

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA**  
**Escuela de Carreras de Posgrado y Educación Continua:**  
**Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales**

*Tesis propuesta para la carrera de:*

**DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**(MENCION EN HIDRÁULICA)**

*Título:*

**ESTIMACIÓN DE**  
**CRECIDAS MÁXIMAS EN**  
**PAISAJE DE MESETA**

*Autor:*

**Juan SERRA**

**Director de Tesis: Dra. Nora Pouey**

**Rosario, Rca. Argentina, Octubre de 2006**

Universidad Nacional de Rosario  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Escuela de Carreras de Postgrado y Educación Continua:  
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

*Disciplina:*

Recursos Hídricos / Hidrología

*Área Temática:*

Estimación de crecidas

*Tema:*

Crecidas máximas en zona de terrazas y clima árido a semiárido

*Título de Tesis:*

**ESTIMACIÓN DE CRECIDAS MÁXIMAS  
EN PAISAJE DE MESETA**

*Autor:*

Juan Serra (\*)

(\*) Ramón Juan José Serra. Ingeniero en  
Recursos Hídricos, (U. N. Litoral 1978),  
Magíster en Recursos Hídricos en Zona de  
Llanura (U. N. Rosario, 2003)

Rosario, Rca. Argentina, Octubre de 2006

“... El año 1899 fue de verdad ‘una hija de las tempestades’ para la colonia. Se sabía que el valle del Chubut estaba expuesto a inundaciones en tiempos idos, porque se hallaban huellas evidentes de ello en la formación de los antiguos lechos de río y los zanjones que surcaban el valle. Pero se pensaba que al cerrar los boquetes donde ellos salían del río, se podían dominar las aguas del mismo, cosa que siguiera su cauce. No había ningún fundamento a esta suposición. Había inundación en el año 1865, cuando llegó el primer contingente y desde entonces, la posibilidad de ello existía constantemente en la mente de los primeros colonos. A pesar de ello, creían éstos, como lo creyeron los que llegaron después, que bastaría con trabajar para evitar que se repitiera en el futuro. Más, ¡pobre de ellos! Jamás soñaron con la avalancha devastadora que llegó este año. ...”

Fragmento de *“A orillas del Río Chubut”*, referido a las grandes inundaciones de fines del siglo XIX en el Valle Inferior. Williams M. Hughes, (1926).

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RIASSUNTO</b>	6
<b>RESUMEN</b>	7

### *Primera Parte*

<b>Capítulo I</b>	<b>9</b>
<b>I. El Problema Torrencial en Paisaje de Meseta</b>	<b>10</b>
1.1. Motivaciones del tema elegido:	12
1.2. Área de estudios	13
2. Delimitación del problema	14
3. Finalidad. Objetivos	15
4. Hipótesis	

### **Capítulo II**

<b>II. INTRODUCCION</b>	<b>9</b>
5. Introducción general	18
6. Métodos y procedimientos conocidos para el cálculo de caudales máximos en Sistemas Hidrológicos Torrenciales	
6.1. Reseña histórica	
6.2. Algoritmos básicos en procesos hidrológicos	
6.3. La ecuación de continuidad	
6.4. Ecuaciones de momentum	
6.5. Las inundaciones	
6.6. Crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales	
7. Información de apoyo para el estudio de la problemática torrencial en la meseta patagónica	34
7.1. Tesis "Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta, en la región semiárida patagónica"; (Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura)	34
7.2. Investigaciones anteriores	34
7.3. Hidroclimatología. Estudio de precipitaciones y tormentas	35
7.4. Hidrometría	38

## *Segunda Parte*

<b>Capítulo III</b>	41
<b>III. MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS MÁXIMAS EN PM</b>	41
<b>MHIG</b>	42
8. MHIG. Desarrollo y referencias técnicas	43
8.1. Presentación	43
8.2. Reseña histórica	44
8.3. Descripción general	47
8.4. Resumen de capacidades de MHIG	49
8.5. Resumen de modelos de procesos y sub-procesos	50
8.6. Características físicas, climatológicas y funcionales de la simulación	52
8.7. Modelos y algoritmos básicos de cálculo a nivel de UEH	54
8.8. Calibración	77
8.9. Explotación	77
8.10. Prueba y validación	79
8.11. Comparación de resultados con otros modelos	88
<b>MHIG-SIG</b>	94
9. MHIG-SIG: desarrollo y referencias técnicas	95
9.1. Introducción	95
9.2. Antecedentes de MHIG-SIG. El modelo PÍXEL.	96
9.3. Procedimientos y algoritmos básicos del MHIG-SIG	97
9.4. Aplicación con DEM de SRTM	127
<b>Capítulo IV</b>	41
<b>IV. ESTIMACION DE CRECIDAS MÁXIMAS EN PAISAJE DE MESETA</b>	131
10. Marco de la investigación. Teórico. Conceptual	131
11. Sistemas hidrológicos en mesetas. Marco conceptual	132
11.1. Sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de mesetas	132
11.2. Descripción física	135
12. Procesos hidrológicos y clasificación de sistemas	137
13. Análisis de casos. Simulación hidrológica	141
13.1. Caso 1: Trelew, Cañadón del Parque Industrial de Trelew, Laguna Chiquichano (SHM)	141
13.2. Caso 2: Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2 (SHT)	156

## *Tercera Parte*

<b>Capítulo V</b>	170
<b>V. DISCUSION, RESULTADOS, CONCLUSIONES</b>	170
13. Discusión de resultados	170
13.1. En relación a los modelos MHIG y MHIG-SIG	170
13.2. En relación al Caso 1 (VIRCh-Trelew, como SHM)	172
13.3. En relación al Caso 2 (Puerto Madryn-Cuenco Aluvional N° 2, como SHT)	173
13.4. Relaciones encontradas en SHM de PM	173
13.5. Relevancia de la variabilidad espacio-temporal de la frontera y superficie tributaria de aguas superficiales	174
14. Conclusiones	176
14.1. Sumario de conclusiones	176
14.2. Sumario de contribuciones	177
14.3. Trabajos futuros	177

## **Capítulo VI**

<b>VI. SÍMBOLOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	179
1. GLOSARIO	179
2. BIBLIOGRAFIA	181
2.1. BIBLIOGRAFIA CITADA	181
2.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	184
3. INDICE DE CITAS	187

## *Apéndices*

## **Capítulo VII**

1. MHIG, Modelo Hidrológico Gaiman. Aspectos funcionales	190
1.1. Menús, sub-menús y barra de herramientas:	190
1.2. Subprogramas y funcionalidades	191
<b>RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS</b>	209

## RIASSUNTO

Questa ricerca, sistema i dati e la conoscenza dall'autore in una tesi precedente, "Metodologia integrata della valutazione delle piene in ambiente tipico delle zone di altipiano, nella regione semiarida della patagonia", ed avanza nei nuovi sviluppi in questo tema.

Il problema si riferisce alla pericolosità torrentizia nei piccoli e medi sistemi idrologici misti, con differenze e somiglianze morfo-idrologiche ai sistemi idrologici tipici di montagna, nonché ai nuovi paradigmi della idrologia di zone di pianura. L'obiettivo generale, è conoscere i processi che determinano le massime piene in questi sistemi nelle regioni di clima arido o semiarido.

La ricerca sviluppa, verifica ed applica due modelli deterministici di simulazione idrologica, uno distribuito ed un altro concentrato, come strumento dell'analisi eseguita.

Con l'utilizzo di altre applicazioni, sono analizzati più casi per confrontare l'ipotesi di variazione spazio-tempo dell'area drenata con la magnitudine della pioggia.

Dall'analisi e dai risultati ottenuti, si verifica l'ipotesi, e si trovano relazioni fra questa superficie drenata con l'intensità, durata ed ubicazione della pioggia; e di conseguenza, il suo rapporto con il tempo di ritorno, che determina la magnitudine della piena.

## RESUMEN

Esta investigación, sistematiza datos y conocimientos alcanzados por el autor en una tesis anterior, “Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta, en la región semiárida patagónica”, y avanza en nuevos desarrollos en esta temática.

El problema refiere a la amenaza torrencial en pequeños y medianos sistemas hidrológicos mixtos, con semejanzas y diferencias morfo-hidrológicas respecto a los sistemas típicos o de montaña, y los nuevos paradigmas de la hidrología de llanuras. El objetivo general, es conocer los procesos hidrológicos determinantes de las crecidas máximas en estos sistemas en regiones de clima árido o semiárido.

La investigación avanza en el desarrollo, prueba y aplicación de dos modelos de simulación hidrológica, uno agregado y otro distribuido, como herramientas del análisis que se efectúa.

Con el apoyo de otras aplicaciones, se analizan casos para contrastar la hipótesis de variación espacio-temporal del área tributaria con la magnitud de las tormentas.

Del análisis y resultados obtenidos, se verifica la hipótesis, y se encuentran relaciones entre dicha superficie tributaria con la intensidad, duración y ubicación de la tormenta. Consecuentemente, su relación con el período de retorno, determinante de la magnitud de la crecidas.

*Primera Parte*

*El Problema Torrencial,*

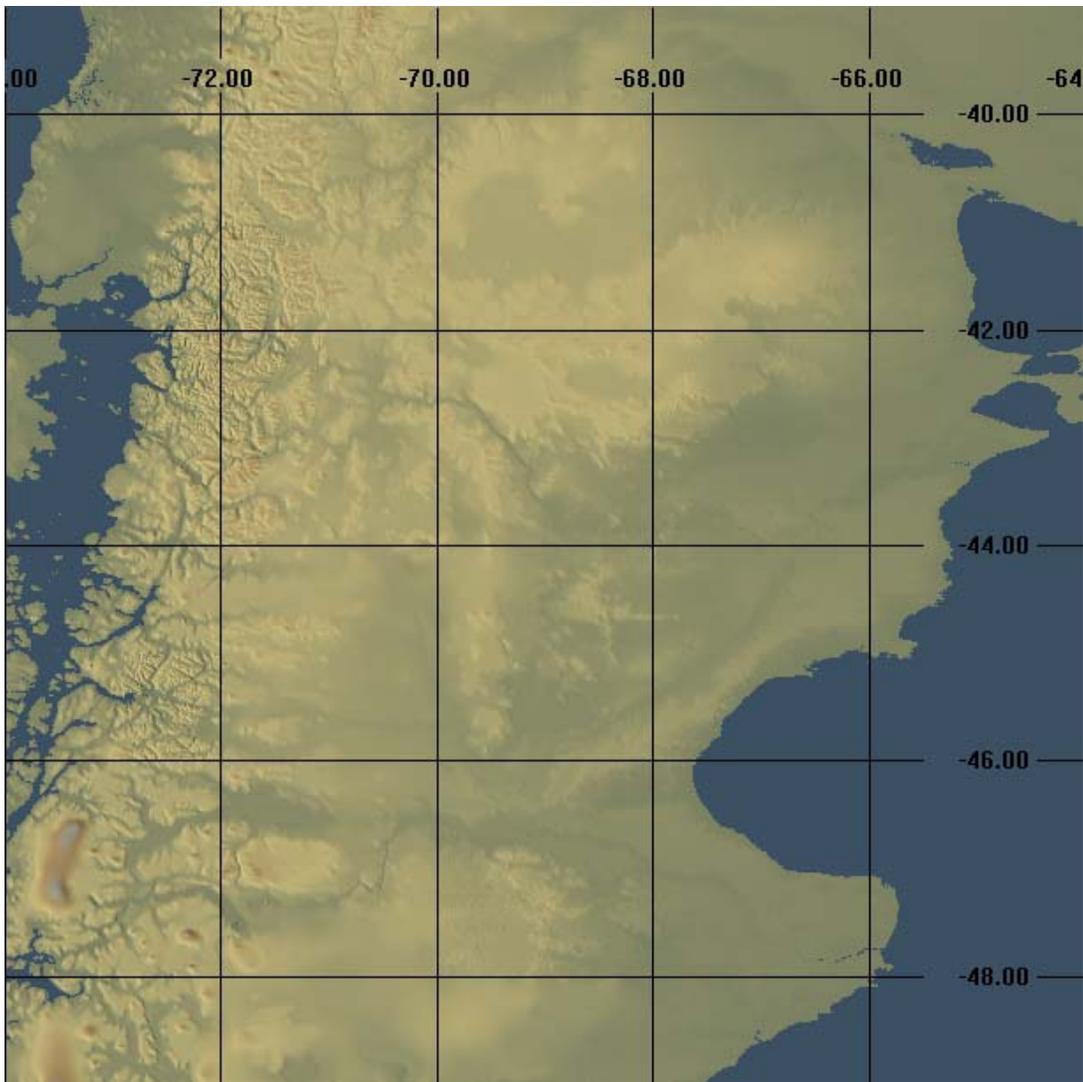
*introducción y marco general de la investigación*

