

2012



*Instituto Nacional del Agua  
Centro Regional Andino*

**Provincia de Catamarca**



**Secretaría del Agua y el Ambiente**

**Dirección de Hidrología y  
Evaluación de Recursos Hídricos**



**“DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO EN EL  
RODEO- DEPARTAMENTO AMBATO- CATAMARCA”**





IT N° 145- CRA

**INFORME FINAL**

**DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO  
EN EL RODEO  
DEPARTAMENTO AMBATO- CATAMARCA  
CONVENIO  
INA -GOBIERNO DE CATAMARCA**

Autores:

*Ing. Jorge A. Maza (Resp. Proyecto)*

*Ing. Patricia López*

*Ing. Victor H. Burgos*

**Publicación Interna**

*Mendoza, agosto 2012*



## INDICE

1. ... INTRODUCCION	1
2. ... OBJETIVO	1
3. ... RELEVAMIENTO DE LA INFORMACION	1
3.1. Información topográfica	1
3.1.1. Relevamiento topográfico	1
3.2. Información cartográfica	7
3.2.1. Relevamiento topográfico	8
3.2.2. Georeferenciación	9
3.2.3. SIG ArcGIS	9
3.2.4. Escala de trabajo	9
3.2.5. Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Concepto de modelo	9
3.3. Información pluviométrica	14
3.3.1. Información pluviográfica del Servicio Meteorológico Nacional	14
3.3.2. Información de la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca	17
3.4. Información hidrológica	20
3.5. Otros antecedentes	22
3.5.1. Programa Provincial para el Uso del Agua. 1ª Etapa. Cuenca Río del Valle, Afluentes y Ríos de la Falda Oriental del Ambato	22
3.5.2. Aluviones en El Rodeo, Catamarca. Consideraciones sobre un sistema de alerta, acciones estructurales y mapeo de la vulnerabilidad hídrica	25
3.5.3. Estudios Hidrológicos e Hidráulicos en la Cuenca del Arroyo Fariñango, provincia de Catamarca. Convenio CFI-INCyTH, 1994	26
4. ... TORMENTAS DE PROYECTO	32
4.1. Estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia basadas en la propiedad de escalamiento simple para la estación pluviométrica El Rodeo, Departamento Ambato-Catamarca	32
4.1.1. Análisis de información pluviográfica y pluviométrica	32
4.1.2. Metodología de escalamiento para la estimación de curvas IDF en función de una duración de referencia	34
4.1.3. Validación de la metodología escalamiento	37
4.1.4. Estimación de las curvas IDF en la estación El Rodeo	38
4.2. Distribuciones espaciales y temporales	40

5. ... DETERMINACION DE PARAMETROS MORFOMETRICOS DE CUENCAS	41
5.1. Caracterización de Suelos	41
5.2. Caracterización de la Vegetación	42
5.2.1. Provincia Fitogeográfica de Las Yungas	42
5.2.2. Chaco Serrano	46
5.2.3. Provincia Altoandina	47
5.3. Caracterización Geomorfológica y Geológica	48
5.3.1. Red hidrográfica	49
5.4. Estimación de parámetros morfométricos	49
5.4.1. Modelo Digital de Elevaciones	49
5.4.2. Delimitación de cuencas	50
5.4.3. Validación Hidrológica del MDE	53
5.4.4. Descripción de la Cuenca	54
5.4.5. Parámetros morfométricos	55
5.4.6. Análisis de parámetros	56
6. ... DETERMINACION DE PERDIDAS DE LA PRECIPITACION	62
6.1. Determinación de CN	62
6.1.1. Mapa Hidrológico de Suelos	63
6.1.2. Mapa de Vegetación	64
6.1.3. Mapa de CN distribuido	65
7. ... MODELACION HIDROLOGICA	67
7.1. Modelo ARHYMO	67
7.2. Topología de la modelación	67
7.3. Aplicación de ARHYMO	68
7.4. Justificación de caudales	70
8. ... SIMULACION MATEMATICA DE LAS AREAS INUNDABLES	74
8.1. Modelo HEC-RAS	74
8.1.1. Datos de entrada al modelo	74
8.1.2. Perfiles transversales	75
8.1.3. Coeficientes de rugosidad de Manning	75
8.2. Resultados de la modelación matemática	78
8.2.1. Situación actual	78
8.2.2. Situación hipotética con escurrimiento total en el cauce (sin desbordes)	85

9. ... EVALUACION DEL RIESGO DE INUNDACIONES	87
9.1. Modelación de Áreas Inundables	88
9.2. Exportación Al SIG	91
9.3. Mapas De Inundación	92
9.4. Evaluación del Riesgo	93
9.5. Resultados	98
10. . RECOMENDACIONES DE MEDIDAS DE MITIGACION DE INUNDACIONES	98
10.1. Propuesta de defensas marginales en el río Ambato	99
10.2. Estudios en la alta cuenca	102
11. . CONCLUSIONES	104
12. . REFERENCIAS	105

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1 Planimetría del relevamiento topográfico .....	2
Figura 3-2 Detalle de relevamiento topográfico en zona de puente 2 .....	3
Figura 3-3 Ejemplos de perfiles transversales relevados .....	3
Figura 3-4 Ejemplos de perfiles transversales relevados .....	4
Figura 3-5 Ejemplos de perfiles transversales relevados .....	5
Figura 3-6 Fotografías en secciones transversales.....	6
Figura 3-7 Fotografías en secciones transversales.....	7
Figura 3-8 Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio.....	11
Figura 3-9 Modelo Digital de Elevaciones Regional .....	12
Figura 3-10 Puntos Red Pasma y Red Posgar .....	13
Figura 3-11 Distribución temporal información pluviográfica del SMN .....	14
Figura 3-12 Número de eventos totales de precipitación reportados por año .....	15
Figura 3-13 Eventos totales estación Catamarca Aero I (1961-1973).....	15
Figura 3-14 Eventos totales estación Catamarca Aero (1974-1998) .....	15
Figura 3-15 Eventos totales estación INTA Sumalao (1964-1981).....	16
Figura 3-16 Promedio de eventos estación Catamarca Aero I (1961-1973) .....	16
Figura 3-17 Promedio de eventos estación Catamarca Aero (1974-1998) .....	16
Figura 3-18 Promedio de eventos e estación INTA Sumalao (1964-1981).....	17
Figura 3-19 Distribución temporal información pluviométrica y pluviográfica.....	18
Figura 3-20 Mapa de ubicación de estaciones .....	20
Figura 4-1 Serie de totales diarios máximos anuales de precipitación en INTA-Sumalao .....	33
Figura 4-2 Serie de totales diarios máximos anuales de precipitación en Catamarca Aero y El Rodeo.....	34
Figura 4-3 Relación entre valores de PWM de I y duraciones para la estación Catamarca Aero .....	35
Figura 4-4 Relación entre valores de $\beta$ y orden de los PWM para la estación Catamarca Aero .....	36
Figura 4-5 Curvas IDF estimadas con series de la estación Catamarca Aero .....	37
Figura 4-6 Comparación de estimaciones IDF estación Catamarca Aero.....	38
Figura 4-7 Curvas IDF estimadas por teoría de escalamiento en la estación El Rodeo .....	39

Figura 5-1	Provincias Fitogeográficas.....	43
Figura 5-2	Pino del Cerro (Podocarpus parlatorei) .....	44
Figura 5-3	Bosque Montano de las Yungas .....	44
Figura 5-4	Bosque Montano de las Yungas .....	45
Figura 5-5	Bosque Montano de las Yungas en Puesto del Río (Ambato) .....	45
Figura 5-6	Bosque Montano de las Yungas en Puesto del Mascareño (Ambato).....	45
Figura 5-7	Arbusto espinoso del Chaco Serrano (condalia microphylla) .....	46
Figura 5-8	Garabato macho (Acacia furcatispina) .....	47
Figura 5-9	Vegetación en cercanías al Cerro Manchao .....	48
Figura 5-10	Modelo Digital de Elevaciones .....	50
Figura 5-11	(a): Codificación de direcciones , (b) Codificación de orientaciones en una grilla de 5x5 celdas ; (c) Red de flujo ; (d) Grilla de acumulación de flujo .....	51
Figura 5-12	Mapa de dirección de flujo cuencas El Rodeo.....	52
Figura 5-13	Mapa de acumulación de flujo .....	52
Figura 5-14	Validación visual de la red hidrográfica sintética .....	53
Figura 5-15	Ubicación relativa de la cuenca respecto a departamentos catamarqueños .....	54
Figura 5-16	Mapa de subcuencas.....	55
Figura 5-17	Áreas de subcuencas.....	57
Figura 5-18	Mapa de Clasificación de órdenes de Horton .....	60
Figura 5-19	Frecuencias de pendientes por subcuenca .....	61
Figura 5-20	Mapa de Pendientes .....	62
Figura 6-1	Flujograma cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN .....	63
Figura 6-2	Mapa de Grupo Hidrológico de Suelos .....	64
Figura 6-3	Mapa de Vegetación .....	65
Figura 6-4	Mapa de CN II .....	67
Figura 7-1	Topología en ARHYMO.....	68
Figura 7-2	Hidrograma generado por ARHYMO correspondiente a una precipitación de TR= 200 años y D= 3 hrs .....	69
Figura 7-3	Relación de caudales y recurrencia.....	70
Figura 7-4	Material de arrastre .....	71
Figura 7-5	Material de arrastre .....	72
Figura 7-6	Valores de Cd considerados .....	72
Figura 8-1	Esquema geométrico en HEC-RAS con imagen satelital de fondo .....	75
Figura 8-2	Perfiles Transversales en HEC-RAS (ver ANEXO 1)) .....	75
Figura 8-3	Desbordes entre progresivas 2912 y 2889 por margen izquierda.....	79
Figura 8-4	Desbordes entre progresivas 2827 y 2798 por margen izquierda.....	79
Figura 8-5	Desbordes entre progresivas 2798 y 2736 por margen derecha .....	79
Figura 8-6	Desbordes entre progresivas 2399 y 2337 por margen derecha y entre progresivas 2399 y 2369 por margen izquierda .....	80
Figura 8-7	Desbordes entre progresivas 2081 y 2043 por margen izquierda.....	80
Figura 8-8	Desbordes entre progresivas 1992 y 1964 por márgenes izquierda y derecha .....	80
Figura 8-9	Desbordes entre progresivas 418 y 360 por margen izquierda.....	81
Figura 8-10	Puente 1 (progr. 2040).....	83
Figura 8-11	Puente 2 (progr. 1775, calle Las Dalias) .....	84
Figura 8-12	Puente 3 (progr. 1275, calle Las Hortencias).....	84
Figura 8-13	Puente 4 (progr. 915, calle Las Maravillas) .....	85
Figura 8-14	Puente 1 (progr. 2040).....	85
Figura 8-15	Puente 2 (progr. 1775, calle Las Dalias) .....	86
Figura 8-16	Puente 3 (progr. 1275, calle Las Hortencias).....	86
Figura 8-17	Puente 4 (progr. 915, calle Las Maravillas) .....	87
Figura 9-1	Triángulo de riesgo (Crichton, 1999).....	88



Figura 9-2	Diagrama de flujo de la metodología empleada para la generación de los mapas de inundación .....	89
Figura 9-3	Modelo Digital de Elevaciones: a) TIN ; b) Kriging normal, c) Kriging optimizado .....	90
Figura 9-4	Perfiles Transversales en HEC RAS .....	91
Figura 9-5	Mapa de Tirantes .....	92
Figura 9-6	Mapa de Velocidades .....	92
Figura 9-7	Mapa de Distancias a Línea de Inundación TR = 2 años.....	94
Figura 9-8	Vulnerabilidad Potencial a Personas.....	95
Figura 9-9	Vulnerabilidad a Personas x Peligrosidad.....	96
Figura 9-10	Mapa de Riesgo .....	97
Figura 10-1	Área a proteger con defensa marginal .....	99
Figura 10-2	Defensa marginal entre progresivas 1407 y 1379 .....	101
Figura 10-3	Funcionamiento hidráulico de defensa marginal entre progresivas 1407 y 1379 y Puente 3 (calle Las Hortencias) para recurrencias de 100 y 200 años .....	101
Figura 10-4	Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen.....	102
Figura 10-5	Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen.....	103
Figura 10-6	Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen.....	103
Figura 10-7	Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen .....	103
Figura 10-8	Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen.....	104

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1	Listado de estaciones pluviometría diaria.....	17
Tabla 3-2	Información período 1969-1980.....	18
Tabla 3-3	Información período 1981-1990.....	19
Tabla 3-4	Información período 1991-2000.....	19
Tabla 3-5	Información período 2001-2011.....	19
Tabla 3-6	Aforos medidos en río El Rodeo ó Ambato-Villa El Rodeo.....	21
Tabla 3-7	Aforos medidos en río El Rodeo ó Ambato-La Puerta.....	21
Tabla 3-8	Aforos medidos en río Los Nogales-Villa El Rodeo a.a. Toma.....	21
Tabla 3-9	Aforos medidos en río Los Nogales-Villa El Rodeo 150 m a.a. Toma.....	21
Tabla 4-1	Valores de relaciones IDF en la estación El Rodeo (I en mm/h).....	39
Tabla 4-2	Valores de Parámetros de la Curva I-D-F.....	39
Tabla 4-3	Precipitaciones totales medias sobre la cuenca total (139.1 km <sup>2</sup> ).....	40
Tabla 4-4	Hietogramas Porcentuales según Estudio del Aº Fariñango (CFI-INCyTH, 1994).....	41
Tabla 5-1	Coordenadas de cierre de cuenca.....	53
Tabla 5-2	Características morfométricas de las subcuencas de El Rodeo, Catamarca.....	56
Tabla 5-3	Índices morfométricos de las subcuencas de El Rodeo, Catamarca.....	56
Tabla 5-4	Áreas de pendientes por subcuencas [km <sup>2</sup> ].....	61
Tabla 6-1	Grupos Hidrológicos de suelos.....	63
Tabla 6-2	Grupos Hidrológicos de suelos.....	64
Tabla 6-3	Valores de CN para tipos de suelo y de vegetación.....	65
Tabla 6-4	Tabulación cruzada entre mapa de CN y mapa de subcuencas. Áreas en km <sup>2</sup> .....	66
Tabla 6-5	Parámetros de pérdidas de precipitación con CHA II en las subcuencas de EL RODEO.....	66
Tabla 7-1	Caudales Máximos de Crecidas.....	68
Tabla 7-2	Caudales de diseño.....	69
Tabla 7-3	Velocidades para producir el arrastre del material granular.....	72
Tabla 7-4	Caudales en función de Cd y f.....	73
Tabla 7-5	Caudales en función de Cd y f.....	73
Tabla 8-1	Caudales de diseño.....	74
Tabla 8-2	Comparación fotográfica para determinar Coeficientes de Manning.....	76
Tabla 8-3	Desbordes.....	78
Tabla 8-4	Manchas de inundación generadas por desbordes del cauce del Río Ambato.....	81
Tabla 8-5	Riesgo hidrológico de puentes.....	87
Tabla 9-1	Vulnerabilidad en función del daño.....	93
Tabla 10-1	Coronamiento de defensa marginal.....	101

## **1. INTRODUCCION**

La villa turística El Rodeo se encuentra a 38 km de la capital provincial; está atravesada por el Río Ambato, de tranquilas aguas durante el estiaje pero cuyas crecidas, que son más frecuentes en verano han sido capaces de transportar peñascos de más de 1 m<sup>3</sup> a muy altas velocidades y de alterar drásticamente el modelado del cauce cada vez que ocurren, debido al impacto contra las márgenes.

Divagante como es el río Ambato al cruzar la villa, amenaza con deteriorar con severidad toda obra de infraestructura edificada hacia adentro de la línea de ribera, definida por las crecidas máximas anuales medias, y de la vía de evacuación de inundaciones.

La conformación actual del río Ambato y la dimensión y distribución del material acumulado en el lecho están estrechamente asociados con las mayores crecientes, eventos de menor intensidad no tendrán fuerza suficiente para variar esta conformación salvo levemente (las alteraciones pueden sobrevenir sólo a consecuencia de crecidas de igual o mayor intensidad).

## **2. OBJETIVO**

En este estudio se realizará la modelación matemática hidrológica necesaria para determinar caudales de diseño que a su vez será la información primordial en la modelación matemática del régimen hidráulico cuyos resultados de tirantes y velocidades permitirán delinear el riesgo de los distintos sectores de la villa de El Rodeo aledaños al cauce.

El riesgo hídrico será conformado, además de la peligrosidad del evento, a través de las vulnerabilidades físicas y las exposiciones de edificaciones e infraestructura, como así también de personas y vehículos.

## **3. RELEVAMIENTO DE LA INFORMACION**

### **3.1. Información topográfica**

#### **3.1.1. Relevamiento topográfico**

La ejecución de los trabajos topográficos fue realizada por la Secretaría del Agua y el Ambiente, Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, recibida en Diciembre de 2010. Y los resultados obtenidos se pueden resumir en los siguientes datos:

Cantidad de Perfiles transversales:	60
Long. Total Perfil Longitudinal:	2838 m
Separación promedio:	45 m (máx: 60 m / mín: 30 m)
Cant. Total de puntos relevados x,y,z :	879
Densidad de puntos por perfil (media):	15

Los criterios tomados en el relevamiento topográfico fueron los siguientes:

- 1) Las separaciones de los perfiles topográficos transversales fueron de 60 metros y como máximo de 100 metros.
- 2) Las longitudes que cubrieron los perfiles fueron de 180 y 250 metros según corresponda para cada caso en particular.
- 3) Se tomó el eje del cauce como centro de cada perfil.
- 4) La prolongación del perfil finaliza una vez alcanzada una altura de 8 metros, tomando como referencia 0,0 metros desde el lecho del río.

En las siguientes figuras se muestran detalles tanto planimétricos como transversales del estudio topográfico, además de fotografías de las secciones transversales del río Ambato.



RELEVAMIENTO DE PERFILES SOBRE EL CAUCE DEL RIO AMBATO (III)  
AMBATO-CATAMARCA  
ESCALA 1:1000

**Figura 3-1 . Planimetría del relevamiento topográfico**

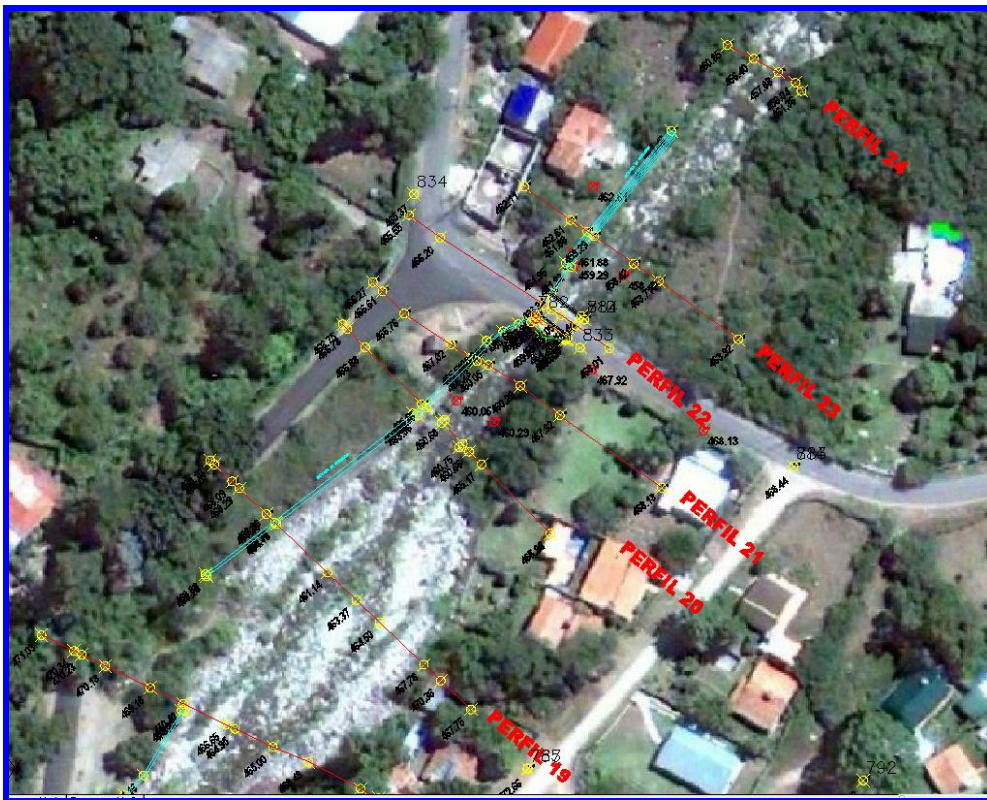


Figura 3-2 . Detalle de relevamiento topográfico en zona de puente 2

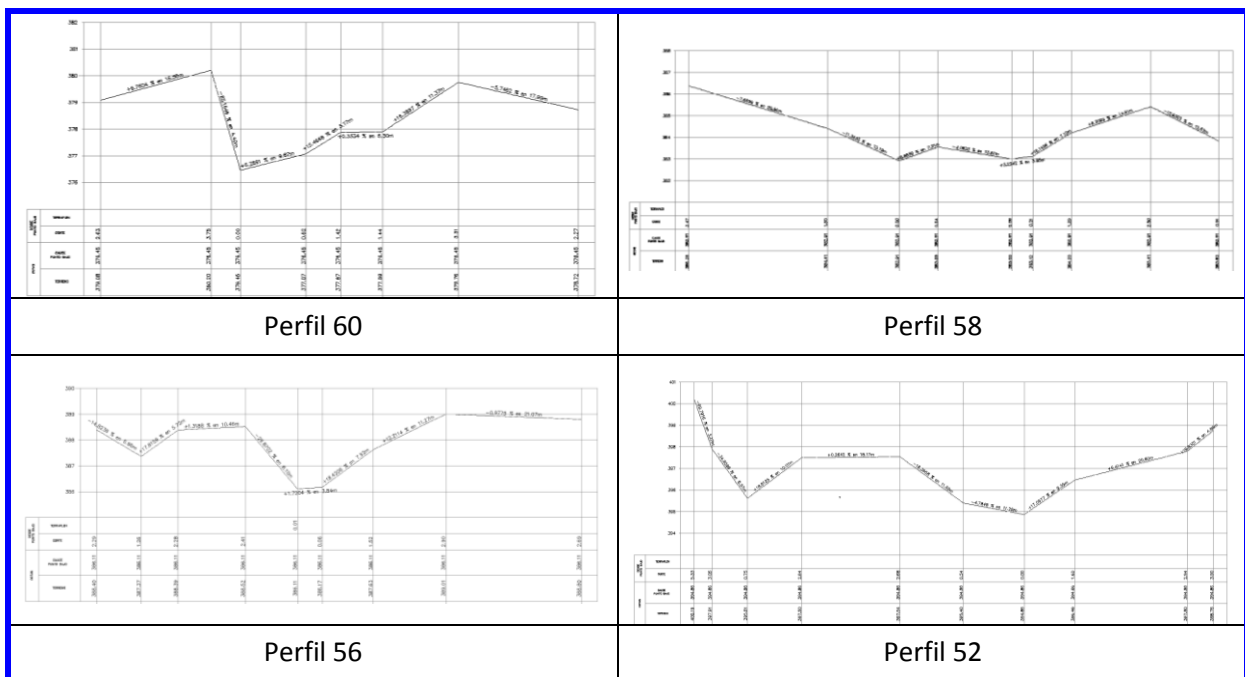


Figura 3-3 Ejemplos de perfiles transversales relevados

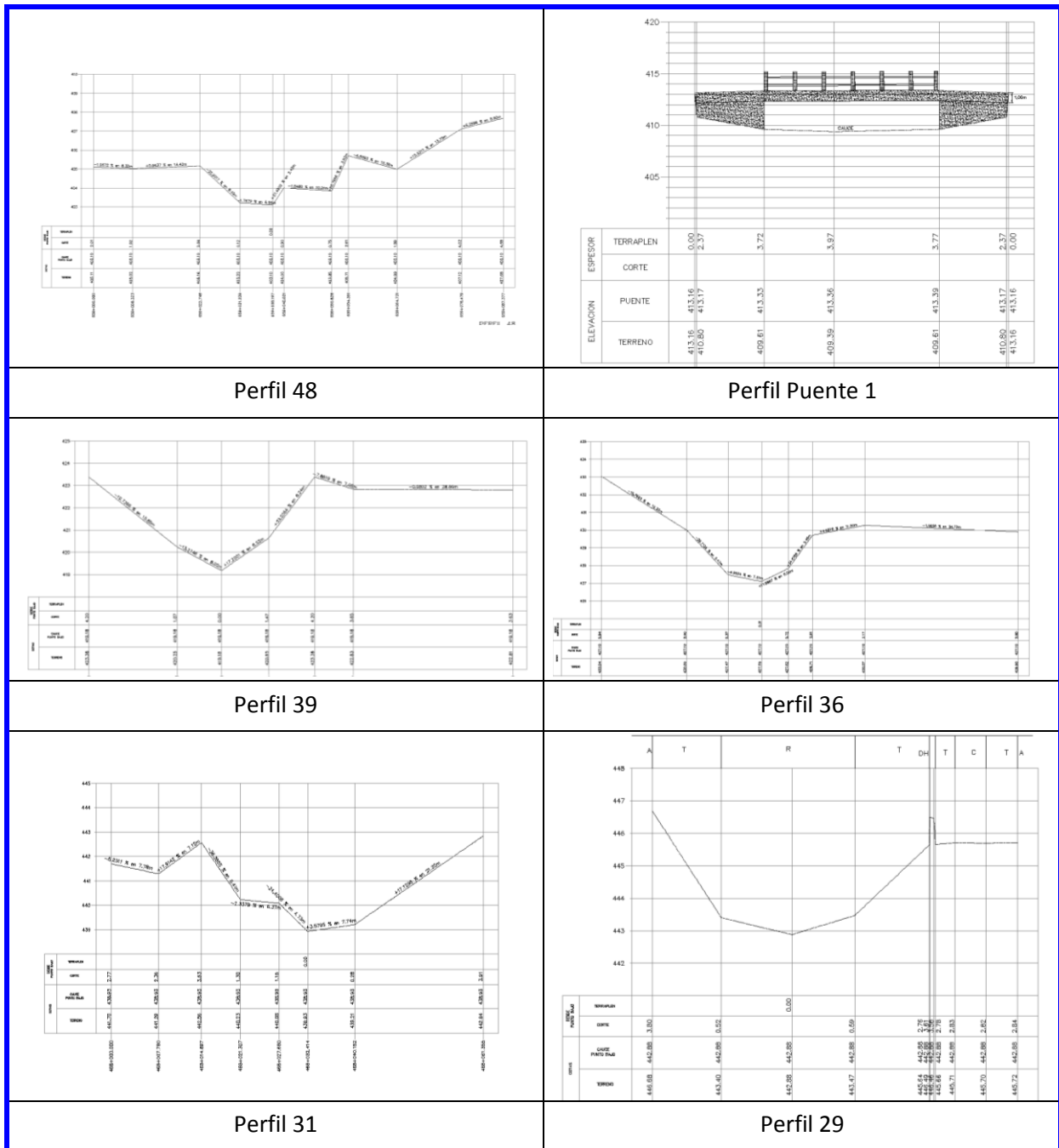


Figura 3-4 Ejemplos de perfiles transversales relevados

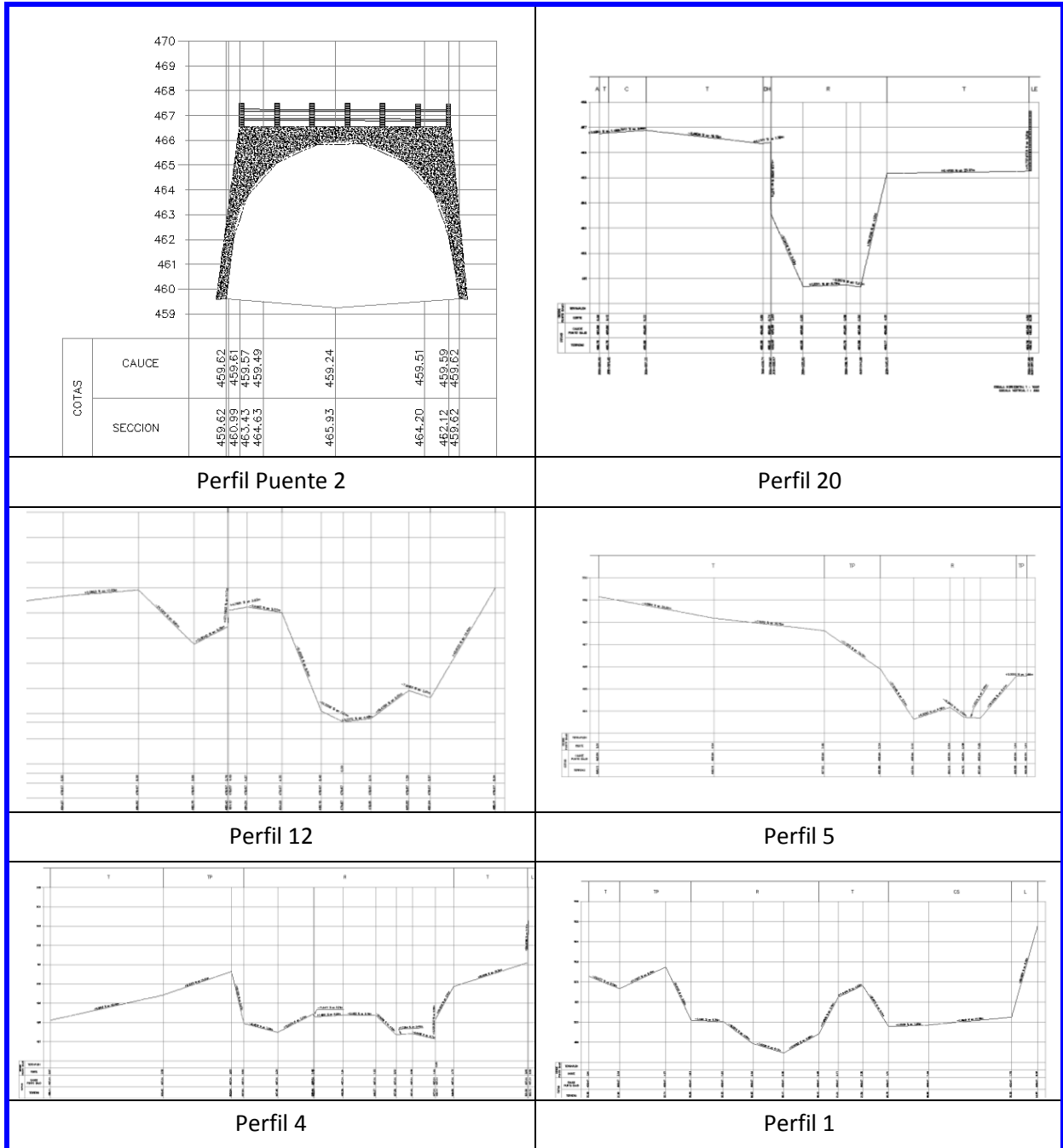
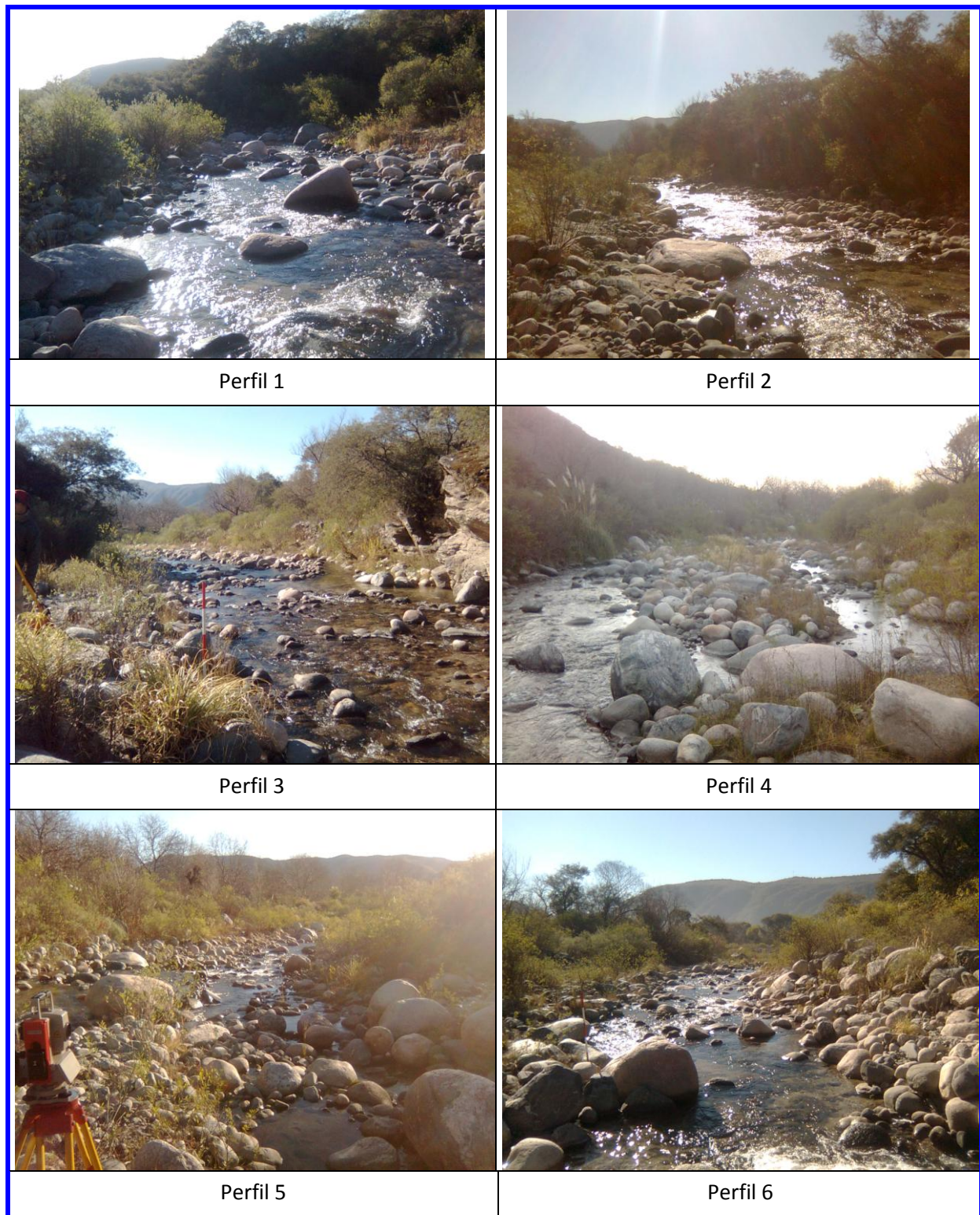


Figura 3-5 Ejemplos de perfiles transversales relevados



**Figura 3-6 Fotografías en secciones transversales**





**Figura 3-7** Fotografías en secciones transversales

### 3.2. Información cartográfica

Se recopiló toda la información disponible acerca del área de estudio. Se trabajó con hojas cartográficas escala 1:50 000 y 1:250 000 (digitales e impresas) e imágenes de satélite (Landsat, MrSid)

### 3.2.1. Relevamiento topográfico

De los diversos estudios de relevamiento físico de la Provincia de Catamarca, se seleccionaron los que a continuación se detallan:

(a) IGM - **Instituto Geográfico Militar**: La principal fuente de datos fue el SIG250 en formato digital a escala 1:250.000. Los niveles de información incluyen:

- a. Cursos de agua
- b. Vías de comunicación
- c. Ferrocarriles
- d. Espejos de agua
- e. Actividades Humanas
- f. Accidentes Geográficos especiales
- g. Puntos Geográficos destacados
- h. Límites administrativos
- i. Puentes

Se utilizaron las siguientes hojas en 1:250000:

2769-IV: Fiambalá	2966-II: San Francisco del Valle de Catamarca
2769-II: Paso San Francisco	2966-III: La Rioja
2766-I: Santa María	2966-IV: Recreo
2766-II: San Miguel de Tucumán	2969-I: Pastillos
2766-III: Belén	2969-III: Tinogasta
2766-IV: Concepción	2569-IV: Antofalla
2966-I: Aimogasta	2566-III: Cachi

(b) ETISIG- Equipo de Trabajo Interdisciplinario en Sistemas de información Geográfica: cuyo objetivo principal fue lograr la utilización plena de los SIG como herramienta de planificación y toma de decisiones en todos los organismos públicos que generan cartografía, optimizando la asignación de recursos destinados a la inversión pública.

(c) SSRRHH – Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación: Mediante el Atlas Digital de Los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina.

Este producto conforma un Sistema de Información Geográfica (SIG) de los Recursos Hídricos Superficiales del Territorio Argentino que consta de una estructura de datos geográficos, con las bases de datos asociadas provenientes de la cartografía de origen. La cartografía de base del Atlas corresponde a la Escala 1:500.000 del I.G.M., la información referida a los diques y embalses ha sido actualizada con respecto a la provista por las cartas IGM.

(d) INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, mediante su Atlas de suelos de la República Argentina

El Atlas de Suelos de la República Argentina describe las regiones naturales, los Suelos y tablas de evaluación y degradación de cada provincia. En escala 1:500.000/1.000.000, en formato digital.

(e) Imágenes de satélite de servidores gratuitos: Se recopilaron imágenes Landsat en formato MrSid de los años 1990, 2000 y 2005.

Para el desarrollo del estudio se emplearon imágenes satelitales multiespectrales Landsat 7. Las imágenes se obtienen a través del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

Las escenas procedentes del satélite Landsat 7 tienen un píxel de 30 m x 30 m en las bandas 1 a 5 y la banda 7; en la banda 6 es de 60 m x 60 m e incorpora un canal pancromático de 15 m de resolución espacial.

### 3.2.2. Georeferenciación

Toda la cartografía se verificó o transformó al siguiente sistema de georeferenciación:

Marco de referencia: **POSGAR 94** (Posiciones Geodésicas Argentinas año 1994)  
Elipsoide de referencia: **WGS 84**  
Sistema de proyección: **Gauss Krügger, faja 3**

### 3.2.3. SIG ArcGIS

Compilada la información obtenida de los estudios antecedentes, en el área y sus inmediaciones, ajustables a los objetivos previamente propuestos, se procedió al procesamiento preliminar de la Información Cartográfica Básica mediante la confección del sistema de información geográfica de base a utilizar en el presente estudio.

Se utilizó la plataforma de ESRI ArcGIS en su versión 9 y algunos procesamientos en ArcView v.3.2.

### 3.2.4. Escala de trabajo

Se optó por dos escalas de trabajo: para la determinación de la cuenca de aporte a la localidad de El Rodeo, se seleccionó la escala 1:200.000; y para el estudio hidráulico y determinación de zonas de inundación, la escala 1:25.000.

### 3.2.5. Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Concepto de modelo

Una acepción de la palabra **modelo**, originada en ámbitos geográficos, lo define como *una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades*. (Felicísimo, 1994)

De la definición se deduce que, la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo, pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

La construcción de modelos, se realiza para conocer o predecir propiedades que se desconocen del objeto real. Este es el sentido en el que se han desarrollado los modelos: partiendo de una

información conocida a partir de la medición del objeto real (ya sea in situ o por teledetección), se elaboró la información derivada que refleja otras propiedades diferentes.

Un **modelo digital del terreno (MDT)** es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. En la cartografía convencional, la descripción de las elevaciones a través del mapa topográfico, constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. El papel equivalente en los MDT, cuando se toma como característica a la cota o altitud, lo desempeña el modelo digital de elevaciones o MDE.

Un **Modelo Digital de Elevaciones (MDE)** es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud (cota) de la superficie del terreno.

Cabe destacar que la naturaleza digital y simbólica de los MDE permite una elevada precisión en la descripción de los procesos, pero no garantiza la exactitud de los resultados.

En efecto, un modelo es necesariamente una descripción aproximada que, en último término, se construye mediante la aplicación de unos supuestos más o menos adaptados a la realidad, pero que nunca pueden ser exactos. Estos supuestos son los encargados de señalar, por ejemplo, qué factores son relevantes para el modelo y cuáles pueden ser obviados.

#### 3.2.5.1. Fuentes del MDE

El origen de un modelo digital de elevaciones puede estar, en principio y a escala local en métodos directos, como el relevamiento planialtimétrico con topografía convencional. Pero, debido a la escala regional del estudio, es inevitable el uso de métodos indirectos, que utilizan como base un conjunto de documentos o datos (analógicos o digitales) elaborados previamente. Dentro de estos últimos se encuentran la digitalización de mapas topográficos con curvas de nivel y las restituciones aerofotogramétricas o por interferometría, aerofotogrametría, LIDAR (*Light Detection And Ranging*), altimetría radar, o interferometría radar de apertura sintética (*InSAR*).

En la década pasada, se observaron grandes avances en la generación y uso de MDE globales con la aparición de los MDE de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [Werner M. 2001] y Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) [Meti/Nasa, 2009]

Los datos de elevación de estas dos misiones espaciales cubrieron las regiones más pobladas del mundo y estuvieron disponibles sin costo a una resolución espacial de 3" de arco (~ 90 m) para el SRTM y a 1" de arco para el GDEM (~ 30 m).

En este trabajo se utilizaron los datos del Aster GDEM.

El trabajo con el MDE requirió de los siguientes pasos:

- Generación, obtención del MDE (AsterGDEM)
- Validación hidrológica
- Manipulación del MDE para obtener mapas derivados (pendientes, orientación, curvatura)
- Visualización
- Análisis del MDE (estadístico, morfométrico)
- Aplicación, uso como variable independiente (para determinación de cuenca)

## SRTM

La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) se realizó en colaboración entre National Aeronautics and Space Administration (NASA) y National Imagery and Mapping Agency (NIMA), denominada NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) desde 2003. En principio se generó un modelo de 90 metros de resolución, y luego se logró un modelo de 30 metros de resolución de acceso más restringido.

## ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model)

Aster GDEM es un nuevo MDE a nivel global, con resolución de 1" de arco, que fue desarrollado en Junio de 2009 por el METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) de Japón y la NASA. El Aster GDEM está basado en imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Este radiómetro es uno de los cinco instrumentos de observación de la Tierra que viaja a bordo del satélite americano TERRA, lanzado en Diciembre de 1999. ASTER recoge las imágenes del espectro visible y también las regiones de longitud de onda de las radiaciones térmicas infrarrojas, con resoluciones espaciales que van desde unos 15 a 90 metros. (ERSDAC, 2009). Puede realizar coberturas estereoscópicas y obtener un MDE de resolución de 30 metros y alturas con errores medios cuadráticos que van de 10 a 25 metros.

La producción del ASTER GDEM involucró el procesamiento de 1,5 millones de imágenes, incluyendo estéreo correlación para crear el modelo en mosaicos de 1º por 1º. Luego de generado el modelo, se creó el ASTER GDEM Validation Team, grupo de trabajo que tuvo como fin la validación del modelo en todo el mundo. Hoy, el ASTER GDEM es un MDE auditado y de uso libre.

Dependiendo de la parte de la Tierra que se considere representada por el ASTER GDEM, los errores son bastante variables, pero en el informe final, se acordó estimar una exactitud vertical global de 20 metros, con el 95% de confianza.

El ASTER GDEM es el sucesor de SRTM, y su diferencia fundamental es que se removieron automáticamente los pixels con nubes y las imágenes se promediaron antes de correlacionar de forma de tener un valor promedio libre de ciertos problemas.

