado 3.4.8. Como resultado de la discretización de la tormenta de diseño en intervalos de 10 minutos, se obtuvo el siguiente Hidrograma de tormenta acumulado.

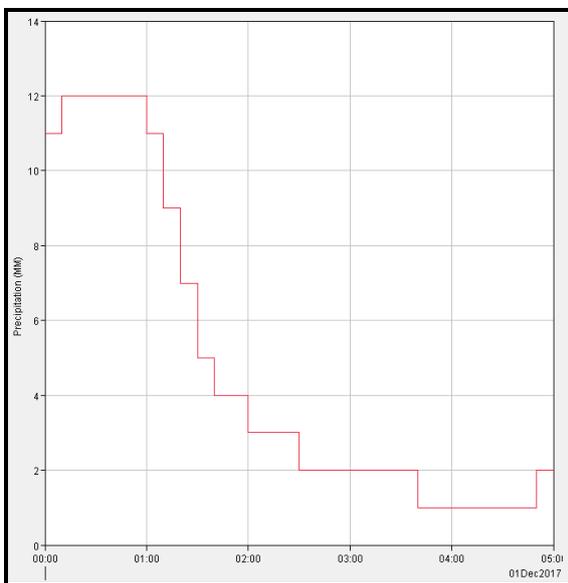


Figura 3.32.- Hidrograma de tormentas acumuladas. 500 años

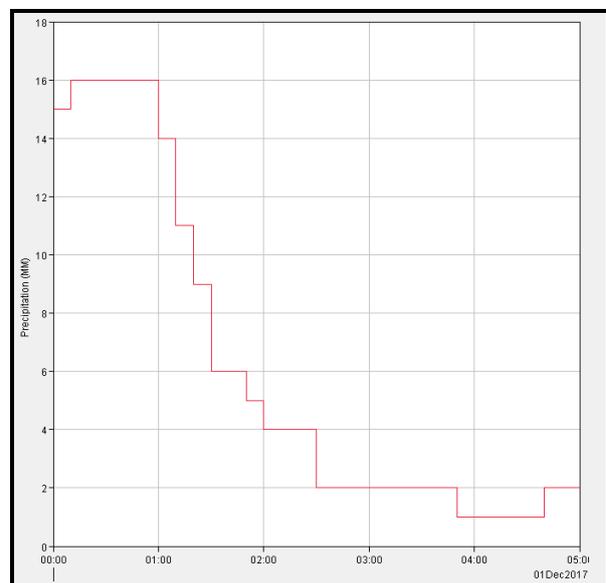


Figura 3.33.- Hidrograma de tormentas acumuladas. 1000 años.

### 3.5.1.4. Modelo Meteorológico.

El modelo meteorológico implementado considera lluvia uniforme sobre toda la superficie de ambas cuencas. Se considera a la tormenta de diseño elegida con base en los datos de la estación

meteorológica de Cipolletti, como si la misma ocurriera sobre las cuencas de manera puntual, sin considerar extrapolación o distancia entre el origen de los datos pluviométricos y las cuencas del sistema.

### 3.5.2. Simulación del Modelo Hidrológico-Generalidades.

Para simular el sistema es necesario definir el tiempo de simulación (control de especificaciones), el que diferirá del tiempo de duración de la tormenta de diseño, ya que debe dar lugar a llegar al máximo caudal, el cual se debe dar para el tiempo de concentración (Mínimo Tiempo en el cual toda la cuenca aporta al caudal).

El Control de Especificaciones se realizó en un período mayor a 10 horas y con intervalos de tiempo de 10 minutos incrementales de lluvia para el cálculo del hidrograma de escurrimiento.

### 3.5.3. Resultados de la Simulación- 500 y 1000 años.

Como resultado de la simulación se obtuvieron los Hidrograma de Crecida de cada cuenca, volúmenes de agua generados por la tormenta de diseño, alturas máximas de embalse, etc.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Roca	73.79	494.1	01dic2017, 04:00	8367.1
D.ROCA	73.79	53.8	01dic2017, 09:30	2927.9
canal trasvase	73.79	53.7	01dic2017, 09:30	2915.2
Cattini	7.41	100.3	01dic2017, 02:00	910.8
D. CATINI	81.20	50.2	01dic2017, 11:30	2893.8
Reach-1	81.20	50.2	01dic2017, 11:30	2893.8

Figura 3.34.- Resultados generales. (500 años).

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Roca	73.79	665.6	01dic2017, 04:30	11464.0
D.ROCA	73.79	127.1	01dic2017, 09:00	5773.2
canal trasvase	73.79	127.0	01dic2017, 09:00	5758.9
Cattini	7.41	130.3	01dic2017, 02:30	1225.9
D. CATINI	81.20	119.4	01dic2017, 10:00	6018.1
Reach-1	81.20	119.4	01dic2017, 10:00	6018.1

Figura 3.35.- Resultados generales.(1000 años).

### 3.5.3.1. Resultados Cuenca Roca.

- 500 años.

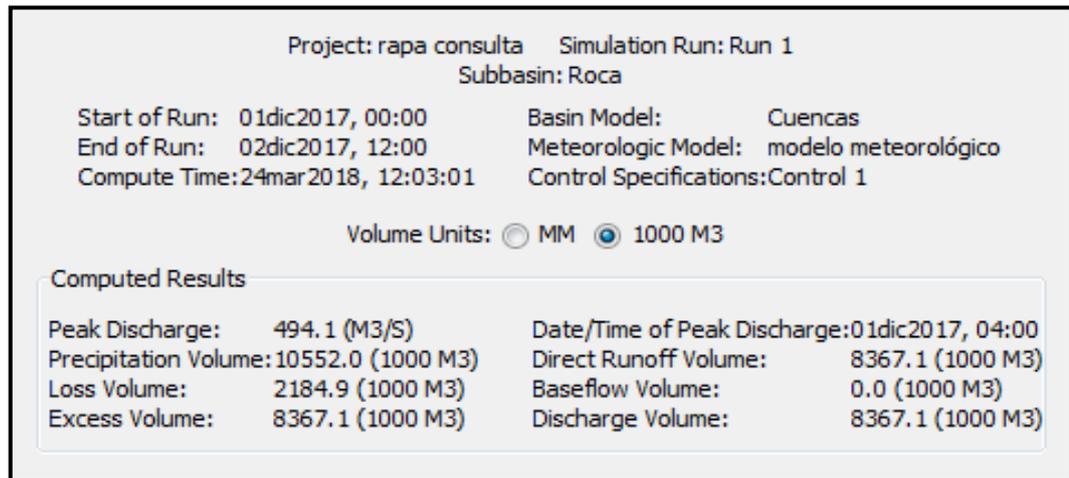


Figura 3.36.- Resultados generales Cuenca Roca. (500 años).

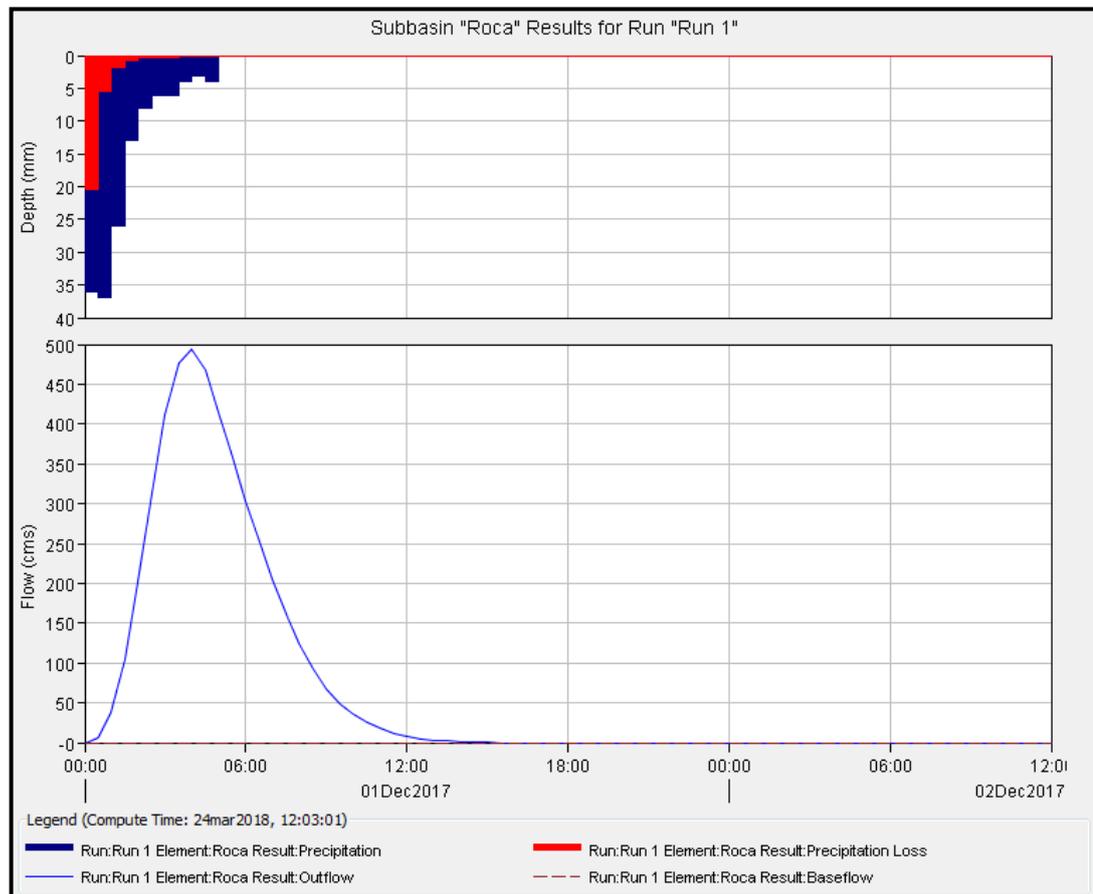


Figura 3.37.- Hidrograma de crecida cuenca Roca. (1000 años).

En la **Figura 3.37** se observa el hietograma de precipitación para la subcuenca Roca , las pérdidas de precipitación y el hidrograma de salida que en ella se genera. Con un caudal pico de  $494.1 \text{ m}^3/\text{seg}$  a las 4:00 hs de iniciada la tormenta, el cual será atenuado por el dique Roca.

- **1000 años.**

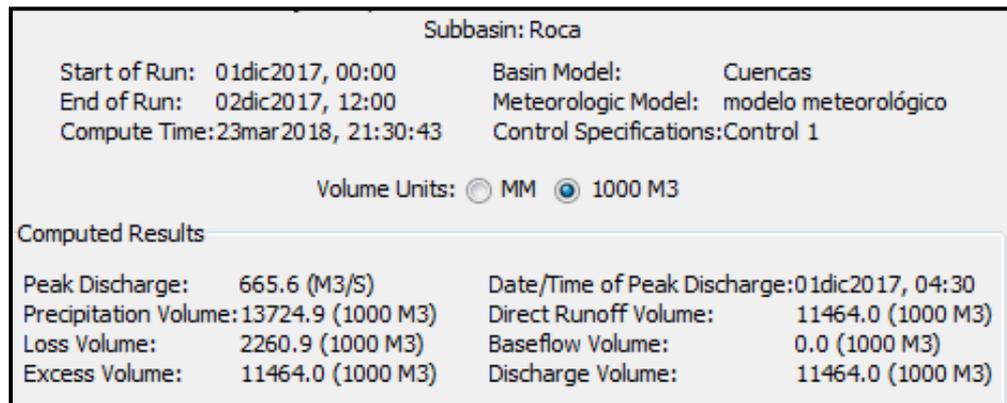


Figura 3.38.- Resultados generales Cuenca Roca. (1000 años).

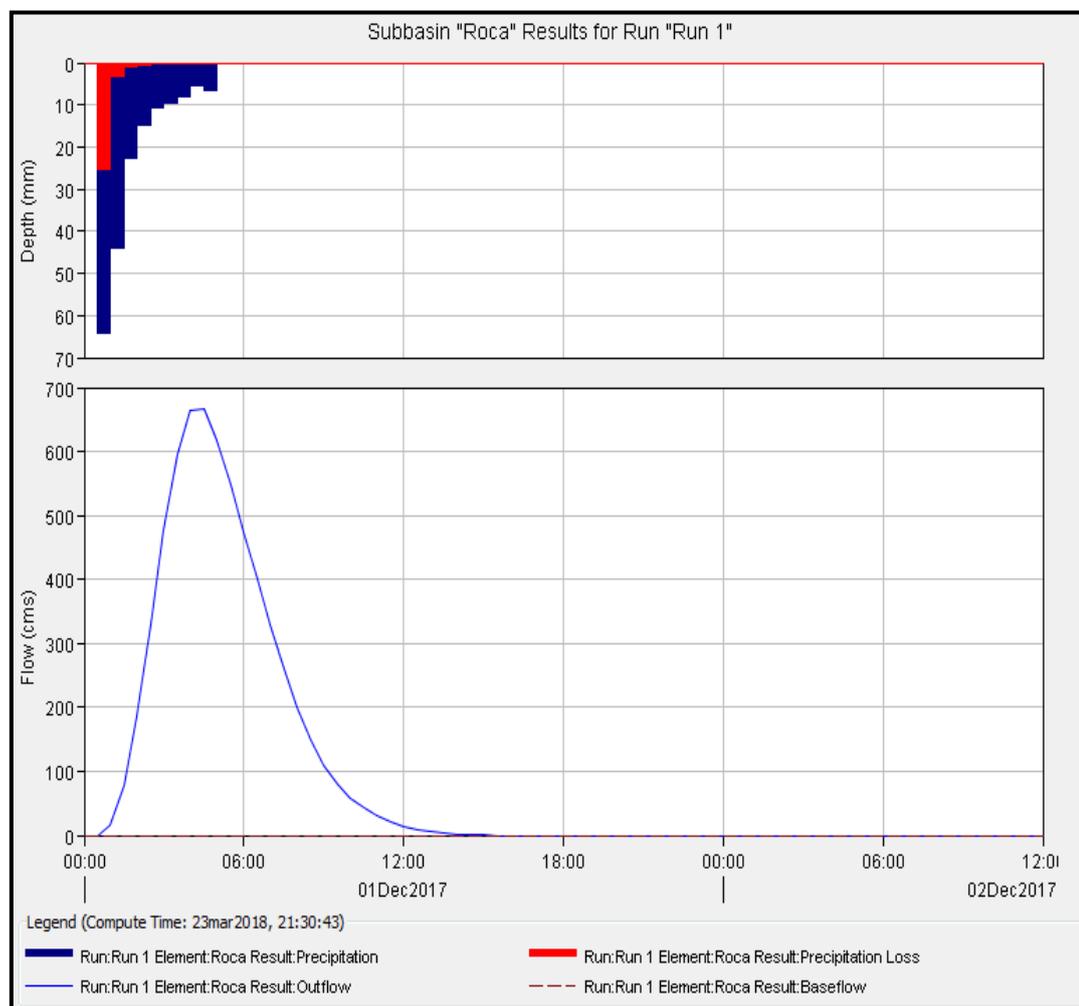


Figura 3.39.- Hidrograma de crecida cuenca Roca. (1000 años).

En la **Figura 3.39** se observa el hietograma de precipitación para la subcuenca Roca, las pérdidas de precipitación y el hidrograma de salida que en ella se genera. Con un caudal pico de  $665.6 \text{ m}^3/\text{seg}$  a las 4:30 hs de iniciada la tormenta, el cual será atenuado por el dique Roca.

### 3.5.3.2. Resultados Dique Roca.

- 500 años.