**EL PROBLEMA TORRENCIAL EN  
PAISAJE DE MESETA**

## I. EL PROBLEMA TORRENCIAL EN PAISAJE DE MESETA

### 1. REGIÓN Y MOTIVACIÓN

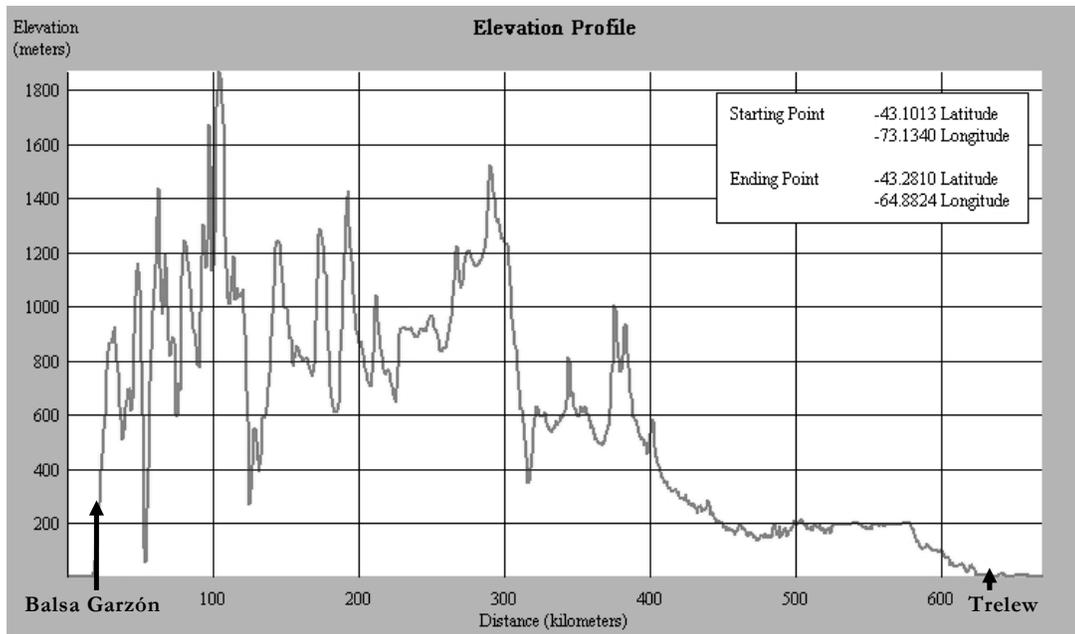
Entre la cordillera y el océano Atlántico, la región patagónica Argentina (Fig. : 1) presenta los paisajes característicos de montaña al Oeste, de extensas mesetas centrales y de costa marítima al Este. La región comprende sistemas hidrológicos exorreicos, (vertientes pacíficas y atlánticas), endorreicos, y arreicos.



*Fig. : 1. Vista MDT para la región central de Patagonia.*

Los vientos dominantes del Oeste y la Cordillera de los Andes son determinantes del régimen de lluvias (génesis orogénica). El gradiente pluviométrico es marcadamente

descendente en dirección Oeste-Este. Así, en la región central, mientras en la cordillera, supera en su base los 1000 mm anuales (Balsa Garzón), a menos de 100 km al Este (Tecka) se reduce a 290mm, para alcanzar en la meseta el orden menor a 200mm, pluviosidad que se mantiene hasta la costa (Trelew, 180 mm/año). (Fig. : 2).



**Fig. : 2. Perfil topográfico entre Balsa Garzón (límite internacional con la Rca. De Chile, en la cordillera, y el Océano Atlántico en Rawson, desembocadura el Río Chubut**

La distribución temporal de las lluvias, presenta una marcada influencia estacional, de régimen pluvio-nival, con las principales lluvias cordilleranas en el otoño y deshielos en primavera. Este elevado gradiente espacial y la variación temporal de las lluvias se manifiestan en la distribución de los excesos superficiales.

Pese a las características áridas a semiáridas, existen fenómenos meteorológicos que aunque se presenten con retornos muy elevados, son causantes de grandes crecidas torrenciales. La influencia del fenómeno ENSO, con su efecto Niño-No Niño, alterna períodos plurianuales de humedad-sequía cuya presencia y magnitud puede observarse en los registros hidrométricos y pluviométricos de mayor longitud.

Estas características climáticas generan hábitos sociales urbanos o rurales donde el hombre no convive con frecuencia con grandes crecidas, sino solo ocasionales. La Patagonia tiene una baja densidad poblacional. Pero los conglomerados urbanos se encuentran concentrados y se expanden sobre estas unidades morfológicas tan desérticas como particulares.

El desconocimiento que se tiene del régimen de crecidas de las unidades torrenciales y bajos inundables, y la falta de planificación adecuada favorecen la tendencia de mal ocupación con infraestructura urbana, y también rural, aumentando la vulnerabilidad y el riesgo hidrológico.

La ocupación de valles de ríos o grandes depresiones inundables, es una parte del problema. Otra parte, más relacionado con la línea investigativa de esta tesis, lo constituye la ocupación de cañadones y áreas deprimidas en mesetas, de bardas en la zona de contacto con los valles, o de planicies con amenaza aluvional local.

Esta problemática, constituye uno de los principales problemas hídricos que padecen las poblaciones patagónicas. Ciudades como Trelew son el paradigma de esta afirmación, donde además de los permanentes problemas en lluvias de escasa relevancia, ha soportado situaciones de emergencia hídricas extremas, como los episodios de Mayo de 1992, Abril de 1998 y Marzo de 2002.

En ríos y cuencas de importancia, que cuentan con información hidrológica y registros hidrométricos históricos, los problemas hallan solución con la aplicación de métodos convencionales de tratamiento de tipo estadístico.

Pero en pequeñas y medianas unidades hidrológicas se carece generalmente de información hidrométrica. El régimen temporario de bruscas crecidas torrenciales muy ocasionales, de corta a mediana duración pero de gran magnitud, agrega dificultad para la medición hidrométrica.

La estimación de hidrogramas y caudal máximo en estos sistemas, podrían procurar resolverse con métodos convencionales para cuencas con *escasez de datos* hidrométricos, utilizando muchas técnicas conocidas y probadas, como correlación hidrológica con cuencas vecinas, modelos o métodos hidrometeorológicos de simulación tipo *lluvia-caudal* o métodos empíricos. Pero las particularidades del PM imponen limitaciones o restricciones en la aplicación de estos métodos. En estos casos, es necesaria una mayor investigación del Hidrólogo respecto a las respuestas del sistema frente a un evento meteorológico dado.

En la tesis “Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta, en la región semiárida patagónica” (Serra, 2003), se tratan estos casos y se ha podido comprobar que tales limitaciones y restricciones encuentran factores comunes que caracterizan a determinadas unidades hidrológicas. Son las unidades propias de terraza, particularmente en su zona de contacto meseta-valle, y en clima semiárido.

### **1.1. MOTIVACIONES DEL TEMA ELEGIDO:**

El tema elegido para esta tesis, es continuador en la misma línea investigativa de proyectos precedentes, y toma de la citada tesis (Serra, 2003) parte de los trabajos futuros propuesto en sus conclusiones.

La amenaza hídrica y el riesgo hidrológico de las crecidas de “cañadones”, constituyen uno de los principales problemas hídricos regionales, padecido sobretodo por las urbanizaciones.

Comodoro Rivadavia, Trelew, Puerto Madryn, Dolavon, Gaiman, General Roca, y muchas otras ciudades patagónicas presentan problemas similares. Trelew, es un caso paradigmático por las gravísimas consecuencias sufridas durante dos eventos meteorológicos ocurridos en una misma década (1992, 1998).

La investigación está motivada en alcanzar un mayor conocimiento y dominio de técnicas para la gestión de recursos hídricos y manejo de crecidas en zona de meseta, y su posterior transferencia al medio.

## 1.2. ÁREA DE ESTUDIOS

Por la riqueza de trabajos y experiencias desarrolladas en el campo de los recursos hídricos, la región del Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh), incluido el área de Puerto Madryn, constituyen el área de estudios seleccionada para esta investigación (Fig. : 3). Sus características geomorfo-hidrológicas y el clima árido a semiárido, permiten analizar casos típicos de las terrazas patagónicas, y generalizar conclusiones a PM.

### 1.2.1. Área Temática

La *estimación de crecidas en PM*, constituye una particularidad del área temática *hidrología superficial*, de una problemática común de la región central y costera patagónica.



*Fig. : 3. Vista de la zona de estudios, en el Valle Inferior del Río Chubut (región ampliada), y ventana de exploración hidrológica con el modelo MHIG-SIG (Imagen Google Earth)*

Su desarrollo, recoge experiencias de dos décadas y media de trabajos e investigaciones, un problema de cierta complejidad en unidades hidrológicas que por sus particularidades suelen presentar dificultades de ser resuelto con técnicas y procedimientos habituales de la ingeniería.

## 2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El sumario de trabajos futuros propuesto por la tesis mencionada (Serra, 2003), en sus conclusiones, refiere a profundizar y mejorar las capacidades de dos modelos hidrológicos distribuidos, uno tipo agregado y otro distribuido, como herramientas de apoyo al análisis en PM.