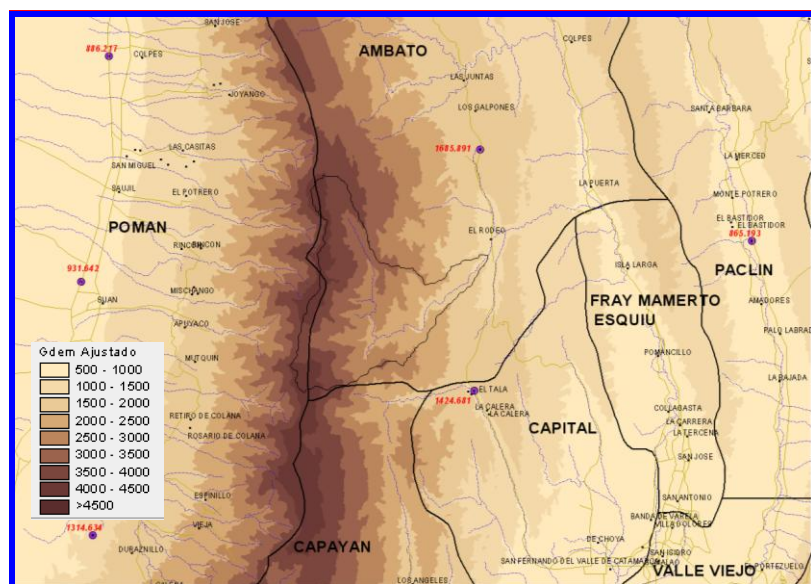
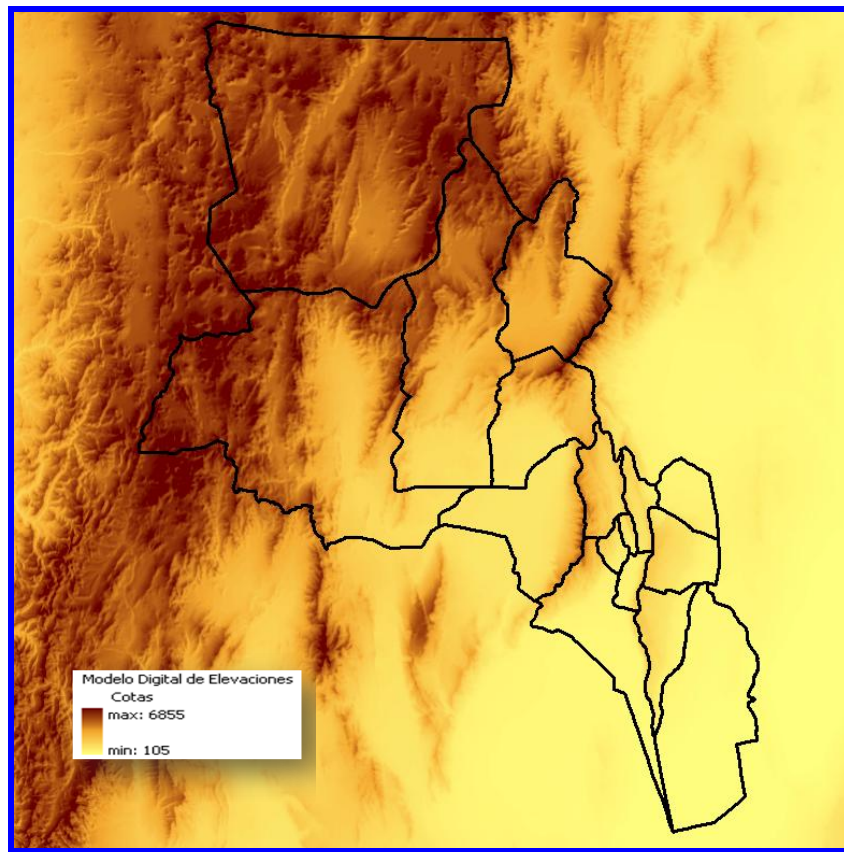


Figura 3-8 Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio



**Figura 3-9 Modelo Digital de Elevaciones Regional**  
(ASTER GDEM is a product of METI and NASA)

### Validación altimétrica del MDE

---

Para la modificación y ajuste del MDE proveniente del AsterGDEM, se confeccionó un modelo de transformación de alturas, originado con las diferencias de elevación entre el MDE y las alturas elipsoidales de los puntos pertenecientes a la Red PASMA (Proyecto de Asistencia Técnica al Sector Minero Argentino).

El ajuste se dividió en dos etapas: un primer paso con una transformación rígida, aplicando al MDE movimientos fijos que permitan situarlo en una posición óptima respecto de la nube de puntos de corrección; y un segundo paso por medio de una deformación elástica mediante un mapa de residuos.

Los movimientos pueden ser en forma plana ( $x$  e  $y$ ) y movimientos en  $z$  y se deberían tratar por separado. Suponiendo en primera instancia que el MDE está perfectamente georreferenciado y solamente tiene errores atribuibles a un desplazamiento en  $z$  es posible ajustarlo planteando la minimización de la suma de los errores cuadráticos puntuales. (Eulliadés - Véneré, 2003)

Este primer ajuste lleva a la obtención de un desplazamiento fijo  $d$  en  $z$  según:

$$d = \frac{\sum(z_p - z_s)}{n}$$

en donde  $d$  es el desplazamiento,  $z_p$  es la cota del MDE,  $z_s$  es la cota del punto conocido. La sumatoria se extiende al número de puntos medidos  $n$ .

Luego de la deformación rígida es posible obtener una distribución de los residuos indicativa de la existencia de errores regionales en ciertas zonas del MDE.

Se utilizó un conjunto de 186 puntos PASMA y para la validación del ajuste alimétrico se utilizaron 8 puntos de la Red POSGAR, tal como se indica en la figura siguiente.

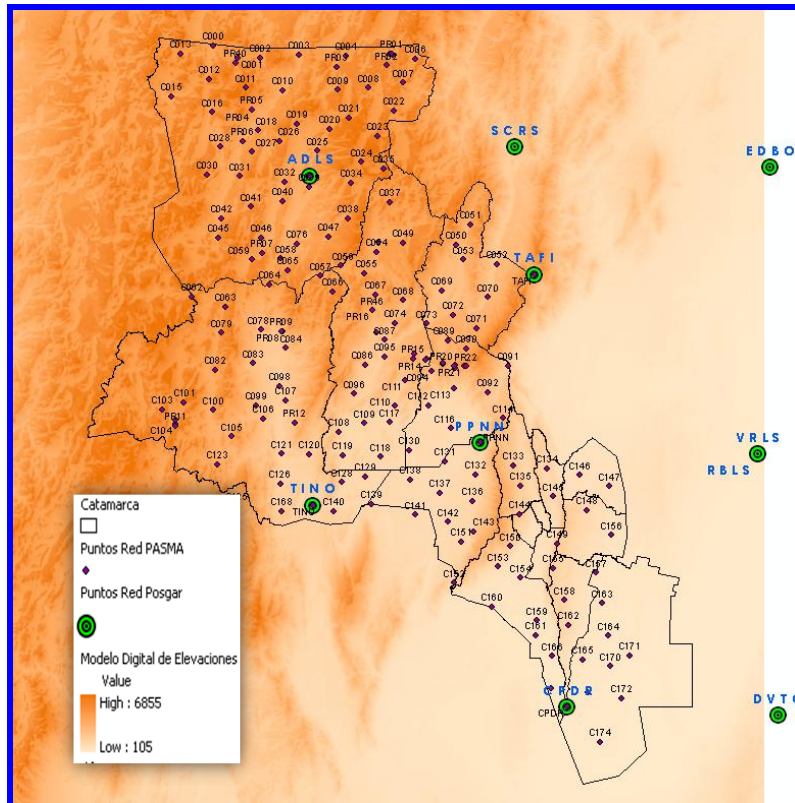


Figura 3-10 Puntos Red Pasma y Red Posgar

### Validación hidrológica del MDE

Un requerimiento tal vez más importante que el ajuste de las elevaciones, es la adecuación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a una red hidrográfica vectorizada válida. Para este caso se emplearon uno de los niveles de información disponibles en los antecedentes cartográficos.

Las etapas de pre-procesamiento del MDE, generación de la red de drenaje sintética y delimitación de cuencas se realizaron con la extensión HEC-GeoHMS para ArcView (USACE, 2003). Esta extensión, que constituye una interface de acople con el modelo hidrológico HEC, presenta una serie de rutinas informáticas para el pre-procesamiento del terreno y para el cálculo de parámetros hidrológicos a nivel de cuenca y subcuenca.

En este sentido, el primer paso consistió en generar un MDE “hidrológicamente corregido”, es decir, la elaboración de un MDE que representa con mayor exactitud las características de la red de drenaje existente en el terreno (USACE, 2003). A los fines del trabajo, esta tarea se efectuó en dos pasos: la imposición de la red de drenaje vectorial proveniente del SIG-250 sobre el MDE crudo, y el llenado de

“depresiones”, celdas aleatorias con menor altura que sus circundantes y que constituyen un impedimento para el cálculo del movimiento del agua sobre el terreno.

### 3.3. Información pluviométrica

#### 3.3.1. Información pluviográfica del Servicio Meteorológico Nacional

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) suministró información relativa a tormentas observadas en las estaciones: Catamarca Aero I (código 10044), Catamarca Aero (código 10044) y Catamarca INTA-Sumalao (código 10070). La estación Aero I es reemplazada por la nueva Catamarca Aero, razón por la cual las observaciones están divididas en dos períodos.

Los registros contienen información pluviográfica procesada con valores máximos para duraciones 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 360 y 720 minutos y totales diarios correspondientes a la fecha de ocurrencia de las tormentas.

La distribución temporal de los registros (Figura 3.11) muestra falta de datos en Catamarca Aero para el período 1975-1981, en 1983 y 1991, mientras que hay superposición con INTA-Sumalao en el período 1964-1974.

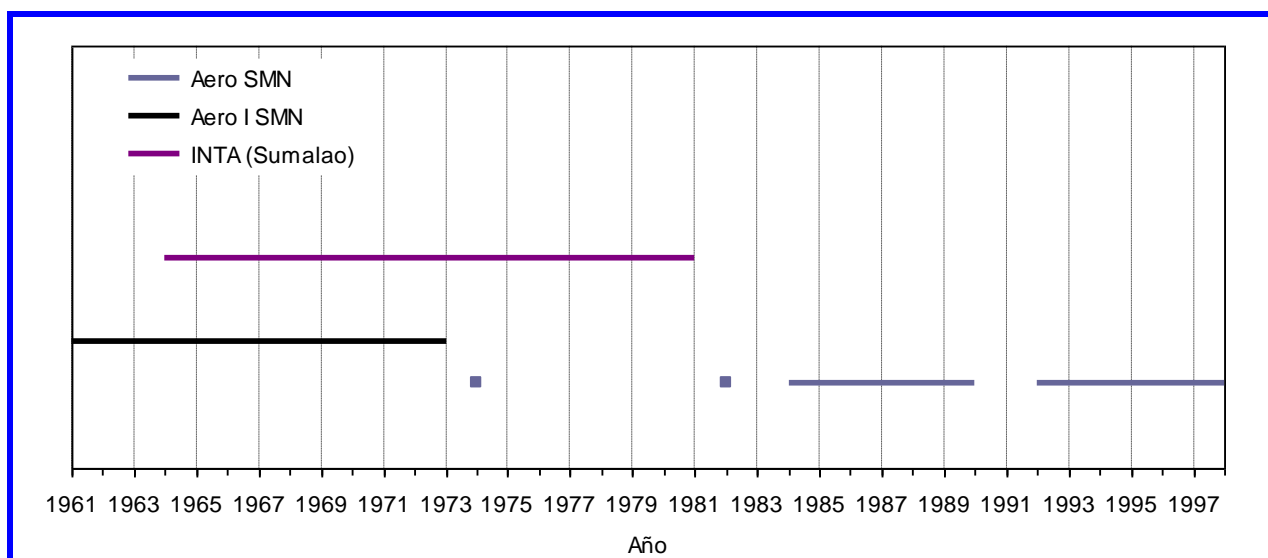


Figura 3-11 Distribución temporal información pluviográfica del SMN

La información recibida fue analizada a fin de obtener el número total de eventos reportados por año y estos resultados se grafican en la Figura 3.12.

El máximo número de eventos por año (63) se produce en 1979 en INTA-Sumalao y en 1986 en Catamarca Aero. La mediana de eventos totales anuales es 39 para las estaciones del SMN y del INTA.

Se observan valores bastante menores que la mediana para los años 1975 (13), 1976 (10), 1978 (14) y 1981(6) en INTA-Sumalao, mientras que Catamarca Aero I presenta diez eventos para el año 1969. Se desconoce si los registros proporcionados comprenden la totalidad de eventos producidos.



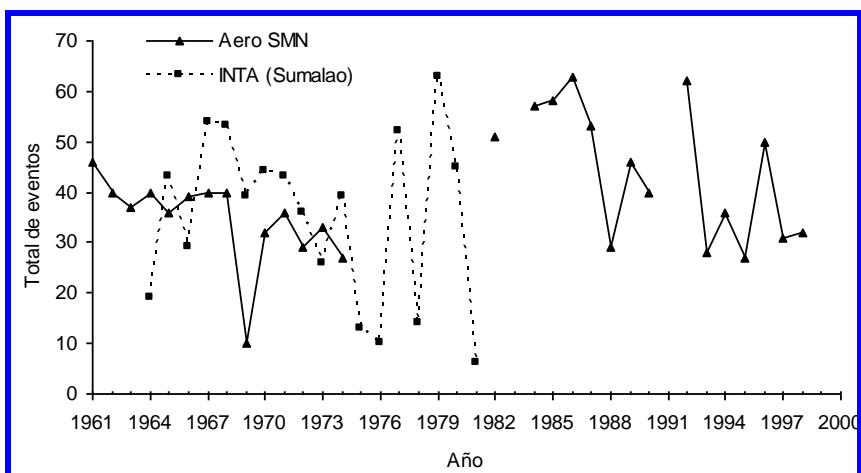


Figura 3-12 Número de eventos totales de precipitación reportados por año

El análisis de eventos totales mensuales por estación (Figuras 3.13 a 3.15) evidencia un mayor número de tormentas en el período octubre-abril, siendo enero el mes de máxima ocurrencia.

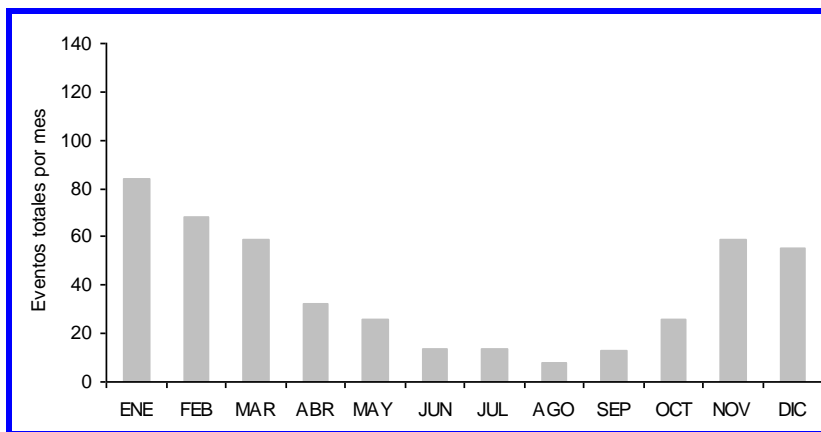


Figura 3-13 Eventos totales estación Catamarca Aero I (1961-1973)

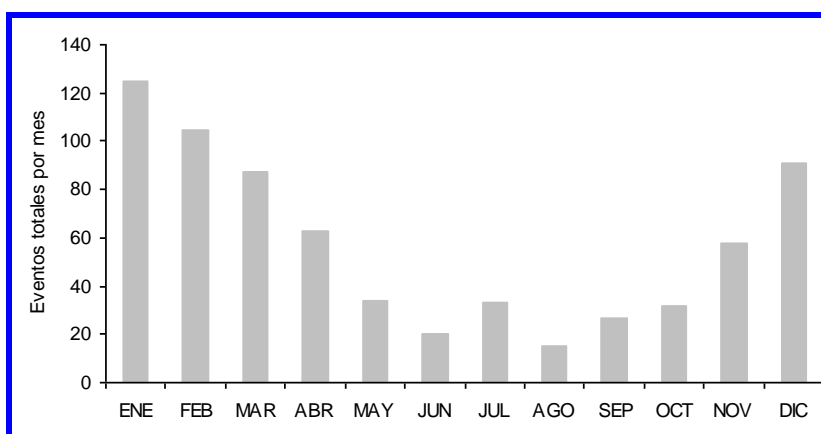
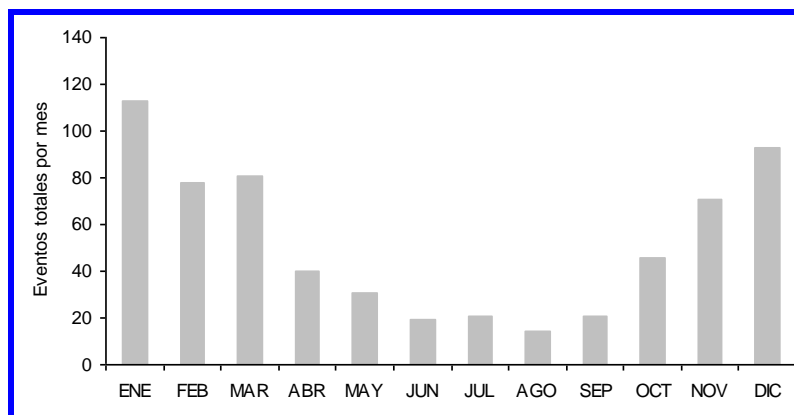


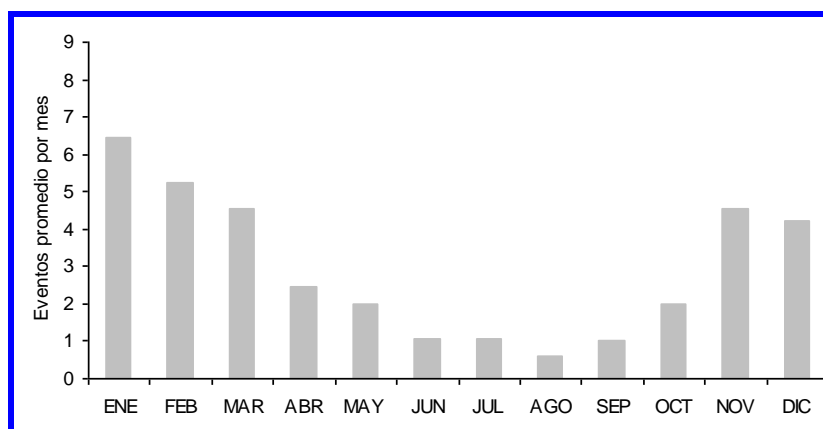
Figura 3-14 Eventos totales estación Catamarca Aero (1974-1998)



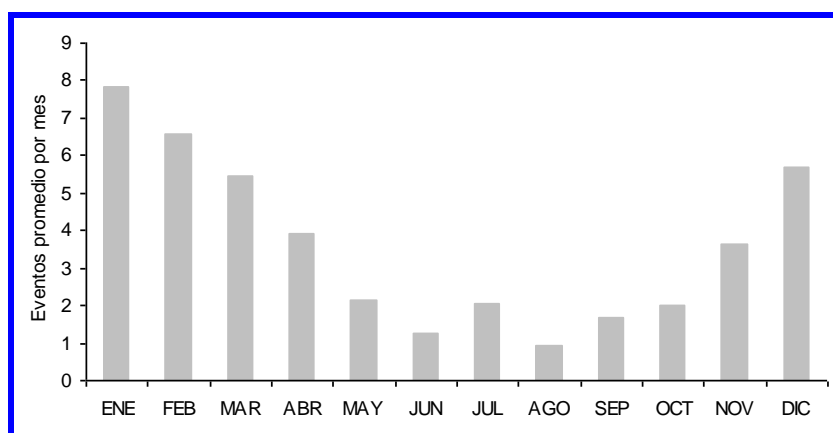
**Figura 3-15 Eventos totales estación INTA Sumalao (1964-1981)**

Los promedios de eventos mensuales por estación se grafican en las Figuras 3.16 a 3.18 con el objeto de proporcionar una estimación del número de eventos que fueron procesados para la estimación de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Estas curvas permitieron obtener valores de intensidades, para las duraciones de interés asociados a distintas recurrencias, que fueron empleados como entrada al modelo de simulación hidrológica ARHymo.



**Figura 3-16 Promedio de eventos estación Catamarca Aero I (1961-1973)**



**Figura 3-17 Promedio de eventos estación Catamarca Aero (1974-1998)**

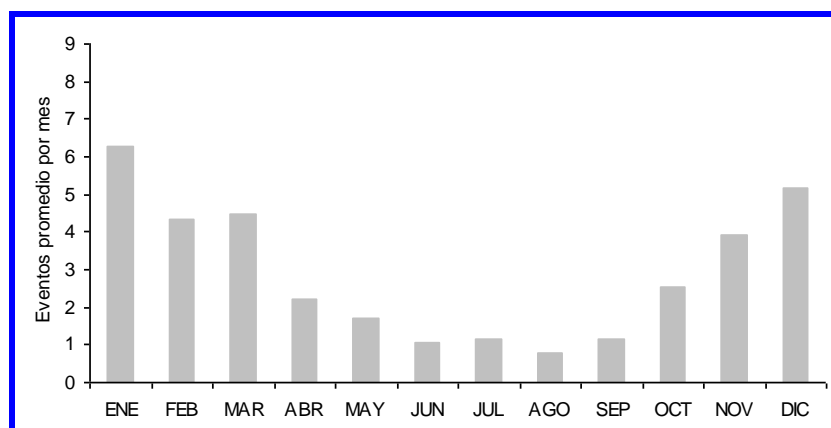


Figura 3-18 Promedio de eventos e estación INTA Sumalao (1964-1981)

### 3.3.2. Información de la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca

Esta Dirección suministró información pluviométrica diaria de las estaciones listadas en la Tabla 3.1.

**Tabla 3-1 Listado de estaciones pluviometría diaria**

Estación	Código	Período de registro
El Rodeo	1	1970-2006
La Puerta	3	1970-1995
El Jumeal	160	1980-2007
Las Rejas	168	1972-1980
Amadores	110	1972-2011
Singuil	7	1971-2007
Colpes	1	1972-1995
Palo Labrado	118	1970-1996
La Bajada	113	1970-2004
La Merced	115	1969-2008
Capital	162	1977-2010
El Portezuelo	136	1970-2010

En la Figura 3.19 se presenta la distribución temporal de la información pluviométrica de la DHERH y pluviográfica de la estación Catamarca Aero del SMN, en la Figura 3.20 se presenta un mapa con la ubicación de las estaciones analizadas.

En las Tablas 3.2 a 3.5 se presenta el número de meses con registro por año y se observa que las estaciones en las que se registran más faltantes son La Puerta, La Rejas, Singuil y La Meced, mientras que El Rodeo, Jumeal y El Portezuelo son las que presentan un mayor número de años completos.

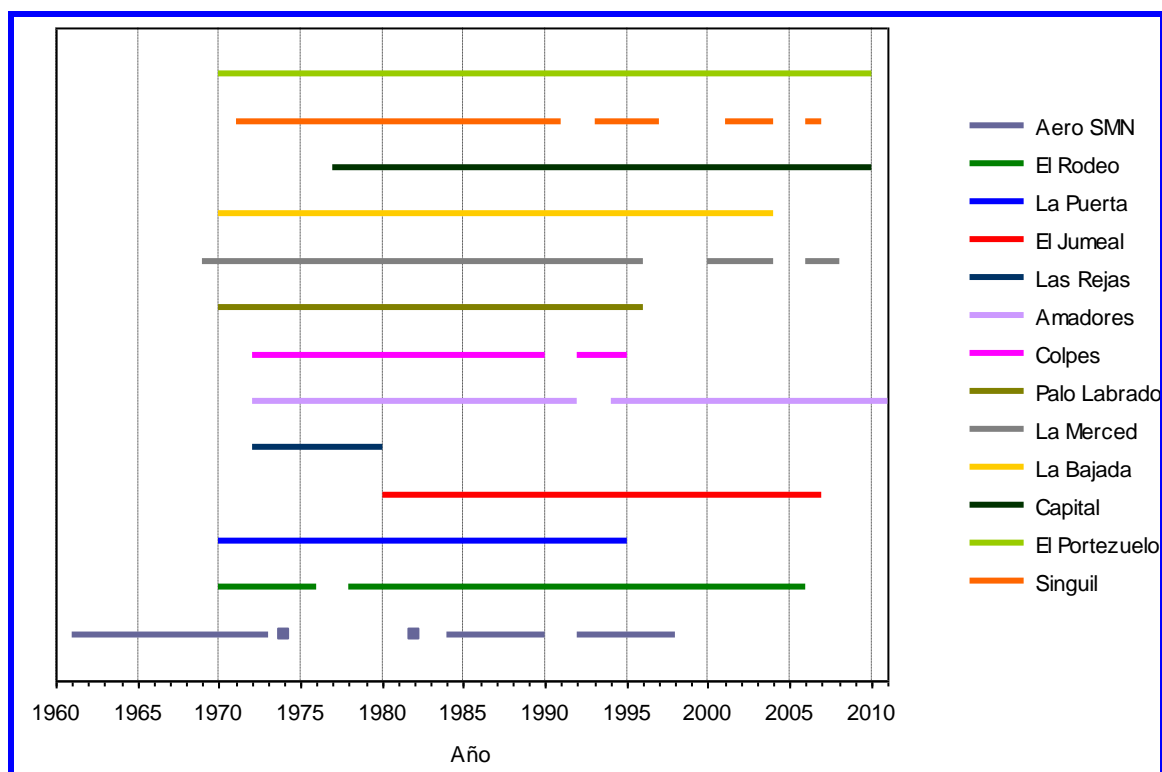


Figura 3-19 Distribución temporal información pluviométrica y pluviográfica

Tabla 3-2 Información período 1969-1980

Estación	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
El Rodeo		4	3	7	3	1	4	2	S/D	7	8	12
La Puerta		2	7	8	11	12	10	7	8	6	4	2
El Jumeal												5
Las Rejas				5	3	7	5	5	10	7	9	5
Amadores				11	10	9	11	7	9	7	9	9
Singuil			4	9	8	8	11	8	10	5	8	9
Colpes				5	10	11	11	10	10	9	8	9
Palo Labrado		2	6	10	8	9	12	8	10	8	7	11
La Bajada		5	2	9	6	10	11	9	10	7	9	10
La Merced	4	9	4	4	4	7	8	4	6	8	11	10
Capital									3	3	10	10
El Portezuelo		2	7	10	10	10	12	9	12	9	8	10

**Tabla 3-3 Información período 1981-1990**

Estación	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
El Rodeo	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12
La Puerta	11	8	8	9	9	6	9	8	8	9
El Jumeal	10	9	12	8	9	10	7	8	9	9
Amadores	10	9	10	3	4	12	8	8	9	9
Singuil	11	7	12	5	12	10	3	4	10	6
Colpes	10	9	11	11	10	10	9	9	9	9
Palo Labrado	8	9	10	10	10	11	7	8	10	9
La Bajada	10	9	11	10	10	12	11	8	9	10
La Merced	11	8	10	7	8	7	11	8	10	12
Capital	10	8	9	11	10	11	8	10	9	10
El Portezuelo	10	9	12	12	10	12	11	9	9	11

**Tabla 3-4 Información período 1991-2000**

Estación	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
El Rodeo	12	12	8	11	5	10	12	11	11	11
La Puerta	9	6	6	5	6					
El Jumeal	12	12	11	12	9	10	10	12	12	11
Amadores	8	3	S/D	9	7	7	6	8	9	10
Singuil	3	S/D	6	2	3	5	4	S/D	S/D	S/D
Colpes	S/D	11	5	8	3					
Palo Labrado	8	7	7	8	4	2				
La Bajada	6	10	10	10	9	10	6	7	8	7
La Merced	6	10	11	2	6	3	S/D	S/D	S/D	8
Capital	11	10	11	11	7	9	9	9	12	11
El Portezuelo	8	8	11	9	8	10	6	6	11	7

**Tabla 3-5 Información período 2001-2011**

Estación	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
El Rodeo	11	10	12	12	12	1					
El Jumeal	7	6	5	6	8	1	3				
Amadores	9	8	7	5	6	7	7	7	6	6	3
Singuil	4	6	2	2	S/D	1	1				
La Bajada	7	9	8	9							
La Merced	9	11	7	7	S/D	7	7	3			
Capital	11	10	10	10	11	8	11	10	9	10	4
El Portezuelo	8	9	11	11	9	7	9	4	8	1	

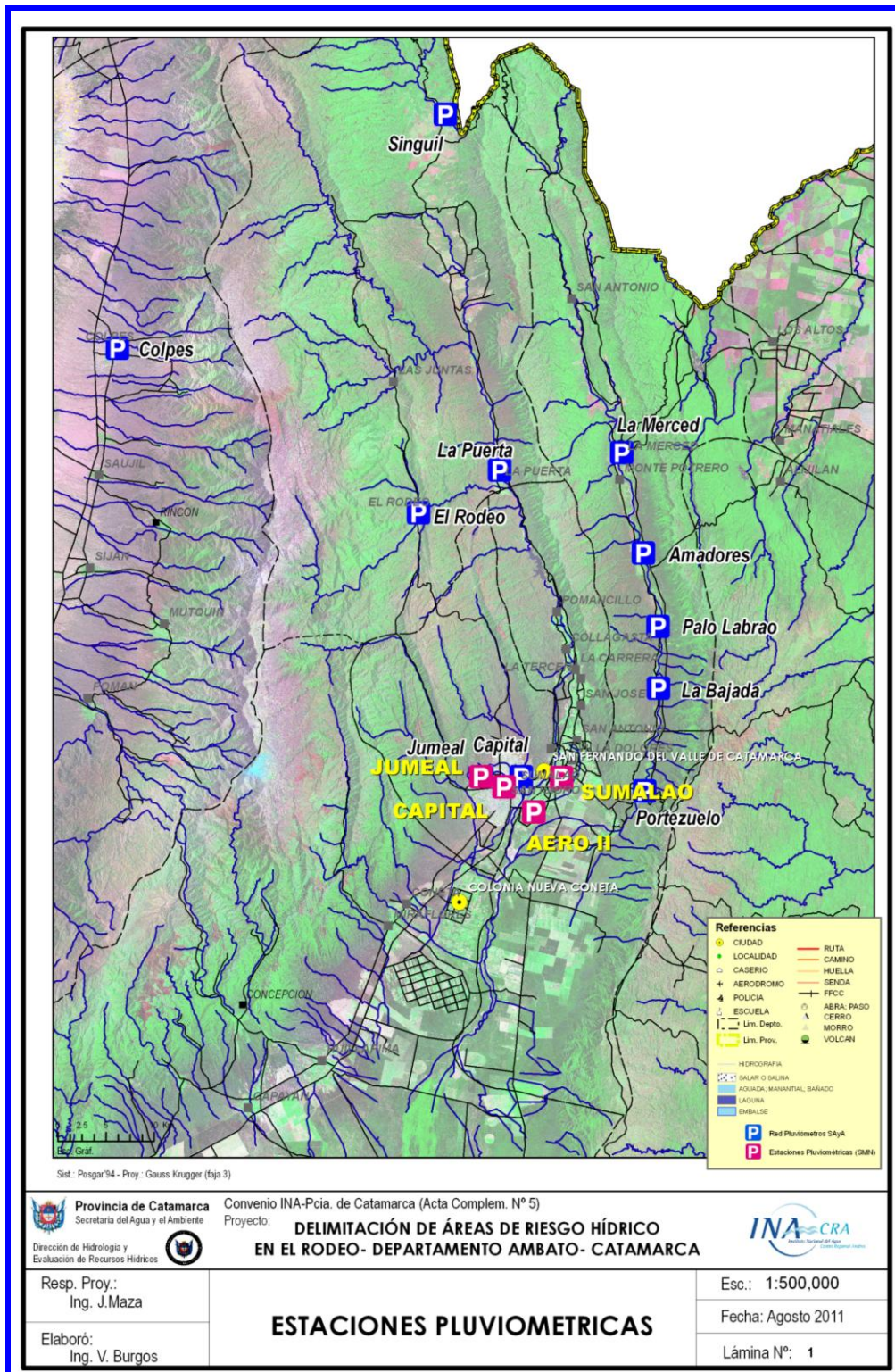


Figura 3-20 Mapa de ubicación de estaciones

### 3.4. Información hidrológica

La Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca realiza observaciones instantáneas de caudales en algunos sitios en la cuenca bajo estudio, en las Tablas 3.6 a 3.9 se presenta esta información para el período 2002-2007.

**Tabla 3-6 Aforos medidos en río El Rodeo ó Ambato-Villa El Rodeo**

Río: El Rodeo ó Ambato  
Localidad: Villa El Rodeo  
Lugar: 50 m aguas arriba de la Toma  
Cuenca del Valle Central

año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
2002										0.12	0.108	0.638
2003	1.2	0.45		0.564	0.498	0.391						
2004											0.325	
2005					0.225		0.175	0.165	0.195	0.239	0.35	
2006												
2007		crecido		-	0.25							

**Tabla 3-7 Aforos medidos en río El Rodeo ó Ambato-La Puerta**

Río: El Rodeo ó Ambato  
Localidad: La Puerta  
Lugar: 1,5 Km arriba Planta Potabilizadora Banda Sud  
Cuenca del Valle Central

año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
2002										0.36	0.458	1.134
2003	1.35	0.794		0.98	0.769	0.772						
2004												
2005												
2006					0.398		0.382	-	0.316	-	crecido	
2007		-		-	0.405							

**Tabla 3-8 Aforos medidos en río Los Nogales-Villa El Rodeo a.a. Toma**

Río: Los Nogales  
Localidad: Villa El Rodeo  
Lugar: Aforo inmediatamente aguas arriba de la Toma (canal)  
Cuenca del Valle Central

año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
2002										0.097	0.052	0.226
2003	0.173	0.183		0.262	0.18	0.179						
2004											0.264	
2005												
2006									0.041			
2007		crecido		-	0.05							

**Tabla 3-9 Aforos medidos en río Los Nogales-Villa El Rodeo 150 m a.a. Toma**

Río: Los Nogales  
Localidad: Villa El Rodeo  
Lugar: 150 m aguas arriba de la Toma  
Cuenca del Valle Central

año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
2002												
2003												
2004												
2005												
2006								0.077	0.039	-	0.172	
2007		crecido		-	0.142							

Se observa que los valores máximos aforados son en río El Rodeo ó Ambato de 1.2 m<sup>3</sup>/s en Villa El Rodeo y de 1.35 m<sup>3</sup>/s en La Puerta para el mes de enero de 2003.

### 3.5. Otros antecedentes

#### 3.5.1. Programa Provincial para el Uso del Agua. 1ª Etapa, Tomo II, Vol. 5º. Cuenca Río del Valle, Afluentes y Ríos de la Falda Oriental del Ambato. Ing. A. Factor. CFI, 1982

De esta publicación, fue considerado de interés el siguiente párrafo y las tablas que se anexan a continuación:

*Al sur de la última línea de filos transversales mencionada se desarrolla la cuenca del río Ambato que, en sus nacientes al pié de los cerros Alto y El Manchao, sigue un recorrido paralelo al rumbo de la sierra, hasta chocar con otro bloque transversal formado por los cerros Filo Colorado, Los Portezuelos, Pabellón y Pabellón Chico, que lo obliga a torcer hacia el este-noreste; en su recorrido recibe también numerosos aportes afluentes, entre los que se destacan los ríos Malduqueo, de los Portezuelos y al llegar a la localidad de El Rodeo, confluye desde el noroeste el río Los Nogales. A partir de aquí el río Ambato sale de la subcuenca atravesando su flanco oriental por el abra limitada por las cumbres del Corral de Barrancas al norte y de la Mesada al sur, para confluir con el río del Valle a la altura de la localidad de La Puerta.*

CUENCA: Río del Valle y Tributarios														ANEXO A 7.4.1-1 (1/6)	
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS															
Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE OBSERVACION			TIEMPO DE OBSERVACION		PROM. ANUAL EN EL PERIODO DE OBSER.	PONDERACION	ORGANISMO QUE OPERO		
			DEPTO	LAT.	LONG.	ALT.	INST.	SUSP.	INT.	AÑOS			MESES	OPERO	CPEGA
1	III-5D	COLPES	AMBATO				07/72		NO	11	01	1972/80 525,2	2		D.H.
2.1	520	EL RODEO	AMBATO	28°11'	65°55'		1974	1958	NO	15	00			SMH(CT)	D.H.
2.2		EL RODEO	AMBATO	28°11'	65°55'		09/69		NO	12	11	1979/81 791,0	2		D.H.
3.1	III-5D	HUMAYA	AMBATO	27°51'	66°01'		1949	1960	NO	12	00			SMH(CT)	D.H.
3.2	808	HUMAYA	AMBATO	27°51'	66°01'		07/69		NO	13	01	1970/73 697,0 1975/81 815,1	2		D.H.
6.1		L. CASTILLOS	AMBATO	27°58'	65°49'		1949		SI					C.T.	D.H.
6.2		L. CASTILLOS	AMBATO	27°58'			07/69		NO	13	01	1970/75 490,5	1		D.H.
5.1		L.P. BLANCAS	AMBATO	27°57'	66°04'		1949		NO					C.T.	D.H.
5.2		L.P. BLANCAS	AMBATO	27°57'	66°04'		01/65		NO	17	07	1965/81 794,8			
4.1	III-5D	LA PUERTA	AMBATO	28°10'	65°48'		1942	1958	SI	17	00			SMH(CT)	D.H.
4.2	1244	LA PUERTA	AMBATO	28°10'	65°48'		07/69		NO	13	01	1970/81 511,2	0		D.H.
7.1	III-5D	LOS VARELAS	AMBATO	27°57'	65°52'		1939	1958	SI	20	00			SMH(CT)	D.H.
7.2	1258	LOS VARELAS	AMBATO	27°57'	65°52'		01/66		NO	16	07	1970/74 463,4	1		D.H.
8.1	III-5D	A.E. CARRANZA	CAPAYAN	29°02'	66°00'		1911	1958	NO	48	00			SMH(FC)	D.H.
8.2	336	A.E. CARRANZA	CAPAYAN	29°02'	66°00'		07/69		NO	13	01	1970/75 300,0	0		D.H.
9.1	III-5D	CAPAYAN	CAPAYAN	28°46'	66°05'		1908	1958	SI	51	00	1908/58 333,9			SMH(FC)
9.2	337	CAPAYAN	CAPAYAN	28°46'	66°05'		09/65	04/77	NO	07	07	1974/76 671,3	0		D.H.
10		C. DEL VALLE	CAPAYAN				09/78		NO	03	11		1		D.H.
11.1	III-5D	CONCEPCION	CAPAYAN	28°41'	66°02'		1948	1962	NO	11	00			SMH(FC)	D.H.
11.2	375	CONCEPCION	CAPAYAN	28°41'	66°02'		07/69		NO	13	01	1970/80 546,9	1		D.H.

N.R.: Las coordenadas de estaciones provinciales son datos no confiables.



CUENCA: Río del Valle y Tributarios  
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS

ANEXO A 7.4.1 - 1 (2/6)

Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION (SMN)	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE OBSERVACION			TIEMPO DE OBSERVACION		PROM. ANUAL EN EL PERIODO DE OBSER.	FONDERACION	ORGANISMO QUE OPERA		
			DEPTO	COORDENADAS			INST.	SUSE	INT.	AÑOS			MESES	OPERA	OPERA
				LAT.	LONG.	ALT.									
12.1	III-5D 342	CHUMBICHA	CAPAYAN	28°51'	66°14'		1902	1958	SI	57	00	1902/58 356,2	1	BMI(FC)	D.H.
12.2		CHUMBICHA	CAPAYAN	28°51'	66°14'		09/69		SI	12	11		1		D.H.
13		EL MEDANO	CAPAYAN				01/70		NO	12	07	1972/76 143,5	1		D.H.
14.1	III-5D 804	HULLAPIMA	CAPAYAN	28°44'	65°58'		1908	1958	NO	51	00	1908/58 346,5		BMI(FC)	D.H.
14.2		HULLAPIMA	CAPAYAN	28°44'	65°58'		07/69	07/77		08	00	1970/76 102,4			D.H.
15		LA MESADA	CAPAYAN				10/71		NO	10	10	1972/76 682,6	1		D.H.
16		LAS PALMAS	CAPAYAN				07/71		NO	11	01	1977/81 662,5	1		D.H.
17.1		LOS ANGELES	CAPAYAN	28°38'	66°00'		1949		SI					C.T.	D.H.
17.2		LOS ANGELES	CAPAYAN	28°38'	66°00'		01/69		NO	13	07	1975/79 673,4	0		D.H.
17.3		LOS ANGELES	CAPAYAN	28°38'	66°00'		01/75		NO	07	07	1977/81 565,1	2		D.H.
18		L. CHANARITOS	CAPAYAN				10/71	03/75	NO	03	05	1972 288	0	D.H.	
19		L. DIVISADEROS	CAPAYAN				07/69		NO	13	01	1973/79 488,0	2		D.H.
20		L. NACIMIENTOS	CAPAYAN				07/71		NO	11	01	1972/80 564,0	1		D.H.
21.1	III-5D 1322	MIRAFLORES	CAPAYAN	28°36'	65°53'		1908	1958	NO	51	00			BMI(FC)	D.H.
21.2		MIRAFLORES	CAPAYAN	28°36'	65°53'		07/69		SI	13	01	1973/74 334,0	0		D.H.
22	III-3CA 1639	NUOVA COHEPA	CAPAYAN				09/78		SI	03	11		1		D.H.
23		PARADA KM. 62	CAPAYAN	29°36'	65°32'		1948	1958		11	00			BMI(CT)	D.H.
24		PUESTO NUEVO	CAPAYAN				10/71		NO	10	10	1975/81 357,1	0		D.H.
25.1		SAN MARTIN	CAPAYAN	29°13'	65°47'		1911	1961	SI					BMI(FC)	D.H.
25.2		SAN MARTIN	CAPAYAN	29°13'	65°47'		01/70		SI	12	07	1970/79 333,7	0		D.H.
26.1		SISI-HUASI	CAPAYAN	28°32'	65°45'		1959			01	00	1959 316,8			D.H.

CUENCA: Río del Valle y Tributarios  
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS

ANEXO A 7.4.1 - 1 (3/6)

Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION (SMN)	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE OBSERVACION			TIEMPO DE OBSERVACION		PROM. ANUAL EN EL PERIODO DE OBSER.	FONDERACION	ORGANISMO QUE OPERA		
			DEPTO	COORDENADAS			INST.	SUSE	INT.	AÑOS			MESES	OPERA	OPERA
				LAT.	LONG.	ALT.									
26.2	III-3CA 2007	SISI-HUASI	CAPAYAN	28°32'	65°45'		01/65		NO	17	07	1968/74 300,0	0		D.H.
27.1		TELARITOS	CAPAYAN	29°29'	65°40'		1911	1958		48	00			BMI(FC)	D.H.
27.2		TELARITOS	CAPAYAN	29°29'	65°40'		07/69	11/74	NO	05	04				D.H.
28		TRAMPASACHA	CAPAYAN				09/69		NO	12	11	1974/81 849,9			D.H.
29.1	III-5D 340	CATAMARCA	CAPITAL	28°20'	65°47'		1909	1958	SI	50	00	1909/58 360,1		BMI(FC)	D.H.
29.2		D. H.	CAPITAL	28°28'	65°47'		09/78		NO	03	11	1979/81 425,7	2		D.H.
30		EL JUMBAL	CAPITAL				01/80		NO	02	07	1980/81 457,7	2		D.H.
31		LAS RETAS	CAPITAL				01/72	06/80	NO	08	05	1972/79 387,4	0		D.H.
32		LA CARRERA	F.M.ESQ.	28°20'	65°42'		1949	1968	SI	10	00			BMI(CT)	D.H.
33		PIEDRA BLANCA	F.M.ESQ.	28°22'	65°42'		1917	1959		42	00	1917/59 413,0		A.y E.E.	D.H.
34		PIRQUITAS	F.M.ESQ.	28°20'	65°42'		1954	1960		07	00	1954/60 506,0		A.y E.E.	D.H.
35.1	III-5D 1137	AMADORES	PACLIN	28°44'	65°38'		1938	1958	SI	21	00			BMI(CT)	D.H.
35.2	III-5D 125	AMADORES	PACLIN	28°46'	65°39'		1938	1949		12	00			PART.	D.H.
35.3	III-3CAa 326	AMADORES	PACLIN	28°44'	65°38'		07/69		NO	13	01	1970/79 540,6	1		D.H.
36		CERVIÑO	PACLIN	28°17'	65°39'		1925	1932		08	00			BMI(FC)	D.H.
37.1		LA BAJADA	PACLIN	28°24'	65°37'		1949		NO					C.T.	D.H.
37.2		LA BAJADA	PACLIN	28°24'	65°37'		01/68		NO	14	07	1968/81 399,3	1		D.H.
38		LA FIGUERA	PACLIN				10/65		NO	16	10	1970/80 762,4	2		D.H.
39.1		LA MERCED	PACLIN	28°10'	65°40'									C.T.	D.H.
39.2		LA MERCED	PACLIN	28°10'	65°40'		09/69		NO	12	11	1975/81 732,9			D.H.