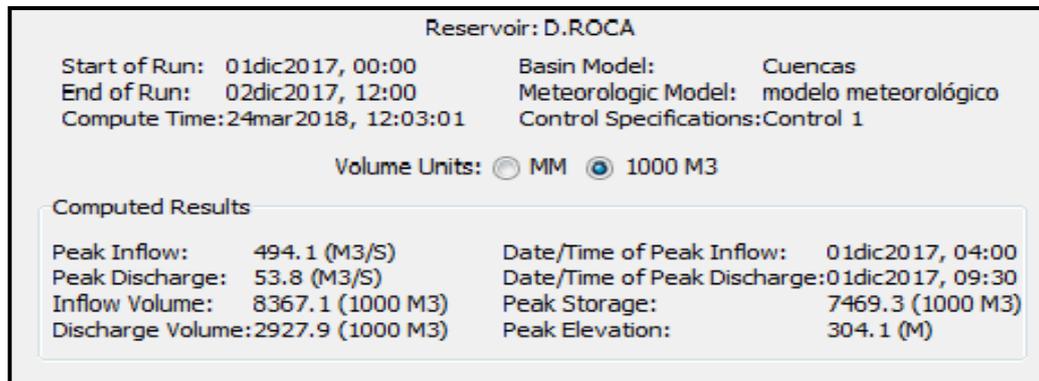


Figura 3.40.- Resultados Dique Roca. (500 años).

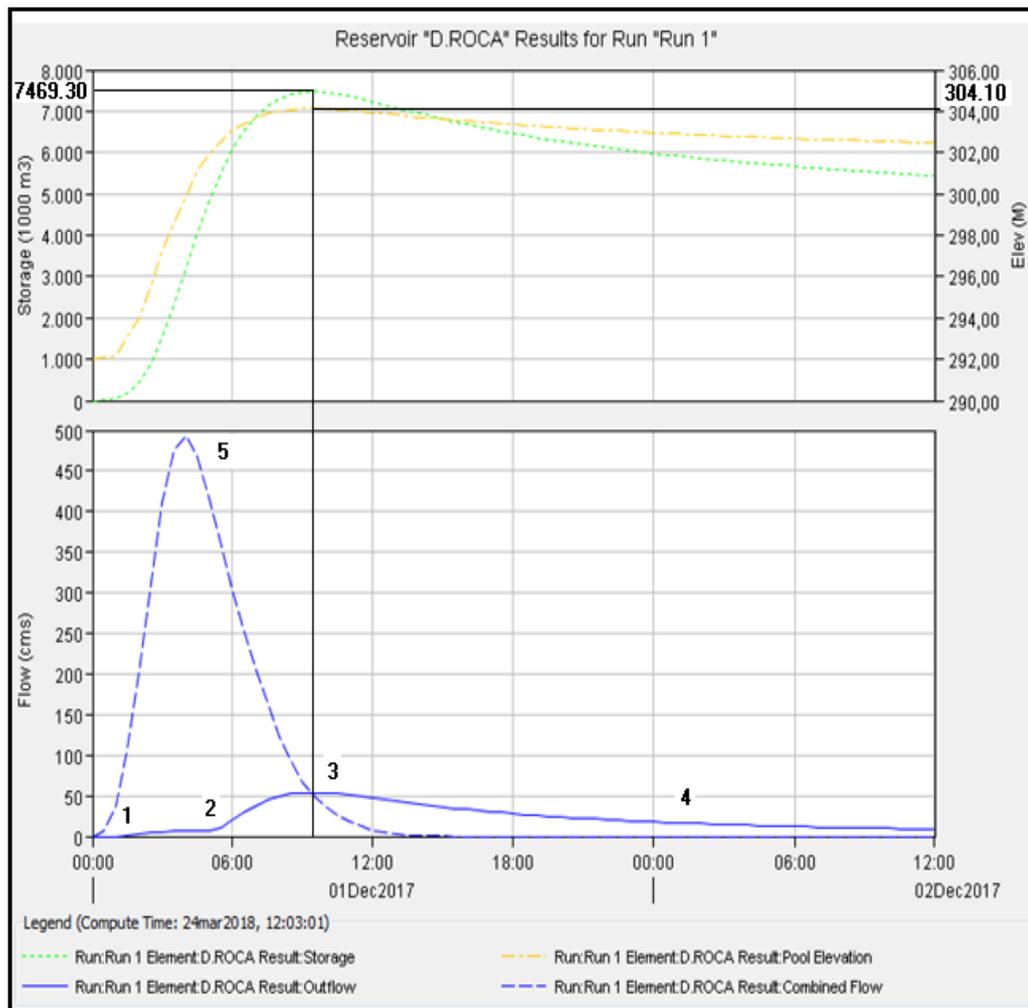


Figura 3.41.- Resultados generales dique Roca. (500 años).

En la **Figura 3.41** en el punto 1 se puede observar la entrada en funcionamiento del orificio de descarga a los 90 minutos de comenzada la tormenta, en el punto 5 observamos el caudal máximo del hidrograma ( $494.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en el punto 2 se observa la entrada en funcionamiento del vertedero (a las 5:30

hs de iniciada la tormenta). En el punto 3 el caudal saliente del dique iguala al caudal entrante al dique a las 8:30 hs de iniciada la tormenta. En este punto se dan la altura maxima del embalse 304.10 metros y por ende el máximo volumen almacenado 7469.3 (1000 m<sup>3</sup>). En el punto 4 se observa una condición estable en las descargas del dique.

- **1000 años.**

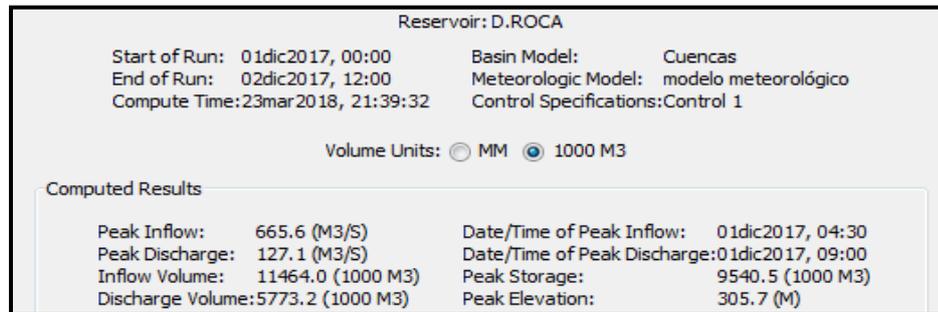


Figura 3.42.- Resultados generales dique Roca. (1000 años).

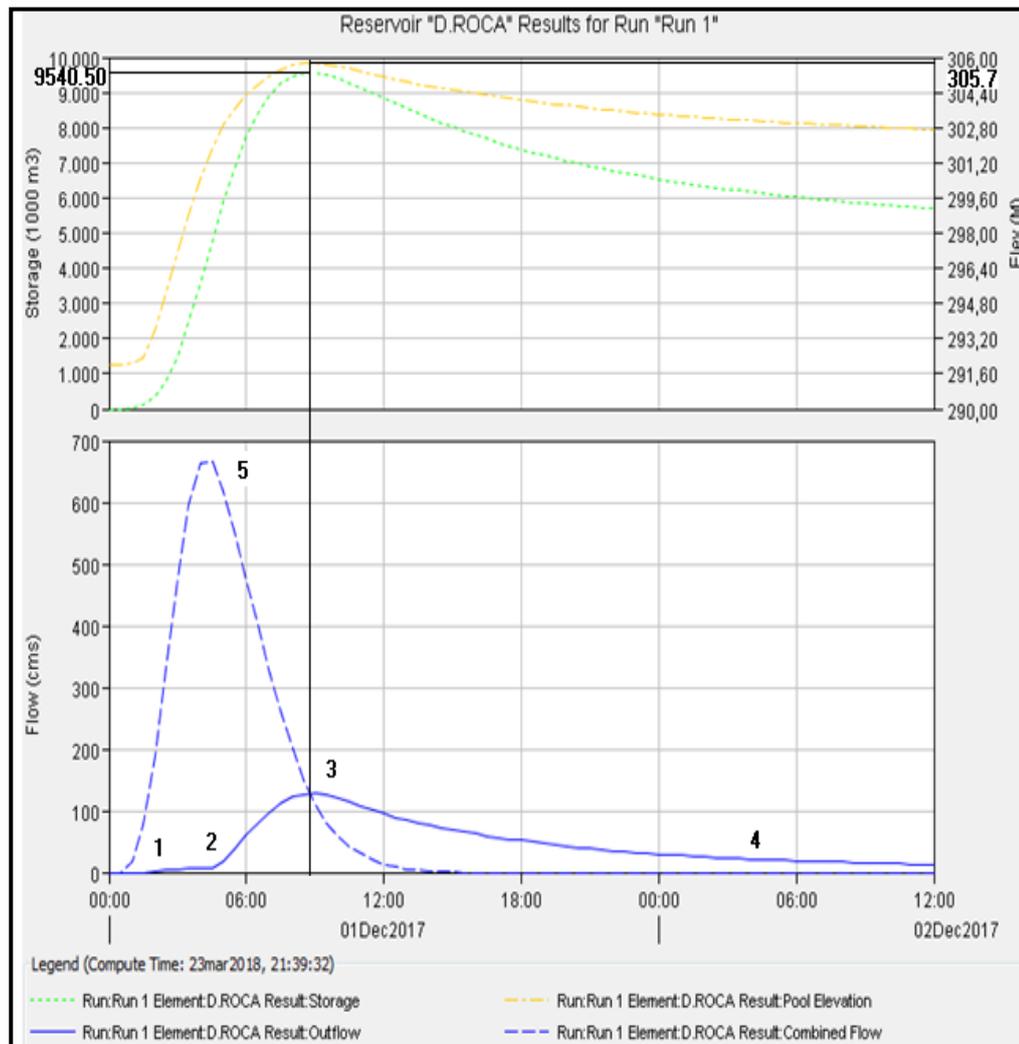


Figura 3.43.- Resultados generales dique Roca. (1000 años)

En la **Figura 3.44** en el punto 1 se puede observar la entrada en funcionamiento del orificio de descarga en menos de 90 minutos de comenzada la tormenta, en el punto 5 observamos el caudal máximo del hidrograma ( $665.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en el punto 2 se observa la entrada en funcionamiento del vertedero (a las 4:30 hs de iniciada la tormenta). En el punto 3 el caudal saliente del dique iguala al caudal entrante al dique a las 8:30 hs de iniciada la tormenta. En este punto se dan la altura máxima del embalse 305.7 metros y por ende el máximo volumen almacenado  $9540.50 (1000 \text{ m}^3)$ . En el punto 4 se observa una condición estable en las descargas del dique.

### 3.5.3.3. Resultados de Canal Trasvase.

- **500 años.**

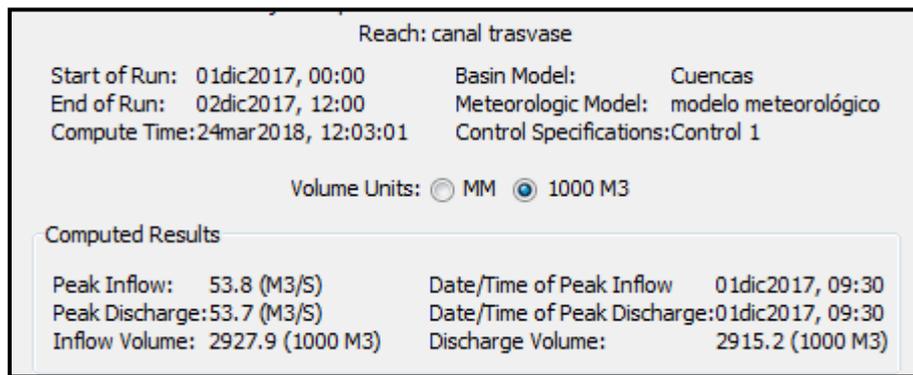


Figura 3.44.- Resultados generales Canal de Trasvase.

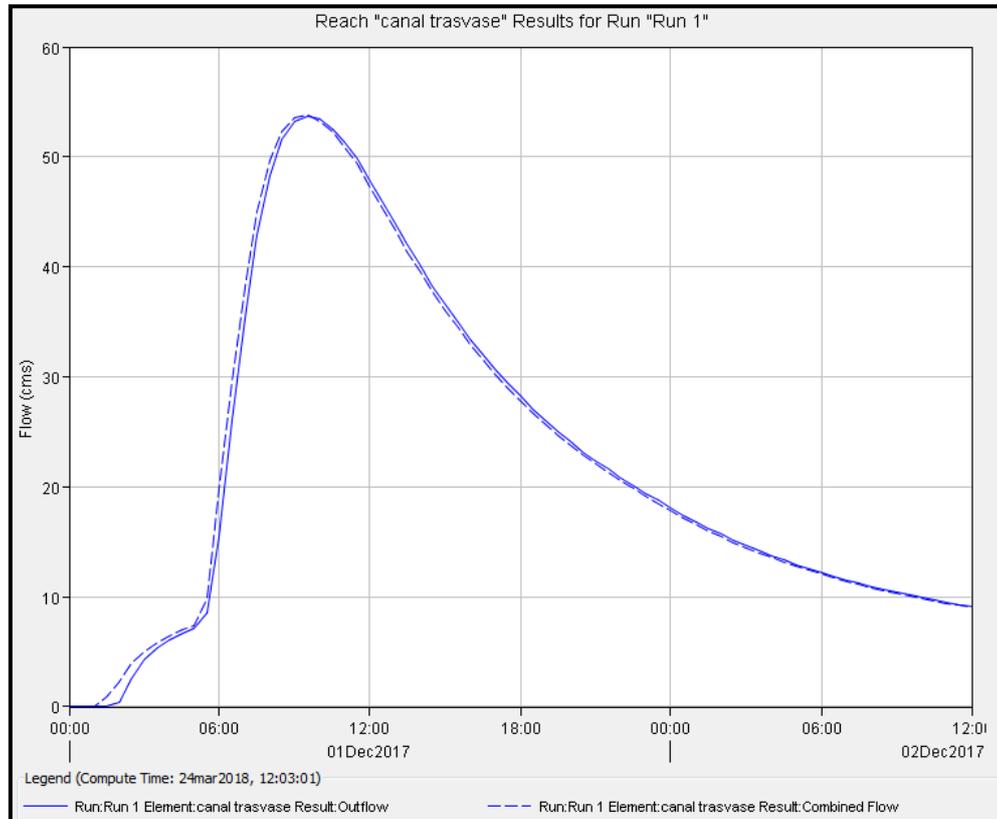


Figura 3.45.- Resultados generales Canal de Trasvase. (500 años).

En la **Figura 3.46** se observa como afecta la llegada de los caudales de los orificio de descarga y vertedero a canal trasvase, encontrando un caudal pico de  $53,8 \text{ m}^3/\text{s}$  siendo este muy superior a los  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  de capacidad maxima del mismo. Tambien se puede observar el defasaje menor a 30 minutos en el tránsito de la avenida sobre el canal trasvase.

- 1000 años.

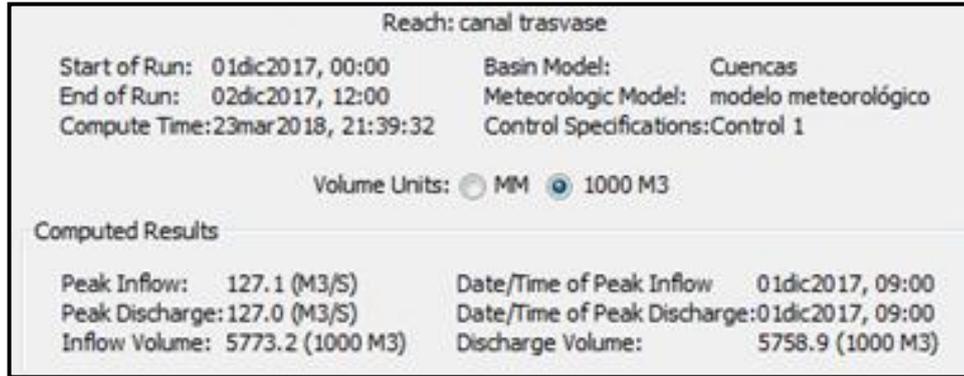


Figura 3.46.- Resultados generales Canal de Traslase. (1000 años).