El estado actual del arte, la observación y las experiencias realizadas, llevan a motivar nuevos interrogantes para este problema en SHM de PM:

- ¿Es posible verificar la existencia de casos, donde el área de aportes superficiales a un área interior cerrada (depresión, laguna), o convergente a una sección transversal de un valle o cañadón, no resulte constante y estacionaria, sino variable con la precipitación?
- De verificarse esta duda ¿es posible sostener que la forma y tamaño del área tributaria varía con la duración e intensidad de la lluvia, y la ubicación del evento meteorológico?
- En relación al interrogante anterior, ¿es posible verificar que el área tributaria de aportes superficiales guarda relación con el período de retorno de la tormenta?
- En consecuencia a ambas preguntas, ¿es posible verificar la inconsistencia y limitación del concepto de *divisoria de aguas en cuencas* en el estudio hidrológico de PM?
- Finalmente, para los casos sometidos a estudio: ¿es posible encontrar parámetros característicos de inundabilidad y torrencialidad entre el área tributaria de aportes superficiales y el período de retorno?
- Si se verifica la movilidad espacio-temporal de la frontera y el área tributaria de aportes superficiales, ¿es relevante para la ciencia hídrica y el análisis de crecidas en PM?

Las respuestas a estos interrogantes, delimitan el problema sometido a investigación, y de hallar respuesta, permitirán elevar el conocimiento del funcionamiento hidrológico y pronosticar la respuesta de SHM en PM, bajo diferentes episodios meteorológicos.

### 3. FINALIDAD. OBJETIVOS

Esta investigación, sistematiza datos y conocimientos adquiridos en la referida tesis (Serra, 2003), que trata del “Paisaje de Meseta Patagónica” y se propone alcanzar nuevos conocimientos, sobre procedimientos y técnicas para estimar crecidas máximas en terrazas, con énfasis en problemas de la región patagónica, dirigido al estudio de pequeñas y medianas unidades hidrológicas torrenciales con escasez de información hidrométrica.

Aunque una herramienta dada (modelo, selección de modelos, o su programa computacional), pueda resultar innovadora, el objeto principal de la investigación, el problema a resolver, no es la herramienta en sí misma.

Esta investigación tiene por finalidad proveer a un mayor conocimiento del funcionamiento hidrológico en *Paisaje de Meseta* (PM) en general, y de la región *patagónica* en particular (PMP).

El objetivo general, es el análisis del funcionamiento hidrológico para la determinación de crecidas máximas en pequeños y medianos Sistemas Hidrológicos Mixtos (SHM) en PM, particularmente de torrentes en ambiente de clima árido o semiárido.

Son objetivos específicos de la investigación:

- Desarrollar, verificar, aplicar modelos hidrológicos específicos para la estimación de crecidas máximas en ambientes torrenciales de PM.
- Analizar, en base a los modelos desarrollados, casos de sistemas hidrológicos torrenciales en PM.
- Analizar, para los casos seleccionados, la relación entre el área tributaria de aportes a una sección de control dada, el período de retorno de la tormenta, la amenaza hidrológica de torrencialidad e inundabilidad, las semejanzas y diferencias con los paisajes extremos de montaña y llanura (SHT y SHNT).
- Verificar, mediante simulación hidrológica, la consistencia, validez generalizada del concepto clásico de “*divisoria de aguas*” en el estudio de crecidas máximas en SHM de PM.

El desarrollo de procedimientos propuestos, se apoya en el marco teórico, y el análisis de casos y en el desarrollo de procedimientos y modelos que permitan mejorar la evaluación de la amenaza hídrica y el riesgo hidrológico de inundación en sistemas con escasez de datos hidrométricos.

#### 4. HIPÓTESIS

Estas investigaciones amplían y refuerzan las desarrolladas en la Tesis en PMP (Serra, 2003) y sus conclusiones.

De la consideración preliminar planteada, de la observación y conocimiento que se tiene del problema, surgen en relación a ***SHM en PM*** conjeturas y proposiciones que a modo de principios, dan respuesta al problema y objetivos de esta investigación, sujetas a ser comprobadas con referencias empíricas y verificadas en este trabajo:

##### **Hipótesis general:**

1) *De la variación espacio-temporal del Área tributaria:* El área de aportes superficiales, a una *sección de control* dada, o a un área interior cerrada (laguna, depresión), puede resultar dependiente de la magnitud (intensidad-duración) y ubicación de la tormenta.

##### **Hipótesis particulares:**

2) *De la Frontera Tributaria:* Para el caso precedente, la dimensión y forma de la línea de frontera tributaria que define el área de aportes superficiales guarda relación con el período de retorno de la tormenta.

3) *De la Divisoria de Aguas:* La divisoria de aguas aplicable en SHT o cuencas, resulta un concepto muy limitado para abordar problemas hidrológicos de determinación de crecidas máximas en PM, pudiendo derivar en el subdimensionamiento del *caudal de diseño* en algunos casos, o en el sobredimensionamiento en otros.

## INTRODUCCIÓN

## II. INTRODUCCIÓN

### 5. INTRODUCCIÓN GENERAL

Esta tesis, aborda una misma línea de investigación sobre hidrología en terrazas, desarrollada en la tesis “*Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta en la región semiárida patagónica*”, (Serra, 2003).

En los años recientes -desde hace cuatro décadas-, la ciencia hídrica incorpora al conocimiento hidrológico un nuevo paradigma, al diferenciar los paisajes extremos de *llanura* y de *montaña*. Desde entonces, la investigación y estudio hidrológicos han volcado esfuerzos en profundizar el conocimiento que se tiene de los denominados *Sistema Hidrológico Típico* (SHT), o *cuenca*, y *Sistema Hidrológico No Típico*, o *Llanura*.

La región central y costera de la Patagonia, en el sur Argentino, presenta sistemas hídricos que alternan en su extensa geografía la *montaña*, la *meseta*, el *valle fluvial* y la *costa marítima*. En sus valles de ríos -de *montaña* o de *meseta*- es donde se concentra la mayor parte de las urbanizaciones, de poblacionales rurales, de explotaciones en áreas bajo riego.

En la *meseta*, y particularmente en la zona de contacto con una planicie fluvial, o entre dos niveles de terrazas, se destacan particularidades geomorfológicas y de dinámica hídrica que dificultan su identificación con una u otra forma extrema de paisaje.

Un ejemplo lo constituyen los denominados “*cañadones*”. Estos cursos de agua, de escurrimientos temporarios, muestran una topografía bien conformada, de importantes pendientes longitudinales y laderas escarpadas, que suelen identificarse con los sistemas típicos. Su descarga final pueden ser hacia depresiones endorreicas, o el mar, pero en el caso de ríos suelen presentarse transversalmente a la línea estructural de contacto de ambas unidades morfológicas (*meseta-valle*).

Por lo general son subsistemas altamente torrenciales, producto de su desarrollo y de las escasas pero ocurrentes lluvias extraordinarias características del clima árido a semiárido de la región.

En la *meseta*, aún con muchas semejanzas a la problemática de *llanura*, también se manifiestan subsistemas con particularidades que las distinguen de ambos sistemas extremos. Sus drenajes son generalmente cursos temporarios, fuertemente erosionados, convergentes hacia lagunas temporarias, más o menos encadenadas y ordenadas jerárquicamente hacia sistemas cerrados, o cuasi-cerrados, pero que convergen en años de extrema pluviosidad hacia grandes depresiones, cursos fluviales, o el mar.

Estos subsistemas tienen características parecidas a las denominadas “cuencas”, pero insertos en sistemas mayores de características mixtas, con marcadas diferencias y semejanzas de sus componentes básicos con los sistemas típicos de montaña y los de llanura.

La vegetación que prevalece es la estepa, con presencia de grandes superficies de suelos desnudos a causa de la salinización de las áreas más deprimidas o de la erosión eólica, hídrica o antrópica.

La tesis en PMP (Serra, 2003), avanza en la investigación de estos sistemas en un *Paisaje de Meseta* (PM). Aborda especialmente una descripción y clasificación geomorfológica e hidrológica de los diferentes componentes y subsistemas que comúnmente se presentan, especialmente los que refiere como *Sistemas Hidrológicos Mixtos* (SHM).

En SHM de PM, la delimitación de la *frontera* de aportes que conforman los excedentes hídricos en crecidas, no tiene por lo general la rigidez del concepto de *divisoria de aguas* en una cuenca. Ni resulta tan difuso e indeterminado como en llanuras. Por lo general presenta estados intermedios, en muchos casos temporales, donde las características de la tormenta definen en la ocasión *el área tributaria de los aportes superficiales*.

A partir de estas particularidades, la investigación y estudio hidrológico de las crecidas en PM, adquiere relevancia e interés científico, por cuanto los métodos conocidos son aplicables en tanto sean conocidas las limitaciones y condiciones de su aplicación.

En la tesis de maestría citada, se ha introducido al análisis de esta problemática, volcado las principales semejanzas y diferencias de los SHM con los SHT y SHNT, se han expuesto las características físicas comunes, propuesto definiciones para distintos sistemas y subsistemas hidrológicos, sus clasificaciones y sub-clasificaciones y su relación con los procesos hidrológicos, y se han analizado algunas herramientas de aplicación específicas para el cálculo de caudales máximos en unidades sin datos hidrométricos.

El trabajo reúne las experiencias de actuación profesional y académica, de investigación, de estudios y proyectos y de obras relacionados con dicha temática.

En este nuevo trabajo de investigación y tesis doctoral, se plantea profundizar el conocimiento hidrológico en SHM de PM, la determinación del área tributaria, el análisis de casos, la relación con la estimación de caudales máximos en sistemas no aforados, y el análisis apoyado con herramientas de modelación específicas.

Las crecidas torrenciales en esta tipología de paisaje constituyen una problemática de vulnerabilidad creciente en las zonas más pobladas, por el mal uso de las riberas y áreas deprimidas inundables, severamente antropizadas por la escasa planificación del crecimiento de la infraestructura rural y urbana.

En muchos problemas de gestión y manejo del agua y de diseño y cálculo de obras hidráulicas y civiles, se necesita evaluar la actividad torrencial con las particularidades de estos sistemas, y determinar los caudales máximos de sus crecidas para definir las

condiciones de contorno que delimitan el problema. El escaso conocimiento y difusión que se tiene de esta conformación hidrológica, interviene como un factor más en la falta de previsión y planificación y frente a la progresiva antropización del paisaje por el desarrollo humano.

Este informe se presenta en tres partes bien diferenciadas. En una *primera parte*, se efectúa en dos capítulos un resumen descriptivo de la citada tesis, y de las principales características físicas e hidrológicas de SHM en PM. Seguidamente se efectúa una revisión del estado del arte, de las herramientas de simulación hidrológica agregada y distribuida, la información de apoyo y el marco de esta investigación.

El Capítulo I trata el problema torrencial en el paisaje de meseta, la región y motivaciones del tema elegido, finalidad, objetivos e hipótesis.

El Capítulo II expone la introducción, con apartados sobre el estado del arte, métodos y procedimientos conocidos e información de apoyo.

En la *segunda parte*, referida a “estimación de crecidas máximas en paisaje de meseta”, se desarrolla en dos capítulos el método y diseño de la investigación y los resultados obtenidos.

El Capítulo III contribuye con dos modelos hidrológicos a utilizar en el análisis de PM: un modelo hidrológico agregado (aplicación MHIG) y otro modelo distribuido basado en MDT (aplicación MHIG-SIG), como herramientas de análisis y apoyo al trabajo.

El Capítulo IV, desarrolla el análisis de crecidas máximas en PM, que constituye el tema principal del trabajo de esta investigación.

La *tercera parte* de este informe aborda la discusión de los resultados y las conclusiones (Capítulo V).

En el Capítulo VI se agrega una descripción de los símbolos utilizados, referencias bibliográficas, índice de citas y glosario de los principales términos del trabajo.