CUENCA: Río del Valle y Tributarios  
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS

ANEXO A 7.4.1 - 1 (4/6)

Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION (SMN)	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE			TIEMPO DE		PROM. ANUAL EN EL PERIO DO DE OBSER.	PONDE- RACION	ORGANISMO QUE		
			DEPTO	COORDENADAS		OBSERVACION			OBSERVACION				OPERO	OPERA	
				LAT.	LONG.	ALT.	INST.	SUSE	INT.	AÑOS					MESES
40.1	III-5D	PALO LARRADO	PACLIN	28°20'	65°37'		1949	1958		10	00	1972/80 562,6	1	SMN(CT)	
40.2	III-3Ca	PALO LARRADO	PACLIN	28°20'	65°37'		07/69			13	01				
41	369	R. CASTILLO	PACLIN	28°29'	65°39'		1925	1932	NO	13	00				
42	III-3Ca	SAN ANTONIO	PACLIN				07/69		NO	13	01	1976/78 891,3	0		D.H.
43	III-5D	SAN FRANCISCO	PACLIN	28°03'	65°37'		1952	1961	NO	10	00				
44	1953	SUPERI	PACLIN	28°10'	65°40'		1926	1964	NO	19	00	1926/58 466,4			
45.1	III-5D	EL PORTEZUELO	V.VIEJC	28°30'	65°35'		1925	1932	NO	08	00	1970/81 538,8		SMN(FC)	
45.2	III-5D	EL PORTEZUELO	V.VIEJC	28°30'	65°35'		01/70			07	00				
46.1	III-5D	HUAYCAMA	V.VIEJC	28°32'	65°40'		1940	1958	NO	19	00				
46.2	III-5D	HUAYCAMA	V.VIEJC	28°32'	65°40'		07/69		NO	13	01	1974/78 595,6	2		D.H.
47	1324	NOTA BOTELLO	V.VIEJC	28°31'	65°39'		1927	1932		16	00			SMN(FC)	
48.1		SUMALAO	V.VIEJC	28°29'	65°44'		1927	1932	NO	16	00			F.C.	
48.2		SUMALAO	V.VIEJC	28°29'	65°44'		01/69	1970	NO	17	07	1967/79 69	2		D.H.

Dr. CARLOS ALBERTO MARTÍ  
JEFE DIVISION HIDROLOGIA  
DIRECCION DE HIDROLOGIA  
CATAMARCA

CUENCA: Río del Valle y Tributarios  
ESTACIONES PLUVIOGRAFICAS

ANEXO A 7.4.1-1 (5/6)

DIRECCION DE HIDRAULICA

Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION (SMN)	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE			TIEMPO DE		PROM. ANUAL EN EL PERIO DO DE OBSER.	PONDE- RACION	ORGANISMO QUE		
			DEPTO	COORDENADAS		OBSERVACION			OBSERVACION				OPERO	OPERA	
				LAT.	LONG.	ALT.	INST.	SUSE	INT.	AÑOS					MESES
1		HUMAYA	AMRATO				03/82			00	05	2		D.H.	
2		CHUMBICHA	CAPAYAN				12/81			00	08		2		D.H.
3		SUMALAO	V.VIEJC	28°29'	65°44'		1964		SI	18	08				INTA

Dr. CARLOS ALBERTO MARTÍ

CUENCA: Río del Valle y Tributarios  
ESTACIÓN EVAPORIMETRICA

ANEXO A 7.4.1 - 1 (6/6)

DIRECCION DE HIDRAULICA

Nº DE ORDEN	Nº DE LA ESTACION (S.M.N.)	NOMBRE DE LA ESTACION	SITUACION GEOGRAFICA			PERIODO DE OBSERVACION			TIEMPO DE OBSERVACION		PRON. ANUAL EN EL PERIODO DE OBSER.	PONDERACION	ORGANISMO QUE		
			DEPTO	COORDENADAS			INST.	SUSE	INT.	AÑOS			MESES	OPERO	OPERA
				LAT.	LONG.	ALT.									
1		SUMALAO	V. VIEJO	28° 29'	65° 44'	525	1944						S.M.N.		

*[Signature]*  
ING. CARLOS ALBERTO...  
1992

### 3.5.2. Aluviones en El Rodeo, Catamarca. Consideraciones sobre un sistema de alerta, acciones estructurales y mapeo de la vulnerabilidad hídrica. CFI, 1992

De esta publicación se extrajeron los siguientes párrafos que podrían resultar de interés para el presente estudio:

*A principios del mes de octubre de 1992 la Provincia de Catamarca solicitó al Consejo Federal de Inversiones (CFI) un diagnóstico sobre causas y posibles vías de solución para atenuar las inundaciones de índole catastróficas que amenazan al paraje "El Rodeo". Este lugar se encuentra a 38 km de la capital provincial; se trata de una villa turística de inusual encanto por la que pasa el río Ambato, de tranquilas aguas durante el estiaje pero cuyas avenidas, que son más frecuentes en verano han sido capaces de transportar peñascos de más de 1 m3 y de alterar drásticamente el modelado del cauce cada vez que ocurren.*

*El río Ambato discurre entre los valles de los ríos Seco y Los Nogales, constituyendo ese sector un ámbito fluvial caracterizado por el régimen apacible de los estiajes y la violencia devastadora de las crecidas de menor frecuencia de aparición, debido al transporte de enormes peñascos a muy altas velocidades que impactan contra las márgenes con gran potencia destructora.*

*En, ese entorno (o si se prefiere, en la ruta del río Ambato) ha crecido el paraje El Rodeo.*

*Divagante como es el río Ambato al cruzar el pueblo, amenaza con deteriorar con severidad toda obra de infraestructura edificada hacia adentro de la línea de ribera, definida por las crecidas máximas anuales medias, y de la vía de evacuación de inundaciones (el espacio ocupado por crecidas de recurrencia pronosticable entre 10 y 25 años).*

*Para definir las acciones inmediatas en el tramo urbano del Río Ambato se parte de reconocer que su conformación actual y la dimensión y distribución del material acumulado en el lecho están estrechamente asociados con las mayores crecientes últimamente ocurridas, el 29 de enero de 1990 y el 1º de abril de 1992, y que eventos menores no tendrán fuerza suficiente para variar esta conformación salvo en órdenes menores (las alteraciones pueden sobrevenir solo a consecuencia de riadas de igual o mayor intensidad).*

*Como el estado actual presenta zonas de riesgo, aún durante eventos medios, por la sobre elevación del lecho en algunos lugares o cambios en la alineación del escurrimiento principal, es necesario redimensionar y conformar el cauce a partir de su eje.*

*Para ello se debe diseñar una sección de pasaje equivalente (con igual pendiente) a la que presenta el río inmediatamente después del puente arco que está aguas abajo del balneario, presuponiendo que esa sección fue formada por la última gran creciente. En los estrechamientos ocasionados por muros de defensa o los estribos de los puentes la sección deberá ser rediseñada profundizando el cauce.*

*El redimensionamiento, considerando el carácter torrencial del río y su gran capacidad de transporte, es una solución temporaria que debe repetirse anualmente o cuando se produzca un cambio significativo de la sección o del alineamiento.*

### **3.5.3. Estudios Hidrológicos e Hidráulicos en la Cuenca del Arroyo Fariñango, provincia de Catamarca. Convenio CFI-INCyTH, 1994**

De esta publicación se extrajeron las siguientes informaciones:

En base a la precipitación de cada estación y sus respectivas coordenadas relativas (Mapa 2), se pudieron determinar para cada evento isohietas elípticas a través del modelo Convective Field Model (CFM) [1] (entre corchetes corresponde al número indicado en Referencias Bibliográficas) y cuyos resultados (salida analítica de datos y mapas) se adjuntan en el Anexo II.

Es importante hacer notar que en cada salida analítica se puede visualizar al pie una Tabla con 5 columnas correspondiendo a valores de (izquierda a derecha):

- valor de precipitación (mm) en una isohieta
- valor de precipitación (relativo al núcleo) en una isohieta
- longitud (Km) del semieje menor de la isohieta elíptica
- longitud (Km) del semieje mayor de la isohieta elíptica
- área (Km<sup>2</sup>) de la isohieta elíptica

Con los valores mencionados, arrojados por el modelo CFM, y las duraciones de las tormentas analizadas (Anexo II), extraídas de las planillas correspondientes a estaciones operadas por la D.H., se pudo realizar una correlación que dio por resultado la siguiente expresión:

$$pp = e^{-(0.0012 - 0.954 \times 10^{-4} D)A} \quad \text{con } R^2 = 0.999$$

donde:

pp = precipitación relativa al núcleo correspondiente a una isohieta elíptica de área A (Km<sup>2</sup>) de un evento de duración D (horas).

También de los registros pluviométricos de la D.H. (Anexo I) se puede estimar que 3 y 6 horas son duraciones típicas de los eventos de la región. En la Figura 1 aparecen las curvas de decaimiento espacial de la tormenta para estas duraciones típicas.

En la Tabla III se pueden visualizar las dimensiones de las isohietas elípticas de valores relativos al núcleo para duraciones de 3 y 6 horas y en los mapas 3, 4, 5 y 6 las isohietas porcentuales correspondientes a las duraciones mencionadas, centradas sobre la cuenca total y sobre la subcuenca 313.

Tabla I Estaciones Pluviométricas

Estación	Código	Institución	Recórd [años]	Fecha	
				Inicio	Final
Rejas-Jumeal	102	D.H.	20	01-07-72	31-12-92
El Tala	103	D.H.	8	01-07-72	30-11-80
Pirquitas	104	D.H.	9	04-01-72	31-12-81
INTA-Sumalao	201	S.M.N.	37	01-12-45	31-12-82
Capital	101	D.H.	14	30-09-78	31-05-92
	202	S.M.N.	38	01-02-33	30-11-71
Aero I	203	S.M.N.	40	01-01-33	30-04-73
La Carrera	205	S.M.N.	26	01-12-49	31-01-75
El Rodeo	209	S.M.N.	35	01-01-44	31-01-79
La Puerta	210	S.M.N.	30	01-04-42	31-01-72
SUPERI	211	S.M.N.	28	01-01-33	28-02-61
Aero II	224	S.M.N.	9	01-05-73	31-12-82
Portezuelo	411	S.M.N.	16	01-01-68	31-12-84

Tabla II Eventos seleccionados para análisis de la distribución espacial  
Precipitación diaria [mm]

Estación Evento	102	103	104	201	202	203	205	209	210	211	224	411
11-12-50				21.8	24	23.2	25	22	30	22		
19-08-51				20.8	20	18	20	7	8	9		
10-01-52				2.5	7	15	25	33	50	69		
21-03-52				25.5	40	28.7	23	13	25	13		
27-10-52				25	31	40.2	57	29	16	13		
22-01-53				2.5	8	8.8	12.5	2	11	2		
30-03-53				19.3	16	16	40	2	18	12		
12-12-53				49	48	65	64.5	26	34	18		
12-02-54				22	38	46	23	5	20	20		
02-03-54				2.1	5	2	60	16	37	25		
05-10-55				18	15	18	27	6	10	16		
27-01-72			16	20		45	36	41.5	29			14
03-03-73	63	25.5	28.6	113		100		45				43
04-12-78	26	56	22.8	16	24						5	10
19-12-78	14		11	22.5	22			5			25.2	10
23-11-79	31	16.5	15	31	33						26	10

Tabla III Tormenta de Proyecto – Distribución areal

% Pmáx	Ln [%Pmáx]	Area		D = 3 horas		D = 6 horas	
		D = 3 hs. [km <sup>2</sup> ]	D = 6 hs. [km <sup>2</sup> ]	S.E. May. [km]	S.E. Men. [km]	S.E. May. [km]	S.E. Men. [km]
0.05	-2.996	3406.59	5044.31	52.07	20.83	63.36	25.34
0.10	-2.303	2618.38	3877.16	45.65	18.26	55.55	22.22
0.15	-1.897	2157.31	3194.43	41.43	16.57	50.42	20.17
0.20	-1.609	1830.17	2710.02	38.16	15.27	48.44	18.58
0.25	-1.386	1576.42	2334.28	35.42	14.17	43.10	17.24
0.30	-1.204	1369.10	2027.29	33.01	13.20	40.17	16.07
0.35	-1.050	1193.80	1767.72	30.82	12.33	37.51	15.00
0.40	-0.916	1041.96	1542.88	28.80	11.52	35.04	14.02
0.45	-0.799	908.02	1344.55	26.88	10.75	32.71	13.08
0.50	-0.693	788.21	1167.14	25.04	10.02	30.48	12.19
0.55	-0.598	679.83	1006.66	23.26	9.30	28.30	11.32
0.60	-0.511	580.88	860.14	21.50	8.60	26.16	10.47
0.65	-0.431	489.86	725.37	19.74	7.90	24.03	9.61
0.70	-0.357	405.59	600.58	17.97	7.19	21.86	8.74
0.75	-0.288	327.14	484.41	16.13	6.45	19.63	7.85
0.80	-0.223	253.75	375.74	14.21	5.68	17.29	6.92
0.85	-0.163	184.81	273.65	12.13	4.85	14.76	5.90
0.90	-0.105	119.81	177.41	9.76	3.91	11.88	4.75
0.95	-0.051	58.33	86.37	6.81	2.73	8.29	3.32
1.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla V. Relación entre valores de publicación [2] y determinados en este estudio

TR	Diaria		F	Duración = 3 hs.		Duración = 6 hs.	
	Pub. [2] (mm)	Estudio (mm)		Pub. [2] (mm)	Estudio (mm)	Pub. [2] (mm)	Estudio (mm)
2	46	46	1.000	26	26.0	29	29.0
5	65	63	1.032	38	36.8	42	40.7
10	88	74	1.189	46	38.7	52	43.7
25	94	88	1.068	57	53.4	64	59.9
50	108	98	1.102	65	59.0	74	67.1
100	120	109	1.101	74	67.2	84	76.3
200	132	119	1.109	82	73.9	94	84.7

Tabla VI. Distribución temporal (tormenta de Chicago modificada) para intervalos de 15 minutos y duración de 3 horas

Tiempo	TR = 5 mm/h	TR = 10 mm/h	TR = 50 mm/h	TR = 5 mm	TR = 10 mm	TR = 50 mm	TR = 5 %	TR = 10 %	TR = 50 %	Prom. %	Corr. %
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	4.94	6.18	8.38	1.24	1.55	2.10	3.0	3.2	3.1	3.1	4.0
0.50	8.98	8.60	11.83	1.75	2.15	2.96	4.2	4.4	4.3	4.3	5.7
0.75	14.33	16.95	24.22	3.58	4.24	8.06	8.6	8.7	8.8	8.7	11.5
1.00	79.89	89.52	127.19	19.97	22.38	31.80	48.0	46.0	46.4	46.8	30.0
1.25	18.15	21.21	30.66	4.54	5.30	7.67	10.9	10.9	11.2	11.0	14.5
1.50	10.53	12.70	17.81	2.63	3.18	4.45	6.3	6.5	6.5	6.5	8.5
1.75	7.74	9.49	13.11	1.94	2.37	3.28	4.6	4.9	4.8	4.8	6.3
2.00	6.24	7.72	10.57	1.56	1.93	2.64	3.7	4.0	3.9	3.9	5.1
2.25	5.28	8.59	8.96	1.32	1.65	2.24	3.2	3.4	3.3	3.3	4.3
2.50	4.61	5.78	7.83	1.15	1.45	1.96	2.8	3.0	2.9	2.9	3.8
2.75	4.11	5.18	8.98	1.03	1.30	1.75	2.5	2.7	2.5	2.8	3.4
3.00	3.72	4.71	6.33	0.93	1.18	1.58	2.2	2.4	2.3	2.3	3.1
				41.63	48.66	68.47	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

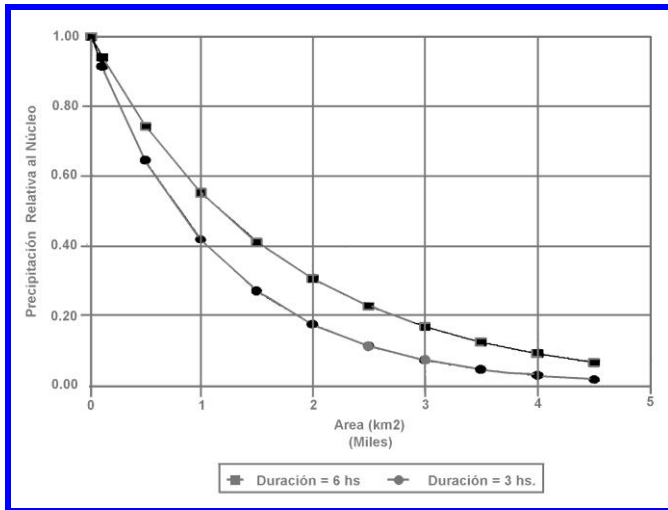
Tiempo	TR = 2 mm	TR = 5 mm	TR = 10 mm	TR = 25 mm	TR = 50 mm	TR = 100 mm
0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	1.0	1.5	1.6	2.2	2.4	2.7
0.50	1.5	2.1	2.2	3.0	3.3	3.8
0.75	3.0	4.2	4.4	6.1	6.8	7.7
1.00	7.8	11.0	11.6	16.0	17.7	20.2
1.25	3.8	5.3	5.6	7.7	8.5	9.7
1.50	2.2	3.1	3.3	4.5	5.0	5.7
1.75	1.6	2.3	2.4	3.3	3.7	4.2
2.00	1.3	1.9	2.0	2.7	3.0	3.4
2.25	1.1	1.6	1.7	2.3	2.5	2.9
2.50	1.0	1.4	1.5	2.0	2.2	2.5
2.75	0.9	1.2	1.3	1.8	2.0	2.3
3.00	0.8	1.1	1.2	1.6	1.8	2.1
	26.0	36.8	38.7	53.4	59.0	67.2

Tabla VII. Distribución temporal (tormenta de Chicago modificada) para intervalos de 15 minutos y duración de 6 horas

Tiempo	TR = 5 mm/h	TR = 10 mm/h	TR = 50 mm/h	TR = 5 mm mm	TR = 10 mm	TR = 50 mm	TR = 5 %	TR = 10 %	TR = 50 %	Prom. %	Corr. %
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	2.53	3.25	4.31	0.63	0.81	1.08	1.3	1.4	1.3	1.3	1.5
0.50	2.84	3.64	4.85	0.71	0.91	1.21	1.4	1.5	1.5	1.5	1.7
0.75	3.28	4.17	5.58	0.82	1.04	1.40	1.5	1.7	1.7	1.7	1.9
1.00	3.91	4.94	6.65	0.98	1.24	1.66	1.9	2.1	2.0	2.0	2.3
1.25	4.94	6.18	8.38	1.24	1.55	2.10	2.5	2.6	2.5	2.5	2.9
1.50	6.98	8.60	11.83	1.75	2.15	2.96	3.5	3.6	3.6	3.5	4.0
1.75	14.33	16.95	24.22	3.58	4.24	6.06	7.1	7.1	7.6	7.2	8.2
2.00	79.89	89.52	127.19	19.97	22.38	31.80	39.8	37.6	38.2	38.5	30.0
2.25	18.15	21.21	30.66	4.54	5.30	7.67	9.0	8.9	9.2	9.0	10.3
2.50	10.53	12.70	17.81	2.63	3.18	4.45	5.2	5.3	5.4	5.3	6.0
2.75	7.74	9.49	13.11	1.94	2.37	3.28	3.9	4.0	3.9	3.9	4.5
3.00	6.24	7.72	10.57	1.56	1.93	2.64	3.1	3.2	3.2	3.2	3.6
3.25	5.28	6.69	8.96	1.32	1.65	2.24	2.6	2.8	2.7	2.7	3.1
3.50	4.61	5.78	7.83	1.15	1.45	1.96	2.3	2.4	2.4	2.4	2.7
3.75	4.11	5.18	6.98	1.03	1.30	1.75	2.0	2.2	2.1	2.1	2.4
4.00	3.72	4.71	6.33	0.93	1.18	1.58	1.9	2.0	1.9	1.9	2.2
4.25	3.41	4.33	5.80	0.85	1.08	1.45	1.7	1.8	1.7	1.8	2.0
4.50	3.15	4.02	5.37	0.79	1.01	1.34	1.6	1.7	1.6	1.6	1.8
4.75	2.94	3.76	5.01	0.74	0.94	1.25	1.5	1.6	1.5	1.5	1.7
5.00	2.76	3.53	4.70	0.69	0.88	1.18	1.4	1.5	1.4	1.4	1.6
5.25	2.60	3.33	4.43	0.65	0.83	1.11	1.3	1.4	1.3	1.3	1.5
5.50	2.46	3.16	4.19	0.62	0.79	1.05	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
5.75	2.34	.01	3.99	0.59	0.75	1.00	1.2	1.3	1.2	1.2	1.4
6.00	2.23	2.88	3.80	0.56	0.72	0.95	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
				50.24	59.66	83.14	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tiempo	TR = 2 mm	TR = 5 mm	TR = 10 mm	TR = 25 mm	TR = 50 mm	TR = 100 mm
0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	0.4	0.6	0.6	0.9	1.0	1.1
0.50	0.5	0.7	0.7	1.0	1.1	1.3
0.75	0.6	0.8	0.8	1.1	1.3	1.5
1.00	0.7	0.9	1.0	1.4	1.5	1.7
1.25	0.8	1.2	1.3	1.7	1.9	2.2
1.50	1.2	1.6	1.8	2.4	2.7	3.1
1.75	2.4	3.3	3.6	4.9	5.5	6.2
2.00	8.7	12.2	13.1	18.0	20.1	22.9
2.25	3.0	4.2	4.5	6.2	6.9	7.9
2.50	1.8	2.5	2.6	3.6	4.1	4.6
2.75	1.3	1.8	2.0	2.7	3.0	3.4
3.00	1.0	1.5	1.6	2.2	2.4	2.8
3.25	0.9	1.2	1.3	1.8	2.1	2.3
3.50	0.8	1.1	1.2	1.6	1.8	2.0
3.75	0.7	1.0	1.0	1.4	1.6	1.8
4.00	0.6	0.9	1.0	1.3	1.5	1.7
4.25	0.6	0.8	0.9	1.2	1.3	1.5
4.50	0.5	0.8	0.8	1.1	1.2	1.4
4.75	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3
5.00	0.5	0.7	0.7	1.0	1.1	1.2
5.25	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2
5.50	0.4	0.6	0.6	0.9	1.0	1.1
5.75	0.4	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0
6.00	0.4	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0
	29.0	40.7	43.7	59.9	67.1	76.3

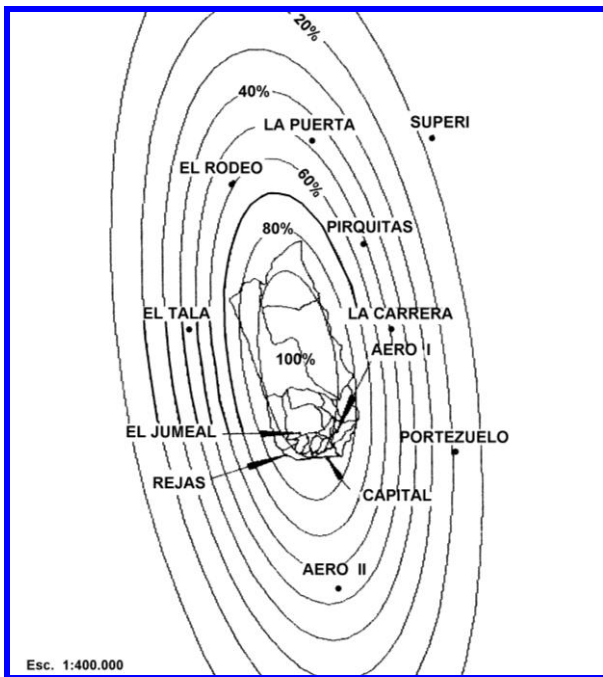




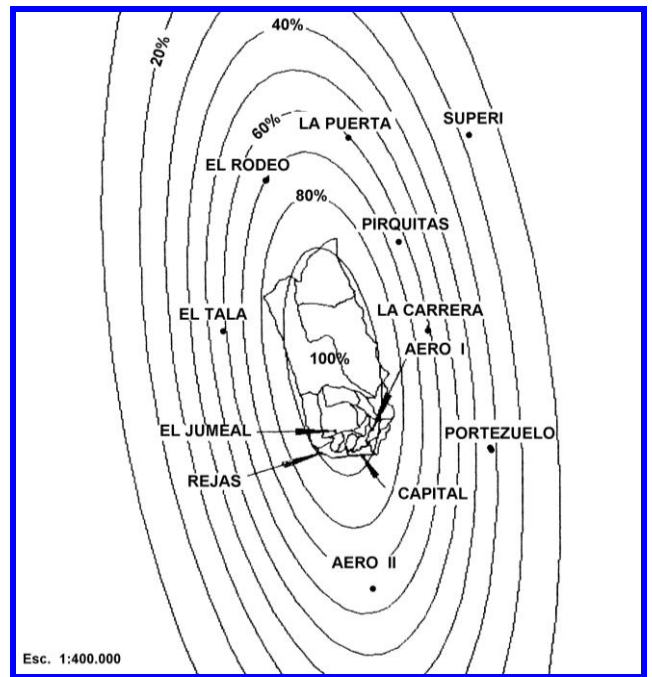
Curva de decaimiento espacial

### Estaciones meteorológicas

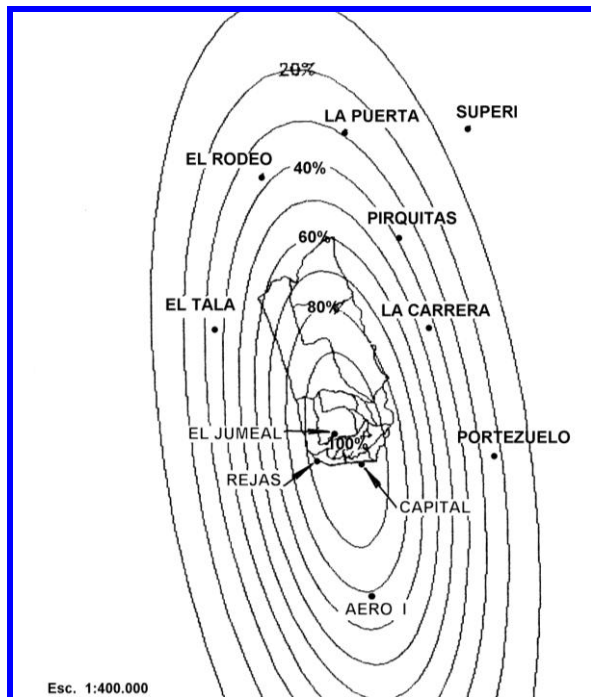
De estas estaciones, figuran en la publicación, los registros de precipitaciones diarias y en algunos casos existen horas de comienzo y finalización de la tormenta y consecuentemente su duración.



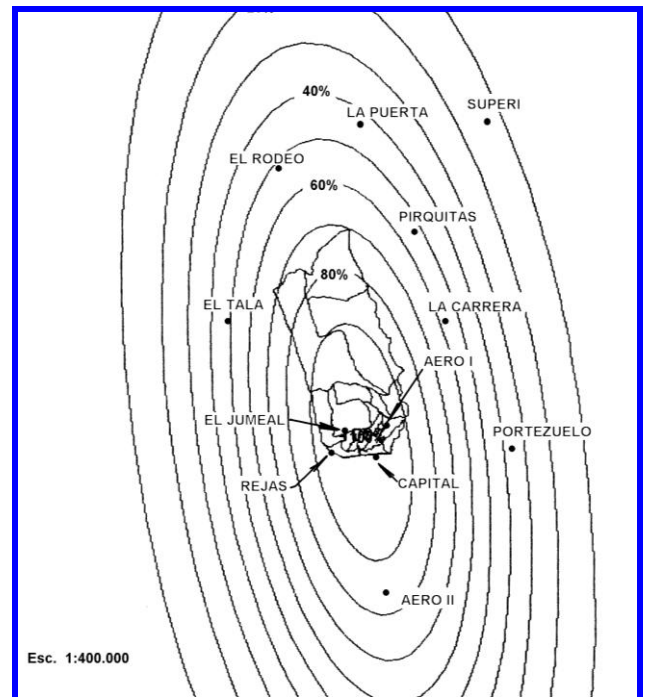
TORMENTA DE PROYECTO – Duración 3 horas



TORMENTA DE PROYECTO – Duración 6 horas



TORMENTA DE PROYECTO – Duración 3 horas



TORMENTA DE PROYECTO – Duración 6 horas

## 4. TORMENTAS DE PROYECTO

### 4.1. Estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia basadas en la propiedad de escalamiento simple para la estación pluviométrica El Rodeo, Departamento Ambato-Catamarca

#### 4.1.1. Análisis de información pluviográfica y pluviométrica

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) suministró información de tormentas observadas en las estaciones: Catamarca Aero I (código 10044), Catamarca Aero (código 10044) y Catamarca INTA-Sumalao (código 10070).

La estación Aero I es reemplazada por la nueva Catamarca Aero, razón por la cual las observaciones están divididas en dos períodos. Los registros comprenden desde 1961 a 1998, con datos faltantes en Catamarca Aero para el período 1975-1981 y para los años 1983 y 1991. Existe superposición con las observaciones de INTA-Sumalao en el período 1964-1974 (1º Informe de Avance. Recopilación y Evaluación de antecedentes. IT N° 137 – CRA. INA. Setiembre, 2011).

Los datos pluviométricos diarios suministrados por la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca (DHyerHC) se superponen con los registros de corta duración a partir de 1970 y contienen información más actualizada.

Se analizaron las series de totales diarios de precipitaciones máximas anuales de las estaciones del SMN, INTA y El Rodeo (DH<sub>y</sub>ERHC) con el propósito de compararlas. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran los ajustes a las distribuciones General de Valores Extremos (GEV) y EV1 (Gumbel).

La serie de la estación INTA-Sumalao presenta una concentración de valores cercanos a los 10 mm (Figura 4.1) y un valor máximo de 108 mm, correspondiente a la tormenta del 02/01/1967, que puede ser considerado como valor atípico extremo. El registro de Catamarca Aero muestra para esa fecha un valor total de precipitación de 40.2 mm.

El ajuste de la distribución GEV no resulta muy satisfactorio, pero el empleo de otra distribución no proveería mejores resultados. Dadas las características de esta serie se decidió no utilizarla en la estimación de las curvas IDF.

La Figura 4.2 muestra que las precipitaciones máximas diarias observadas en El Rodeo en el período 1970-2006, son mayores que las de Catamarca Aero, en consecuencia la estimación de las curvas IDF con los datos de esta última estación estaría subestimando las precipitaciones en la cuenca bajo estudio. Por este motivo se decidió emplear una metodología que relacione los datos de corta duración del SMN y los pluviométricos de la estación El Rodeo.

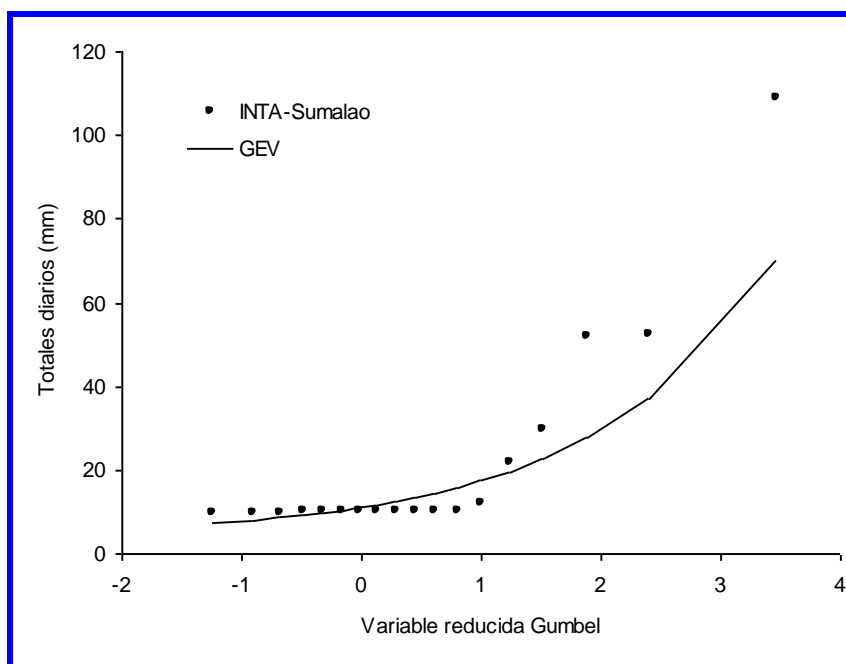


Figura 4-1. Serie de totales diarios máximos anuales de precipitación en INTA-Sumalao

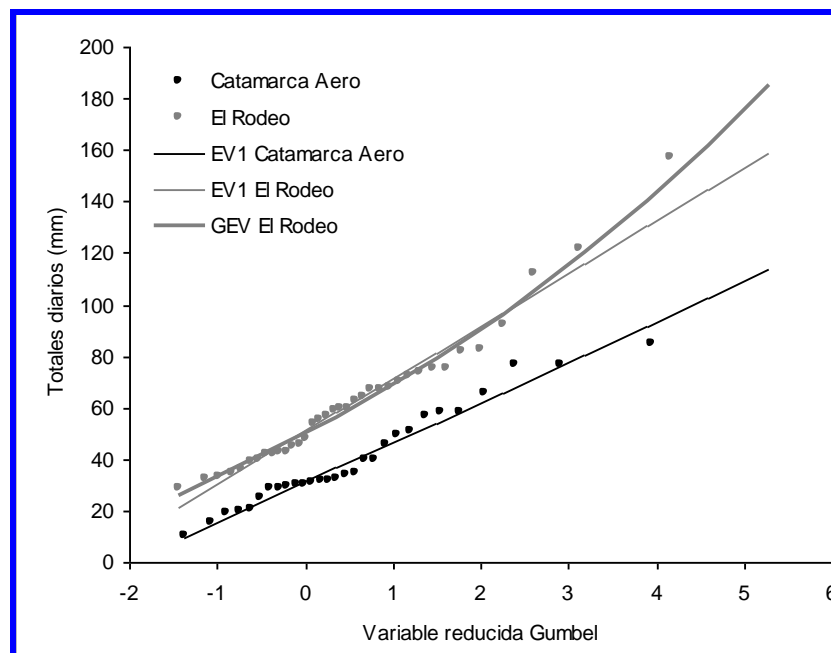


Figura 4-2 . Serie de totales diarios máximos anuales de precipitación en Catamarca Aero y El Rodeo

#### 4.1.2. Metodología de escalamiento para la estimación de curvas IDF en función de una duración de referencia

En este estudio se empleó la metodología basada en la teoría de escalamiento temporal propuesta por Yu et al. (2004) para la estimación de curvas regionales IDF en sitios sin registros pluviográficos.

Los modelos de escala invariante o escalamiento permiten transformar datos de un modelo temporal o espacial en otro.

Un fenómeno presenta características de escalamiento simple para la variable aleatoria  $I$  cuando:

$$I_{\lambda d} \stackrel{dist}{=} \lambda^{\beta} I_d \quad (4.1)$$

donde  $\stackrel{dist}{=}$  denota igualdad en la función de distribución de probabilidad, es decir que la distribución de probabilidad del fenómeno es invariante con respecto a la escala;  $I$  es una variable aleatoria, en este caso intensidades de precipitación máximas anuales para duraciones  $d$  y  $\lambda d$ ;  $\lambda$  es el parámetro de escala y  $\beta$  representa el exponente de escalamiento.

Si los momentos de  $I$  existen, éstos son invariantes con la escala y se relacionan según:

$$E[I_{\lambda d}^n] = \lambda^{\beta n} E[I_d^n] \quad (4.2)$$

donde  $\beta_n$  es el exponente de escalamiento de orden  $n$ .

Para momentos ponderados por probabilidad (PWM) la ecuación (3.2) queda representada por:

$$M_{\lambda d}^{1,n,0} = \lambda^{\beta} M_d^{1,n,0} \quad (4.3)$$

La ecuación anterior puede ser transformada aplicando logaritmos como:

$$\log M_{\lambda d}^{1,n,0} = \log M_d^{1,n,0} + \beta \log \lambda \quad (4.4)$$

El exponente de escalamiento ( $\beta$ ) puede ser estimado como la pendiente de la regresión lineal entre los valores transformados de los PWM y el parámetro de escala ( $\log \lambda$ ) para varios órdenes  $n$ .

Si las intensidades de precipitación ( $I$ ) para varias duraciones presentan escalamiento simple (Kumar et al.; 1994) la relación log-log de la ecuación (4.4) entre los valores de PWM y sus duraciones se mantiene para todos los momentos de orden  $n$  y la pendiente  $\beta$  es constante e independiente de  $n$ .

Para determinar si las intensidades de las precipitaciones observadas en la estación Catamarca Aero presentaban características de escalamiento simple, se estimaron los valores de PWM (orden 0 a 6) para duraciones de 1, 1.5, 2, 3, 4, 12 y 24 horas. En la Figura 4.3 se grafican las relaciones entre los PWM y las duraciones seleccionadas y se observa que éstas son lineales.

Los valores estimados del exponente de escalamiento para los órdenes de momentos considerados se grafican en la Figura 4.4, demostrando que la estimación de  $\beta$  (-0.8731) es constante para los diferentes órdenes de momentos y verificando la característica de escalamiento simple de las intensidades de precipitación observadas en la estación Catamarca Aero.

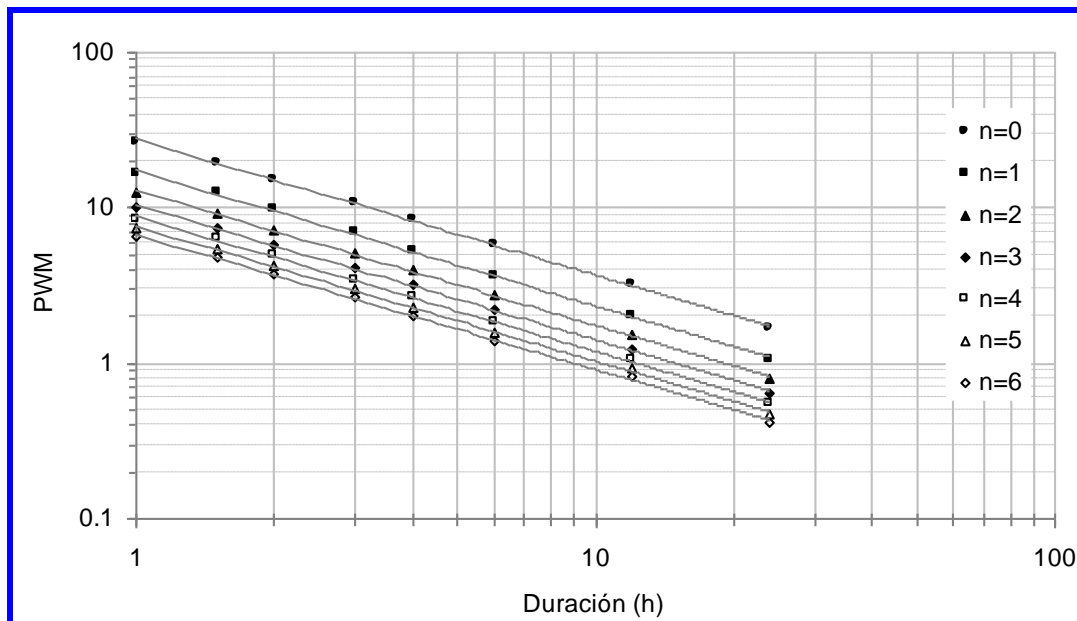


Figura 4-3 Relación entre valores de PWM de  $I$  y duraciones para la estación Catamarca Aero

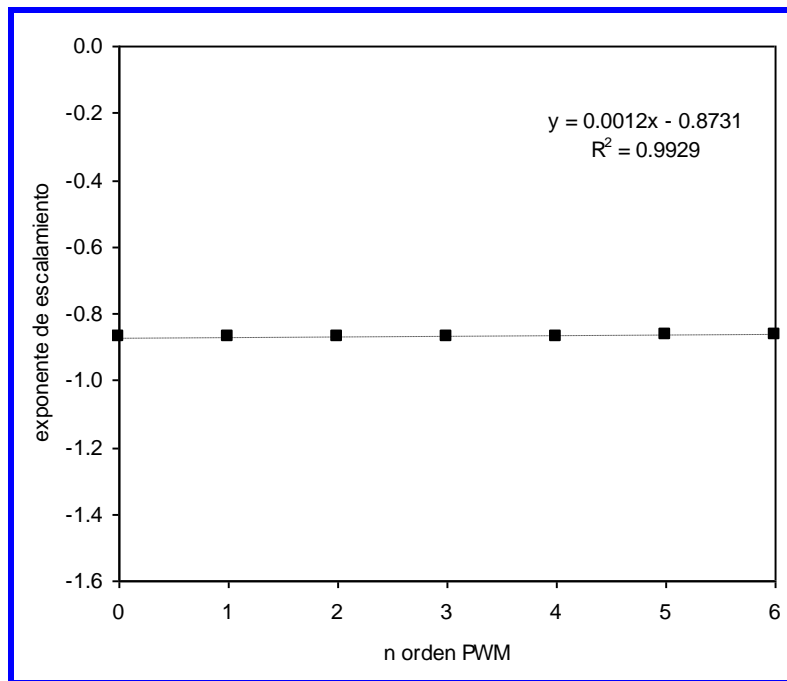


Figura 4-4 Relación entre valores de  $\beta$  y orden de los PWM para la estación Catamarca Aero

Para la distribución EV1 la estimación de cuantiles es:

$$I_d = \mu_d + \alpha_d \hat{y} \quad (4.5)$$

donde:  $\hat{y} = -\ln[-\ln(1-1/T)]$  y  $T$  es el período de retorno.

Para un proceso de escalamiento simple, el estudio de Yu et al. (2004) define las propiedades estadísticas de la distribución EV1 para dos escalas diferentes de tiempo  $d$  y  $\lambda d$  según:

$$\mu_{\lambda d} = \lambda^\beta \mu_d \quad (4.6)$$

$$\alpha_{\lambda d} = \lambda^\beta \alpha_d \quad (4.7)$$

$$I_{\lambda d}^T = \lambda^\beta I_d^T \quad (4.8)$$

Considerando las ecuaciones de transformación (4.6) a (4.8) las curvas IDF basadas en el concepto de escalamiento simple pueden ser estimadas como:

$$I_t^T = I_{\lambda d}^T = I_d^T \lambda^\beta = (\mu_d + \alpha_d \hat{y})(t/d)^\beta \quad (4.9)$$

donde  $I_t^T$  representa la intensidad de precipitación para la duración  $t = \lambda d$  (horas) y período de retorno  $T$  (años).

La ecuación (4.9) puede ser fácilmente utilizada para estimar las intensidades de diseño para varias duraciones ( $t$ ) y períodos de retorno ( $T$ ), en función de los parámetros estadísticos ( $\alpha_d$  y  $\mu_d$ ) y del exponente de escalamiento ( $\beta$ ) de la serie de intensidades máximas anuales para la duración de referencia ( $d$ ).