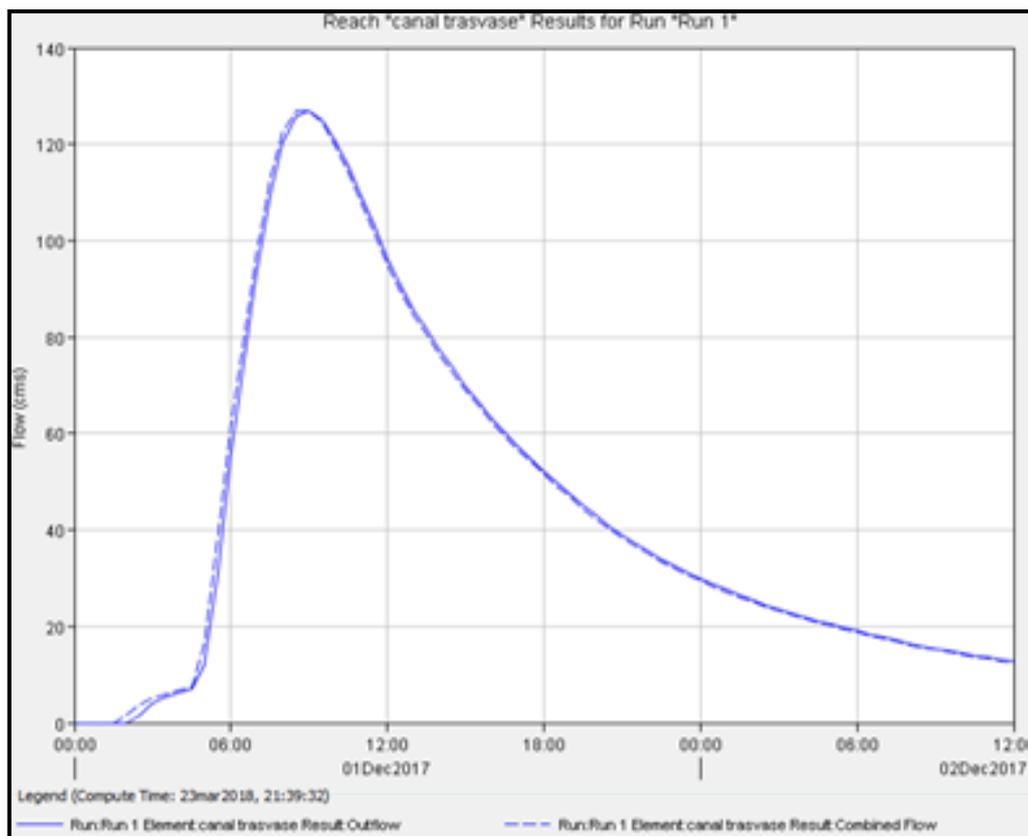


Figura 3.47.- Curva de transito de hidrograma en el canal trasvase.

En la **Figura 3.48** se observa como afecta legada de los caudales de los orificio de descarga y vertedero a canal trasvase, encontrando un caudal pico de  $127.1 \text{ m}^3/\text{s}$  siendo este muy superior a los  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  de capacidad máxima del mismo. También se puede observar el defasaje menor a 30 minutos en el

tránsito de la avenida sobre el canal trasvase.

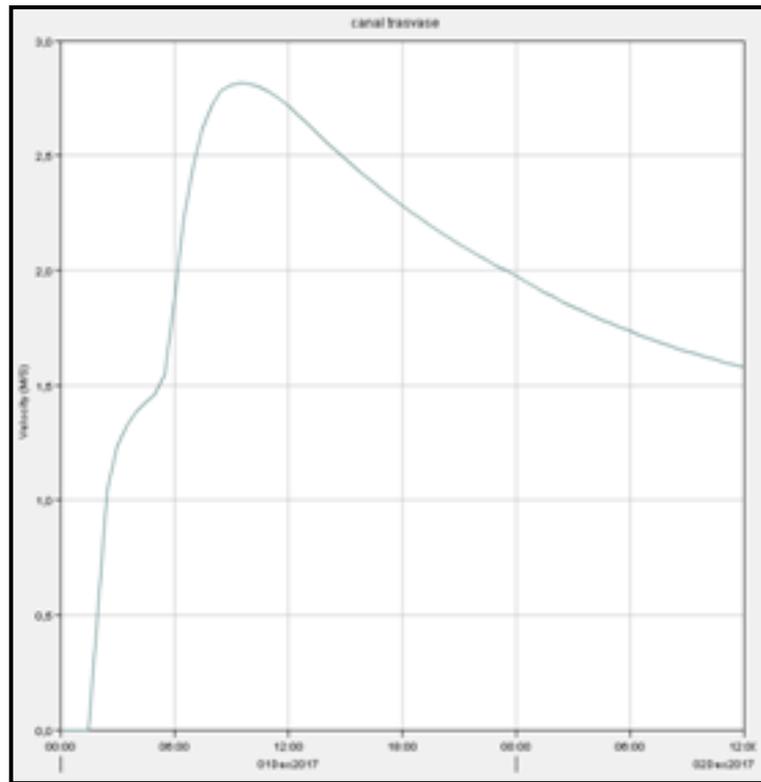


Figura 3.48.- Curva de velocidad del flujo en el canal trasvase. (500 años).

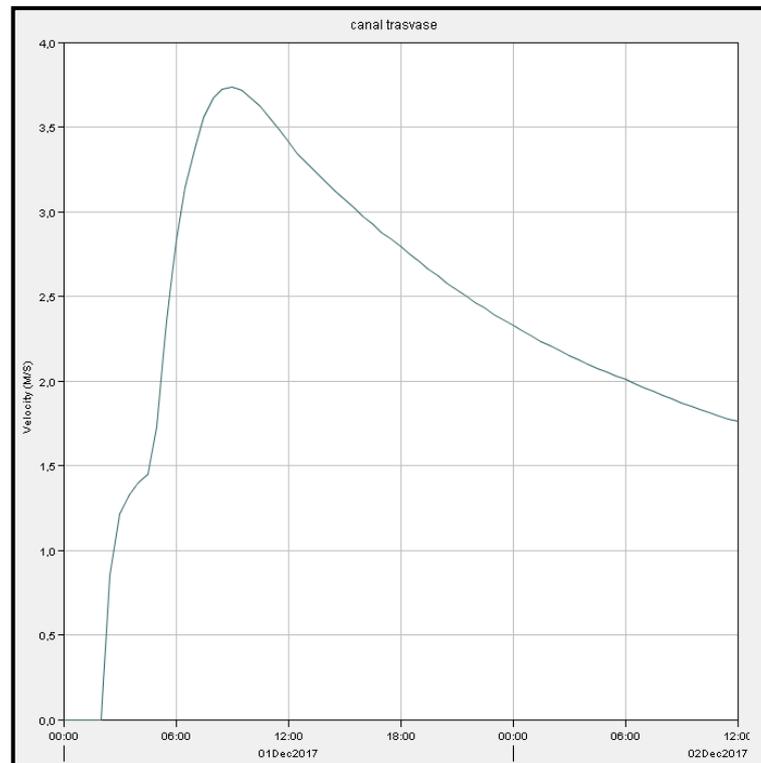


Figura 3.49.- Curva de velocidad del flujo en el canal trasvase.(1000 años).

En las **Figura 3.49** y **Figura 3.50**, se observa una velocidad máxima de flujo en el canal de trasvase para 500 años de 2.6 m/s. y de 3,4 m/s. para 1000 años de recurrencia.

### 3.5.3.4. Resultados de la Cuenca Catini.

- **500 años.**

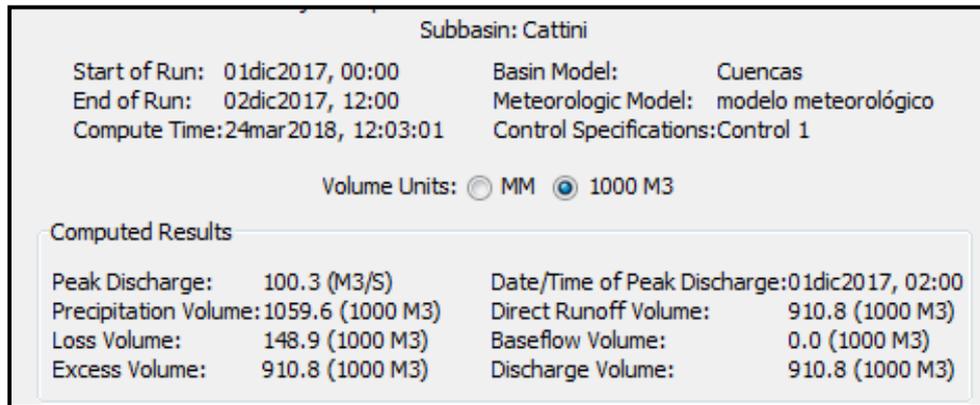


Figura 3.50.- Resultados generales Cuenca Catini. (500 años).

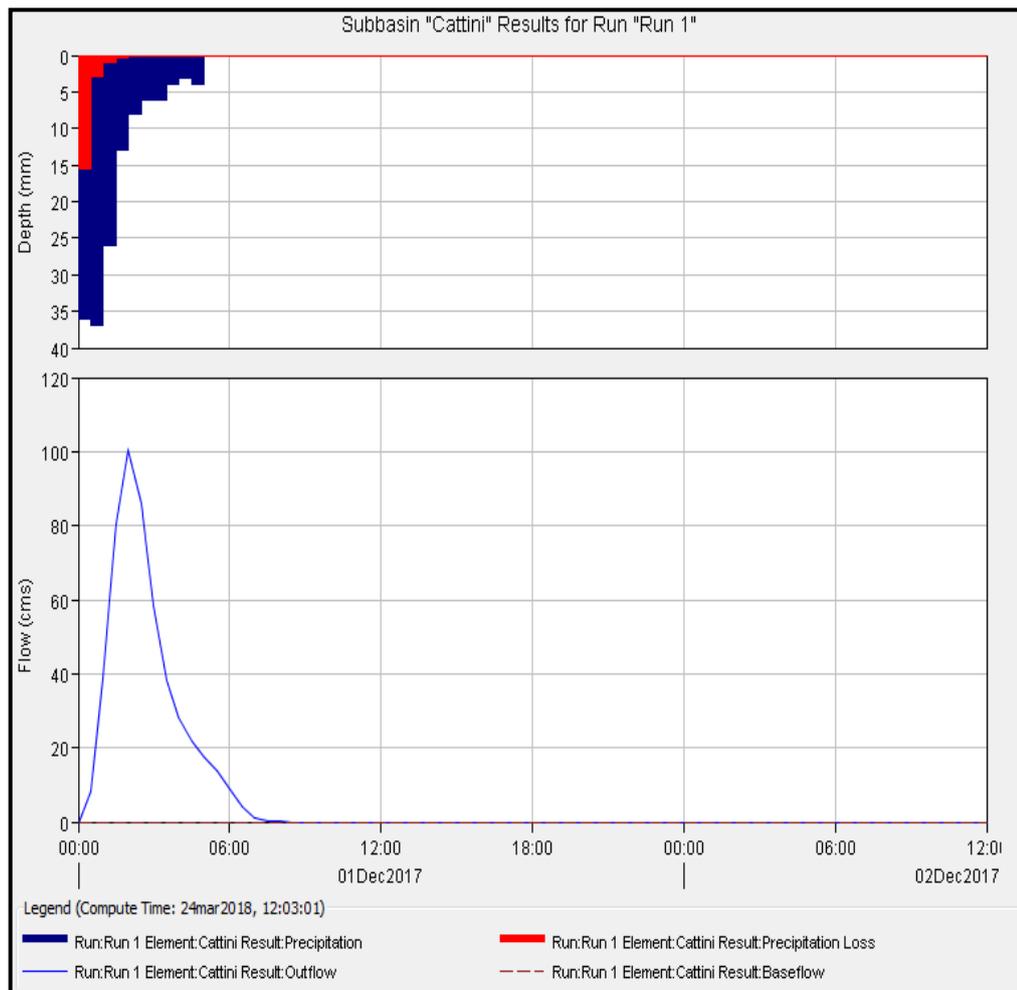


Figura 3.51.- Hidrograma de crecida cuenca Catini. (500 años).

En la **Figura 3.52** se observa el hietograma de precipitación para la subcuenca Catini, las pérdidas de precipitación y el hidrograma de salida que en ella se genera. Con un caudal pico de 1000.3 m<sup>3</sup>/seg a las 2:00 hs de iniciada la tormenta, el cual será atenuado por el dique Catini.

- **1000 años.**

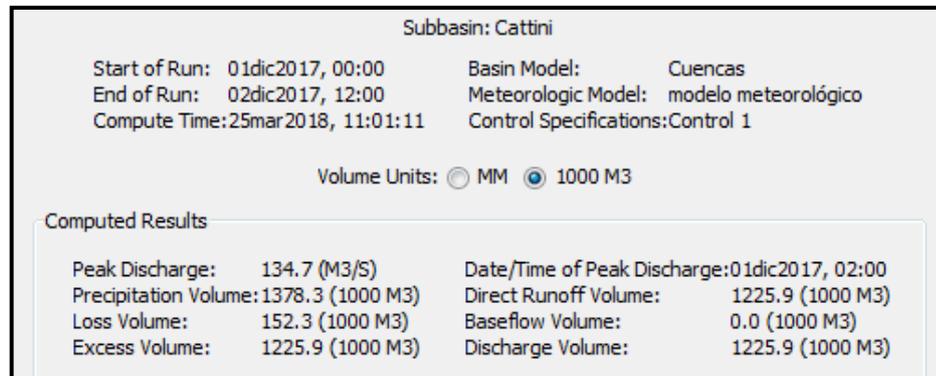


Figura 3.52.- Resultados generales Cuenca Catini. (1000 años).