En el Capítulo VII se agrega un apéndice descriptivo de la aplicación MHIG y de ensayos de infiltración.

## 6. ESTADO DEL ARTE. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS CONOCIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS EN SISTEMAS HIDROLÓGICOS TORRENCIALES

### 6.1. RESEÑA HISTÓRICA

Siendo que esta investigación es continuadora en la misma línea desarrollada en la tesis en PMP (Serra, 2003), se resumen de dicho trabajo algunos aspectos más relevantes que son parte del marco teórico presente.

La Hidrología es muy antigua, pensadores como Homero, Tales de Mileto, Platón, Aristóteles, daban las primeras respuestas sobre el origen de los cursos de agua. Pero como ciencia, tuvo su gran desarrollo en el siglo XX, inspirada en pensadores mecanicistas como Descartes, Hobbes y otros que marcaron la fuerte influencia de las “ciencias duras” y dieron el marco teórico a la hidrología de cuencas.

El desarrollo y la industrialización del mundo, trajo consigo la introducción de crecientes problemas ambientales, y con ellos el del manejo del agua. La cantidad y distribución de las aguas dulces y su creciente escasez conforme evoluciona la vida humana en el planeta, la contaminación y la interrelación con los problemas ambientales del mundo moderno, fueron introduciendo nuevos problemas en la ciencia hídrica, en un contexto de contemporaneidad con el crecimiento de las ciencias ambientales.

Los nuevos problemas hídricos encontraron limitaciones de ser resueltos con las teorías existentes, propias del planteo filosófico en que se desarrollaron. Así, la problemática de *inundabilidad-sequía* en áreas deprimidas, en el contexto de nuevas escuelas de pensamiento da lugar al nacimiento de la Hidrología de Llanura.

En nuestro país, la Hidrología de Llanura tuvo una fuerte influencia de la geomorfología francesa. Dos trabajos pueden citarse como disparadores de esa línea de pensamiento, vanguardia internacional para este nuevo paradigma.

Fertonani (1978), introduce dos nuevos conceptos teóricos de fuerte sesgo geomorfológico para los sistemas hidrológicos. Por un lado, identifica “sistemas en los cuales la estructura de disipación o de escurrimiento está conformada por elementos *lineales, organizados y jerarquizados*” (el concepto de *linealidad* refiere aquí a la prevalencia de una dimensión sobre las otras dos para el flujo superficial). A estos sistemas, se los puede “identificar dentro de una porción de espacio o una unidad de comportamiento definida” y se “puede encontrar un punto de relación que exprese la resultante de una conducta intrínseca de los diferentes niveles o estados energéticos que lo conforman”. Estos sistemas, bautizados como “*sistemas hidrológicos típicos*” (SHT) son las comúnmente denominadas *cuencas*, “una superficie tributaria con relación puntual, en donde los escurrimientos se resuelven en forma más o menos ordenada, según una conducta definida por la jerarquización de sus componentes”.

Fertonani, sostiene seguidamente la existencia de otros sistemas, “en los cuales no se tiene ni la superficie tributaria definida, ni la relación puntual. Sistemas que no cuentan con componentes lineales, organizados y jerarquizados conformando su estructura de disipación (escurrimientos areales, mantiformes)”, a los que denomina *Sistemas Hidrológicos No Típicos* (SHNT).

Para el autor, cuando se pretenden introducir aspectos de manejo y control en áreas llanas, generalmente se recurre a lo conocido, el concepto de “cuenca”, lo cual implica aislar porciones de espacio recurriendo a divisorias artificiales tales como bordos o terraplenes. El problema es que por desconocimiento, se transforma a la naturaleza para adaptarla a situaciones conocidas (cuencas) y esto implica en muchos casos un muy difícil control de las reacciones que el paisaje experimenta.

Posteriormente y en la misma línea de pensamiento, un trabajo de la Universidad Nacional del Litoral entre cuyos participantes se destaca el mismo autor citado y que obtiene el primer premio del IX Congreso Nacional del Agua, precisa tales conceptos proponiendo nuevas definiciones:

“Un *Sistema Hidrológico* (SH) es un conjunto de componentes caracterizable mediante variables y parámetros (hidrológicos o no) que interactúan entre sí y con el medio según relaciones funcionales definidas que permiten, conocido el estímulo que se aplica, predecir las respuestas del sistema”. Y define como componentes, a “aquellos elementos físicos, hidrológicos, tales como ríos, esteros y acuíferos, soportados o contenidos por el modelado. Los que pueden cuantificarse mediante las variables que determinan su estado o su relación con otros componentes”.

Para los SH, la definición deja atrás el concepto morfológico clásico e incorpora la dinámica entre el clima y el modelado, entendido como “el conjunto de elementos físicos terrestres (geológicos, morfológicos, edáficos, fitológicos) y la interacción según sus componentes y relaciones funcionales que determinan las respuestas del sistema”.

El trabajo de Caamaño et al. (1979) consolida desde una visión sistémica los conceptos anteriores respecto a los SHT, y agrega que de la confrontación *clima-modelado*, las respuestas a un estímulo importante son esencialmente *no atmosféricas* (excedentes hídricos superficiales, subsuperficiales y subterráneos). En los SHNT, la resolución de los excedentes hídricos no es a través de los escurrimientos sino que encuentra la deformación de sus componentes como respuestas a un estímulo importante, provocando inundaciones, cuyos resultados no pueden ya evaluarse sólo a través de metodologías tradicionales.

Ambos conceptos teóricos, dan una interpretación académica de los dos sistemas hidrológicos extremos. En la naturaleza, no se encontrarán uno u otro en la pureza de su definición sino en formas combinadas, donde los autores proponen su clasificación conforme la predominancia de las características del sistema principal.

## 6.2. ALGORITMOS BÁSICOS EN PROCESOS HIDROLÓGICOS

En los problemas usuales de la mecánica de los fluidos, el flujo queda expresado por las ecuaciones básicas de *balance de masa*, de *cantidad de movimiento* y de *energía*. Puede agregarse, los que expresan flujos difusivos y la ecuación de estado de la presión.

El conjunto de *ecuaciones diferenciales de segundo orden* a que arriban teorías, como la Ley de Fourier, o las de Fluido Newtonianos, son *no lineales*, sin solución única, y suelen carecer de solución analítica.

Esta limitación de las teorías existente, reduce solo a algunos casos la posible solución exacta, entre los que se pueden citar los *flujos unidireccionales*, de los que derivan los conocidos casos de *Poiseuille* (flujo por gradiente de presión) y de *Couette* (flujo por superficie de arrastre en contacto con el fluido).

La mayoría de los problemas reales que se abordan en el estudio de flujos superficiales, admiten el análisis bajo condiciones de *fluido newtoniano incompresible, e isotérmico*.

En un sistema hidrológico, los procesos y subprocesos son los responsables de la transformación de la distribución tiempo-espacio del agua. En los procesos hidrológicos el movimiento depende de las propiedades físicas y de su relación con otros medios presentes.

La conocida *ecuación general de volumen de control* o *Teorema de transporte de Reynolds*, (Shames, 1967; Chow, 1964, 1989) desarrolla las ecuaciones de *continuidad, momento y energía* en los procesos hidrológicos a partir del análisis por *volumen de control*.

Tal como se aplica para la física de las partículas, Reynolds en su estudio de los fluidos propuso el análisis a partir de un volumen de control o porción imaginaria de un tubo de corriente, en la que la superficie que lo contiene se supone impermeable y dentro de la cual circula la corriente de fluido (Chow et al., 1994).

Para todos los fluidos –y para el agua en particular-, sus propiedades pueden admitir dos grandes grupos. Un primer grupo, de propiedades que dependen de la *cantidad de masa* presente, o propiedades *extensivas*. Y un segundo grupo, de propiedades intensivas que son las que no dependen de la cantidad de masa presente.

Reynolds, expresa que toda propiedad extensiva “*B*” del fluido, (masa, momentum, energía, masa del vapor de agua), representada por una variable de magnitud escalar o vectorial, puede ser expresada a partir de una propiedad intensiva  $\beta = dB/dm$ . Es decir, de la cantidad *B* por unidad de masa. Las propiedades extensivas que se analizan son la masa, el momentum y la energía.

En un volumen de control, para un elemento diferencial *dB*, la cantidad de propiedad *B* puede ser expresada por (I) :

$$(I) \quad B = \iiint_{V.C.} dB \quad ;$$

Donde  $B = \vec{B}$ , es una propiedad extensiva cualquiera y  $\beta$  su propiedad intensiva expresada por unidad de masa. La densidad del fluido es “ $\rho$ ”, la masa es “ $m$ ”; la densidad es  $\rho = dm/dv$ , y “ $v$ ” es el volumen.

Reynolds en su teorema, relaciona la tasa de cambio  $dB/dt$  de la propiedad extensiva respecto al tiempo. Si se analiza el momentum del fluido B, de magnitud vectorial, será  $\mathbf{B} = m\mathbf{V}$  (donde  $\mathbf{V}$  es la velocidad).

De acuerdo a la ecuación fundamental de la mecánica clásica, la segunda Ley de Newton (II) , la tasa de cambio del momentum respecto al tiempo, será:

$$(II) \quad \frac{d\vec{B}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \sum \vec{F}$$

Las acciones externas en el fluido dada por  $d\mathbf{B}/dt$ , se compone de dos partes. Por un lado, la tasa de cambio de la propiedad dentro del volumen de control. Por otro lado, la transferencia o *flujo neto* a través de la superficie de control, en la frontera del volumen de control. Resolviendo esta expresión, se arriba la ecuación general de Reynolds (III) , que expresa:

$$(III) \quad \frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \beta \rho dv + \iint_{S.C.} \beta \rho \vec{V} d\vec{A} \quad ; \text{Teorema de Transporte de Reynolds.}$$

El Teorema de Transporte de Reynolds, establece que *la tasa total de cambio de una propiedad extensiva de un fluido es igual a la tasa de cambio de la propiedad extensiva almacenada en el volumen de control (primer término de la expresión integral), más el flujo neto de la propiedad extensiva a través de la superficie de control (segundo término de la expresión integral.* Por convención, los flujos de entrada son negativos y los de salida son positivos.

### 6.3. LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Un principio básico de aplicación a los problemas hidrológicos –como de los hidráulicos- es el de la *conservación de la masa*, del que derivan las ecuaciones de continuidad (IV) . Si en el teorema anterior, la propiedad extensiva B es la masa “ $m$ ”, por la Ley de conservación de la masa será  $\beta = dB/dm = 1$  y  $dB/dt = dm/dt = 0$ .

$$(IV) \quad \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \rho dv = - \iint_{S.C.} \rho \vec{V} d\vec{A} \quad ; \text{ecuación de continuidad para fluidos.}$$

Es decir, la tasa de cambio de la masa en el interior del volumen de control debe ser igual y de signo contrario al flujo neto a través de la superficie de control. Si “S” es el almacenamiento de fluido en el volumen, el primer término resulta ser la tasa de cambio del almacenamiento dentro del volumen de control,  $dS/dt$ . El segundo término, el flujo neto de masa a través de la superficie, es la diferencia entre los flujos de entradas y salidas, esto es,  $(Q_t - I_t)$ . En la práctica y para un curso de agua, es la diferencia entre los caudales salientes y entrantes de un tramo dado. La ecuación de continuidad resulta de la conocida expresión de continuidad para flujo no permanente, de densidad constante (V) , aplicable a corrientes de agua:

$$(V) \quad \frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad ; \text{ecuación de continuidad flujo permanente y densidad}$$

constante.