Los parámetros estadísticos  $\alpha_d$  y  $\mu_d$  pueden estimarse (Landwehr et al., 1979) como:

$$\alpha_d = (2M_d^{1,1,0} - M_d^{1,0,0}) / \ln 2 \quad (4.10)$$

$$\mu_d = M_d^{1,0,0} - 0.5772 \alpha_d \quad (4.11)$$

donde  $M_d^{1,0,0}$  y  $M_d^{1,1,0}$  son los PWM de orden 0 y 1 estimados de a partir de la serie de intensidades máximas anuales de duración d.

La metodología anterior fue aplicada a los registros de Catamarca Aero con el propósito de verificar su desempeño.

#### 4.1.3. Validación de la metodología escalamiento

Las curvas IDF (Figura 4.5) fueron estimadas ajustando distribuciones EV1 a las series de intensidades máximas anuales de la estación Catamarca Aero para distintas duraciones (1, 1.5, 2, 3, 4, 6 y 12 horas) y períodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

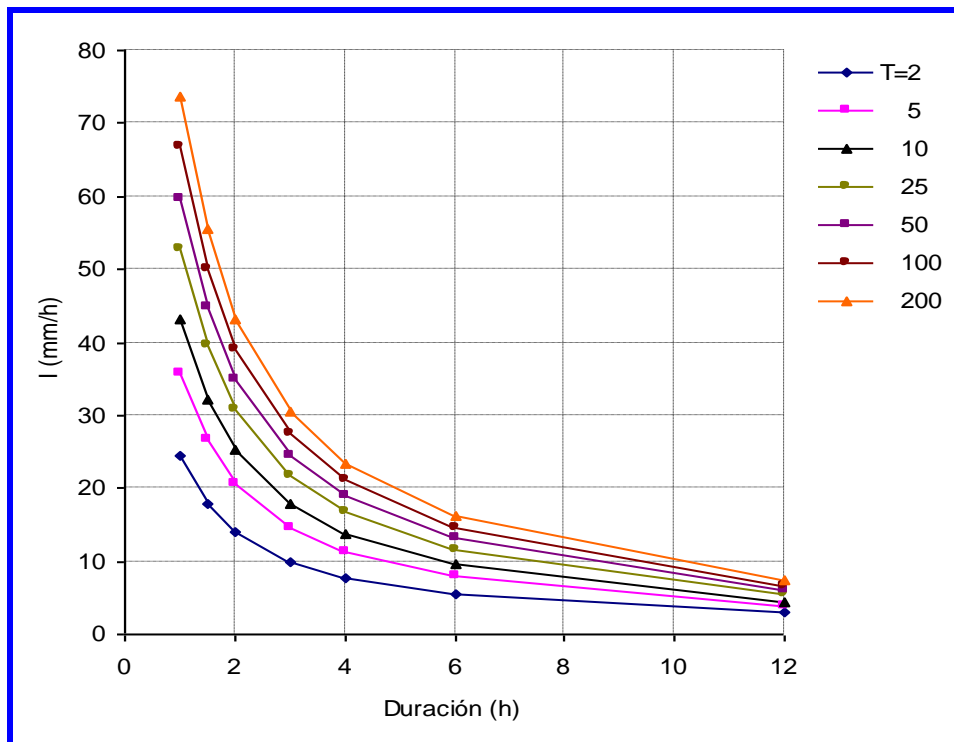


Figura 4-5 Curvas IDF estimadas con series de la estación Catamarca Aero

La metodología de escalamiento se aplicó para estimar las mismas relaciones a partir de la ecuación (4.9) utilizando la serie de intensidades correspondiente a totales diarios de precipitación máximas anuales observadas por el SMN, es decir para una duración de referencia de un día.

Como los datos pluviográficos de 24 horas no se encontraban disponibles, las relaciones para duraciones t (horas) y períodos de retorno T (años) fueron obtenidas

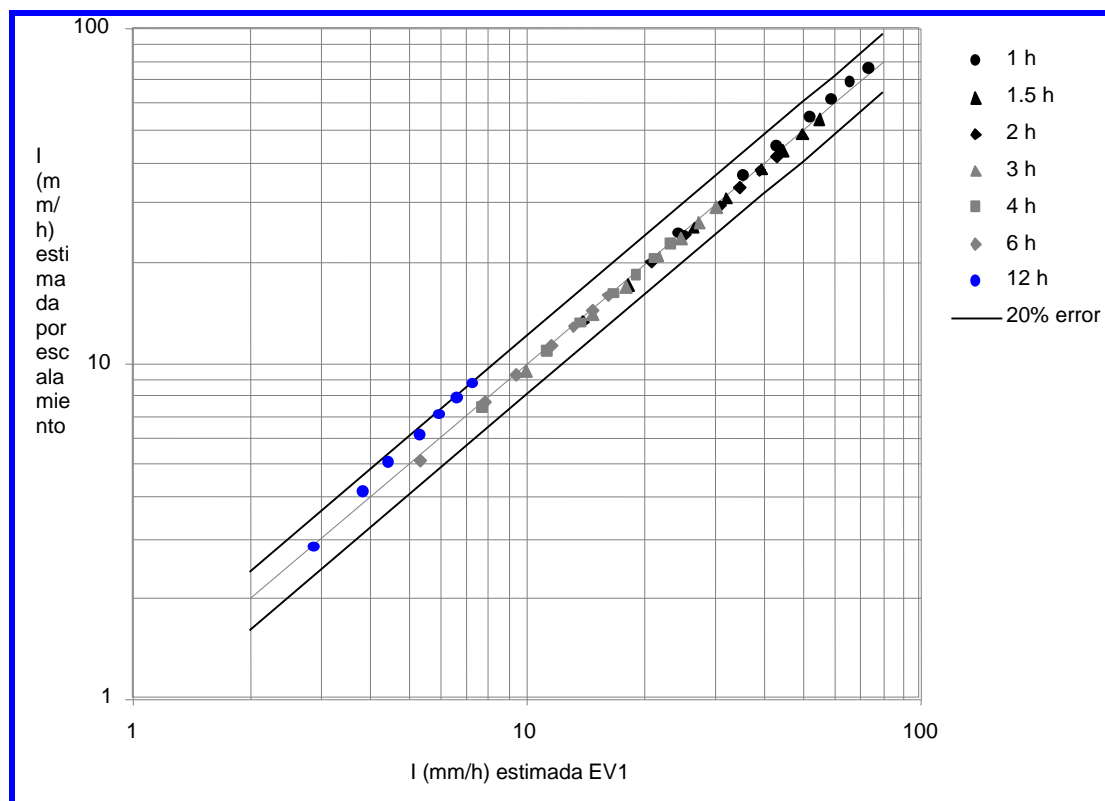
$$I_t^T = (\mu_{día} + \alpha_{día} \hat{y}) (t/24)^\beta \quad (4.12)$$

Los parámetros estadísticos estimados de la serie son:  $\alpha_{día} = 0.646$  y  $\mu_{día} = 1.288$  y el exponente de escalamiento  $\beta = -0.8731$  (sección 4.1.2).

Con el objeto de comparar el desempeño de la metodología de escalamiento las relaciones obtenidas

con la ecuación (3.12) fueron comparadas con las ajustadas a las observaciones. En la Figura 4.6 se presentan los resultados obtenidos.

La metodología de escalamiento produce estimaciones similares a las obtenidas en función de las observaciones, salvo para la duración 12 horas. Para esta duración se producen sobreestimaciones sistemáticas, siendo éstas más notorias para períodos de retorno superiores a 25 años, pero en todos los casos éstas caen dentro de la banda de 20% del error.



**Figura 4-6 Comparación de estimaciones IDF estación Catamarca Aero**

La Figura 4.6 demuestra que el desempeño de la metodología de escalamiento es adecuado para la estación Catamarca Aero y en consecuencia esta técnica puede ser empleada para obtener relaciones IDF, para las duraciones y períodos de retorno validados en regiones homogéneas, a partir de las series de datos pluviométricos.

#### 4.1.4. Estimación de las curvas IDF en la estación El Rodeo

Dado que la estación El Rodeo presentaba valores máximos diarios superiores a los registrados en Catamarca Aero y que no cuenta con registros pluviográficos, la estimación de las relaciones IDF en la zona bajo estudio se realizó utilizando la teoría de escalamiento temporal definida en la sección 4.1.2 considerando las siguientes hipótesis:

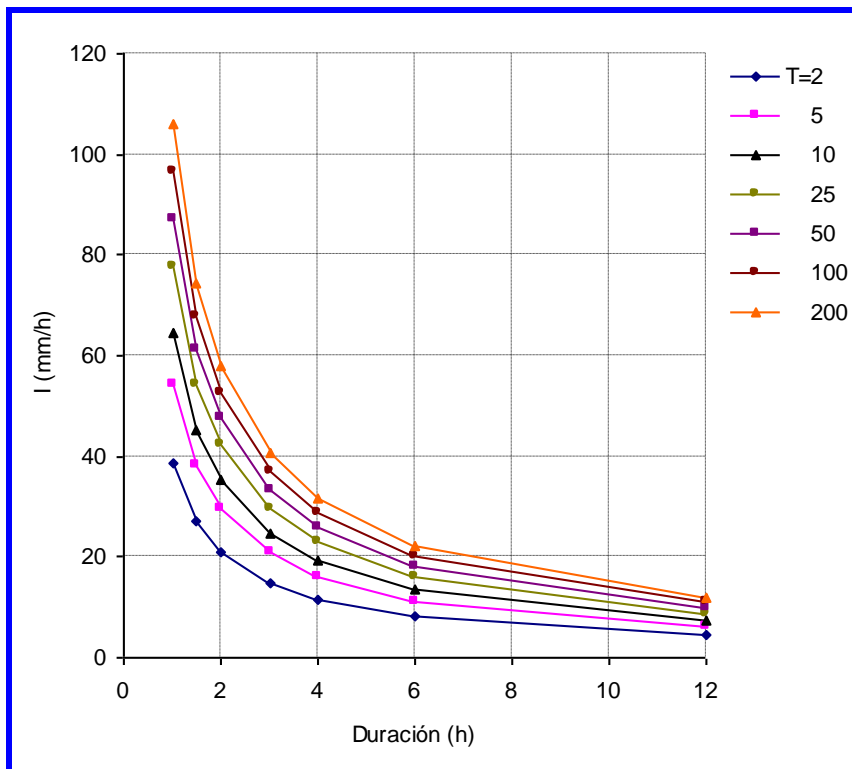
- La región bajo estudio es homogénea respecto a Catamarca Aero, es decir los exponentes de escalamiento son similares
- El exponente de escalamiento utilizado para la estación pluviométrica El Rodeo es igual al estimado para Catamarca Aero.



Los parámetros estadísticos de la ecuación (4.12) se estimaron con las series de intensidades diarias máximas anuales ( $\alpha_{\text{día}} = 0.853$  y  $\mu_{\text{día}} = 2.103$ ) y las relaciones IDF obtenidas se presentan en la Tabla 4.1 y se grafican en la Figura 4.7.

**Tabla 4-1 Valores de relaciones IDF en la estación El Rodeo (I en mm/h)**

Duración (h)	Período de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	200
1	38.7	54.2	64.5	77.5	87.1	96.6	106.2
1.5	27.2	38.1	45.3	54.4	61.1	67.8	74.5
2	21.1	29.6	35.2	42.3	47.5	52.8	58.0
3	14.8	20.8	24.7	29.7	33.4	37.0	40.7
4	11.5	16.2	19.2	23.1	26.0	28.8	31.6
6	8.1	11.3	13.5	16.2	18.2	20.2	22.2
12	4.4	6.2	7.4	8.8	9.9	11.0	12.1



**Figura 4-7 Curvas IDF estimadas por teoría de escalamiento en la estación El Rodeo**

Las relaciones IDF estimadas para la estación El Rodeo pueden ser ajustadas a la expresión típica:

$$I_{(mm/hr)} = \frac{A}{\left( \phi_{(min)} + B \right)^C} \quad (4.13)$$

Los parámetros A, B y C obtenidos se presentan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4-2 Valores de Parámetros de la Curva I-D-F**

T (años)	A	B	C
2	1462.000	1.500	0.882
5	2035.770	1.500	0.881
10	2403.010	1.500	0.879
25	2933.890	1.500	0.883
50	3288.670	1.500	0.882
100	3642.530	1.497	0.882
200	3999.900	1.500	0.882

## 4.2. Distribuciones espaciales y temporales

A efectos de generar las tormentas de diseño a aplicar en la modelación matemática hidrológica se utilizaron algunas pautas desarrolladas en el Estudio del Arroyo Fariñango (CFI-INCYTH, 1994).

El decaimiento espacial de las tormentas de diseño fue generado a través de la siguiente expresión obtenida del mencionado estudio:

$$pp = e^{-(0.0012-0.954 \cdot 10^{-4} \cdot D) \cdot A}$$

donde:

pp= precipitación relativa al núcleo correspondiente a una isohieta elíptica de área A (km<sup>2</sup>) de un evento de duración D (horas)

Así se obtuvieron  $pp_{3hrs} = 0.881$  y  $pp_{6hrs} = 0.916$  para el área total de la cuenca (139.1 km<sup>2</sup>). Tales valores de pp fueron multiplicados por las precipitaciones correspondientes a 3 y 6 hrs de duración extraídas de las curvas IDF (Tabla 3.1) resultando las precipitaciones totales medias que figuran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4-3 Precipitaciones totales medias sobre la cuenca total (139.1 km<sup>2</sup>)**

Duración (h)	TR (años)						
	2	5	10	25	50	100	200
	P (mm)						
3	39.1	55.0	65.3	78.5	88.2	97.8	107.5
6	44.5	62.1	74.2	89.1	100.1	111.1	122.1

La distribución temporal de esas precipitaciones totales en las duraciones especificadas se implementó a través de los hietogramas porcentuales del mencionado estudio que figuran en la Tabla 4.4.

**Tabla 4-4 Hietogramas Porcentuales según Estudio del Aº Fariñango (CFI-INCyTH, 1994)**

Duración 6 hrs		Duración 3 hrs	
Tiempo (min)	Precipitación (%)	Tiempo (min)	Precipitación (%)
0	0.0	0	0.0
15	1.5	15	4.0
30	1.7	30	5.7
45	1.9	45	11.5
60	2.3	60	30.0
75	2.9	75	14.5
90	4.0	90	8.3
105	8.2	105	6.3
120	30.0	120	5.1
135	10.3	135	4.3
150	6.0	150	3.8
165	4.5	165	3.4
180	3.6	180	3.1
195	3.1	Total=	100.0
210	2.7		
225	2.4		
240	2.2		
255	2.0		
270	1.8		
285	1.7		
300	1.6		
315	1.5		
330	1.4		
345	1.4		
360	1.3		
Total=	100.0		

## 5. DETERMINACION DE PARAMETROS MORFOMETRICOS DE CUENCAS

### 5.1. Caracterización de Suelos

En todo el valle y sierras de Las Juntas y El Rodeo, y en la ladera oriental del Ambato – Manchao se localizan depósitos loésicos, productos de una selección de materiales causada por vientos globales y arrojados sobre estas laderas. Se trata de un sedimento friable, de color castaño claro, con estratificación gruesa, y un espesor de aproximadamente 8 m. La roca principal es un limo arenoso compuesto por granos de cuarzo, plagioclasa ácida, vidrio, moscovita, biotita, piroxeno, entre otros (González Bonorino, 1974).

Los suelos pertenecen a la unidad cartográfica **Complejo de Humaya** formado por **Haplustol Lítico**, **Haplustol éntico** y **Haplustol típico** (Ogas, 1994). Se formaron a partir de depósitos eólicos de limo y

arenas finas. Son suelos profundos, con un buen contenido de humedad durante todo el año, de textura franco arenosa fina, muy ricos en materia orgánica (3%) y nitrógeno total 0,2–0,3 %, y de pH ácido (5) (Quiroga *et al.*, 2001c).

## 5.2. Caracterización de la Vegetación

El análisis y descripción de la vegetación de la zona de estudio, se basó desde el punto de vista fitogeográfico en los trabajos de Cabrera (1976), Morello (1958), y Morlans (1995).

En cuanto a la representación cartográfica de las Provincias Fitogeográficas y Comunidades Vegetales, esta se basó en los trabajos de Cabrera (1976), y la cartografía elaborada por Morlans (1995).

La vegetación predominante en la zona de influencia del estudio, corresponde a la provincia fitogeográfica Chaqueña, distrito **Chaco Serrano** (Cabrera, 1994; Morlans, 1995). En estas latitudes se encuentran bien desarrollados los bosques de *Schinopsis haenckeana* y los pastizales de *Stipa* y *Festuca*.

En las quebradas más húmedas y frías se pueden observar los bosques de *Podocarpus parlatorei* pertenecientes al distrito de **Los Bosques Montanos** de la provincia fitogeográfica de las **Yungas** (Morlans, 1995) y las zonas de lomadas, con altitudes superiores a los 3000 m s.n.m se desarrolla el pastizal perteneciente al distrito de las **Praderas Montanas** de las Yungas.

La eco-región tiene una vegetación de tipo selvática que se desarrolla en faldeos de montañas, valles y quebradas, y áreas de pedemonte, bajo un clima cálido y húmedo. De acuerdo a la vegetación dominante, en Catamarca se distinguen tres sub eco-regiones: Selva de Montaña, Selva de Transición y Pastizales de Neblina.

### 5.2.1. Provincia Fitogeográfica de Las Yungas

Esta Provincia, junto con la Provincia Paranaense (ubicada en el NE de Argentina) integra el Dominio Amazónico, Región Neotropical, el cual cubre gran parte de América Central y del Sur. Además de las mencionadas, el Dominio comprende otras siete Provincias, que no están representadas en el país (Cabrera y Willink, 1973).

El reconocimiento de Distritos resulta difícil por ser la porción de las Yungas que penetra en Catamarca la manifestación más austral de esta Formación Fitogeográfica; por tal razón, está considerablemente empobrecida y, especialmente en los niveles altitudinales superiores, pierde continuidad, interdigitándose profusamente con la Provincia Chaqueña (Distrito Serrano) y, en menor medida, con manifestaciones Prepuneñas o Puneñas. (Morlans, 1995)

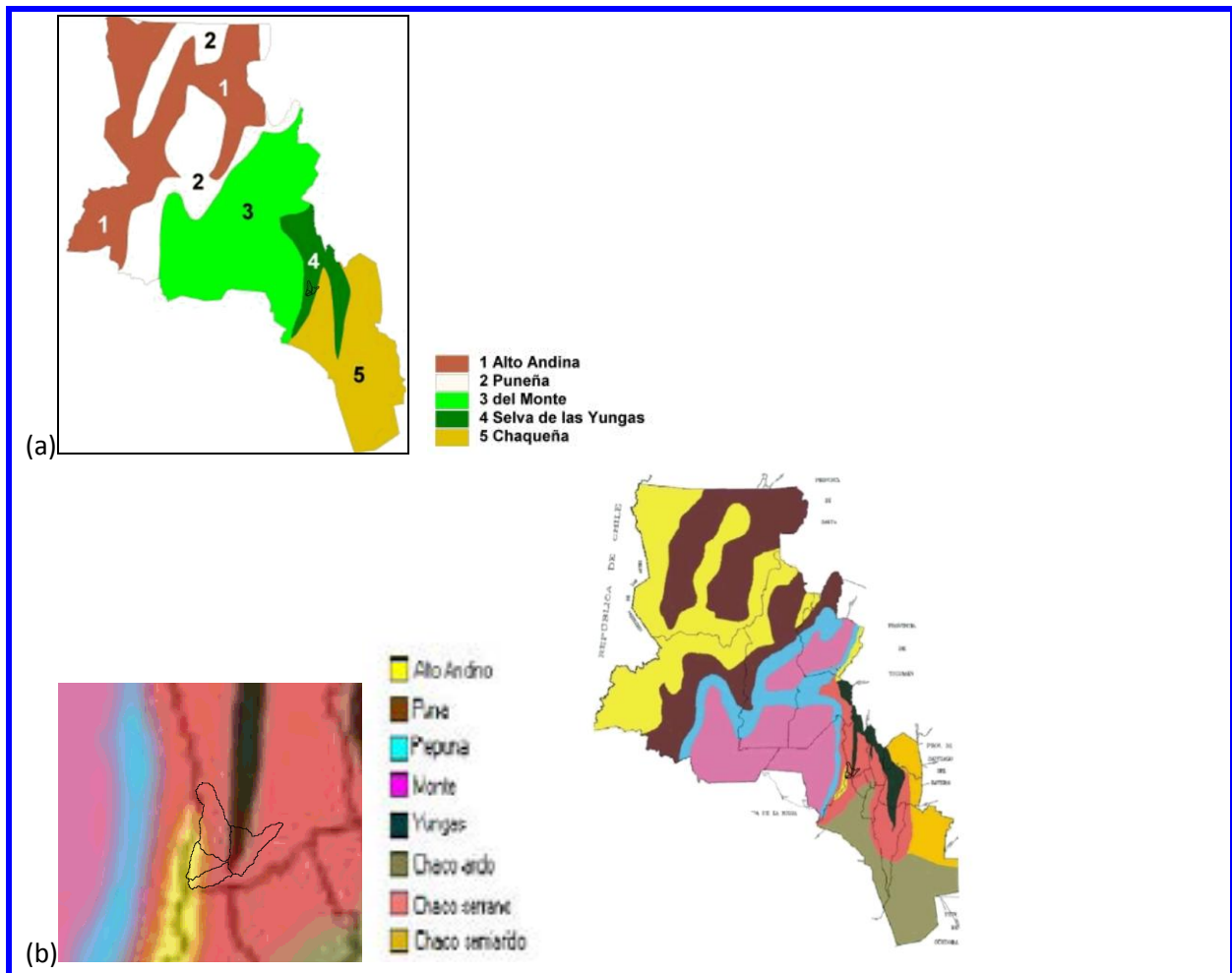


Figura 5-1 Provincias Fitogeográficas (a): Cabrera, 1976; (b): Morlans, 1995

No obstante, tomando los criterios de Cabrera (1976), podría considerarse que, en Catamarca, hay por lo menos dos distritos representados: el Distrito de las Selvas Montanas y el Distrito de los Bosques Montanos. De ambos, el distrito presente en el área de estudio es el Bosque Montano. (ver Figuras 5.2 a 5.6)

#### **- Distrito de los Bosques Montanos**

Puede observarse en las quebradas que desde las sierras circundantes bajan hacia el Valle del Suncho, así como en las quebradas de la falda oriental de la Sa. de Humaya (al norte de los Altos de Singuil) y en las quebradas y vallecitos estrechos de la Cumbre de Narvéez, Silleta de Las Higueras y Cumbres de Balcozna.

En todos los casos el elemento arbóreo predominante es el Aliso (*Alnus acuminatus*), Betulácea de 6 a 10 m de altura y follaje caduco.

Por lo general los faldeos (excepto en las áreas en que se instala la Selva Montana) y cumbres de las sierras mencionadas están cubiertas por una vegetación graminosa continua cuya composición florística no ha sido analizada y por lo tanto surgen dudas respecto a si deben adjudicarse a las Praderas Montanas (del Distrito de los Bosques Montanos, Provincia de Las Yungas) o a los pastizales de *Stipa* y *Festuca* del Distrito Chaqueño Serrano, Provincia Chaqueña.

Lo más probable es que se trate de una zona de transición entre ambas comunidades, con predominio de los géneros *Stipa*, *Festuca* y *Deyeuxia*, comunes a las dos.

Ocupando el sector alto de las Yungas entre los 1400 y 2200 m. s. n. m., no suele formar un piso continuo sobre la selva montana, sino que puede formar bloques aislados rodeados de prados montanos o pastizales de neblinas. Es un bosque que puede ser caducifolio, compuesto por un único estrato arbóreo, donde siempre existe una especie dominante, *agnus acuminata* (aliso-caducifolio) o *Podocarpus parlatoresi* (Pino del cerro- peremnifolio) (Figura 5.2), formando bosques puros, dominando el *podocarpus* en la zona baja de la cuenca de estudio, en quebradas y faldeos con exposición sur y este, principalmente. Se trata de un área disyunta, es decir, sin continuidad con formaciones similares que se desarrollan a menores altitudes.



**Figura 5-2 Pino del Cerro (*Podocarpus parlatoresi*)**

Fuente: <http://www.geolocation.ws/v/W/4d5664361d41c86ece03d5bd/a-specimen-of-podocarpus-parlatoresi-at/en> (visto en Nov. 2011)



**Figura 5-3 Bosque Montano de las Yungas**

Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/44764514.jpg> (visto en Nov. 2011)



**Figura 5-4 Bosque Montano de las Yungas**

Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/39019078.jpg> (visto en Nov. 2011)



**Figura 5-5 Bosque Montano de las Yungas en Puesto del Río (Ambato)**

Fuente: <http://www.panoramio.com/photo/32385180> (visto en Nov. 2011)



**Figura 5-6 Bosque Montano de las Yungas en Puesto del Mascareño (Ambato)**

Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/2535982.jpg> (visto en Nov. 2011)

### **- Cobertura vegetal por estratos**

-Estrato arbóreo: en ningún caso la cobertura de follaje del estrato arbóreo supera el 20 %, situándose en general alrededor del 15 %

-Estrato arbustivo: muy bien desarrollado, presenta una cobertura siempre superior al 65 %, llegando hasta un 80 %.

-Estrato herbáceo: varía dentro de un rango muy amplio, desde un mínimo de 4 % a un máximo del 40 %.

Debido a la presencia de estrato muscinal (entre 15 y 40%) la proporción de suelo descubierto no sobrepasa el 10 % (con un 15 a 20 % de suelo "expuesto")

### **5.2.2. Chaco Serrano**

Se ubica en las laderas orientales de las sierras pampeanas. El sector serrano de la ecoregión Chaqueña, comprende sectores de sistemas montañosos de las sierras de Capillitas, (Andalgalá), Sierra de Ambato (Ambato), Sierras de Balcozna, (Ambato y Paclín), Sierras de los Ángeles (Capayán), Sierra de Ancasti (Ancasti y el Alto) y otras; ocupando las laderas bajas de cerros y quebradas, formando un complicado engranaje y un amplio ecotono con las Provincias de las Yungas y el Monte.

La vegetación dominante es el **bosque xerófilo**, alternando con estepas de **gramíneas duras**. Las comunidades principales son la de los bosques de Horco-quebracho (*Schinopsis haenkeana*), los bosques de tabaquillo y los pastizales de *Stipa* y *Festuca* (Cabrera, 1976). Altitudinalmente llega hasta los 1.800 m s.n.m.

Entre los arbustos sobresalen *Eupatorium buniifolium*, *Condalia microphylla* (Figura 5.7), varias especies de *Flourensia* y de *Lycium*.

Según Morlans (1995) los pastizales de altura en Catamarca se encuentran sobre los 1800 - 2000 m s.n.m. La vegetación consiste en una asociación de gramíneas entre las que se destacan *Stipa tenuissima*, *Stipa ichu*, *Festuca hieronymii*, y en menor proporción, *Bromus unioloides*, *Eragrostis lugens*, *Piptochaetium montevidense*, *Botriochloa spp.*, *Melica spp.*, *Digitaria spp.* y dicotiledóneas herbáceas de los géneros *Rumex*, *Plantago*, *Zinnina spp.*, y *Alchemilla spp.*



**Figura 5-7 Arbusto espinoso del Chaco Serrano (*condalia microphylla*)**

Fuente: [http://www.floraargentina.edu.ar/Imagenes/Condalia%20microphylla-Pensiero-7199%20\(3\).jpg](http://www.floraargentina.edu.ar/Imagenes/Condalia%20microphylla-Pensiero-7199%20(3).jpg)  
(visto en Nov.2011) en: "Catálogo de las Plantas Vasculares del Conosur



Fisonómicamente, su vegetación puede describirse como comunidades de arbustos altos (3,5 a 5 m), predominantemente espinosos y densos, caducifolios, siendo *Mimozgyanthus carinatus*, *Prosopis torquata* y *Acacia furcatispina* (garabato macho o uña de gato, ver Figura 5.8) las especies más características. Entre éstas emergen las copas dispersas de Quebracho Blanco y en menor cantidad Algarrobos, o bien forman angostas galerías junto al cauce de ríos semipermanentes o permanentes, especies arbóreas provenientes del Chaco Serrano

Por sobre los 2000 m s.n.m. hay una tendencia progresiva de aumento de zonas improductivas, por aumento de los afloramientos rocosos. Pasando los 3.500 m s.n.m., la vegetación se torna muy rala y aparecen especies propias del Dominio Altoandino (Morlans, 1995).



**Figura 5-8 Garabato macho (*Acacia furcatispina*)**

Fuente:[http://4.bp.blogspot.com/\\_blQA2NlaONk/SxAHc47mNII/AAAAAAAAAFd0/sPsD4uR12yc/s320/nuevas4+049.jpg](http://4.bp.blogspot.com/_blQA2NlaONk/SxAHc47mNII/AAAAAAAAAFd0/sPsD4uR12yc/s320/nuevas4+049.jpg)  
(visto en Nov.2011)

### 5.2.3. Provincia Altoandina

Morlans (1995) indica que la Provincia Altoandina en Catamarca aparece a partir de los 3600-3700 m s.n.m., las especies más características son *Stipa frigida* y *Festuca orthophylla*, también se encuentran *Stipa crhysophylla* y *Festuca crhysophylla*.

Las comunidades son en general abiertas, tanto cuanto mayor es la exposición del viento y/o el frío.

Todas las gramíneas presentan una coloración que semejan pastos secos, debido a la gruesa cutícula que las recubre. Al resguardo de estas crecen pequeñas fanerógamas. Ocurren además abundantes caméfitos y geófitos en relación al clima frío de altura. (Figura 5.9)



**Figura 5-9 Vegetación en cercanías al Cerro Manchao**

Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/2517253.jpg> /  
<http://static.panoramio.com/photos/original/18649290.jpg> (visto en Nov. 2011)

#### **- Pastizales de Neblina**

Estos pastizales se ubican en las cumbres y sectores más altos de las laderas de las sierras de El Alto-Ancasti y Ambato-Manchao.

Se trata de pastizales cespitosos donde se presentan como dominantes *Stipa ichu* (paja blanca) y *Festuca hieronymi* var. *hieronymi* (paja colorada), en manchones discontinuos en una matriz de césped de escasa altura, con una abundante cantidad de especies gramíneas y latifoliadas de porte rastroso. Además, entre las rocas, cubiertas de líquenes, se encuentran pequeñas cactáceas, helechos, y con menos frecuencia chaguales.

### **5.3. Caracterización Geomorfológica y Geológica**

Desde el punto de vista Geológico, el Valle de Ambato, se encuentra en la provincia Geológica de las Sierras Pampeanas Noroccidentales. Dicha provincia geológica ocupa el centro y sur del territorio catamarqueño y se caracteriza por poseer estrechos valles y bolsones, alternando con bloques o cordones elevados.

Geológicamente las Sierras Pampeanas están compuestas por un basamento Precámbrico de metamorfitas y granitos como elementos principales, con depósitos Terciarios y Cuaternarios, que se conservan mayormente en valles y bolsones y en las áreas proximales de los pie de monte, respectivamente.

El Valle de Catamarca es una extensa depresión tectónica delimitada al oeste por la Sierra de Ambato-Manchao y al este por la Sierra de El Alto-Ancasti. Su límite norte está dado por las últimas estribaciones de la Sierra de Fariñango y Sierra de Gracián, las que descienden hasta hundirse en el

relleno Cuartario, un poco al norte y al este de la ciudad capital. Hacia el sur, el valle de Catamarca se continúa con los llanos de La Rioja.

Este “valle” en realidad no es tal desde un punto de vista geomorfológico, ya que su origen no es fluvial sino que se trata de una depresión tectónica. En su parte septentrional, el valle es recorrido por el curso inferior del río del Valle, del cual el Río Ambato es afluente. Al respecto, cabe señalar que antiguamente, cuando las aguas del río del Valle no eran utilizadas para el riego ni existía el dique regulador de Pirquitas, las crecientes del río solían llegar bastante más al sur que donde se insumen actualmente (Punta del Río), alcanzando a veces la Ruta Nacional 60, límite con la Provincia de La Rioja. (Morlans, 1993)

El relieve es marcadamente accidentado, de laderas y quebradas con inclinación y pendientes variadas.

### **5.3.1. Red hidrográfica**

La red de avenamiento de la Sierra de Ambato en su faldeo oriental, es de textura gruesa, contando con pocos cursos en valles angostos y profundos. Los lineamientos principales siguen la dirección NNW-SSE. Son pocos cursos pero bien desarrollados, siendo reducida la densidad de avenamiento.

Las cumbres, de rocas graníticas, están poco disectadas por cursos de agua ya que la pendiente es menor, y de poca extensión. El encajonamiento que presentan los cursos están asociados a varios factores: altitud, fuerte pendiente, condiciones climáticas y escasa vegetación. De esas características, la pendiente y la poca permeabilidad de las rocas derivan el alcance del caudal, la velocidad del avenamiento y el gran volumen de material de arrastre que consta de bloques rodados que pueden alcanzar notable tamaño. (Pasotti, Canoba y Albert, 1973)

Al acercarse al valle longitudinal se vuelven más nutrida la red de drenaje, y antes de penetrar en el cajón que corta transversalmente la Sierra de Fariñango, por la pérdida súbita de pendiente, deposita el material de arrastre, que es el que niveló en buena medida el fondo y permitió el asentamiento humano en El Rodeo. Al salir del cajón, en la localidad de La Puerta, el caudal sólido es notablemente de menor alcance. (Pasotti et al, op. cit)

La ladera occidental del mencionado cordón desciende en forma abrupta hacia el Bolsón de Pomán, formando conos de deyección; y va decreciendo en altura hacia el Sur en forma de lomadas bajas hasta desaparecer en los límites de la provincia de La Rioja, bajo una cubierta de sedimentos de superficie árida.

## **5.4. Estimación de parámetros morfométricos**

### **5.4.1. Modelo Digital de Elevaciones**

Tal como se explicó en 3.2.5.1, un modelo digital de elevaciones (MDE) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. [Felicísimo, 1994]

El modelo digital de elevaciones confeccionado es el mostrado en la Figura 5.10, el cual tiene una resolución espacial de 25 m (resampleado).

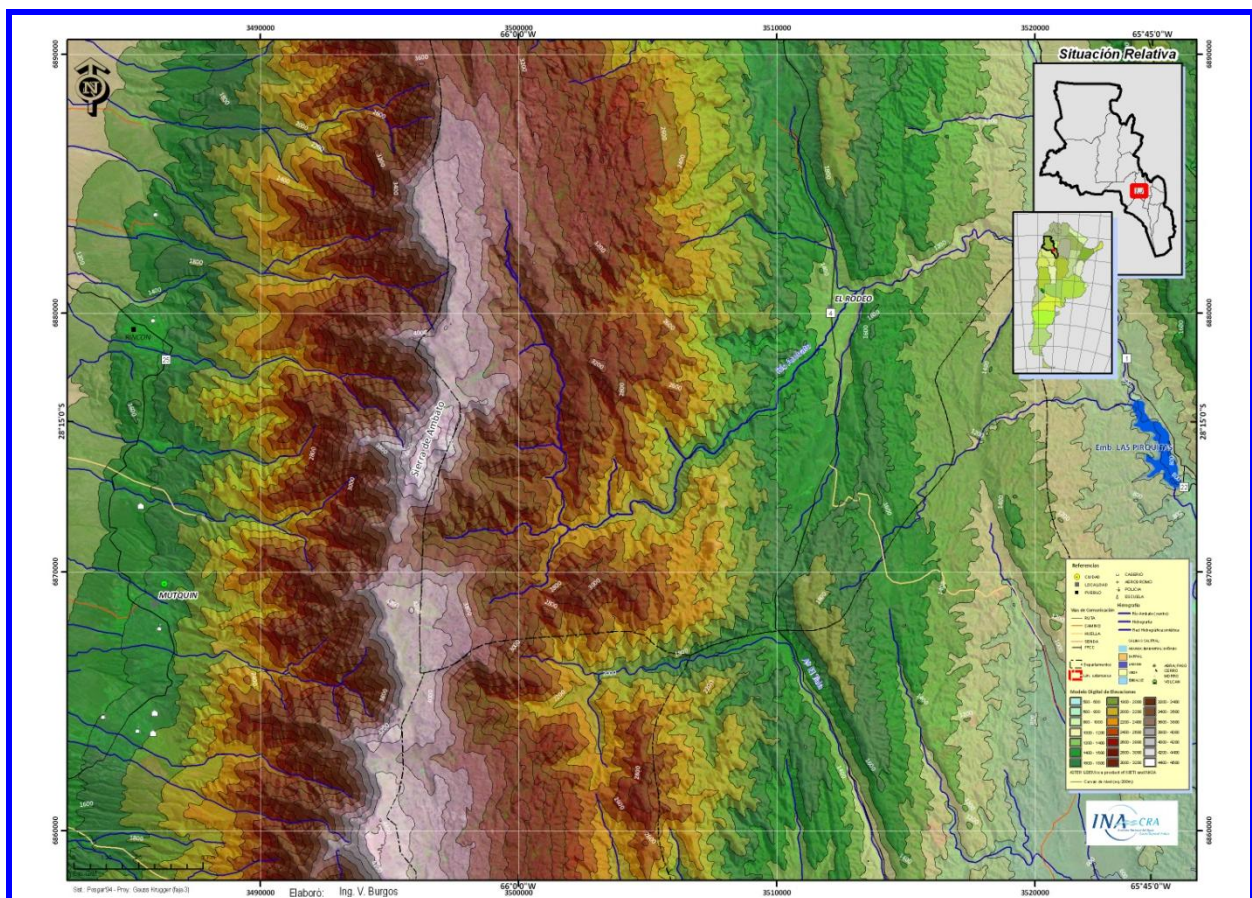


Figura 5-10 Modelo Digital de Elevaciones

#### 5.4.2. Delimitación de cuencas

La representación de la variabilidad espacial del medio físico en modelos hidrológicos se apoya actualmente en el uso de herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), facilitando la generación de modelos y simulación de escenarios. (Burgos, 2005)

Para la modelación hidrológica del Río Ambato, se ha efectuado el análisis de cuencas, con la interfase geoespacial HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling System Extension).

Las características topográficas determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El MDE contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y de la cuenca hidrográfica de aporte. Por lo tanto, a partir del MDE se generaron distintos mapas derivados por medio del geoprocésamiento y análisis espacial, con el objetivo de determinar las cuencas de aporte al área de estudio y cuantificar los parámetros morfométricos necesarios.

La orientación de laderas, en un punto, puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto (pixel). Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir del MDE.

El algoritmo utilizado para la confección del mapa de dirección de flujo fue el denominado D8, cuyas orientaciones están categorizadas en 8 clases (E, NE, N, NW, W, SW, S, SE) codificadas con números potencias de 2, según GeoHMS (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128)

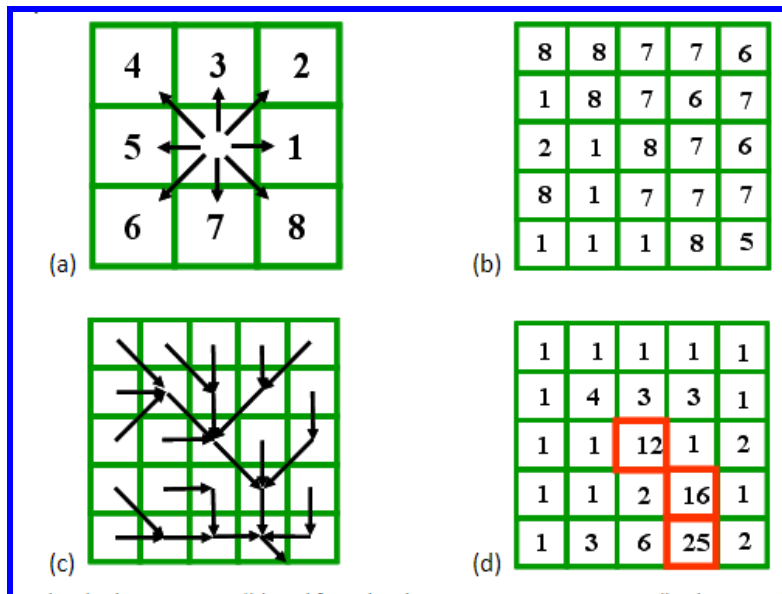


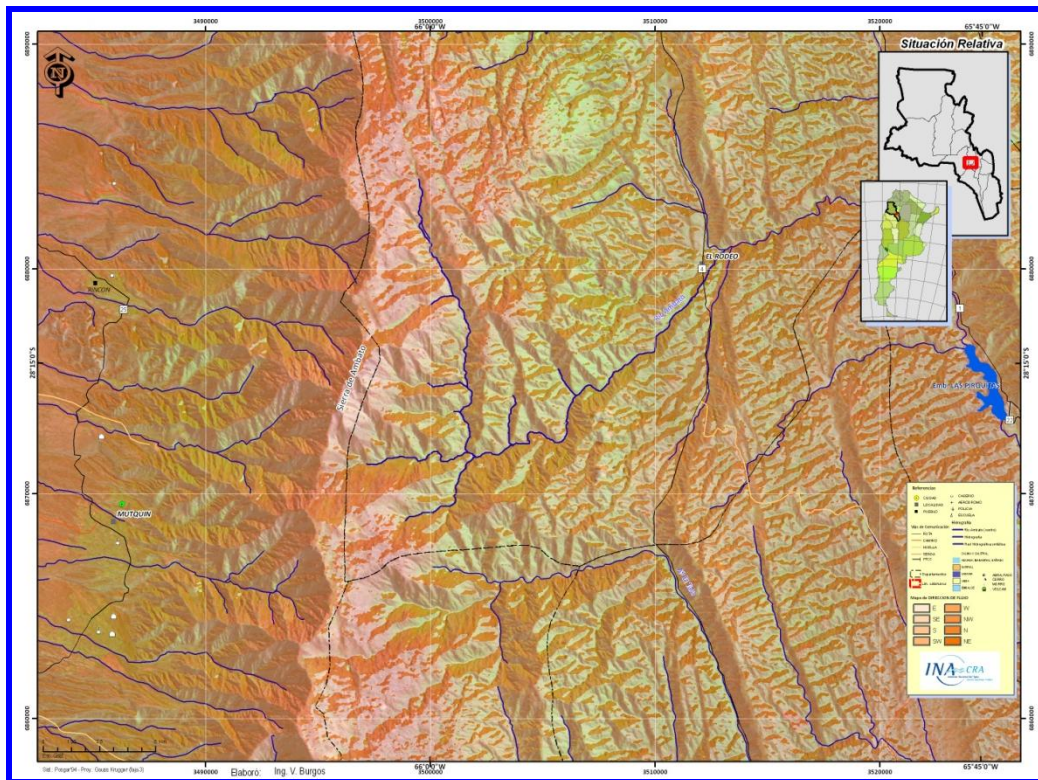
Figura 5-11 (a): Codificación de direcciones , (b) Codificación de orientaciones en una grilla de 5x5 celdas ; (c) Red de flujo ; (d) Grilla de acumulación de flujo

El método para obtener la red de flujo consiste en asignar a cada celda el valor del código de orientación (como se indica en la Figura 5.11b), esto se realiza mediante un motor de análisis de 9 celdas (3 x 3) que se va desplazando a lo largo de toda la grilla del modelo de elevaciones, calculando para cada valor central el gradiente o pendiente del mismo respecto a las 8 celdas circunvecinas, asignando el código según al máximo gradiente. (Burgos, 2005)

El paso siguiente para la obtención de la red de drenaje consiste en contar la cantidad de celdas que convergen a la celda de análisis (como se indica en la Figura 5.11c y 5.11d). En la grilla resultante si se elige un umbral mínimo, es decir una cantidad mínima de celdas drenantes que hagan que la celda pertenezca a un cauce o no, se obtendría la red hidrográfica (en el ejemplo de la Figura 5.11d podría ser de 10 celdas y el cauce quedaría definido por las marcas en rojo).