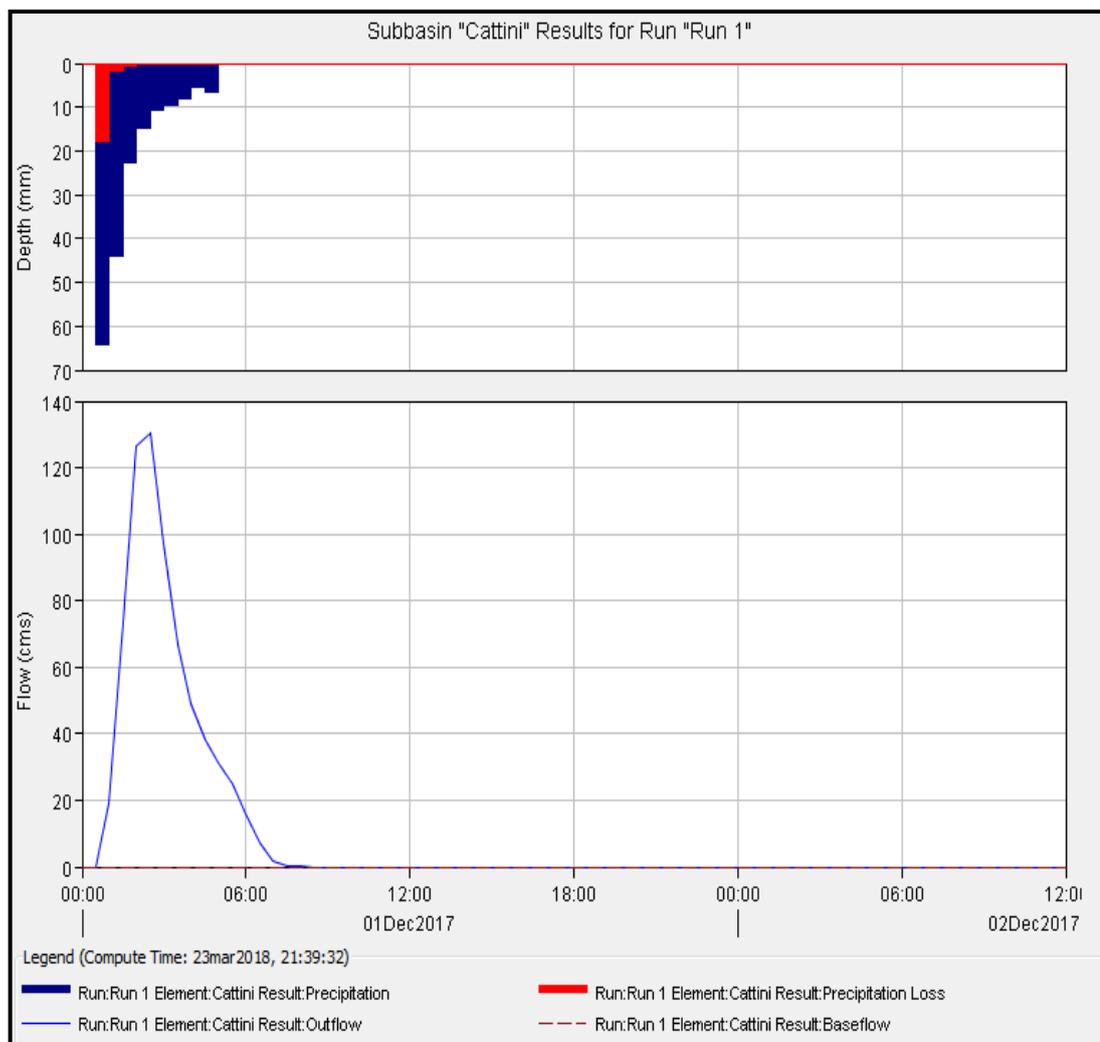


Figura 3.53.- Hidrograma de crecida cuenca Catini. (1000 años)

En la **Figura 3.53**, se observa el hidrograma generado en la cuenca Catini para la tormenta de diseño elegida. Como se observa, el hidrograma posee un pico a las 2:30 hs de iniciada la tormenta, con un caudal  $131.7 \text{ m}^3/\text{s}$  el cual es atenuado por el dique Catini.

### 3.5.3.5. Resultados del Dique Catini.

- 500 años.

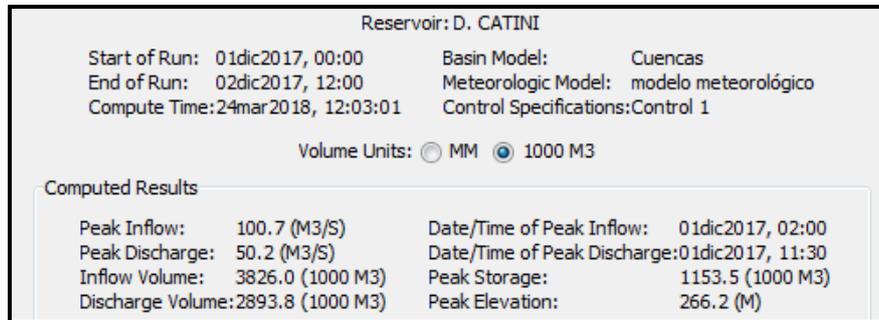


Figura 3.54.- Resultados generales Dique Cattini. ( 500 años).

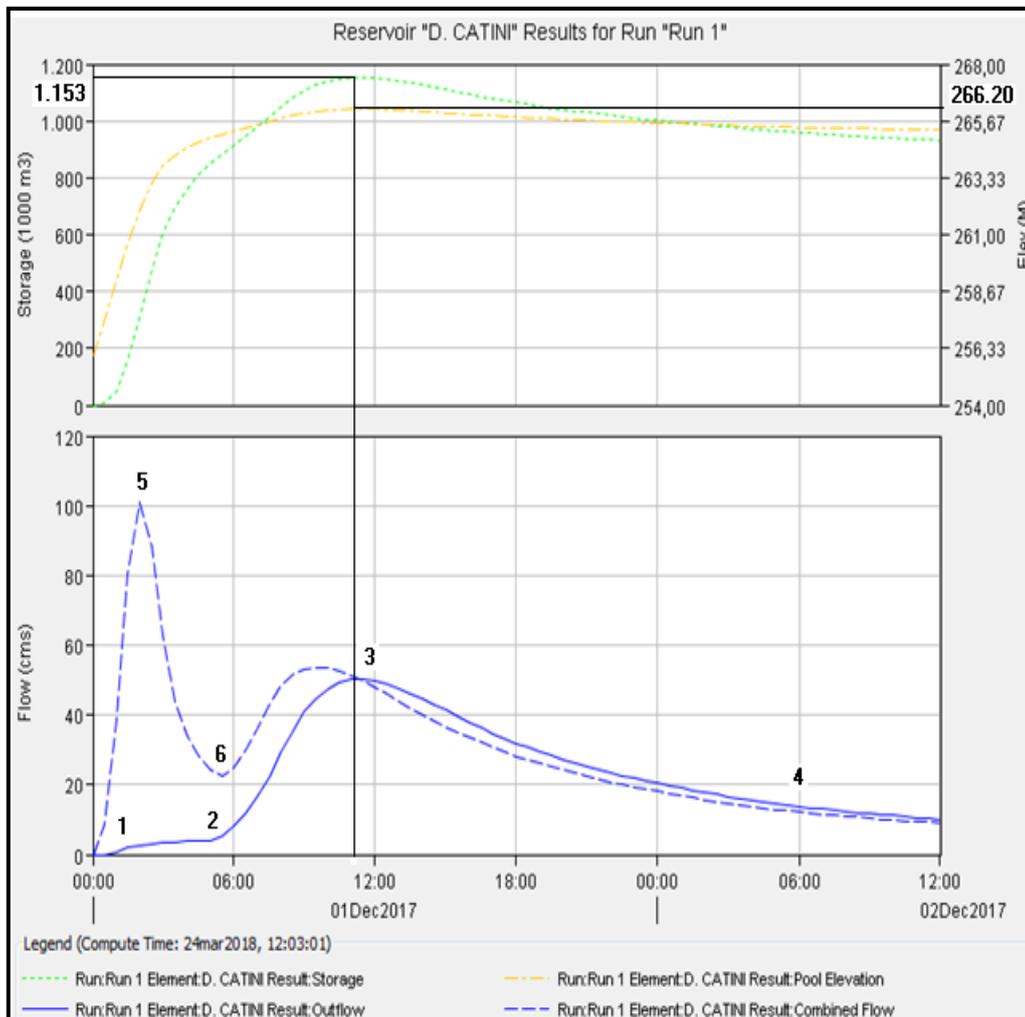


Figura 3.55.- Resultados generales Dique Catini. (500 años).

En la **Figura 3.56** en el punto 1 se puede observar la entrada en funcionamiento del orificio de descarga a los 60 minutos de comenzada la tormenta, en el punto 5 observamos el caudal máximo del

hidrograma ( $100.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en el punto 2 se observa la entrada en funcionamiento del vertedero ( a las 5:00 hs de iniciada la tormenta). En el punto 3 el caudal saliente del dique iguala al caudal entrante al dique a las 11:30 hs de iniciada la tormenta.. En este punto se dan la altura máxima del embalse 266.20 metros y por ende el máximo volumen almacenado 1.153 (1000  $\text{m}^3$ ). En el punto 4 se observa una condición estable en las descargas del dique. En el punto 6 se observa el momento en el cual las descargas del dique Roca llegan al dique Catini mediante el Canal Trasvase.

- **1000 años.**

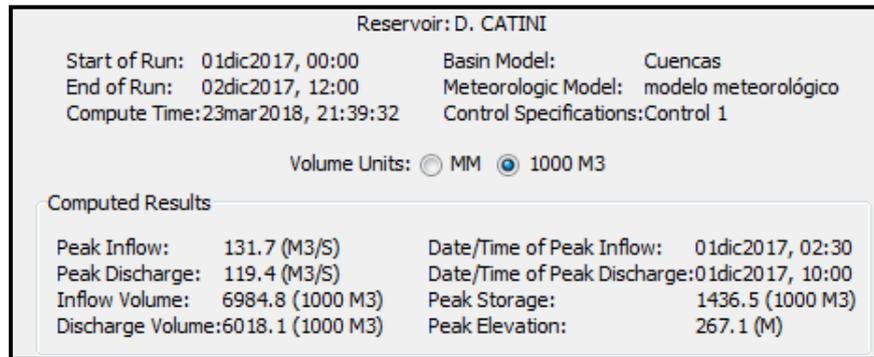


Figura 3.56.- Resultados generales Dique Catini. (1000 años).

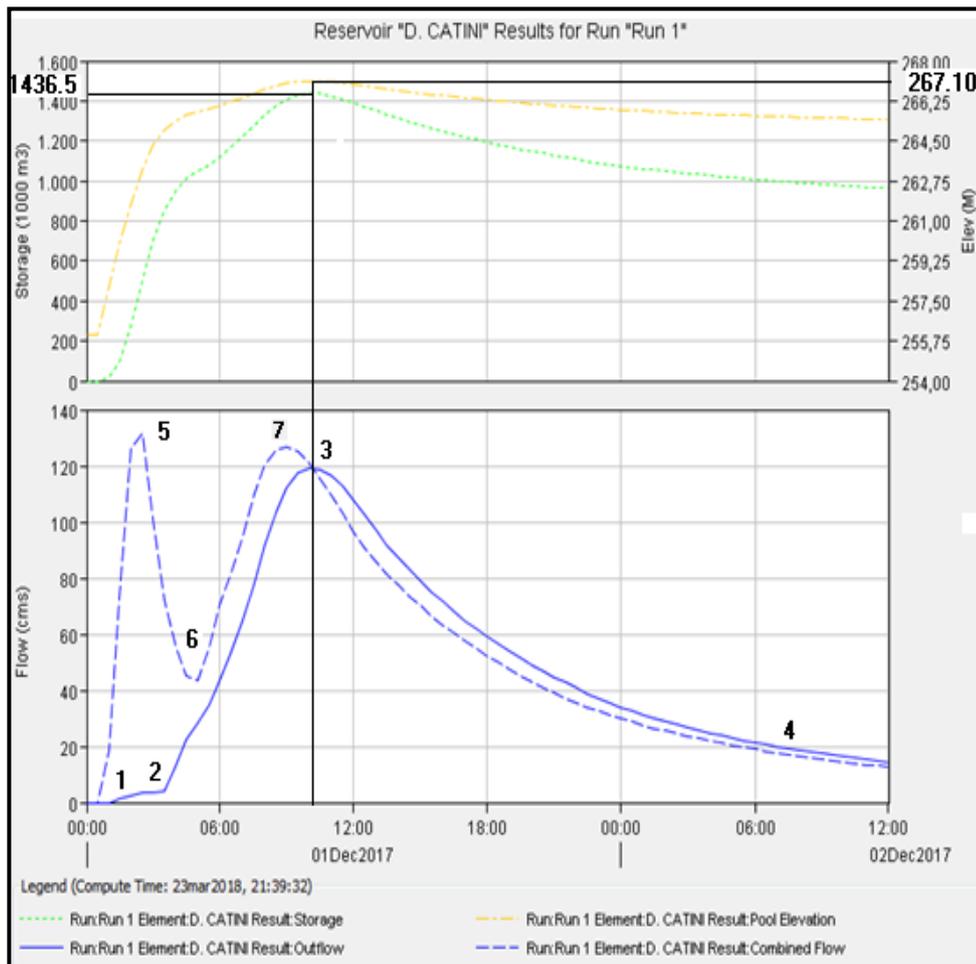


Figura 3.57.- Resultados generales Dique Catini. (1000 años).

En la **Figura 3.58** en el punto 1 se puede observar la entrada en funcionamiento del orificio de descarga a los 30 minutos de comenzada la tormenta, en el punto 5 observamos el caudal máximo del hidrograma ( $131.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en el punto 2 se observa la entrada en funcionamiento del vertedero (a las 3:30 hs de iniciada la tormenta). En el punto 3 el caudal saliente del dique iguala al caudal entrante al dique a las 10:00 hs de iniciada la tormenta. En este punto se dan la altura maxima del embalse 267.10 metros y por ende el máximo volumen almacenado  $1.436.50 (1000 \text{ m}^3)$ . En el punto 4 se observa una condición estable en las descargas del dique. En el punto 6 se observa el momento en el cual las descargas del dique Roca llegan al dique Catini mediante el canal Trasvase. En el punto 7 se observa el pico de caudal producido por las avenidas de las cuencas roca y catini en conjunto.

### 3.5.3.6. Resultados del Canal de salida (desagüe).

- **500 años.**

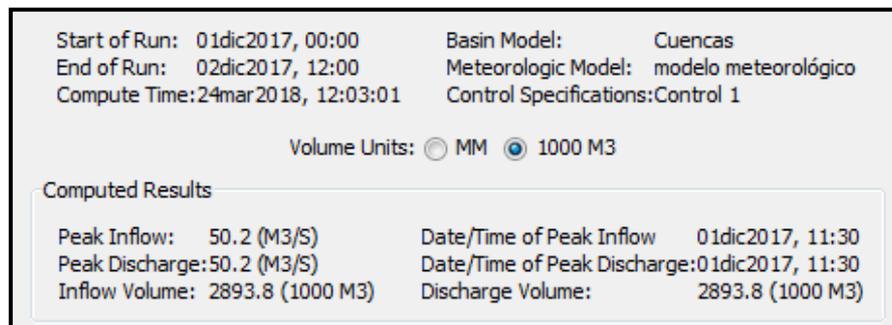


Figura 3.58.- Resultados generales Canal de Desague. (500 años).

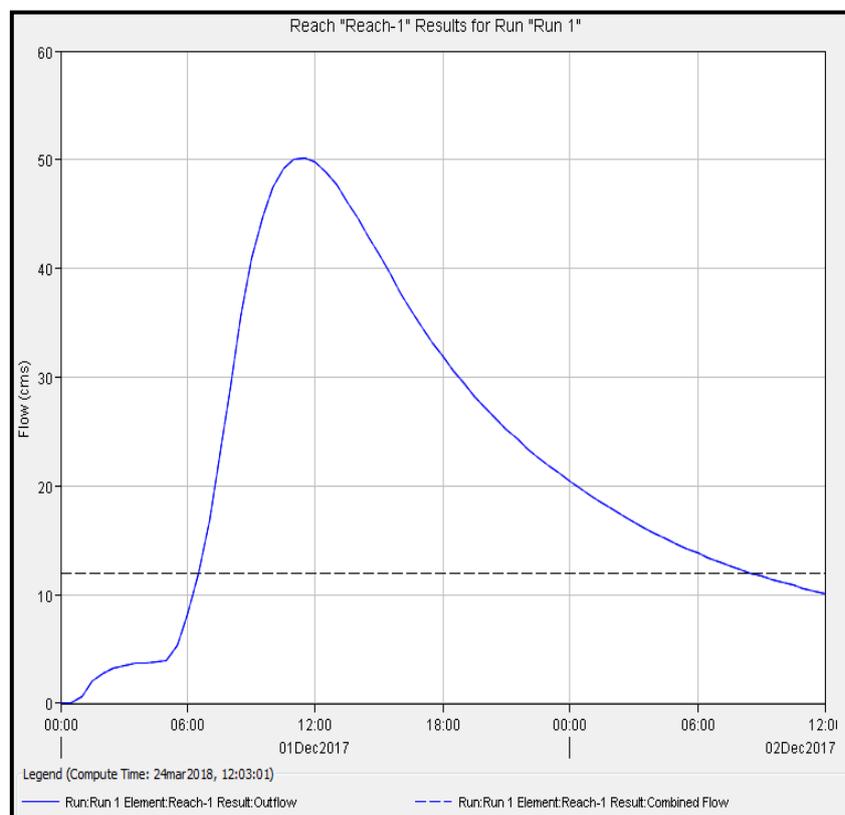


Figura 3.59.- Resultados generales Canal de Desague. (500 años).