En el caso de flujo permanente, el primer término de la ecuación (variación temporal) será nulo, y en consecuencia, las entradas igual a las salidas (VI) :

$$(VI) \quad \oint_{s.c.} \rho \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad ; \text{ecuación de continuidad para flujo permanente.}$$

Cuando el total de flujos de entrada y salida se igualan, se dice que el sistema es cerrado, en caso contrario el sistema es abierto. Por ejemplo, el ciclo hidrológico es un sistema cerrado. El ciclo de escorrentía es un sistema abierto, pues una parte de lo que precipita no se transforma en escorrentía.

#### 6.4. ECUACIONES DE MOMENTUM

Si el teorema de transporte de Reynolds se aplica al *momentum* o cantidad de movimiento del fluido, la propiedad extensiva B es  $\mathbf{B} = m\mathbf{V}$  y  $\beta = d\mathbf{B}/dm = \mathbf{V}$ . La tasa de cambio del momentum con respecto al tiempo por la 2da. Ley de Newton es:  $d(m\mathbf{V})/dt = \sum \mathbf{F}$ . Reemplazando en la ecuación general de volumen de control (VII) es:

$$(VII) \quad \sum F = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \vec{V} \rho dv + \oint_{s.c.} \vec{V} \left( \rho \vec{V} \right) d\vec{A} \quad \text{Ecuación integral de momentum}$$

en flujo impermanente.

Si el flujo es permanente, el primer término se anula (VIII) , resultando:

$$(VIII) \quad \sum F = \iint_{s.c.} \vec{V} \left( \rho \vec{V} \right) d\vec{A} \quad \text{Ecuación integral de momentum, flujo No}$$

Uniforme y permanente.

Si además de permanente, el flujo es uniforme, se tendrá que el segundo término es nulo, puesto que las velocidades son constantes en todos los puntos de la superficie de control, es decir,  $\sum F=0$ ,

Otros flujos particulares que derivan de las ecuaciones básicas de la hidráulica y que interesan específicamente a esta investigación, son:

- Flujo uniforme permanente en canal abierto (fórmula de Manning);
- Flujo superficial (o flujo “mantiforme”);
- Flujo para un sistema lineal en tiempo continuo y sistema lineal en tiempo discreto;
- Tránsito agregado de crecientes. Método de Muskingum, Muskingum-Kunge, Runge Kutta, Tránsito de Piscina Nivelada; y sus resoluciones por el método e diferencias finitas.
- Método de embalse lineal y embalses lineal en serie
- Tránsito hidrológico en Ríos
- Ecuaciones diferenciales de Saint Venant en canales abiertos, y formas simplificadas para el tránsito distribuido unidimensional;

## 6.5. LAS INUNDACIONES

Las crecidas e inundaciones en cuenca y en área de llanura es uno de los principales temas de estudio de la ciencia hídrica: conocer la amenaza, la vulnerabilidad del medio, y el riesgo de inundación ante la creciente ocupación en zonas inundables con infraestructura y asentamientos poblacionales.

Actualmente, hay una marcada tendencia de distintos investigadores en atribuir mayor importancia a las *acciones no estructurales* y de *prevención* en el tratamiento de esta problemática, como así también a la integración multidisciplinaria en la gestión ambiental de cuencas hídricas.

Tucci et al. (1993), autor latinoamericano de modernos trabajos sobre hidrología urbana, sostiene en relación a las áreas ribereñas que “...los problemas de inundación dependen del grado de ocupación de las áreas inundables por la población y de la frecuencia de ocurrencia de las inundaciones...”. Refiere también –como muchos otros autores contemporáneos- a las Medidas o Acciones Estructurales y No Estructurales en el control de las inundaciones.

En Argentina, un libro reciente, reúne trabajos de diferentes autores nacionales en la problemática de las inundaciones urbanas, (Bertoni et al., 2004), con el abordaje de los casos más graves ocurridos en los últimos años como los episodios de San Carlos Minas, Santa Fe y otros.

En relación a esta tesis, se menciona el Capítulo destinado al caso de la tormenta extraordinaria ocurrida en la zona del Valle Inferior del Río Chubut en Abril de 1998, y las graves consecuencias emergentes por la crecida del Cañadón del Parque Industrial de Trelew (Serra, 2004c). Algunos de estos casos son tratados también en otra publicación internacional patrocinada por la “Internacional Association of Hydrological Sciences” (Bertoni, 2006).

## **6.6. CRECIDAS MÁXIMAS EN PEQUEÑAS Y MEDIANAS CUENCAS TORRENCIALES**

### **6.6.1. Génesis de las crecidas**

Heras (1976), clasifica las crecidas por su origen pluvial líquido, níveo o mixto, y atribuye para las más grandes a causa de tormentas excepcionales por su intensidad, extensión, duración y repitencia. “Considerados en una larga serie de años, los temporales fuertes, que persisten muchos días en grandes extensiones, parecen reproducirse a intervalos más o menos alejados siguiendo modalidades casi análogas”.

Expresa que los aguaceros tempestuosos y cortos, violentos y muy localizados, producen en las pequeñas cuencas, principalmente de montaña, crecidas “de punta”, cuyos caudales máximos pueden producir efectos importantes en pequeños torrentes, sin influir notablemente en el caudal de los grandes cursos de agua.

La topografía, la geometría de la cuenca, la red de drenaje, condicionan el tiempo de concentración. La temperatura, humedad, cobertura vegetal, permeabilidad del suelo, estación del año, la intensidad y distribución de la lluvia, hacen de una misma lámina de agua caída caudales picos diferentes.

López Cadenas y Pérez Soba (1982) incorporan el “Cálculo de caudales máximos de los torrentes”, que caracterizan la génesis del proceso torrencial en lluvias, nevadas y la superposición de ambas formas de precipitación.

Temez (1978), coincide en esta clasificación sobre el origen de las avenidas, crecidas o riadas, aunque las nivales requieren del tratamiento específico e independiente siendo poco característico del paisaje o entorno de su estudio.

En un trabajo reciente efectuado en el Arroyo Esquel, Pcia. del Chubut, se analiza las crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas pluvionivales con escasez de datos hidrométricos, partiendo del análisis para una cuenca pluvionival de montaña con suficiencia de información hidrológica (Serra, 2002). Se deduce de los resultados, que existen cuencas en que una tormenta pluvionival puede generar crecidas de volúmenes de escorrentía de importancia con picos relativamente altos, pero cuya onda resulta más

amortiguada que la producida por una lluvia extraordinaria que abarque a todo el cuenco sin nieves.

### 6.6.2. La crecida de Diseño o de Proyecto

Chow, define el diseño hidrológico como el “proceso de evaluación del impacto de los eventos hidrológicos en un sistema de recursos hidráulicos y de escogencia de valores para las variables importantes del sistema para que este se comporte adecuadamente”. El diseño hidrológico puede utilizarse para desarrollar esquemas de una nueva estructura, como un dique para el control de crecientes, o para desarrollar programas de manejo y administración para controlar mejor un sistema existente (mapas de inundación).

En muchos problemas de la hidrología se requiere determinar el caudal de diseño. Puede definirse un *valor límite esperado* (VLE), definido como *la máxima magnitud posible de un evento hidrológico en un lugar dado utilizando información hidrológica disponible*. Este concepto está asociado con la *precipitación máxima probable* (PMP, definida por la OMM, Organización Meteorológica Mundial) y la equivalente *crecida máxima probable* (CMP), que es la crecida máxima físicamente posible en la cuenca.

Los métodos probabilísticos permiten estimar la magnitud de eventos hidrológicos cuya frecuencia es conocida y por lo tanto, asociada a un período de retorno dado.

En el diseño hidrológico, es importante conocer las magnitudes de las crecientes a través de parámetros de caudales, volúmenes y elevaciones que definen la *creciente de diseño* o *caudal de diseño*, particularmente útil cuando se trata del diseño de estructuras hidráulicas (vados, alcantarillas, puentes, vertederos, derivaciones, etc.), pero también útiles a la planificación del control y uso del agua.

Para Heras (1976), existen una gran variedad de procedimientos y técnicas para el cálculo de la crecida de proyecto sin que estén hoy estandarizados. La estimación de máximas crecidas tienen mayor importancia en proyectos de presas, por la seguridad de las mismas, y recomienda dos aspectos: el cálculo de la máxima crecida para la estabilidad de la obra y la ponderación de los riesgos consecuentes al establecimiento de la obra aguas abajo de la misma.

López Cadenas y Soba Baro (1982), desarrollan experiencias de Munteanu, Apostol, Gaspar, y otros autores Rumanos. De este grupo se destaca el método de los paralelogramos de escorrentía de Apostol, el procedimiento o diagrama de distribución de la superficie de la cuenca de Gaspar, el diagrama sectorial de la cuenca de Gaspar, el método de Gologan, el de lluvia horaria de Mustata, o el más conocido y difundido *método racional*. Algunos de estos métodos son la base de generación del hidrograma y su propagación, en el modelo agregado que aquí se desarrolla (Tabla Nro.: 1).

<b>Clasificación de métodos de cálculo para la crecida de Proyecto</b>	
Rafael Heras:	Métodos Directos
	Métodos Empíricos
	Métodos Estadísticos
	Correlación Hidrológica
	Métodos Hidrológicos
López Cadenas y Soba Baro: Métodos de Cálculo y Verificación de Caudales Máximos en Torrentes	Métodos Directos
	Métodos Indirectos

*Tabla Nro.: 1. Clasificación de métodos de cálculo de la crecida de proyecto, o crecida de diseño*

### **6.6.3. La Crecida Máxima y el Caudal Máximo Probable**

Heras (1976) propone las siguientes definiciones de uso común en la Hidrología:

- Crecida Anual (CA): Igualada o superada, como media, una vez cada año.
- Crecida Máxima Posible (CMPb): Máxima crecida que cabe esperar, si se supone la coincidencia total de todos los factores que producirían la precipitación máxima y la escorrentía máxima.
- Crecida Máxima Probable: (CMP): Máxima crecida que cabe esperar, teniendo en cuenta los factores condicionantes: geográficos, meteorológicos, hidrológicos y geológicos.
- Crecida Máxima Extraordinaria: Corresponde a una recurrencia de 100 años.
- Crecidas Excepcionales: Corresponden a una recurrencia de 500 años.
- Crecidas Catastróficas: Corresponden a una recurrencia de 1000 años.

### **6.6.4. Métodos Directos y Empíricos**

#### ***a. Métodos Directos***

Para Heras el *método directo* calcula los caudales producidos por una crecida observada en un tramo del río suficientemente característico, en el cual se miden las cotas máximas alcanzadas por las aguas. Aunque los métodos directos carecen de precisión, suelen dar una buena aproximación al orden de magnitud del caudal máximo buscado.

#### ***b. Métodos Empíricos***

Hay una variedad de fórmulas empíricas para determinar caudales máximos de crecidas, de utilidad para contrastar órdenes de magnitud de resultados obtenidos por otros métodos. El principal problema es la aplicación correcta de estas fórmulas pues resultan de estimaciones en determinadas cuencas, condiciones y características físicas.