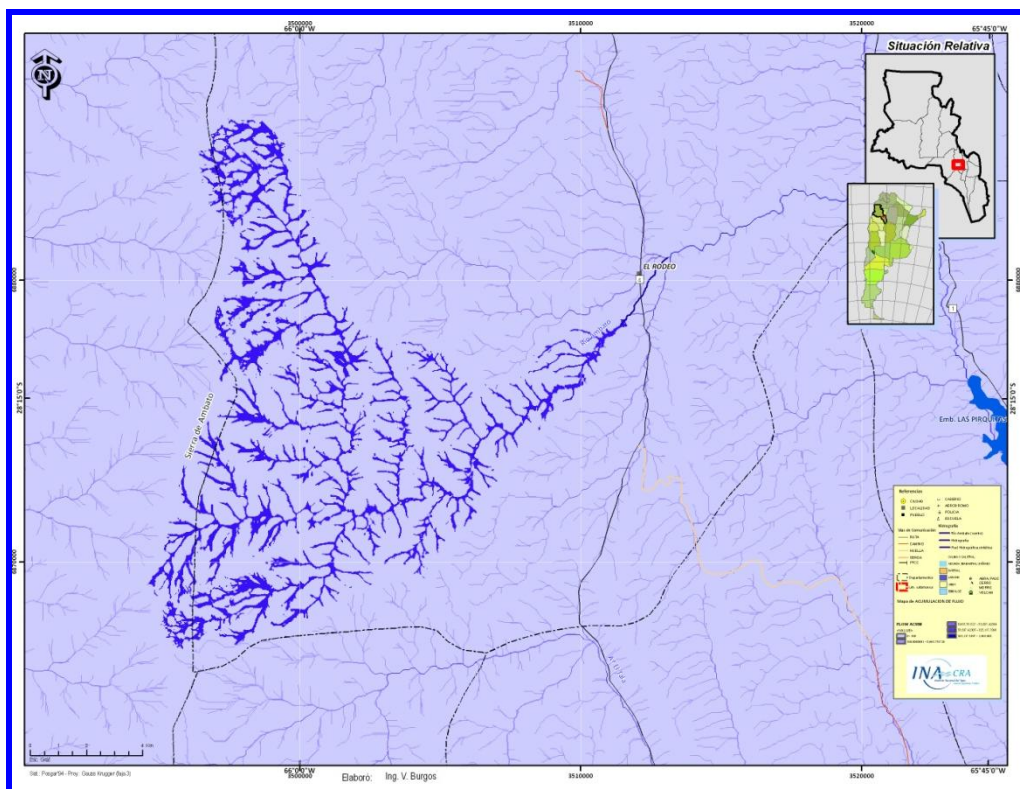
Procesando el modelo de elevaciones se obtuvo el mapa general de direcciones de flujo asignando a cada codificación de orientación un color (en este caso de verdes en degradado) como se muestra en la Figura 5.12.

Siguiendo la metodología, se generó el mapa de acumulación de aporte, que representa en un punto determinado, la cantidad de píxeles que drenan a él, y por medio de este se identifica la red de drenaje.



**Figura 5-12 Mapa de dirección de flujo cuencas El Rodeo**

La hidrografía se determina al establecer un umbral mínimo de acumulación de aporte hídrico para que sea considerado cauce torrencial, río o sólo ladera. En la Figura 5.13 se observa el mapa de acumulación de flujo y la red hidrográfica generada.



**Figura 5-13 Mapa de acumulación de flujo**

La delimitación de la cuenca general de El Rodeo, se obtuvo considerando como punto de desagüe, al primer perfil transversal del Río Ambato, relevado topográficamente para el análisis hidráulico.

Las coordenadas del punto de cierre son:

**Tabla 5-1 Coordenadas de cierre de cuenca**

Cuenca	Coord. X (Este)	Coord. Y (Norte)
El Rodeo	3511575	6878625

(Sistema: Posgar 94, Proyección: Gauss Krüger, faja 3)

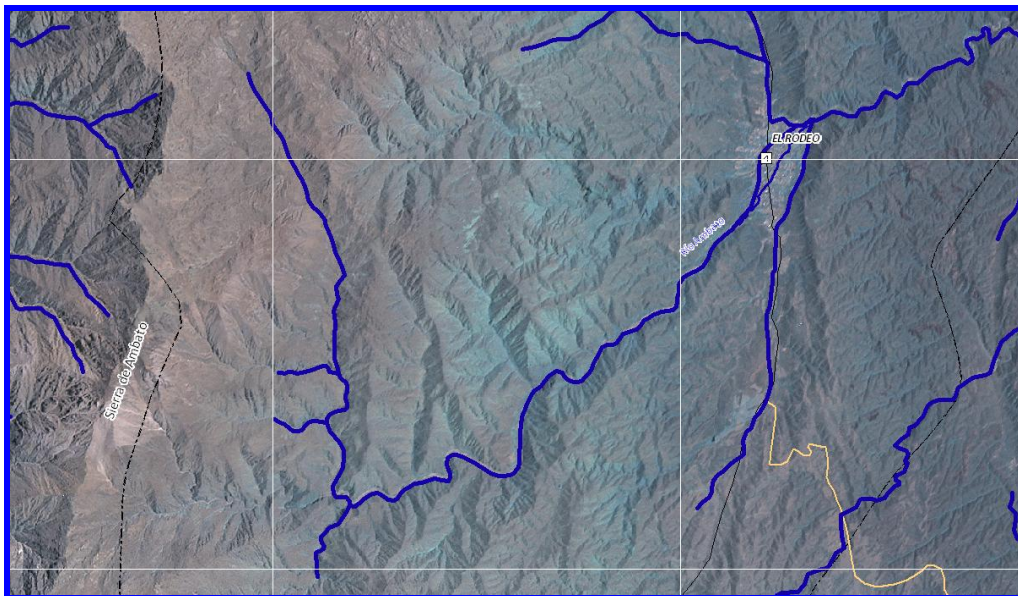
### 5.4.3. Validación Hidrológica del MDE

Un requerimiento tal vez más importante que el ajuste de las elevaciones, es la adecuación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a una red hidrográfica vectorizada válida. Para este caso se empleó uno de los niveles de información disponibles en los antecedentes cartográficos.

Se eligió como base hidrográfica el perteneciente al SIG250, debido a que las otras fuentes presentaban diferencias locales en algunas zonas. Se corroboró con las imágenes satelitales qué fuente de datos se ajustaba más a la red hídrica, para finalmente comprobar luego del procesamiento morfométrico, el ajuste necesario.

No hubo necesidad de modificar el MDE con algún método de adecuación a una red hidrográfica impuesta, debido que el ajuste normal representa fehacientemente los cauces a modelar.

Para la verificación del análisis se utilizó un mosaico de imágenes Landsat de resolución espacial de 10 m, con la cual se pudo corroborar el ajuste de la hidrografía digital sintética y de la delimitación de la cuenca de aporte.



**Figura 5-14 Validación visual de la red hidrográfica sintética**

Se logró un muy buen ajuste de la red hidrográfica generada por procesos dentro del SIG y la red

hidrográfica distinguible en la imagen satelital, como se observa en Figura 5.14.

#### 5.4.4. Descripción de la Cuenca

La **cuenca hidrográfica El Rodeo**, cubre un área total de **139.3 Km<sup>2</sup>**, y está localizada aproximadamente entre los 65° 53' y 66° 03' de longitud oeste y entre los 28° 09' y 28° 20' de latitud sur. Se ubica casi totalmente en el departamento de Ambato, abarcando un 7.9% de su extensión y representa un 0.14% de la superficie de Catamarca. (ver Figura 5.15)

El cauce principal lo conforma el Río Ambato que nace en el Cº Manchao, y tiene como afluentes el río Los Nogales y los arroyos: Nevado, Picaso, Manchao, Angostura, Higuierita y Algarrobal, uniéndose en la localidad de El Rodeo.

Las aguas de este río son utilizadas para el regadío de hectáreas y servicio de agua potable. Es una subcuenca del río Del Valle.

Etimológicamente Ambato proviene del *kakán* y del quechua *An-Huatu* que significa "Hechicero del Alto", porque justamente el punto más alto del cordón montañoso del Ambato se llama "Manchao", que significa *Manch*: miedo, *Ao*: lugar: "Lugar del Miedo", ya que es "Lugar de mucho viento y espanta con sus ruidos".

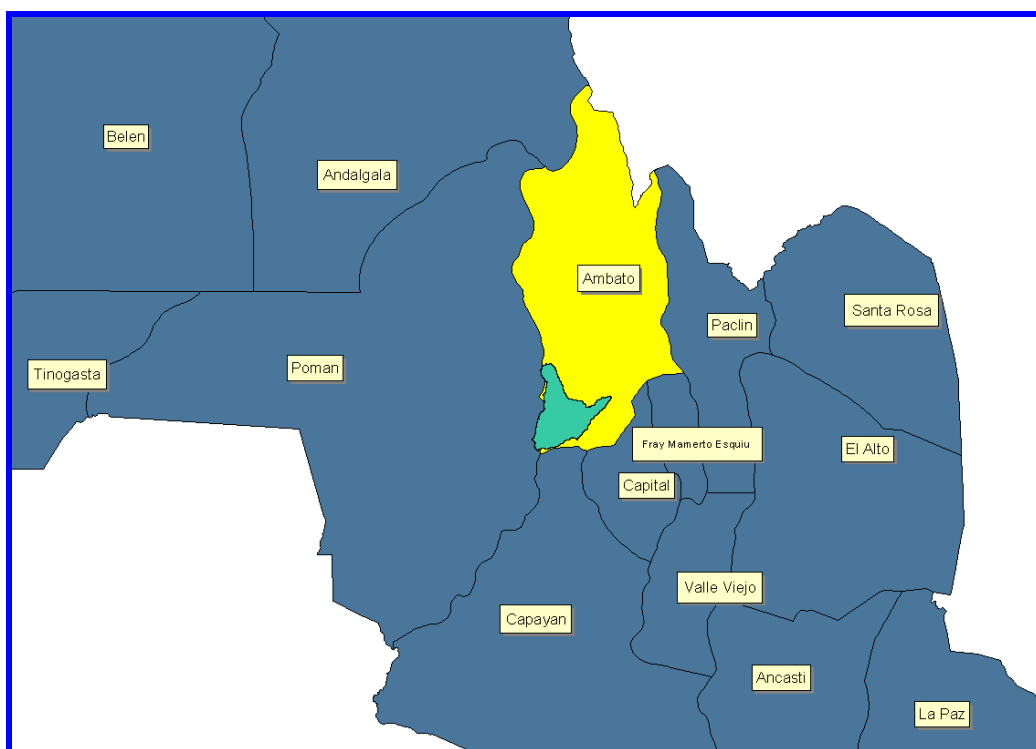


Figura 5-15 Ubicación relativa de la cuenca respecto a departamentos Catamarqueños

Al oeste la cuenca limita con la Sierra de Ambato, con una cota máxima de 4575 m s.n.m, del Cº El Manchao. Esta sierra que pertenece a las Sierras Pampeanas está orientada con dirección noroeste. Al norte el límite se ubica por la divisoria de aguas del Cº El Alto, con alturas del orden de los 4160 m s.n.m. Al sur la cuenca limita con la perteneciente al río El Tala y el límite oriental es en la entrada a la localidad de El Rodeo, a cota 1394 m s.n.m, cerrando la cuenca en el primer perfil topográfico realizado para este análisis del riesgo aluvional sobre el río homónimo.



La cuenca está compuesta por 4 subcuencas de forma elongada que desembocan en el Río Ambato, tal como se muestra en la Figura 5.16.

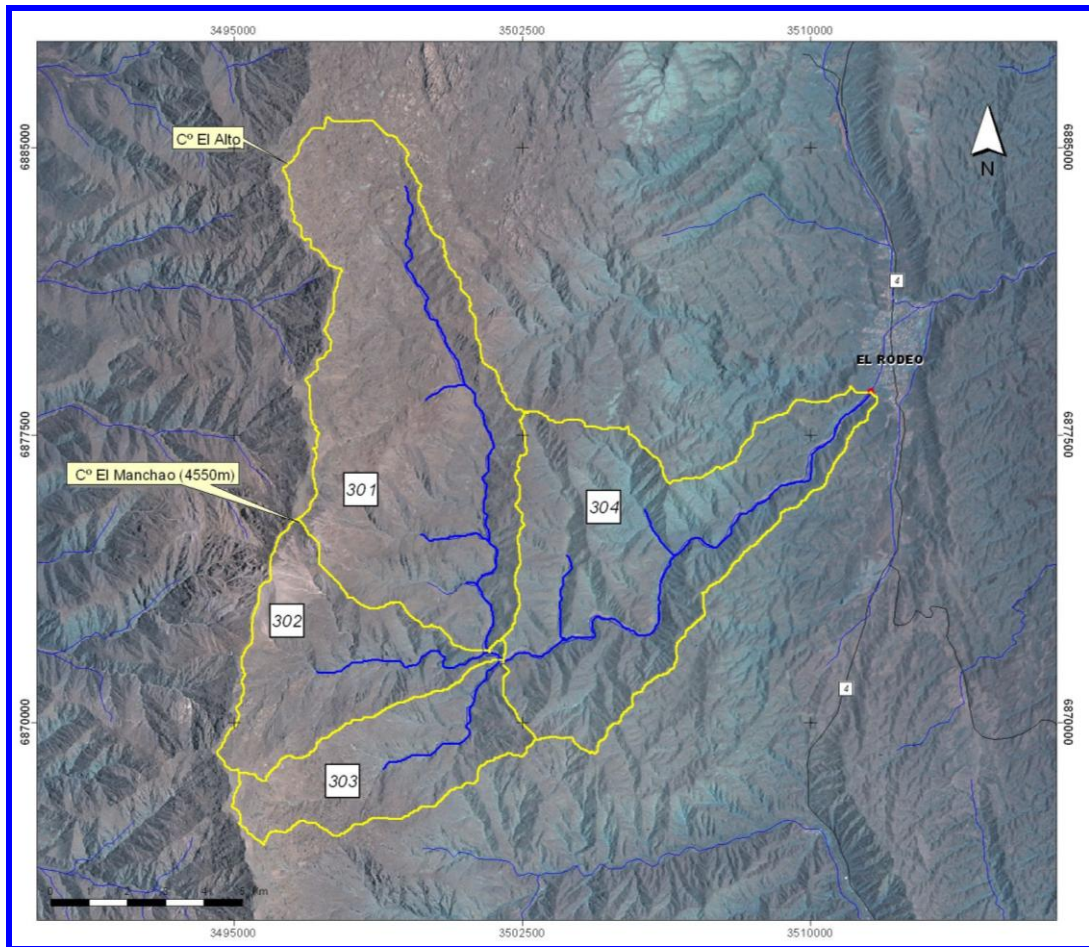


Figura 5-16 Mapa de subcuencas

#### 5.4.5. Parámetros morfométricos

Se realizó la división en cuencas hidrográficas y se aplicaron y compararon un total de **seis índices hidrológicos** y **nueve parámetros morfométricos**.

Los índices fueron los siguientes:

- índice de compacidad,
- factor de forma,
- coef. de forma
- radio de elongación
- relación de circularidad
- rectángulo equivalente

Los parámetros morfométricos fueron:

- área
- perímetro
- cotas máximas y mínimas (desnivel altitudinal)

- longitud del cauce más largo
- pendiente media del cauce principal
- elevación media hipsométrica
- el orden de corrientes por cuenca
- la densidad de drenaje
- frecuencia de cauces de orden 1

Otros parámetros y elementos fueron obtenidos como paso previo a la obtención de los ya mencionados pero que no son analizados debido a que están contenidos en los anteriores: red de drenaje, curvas de nivel, divisorias de aguas, ancho y largo de la cuenca.

En la Tabla 5.2 se consignan las características morfométricas principales de las subcuencas, y en la Tabla 5.3, algunos índices morfométricos.

**Tabla 5-2 Características morfométricas de las subcuencas de El Rodeo, Catamarca**

Sub Cuenca	Nombre	Área	Perím.	Cota máx.	Cota mín.	ΔH	Cauce más largo	Pend.
Nro.		km <sup>2</sup>	km	m	m	m	km	%
301	El Alto	55.81	36.4	4145.0	2286.4	1858.6	18.86	9.85
302	Manchao	21.32	23.4	4217.0	2250.5	1966.5	10.16	19.35
303	Pabellón	17.69	21.2	4199.0	2250.5	1948.5	9.88	19.73
304	Ambato	44.48	35.0	3247.0	1394.2	1852.8	20.40	9.08
Area Total:		<b>139.31</b>						

**Tabla 5-3 Índices morfométricos de las subcuencas de El Rodeo, Catamarca**

Sub cuenca	Área Km <sup>2</sup>	Perim Km	Kc	Rf	Kf	Re	Rci	L1	L2
301	55.81	36.4	1.37	0.16	0.27	0.45	0.53	3.86	14.47
302	21.32	23.4	1.43	0.21	0.23	0.51	0.49	2.23	9.58
303	17.69	21.2	1.42	0.18	0.24	0.48	0.50	2.05	8.62
304	44.48	35.0	1.48	0.11	0.21	0.37	0.46	3.05	14.60
Tot.:	139.31	87.0	2.08	0.12	0.09	0.39	0.23	3.45	40.38

Ref:

Kc: Coeficiente de compacidad o Gravelius.

Rf: Factor de forma

Kf: Coeficiente de forma

Re: Radio de elongación

Rci: Radio de circularidad

L1: Longitud Rectángulo equivalente

L2: Longitud Rectángulo equivalente

#### 5.4.6. Análisis de parámetros

##### Area de la cuenca

El área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como el volumen de agua que ingresa por precipitación, la

magnitud de los caudales, etc. El área de la cuenca definida como la proyección horizontal de la superficie de la misma, se puede medir directamente del mapa topográfico. Desde el punto de vista hidrológico es más importante esta proyección horizontal que la superficie real de la cuenca. Las gotas de lluvia caen verticalmente y no ortogonales a la ladera, igualmente el crecimiento de los árboles es vertical, etc.

En función de la superficie pueden clasificarse en:

- Área < 100 km<sup>2</sup>, cuenca pequeña
- 100 km<sup>2</sup> < Área < 2000 km<sup>2</sup>, cuenca mediana
- Área > 2000 km<sup>2</sup>, cuenca grande

Área Total Cuencas El Rodeo: 139.3 km<sup>2</sup>

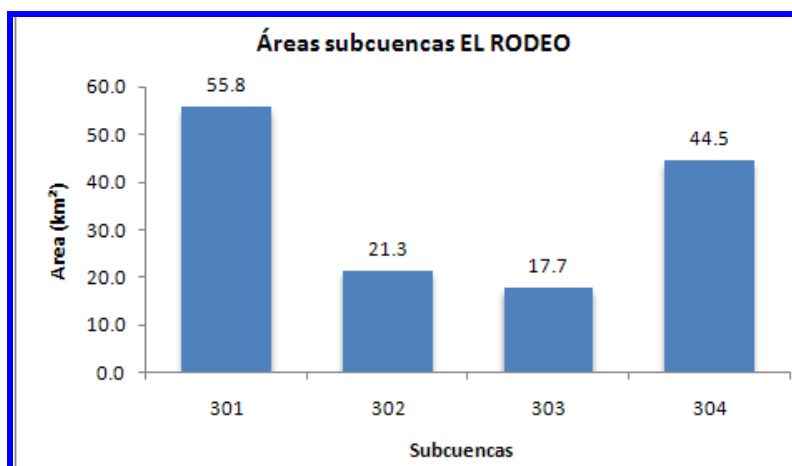


Figura 5-17 Áreas de subcuencas

En general, a mayor tamaño de la cuenca, el escurrimiento total es mayor, pero el escurrimiento específico por unidad de superficie es menor. La probabilidad de ocurrencia de un fenómeno para toda el área también disminuye con el aumento del tamaño de la cuenca.

La cuenca total de estudio se clasifica como **cuenca mediana**, y su orden de magnitud es de 140 km<sup>2</sup> y las subcuencas clasifican como **cuenca pequeñas**

### Índice o coeficiente de compacidad

El índice o coeficiente de compacidad  $K_c$  se debe a Gravelius, y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca.

Llamas (1993) da la siguiente expresión:  $K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$

siendo P y A el perímetro y el área de la cuenca, respectivamente. En cualquier caso, el coeficiente será mayor que la unidad, tanto más próximo a ella, cuanto la cuenca se aproxime más a la forma circular, pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas.

Este valor que crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, permite clasificar a una cuenca como:

- $K_c = 1.00-1.25$ , Redonda
- $K_c = 1.25-1.50$ , Ovalada
- $K_c = 1.50-3.00$ , Oblonga

Todas las subcuencas bajo estudio se caracterizan como ovaladas:  $1.37 < K_c < 1.48$ , mientras que la cuenca total se clasifica como oblonga ( $K_c = 2.08$ )

### **Factor de forma**

---

El factor de forma,  $R_f$ , fue definido por Horton, como el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal:

$$R_f = \frac{A}{L^2} \quad 1$$

donde  $L_m$  es la longitud máxima o recorrido principal de la cuenca. Mediante este parámetro se relacionan otros parámetros morfométricos de la cuenca.

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

### **Coficiente de forma**

---

Coficiente de forma,  $K_f$ . Es la relación entre la anchura media  $B_m$  de la cuenca y la longitud ( $L$ )

$$K_f = \frac{B_m}{L}$$

### **Radio o relación de elongación**

---

El radio o la relación de elongación ( $R_e$ ) Definido por Schumm, es la relación entre el diámetro de un círculo de área igual a la cuenca y la longitud de la cuenca ( $L$ ). Expresando el diámetro en función del

área de la cuenca ( $A$ ) queda:

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad 2$$

### **Radio o relación de circularidad**

---

El radio o la relación de circularidad, ( $R_{ci}$ ), es el cociente entre el área de la cuenca ( $A$ ) y la del círculo

cuyo perímetro ( $P$ ) es igual al del la cuenca:

$$R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad 3$$

### **Rectángulo equivalente**

---

Para poder comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se utiliza la noción de rectángulo equivalente o rectángulo de Gravelius. Se trata de una transformación puramente geométrica en virtud de la cual se asimila la cuenca a un rectángulo que tenga el mismo perímetro y

superficie, y, por tanto, igual coeficiente de Gravelius (coeficiente de compacidad,  $K_c$ ), además de tener la misma distribución hipsométrica. Así, las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas al lado menor del rectángulo, y el desagüe de la cuenca, que es un punto, queda convertido en el lado menor del rectángulo.

Para la construcción del rectángulo, se parte del perímetro,  $P$ , y el área de la cuenca,  $A$ . Si los lados menor y mayor del rectángulo son, respectivamente,  $L_1$  y  $L_2$ , entonces:

$$P = 2(L_1 + L_2) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0.28}$$

siendo  $L_1 L_2 = A$

Para que esta representación sea posible es necesario que se cumpla la condición:  $K_c \geq 1.12$ .

### **Densidad de drenaje**

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación, y, por tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma.

Los valores de la densidad de drenaje varían:

- Dd baja: menor a 5 km/km<sup>2</sup>
- Dd media: 5.0 - 13.7 km/ km<sup>2</sup>
- Dd alta: 13.7 - 155.3 km/ km<sup>2</sup>
- Dd muy alta: mayor a 155.3 km/ km<sup>2</sup>

**Dd Cuenca EL RODEO= 0.67 km/km<sup>2</sup>**

Todos valores de la densidad de drenaje se encuentran por debajo de cinco, lo que indicaría una baja densidad de drenaje (93.6 km en toda la cuenca).

Es necesario recalcar, que los parámetros e índices establecidos por Horton, varían en función de la escala o umbral del área de drenaje, con el cual se consideran los cauces de primer orden. Los coeficientes indicados anteriormente fueron estimados para un umbral de 1 km<sup>2</sup>.

### **Coficiente de Torrencialidad o Frecuencia de Orden 1)**

Relación entre el número total de curso de orden 1 y el área de la cuenca. Es indicador de la erodabilidad de una región, muy relacionado con los procesos de erosión lineal y con la capacidad de descarga de una cuenca, debido a que por lo general los cursos de orden 1 son de génesis erosiva (erosión en surcos y cárcava).

Altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, y alta torrencialidad.

**F1 Cuenca EL RODEO = 0.23**

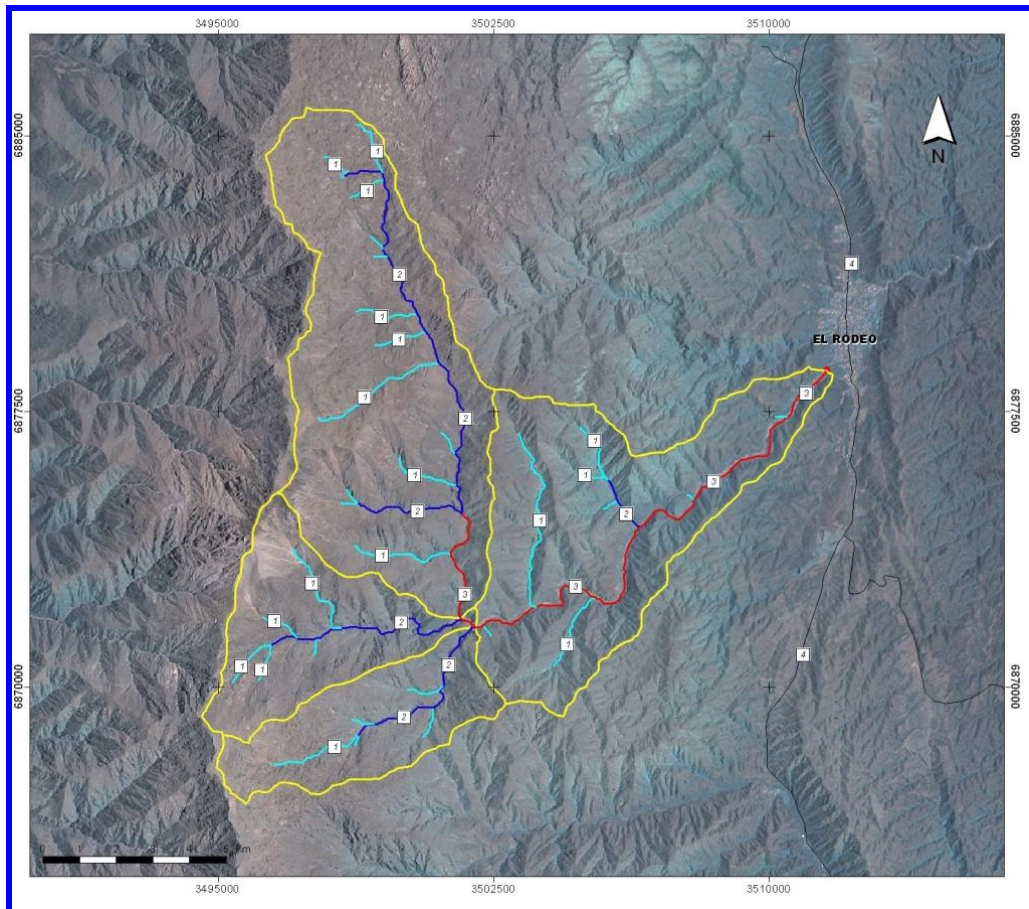
Entre más corrientes tributarias de primer orden tenga el sistema de drenaje, más rápida será su

respuesta a la precipitación, en este caso los valores del coeficiente de torrencialidad obtenidos son bajos (entre 2 y 3 cauces de primer orden en 10 km<sup>2</sup>, para un umbral de 1 km<sup>2</sup>).

### **Orden de Cauces (Strahler – Horton)**

Siguiendo la metodología propuesta por Strahler y mediante un algoritmo de clasificación topológica del SIG, se confeccionó el mapa de órdenes de cauce, que se muestra en Figura 5.18.

El tramo bajo estudio posee un orden máximo de 3.



**Figura 5-18** Mapa de Clasificación de órdenes de Horton

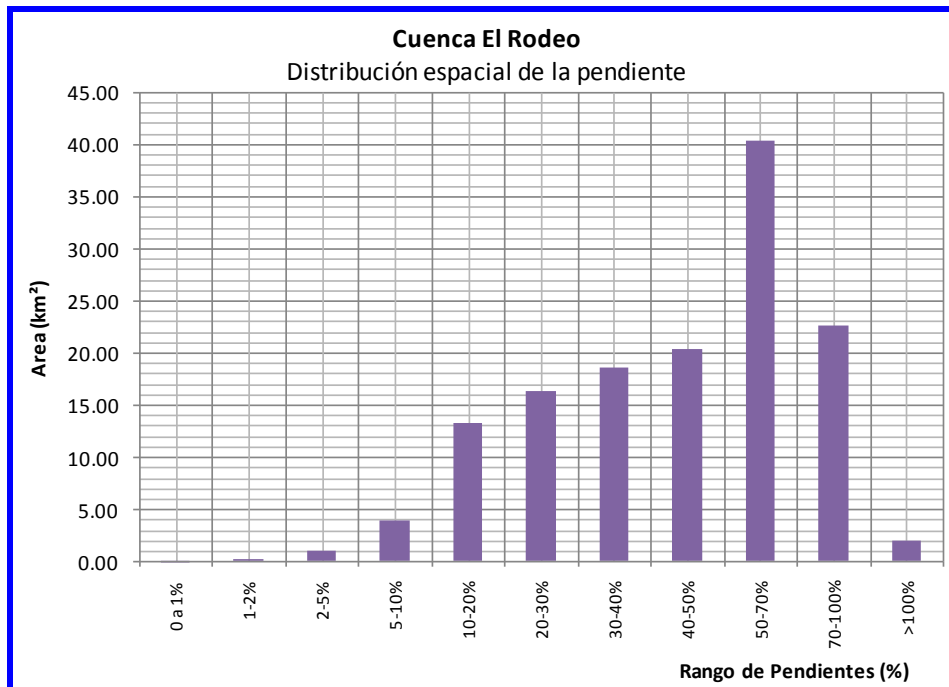
### **Pendiente**

La pendiente media de una cuenca es el cociente entre la diferencia de elevación máxima, H, (medida entre las cotas máximas y mínimas del cauce más largo) y la longitud de dicho cauce.

El 30% de la cuenca general posee pendientes fuertes, entre 50 y 70 %. Esto indicaría la alta respuesta hidrológica debido a sus abruptas laderas. Sólo un 4 % de la cuenca tiene pendientes menores al 10%, mientras que la mitad del área se encuentra con pendientes entre 10 y 50 %. El resto supera taludes de 70 %.

**Tabla 5-4 Áreas de pendientes por subcuencas [km<sup>2</sup>]**

Subcuenca	0-1%	1-2%	2-5%	5-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-70%	70-100%	>100%
301	0.03	0.09	0.59	2.22	7.21	8.36	8.27	7.76	13.12	7.43	0.73
302	0.00	0.01	0.07	0.24	1.07	1.85	2.96	3.43	7.14	4.03	0.53
303	0.01	0.03	0.22	0.69	2.38	2.13	2.13	2.42	5.04	2.44	0.21
304	0.01	0.02	0.21	0.83	2.70	4.11	5.28	6.83	15.19	8.83	0.46
<b>Total:</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>	<b>1.09</b>	<b>3.98</b>	<b>13.36</b>	<b>16.45</b>	<b>18.63</b>	<b>20.43</b>	<b>40.49</b>	<b>22.73</b>	<b>1.93</b>



**Figura 5-19 Frecuencias de pendientes por subcuenca**

La distribución espacial de la pendiente permite visualizar la importancia de este parámetro en las incidencias hidrológicas de la cuenca bajo estudio. En la Figura 5.20 se observa en colores verdes las pendientes menores mientras que en rojos se indican las pendientes fuertes.

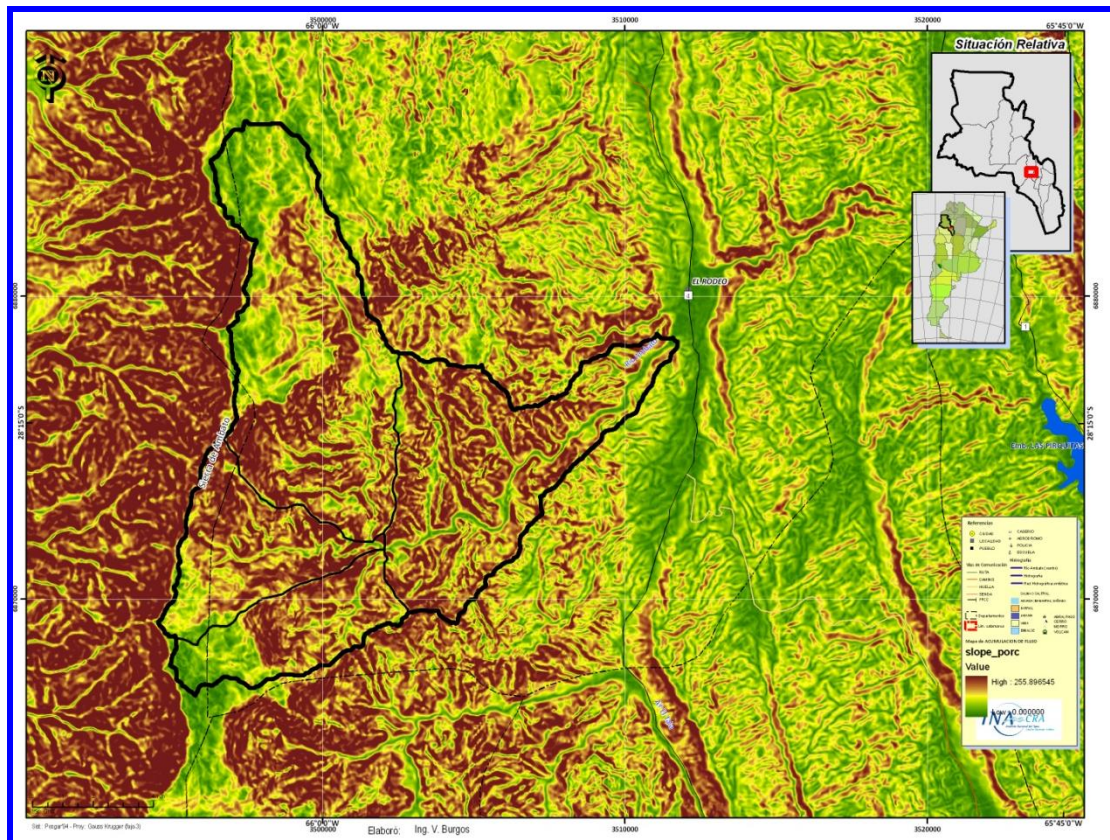


Figura 5-20 Mapa de Pendientes

## 6. DETERMINACION DE PERDIDAS DE LA PRECIPITACION

### 6.1. Determinación de CN

La determinación del potencial de escurrimiento se realizó en función del número de curva (CN; metodología del U.S. Soil Conservation Service, hoy NRCS) y se llevó a cabo de forma distribuida utilizando el SIG ArcView 3.2a y tablas de clasificación (Burgos, 2008).

El cruzamiento espacial de los mapas de uso de suelos y el del tipo hidrológico de suelos se realizó por medio de un procesamiento de álgebra de mapas y se obtuvo para cada cuenca el CN ponderado por área, debido a que el modelo hidrológico utilizado es del tipo concentrado.

Para que en la operación de superposición necesaria para realización del mapa del CN no haya números iguales, cada clase de las variables usos y tipos de suelos se reclasificó previamente asignando a cada identificador un número primo. El mapa resultante se volvió a clasificar asignando el correspondiente CN a su biunívoco producto de números primos.

Una forma de resumir la metodología empleada es mediante la representación por flujograma de las operaciones realizadas (Figura 6.1).



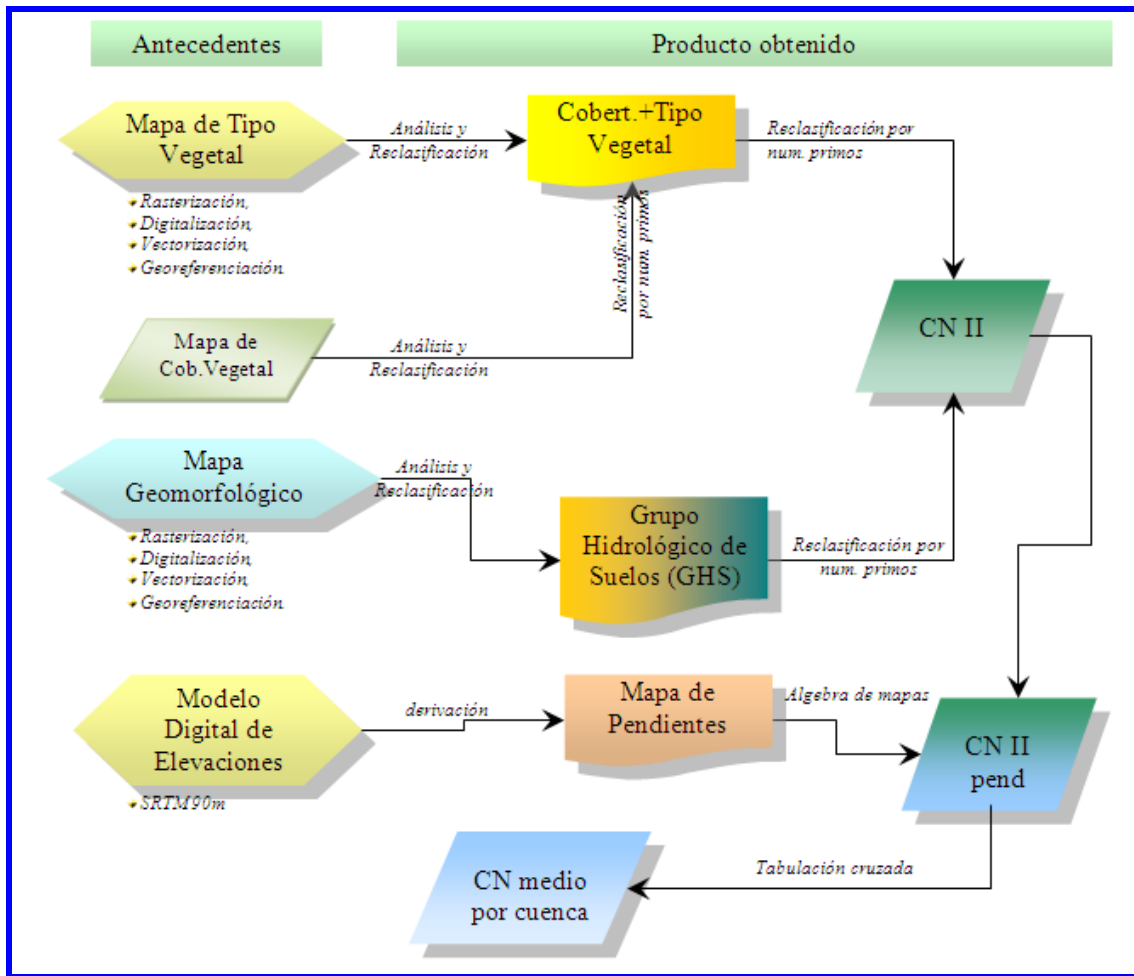


Figura 6-1 . Flujograma cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN

### 6.1.1. Mapa Hidrológico de Suelos

Analizando el Atlas de Suelos realizado por el INTA, se distinguen los siguientes grupos, órdenes y subórdenes de suelos indicados en Tabla 6.1. Asimismo se asignaron para cada unidad un valor de Grupo Hidrológico de Suelo (GHS) en función de la capacidad de drenaje de cada uno.

Tabla 6-1 Grupos Hidrológicos de suelos

Grupo	Orden	Suborden	Textura	Drenaje	GHS
Entisol	Ustortente	líticos	Arenosa Gruesa	Algo excesivamente drenado	B
	Torrortente	lítico	Franca	Algo Drenado	D
Molisol	Haplustol	lítico	Franco Arenosa	Bien Drenado	C
Fondos de ríos, valles saturados, zona de recarga			Arenosa Gruesa / clastos / detritos	Excesivamente drenado	A
Roca	-	-	-	-	D

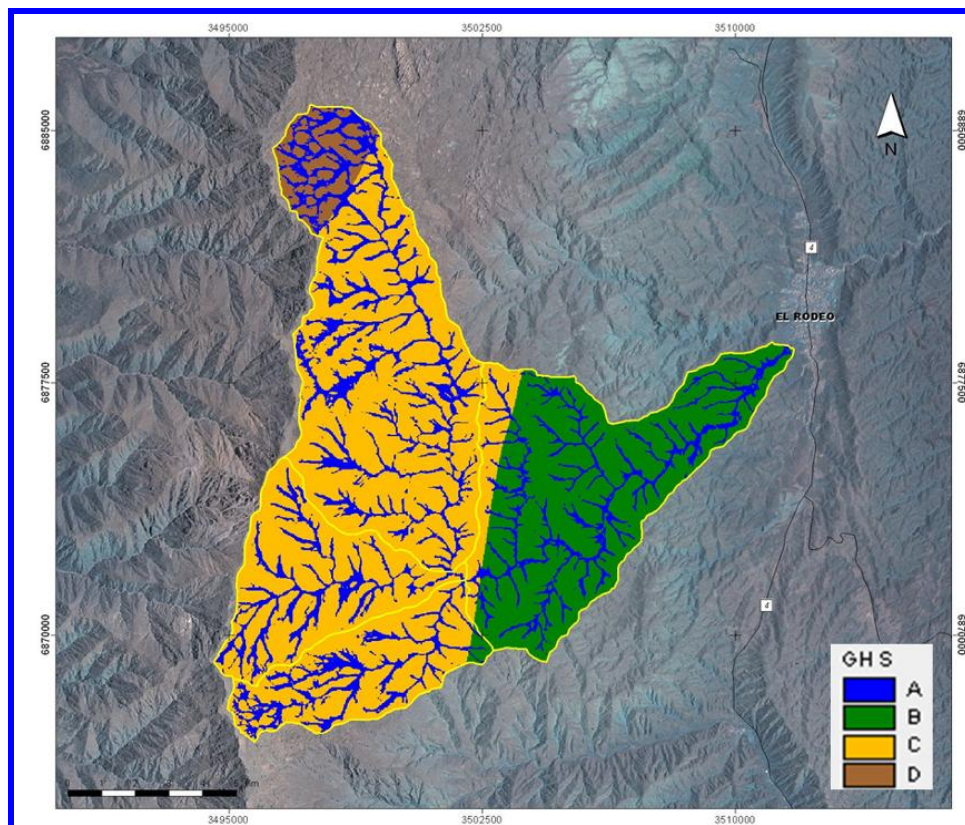
**Tabla 6-2 Grupos Hidrológicos de suelos**

GHS	Potencial de escorrentía	Infiltración	Suelo típico
A	Escaso	Alta	Arenas, gravas excesivamente drenadas
B	Moderado	Moderada	Texturas medias
C	Medio	Lenta	Texturas finas o suelos con capas que impiden el drenaje
D	Elevado	Muy lenta	Suelos arcillosos compactos, suelos poco profundos sobre capas impermeables.

En su mayoría se evidencian grupos de suelo del tipo C, y algunas zonas con suelos tipo A, B y D, tal como se indica en la Figura 6.2.

### 6.1.2. Mapa de Vegetación

Por medio de la georeferenciación de las ecoregiones cartografiadas por Morláns (1995) y Cabrera, (1976) se digitalizaron las zonas límites y se obtuvo el mapa indicado en la Figura 6.3. La delimitación del bosque montano se mejoró con una digitalización y reconocimiento visual sobre imagen satelital.