En la **Figura 3.60** se puede observar que los caudales máximos generados por el dique Catini (50.2 m<sup>3</sup>/s) superan ampliamente los 12 m<sup>3</sup>/s soportados por el canal de salida.

- **1000 años.**

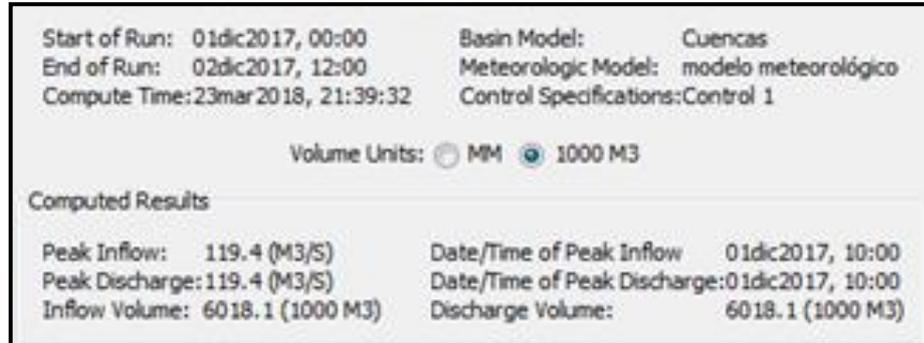


Figura 3.60.- Resultados generales Canal de Desagüe. (1000 años).

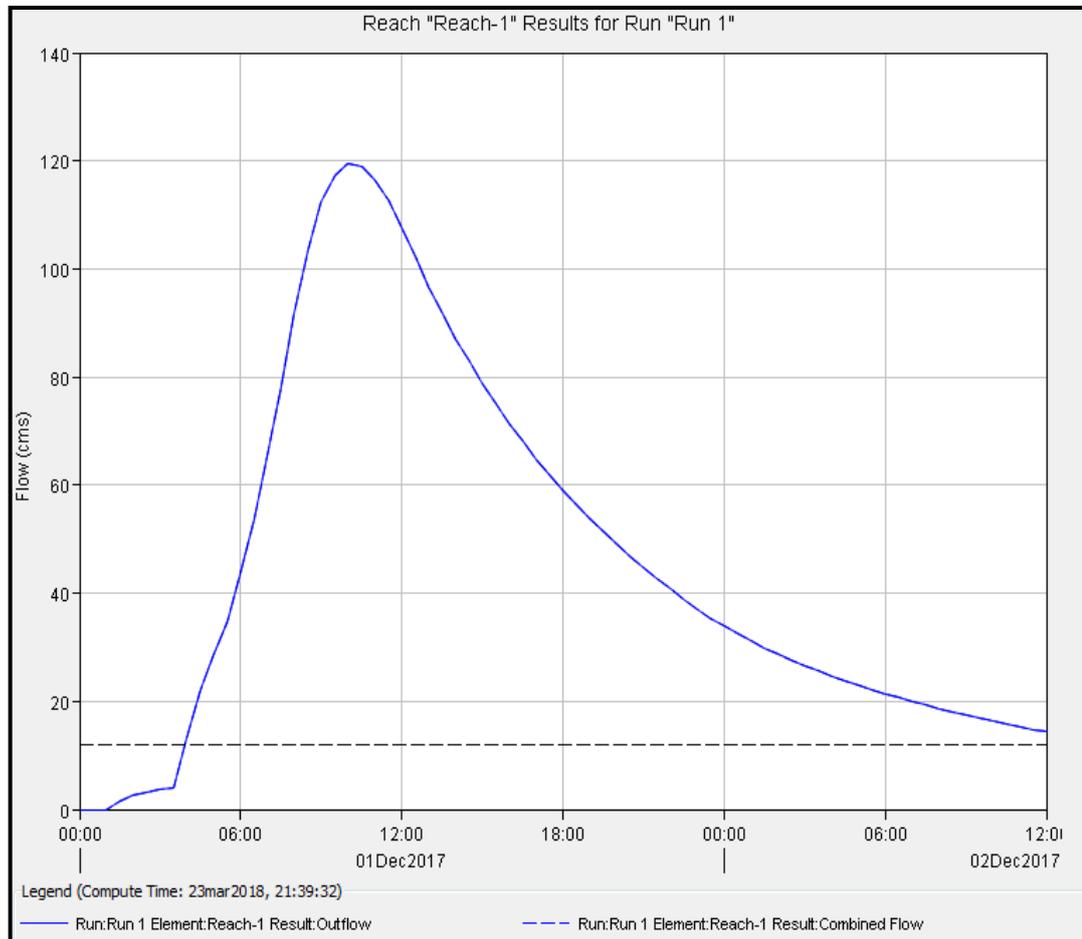


Figura 3.61.- Resultados generales Canal de Desagüe. (1000 años).

En la **Figura 3.62** se puede observar que los caudales máximos generados por el dique Catini (119.4 m<sup>3</sup>/s) superan ampliamente los 12 m<sup>3</sup>/s soportados por el canal de salida.

### 3.6. Determinación de la producción de sedimentos en las cuencas aluvionales.

La cuantificación de la producción de sedimentos se realizó mediante el modelo paramétrico “MUSLE”, **Ecuación 3.3**, la cual se transcribe a continuación:

$$Y = 11,8 (V_{TR} Q_{TR})^{0,56} K LS C P \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Tanto  $V_{TR}$  como  $Q_{TR}$ , fueron determinados en el apartado 3.5

Para implementar la ecuación anterior en ArcGis se calculó por separado cada uno de los factores que la integran mediante una serie de operaciones, dando como resultado una capa raster para cada uno. Esto permitió evaluar un valor ponderado de cada parámetro para cada cuenca.

#### 3.6.1. Erodabilidad del suelo. Factor K.

En la presente tesis los valores de erodabilidad han sido asignados a partir de la textura del suelo existente en la zona, para ello se hizo uso de la **Figura 3.11** y la **Tabla 2.10**. Una vez asignados los valores de  $k$  a cada tipo de suelo se obtuvo la **Tabla 3.27**, la misma muestra la distribución de los mismos en la ZDA.

La **Tabla 3.27**, detalla los valores de “ $K$  medios ponderados” obtenidos para cada cuenca aluvional.

Cuenca	Factor K (Ton Hs/Newton Ha)
Roca	0.207999
Catini	0.282926

Tabla 3.27.- Factor de Erodabilidad K.

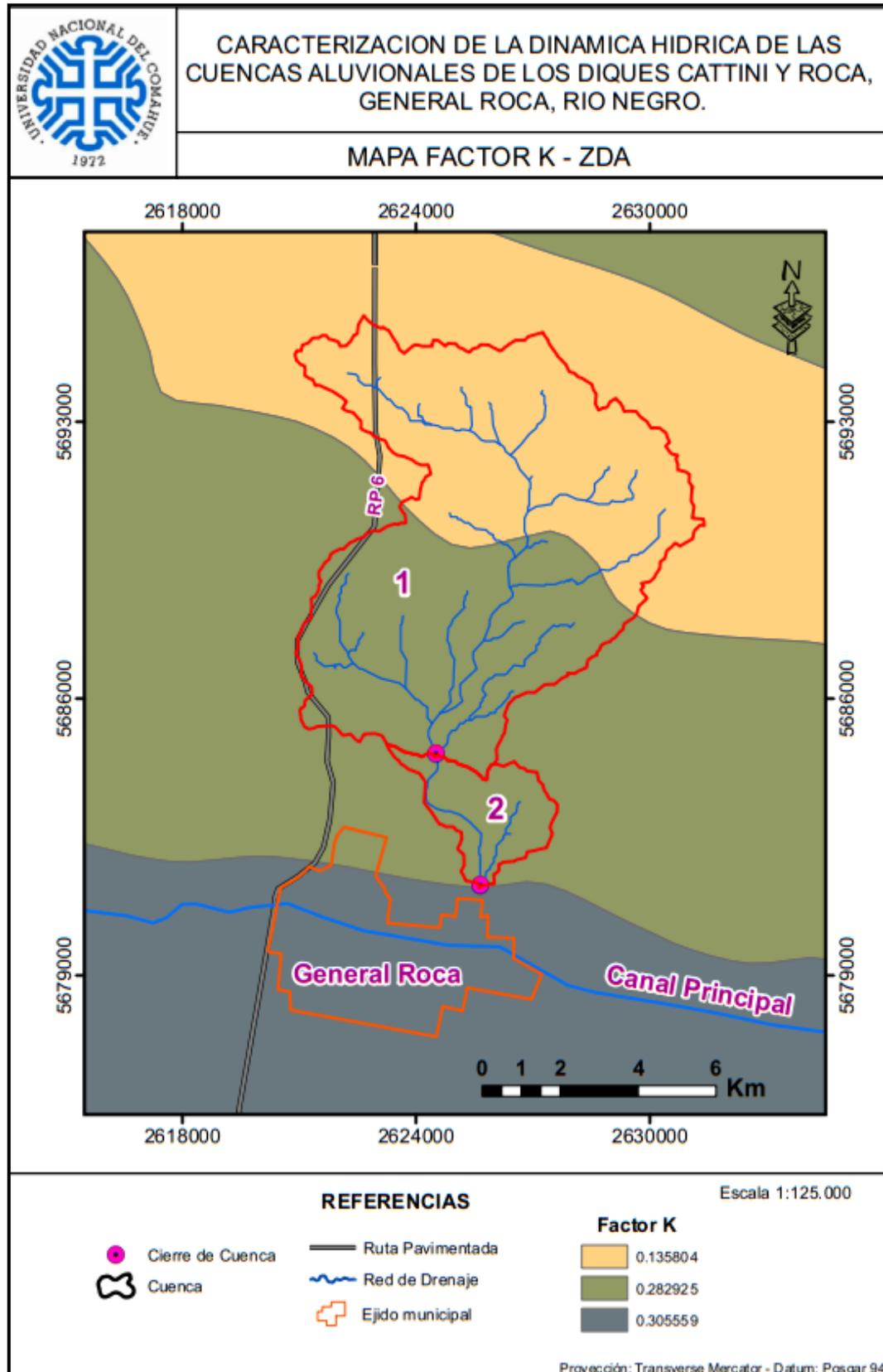


Figura 3.62.- Mapa del Factor K distribuido.

### 3.6.2. Topografía. Factor LS.

Este factor se refiere al efecto combinado de la longitud y el gradiente de la pendiente. Según lo expuesto en el apartado 2.9.2, se obtiene multiplicando el subfactor longitud “L”, por el subfactor gradiente “S”.

Para la obtención del Factor LS, se aplicó la ecuación propuesta por Moore y Burch (1986) presentada en la **Tabla 2.11**, que dentro del ambiente SIG se transforma en la **Ecuación 3.4** (Engel, 1999), se tiene:

$$LS = Pow(FlowAcc * celda / 22.13, m) * Pow\left(\left(\sin(Pend * 3.1416 / 180)\right) / 0.0896, n\right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

*FlowAcc*: grid de acumulación de flujo o flujo acumulado,

*Celda*: Tamaño de las celdas del grid,

*Pend*: pendiente en grados,

*Power*: Potencia,

Transformación de grados sexagesimales a radianes ( $1^\circ = 3,1416/180$  radianes);

Se adaptan  $m = 0,4; n = 1,3$ , para la presente tesis.

El modelo MUSLE sólo es adecuado para la estimación de la erosión laminar y de surcos, por lo que hay un límite superior de la longitud de la pendiente que se debe utilizar según Foster et. al.(1996). Para hacer cumplir este límite superior, se tendrá que modificar el grid de la acumulación de flujo generado dentro del SIG, para ello se tomó **120 mts.** como límite superior para la presente tesis. Puesto que el ancho de cada celda es de **30 metros**, esto se traduce en una acumulación de flujo de **4 celdas** de la grilla.

En la **Tabla 3.28** se muestran los valores de *LS* obtenidos para cada cuenca, dichos valores se obtuvieron a partir del Mapa del Factor LS.

Cuenca	Factor LS
Roca	0.382931
Catini	0.829568

Tabla 3.28.- Valores del Factor LS para cada cuenca.

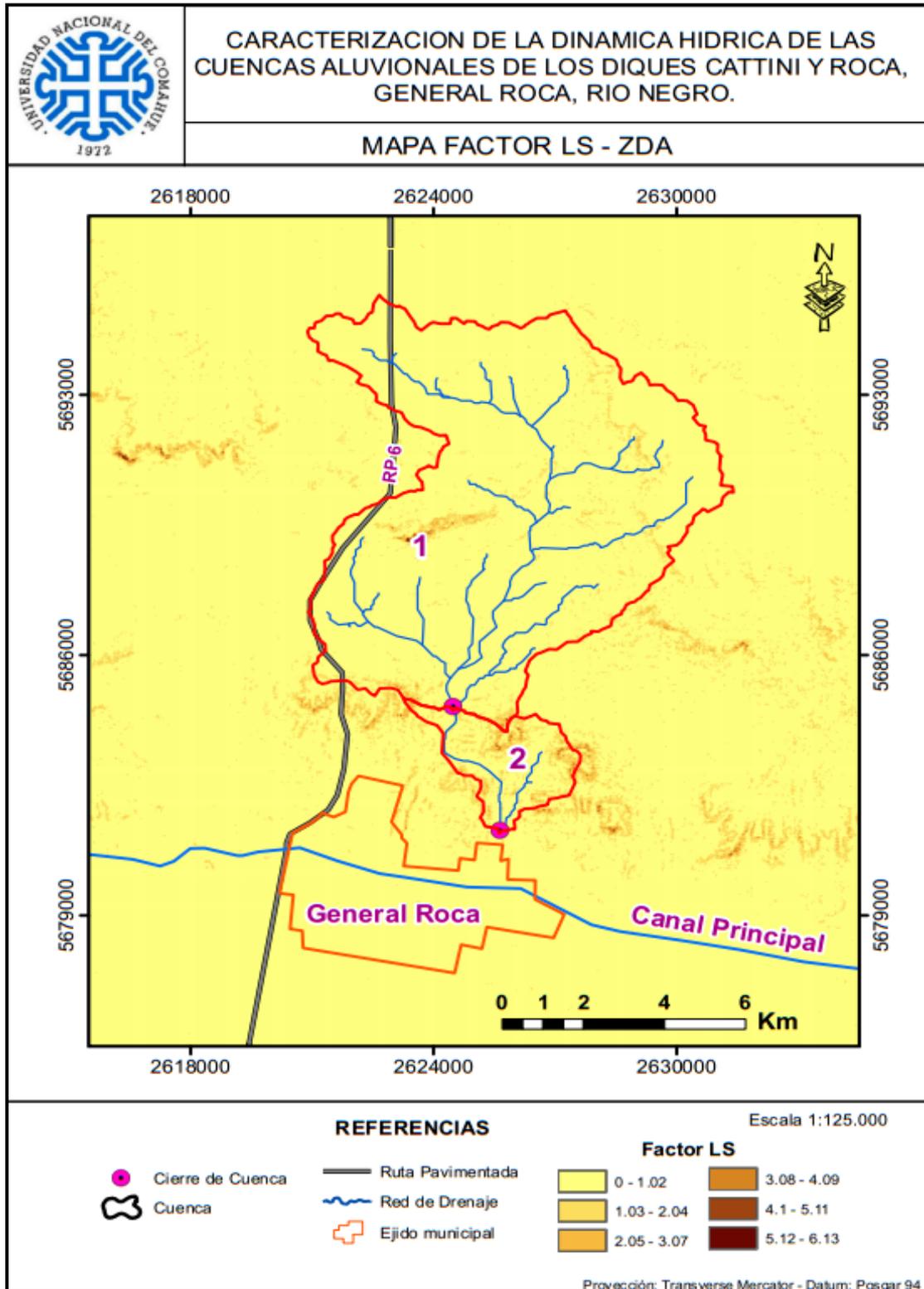


Figura 3.63.- Mapa del Factor LS.