Además de una elevada incertidumbre en el resultado, por lo general no relacionan el caudal máximo con el tiempo de recurrencia.

Hay dos grandes grupos, probabilísticas y no probabilísticas. En la tesis en PMP (Serra, 2003) se citan y detallan una diversidad de expresiones recogidas por Heras, y otros autores, que resumen fórmulas para el cálculo de caudales máximos.

#### 6.6.5. Métodos estadísticos

##### *a. Teoría de Probabilidades –Período de retorno o recurrencia*

Heras, refiere a los métodos estadísticos como aquellos basados en la teoría de probabilidades que permiten por extrapolación estimar la crecida máxima que puede llegar a tener un curso de agua a partir de una serie de caudales máximos conocidos. El cálculo probabilístico de período de retorno se efectúa a través del análisis de frecuencia experimental y la aplicación de una función teórica de distribución de buen ajuste.

Para el análisis experimental, se utilizan diferentes expresiones prácticas de cálculo de la frecuencia experimental. López Cadenas y Soba Baro (1982) describen métodos conocidos como California (1923), Hazen (1930), Kimball (1951), Weibull (1939), Tukey (1964), Gringorten (1963), Blom (1958); (Tabla Nro.: 2).

Expresión de f, de	f (frecuencia experimental)
California	$i/N$
Hazen	$(i-0,5)/N$
Kimball	$(i+1) / N$
Weibull	$i/(N+1)$
Tukey	$(3 i-1)/(3 N +1)$
Gringorten	$(i-0,44)/(N+0,12)$
Blom	$(N-0,375)/(n+0,25)$
N, Nro. de datos de la muestra; i, Nro. de posición en la serie ordenada.	

**Tabla Nro.: 2. Expresiones comunes para el cálculo de la frecuencia experimental**

Entre las funciones teóricas de ajuste, de uso más común en Hidrología, se destacan métodos o leyes conocidas como Normal o de Gauss (1809), Logaritmo Normal, Ley de Gumbel (1954, 1958), Logaritmo Gumbel o Ley de de Frechet (1927), Pearson III, Logaritmo Pearson III , Fuller (1987), Valores Extremos Generalizados. En la selección de la función de ajuste más conveniente, los métodos más usados son los test de comprobación gráfica (visual), Ley de Gibrat-Galton y test de bondad de ajuste de

Chi Cuadrado (Custodio y Llamas, 1976), Test de Kolmogorov (1933) e índices estadísticos.

Heras (1976), sostiene que debido al número de datos generalmente utilizables no parece correcto extrapolar a tiempos de recurrencia superiores a 1000 años. Debe calcularse el hidrograma correspondiente a un tiempo de recurrencia de T=100 años y, a partir de este valor, obtener los coeficientes de seguridad que den los valores del hidrograma para tiempos de recurrencia superiores, en función de las características hidrológicas de la cuenca y del tipo de obra.

### ***b. Hidrología Estocástica***

Una de las más antiguas referencias se aprecia en un clásico de la ciencia hídrica contemporánea, “*Hidrología para Ingenieros*”, de Linsley et al. (1977) donde dedica un capítulo a las series hidrológicas que tienen un comportamiento en parte aleatorio y en parte determinístico.

La Hidrología Estocástica o ciencia de “las conjeturas”, es una disciplina relativamente moderna para el tratamiento de series aleatorias temporales. El autor cita a Hazen y Sudler como iniciadores, pero que se consolida con los estudios de Markov y su modelo “Markoviano de primer orden”, una función sencilla para la generación de volúmenes de flujo anual en cursos de agua permanentes.

Markov, utiliza la combinación de los estadísticos que definen la componente determinística con la utilización de la técnica de Montecarlo y distribución “t”, para la generación de números aleatorios en el entorno determinístico. Posteriormente, suma a su teoría la generación sintética de caudales (o volúmenes de escorrentías) medios mensuales (IX) , incorporando estadísticos estacionales.

$$(IX) \quad Q_{i,j} = \bar{Q}_j + \rho_j * \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} * \left( Q_{i-1,j-1} - \bar{Q}_{j-1} \right) + t_i * \sigma_j * \sqrt{1 - \rho_j^2} \text{ Procedimiento de}$$

Markov p/ caudales medios a nivel medio mensual.

Donde, Q, es el caudal medio mensual; j, subíndice de estaciones o meses; i, subíndice serial del primer mes al último;  $\rho_j$ , es el coeficiente de correlación serial entre  $Q_j$  y  $Q_{j-1}$ ;  $\sigma_j$ , el desvío estándar del mes,  $t_i$ , distribución de probabilidades “t” (técnica de Montecarlo) para el mes “i”.

### ***c. Correlación Hidrológica***

Heras (1976), dice que si no hay datos y no es posible estudiar con cierta garantía la máxima crecida, se puede recurrir a la correlación con los valores de crecidas de cuencas hidrológicamente afines a la estudiada en función de la semejanza de las principales variables, régimen de precipitaciones, extensión de la cuenca, orografía, forma de la cuenca, geología, vegetación, etc.

Para ello, se basa en el estudio de otra cuenca en la que sí existan datos, estableciendo luego los coeficientes de correspondencia entre ambas cuencas y en función de las características hidrológicas y físico geográficas de cada una de ellas.

#### **6.6.6. Métodos Hidrológicos o Hidrometeorológicos**

Determinan el caudal máximo a partir de las lluvias y las características físico hidrológicas de la cuenca. Heras, los denomina métodos hidrológicos, López Cadenas y Soba Baro (1982) los refieren con la denominación de métodos “Hidrometeorológicos”.

La base de cálculo de estos métodos es la *Teoría del Hidrograma Unitario*, dada por Sherman (1932) en su artículo sobre “*Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method*”.

Del Hidrograma Unitario derivan distintas proposiciones de uso común en la simulación hidrológica: la fórmula racional, el hidrograma unitario sintético de Snyder (1938), el modelo de Williams (1945) -base del modelo HYMO-, el hidrograma unitario triangular, entre otros.

#### **6.6.7. La modelación hidrológica. Clasificación**

Chow et al. (1994), clasifica en dos grandes clases los modelos hidrológicos (MH), *físicos* y *abstractos*. Los modelos físicos son aquellos que representan a una escala reducida una selección de variables del sistema real. Los modelos abstractos utilizan las matemáticas para representar variables del sistema real y expresar las relaciones que vinculan las entradas y las salidas. Las variables, pueden ser funciones de tiempo y del espacio o bien ser variables aleatorias o probabilísticas descriptas a partir de su función de densidad.

El primer grupo de variables no aleatorias, da origen a los “modelos determinísticos”, donde una entrada produce una salida única.

Desde el punto de vista de su variabilidad espacial, los modelos determinísticos pueden a su vez ser “agregados”, si el sistema es promediado en el espacio o considerado como punto único. O bien, pueden ser “distribuidos”, donde los procesos hidrológicos se dan en varios puntos del espacio y sus variables son funciones de las dimensiones del espacio.

Cada uno de estos dos grupos de modelos determinísticos, pueden ser de “flujo permanente” si la tasa de flujo temporal no cambia, o “impermanentes” en el caso contrario.

Los modelos estocásticos tienen salidas que son aleatorias o son en parte aleatorias. Pueden ser independientes en el espacio o correlacionados con él, y cada uno de estos dos grupos, a su vez puede ser independientes del tiempo o correlacionados con él.

### ***a. Modelos de simulación de crecidas agregados y distribuidos***

Ponce (1989) y Chow et al. (1994), tratan las diversas clasificaciones de los modelos de simulación de crecidas en la actualidad, y avanzan en consideraciones respecto a los *modelos agregados* y *modelos distribuidos*. Los modelos *agregados* consideran la lluvia aplicada en forma uniforme en toda la superficie de la cuenca, los parámetros de los submodelos son globales y constantes. Los modelos *distribuidos* son de última generación y se expanden por la rapidez de multiplicación de memoria y velocidad de procesamiento de los ordenadores y el desarrollo de los SIG o sistemas de información geográfica. Permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros de los submodelos siendo simultáneo el análisis ínter temporal. Hay modelos distribuidos donde se analiza celda a celda y *pseudo-distribuidos* en donde la cuenca se divide en pequeñas subáreas o "subcuencas" con precipitación y parámetros constantes. Los SIG, constituyen herramientas de gran utilidad para procesar estos modelos de simulación.

De los modelos agregados se destacan entre otros HYMO, ARHYMO, y muy particularmente un modelo que se ha difundido mucho en los últimos años, el HEC HMS, una versión actualizada del original HEC1.

El HMS, *Hydrologic Modeling System*, es producido por *Hydrologic Engineering Center, US Federal Government* producto con derechos reservados pero de dominio público (*public domain*). En su versión más reciente, bajo sistema operativo Windows, el sistema interactúa con una interfase gráfica para el manejo de los componentes a simular (subcuencas, ríos, redes de ríos, reservorios) y permite optar por diferentes submodelos de cálculo de las pérdidas (intercepción, evaporación, infiltración) y de propagación en laderas y de la onda de crecida en cauces. Este modelo se utiliza para contrastar resultados del modelo que se desarrolla en esta tesis.

Entre los modelos pseudo distribuidos Francés García (1996) cita TOPMODEL, y KINEROS del U.S. Department of Agricultura (Michaud y Sorooshian, 1994).

TOPMODEL es un modelo hidrológico lluvia-escorrentía, determinístico, físicamente basado, de última generación, desarrollado inicialmente en 1989 por el profesor Keith Beven, "Center for Research on Environmental Systems and Statistics, Department of Environmental Science, Institute of Environmental and Natural, Lancaster University, Lancaster". (Beven y Kirkby, 1979; Beven, 1997).

KINEROS, es un modelo tipo lluvia-caudal, introducido por Michaud (Michaud y Sorooshian (1994) nacido del estudio hidrológico en ambientes semiáridos del paisaje de Arizona, Estados Unidos.

Entre los distribuidos Francés García (1996) destaca el modelo OMEGA, el CASC2D, de Colorado State University (Doe et al., 1996), integrado con GRASS; el modelo R.WATER.FEA incorporado a GRASS; también el THALES, de malla triangular irregular para el seguimiento de las curvas de nivel, conectado con MDT TAPES-C,

que utiliza el submodelo de Smith y Parlante para el tratamiento de la infiltración. CASC2D fue desarrollado originalmente por Julien como parte de un proyecto de *Colorado State University* financiado por *U.S. Army Research Office* (Julien et al., 1995).

Entre los modelos de celdas de desarrollo recientes, puede citarse a Hydrological Grid 2002, conocido como HG2, o HyGrid2k2, desarrollado por el Profesor Federico Cazorzi, Department of Crop Science and Agricultural Engineering, de University of Udine (Cazorzi, 2002). HG2 es un grupo de programas para la elaboración de datos espaciales georeferenciados en formato de grilla.

## **7. INFORMACIÓN DE APOYO PARA EL ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA TORRENCIAL EN LA MESETA PATAGÓNICA**

### **7.1. TESIS “METODOLOGÍA INTEGRADA DE ESTIMACIÓN DE CRECIDAS EN AMBIENTES TORRENCIALES TÍPICOS DE ÁREAS DE MESETA, EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA PATAGÓNICA”**

Tal se ha mencionado, esta tesis en PMP (Serra, 2003) constituye un estado del arte directo y previo para el tema sometido a investigación. Su desarrollo, resultados, discusión y conclusiones, y espacialmente el sumario de trabajos futuros, es tenido presente en el desarrollo de esta investigación.