**Figura 6-2 Mapa de Grupo Hidrológico de Suelos**

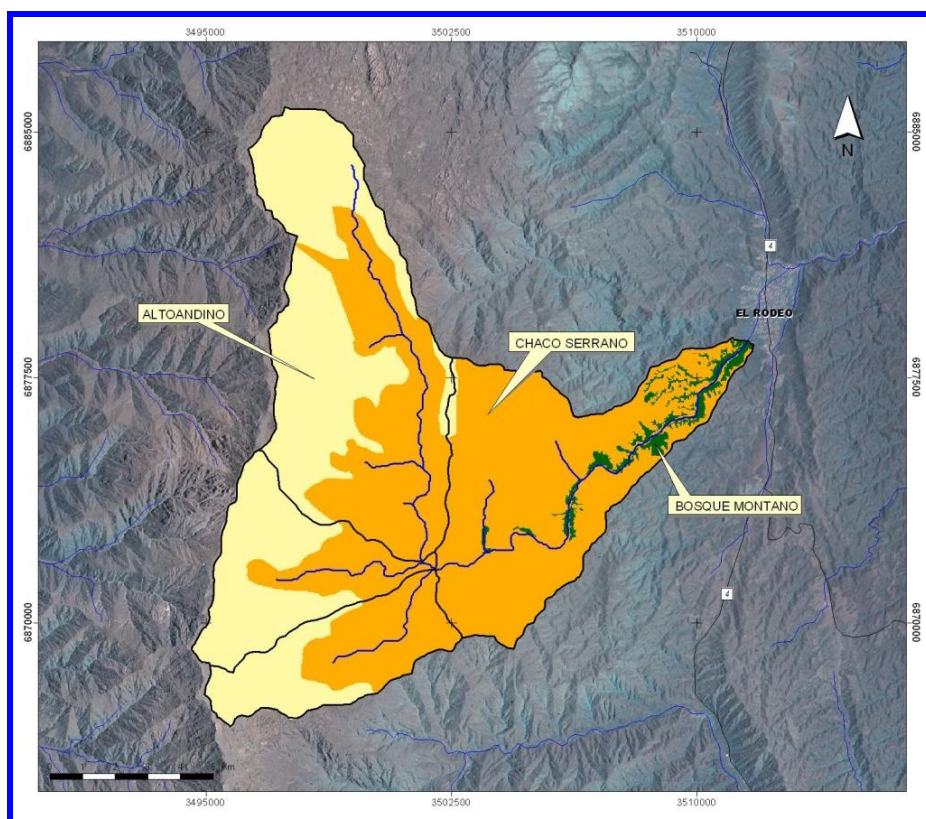


Figura 6-3 Mapa de Vegetación

### 6.1.3. Mapa de CN distribuido

Siguiendo la metodología del flujograma de Figura 6.1 se realizó una tabulación cruzada entre suelos (GHS) y tipos de vegetación a efectos de conseguir una distribución espacial de los valores de CN para cada subcuenca.

Tabla 6-3 Valores de CN para tipos de suelo y de vegetación

Uso de Suelo y cobertura Vegetal	Código	Grupo Hidrológico de Suelos (GHS)			
		A	B	C	D
		1	3	5	7
<b>Ecoregión de las Yungas.</b> Bosque Montano [1400 a 2200m s.n.m] Pino del Cerro. Cob herbácea: 70 a 85 % (1)	111	30	55	70	77
<b>Alto Andino.</b> Pastizales + Roca. Cob. Herbácea 10 % (1)	113	68	79	86	89
<b>Chaco Serrano.</b> Pastizal de altura - Bosque xerófilo c/ gramíneas duras [hasta 1800 m s.n.m. Predominio: Bosque de Horco quebracho // Pastizal de Stipa y Festuca // Arbustos espinosos (2)	117	45	64	76	82

Ref:

(1) Seg/ tabla 7.10 Fattorelli y Fernández ; 2007, Diseño Hidrológico. Zeta Editores

(2) promedio entre matorral y mata desértica (tabla 7.10 y 7.11 . Fattorelli y Fernández ;op. cit)

Basándose en tabulaciones cruzadas del mapa de CN distribuido generado (Figura 6.4) y las subcuencas estimadas, se obtuvieron los valores medios de CN para cada subcuenca, indicadas en Tabla 6.4.

**Tabla 6-4 Tabulación cruzada entre mapa de CN y mapa de subcuencas. Áreas en km<sup>2</sup> <sup>2</sup>**

CN	301 ALTO	302 MANCHAO	303 PABELLON	304 AMBATO
30	0.0	0.0	0.0	1.3
45	5.0	1.5	2.3	5.5
55	0.0	0.0	0.0	2.0
64	0.0	0.0	0.5	31.8
68	7.4	2.8	2.0	0.0
76	19.5	5.0	7.5	3.3
86	19.2	12.0	5.5	0.4
89	4.7	0.0	0.0	0.0
	55.8	21.3	17.7	44.5
<b>CN medio</b>	<b>76.7</b>	<b>78.5</b>	<b>73.9</b>	<b>61.4</b>

Siguiendo la metodología del U.S. N.R.C.S se obtuvieron los valores medios de abstracción inicial, según el potencial máximo de almacenamiento para valores de CN correspondientes a la condición II de humedad antecedente (CHA II).

**Tabla 6-5 Parámetros de pérdidas de precipitación con CHA II en las subcuencas de EL RODEO**

Sub Cuenca	Nombre	CN II	$I_a = S^{0.55}$ (mm)
<b>301</b>	Alto	76.7	10.9
<b>302</b>	Manchao	78.5	10.3
<b>303</b>	Pabellón	73.9	11.9
<b>304</b>	Ambato	61.4	16.3

CNII: Número de Curva en condición de Humedad Antecedente II (CHA II)

S: Almacenamiento, mm

I<sub>a</sub>: Abstracción inicial, mm

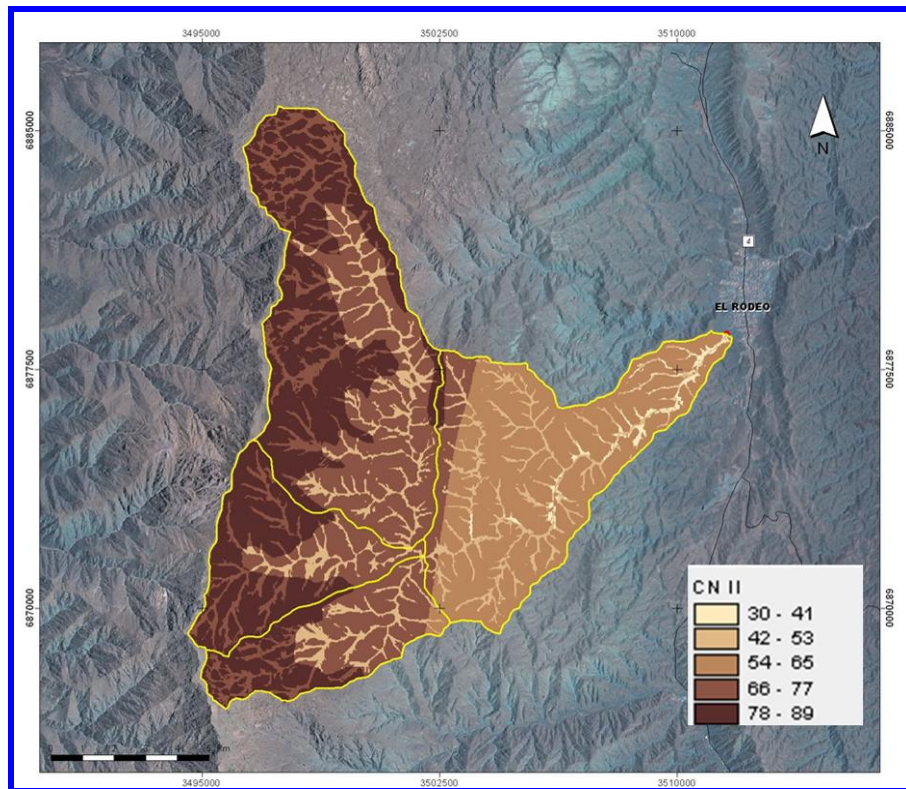


Figura 6-4 Mapa de CN II

## 7. MODELACION HIDROLOGICA

### 7.1. Modelo ARHYMO

El modelo ARHYMO es un modelo de transformación lluvia-caudal, de tipo determinístico y de parámetros concentrados, desarrollado por el INA y que es ampliamente utilizado en Argentina desde 1993. En este estudio se hizo uso de la nueva versión en entorno MS Windows® (Fornero, et al., 2002).

ARHYMO utiliza, para la consideración de las pérdidas en la precipitación, la metodología del U.S. Soil Conservation Service (actualmente U.S. NRCS), y, para la transformación del hietograma de precipitación efectiva en hidrograma, tiene implementado un hidrograma unitario instantáneo fundamentado en la analogía de Nash (representación matemática de la cuenca como n embalses lineales en serie).

### 7.2. Topología de la modelación

La Figura 7.1 muestra el esquema modelado por ARHYMO considerando 4 subcuencas según lo determinado en el punto 5.4.5.

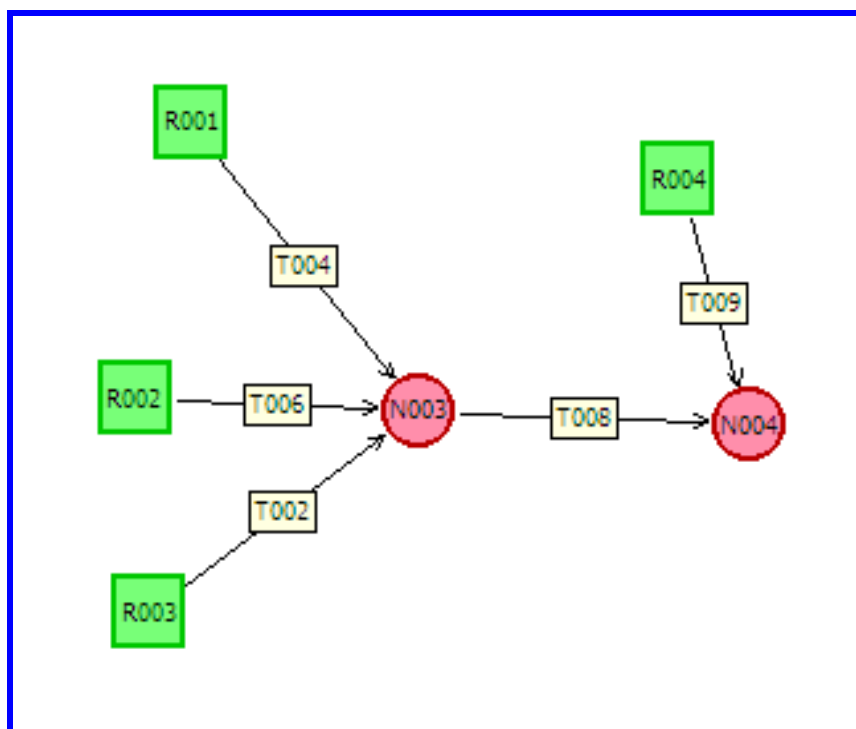


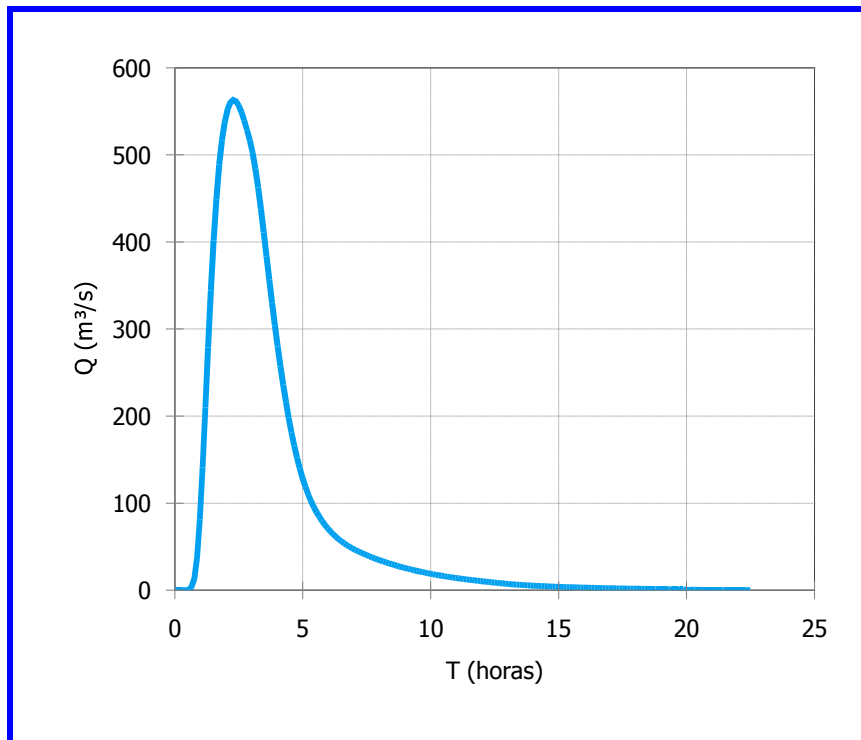
Figura 7-1 Topología en ARHYMO

### 7.3. Aplicación de ARHYMO

Se aplicó el modelo considerando las 14 tormentas de proyecto especificadas (TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años para duraciones de 3 y 6 hrs) obteniendo así los caudales máximos de hidrogramas de escurrimiento que figuran en la Tabla 7.1.

Tabla 7-1 Caudales Máximos de Crecidas

		Precipitaciones con TR (años)						
		2	5	10	25	50	100	200
		Caudales máximos de mrecidas (m <sup>3</sup> /s)						
Precipitaciones con duración (hrs)	3	73.1	158.5	223.9	320.6	398.3	477.7	563.2
	6	71.1	153.1	224.8	319.7	398.1	480.7	566.1



**Figura 7-2 . Hidrograma generado por ARHymo correspondiente a una precipitación de TR= 200 años y D= 3 hrs**

Dada la similitud entre los caudales máximos generados por tormentas de 3 y 6 horas de duración es que se proponen los siguientes caudales de diseño (Tabla 7.2) a los efectos de que sean utilizados por la modelación hidráulica para generar las áreas inundables. La Figura 7.3 representa la relación semilogarítmica entre caudales y recurrencias.

**Tabla 7-2 Caudales de diseño**

TR (años)	Caudales de diseño (m <sup>3</sup> /s)
2	73
5	159
10	225
25	321
50	398
100	481
200	566

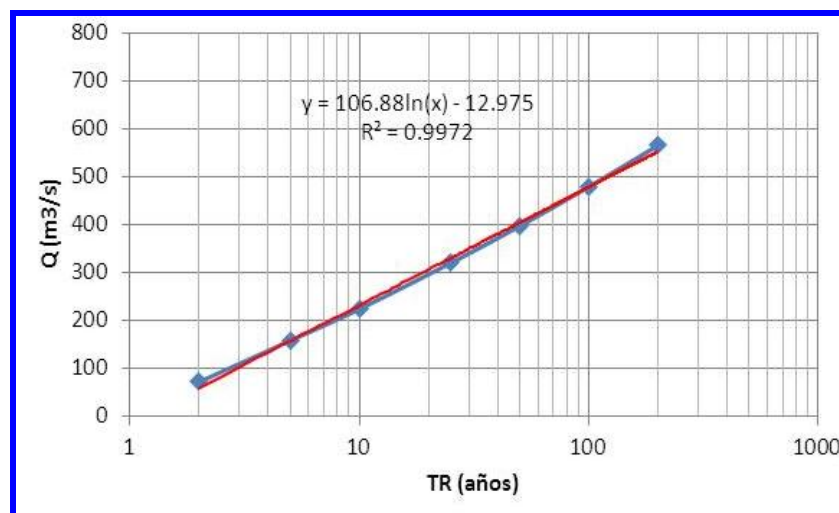


Figura 7-3 Relación de caudales y recurrencia

Calculando el tiempo de concentración como la diferencia de tiempo entre el final del hidrograma de precipitación efectiva y el punto de inflexión de la rama descendente del hidrograma generado por ARHymo se pudo determinar que para la cuenca del río Ambato este parámetro está en el orden de 40 a 50 minutos.

Este valor es coincidente si se utiliza la ecuación empírica:

$$V_{(m/s)} = K \cdot \sqrt{S_{(\%)}}$$

donde  $S$  es pendiente y  $K$  tiene valores como:

- $K= 7.0$  pequeños cauces
- $K= 4.0$  flujo superficial en cauces muy anchos
- $K= 1.6$  flujo superficial

Entonces si se considera que el cauce principal de 39.26 km tiene una pendiente media de 7% y se asume un valor intermedio de  $K= 5$  entonces es

$$v = 5 \cdot \sqrt{7} = 13.2 \text{ m/s} = 47.6 \text{ km/h}$$

$$\text{tiempo de viaje } T = \frac{L}{v} = \frac{39.26 \text{ km}}{47.6 \text{ km/h}} = 0.82 \text{ h} = 49.5 \text{ min}$$

#### 7.4. Justificación de caudales

Debido a la incertidumbre generada por la falta de información que permitiría calibrar el modelo hidrológico para obtener caudales por crecidas pluviales y, con el objetivo de validar el rango de tales caudales, se recurrió a determinar qué valores de caudales producirían el arrastre del material granular de importantes tamaños que se pueden observar en el cauce (Figuras 7.4 y 7.5). A partir de las siguientes ecuaciones que relacionan al arrastre de cuerpos sumergidos con la presión dinámica de un flujo, se puede determinar la velocidad del fluido:



$$R = AC_d \rho \frac{V^2}{2} = f \cdot P$$

$$f \cdot P = AC_d \frac{\gamma V^2}{g}$$

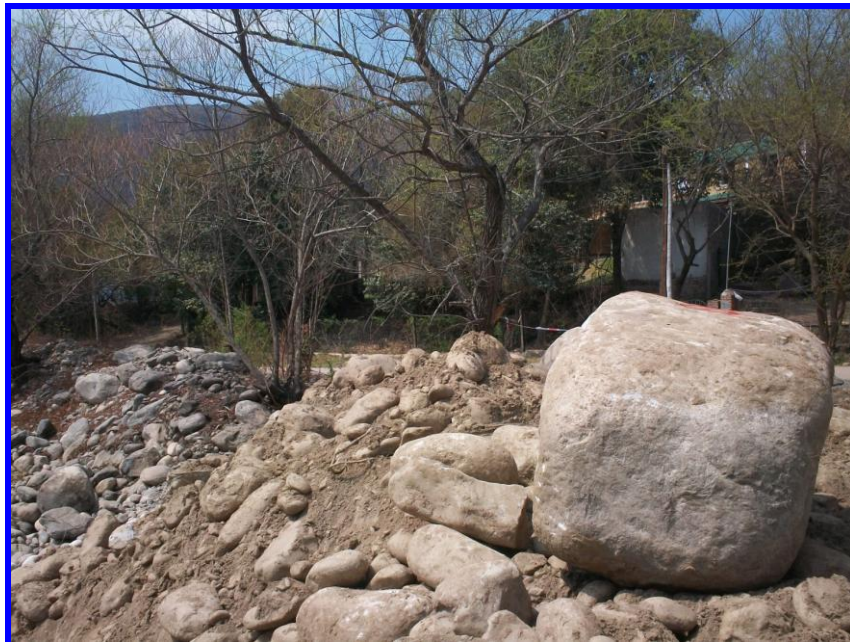
$$V = \sqrt{\frac{2gfP}{\gamma AC_d}}$$

donde:

- R= resistencia al arrastre (kg)
- A= área del cuerpo enfrentada al flujo (m<sup>2</sup>)
- C<sub>d</sub>= coeficiente de forma del cuerpo sumergido
- ρ= densidad del fluido = γ/g
- g= aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- V= velocidad del flujo (m/s)
- f= factor de fricción entre el cuerpo y el lecho del cauce
- P= peso del árido (kg)
- γ = peso específico del fluido = 1000 kg/m<sup>3</sup>

y considerando que se supondrá un árido como el de la Figura 7.4, semejante a un cubo de aproximadamente 1 m de lado, entonces, si:

- γ<sub>s</sub> = peso específico del material granular = 2650 kg/m<sup>3</sup> y
- Vol = volumen del material granular= 1 m<sup>3</sup>
- P = γ<sub>s</sub> . Vol= 2650 kg



**Figura 7-4 Material de arrastre**

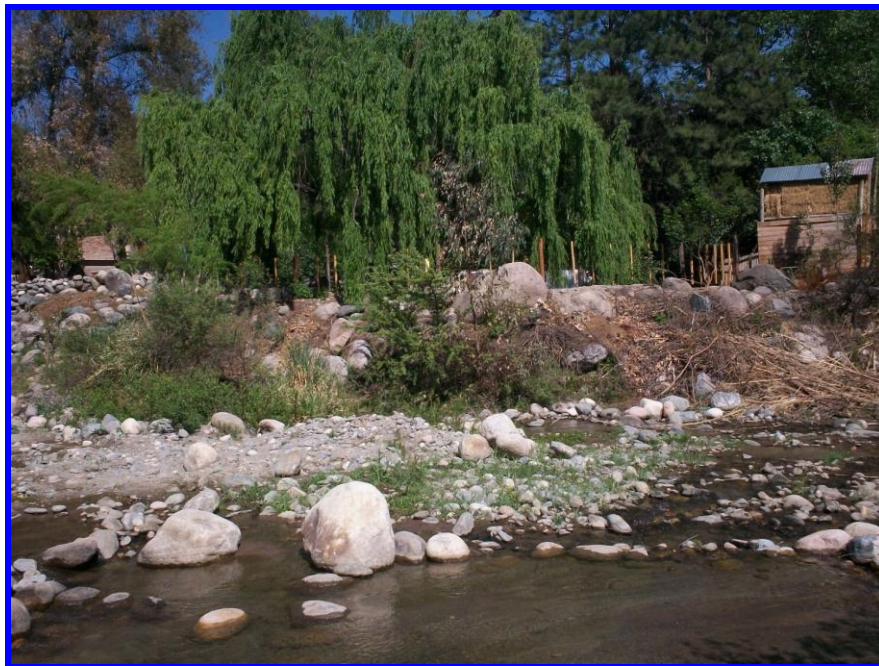


Figura 7-5 Material de arrastre

Se presenta en la Tabla 7.3 el rango de velocidades así calculadas para producir el arrastre del material granular supuesto en función de distintos valores de  $f$  y  $C_d$ , debido a la obvia incertidumbre de tales parámetros.

Tabla 7-3 Velocidades para producir el arrastre del material granular

$C_d$	V (m/s)						
	$f$						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.2	10.2	11.4	12.5	13.5	14.4	15.3	16.1
0.5	6.7	7.4	8.1	8.8	9.4	10.0	10.5
0.8	5.1	5.7	6.2	6.7	7.2	7.6	8.0
1.1	4.4	4.9	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0

Los valores de  $C_d$  considerados contemplan los que se evidencian en la Figura 7.6 ( $C_w$ ) obtenidos de (Fernández Díez, P.).

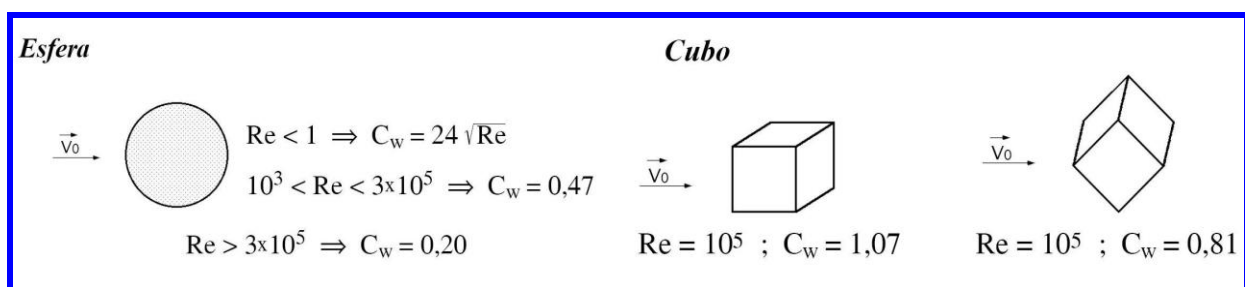


Figura 7-6 Valores de  $C_d$  considerados

A partir de las velocidades de la Tabla 7.3 se obtuvieron caudales a través de las siguientes ecuaciones empíricas que figuran en la publicación (López Alonso, R. et al.):

$$V = 1.62 \cdot S^{0.33} \cdot Q^{0.34} \cdot d_{90}^{-0.25} \quad (10)$$

$$V = 1.43 \cdot S^{0.27} \cdot Q^{0.32} \cdot d_{90}^{-0.29} \quad (11)$$

$$V = 1.20 \cdot S^{0.31} \cdot Q^{0.41} \cdot d_{90}^{-0.39} \quad (13)$$

$$V = 0.37 \cdot g^{0.33} \cdot S^{0.20} \cdot Q^{0.34} \cdot d_{90}^{-0.35} \quad (\text{Rickenmann,1994})$$

donde:

V = velocidad del flujo (m/s)

S = pendiente del cauce (m/m)

Q = caudal (m<sup>3</sup>/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

d<sub>90</sub>= diámetro intermedio del material granular para el cual el 90% de la muestra es inferior (se consideró 1m)

Los resultados obtenidos figuran en las Tablas 7.4 y 7.5.

**Tabla 7-4 Caudales en función de Cd y f**

	C <sub>d</sub>	Q (m <sup>3</sup> /s) según ec. 10				Q (m <sup>3</sup> /s) según ec. 11			
		0.2	0.47	0.81	1.07	0.2	0.47	0.81	1.07
f	0.4	4610	1312.2	589.4	<b>391.4</b>	6429.8	1692	722.8	<b>467.9</b>
	0.5	6400.6	1821.9	818.3	<b>543.4</b>	9112.1	2397.9	1024.4	663.1
	0.6	8368.8	2382.2	1069.9	710.5	12115.4	3188.2	1362	881.6
	0.7	10498.1	2988.3	1342.1	891.3	15414.9	4056.5	1733	1121.7
	0.8	12776	3636.7	1633.3	1084.6	18991.3	4997.6	2135	1382
	0.9	15192.1	4324.5	1942.2	1289.8	22828.6	6007.4	2566.4	1661.2
	1	17738.2	5049.2	2267.7	1505.9	26913.9	7082.4	3025.7	1958.5

**Tabla 7-5 Caudales en función de Cd y f**

	C <sub>d</sub>	Q (m <sup>3</sup> /s) según ec. 13				Q (m <sup>3</sup> /s) según Rickenmann (3)			
		0.2	0.47	0.81	1.07	0.2	0.47	0.81	1.07
f	0.4	1950.1	687.9	354.2	<b>252.2</b>	11745.3	3343.3	1501.6	997.1
	0.5	2560	903.1	465	<b>331.1</b>	16307.2	4641.9	2084.8	1384.4
	0.6	3197.4	1127.9	580.8	<b>413.6</b>	21321.8	6069.2	2725.9	1810.1
	0.7	3858.7	1361.2	700.9	<b>499.1</b>	26746.9	7613.5	3419.5	2270.7
	0.8	4541.1	1601.9	824.8	<b>587.4</b>	32550.4	9265.5	4161.4	2763.4
	0.9	5242.5	1849.4	952.2	678.1	38706.2	11017.7	4948.4	3286
	1	5961.3	2102.9	1082.8	771.1	45193	12864.2	5777.7	3836.7

Como se puede apreciar el orden de magnitud de los valores de caudales así obtenidos justifican plenamente a los hallados por modelación matemática. Si existen tales tamaños de áridos en el cauce es que en algún momento se produjeron caudales que tenían capacidad de transportarlos.

Son significativos los caudales en negrita calculados con  $C_d = 1.07$  (cubo), ya que, prácticamente, representan los caudales correspondientes a TR entre 25 y 200 años.

## 8. SIMULACION MATEMATICA DE LAS AREAS INUNDABLES

### 8.1. Modelo HEC-RAS

El modelo HEC-RAS ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del U.S. Corps of Engineers. Siendo su versión más moderna la 4.1.0 de enero de 2010 (U.S. Hydrologic Engineering Center, 2010).

Es un modelo que simula cálculos hidráulicos unidimensionales en canales naturales o artificiales en régimen permanente o impermanente gradualmente variado.

El procedimiento computacional está basado en la solución de la ecuación de energía unidimensional y las pérdidas de energía se evalúan por la ecuación de Manning. El método de cálculo es el conocido como estándar por pasos.

El modelo está también diseñado para estudios de manejo de planicies inundables o de seguros contra crecidas.

Se pueden evaluar el comportamiento hidráulico de puentes, alcantarillas, defensas de márgenes, etc. y también considerar fondo móvil, es decir erosión al pie de las estructuras.

#### 8.1.1. Datos de entrada al modelo

La información que HEC-RAS necesita como básica para su funcionamiento consta de la descripción topográfica de secciones transversales a lo largo del tramo a simular, el detalle de coeficientes de rugosidad de Manning en esos perfiles transversales y la descripción geométrica de obras de arte y obstrucciones que afecten al flujo a simular.

Los caudales utilizados en las corridas de HEC-RAS son aquéllos determinados en 7.3:

*Tabla 8-1 Caudales de diseño*

TR (años)	Caudales de diseño (m <sup>3</sup> /s)
<b>2</b>	73
<b>5</b>	159
<b>10</b>	225
<b>25</b>	321
<b>50</b>	398
<b>100</b>	481
<b>200</b>	566

### 8.1.2. Perfiles transversales

Como parámetros geométricos del río Ambato y sus planicies de inundación se utilizaron los levantamientos topográficos realizados por la Secretaría del Agua y el Ambiente, Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos del Gobierno de Catamarca, consistentes en una serie de perfiles transversales al río que abarcan ambas márgenes y cuyas características se detallan 3.1.

La topografía se encuentra georreferenciada al sistema Posgar con proyección Gauss Kruger en faja 3.

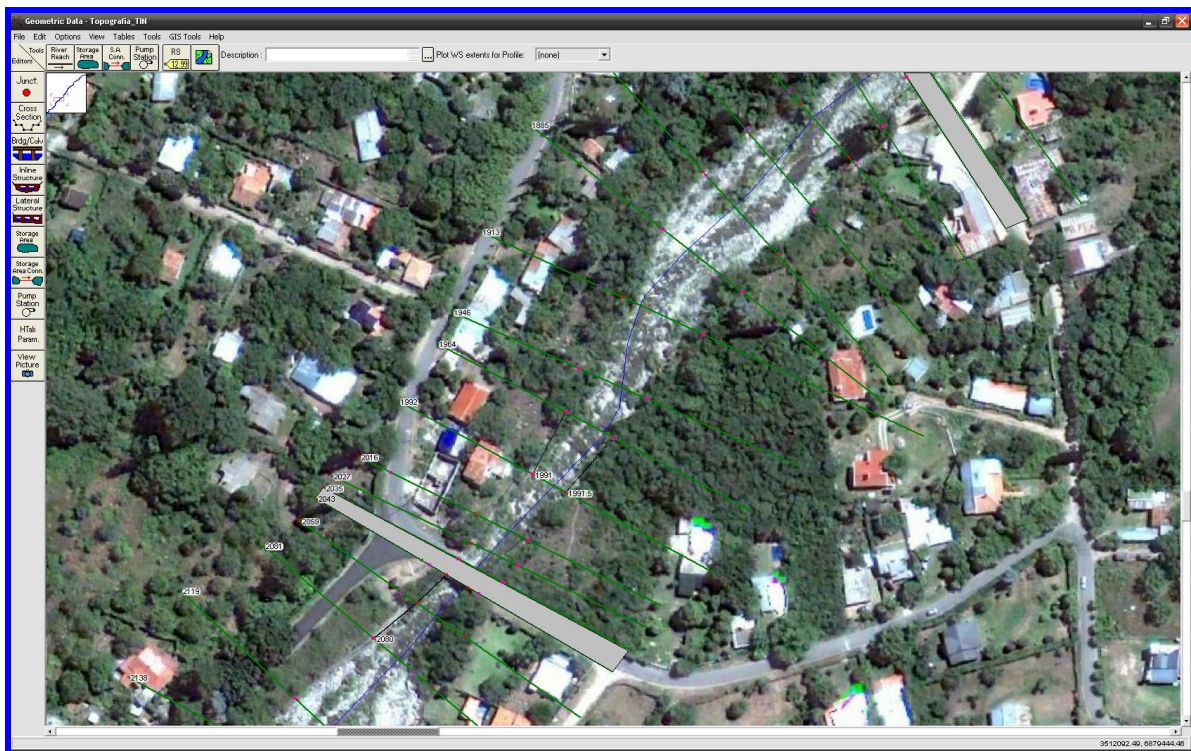


Figura 8-1 Esquema geométrico en HEC-RAS con imagen satelital de fondo

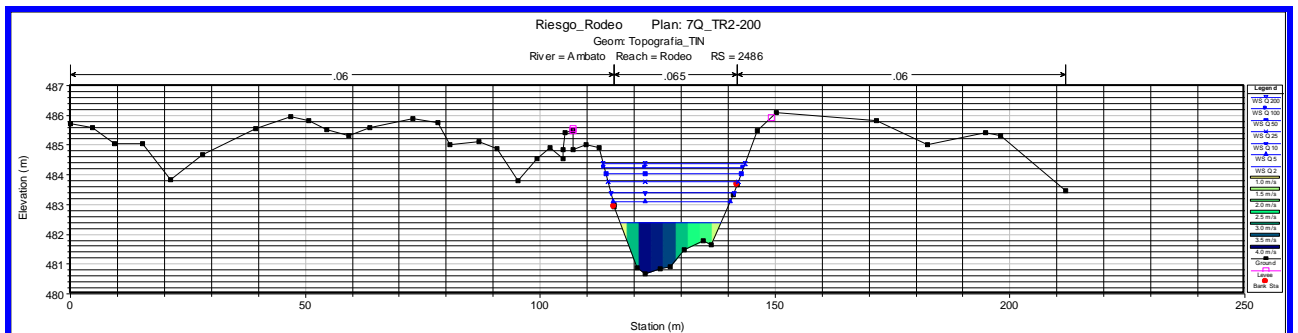


Figura 8-2 Perfiles Transversales en HEC-RAS (ver ANEXO 1)

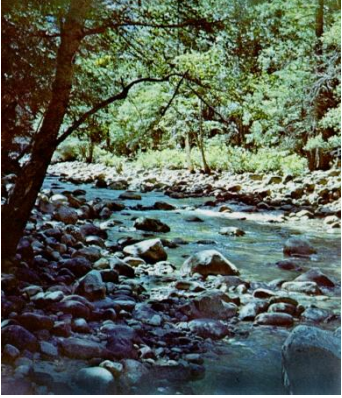
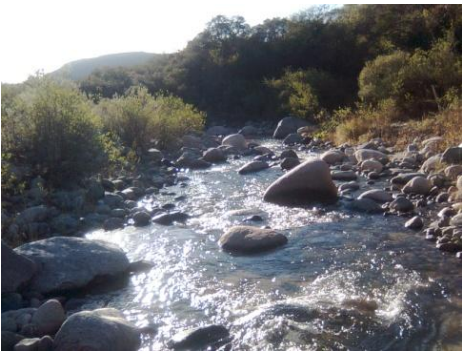


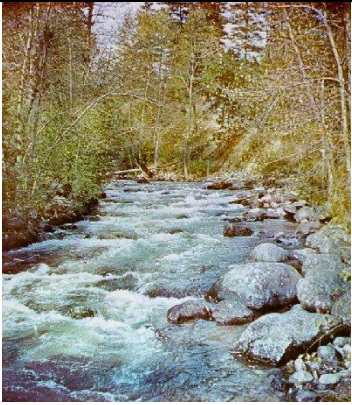

### 8.1.3. Coeficientes de rugosidad de Manning


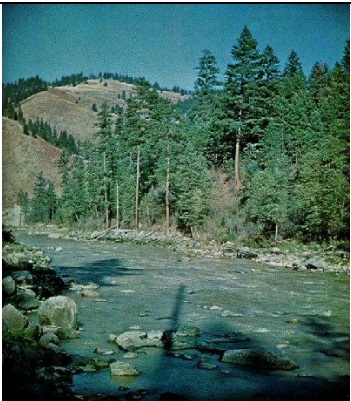
El coeficiente de rugosidad de Manning en la mayoría de los casos se constituye en un parámetro de calibración cuando existe la información pertinente para que se realice este procedimiento.

En el caso del río Ambato no existen datos de altura de agua asociados a caudales y por lo tanto los coeficientes de Manning fueron determinados con el soporte de: comparación de imágenes fotográficas de otros ríos de similares características (USGS, 1977) y ecuaciones empíricas.

El valor de coeficiente de Manning correspondiente al cauce fue estimado en coincidencia con las fotografías extraídas de (Barnes, H. H. Jr, USGS, 1977):

**Tabla 8-2 Comparación fotográfica para determinar Coeficientes de Manning**

(Barnes, H. H. Jr, USGS, 1977)	Secciones Río Ambato	n
	 Secc. 2912	0.065
	 Secc. 2827	0.079
	 Secc. 2666	0.075

(Barnes, H. H. Jr, USGS, 1977)	Secciones Río Ambato	n
	 Secc. 2035	0.043
	 Secc. 1775	0.050
	 Secc. 1476	0.073

Estos valores de Manning fueron luego verificados con la aplicación de la fórmula de Jarret (1984):

$$n = 0.32 S^{0.38} R^{-0.16}$$

La diferencia promedio entre los coeficientes de Manning asignados por comparación fotográfica y los calculados con la expresión de Jarrett es de 24.4% con una desviación estándar de 38.4%.

A los coeficientes de Manning correspondientes a las márgenes derecha e izquierda de las secciones que exceden al cauce se les asignó un valor de 0.060 de acuerdo a las características generales del tramo del Río Ambato modelado.

## 8.2. Resultados de la modelación matemática

### 8.2.1. Situación actual

Se realizaron corridas de HEC-RAS a efectos de diagnosticar la situación actual del funcionamiento del Río Ambato con los 7 caudales de diseño. Las manchas de inundación que generan cada uno de los caudales de diseño se pueden visualizar en los mapas RH01 a RH28.

Se pueden resaltar los siguientes aspectos que resultan de la modelación matemática:

- ✓ en todos los tramos de escurrimiento libre y para todas las recurrencias el régimen de flujo es mayoritariamente supercrítico o crítico ( $N^{\circ}$  de Froude  $\geq 1$ )
- ✓ para TR = 2 años el cauce contiene en su totalidad al escurrimiento, sin producirse desbordes, corroborando así, y en forma congruente, la respuesta geomorfológica del cauce a la crecida originada por la precipitación media
- ✓ para el resto de las recurrencias (5 a 200 años) se producen desbordes de variada magnitud, lo cual fue modelado considerando el uso de un labio vertedero de pared gruesa (Figuras 8.1 a 8.7), de forma de representar el caudal que se fuga de la sección transversal y sale del sistema (Tabla 8.3). El caudal que llega al final del tramo modelado se reduce de tal manera que, por ejemplo, en el caso de TR = 200 años pasa a una recurrencia de menos de 10 años. En la Tabla 8.4 se pueden apreciar algunas de las manchas de inundación generadas por los desbordes y la infraestructura afectada. También es de resaltar que se ha indicado con flechas rojas el sentido de evacuación del flujo generado por los desbordes.