### 3.6.3. Cubierta Vegetal y Manejo. Factor C

A partir de las bandas brindadas por el satélite LANDSAT 8, se calcularon los valores del NDVI del de la ZDA (**Figura 3.64**). Luego mediante la **Ecuación 2.56**, y el álgebra de mapas dentro del software ArcGis, se obtuvo el factor C distribuido (**Figura 3.65**). El valor del “Factor C” de cada cuenca, se calculará según la **Ecuación 2.54**, donde se obtuvo un valor medio ponderado. Se presenta su valor para cada cuenca en la **Tabla 3.29**.

Cuenca	Factor C
Roca	0.463742
Catini	0.468323

*Tabla 3.29.- Valores de C medios ponderados.*

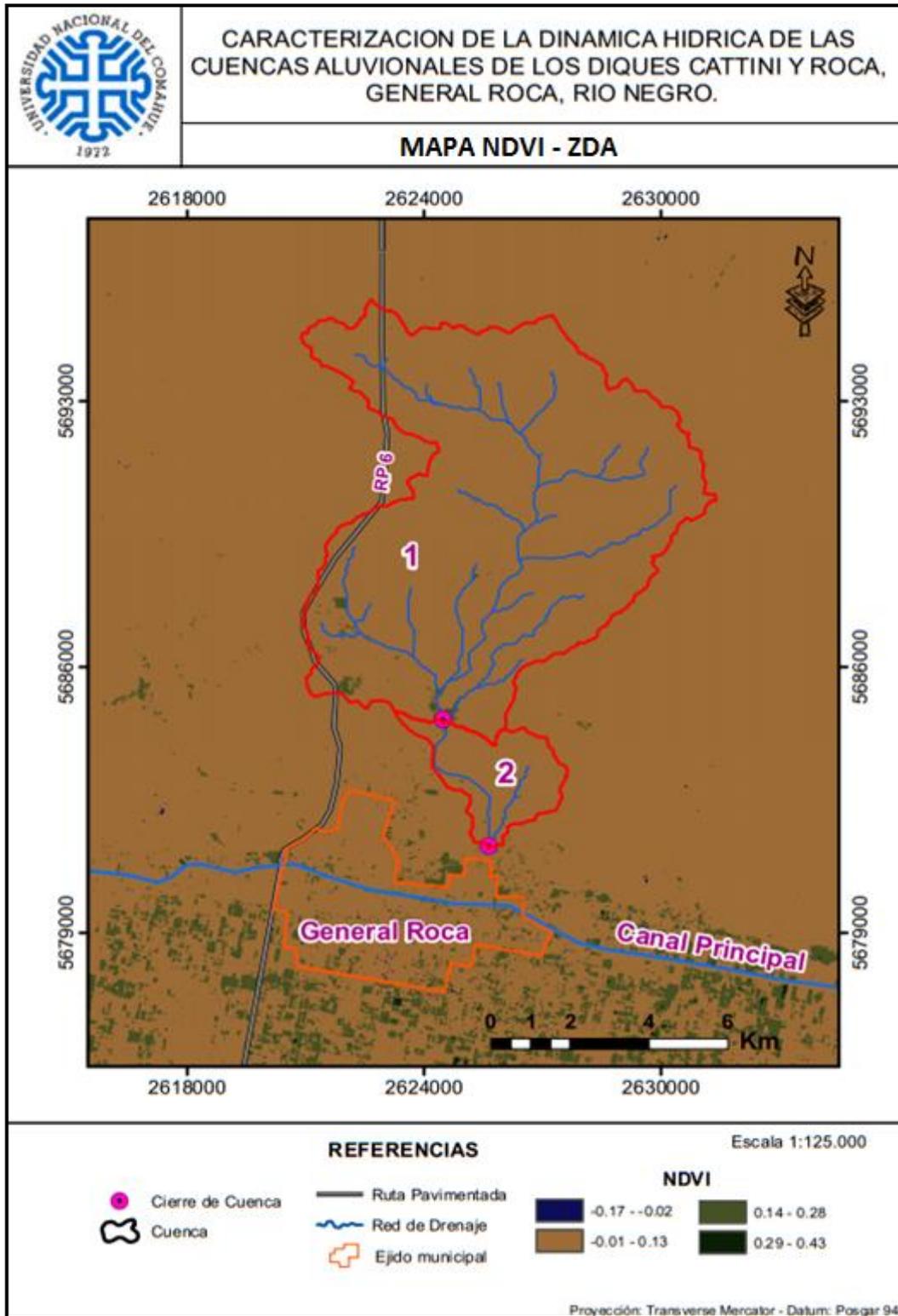


Figura 3.64.- Mapa de NDVI distribuido.

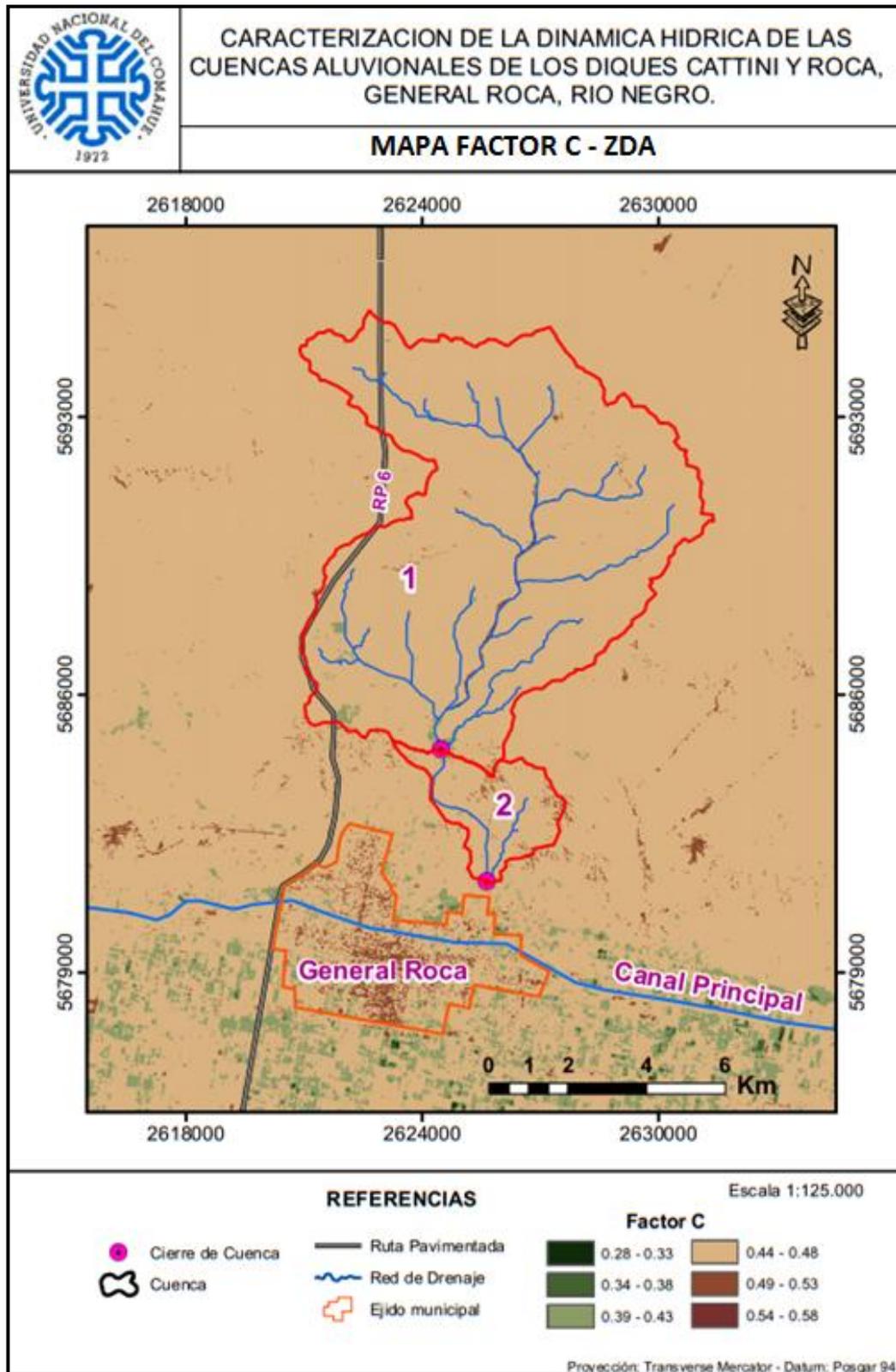


Figura 3.65.- Mapa del Factor C distribuido.

#### 3.6.4. Prácticas de conservación. Factor P.

En la presente Tesis se consideró que sobre las cuencas aluvionales no se practican actividades de conservación, por lo que se adopta un valor de 1 para el Factor P.

### 3.6.5. Factor de Escorrentía.

De la modelación hidrológica realizada en la **apartado 3.5** se obtuvieron los valores de caudales máximos y volumen de escorrentía, para las recurrencias consideradas. Los siguientes se observan en la **Tabla 3.30.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 2, 5 y 10 años.**

En base a dichos valores se calculó el Factor de Escorrentía asociado a cada cuenca.

Cuenca	TR 2 años			TR 5 años			TR 10 años		
	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$
	(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>		(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>		(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>	
Roca	19.5	3.468E+05	6681.3	40.2	7.139E+05	15010.79	62.6	1.0855E+06	24323.96
Catini	5.9	5.54E+04	1224.74	10.2	10.2E+04	2342.24	15	1.455E+05	3546.62

Tabla 3.30.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 2, 5 y 10 años.

Cuenc a	TR 25 años			TR 50 años			TR 100 años		
	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$
	(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>		(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>		(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>	
Roca	108.5	1.8513E+06	44630.08	157.9	2.7422E+06	68616.65	228	3.876E+06	102314.79
Catini	24.2	2.313E+05	6010.01	34.8	3.276E+05	8951.11	48.5	4.475E+05	12836.88

Tabla 3.31.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 25, 50 y 100 años.

Cuenca	TR 500 años			TR 1000 años		
	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$	$Q_{TR}$	$V_{TR}$	$(Q_{TR}V_{TR})^{0.56}$
	(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>		(m <sup>3</sup> /s)	m <sup>3</sup>	
Roca	494.1	8.367E+06	242759.03	665.69	1.1464E+07	342187.59
Catini	100.3	9.108E+05	28708.16	134.7	1.2259E+06	39992.70

Tabla 3.32.- Caudal, Volumen y Factor de Escorrentía para TR 500 y 1000 años.

### 3.6.6. Cálculo de sedimentos.

Aplicando los valores obtenidos de los factores de la ecuación MUSLE, se obtuvieron los montos de producción de sedimentos para las cuencas considerando el estado de humedad antecedente AMCII en los suelos de las mismas, se resumen los resultados en la **Tabla 3.34** y **Tabla 3.35**, respectivamente.

Cuenca	$Y_2$ (Tn)	$Y_5$ (Tn)	$Y_{10}$ (Tn)	$Y_{25}$ (Tn)	$Y_{50}$ (Tn)	$Y_{100}$ (Tn)	$Y_{500}$ (Tn)	$Y_{1000}$ (Tn)
Roca	2912.08	6542.50	10601.68	19452.16	29906.78	44594.23	105807.29	149142.29
Catini	1588.53	3037.98	4600.09	7795.20	11609.92	16649.91	37235.55	51872

Tabla 3.33.- Sedimentos producidos a la salida de las cuencas en toneladas (Tn).

Cuenca	$y_2$ (Tn/Ha)	$y_5$ (Tn/Ha)	$y_{10}$ (Tn/Ha)	$y_{25}$ (Tn/Ha)	$y_{50}$ (Tn/Ha)	$y_{100}$ (Tn/Ha)	$y_{500}$ (Tn/Ha)	$y_{1000}$ (Tn/Ha)
Roca	0.39	0.89	1.44	2.64	4.05	6.04	14.34	20.21
Catini	2.14	4.10	6.21	10.52	15.67	22.47	50.25	70

Tabla 3.34.- Cantidad de sedimentos producidos en toneladas/hectárea (Tn/ha).

### 3.6.6.1. Producción anual de escorrentía y sedimentos.

En la **Tabla 3.35**, **Tabla 3.36** y **Tabla 3.37**, se presentan los montos de producción anual de escorrentía y de sedimentos de cada cuenca, respectivamente; este último fue calculado a través de la **Ecuación 2.58** y considerando una lluvia promedio anual de  $P_a = 200$  mm.

Cuenca	Va (m <sup>3</sup> /año)
Roca	1.02E+07
Catini	1.16E+06

Tabla 3.35.- Producción anual promedio de escorrentía.

Cuenca	As (T/año)	as (T/año/Ha)
Roca	97178.35	13.17
Catini	36194.11	0.81

Tabla 3.36.- Producción anual de sedimentos.

En la **Tabla 3.37** se da la clasificación del grado de degradación por erosión hídrica establecido por la FAO (1980). Aplicando dicha clasificación a los valores de la **Tabla 3.36.- Producción anual de sedimentos**.

, se tiene que de las cuencas analizadas presentan una degradación moderada.

Grado de Degradación	Pérdidas de Suelo	
	T/ha/año	mm/año
Ninguna a ligera	< 10	< 0.6
Moderada	10 - 50	0.6 - 3.3
Alta	50 - 200	3.3 - 13.3
Muy Alta	> 200	> 13.3

Tabla 3.37.- Degradación por erosión hídrica. (FAO, 1980)

Para tomar noción de la magnitud de material movilización que conformará el relleno de las cuencas, se considerará un material sedimentario como la arena seca (peso específico 1.6 T/m<sup>3</sup>). Se tiene:

Cuenca	As (m <sup>3</sup> /año)	As (hm <sup>3</sup> /año)	vol. D-C (hm <sup>3</sup> )	Años
Roca	60736.47	0.0607	8.75	144
Catini	22621.32	0.0226	1.55	68

Tabla 3.38.- Tiempo que tarda en colmatarse cada cuenca.