### **7.2. INVESTIGACIONES ANTERIORES**

Con relación a la documentación de apoyo utilizada, aportan a este desarrollo los siguientes trabajos de investigación del autor de esta tesis, desde 1986 a la fecha:

- PI N° 453: *Riesgo Aluvional y Seguridad hídrica en Ambientes torrenciales de la meseta Semiárida Patagónica: Parametrización Hidrológica*; SCyT, UNPSJB; (2002-2004);
- PI Nro. 274: *Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos*, SCyT, UNPSJB; (1999-2002);
- “PI Nro. 194: *Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique-Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut*, SCyT, UNPSJB; (1995-1998);
- PI Nro. 138: *Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut*, SCyT, UNPSJB; (1992-1995);
- PI Nro. 38: *Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut*; (1986-1990);

Se destaca además, el material disponible en forma de bibliografía, publicaciones y documentos del *Centro de Documentación* del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica

de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, en la Provincia del Chubut.

### 7.3. HIDROCLIMATOLOGÍA. ESTUDIO DE PRECIPITACIONES Y TORMENTAS

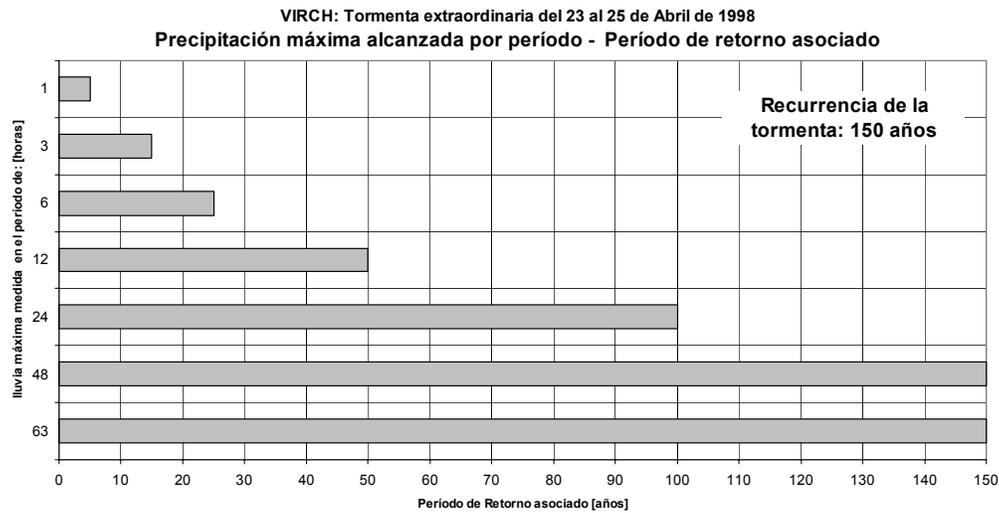
Un aspecto importante para el desarrollo de la investigación, es la información disponible del régimen de precipitaciones y tormentas en el área de estudios. Las ecuaciones de tormentas para la región del VIRCh fueron estudiadas en un proyecto de investigación sobre “Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, (Villegas et al., 1994, en Serra et al., 1995).

El 24 y 25 de Abril de 1998, se produjo un evento meteorológico en la región del VIRCh de características excepcionales. La precipitación caída en 63 horas de lluvia alcanzó una magnitud similar al promedio de lluvias de un año y medio. El retorno de la tormenta para la información existente a ese momento fue del orden cercano a 300 años, que se reduce a 150 años al incorporar dicho evento a la serie estadística. Las intensidades intermedias máximas también tuvieron características excepcionales (mayor detalle en el Apéndice, Tabla Nro.: 25). En la Fig. : 4 se muestra intensidades máximas para diferentes duraciones de esa tormenta, y en la Fig. : 5 se muestra una función teórica de ajuste para las intensidades máximas, de muy buena correlación ( $R^2=0,9991$ ).

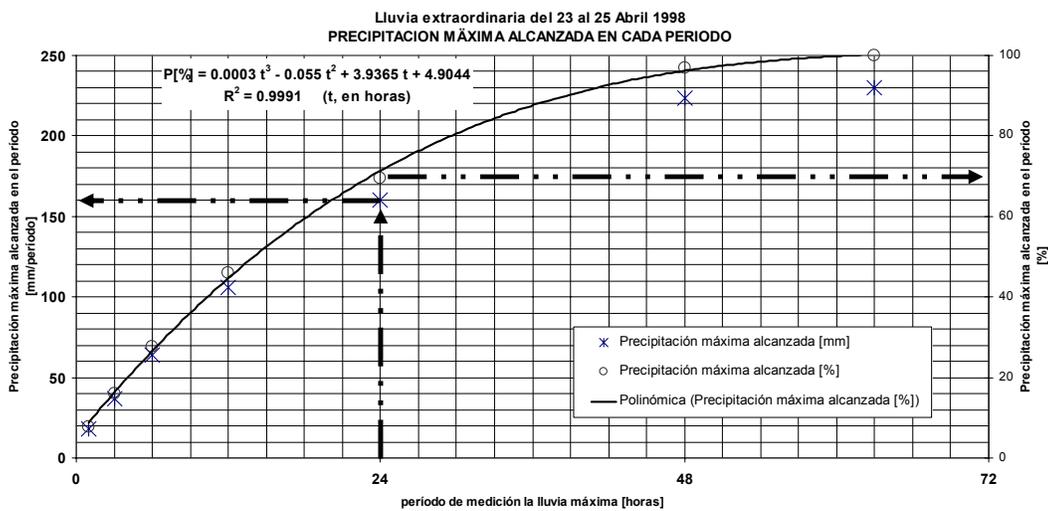
En un proyecto de investigación posterior, el estudio es actualizado para incorporar la tormenta excepcional ocurrida en Abril de 1998, (Chachero, 1998, en Serra et al., 1998). En la Fig. : 6, se muestran las curvas que relacionan *Precipitación-Duración-Recurrencia* (PDR) para la región del Valle Inferior del Río Chubut, elaboradas a partir de la información pluviográfica de la Estación Experimental Trelew del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Actualización de Ecuaciones Tormentas en el VIRCH (Chachero, 1998 en Serra et al., 1998).

La información climatológica seleccionada que enmarca estos estudios proviene de las siguientes estaciones (Chachero, 2006 en Serra et al., 2006):

Estación Experimental Trelew del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-(INTA): Ubicada en Trelew, Valle Inferior del Río Chubut (latitud Sur: 43° 16' 20"; longitud Oeste: 65° 21' 40"y altitud 10 m). La información corresponde a una Estación Meteorológica Completa para el periodo 1970/90. Desde el año 1990 al año 1996 se continuó con el registro convencional pero solamente de algunos parámetros. En el año 1996 se instaló una estación automática. Las observaciones con la estación tradicional corresponden a Temperatura Media, Media Máxima y Media Mínima; Temperatura Máxima y Mínima Absoluta; Humedad relativa Máxima, Media y Mínima; Heliofanía efectiva; Evaporación Tanque tipo A; Velocidad del Viento a 0,5 m y a 2 m; Precipitación. Desde el año 1991, no se cuenta con información de lectura de tanque evaporimétrico ni de heliofanía efectiva.



*Fig. : 4. VIRCh, Tormenta extraordinaria del 23 al 25 de Abril de 1998. Intensidades máximas en distintos períodos.*

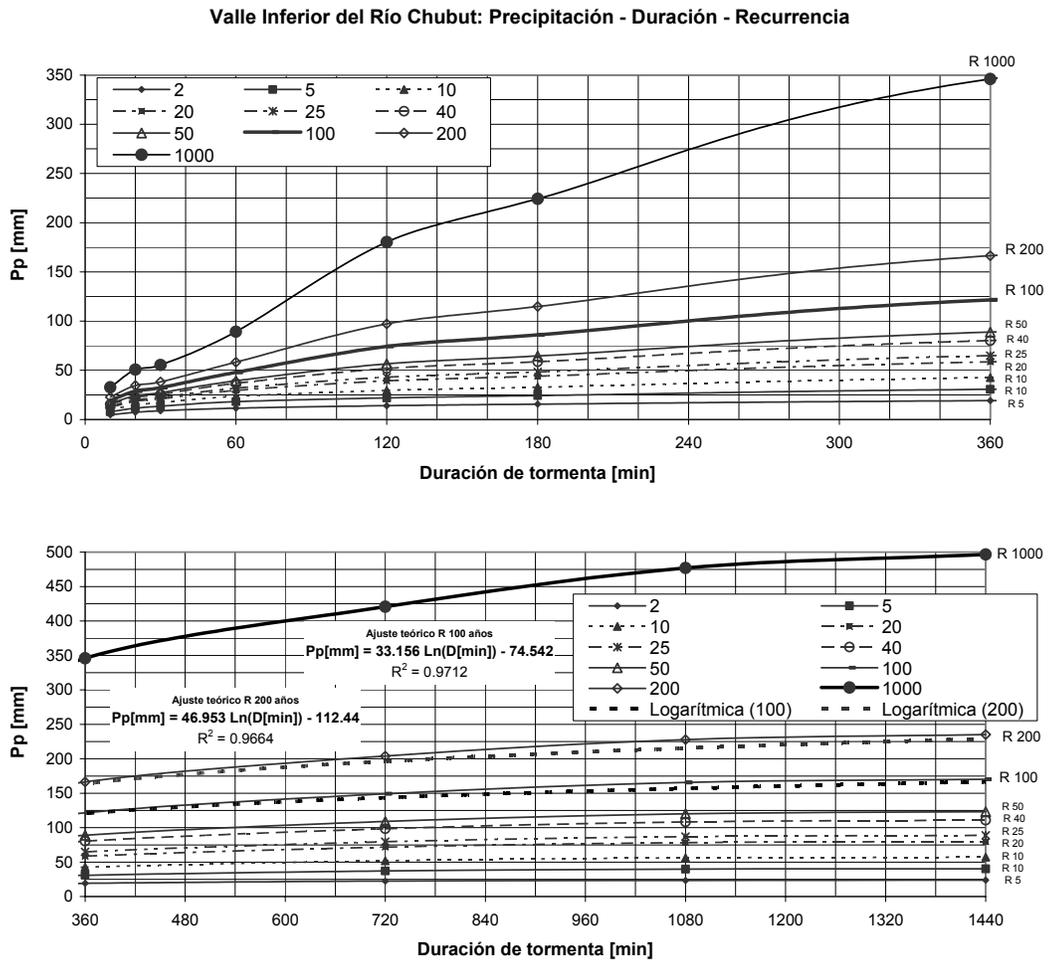


*Fig. : 5. VIRCh, Tormenta extraordinaria del 23 al 25 de Abril de 1998. Ajuste de función teórica para intensidades máximas en distintos períodos*

Estación del Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería UNPSJB: Estación automática emplazada en la ciudad, en el predio de la Universidad con las siguientes coordenadas: Latitud 43° 14' 59"S; Longitud: 65° 18' 30"W y altitud 14 m. Se instaló en el año 1997 en el marco del proyecto de Investigación "Dinámica Estratosférica. Radiación Ultravioleta y Biología".