**Tabla 8-3 Desbordes**

Entre progr.	Margen	Caudales vertidos lateralmente por desborde (m <sup>3</sup> /s)						
		TR (años)						
		2	5	10	25	50	100	200
2912 a 2889	izq	0.00	1.54	8.04	22.29	33.81	45.94	58.61
2827 a 2798	izq	0.00	0.00	0.00	3.09	9.43	14.45	18.00
2798 a 2736	der	0.00	7.26	22.10	38.21	47.06	58.64	69.67
2399 a 2337	der	0.00	0.02	3.00	19.74	34.43	50.94	37.38
2399 a 2369	izq	0.00	0.00	0.00	1.11	3.57	7.30	5.23
2081 a 2043	izq	0.00	0.00	2.83	20.87	35.43	33.59	146.70
1992 a 1964	der	0.00	5.94	12.00	16.83	19.29	19.26	19.62
1992 a 1964	izq	0.00	4.16	9.07	13.13	15.21	15.20	15.49
418 a 360	izq	0.00	1.17	2.21	3.76	4.43	4.43	4.51



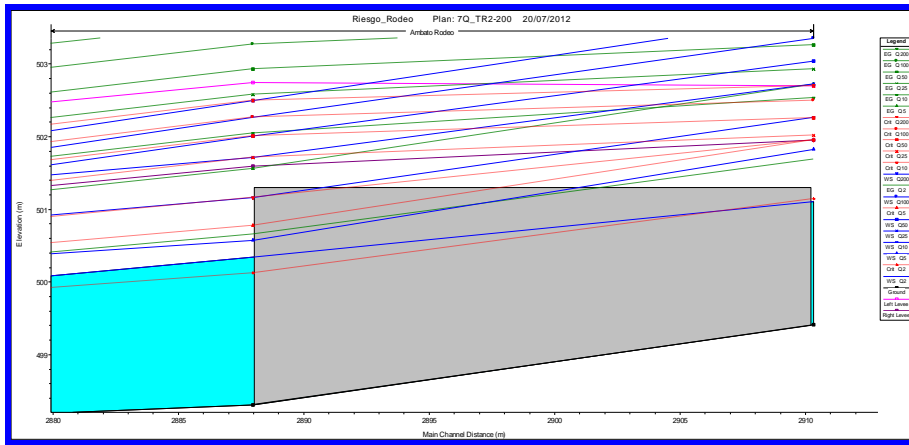


Figura 8-3 Desbordes entre progresivas 2912 y 2889 por margen izquierda

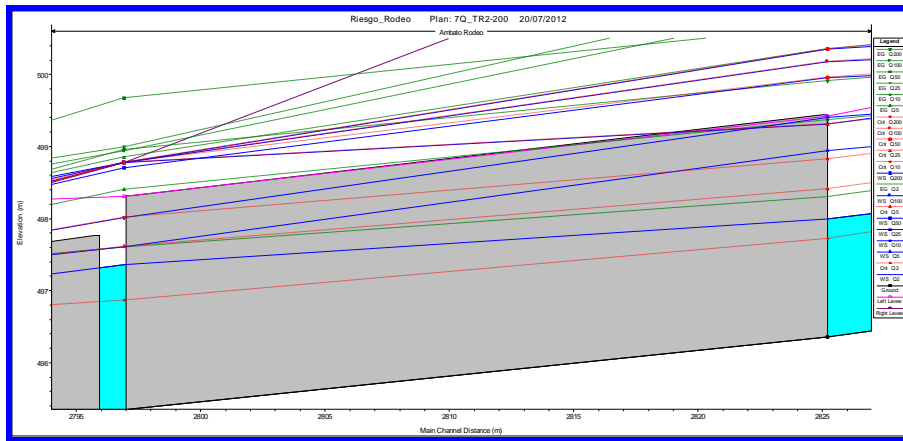


Figura 8-4 Desbordes entre progresivas 2827 y 2798 por margen izquierda

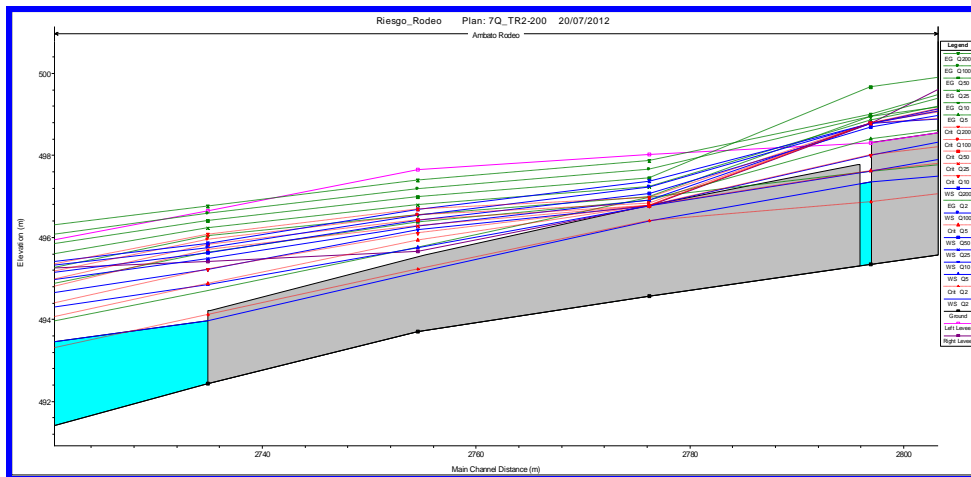
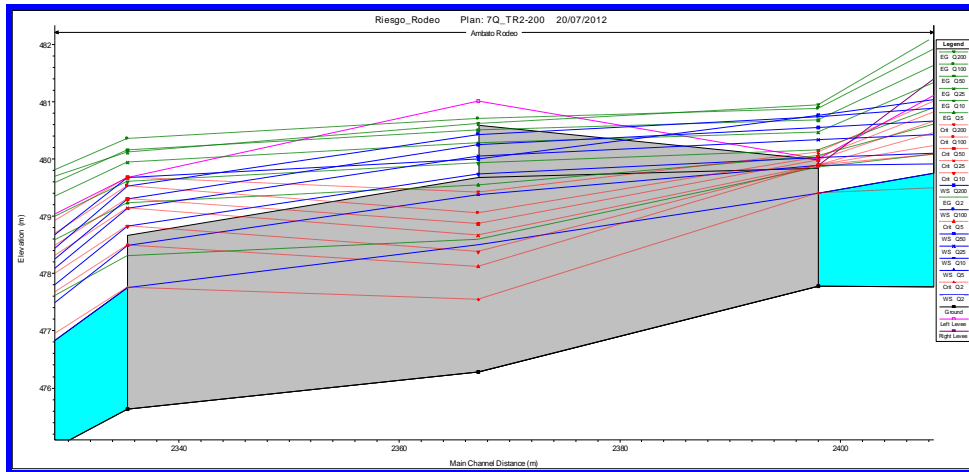
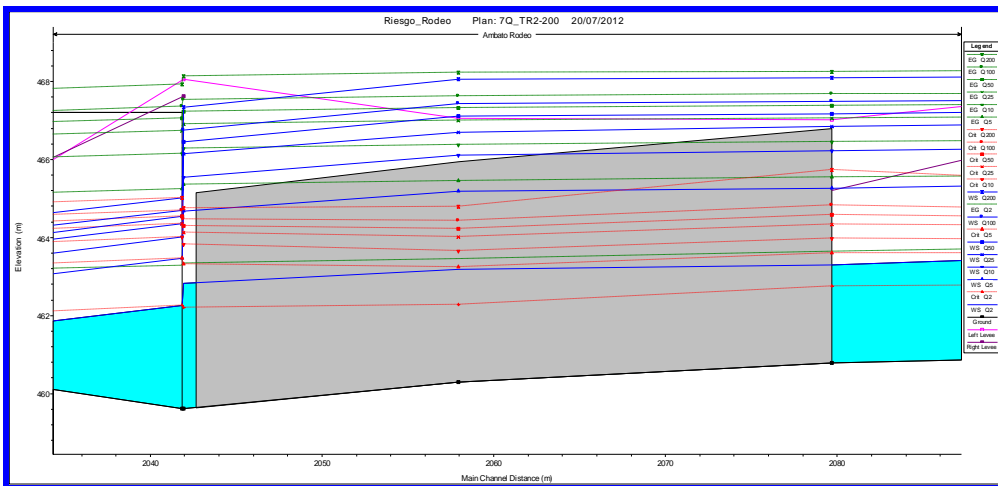


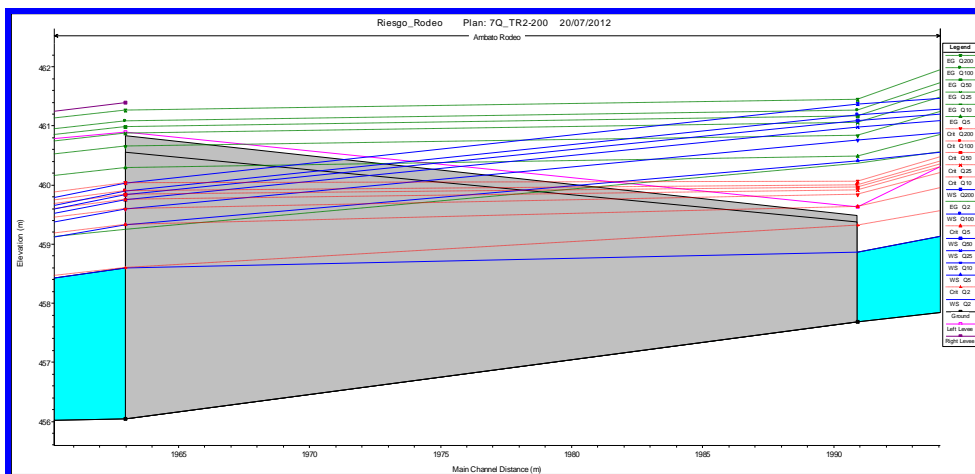
Figura 8-5 Desbordes entre progresivas 2798 y 2736 por margen derecha



**Figura 8-6** Desbordes entre progresivas 2399 y 2337 por margen derecha y entre progresivas 2399 y 2369 por margen izquierda



**Figura 8-7** Desbordes entre progresivas 2081 y 2043 por margen izquierda



**Figura 8-8** Desbordes entre progresivas 1992 y 1964 por márgenes izquierda y derecha

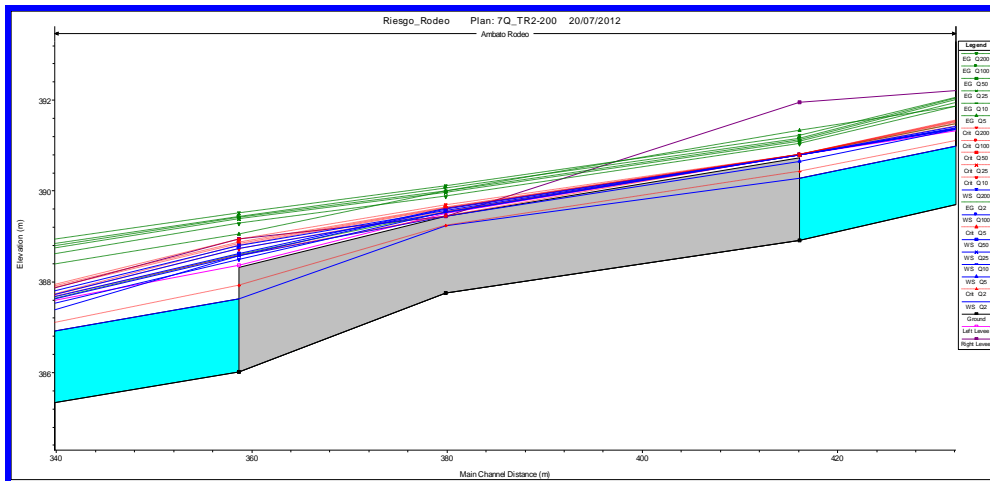











Figura 8-9 Desbordes entre progresivas 418 y 360 por margen izquierda

Tabla 8-4 Manchas de inundación generadas por desbordes del cauce del Río Ambato

TR (años)	Calle Los Ligustros (Progr. 2369)	Aguas arriba Puente N° 1	Aguas arriba Puente N° 3
5			
10			

TR (años)	Calle Los Ligustros (Progr. 2369)	Aguas arriba Puente N° 1	Aguas arriba Puente N° 3
25			
50			
100			

TR (años)	Calle Los Ligustros (Progr. 2369)	Aguas arriba Puente N° 1	Aguas arriba Puente N° 3
200			

Con respecto al funcionamiento hidráulico de los puentes se puede acotar:

- ✓ Puente 1 (progr. 2040, aguas abajo del camping municipal), es el más antiguo de todos; para recurrencias de 10 a 200 años el resalto que produce causa el desborde por margen izquierda aguas arriba del puente. En el caso de TR= 200 años el tablero del puente es sobrepasado funcionando como vertedero.

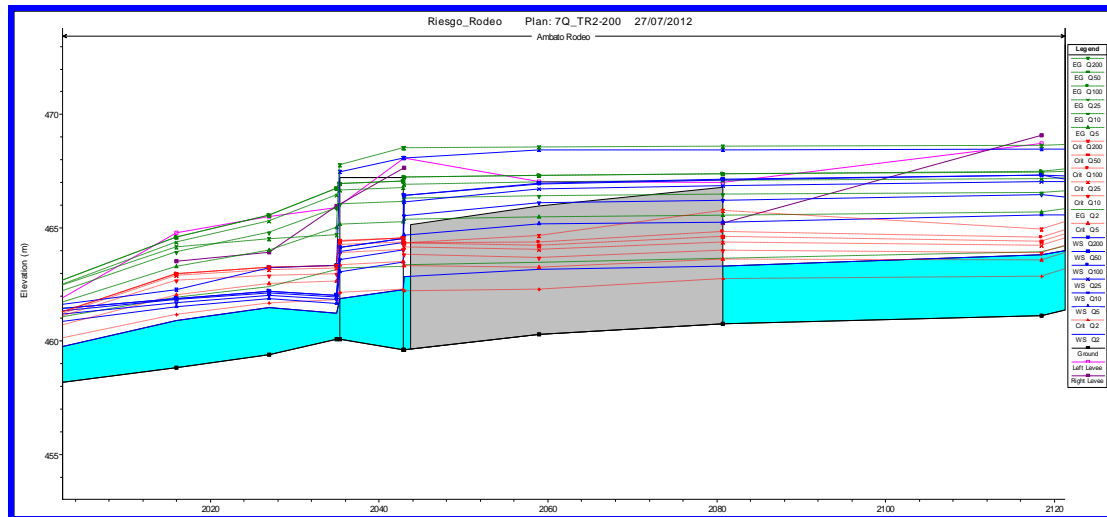
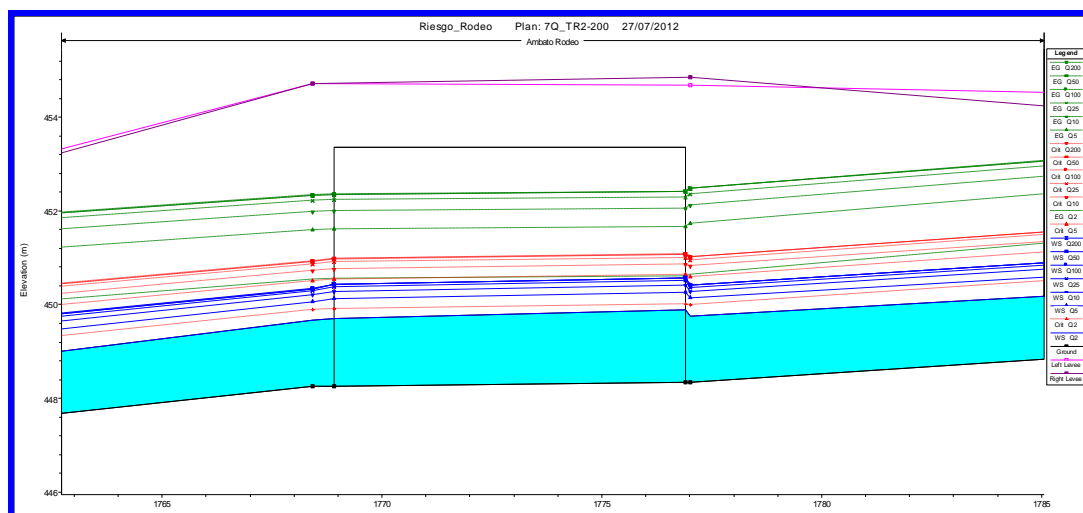


Figura 8-10 Puente 1 (progr. 2040).

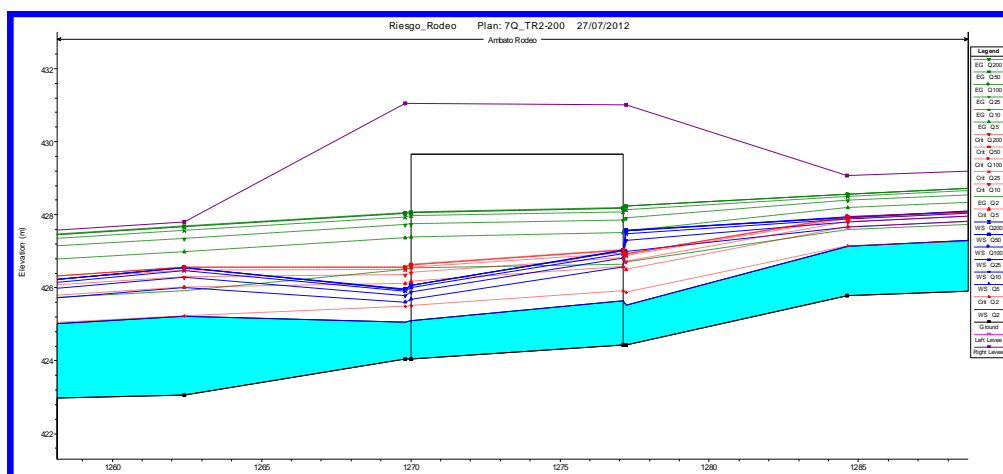
Se observa también en color gris, aguas arriba del puente, la estructura que simula el vertido lateral por margen izquierda entre progresivas 2043 y 2081

- ✓ Puente 2 (progr. 1775, calle Las Dalias), su nueva estructura permite un escurrimiento libre en régimen supercrítico para los caudales de todas las recurrencias consideradas



**Figura 8-11 Puente 2 (progr. 1775, calle Las Dalias)**

- ✓ Puente 3 (progr. 1275, calle Las Hortencias), a pesar de ubicarse su nueva estructura sobre una fuerte pendiente en el cauce, se genera aguas arriba del puente, un pequeño resalto que no produce inconvenientes para caudales de 2 a 200 años de tiempo de retorno.



**Figura 8-12 Puente 3 (progr. 1275, calle Las Hortencias)**

- ✓ Puente 4 (progr. 915, calle Las Maravillas) esta nueva estructura genera resaltos aguas arriba para caudales de recurrencia 5 y 10 años; para TR = 2 años el escurrimiento pasa de supercrítico a subcrítico en el ancho del puente; para TR= 25 a 200 años el tablero del puente es sobrepasado funcionando como vertedero.

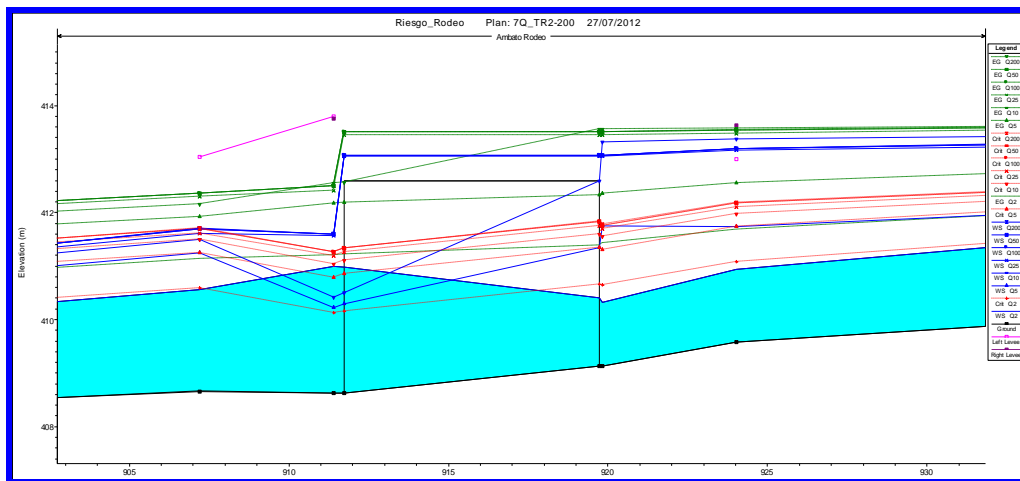


Figura 8-13 Puente 4 (progr. 915, calle Las Maravillas)

### 8.2.2. Situación hipotética con escurrimiento total en el cauce (sin desbordes)

A efectos de determinar el nivel de seguridad de los puentes se hicieron corridas de HEC-RAS para todos los caudales (recurrencias 2 a 200 años) considerando que no existen desbordes y en consecuencia la totalidad del flujo escurre por el cauce del río. Para modelar esta situación hipotética se recurrió al artificio de simular la existencia de defensas longitudinales que impiden el desborde lateral. Al respecto del funcionamiento hidráulico de los puentes se puede acotar:

- ✓ **Puente 1** (progr. 2040, aguas abajo del camping municipal), el caudal admisible sin sobrepaso es el correspondiente a TR = 10 años ( $225 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Como se puede apreciar en la Figura 8.12 para TR = 25 años el escurrimiento sobrepasa al tablero del puente, actuando como vertedero.

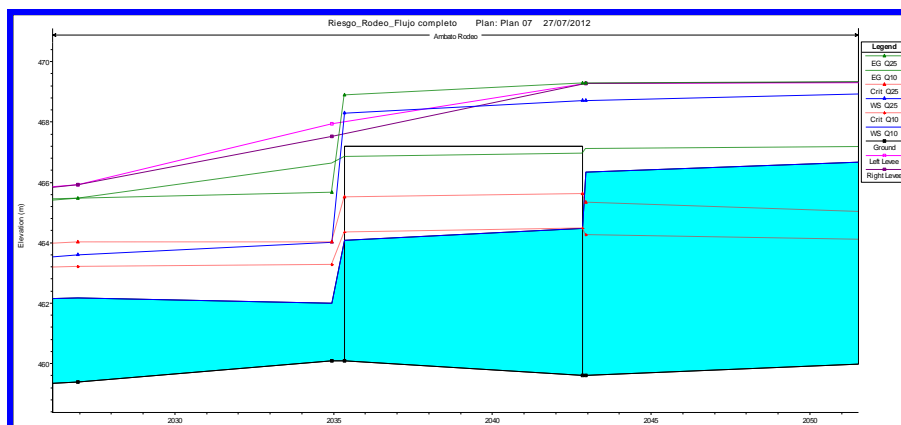


Figura 8-14 Puente 1 (progr. 2040)

- ✓ **Puente 2** (progr. 1775, calle Las Dalias), el caudal admisible sin sobrepaso es el correspondiente a TR = 10 años ( $225 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Como se puede apreciar en la Figura 8.15 para TR= 25 años el escurrimiento sobrepasa al tablero del puente, actuando como vertedero.

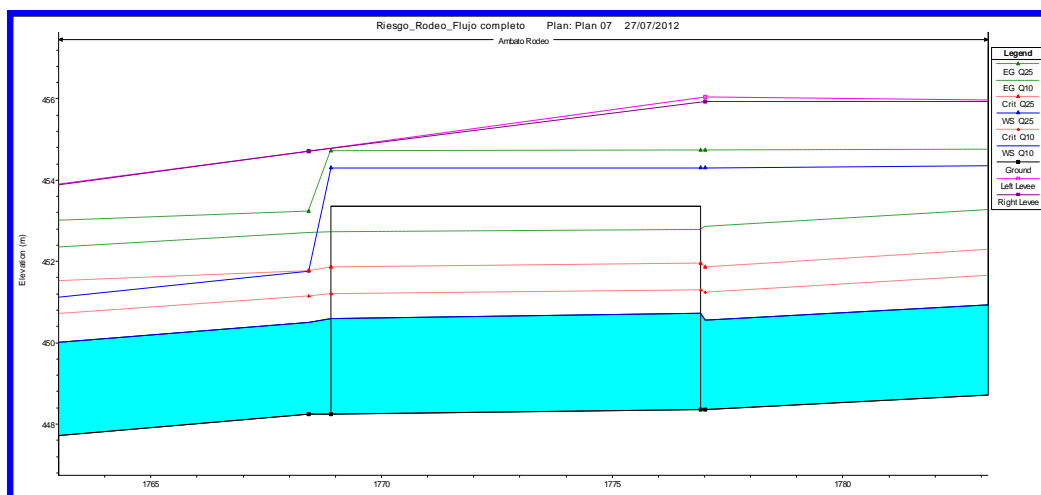


Figura 8-15 Puente 2 (progr. 1775, calle Las Dalias)

- ✓ **Puente 3** (progr. 1275, calle Las Hortencias), el caudal admisible sin sobrepaso es el correspondiente a TR= 25 años ( $321 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Como se puede apreciar en la Figura 8.16 para TR= 50 años el escurrimiento sobrepasa al tablero del puente, actuando como vertedero.

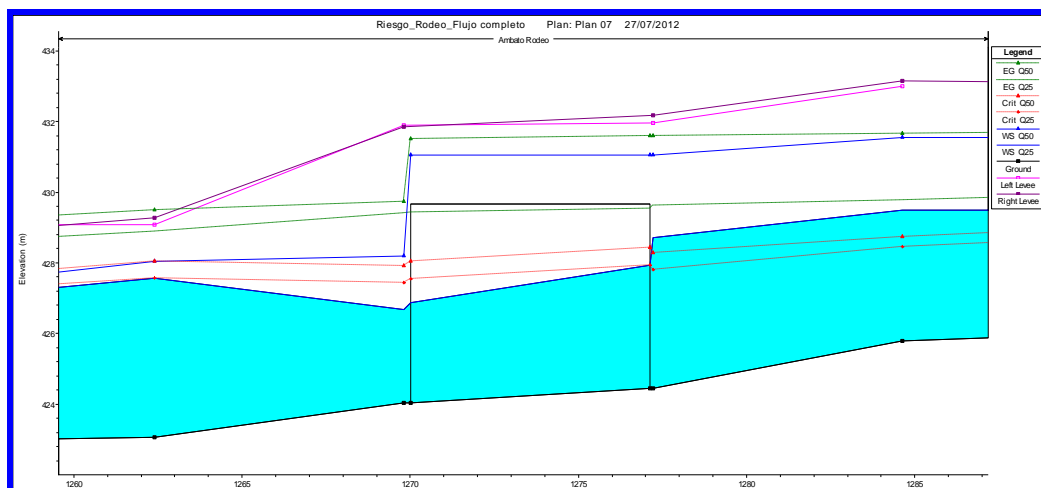
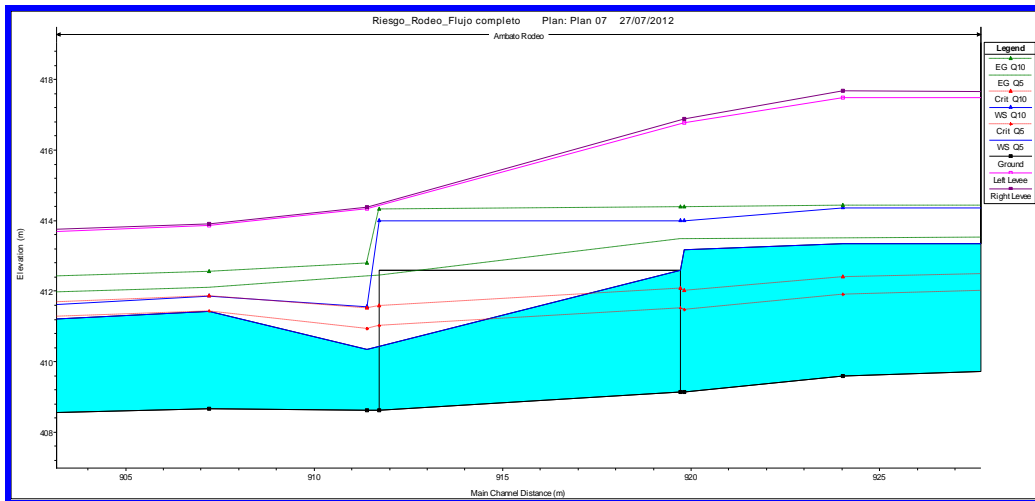


Figura 8-16 Puente 3 (progr. 1275, calle Las Hortencias)

- ✓ **Puente 4** (progr. 915, calle Las Maravillas), el caudal admisible sin sobrepaso es el correspondiente a TR = 5 años ( $159 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Como se puede apreciar en la Figura 8.17 para TR= 10 años el escurrimiento sobrepasa al tablero del puente, actuando como vertedero.





**Figura 8-17 Puente 4 (progr. 915, calle Las Maravillas)**

Como se puede apreciar el nivel de riesgo hidrológico de colapso de los puentes es relativamente alto. El riesgo hidrológico es el riesgo de que el evento de diseño (con un TR asociado) de una obra hidráulica sea sobrepasado en un período  $n$  considerado (por ej. la vida útil de la obra):

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n$$

es decir que la crecida de TR (años) tiene un riesgo hidrológico (R) de que se produzca en los próximos  $n$  años. En la Tabla 8.5 se puede apreciar el nivel de riesgo de cada puente, evidenciando el grave caso del puente 4.

**Tabla 8-5 Riesgo hidrológico de puentes**

Puente	TR (años)	$n$ (años)	R
1	25	50	0.870
2	25	50	0.870
3	50	50	0.636
4	10	50	0.995

## 9. EVALUACION DEL RIESGO DE INUNDACIONES

Las inundaciones son un episodio natural en la dinámica fluvial, que se expresa morfológicamente para los ríos en la planicie de inundación o lecho mayor. Cuanto mayor es la cuenca aguas arriba de una localidad determinada, mayor es el caudal máximo de una crecida y consecuentemente mayores las posibilidades de recurrir a evacuaciones, produciendo las inundaciones daños, fundamentalmente, económicos.

Los Factores del Riesgo son tres: la Peligrosidad, la Exposición y la Vulnerabilidad (Ayala- Carcedo, F.J., 2001).

- ✓ La **Peligrosidad** se compone de dos aspectos, la Severidad o Intensidad y la Probabilidad, ambas relacionadas (cuanto más intenso o severo es un peligro, afortunadamente, es tanto menos frecuente). En este estudio la Peligrosidad ha sido representada por su probabilidad de ocurrencia o tiempo de retorno.
- ✓ La **Exposición** es el conjunto de personas y bienes potencialmente expuestos a la acción de un Peligro. En este estudio la Exposición ha sido dimensionada en función de la distancia entre la ubicación del bien o persona y la línea de ribera.
- ✓ La **Vulnerabilidad**, es la potencialidad del daño que puede producir un Peligro de una determinada Severidad o Intensidad sobre el conjunto de personas y bienes potencialmente expuestos. En este estudio la Vulnerabilidad ha sido representada en función del daño parcial o colapso de las personas o bienes expuestos a la presión dinámica que ejerce el agua sobre ellos.

Sin que se den los tres, no existe Riesgo como lo evidencia la Figura 9-1 Un terremoto en un desierto donde no hay Exposición de personas o bienes, no supone Riesgo.



Figura 9-1 Triángulo de riesgo (Crichton, 1999)

Por otra parte, existen niveles de Riesgo para la población, admisibles y no admisibles. El Riesgo 0 (cero) no existe, y voluntariamente se asumen Riesgos significativos como pasear en automóvil, bañarse en una piscina, fumar o tener productos tóxicos en casa. En general, se admite mayor nivel de riesgo, de pérdida potencial, cuando el riesgo es asumido o no es catastrófico.

No existe amenaza o vulnerabilidad en forma independientemente, ya que son situaciones mutuamente condicionantes que se definen en forma conceptual de manera independiente para efectos metodológicos y para una mejor comprensión del riesgo. Así, al intervenir uno o los dos componentes del riesgo, se está interviniendo el riesgo mismo. Sin embargo, dado que en muchos casos no es posible intervenir la amenaza, para reducir el riesgo no queda otra alternativa que modificar las condiciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos. Esta es la razón por la cual con mucha frecuencia se hace énfasis en el estudio de la vulnerabilidad y en la necesidad de reducirla mediante medidas de prevención-mitigación, sin embargo lo que realmente se intenta de esta manera es la reducción del riesgo.

### 9.1. Modelación de Áreas Inundables

La metodología utilizada para la generación de los mapas de inundación se puede explicar siguiendo el diagrama de flujo que muestra la Figura 9.2.

Se procesaron los 74 perfiles del relevamiento topográfico, logrando confeccionar dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG) un modelo digital de elevaciones (MDE) que sirvió de base tanto para la extracción de atributos como para el volcado de resultados

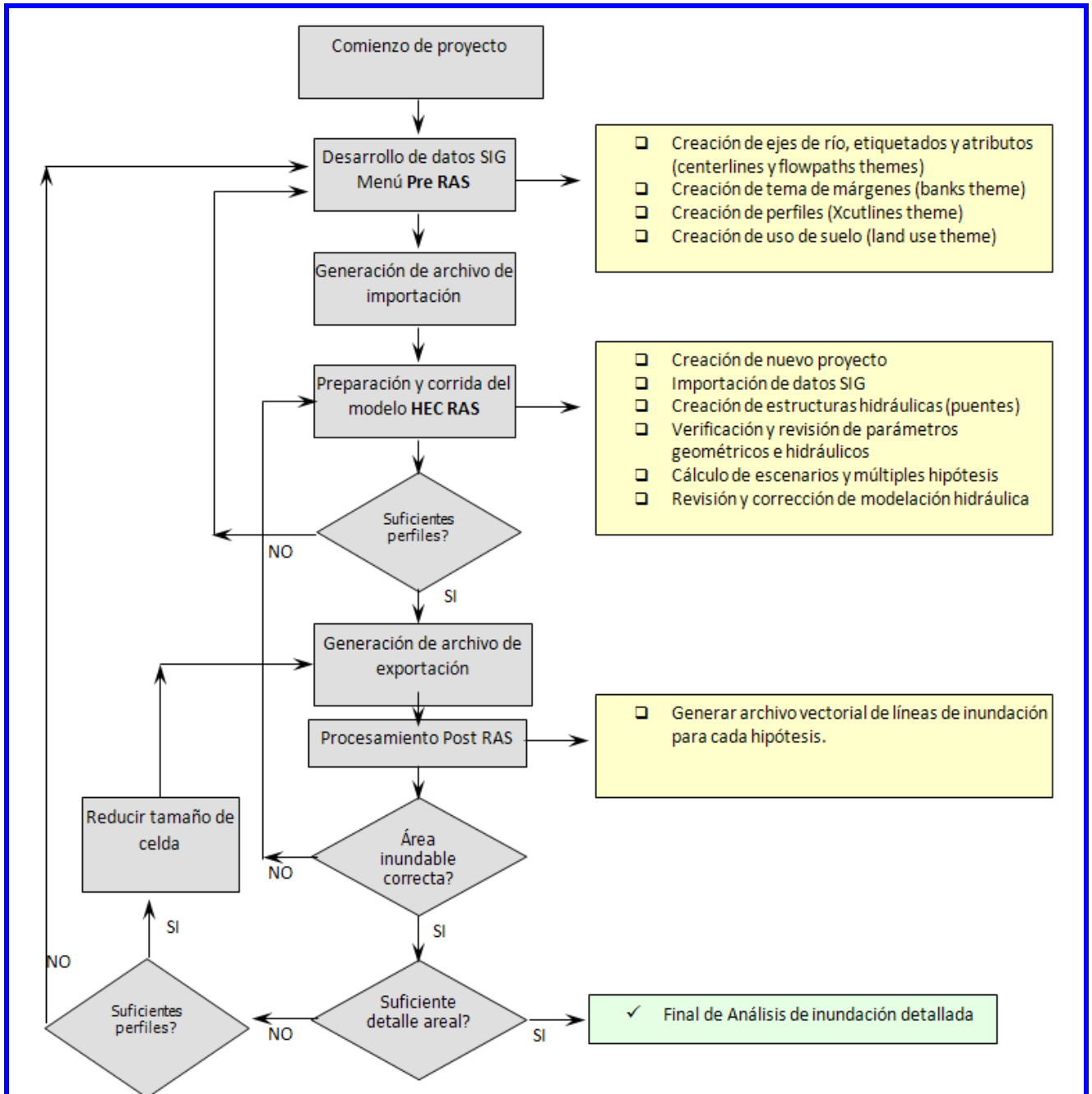
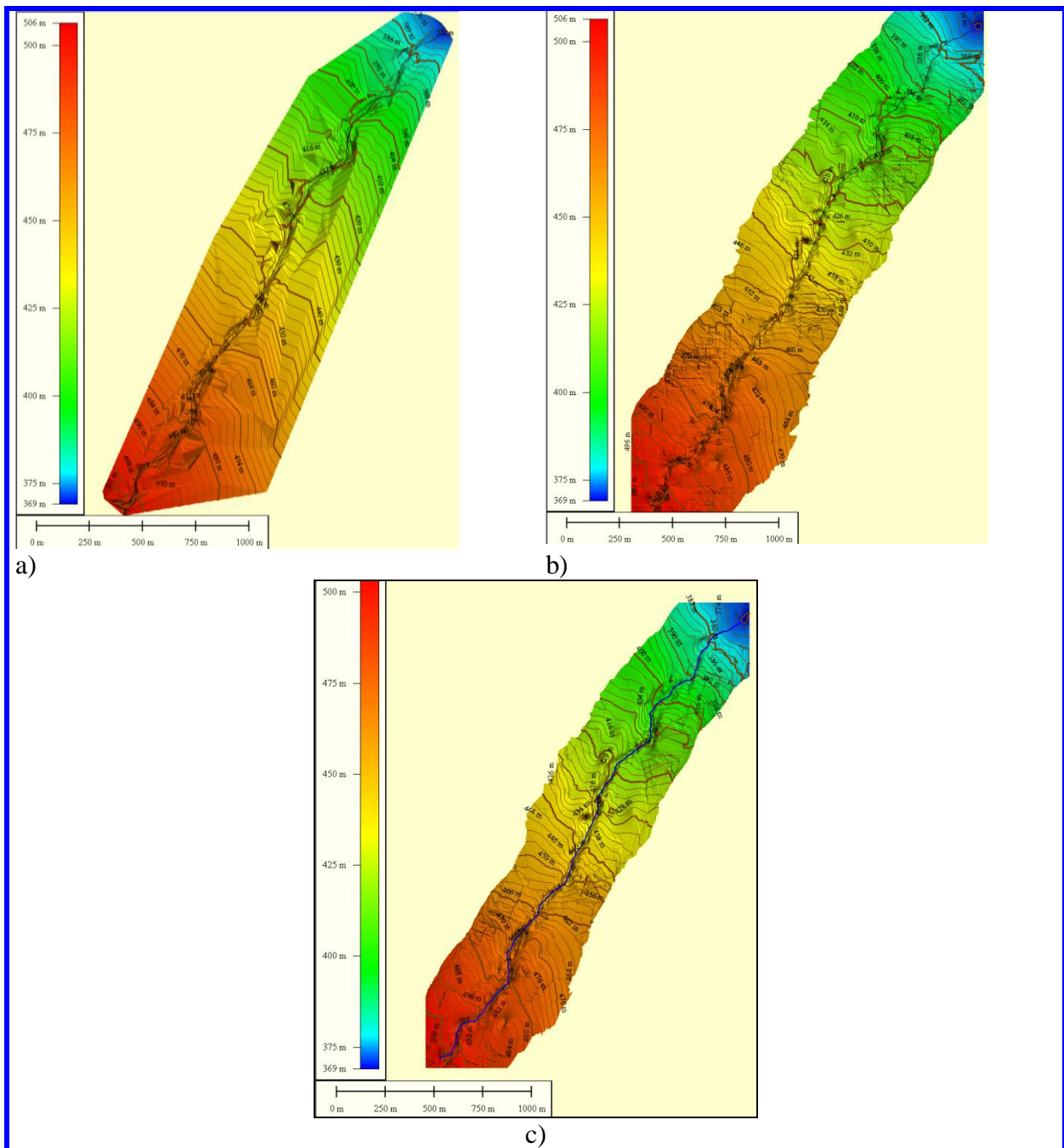


Figura 9-2 Diagrama de flujo de la metodología empleada para la generación de los mapas de inundación

Para mejorar la delimitación de las líneas de inundación entre los perfiles transversales relevados, se confeccionaron tres MDE (Figura 9.3); el primero en formato TIN , el segundo con interpolación tipo Kriging sin opciones de búsqueda y anisotropía normal y el tercero, con interpolador Kriging y los siguientes parámetros:

Radio de búsqueda: R = 200, r = 300; anisotropía = 0.6 - 25º con breakline en eje río.

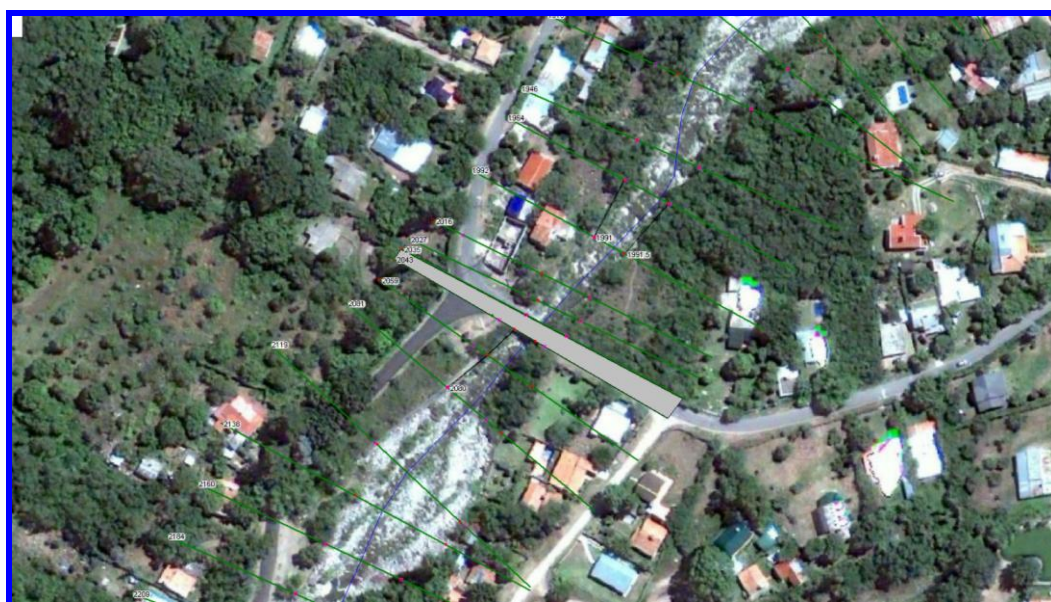
En total se procesaron 1231 puntos, y se generaron grillas con resolución espacial de 2 m.



**Figura 9-3 Modelo Digital de Elevaciones: a) TIN ; b) Kriging normal, c) Kriging optimizado**

Siguiendo el esquema planteado se consideraron como atributos vectoriales de referencia para la modelación numérica del HEC RAS al eje del río, a las márgenes izquierda y derecha, a los sentidos de flujo y a las estaciones o secciones de análisis (siguiendo los perfiles transversales) (Figura 9.4).

Una vez creados tales *shapes* se crea la topología de los ejes y de las secciones asignándoles a los vectores atributos de ubicación y posicionamiento respecto al origen del eje del río y progresivas relativas hacia el próximo perfil de aguas abajo y atributos nominales dando nombres a los tramos a considerar.



**Figura 9-4** Perfiles Transversales en HEC RAS

Exportada la información vectorial se empieza la modelación numérica dentro de HEC-RAS, por medio de la importación de la geometría a analizar. Se revisan las secciones y se asignan los coeficientes de Manning adoptados según las zonas del perfil transversal.

La topología final de análisis quedó entonces dividida en cuatro tramos, el primero entre progresivas 2912 y 2184, el tramo 2 entre progresivas 2184 y 1568, el tramo 3 entre progresivas 1568 y 829 y el tramo 4 entre progresivas 829 y 0, tal como lo indican las láminas RH01 a RH40.

## 9.2. Exportación Al SIG

Luego de revisar los resultados dentro del modelo HEC RAS, siguiendo el esquema planteado de la Figura 9.2 se procedió a la exportación de los mismos al Sistema de Información Geográfica, utilizando ArcView GIS® con las extensiones Spatial Analysis y 3D Analysis, y otras extensiones de uso libre como el HecGeoRAS.

Luego de evaluar las primeras exportaciones realizadas y analizando las configuraciones geométricas y topológicas, se consideró la resolución de análisis por medio del tamaño del pixel o unidad areal mínima con información de tirante y velocidad; por lo que el tamaño de la celda se dispuso en 5 m x 5 m, generando así mapas con una alta resolución espacial.

Para cada recurrencia (TR = 2 a 200 años) se confeccionaron los mapas de tirantes hidráulicos, y de velocidades (Figuras 9.5 y 9.6), los cuales se utilizaron para calcular los mapas de riesgo.

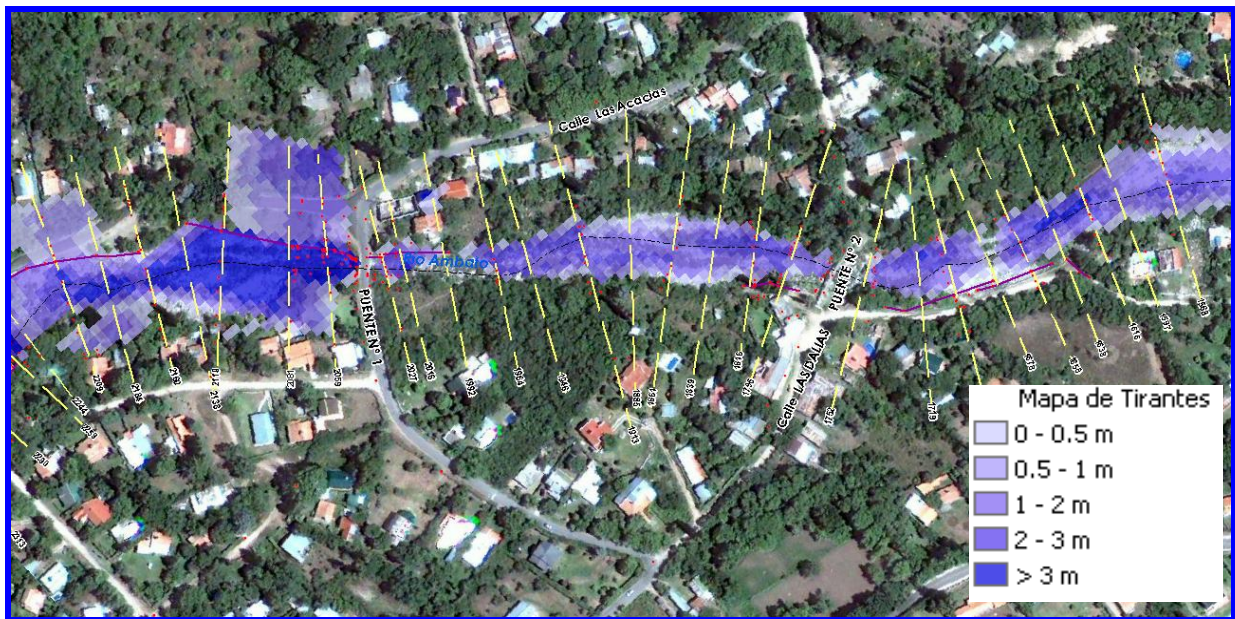


Figura 9-5 Mapa de Tirantes

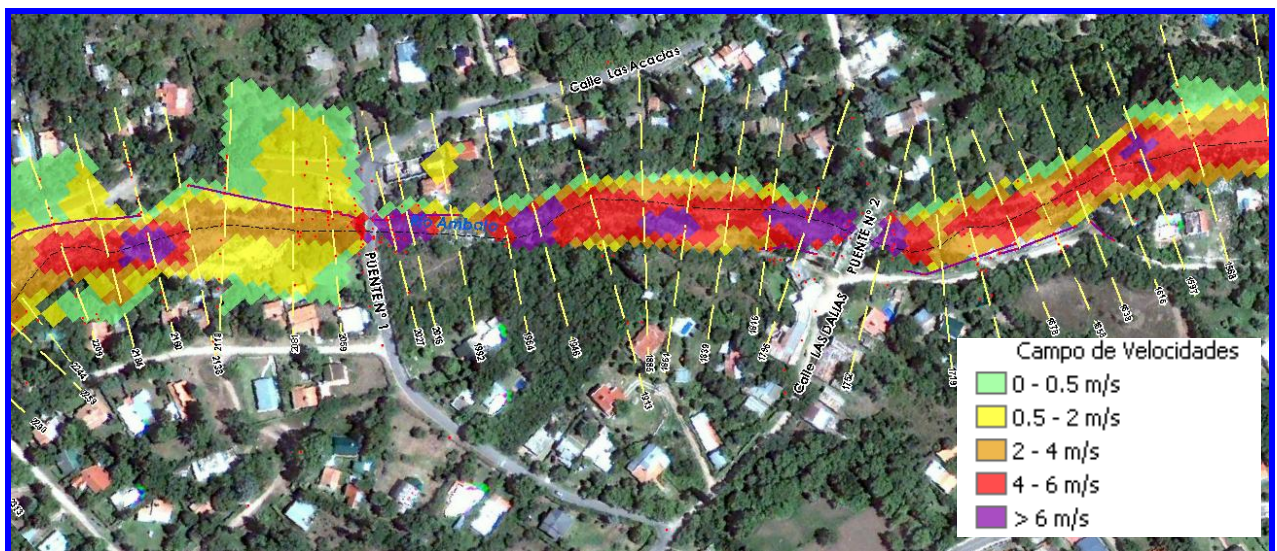


Figura 9-6 Mapa de Velocidades

### 9.3. Mapas De Inundación

Se conformó un polígono que envuelve la línea de ribera izquierda y derecha del río Ambato en el tramo estudiado. Esta línea de ribera corresponde a los resultados de la recurrencia 2 años (láminas RH01 a RH04).