### 3.7. Resumen del Capítulo.

- En este capítulo se aplica la metodología desarrollada al sistema aluvional Roca-Catini, ubicado en el sector norte de la ciudad de General Roca, utilizando un MDT del Instituto Geográfico Nacional REPÚBLICA ARGENTINA.
- Se realizó la transformación del MDT base en coordenadas geográficas a coordenadas planas, cuyo paso de malla es de 30 m. Esto permitió la compatibilización con la imagen Landsat 8 de la zona. Tanto el MDT como la Imagen Landsat se utilizaron en el software ArcGIS, permitiendo obtener los parámetros morfométricos que caracterizan a las cuencas.
- La clasificación supervisada realizada en el software ERDAS-IMAGINE 2014 a partir de la imagen Landsat 8, permitió identificar con precisión las distintas Coberturas y Usos del Suelo; como también la reclasificación de las texturas del suelo permitió definir los Grupos Hidrológicos presentes en la ZDA. Dichos componentes junto con las pendientes de la zona, posibilitaron la aplicación de un Modelo Cartográfico que permitió mediante el análisis espacial, detectar las áreas de igual índice CN en forma rápida y precisa. Luego mediante reclasificación del parámetro CN se determinó del potencial de escorrentía.
- A través del análisis estadísticos de los datos pluviométricos relevados, la aplicación del modelo de precipitaciones intensas de origen convectivo para la RAVRN desarrollado en la Universidad Nacional de Comahue y los hietogramas de Huff, se elaboraron las Tormentas de Proyecto. Dichas tormentas constituyen uno de los datos más relevantes para la modelación hidrológica en HEC-HMS.
- Los resultados obtenidos constituyeron los insumos para efectuar la simulación mediante el modelo HEC-HMS, se debe enfatizar sobre la importancia de los procesos de control de calidad de los datos iniciales y métodos aplicados para la integración raster/vector, tratamiento de imágenes, álgebra de mapas, modelos cartográficos y análisis espacial en SIG. La simulación permitió obtener los volúmenes y caudales de escorrentía superficial de cada cuenca, y comparar dichos volúmenes generados con las curvas de almacenamiento de los diques, para determinar el correcto funcionamiento del sistema en su conjunto.
- Por último, se determinó el volumen anual de producción de sedimentos para cada cuenca, mediante el uso del modelo MUSLE, y la metodología de Simons.

#### 4. Análisis de resultados.

Los resultados alcanzados permiten establecer que:

- Los diques Catini y Roca se construyeron en la ZDA debido a la peligrosidad hidrológica que representan sus cuencas de aporte. Dicha amenaza se evidenció en varios eventos ocurridos, y corroborados en la presente tesis ( se usaron datos actuales y actualización de los datos antiguos).

- Es evidente de acuerdo a los análisis realizados que ambos diques son imprescindibles para la defensa de la ciudad de General Roca ante las escorrentías o crecidas aluvionales de gran magnitud que se originan en la cuencas analizadas, como consecuencia de precipitaciones intensas de origen convectivo. Dicho resultado fue determinado al calcular las precipitaciones mediante el modelo de precipitación desarrollado en la Universidad del Comahue para la RAVRN, y al obtener los elevados potenciales de escorrentías de las cuencas mediante los índice CN calculados (89.90 para la cuenca Roca y 93.19 para la cuenca Catini), los valores de CN manifiestan que un gran porcentaje de la precipitación que cae sobre el sistema de cuencas escurrirá superficialmente.

- En la ZDA las precipitaciones de interés son las convectivas, ya que son las que generan mayor volumen de escorrentía, las mismas se hacen presente en primavera y verano. Esto se observa en la **Figura 3.19**.

- La tormenta de proyecto adoptada posee una duración de 5 hs, ya que los tiempos de concentración que se establecieron fueron: para la cuenca Roca de 4.52 hs, para la cuenca Catini de 1.68 hs (se determinó 5 hs. ya que la cuenca Roca es la que domina el sistema con su escorrentía superficial). Esto produce que todos los puntos de las Cuencas Roca y Catini, aporten el máximo volumen y caudal posibles generados por la tormenta de diseño, que es acorde además a la duración de tormentas para las cuencas de similares características de la región.

- El sistema de protección aluvional es un conjunto de diques y canales que fue construido por partes, pero el funcionamiento en su conjunto hace que los grandes volúmenes y caudales de escorrentía a tratar sea más eficiente. Esto se observa pues los volúmenes de salida del dique Roca y Catini son peligrosos para llegar directamente a la ciudad.

- La cuenca Roca presenta un caudal pico de 494 m<sup>3</sup>/s, y la cuenca Catini 100.3 m<sup>3</sup>/s para una recurrencia de 500 años. Estos evidencian el por qué el dique Roca se construyó primero, y por qué se considera al mismo como atenuador principal y al dique Catini como atenuador secundario (ambos son sumamente necesarios).

- En el **Figura 3.41** se observa la altura de embalse del Dique Roca para una recurrencia de 500 Años, llegando a la cota 304.1 msnm, muy próximo a los 305 msnm (cota de coronamiento), lo cual muestra una situación crítica y peligrosa. Esta situación se agrava para la recurrencia de 1000 años, que supera el nivel de coronamiento llegando a los 305,7 msnm.

- En el caso del dique Catini para una recurrencia de 500 años, se eleva el nivel de embalse hasta los 266.20 msnm, concordante con situaciones verificadas en tormentas recientes. Este nivel de

embalse no supera los 267.5 msnm de cota de coronamiento, pero deja poco margen para atenuar una crecida superior. Esta situación cambia para las recurrencias de 1000 años, pues el dique Roca ve superado su coronamiento, y el conjunto de caudales generados en la cuenca Catini producen un nivel de embalse superior de 267.1 msnm.

- Para el caso del canal de trasvase, este ve superado su capacidad de conducción tanto en las recurrencias de 500 como de 1000 años y con velocidades superiores a los 3 m/s, generando gran erosión en su cauce escavado sobre terreno natural.

- La capacidad de descarga del canal de salida del Dique Catini (Canal de Desagüe), es superada ampliamente para recurrencias de 500 y 1000 años, generando desbordes.

- Los volúmenes y caudales de llegada a los embalses son los que generan el arrastre de sedimentos y como a mayor caudal mayor cantidad de sedimentos generados, podemos observar esta diferencia entre los arrastres de sedimentos en ambas cuencas.

- La pérdida de suelo por erosión hídrica en las cuencas Roca y Catini se determinó por medio del modelo paramétrico “MUSLE” y la metodología de sedimentos propuesta por Simons, obteniéndose la magnitud de sedimentos que se movilizan para una crecida de 1000 años de recurrencia. Dichos volúmenes de sedimentos al año son:  $0.061 \text{ hm}^3$  para la cuenca Roca, y  $0.0225 \text{ hm}^3$  para la cuenca Catini (suponiendo un sedimento arena mojada cuya densidad es de  $1.6 \text{ T/m}^3$ ). Esto implica una reducción en la capacidad de los embalses, si se considera que no existe una perturbación antrópica en las cuencas, el embalse Roca se colmatará en 144 años y el Catini en 68 años.

## 5. Conclusiones.

La presente tesis pone de manifiesto la dinámica hídrica de las Cuencas Roca y Catini, para lo cual se delimitaron las cuencas con un modelo digital del terreno, las redes de drenaje y las características morfométricas, de suelos, cobertura y potencial de escorrentía de las mismas; aprovechando la versatilidad de los sistemas de información geográfica para integrar a los modelos de predicción.

La importancia de la existencia de estaciones meteorológicas en la zona de estudio quedó de manifiesto en la recopilación de información, y en el procesamiento de datos.

El procesamiento de datos meteorológicos permitió elaborar tormentas de proyecto asociadas a distintas recurrencias, para lo cual se consideró el hietograma de Huff. Se calcularon las intensidades máximas, y se obtuvieron los hietogramas para distintas recurrencias.

Se calcularon las escorrentías superficiales mediante el software HEC-HMS, se eligió una recurrencia de 500 y 1000 años, se consideraron los 3 estados de humedad para los suelos de las cuencas y se obtuvieron los caudales máximos de las cuencas, los volúmenes de escorrentía e hietogramas.

Se describió el modelo hidrológico completo, con la ubicación exacta de cuencas y diques, y se modeló el sistema en conjunto, obteniendo las curvas volumen- elevación de cada dique, la laminación de crecida de los diques y canales.

Se calcularon los volúmenes de sedimentos generados por las cuencas, basados en los volúmenes y caudales de escorrentía generados. Se estimó el tiempo de colmatación del dique.

Los resultados de las simulaciones generadas permiten concluir que:

- ✓ Se observó que la ZDA presenta características hidrológicas bien marcadas, también que las cuencas son pequeñas pero con elevado potencial de escorrentía superficial. Dichas particularidades generan caudales elevados ante precipitaciones intensas.
- ✓ de volúmenes y caudales generados por la cuenca Roca son superiores a los generados por la cuenca Catini, esto se debe a la diferencia en superficie que abarca cada cuenca, ocupando la cuenca Catini un 10% del área que ocupa la cuenca Roca. Los caudales generados implican una escorrentía elevada, atribuidos principalmente a los altos valores de CN hallados para cada cuenca.
- ✓ Es de suma importancia los trabajos precedentes, ya que permitieron confeccionar un modelo para la zona, calibrar los modelos y permitieron generar los hietogramas acumulados necesarios para la simulación de los volúmenes de escorrentía.
- ✓ Las precipitaciones ocurridas en la zona son de características fuertemente convectivas y si bien se simuló tormentas de corta duración acordes con los tiempos de concentración de la cuenca, estas simulaciones mostraron volúmenes elevados de precipitación.

- ✓ La modelación del conjunto del sistema hidrológico es una herramienta que permitió simular el sistema de protección aluvional en su conjunto, bajo condiciones extremas, evidenciando la situación crítica del sistema. Esto se debe a que los volúmenes de escorrentía superficial generados en la simulación con HEC-HMS para una tormenta con recurrencia de 500 o 1000 años, son próximos a los volúmenes máximos de embalse que permite el dique Roca, siendo este quien lamina el mayor volumen y el mayor caudal.
- ✓ La estimación de los sedimentos mediante el método MUSLE son acordes al tipo de cuenca y tormenta de diseño adoptada, pero que no son considerados un problema para la situación actual de los diques. Es decir, que la colmatación de los diques por arrastre de sedimentos no reduce de manera significativa el volumen de embalse.

## 6. Recomendaciones.

Basados en las situaciones historias de inundación que sufrió la zona de análisis, evidenciando su importancia en la construcción de los diques y la situación actual del sistema recomendamos:

- 1) Mantenimiento programado y periódico de las obras de arte existentes, tales como alcantarillas, enrocado, retiro de malezas, limpieza de canal trasvase y prohibición de toda actividad recreativa o que interfiera con la reducción de volúmenes de los diques. (ver Anexo)
- 2) Se recomienda el cierre del basural en cercanías de los diques Roca y Catini, pues el mismo avanza sobre sus cuencas incorporando basura y escombros que podrían obstaculizar las obras de arte.
- 3) Se recomienda trasladar los asentamientos que se encuentran próximos al vertedero de la cuenca Roca y Catini.
- 4) Se recomienda informar a la población la importancia del sistema, pues el vandalismo ha causado deterioro de las obras de arte.
- 5) Se recomienda restringir el acceso vehicular al público para evitar vandalismo y el uso como basurero.
- 6) Se recomienda la elevación del coronamiento de ambos diques por encima de su altura actual al menos 2 metros para el dique Roca y 1 metro para el dique Catini, siempre considerando que los cálculos fueron realizados con una recurrencia de 1000 años. Si bien es una recurrencia baja, es acorde a la importancia de los diques sobre la ciudad de General Roca.

## 7. Anexo.

### 7.1. Serie de precipitaciones diarias.

INDICE	AÑO	FECHA	Pd (mm)	INDICE	AÑO	FECHA	Pd (mm)
1	1990	10/02/1990	91.6	31	2004	22/04/2004	27
2	2014	06/04/2014	87	32	2004	26/07/2004	27
3	2000	02/10/2000	68	33	2016	01/01/2016	27
4	1981	26/03/1981	67.3	34	2016	11/05/2016	27
5	2012	16/11/2012	63	35	1991	18/05/1991	26.8
6	2006	22/02/2006	60	36	1994	11/10/1994	26.2
7	2012	14/10/2012	56	37	1984	19/06/1984	25.5
8	1997	21/03/1997	48	38	1982	23/09/1982	25
9	2014	07/04/2014	47	39	2006	03/10/2006	25
10	2009	10/05/2009	45.6	40	1993	03/03/1993	24.1
11	2006	18/02/2006	45	41	2005	28/06/2005	24
12	2004	07/02/2004	43	42	1992	24/01/1992	23.4
13	2001	29/09/2001	41.5	43	1990	07/02/1990	23.2
14	1992	26/11/1992	39.4	44	2002	19/10/2002	23
15	1979	07/01/1979	37.3	45	1994	02/01/1994	22.6
16	1984	19/12/1984	36	46	1984	18/04/1984	22.5
17	1979	01/10/1979	35.7	47	1996	04/12/1996	22
18	1984	30/03/1984	34	48	2002	18/03/2002	22
19	1988	20/09/1988	33.8	49	2007	13/09/2007	22
20	1982	26/09/1982	33.6	50	2008	19/05/2008	22
21	2010	26/09/2010	30.7	51	2015	15/04/2015	22
22	2010	27/09/2010	30.5	52	1988	07/03/1988	21.5
23	1997	28/01/1997	29.5	53	2001	10/05/2001	21.5
24	1987	22/02/1987	29	54	2005	01/12/2005	21.5
25	2014	03/10/2014	29	55	2002	26/02/2002	21.2
26	1986	16/01/1986	28.1	56	2004	04/04/2004	21
27	1983	02/01/1983	28	57	2016	05/05/2016	21
28	1987	22/03/1987	27.5	58	2005	12/12/2005	20.5
29	1987	03/03/1987	27.4	59	2000	06/07/2000	20
30	1984	18/03/1984	27.1	60	2015	20/09/2015	20

## 7.2. Ajuste estadístico con la función de distribución GEV.

INDICE	AÑO	FECHA	Pd (mm)	F(x)	GEV
1	1990	10/02/1990	91.6	0.99	0.983
2	2014	06/04/2014	87	0.98	0.980
3	2000	02/10/2000	68	0.96	0.961
4	1981	26/03/1981	67.3	0.94	0.960
5	2012	16/11/2012	63	0.93	0.952
6	2006	22/02/2006	60	0.91	0.944
7	2012	14/10/2012	56	0.89	0.932
8	1997	21/03/1997	48	0.88	0.893
9	2014	07/04/2014	47	0.86	0.886
10	2009	10/05/2009	45.6	0.84	0.875
11	2006	18/02/2006	45	0.83	0.870
12	2004	07/02/2004	43	0.81	0.852
13	2001	29/09/2001	41.5	0.79	0.836
14	1992	26/11/1992	39.4	0.78	0.809
15	1979	07/01/1979	37.3	0.76	0.775
16	1984	19/12/1984	36	0.74	0.751
17	1979	01/10/1979	35.7	0.73	0.745
18	1984	30/03/1984	34	0.71	0.706
19	1988	20/09/1988	33.8	0.69	0.701
20	1982	26/09/1982	33.6	0.68	0.696
21	2010	26/09/2010	30.7	0.66	0.609
22	2010	27/09/2010	30.5	0.64	0.602
23	1997	28/01/1997	29.5	0.63	0.564
24	1987	22/02/1987	29	0.61	0.544
25	2014	03/10/2014	29	0.59	0.544
26	1986	16/01/1986	28.1	0.58	0.505
27	1983	02/01/1983	28	0.56	0.501
28	1987	22/03/1987	27.5	0.54	0.477
29	1987	03/03/1987	27.4	0.53	0.473
30	1984	18/03/1984	27.1	0.51	0.458
31	2004	22/04/2004	27	0.49	0.453
32	2004	26/07/2004	27	0.48	0.453
33	2016	01/01/2016	27	0.46	0.453
34	2016	11/05/2016	27	0.44	0.453
35	1991	18/05/1991	26.8	0.43	0.443
36	1994	11/10/1994	26.2	0.41	0.412
37	1984	19/06/1984	25.5	0.39	0.374

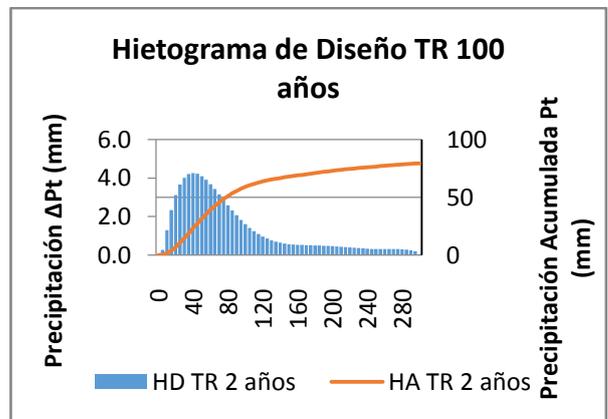
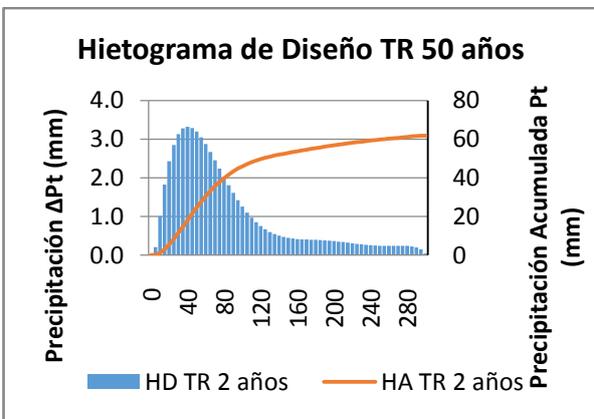
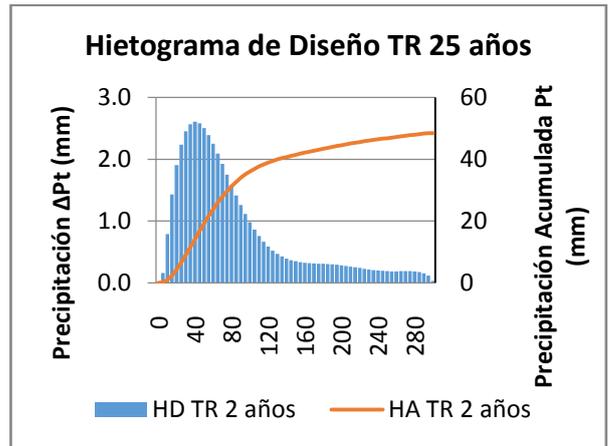
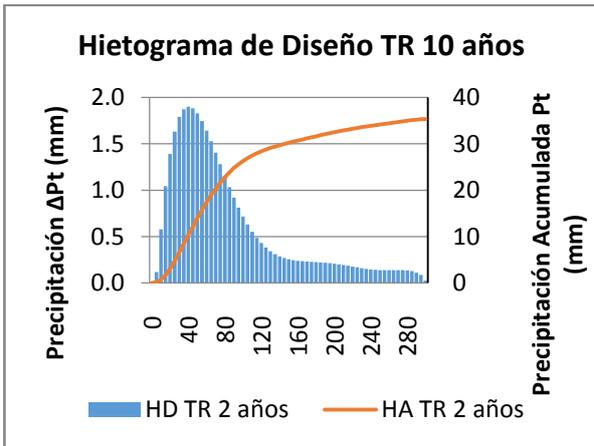
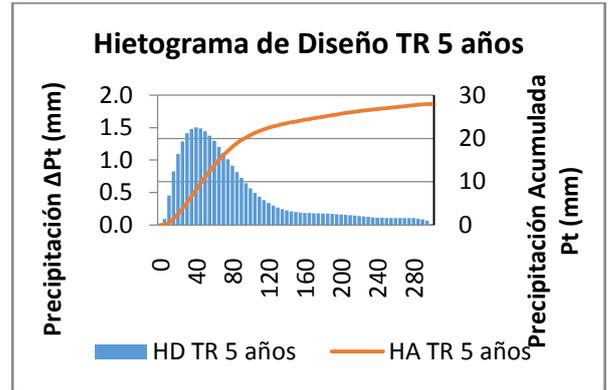
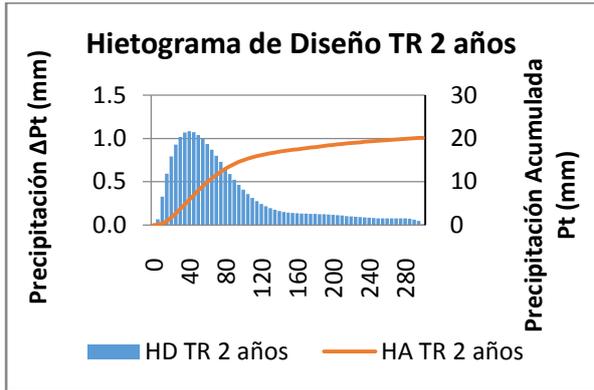
INDICE	AÑO	FECHA	Pd (mm)	F(x)	GEV
38	1982	23/09/1982	25	0.38	0.346
39	2006	03/10/2006	25	0.36	0.346
40	1993	03/03/1993	24.1	0.34	0.293
41	2005	28/06/2005	24	0.33	0.287
42	1992	24/01/1992	23.4	0.31	0.252
43	1990	07/02/1990	23.2	0.29	0.240
44	2002	19/10/2002	23	0.28	0.228
45	1994	02/01/1994	22.6	0.26	0.204
46	1984	18/04/1984	22.5	0.24	0.198
47	1996	04/12/1996	22	0.23	0.169
48	2002	18/03/2002	22	0.21	0.169
49	2007	13/09/2007	22	0.19	0.169
50	2008	19/05/2008	22	0.18	0.169
51	2015	15/04/2015	22	0.16	0.169
52	1988	07/03/1988	21.5	0.14	0.141
53	2001	10/05/2001	21.5	0.13	0.141
54	2005	01/12/2005	21.5	0.11	0.141
55	2002	26/02/2002	21.2	0.09	0.125
56	2004	04/04/2004	21	0.08	0.115
57	2016	05/05/2016	21	0.06	0.115
58	2005	12/12/2005	20.5	0.04	0.090
59	2000	06/07/2000	20	0.03	0.068
60	2015	20/09/2015	20	0.01	0.068

### 7.3. Pruebas de bondad ajuste.

En esta sección se muestran las salidas proporcionados por el software EasyFit 5.5 luego de realizar los test de bondad de ajuste.

<b>Gen. Extreme Value [#1]</b>					
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>					
Tamaño de la muestra	60				
Estadística	0.07817				
Valor P	0.82893				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.13573	0.15511	0.17231	0.19267	0.20673
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Anderson-Darling</b>					
Tamaño de la muestra	60				
Estadística	0.67437				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Chi-cuadrado</b>					
Grados de libertad	5				
Estadística	5.1504				
Valor P	0.39781				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	7.2893	9.2364	11.07	13.388	15.086
Rechazar?	No	No	No	No	No

**7.4. Hietogramas de diseño para TR de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.**



### 7.5. Estado del Sistema al 17 de Marzo de 2017.



En la foto se puede observar la falta de mantenimiento en los espaldones aguas arriba del Dique Roca



En la foto se observa la falta de mantenimiento en el coronamiento del Dique Roca



En la foto se observa la actividad antrópica en la cuenca Roca.



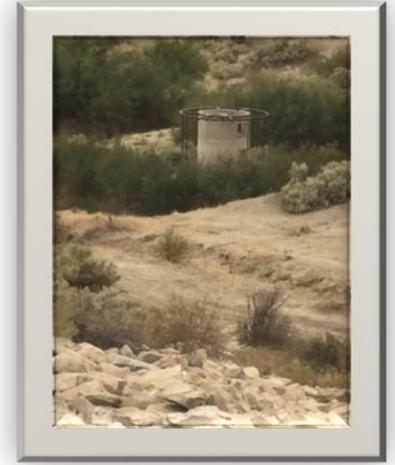
En la foto se observar la actividad antrópica en los espaldones aguas abajo del Dique Roca.



En la foto se observan las obstrucciones de malezas en la torre 1 de los descargadores de fondo del Dique Roca.



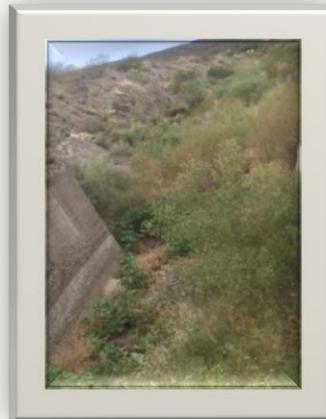
En la foto se observa el efecto del vandalismo en las rejas de protección de las torres de los descargadores de fondo del Dique Roca.



En la foto se observan las obstrucciones de malezas en la torre 2 de los descargadores de fondo del Dique Roca.



En la foto se observa la falta de limpieza en la salida de los descargadores de fondo del Dique Reoca



En la foto se observa la falta de mantenimiento en la salida de los descargadores de fondo del Dique Roca



En la foto se observa la falta de mantenimiento del Canal Trasvase



En las foto se observa la actividad antrópica  
aguas abajo del Dique Roca-Cuenca Catini



En la foto se observa el crecimiento  
de malezas en la Cuenca Catini



En la foto se observa la falta de mantenimiento  
en el coronamiento del Dique Catini



En la foto se observa la falta de  
Mantenimiento en la Cuenca Catini



En la foto se observa el efecto del vandalismo en las rejas de la torre de toma de los descargadores de fondo del Dique Catini



En la foto se observan las obstrucciones laterales en la torre de toma por falta de mantenimiento



En la foto se observa la falta de mantenimiento en el espaldones aguas abajo del Dique Catini y la Actividad Antrópica sobre el mismo.



En la foto se observa la salida del descargador de fondo del Dique Catini-Libre de Obstrucciones.



En la foto se observa el amortiguador de flujo en la salida de los descargadores de fondo del Dique Catini-Parcialmente Obstruida



En la foto se observa la falta de mantenimiento en la estructura de amortiguación de salida del descargador de fondo del Dique Catini



En la foto se observa la falta de mantenimiento en el Canal de Salida del Dique Catini ( Desagüe).

## 8. Bibliografía

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: LIMUSA S.A. de C.V.
- ArcGIS. (s.f.). Recuperado el Agosto de 2017, de <https://www.arcgis.com>
- Bradbury, K.R.; Dripps, W.; Hankley, C; Anderson, M.; Potter, K. (2000). *Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates*.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí, México: Universitaria Potosina.
- Chao-Yuan Lin, Wen-Tzu Lin, Wen-Chieh Chou. (2002). *Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience*. Soil & Tillage Research, 68, pp.143-152.
- Chow, Maidment, Mays. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.
- Engel, B. A. (1999). *Estimating soil erosion using RUSLE (revised universal soil loss equation) using ArcView*. Purdue University Department of Agricultural and Biological Engineering. West Lafayette, Indiana.
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma.
- Fattorelli S., Fernández P. (2011). *Diseño Hidrológico* (Segunda ed.). WASA - GN.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales*. Oviedo: Pentalfa Ediciones.
- Foster, G.R., Renard, K.G., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A.,. (1996). *RUSLE User's Guide*. Soil and Water Cons. Soc. .
- Gámez Morales, W. (2009). *Téxto básico de Hidrología*. Managua, Nicaragua: Editronic, S.A. .
- Giménez Suárez, M. (2008). *Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España)*.
- Goldman S.J., Jackson K., Bursztynsky T.A. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook*. New York: McGraw Hill Book Co.
- Google Maps. (s.f.). Recuperado el 2 de agosto de 2017, de <https://maps.google.com.ar>
- Horton, R. (1932). *Drainage Basin Characteristics*. Tans. Am. Geoplys.
- Huff, F. (1967). *Time distributions of rainfall in heavy storms*. Water Resour. Res. vol. 3.

*Hydrologic Engineering Center*. (5 de Septiembre de 2017). Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

*Instituto Geográfico Nacional*. (s.f.). Recuperado el 25 de Julio de 2017, de <http://www.ign.gob.ar/>

INTA. (2000). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Instituto de Tecnología .

Linsley, Kohler, Paulus. (1977). *Hidrología para ingenieros* (Segunda ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.

Llamas, J. (1993). *Hidrología General, Principios y Aplicaciones*. Bilbao: Universidad del País Vasco.

López Alonso, R. (2001). *Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método de número de curva del Soil Conservation Service*. Lérída.

Mármol, L. (2008). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes*. Universidad Nacional de Salta, Salta.

Moncho Agud, R. (2008). Análisis de intensidad de precipitación: Método de la intensidad contigua. *Aficionados a la Meteorología* .

Moncho Agud, R. (2008). *Análisis de la intensidad de precipitación: Método de la Intensidad Contigua*.

Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (Segunda ed.). Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Moore, I.D y Burch, G.J. (1986). *Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects*.

Negro, D. R. (18 de 10 de 2003). Estación Meteorológica: 100 años. *Estación Meteorológica: 100 años* , pág. <http://www1.rionegro.com.ar/arch200310/c18j03.html>.

Rapacioli R., M. M. (1996). *Determinación de un modelo de precipitaciones intensas para la región del Alto Valle del Río Negro y de curvas caudal – área – frecuencia en zona de meseta al Norte de la ciudad de Cipolletti*. Facultad de Ingeniería, UNCo.

Rapacioli R.A., D. V. (2013). *Determinación de Curvas IDF en la Cuenca Superior del Río Colorado - Segunda Parte*. Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.

Rapacioli y D'Amico. (Julio 2013). *Determinación de Curvas IDF en la Cuenca Superior del Río Colorado 1er parte*. Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.

Rapacioli, R. A. (2017). *Estudio de Caracterización Hidrológica y Anteproyecto de obras de contral y manejo de los escurrimientos en Cuencas Aluvionales incidentes en sectores del sistema pluvial de la Ciudad de Cipolletti - Provincia de Río Negro.*

Rapacioli, R. (2007). *La Problemática Aluvional en la Región del Alto Valle del Río Negro –Tesis de Maestría GADU – FI – UNCo .*

Rapacioli, R. (2016). *Sistemas de Información Geográfica aplicados al Manejo de Cuencas Hidrográficas - Tomo I.* Neuquén: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Rapacioli, R. y Marizza, M. (1996). *Determinación de un modelo de precipitaciones intensas para la región del Alto Valle del Río Negro y de curvas caudal-área-frecuencia en zona de meseta al norte de la ciudad de Cipolletti.* XVI Congreso Nacional del Agua. Neuquén, Argentina.

Rühle, F. (1986). *Determinación de Precipitaciones Intensas de Poca Duración en Regiones sin Información Pluviográfica, a los Fines del Dimensionamiento de Obras de Arte.* Dirección General de Vialidad de la Nación, Buenos Aires.

Sánchez San Román, F. J. (2013). *Tránsito de Hidrogramas.* Dpto. Geología - Univ. Salamanca, España.

Service, S. C. (1972). *National Engineering Handbook.* Washington, D.C.

Simons, D. B., Fuat Sentürk. (1992). *Sediment Transport Technology. Water and Sediment Dynamics.* Littleton, Colorado, USA: Water Resources Publications, P.O. Box 2841.

Snyder, F. F. (1938). *Synthetic unit-graphs.* Trans. Am. Geophys.

Strahler, A. (1952). *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography.* Bulletin of the Geological Society of America 63: 1117-1142.

U.S. Geological Survey. (s.f.). Recuperado el 17 de Julio de 2017, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Vich, A. (1999). *Aguas Continentales. Formas y Procesos.* Ituzaingó - Mendoza: ZETA Editores S.R.L.

Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología.* Cartago, Costa Rica: MaxSoft.

Williams, J. (1995). *The EPIC Model, Computer Models of Watershed Hidrology.* Water Resources Publications.

Williams, J.R. y Berndt, H.D. (1977). *Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology.*



Wischmeier, W.H. Johnson, C.B. Cross, B.V. (1971). *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. Journal of Soil and Water Conservation.

Wischmeier, W.H., Smith D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA. Handbook N° 537.