El post procesamiento de la información proveniente del modelo hidráulico en conjunto con el uso del MDE permitió generar mapas raster tanto de tirantes hidráulicos (altura de agua) como de velocidades del flujo, para cada recurrencia analizada.

La delimitación de los polígonos de las áreas de inundación también se consiguió empleando para su configuración, entre perfil y perfil, las cotas de terreno del MDE, logrando un polígono irregular que se adecua al terreno.

### 9.4. Evaluación del Riesgo

Se ha definido como Índice de Riesgo al producto de la Peligrosidad, la Exposición y la Vulnerabilidad, definiendo a cada variable como:

- ✓ La **Peligrosidad** (P) ha sido representada por la probabilidad de ocurrencia del evento, es decir, la inversa del tiempo de retorno.
- ✓ La **Exposición** (E) ha sido dimensionada en función de la distancia entre la ubicación del bien o persona y la línea de inundación correspondiente a TR= 2 años (LITR=2) en proporción con la distancia máxima del área inundada, quedando:

$$E = \frac{Q_{MAX} - Dist.LR}{D_{MAX}}$$

El mapa Dist, se generó por medio de buffers desde la LITR=2, siendo DMAX. = 65m (máxima distancia de cobertura de las líneas de inundación desde LITR=2) (Figura 9.7)

- ✓ La **Vulnerabilidad** (V) ha sido representada en función del daño parcial o colapso de las personas o bienes expuestos a la presión dinámica ( $\gamma \cdot v^2$  o  $\gamma \cdot v$ ) que ejerce el agua sobre ellos:

**Tabla 9-1 Vulnerabilidad en función del daño**

Daño a:	Ecuación	Condición	Vulnerabilidad
Personas	$\gamma \cdot v^2 < 1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$ $\gamma \cdot v < 1 \text{ m}^2/\text{s}$	Estable	V = 0
	$\gamma \cdot v^2 \geq 1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$ $\gamma \cdot v \geq 1 \text{ m}^2/\text{s}$	Inestable	V = 1
Vehículos	$\gamma \cdot v \leq -0.0564 v^2 + 0.6599 v + 0.0584$	Estable	V = 0
	$\gamma \cdot v > -0.0564 v^2 + 0.6599 v + 0.0584$	Inestable	V = 1
Edificios	$\gamma \cdot v \leq 3 \text{ m}^2/\text{s}$ $v < 2 \text{ m/s}$	Inundación	V = 0
	$3 < \gamma \cdot v \leq 7 \text{ m}^2/\text{s}$ $v \geq 2 \text{ m/s}$	Daño Parcial	V = 1
	$\gamma \cdot v > 7 \text{ m}^2/\text{s}$ $v \geq 2 \text{ m/s}$	Daño Total	V = 2

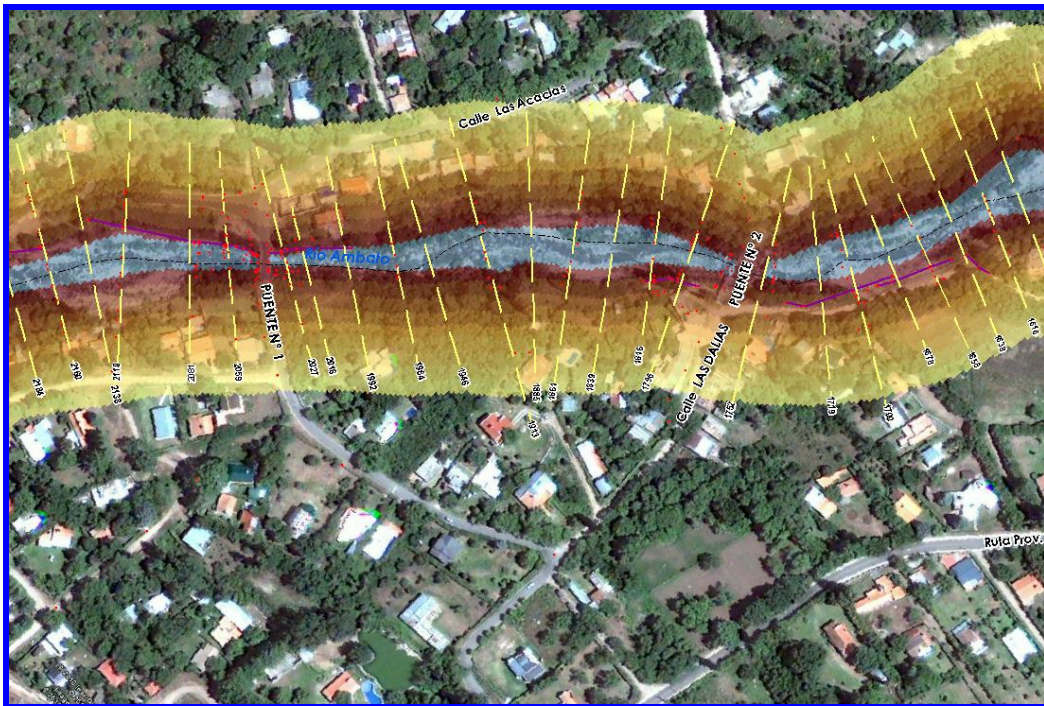


Figura 9-7 Mapa de Distancias a Línea de Inundación TR = 2 años

Adoptando esta nomenclatura es posible definir el Índice de riesgo hidráulico (R) como una magnitud que expresa la presencia simultánea, dentro de un área, de una situación de peligrosidad, de exposición y de vulnerabilidad, o sea:

$$R = P \cdot E \cdot V$$

Esta definición sintetiza muy bien el concepto de interferencia entre ambiente natural y actividad antrópica, permitiendo su inmediata representación gráfica por mapas temáticos, debido a que la vulnerabilidad y la exposición tienen intrínsecamente distribución espacial.

Pero como la vulnerabilidad potencial de cada elemento está definida utilizando variables hidráulicas que dependen de la probabilidad de ocurrencia, se confeccionaron los mapas de vulnerabilidades de personas, vehículos y edificios para las recurrencias de 25, 50, 100 y 200 (las frecuencias mayores no producen desbordes), para luego por medio de análisis de estadística local buscar el máximo por pixel. Es decir, en un pixel determinado existirán o no, valores de vulnerabilidad potencial (V) para cada recurrencia (Figura 9.8), para luego al multiplicarlo por el mapa de peligrosidad ( $P=1/TR$ ) elegir para ese pixel el máximo de los cuatro, pudiendo alguno ser nulo (Figura 9.9).



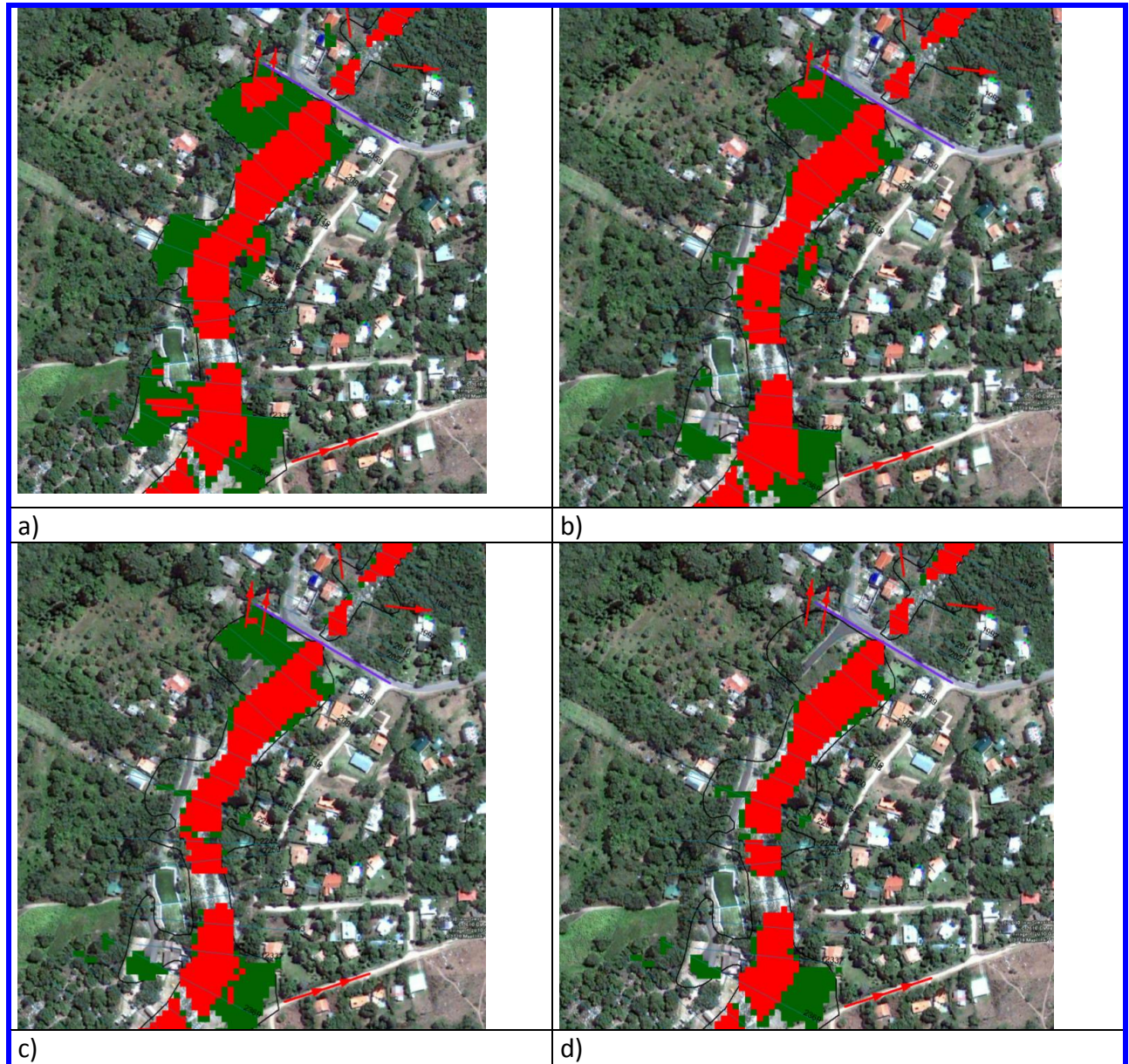


Figura 9-8 Vulnerabilidad Potencial a Personas: a) TR= 200 años, b) TR=100 años, c) TR=50 años, d) TR=25 años

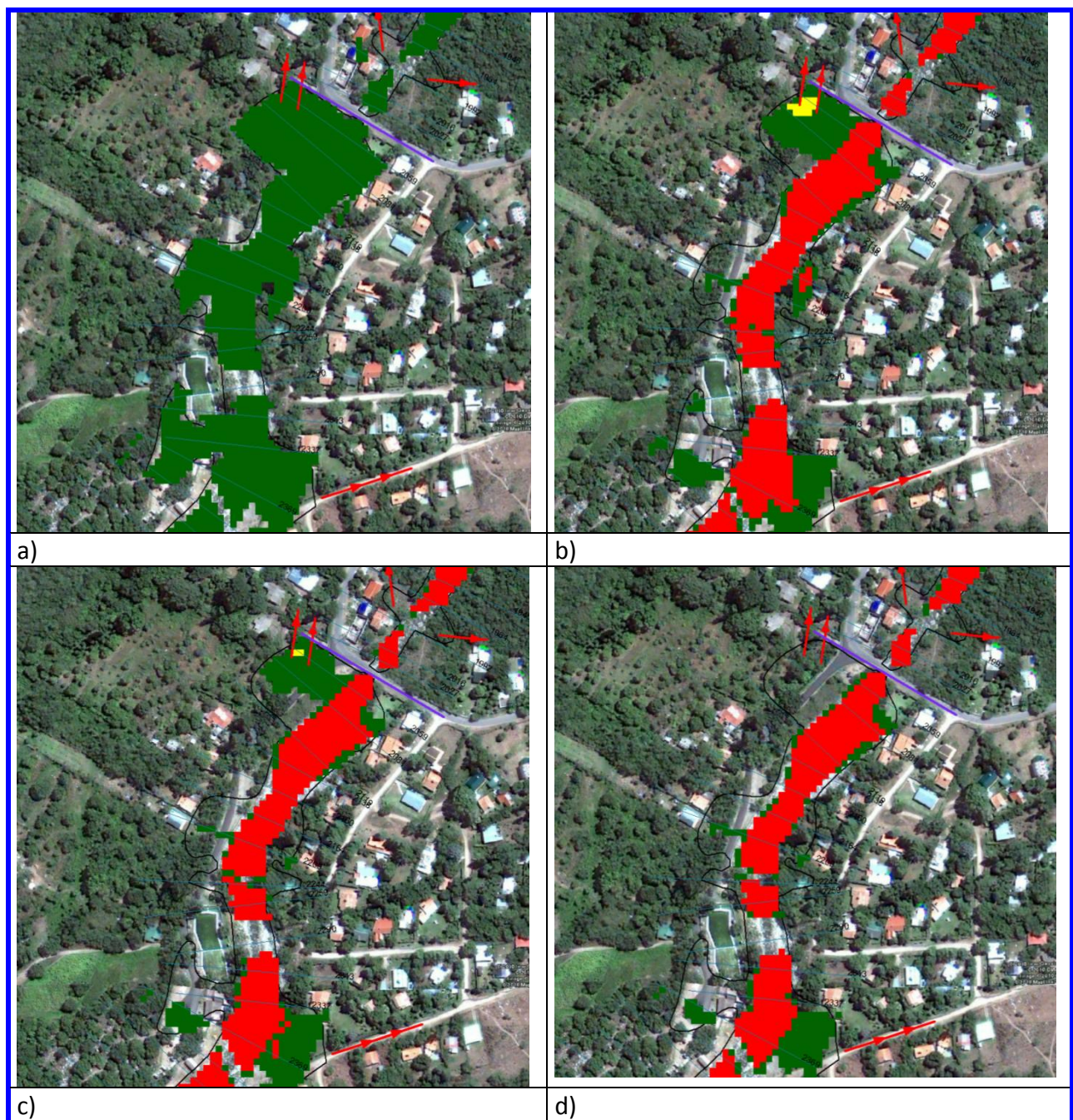


Figura 9-9 Vulnerabilidad a Personas x Peligrosidad: a) TR= 200 años, b) TR=100 años, c) TR=50 años, d) TR=25 años

Al multiplicar por medio de álgebra de mapas: el mapa de daño del elemento (valores de V) por el mapa de exposición (valores en m) y por las probabilidades de ocurrencia ( $1/TR$ ), este producto arroja un índice de riesgo (R) que se encuentra entre 0 y 0,08. (Figura 9.10) Una vez que se ha asignado el índice de riesgo (R) para cada elemento, cada área es clasificada en una de las cuatro clases de riesgo:

- ✓ R4 (**Muy Elevado**). Posibles pérdidas de vidas humanas y lesiones graves a las personas, daños graves a los edificios y a la infraestructura, daños al patrimonio ambiental, destrucción de actividades socioeconómicas. (Rango  $>0,03$ )

- ✓ R3 (**Elevado**). Posibles problemas respecto a la seguridad de las personas, daños funcionales a los edificios y a la infraestructura, con consecuente inhabilitación de los mismos y la interrupción de las actividades socioeconómicas, daños al patrimonio ambiental. (Rango de 0,01 a 0,03)
- ✓ R2 (**Medio**). Posibles daños menores a los edificios, a la infraestructura y al patrimonio ambiental que no perjudican la seguridad de las personas, la inhabilitación de los edificios y la funcionalidad de las actividades socioeconómicas. (Rango de 0.002 a 0,01)
- ✓ R1 (**Moderado**). Los daños sociales, económicos y al patrimonio ambiental son marginales. (Rango < 0.002)

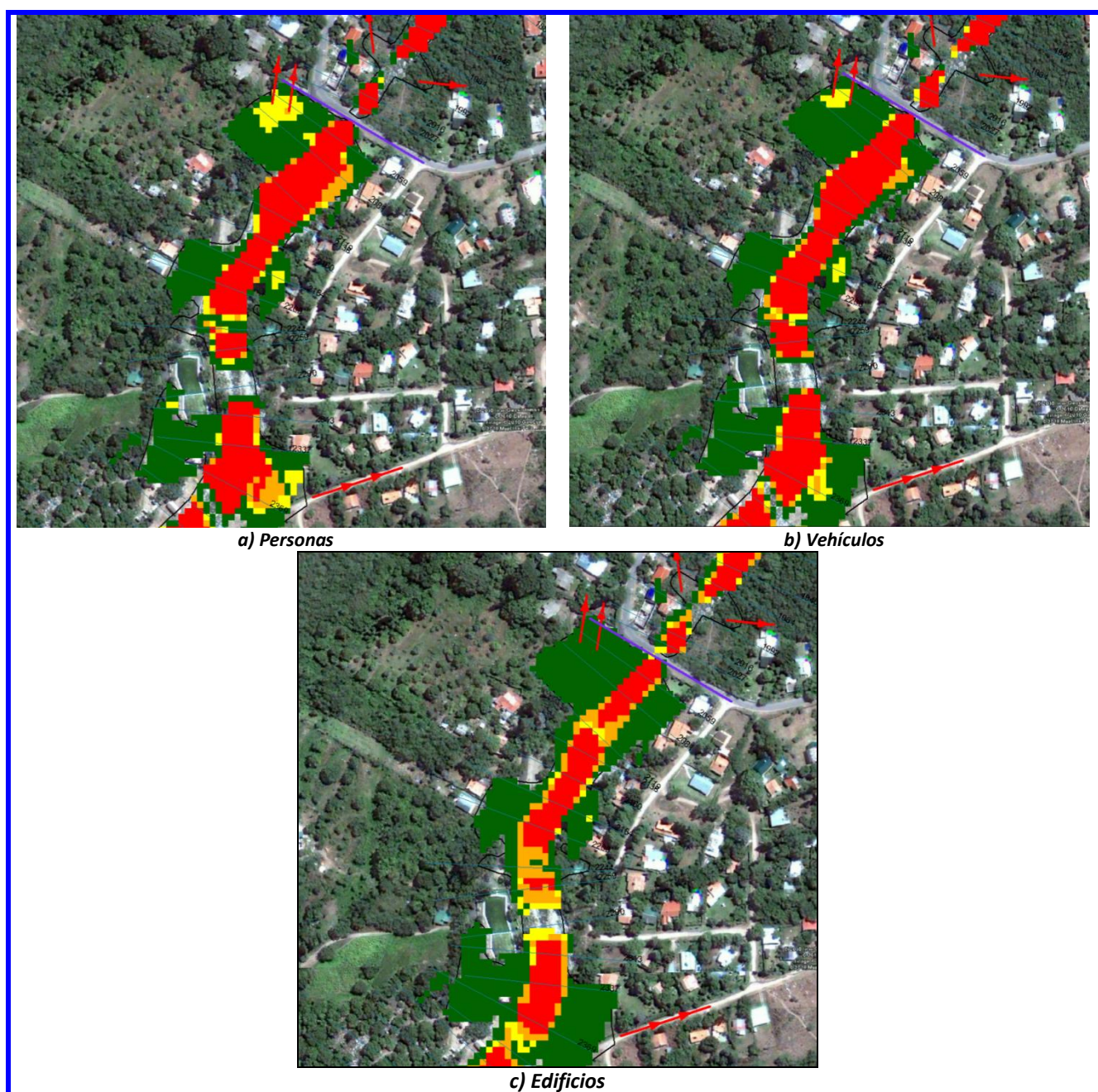


Figura 9-10 Mapa de Riesgo

## 9.5. Resultados

La demarcación de las áreas de riesgo hídrico se puede visualizar en los mapas:

- ✓ Riesgo hídrico a personas mapas RH29 a RH32
- ✓ Riesgo hídrico a vehículos mapas RH33 a RH36
- ✓ Riesgo hídrico a edificios mapas RH37 a RH40

Es notable que son muy pocos los casos de riesgo existentes en las planicies inundables, siendo aquellos referidos a las personas los que tienen mayor cantidad, debido a la obviamente mayor vulnerabilidad frente a vehículos y edificios.

Es de importante mención que al no contar con un mayor detalle topográfico de las planicies inundables no se ha podido establecer el riesgo hídrico que generan los desbordes laterales ya que esa falta de información impide obtener resultados de profundidad y velocidad del agua.

## 10. RECOMENDACIONES DE MEDIDAS DE MITIGACION DE INUNDACIONES

Considerando que existe una estrecha relación entre la reducción de la vulnerabilidad a inundaciones, con la aplicación de los principios del manejo de cuencas hidrográficas en el contexto del desarrollo sostenible, y que la cuenca hidrográfica es una unidad efectiva para la planificación y el ordenamiento territorial, se recomienda lo siguiente:

a) Considerar las siguientes medidas no estructurales:

- ✓ la zonificación y el ordenamiento territorial
- ✓ demarcación del deslinde público del privado (línea de ribera)
- ✓ restricciones al uso del suelo
- ✓ implementación de sistemas de alerta en tiempo real
- ✓ preparación de planes de contingencia por parte de organismos vinculados a la Defensa Civil
- ✓ la formación y capacitación de las comunidades en la preparación para enfrentar adecuadamente la contingencia.
- ✓ concientizar a la población sobre que las soluciones estructurales que se adopten no tienen riesgo cero, siempre existe un evento que puede superar al de diseño; esto es que las soluciones estructurales (por ej. defensas) no aumenten la vulnerabilidad de las áreas defendidas al crear una falsa sensación de seguridad total.

b) Considerar las siguientes medidas estructurales:

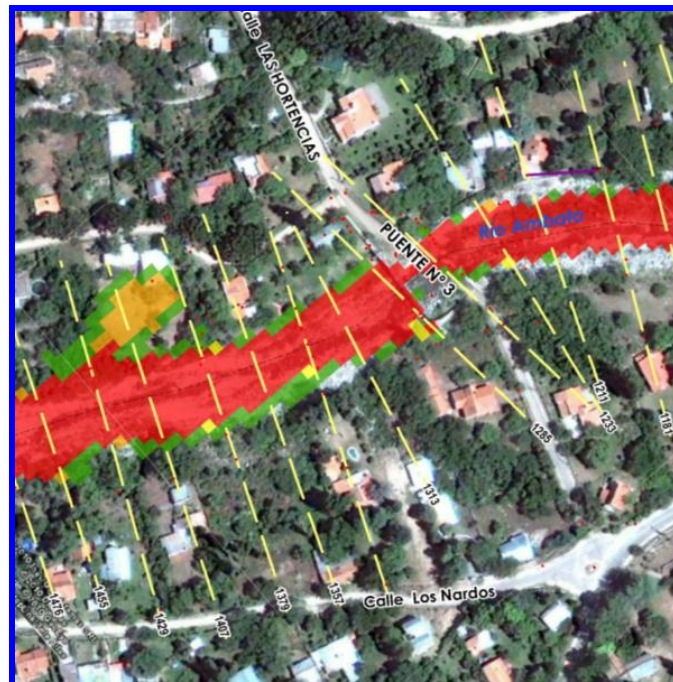
- ✓ diseños alternativos de construcción de infraestructura y vivienda para resistir a los efectos producidos por las inundaciones
- ✓ defensas contra crecidas
- ✓ corrección de torrentes

### 10.1. Propuesta de defensas marginales en el río Ambato

Los estándares de diseño de defensas marginales indican que se le debería dar al cauce del río Ambato una capacidad suficiente para poder conducir el caudal de TR = 100 años,  $481 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin embargo existe la restricción de que los puentes sean sobrepasados con su consiguiente colapso como se expone en 8.3.2. Los caudales de crecidas adicionan una significativa sollicitación por el empuje hidrodinámico sobre los puentes que pueden ocasionar el vuelco del tablero del puente y la falla estructural del mismo.

Con esta premisa es que se propuso que solamente habría que defender las zonas de planicie inundable con riesgo hídrico significativo a partir de las determinaciones explicadas en 9.4.

Observando las láminas de riesgo hídrico (Láminas RH 29 a 40) y considerando que el riesgo hídrico a personas es el que muestra una mayor vulnerabilidad, y por lo tanto un mayor interés en proteger, es que se seleccionó la zona comprendida entre las progresivas 1407 y 1379 (Figura 10.1) para ubicar una defensa marginal ya que se puede observar la señalización de riesgo hídrico elevado en la Lámina N° RH 31.



ocurrencia, luego como consecuencia de esa naturaleza aleatoria, existen incertidumbres inherentes a esos procesos que se manifiestan como *riesgo hidrológico*, que es el riesgo de que el evento de diseño (con un *TR* asociado) de una obra hidráulica sea sobrepasado en un período *n* considerado (por ej. la vida útil de la obra). En el caso que nos ocupa se puede calcular el riesgo hidrológico como:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{100}\right)^{50} = 39.5\%$$

es decir que la crecida de *TR* = 100 años tiene un riesgo de que se produzca en los próximos 50 años de 39,5%, el cual es un riesgo aceptable de acuerdo a los costos involucrados, siempre y cuando no se pierdan vidas humanas por la falla de la obra, ya que se considera que existen acciones de tipo no estructural (por ej. sistema de alerta, plan de contingencia, etc) que disminuyen el riesgo de tales pérdidas.

Una cuestión de fundamental importancia en el diseño de defensas costeras fluviales es la determinación de la revancha, considerada ésta como la altura existente entre la superficie libre de agua en el cauce y el coronamiento de la defensa.

Luego de una extensa revisión bibliográfica sobre el tema se decidió asignarle al coronamiento de la defensa la cota correspondiente a la superficie libre de agua producida por la crecida de *TR* = 200 años. Esta decisión está fundamentada en las siguientes consideraciones:

- ✓ el *TR* = 200 años corresponde a un error de 11% (Linsley, R.K., 1986) en la estimación del caudal pico correspondiente a *TR* = 100 años. Justamente la diferencia que existe entre los caudales de recurrencias 100 y 200 años en el río Ambato es de 15%; luego consecuentemente se cubre el 11% de incertidumbre en la determinación del caudal pico de la crecida de *TR* = 100 años con la cota de coronamiento coincidente con el evento de 200 años
- ✓ haciendo la cota de coronamiento de la defensa igual al nivel de agua que corresponde a la crecida de *TR* = 200 años se disminuye el riesgo de ocurrencia en los próximos 50 años de 39,5% a 22,2%

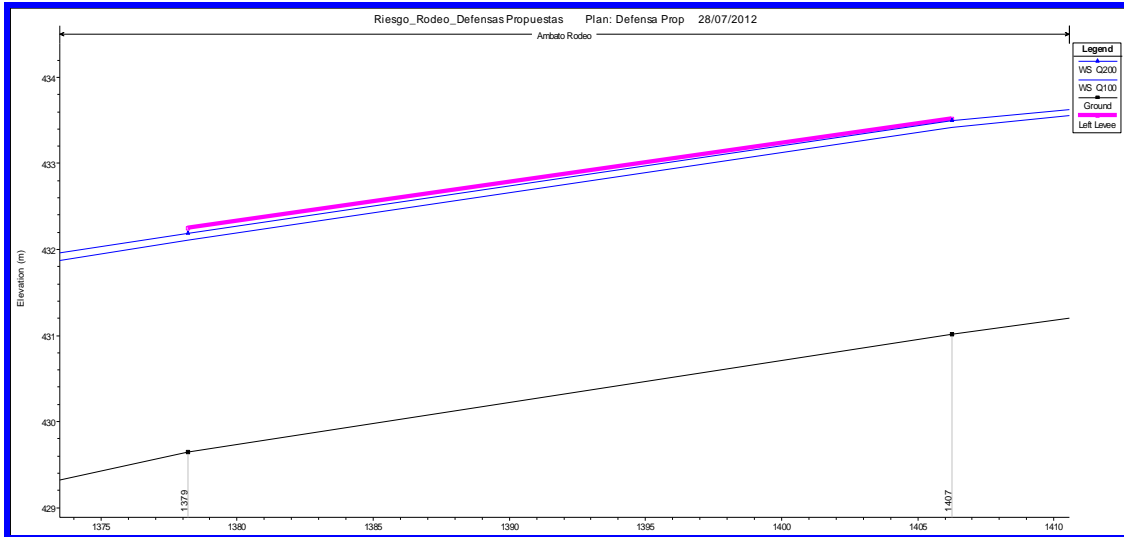
$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{200}\right)^{50} = 22.2\%$$

- ✓ en la publicación (U.S. National Research Council, 2000) se expresa que una revancha de 0,90 m para una defensa diseñada con *TR* = 100 años (norma habitual en U.S.A.) implica en promedio reducir el riesgo a aproximadamente 1/230 por año. Esto implica que para U.S.A. una recurrencia del orden de 200 años es apropiada para considerar la revancha.

En la Figura 10.2 se puede apreciar el tramo de defensa necesario con las progresivas y cotas de coronamiento especificadas en la Tabla 10.1.

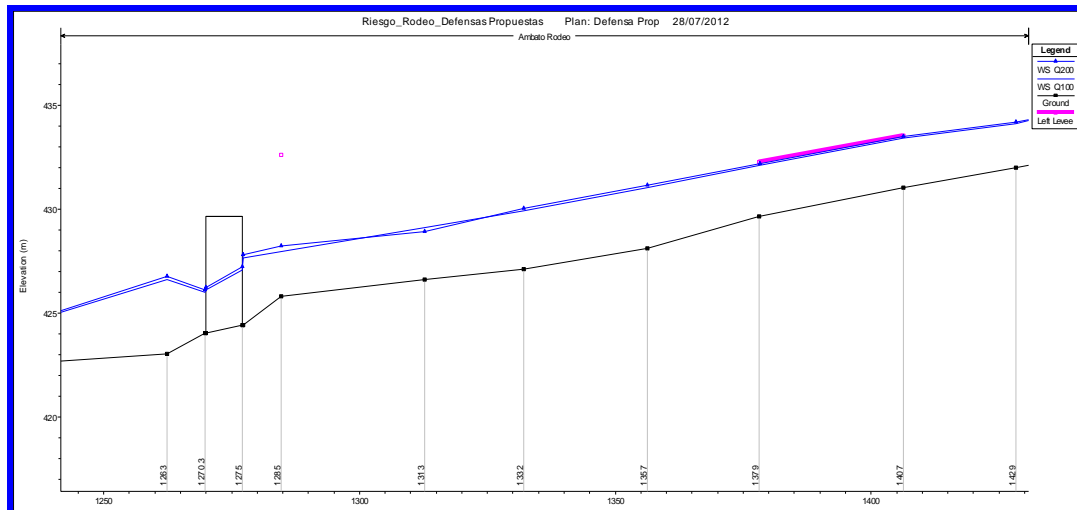
**Tabla 10-1 Coronamiento de defensa marginal**

Progresiva	Estación (margen izq.)	Cota
1407	40.00	433.52
1379	52.46	432.25



**Figura 10-2 Defensa marginal entre progresivas 1407 y 1379**

Es de resaltar que la ubicación de esta defensa no afecta al funcionamiento hidráulico del Puente 3 (calle Las Hortencias) como se puede apreciar en la Figura 10.3.



**Figura 10-3 Funcionamiento hidráulico de defensa marginal entre progresivas 1407 y 1379 y Puente 3 (calle Las Hortencias) para recurrencias de 100 y 200 años**

## 10.2. Estudios en la alta cuenca

Teniendo en cuenta el tamaño de los grandes bloques de roca, que se observan en el cauce del río en las inmediaciones de la ciudad de Rodeo, sería recomendable realizar un estudio geológico de la cuenca superior relacionado con las características hidrológicas de la cuenca alta, con el fin de determinar el aporte de los materiales sólidos de gran volumen presentes en el cauce. En la ejecución del estudio se deberían contemplar las siguientes actividades:

- ✓ Análisis y mapeo de las unidades geológicas aflorantes en superficie, así como también la caracterización del grado de alteración y meteorización de las rocas participantes.
- ✓ A partir del mapa de pendientes de la cuenca alta, realizado desde un modelo digital de elevaciones (DEM), determinar las pendientes críticas a partir de un valor umbral, que permita definir las áreas de mayor pendiente, que, cruzadas con el mapa geológico de rocas con mayor alteración y meteorización, permitan establecer los sectores con mayor riesgo y susceptibilidad de desmoronamiento y deslizamiento de material rocoso, cercanas al cauce del río.
- ✓ Relacionar las secciones con mayor riesgo de aporte de los grandes bloques de roca, con los resultados de los caudales obtenidos en la modelación hidrológica, para los distintos tiempos de recurrencia utilizados
- ✓ Determinar la ubicación óptima de obras de retención de materiales sólidos de gran volumen como las que se pueden apreciar en la fotografías de las Figuras 10.4 a 10.8.



**Figura 10-4** Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen





*Figura 10-5 Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen*



*Figura 10-6 Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen*



*Figura 10-7 Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen*



*Figura 10-8 Obras de retención de materiales sólidos de gran volumen*

## **11. CONCLUSIONES**

Este estudio hidrológico-hidráulico para determinar el riesgo hídrico del Río Ambato en la localidad de El Rodeo fue llevado a cabo utilizando modelación matemática que no pudo ser calibrada ni validada con información histórica, siendo un típico caso de aplicación en cuenca sin datos.

Sin embargo se ha podido sustentar el orden de los valores de los resultados de la modelación matemática en función de “rastros” que ha dejado el funcionamiento hídrico de este sistema:

- ✓ El material de arrastre de gran calibre que existe en el cauce del río permitió establecer el orden de los caudales necesarios para poder realizar el traslado de ese material convalidando así el orden de magnitud de los caudales resultantes de la aplicación del modelo ARHymo.
- ✓ La aplicación del modelo HEC-RAS permitió establecer que para la crecida media (TR= 2 años) no se producían desbordes en el cauce del Río Ambato, lo cual convalida la respuesta geomorfológica del sistema a la acción fluvial de tal crecida, dando validez también a la determinación de la precipitación con tal recurrencia.

Las corridas del modelo HEC-RAS han permitido evidenciar:

- ✓ Los desbordes del cauce que se generan con crecidas de TR= 5 años y superiores
- ✓ Que tales desbordes benefician a la estabilidad de los puentes ya que si no fuera así serían altamente vulnerables
- ✓ Las planicies inundables tienen muy pocos casos de áreas de riesgo hídrico

- ✓ La instalación de defensas laterales para evitar los desbordes aliviaría el riesgo hídrico de las zonas afectadas pero simultáneamente afectaría a la estabilidad de los puentes
- ✓ La necesidad de una defensa lateral para mitigar un área de riesgo hídrico elevado

Se han recomendado una serie de medidas no-estructurales y estructurales que son congruentes en la mitigación del riesgo hídrico de las cuales son interesantes de resaltar:

- ✓ Una adecuada planificación del uso del suelo utilizando como base los mapas de riesgo hídrico
- ✓ La posibilidad de establecer un sistema de alerta hidrológico en la cuenca en base a estaciones pluviográficas de transmisión en tiempo real considerando que el tiempo de concentración de la cuenca es del orden de 50 minutos
- ✓ La realización de estudios y obras en la alta cuenca del Río Ambato en relación con el transporte de material de arrastre de gran tamaño

## 12. REFERENCIAS

- ❑ Ayala-Carcedo, F.J. “*La Ordenación del Territorio en la prevención de catástrofes naturales y tecnológicas. Bases para un procedimiento técnico-administrativo de evaluación de riesgos para la población*”. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 30, 37-50, 2001
- ❑ Barnes, H. H. Jr. “*Roughness Characteristics Of Natural Channels*”. U.S. Geological Survey Water - Supply Paper 1849, 1977.
- ❑ Burgos, V. H. (2005) “*Modelación Hidrológica de Cuencas Piedemontanas. Uso de Sistemas de Información Geográfica en Hidrología Superficial*” XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza
- ❑ Burgos, V. H. (2008) “*Estimación de la distribución espacial del Número de Curva en cuencas piedemontanas del Gran Mendoza aplicando técnicas SIG*” en Workshop Internacional de Aplicaciones de SIG en Hidrología, FICH Univ. Nac. del Litoral.
- ❑ Cabrera, Angel L (1994): *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Regiones Fitogeográficas. Tomo II. Primera Reimpresión*. Editorial ACME. Buenos Aires.
- ❑ Cabrera, Angel L. y A. WILLINK, (1973): *Biogeografía de América Latina*. OEA.
- ❑ Cabrera, Angel L., (1976): *Regiones Fitogeográficas Argentinas*. Fasc. 1. Tomo II. Enc. Arg. de Agr. y Jard. Ed. ACME. Buenos Aires.
- ❑ Convenio CFI-INCYTH. (1994) “*Acta Complementaria Nº1. Estudios Hidrológicos e Hidráulicos en la Cuenca del Arroyo Fariñango*”. Provincia de Catamarca. Informe Final, marzo 1994.
- ❑ Crichton D (1999) The risk triangle. In: Ingleton J (ed) *Natural disaster management*. Tudor Rose, London
- ❑ de la Orden, E.A. ; A. Quiroga, D. Ribera Justiniano, M.C. Morlans (2006) “*Efecto del sobrepastoreo en un pastizal de altura. Cumbres de Humaya. Catamarca. Argentina*” *Rev. Ecosistemas* 15 (3): 142-147. Sept.2006.
- ❑ Dirección Provincial de Planificación Subsecretaría de Planificación. (2007) “*Plan Estratégico Provincial (PET)*”, Secretaría General de Gobernación. Catamarca.
- ❑ ERSDAC, Earth Remote Sensing Data Analysis Center (2009): “*ASTER GDEM*”. Web site: <http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/index.html>

- ❑ Eulliadés, P.; Vénere, M. (2003) "Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros" Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing., Vol 19,1,33-44 . ISSN 0213-1315
- ❑ Fattorelli, S., Fernández, P.C. (2007) Diseño Hidrológico, Ed. Zeta Editores
- ❑ Felicísimo, A. M. (1994) Modelos Digitales de Terreno, Ed. Pentalfa-Oviedo
- ❑ Felicísimo, Angel M. (1994) Modelos Digitales de Terreno, Ed. Pentalfa-Oviedo
- ❑ Fernández Díez, P. (2000) "Mecánica de Fluidos". Univ. de Cantabria, España. (<http://es.libros.redsauce.net/index.php?folderID=10>) visto en Nov. 2011.
- ❑ Fornero L.A., A. Pavese, J. Maza, D. Vega. (2002) "Actualización del Modelo Hidrológico ArHymo. Libro de Resúmenes del XIX Congreso Nacional del Agua" (ISBN 987-20378-0-9), págs. 49-50 y en CD (ISBN 987-20378-1-7) Trabajo Nº 14 de la Comisión 2. Carlos Paz, Córdoba. 2002
- ❑ González Bonorino, F. (1978). Descripción Geológica de la Hoja 14f. San Fernando del Valle de Catamarca (Provincias de Catamarca y Tucumán). Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. En Boletín Nº 160. Ministerio de Economía. Secretaría de Estado y Minería. Servicio Geológico Nacional. Buenos Aires.
- ❑ HEC-GeoHMS Hydrologic Engineering Center Geospatial Hydrologic Modeling Extension, (2000) "User's Manual" US Army Corps of Engineers .
- ❑ HEC-GeoHMS Hydrologic Engineering Center Geospatial Hydrologic Modeling Extension, (2000) "User's Manual" US Army Corps of Engineers.
- ❑ Jarrett, R.D. Hydraulic of high gradient streams. J. Hydraul. Eng. 110 (11), (1519–1539). 1984
- ❑ Kumar, P., Guttarp, P., Foufoula-Georgiou. E. (1994) "A probability weighted moment test to assess simple scaling". Stochastic Hydrology and Hydraulics. 8, 173-183.
- ❑ Landwehr, J.M., Matalas, N.C., Wallis, J.R. (1979) "Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameter and quantiles". Water Resource. Res. 15(5),1055–1063
- ❑ Linsley, R.K. "Flood estimates: how good are they?" Water Resources Research, Vol.22, Nº9, Pages 1595-1695. Aug, 1986.
- ❑ López Alonso, R.; J. Barragán Fernández y M.A. Colomer Cugat (2008). "Predicción de la velocidad media del flujo en ríos de montaña". Ingeniería del Agua, Vol. 15, No 2, Junio 2008.
- ❑ Maidment, D.R. (1992) Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York.
- ❑ Maza J.A., V. Burgos "Delimitación de áreas inundables por el Río Blanco en la Av. Los Cóndores, Potrerillos, Mendoza". Informe Final. Convenio Ministerio de Amb. y Obras Públicas de Mendoza-INA. IT Nº 77 – CRA. 2006
- ❑ METI/NASA (2009). ASTER Global Digital Elevation Model by Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- ❑ METI/NASA (2009). ASTER Global Digital Elevation Model by Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- ❑ Morláns, María y Guichon B.A (1994) "Reconocimiento ecológico de la provincia de Catamarca I: Valle de Catamarca. Vegetación y fisiografía" Universidad Nacional de Catamarca.
- ❑ Morláns, María (1995) "Regiones naturales de Catamarca. Provincias Geológicas y Provincias Fitogeográficas" Rev. Ciencia y Técnica. UNCa. Secretaría de Investigación. Vol. II. Nº2. Año 1.
- ❑ Nanía, L.S., Gómez Valentín, M. (2009) "Ingeniería Hidrológica", Ed. Grupo Editorial Universitario

- ❑ Ogas, R.R., et al. (1994). *Estudio de Suelos. Informe Final. Etapa I. Estudios Básicos. Estudio Integral del Sistema Pirquitas y Manejo de la Subcuenca del Río Los Puestos*. Convenio C.F.I. - Pcia. de Catamarca. 120 pp
- ❑ Páez, María S. (2005) *“Formación de microrelieves y procesos de remoción en masa en la subcuenca del río Las Juntas Ambato, Catamarca”* Año 5 - Vol 1 - Número 6 Rev. Proyección 6. ISSN: 1852-0006
- ❑ Palmieri, C. N.; et al (2005) *“Caracterización hidroclimática de siete localidades del departamento Ambato. Provincia de Catamarca. Argentina.”* Rev. CIZAS ISSN 1515-0453 Vol.6, Núm. 1 y 2. UNCa
- ❑ Pasotti, P. ; Canoba, C. ; Albert, O. (1973) *“Aporte a la geología de las Sierras Pampeanas de la Provincia de Catamarca (Ambato, Gracian, Ancasti)”* Publicaciones LIX de la Univ. Nac. de Rosario.
- ❑ Quiroga, A., Correa, R.J. y Watkins, P.H. (2001). *Evaluación de la Calidad Forrajera Otoñal del Pasto Punilla (Alchemilla pinnata Ruiz et Pav.) en el Pastizal de Neblina de la Cuenca del Río Los Puestos*. Departamento Ambato. Catamarca. Revista de Ciencia y Técnica VII(10): 55-62.
- ❑ Tarboton, D. y Ames, D. (2001) *“Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data”* World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida
- ❑ Tarboton, D. y Ames, D. (2001) *“Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data”* World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida
- ❑ U.S. Hydrologic Engineering Center. *“HEC-RAS River Analysis System. User’s Manual”* Version 4.1.0, Jan, 2010.
- ❑ U.S. National Research Council *“Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies”*. Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction, Water Science and Technology Board. National Academy Press, 2000
- ❑ Werner M. (2001). Shuttle Radar Topography Mission. Mission overview. Journal of Telecommunication 55, 75-79.
- ❑ Yu, P., Yang, T., Lin, C. (2004) *“Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall”* Journal of Hydrology. 295, 108-123.