Durante los años 1997 a 1999 se registraron solamente mediciones de radiación, y en noviembre de 1999 se comenzaron a tomar los parámetros que luego se detallan y son de mayor interés para este proyecto. La recolección de datos se realiza mediante una

estación automática Monitor II de Davis Instruments' con paso de minuto desde noviembre de 1999 a la fecha, registrando los siguientes parámetros: Temperatura Máxima, Media y Mínima; Precipitación; Presión; Humedad; Punto de rocío; Velocidad del viento media y máxima; Dirección del viento.



**Fig. : 6. Relaciones Precipitación-Duración de Tormenta-Recurrencia, para el Valle Inferior del Río Chubut**

Servicio Meteorológico Nacional (SMN): La estación del Servicio Meteorológico estaba ubicada en las coordenadas 43° 14' S, 65°18'W, hasta el año 1975, cuando fue trasladada a coordenadas 43° 12' S, 65° 17' W. Presenta una importante información de largo período, aunque se dispone solamente de la serie de precipitación diaria del período 1933-1992, con algunos años faltantes. Asimismo, se cuenta con los reportes correspondientes a dos decenios diferentes (1941/1950; 1951/60) y aunque tienen una fuerte agregación, son muy adecuados para la descripción climatológica general de la zona ya que cubren un período de extensión considerable para caracterización. Los parámetros relevados por ese organismo son presión, temperaturas (bulbo seco, bulbo húmedo, máxima, máxima absoluta, mínima, mínima absoluta, punto de rocío); tensión

de vapor; humedad relativa; velocidad del viento; frecuencia de direcciones; precipitación; nubosidad total.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, la información de las tres estaciones estudiadas para la ciudad de Trelew, indican que corresponden a clima Seco (B) desértico (W), (Ares, 2006, en Serra et al., 2006).

#### **7.4. HIDROMETRÍA**

Las cuencas de los principales ríos de la región, con vertiente pacífica, atlántica o endorreica, disponen de información hidrométrica publicada en los anuarios de la Secretaría de Recursos Hídricos (EVARSA, 2004).

En general, no existen datos hidrométricos para cuencas o subsistemas menores. Las características torrenciales y los tamaños (pequeños y medianos) de las cuencas o sistemas hidrológicos mixtos que se analizan, dificultan aún más la disponibilidad de aforos y limnimetría que permitan ajustar modelos de simulación y contrastar resultados.

Para el análisis de casos, la investigación se apoya en datos de campo puntuales, valores máximos alcanzados, tiempo de base observado de un hidrograma, correlación con cuencas vecinas.

Como caso particular, se cuenta con observaciones no sistemáticas en las pequeñas presas de control de crecidas existentes en la zona de estudios de esta investigación.

## *Segunda Parte*

### *Desarrollo*

**MODELOS DE SIMULACIÓN  
HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE  
CRECIDAS MÁXIMAS EN PAISAJE DE  
MESETA**

### III. MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS MÁXIMAS EN PM

En este Capítulo se desarrollan y verifican los dos modelos de simulación hidrológica propuestos en el primer objetivo específico, y aplicados a casos en el Capítulo anterior. Los modelos se presentan con un detalle de las referencias técnicas que utiliza cada proceso y subproceso.

El primero de ellos, “Modelo Hidrológico Gaiman” (MHIG), tiene como antecedente al “Modelo Gaiman”, (Serra, 2003). En este desarrollo, se incorporan nuevos modelos de procesos que mejoran sustancialmente su aplicación a casos en SHM. Agrega además, funcionalidades computacionales para adaptarlo a formas de entradas y salidas gráficas, en un entorno de trabajo moderno (Windows XP 32 bits).

El simulador, de tipo determinístico-agregado, permite determinar crecidas máximas en múltiples secciones de control, para una tormenta, o una selección de varias tormentas de precipitación, duración y recurrencia conocidas (PDR). Como resultados, se obtienen los hidrogramas de la tormenta, y los parámetros de *caudal máximo*, *escorrentía* y *coeficiente de escorrentía* resumidos en tablas y ábacos para todas las tormentas simuladas.

El simulador MHIG-SIG, es de tipo determinístico-distribuido, desarrollado en esta tesis por completo, con dos opciones de cálculo *celda a celda* diferentes:

- Método de cascada,
- Método de Flujo Superficial y turbulento.

Como variable de entrada del modelo, admite una tormenta discreta, de lluvia real o sintética, en toda el área de estudio o en una parte de ella. Como resultados pueden obtenerse elevación y flujo medios de agua en cada celda y para cada período de cálculo, y los valores máximos durante la tormenta. También pueden obtenerse los valores acumulados para una sección transversal o selección lineal de celdas.

**MHIG**

**MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN**

## MHIG: MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN

### 8. MHIG. DESARROLLO Y REFERENCIAS TÉCNICAS

#### 8.1. PRESENTACIÓN

MHIG (Modelo Hidrológico Gaiman) está integrado por un conjunto de programas computacionales para la modelación hidrológica lluvia-caudal, orientado al cálculo de *crecidas máximas* en pequeños y medianos sistemas hidrológicos, de escurrimiento temporario y en PM. De acuerdo a la clasificación de modelos hidrológicos de Chow (1994), es un modelo de tipo *determinístico-agregado y flujo no permanente*.

Está conformado por una selección de modelos hidrológicos y métodos básicos conocidos. Estos modelos básicos son combinados con algoritmos y procedimientos computacionales modificados o desarrollados, y resultados experimentales producidos en más de dos décadas de trabajo en la estimación de crecidas máximas. Particularmente, las experiencias se han dirigido a sistemas hidrológicos en terrazas y en pequeñas y medianas cuencas torrenciales.

MHIG se ha desarrollado para su funcionamiento bajo sistema operativo Windows de 32 bits. Aprovecha la interfase gráfica de usuario (IGU) y la potencialidad de la programación orientada a objetos, logrando un "entorno más amigable" para el diseño, ingreso de datos y presentación de informes de una simulación hidrológica de crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales. Los resultados de simulación pueden ser fácilmente importados en formato texto por aplicaciones de uso común.

MHIG, tiene por precedente la aplicación "GAIMAN", tomando como base el estado de desarrollo alcanzado en la tesis en PMP (Serra, 2003). En esta nueva etapa y versión, el modelo ha sido reformulado por completo, introduciendo modificaciones computacionales sustanciales e incorporando nuevos modelos de procesos hidrológicos, para adaptarlo a las necesidades de este trabajo y su actualización como herramienta informática.

La estructura de simulación utiliza cuatro componentes (o elementos) hidrológicos:

- 1) UEHs: Unidades de Estudio Hidrológico, en general, o Subcuencas en SHT en particular);
- 2) Cauces y tramos de escurrimiento encauzado, temporario o permanente;
- 3) Lagos, lagunas, mallines;
- 4) Presas, (con estructuras hidráulicas de evacuación);

Cada uno de estos componentes puede ser editado en un diagrama, mediante un *editor gráfico* que permite las operaciones usuales de creación del componente, carga de parámetros, modificación y eliminación.

Las abstracciones son evaluadas a nivel de UEH, con parámetros para las *retenciones superficiales* por *almacenamiento* e *intercepción* y *pérdidas por infiltración*. Para las hipótesis señaladas no se requiere evaluar *evaporación* o *transpiración*.

La propagación de la onda de crecida se efectúa para cada componente; en el caso de UEH se traslada el hidrograma a “pie de ladera o subcuenca”.

Los tramos de “cauces” permiten simular la red de drenajes y diagramar el ruteo de las aguas superficiales, jerarquizando el orden de los mismos. La traslación del hidrograma se realiza por cada tramo, por dos métodos opcionales: *directo* o de *onda cinemática*.

Pueden interponerse presas o lagos, con sus relaciones de *altura de agua*, *almacenamiento*, *superficie de inundación* y *caudal erogado*; pueden incluirse las funciones de descarga de las estructuras hidráulicas de evacuación.

La traslación del hidrograma en lagos o embalses puede efectuarse por distintos métodos conocidos, de onda cinemática, y resolución de ecuaciones diferenciales por diferencias finitas: *Piscina Nivelada*, *Muskingum*, *Runge Kutta* (Chow, 1994).

MHIG permite efectuar *corridas* para una tormenta, o para múltiples tormentas. La simulación de una tormenta genera como resultado el hidrograma, en formato gráfico y de tabla, pudiendo modificarse de forma directa las variables y ver sus efectos (hidrograma dinámico). En corridas simultáneas de tormentas múltiples se generan como resultados tablas y ábacos de *caudal máximo*, *escorrentía* y *coeficiente de escorrentía*, en función de la *duración* y *recurrencia* de la tormenta. Los resultados pueden ser exportados en formato texto para su utilización por otras aplicaciones.

Todos los resultados son informados para cada uno de los componentes (UEH, cauce, lago o represa), pudiendo ser requeridos diferentes períodos o *pasos* de cálculo y de salidas.

## **8.2. RESEÑA HISTÓRICA**

El modelo “GAIMAN”, tuvo su origen en trabajos hidrológicos inéditos del autor, en documentos internos para la antigua Dirección General de Estudios y Proyectos del Ministerio de Economías Servicios y Obras Públicas de la Provincia del Chubut, producidos entre los años 1983 y 1985.

El diseño inicial respondió a un estudio realizado en 1983 para el control aluvional de la cuenca de un pequeño cañadón suburbano, el Cañadón Baraibar; ubicado en zonas de bardas al norte de la ciudad de Gaiman -a unos 40km al Oeste de la ciudad capital Rawson- que desagua al Río Chubut a través de su casco urbano.

El cuenco del Cañadón Baraibar tiene una extensión de 170 Has. Por las características geomorfológicas, hidrológicas, su tamaño, y la información disponible, constituyó con el tiempo una cuenca experimental para la obtención de parámetros de calibración y mejora del modelo.

En su primer desarrollo, el modelo se programó en lenguaje Basic para una de las primeras computadoras tipo PC, de oficina, la antigua Olivetti P6060, con soporte en disco flexible de 8".

Desde entonces, tuvo una actualización y mejora continua, dada por la suma de experiencias y la experimentación en campo y laboratorio de parámetros de sub-modelos a través de las aplicaciones en distintos casos.

Hasta 1985 con esta versión del modelo se calcularon tormentas y caudales de diseño en esa cuenca (SHT) y en otros sistemas hidrológicos de meseta como el "Cañadón de las Mil Ocho Viviendas" de la ciudad de Comodoro Rivadavia, los "Cuencos Aluvionales uno N° 1 a N° 5 de Puerto Madryn", o del "Cañadón del Parque Industrial, (PIT)" que drena sobre populosos barrios de la ciudad de Trelew.

Con la aparición en el mercado de la "PC-XT" y posteriormente "PC-AT", el programa fue readaptado a esta nueva generación de ordenadores de oficina.

En 1989, el modelo se presenta por primera vez dentro de un proyecto de investigación: PI Nro. 38: Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut (Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco), donde se lo readapta para generalizarlo al uso de cuencas torrenciales regionales, de mayor complejidad hidrológica, en lenguaje GWBasic de DOS para IMB-PC. (Serra y Clérico, 1989, inédito).

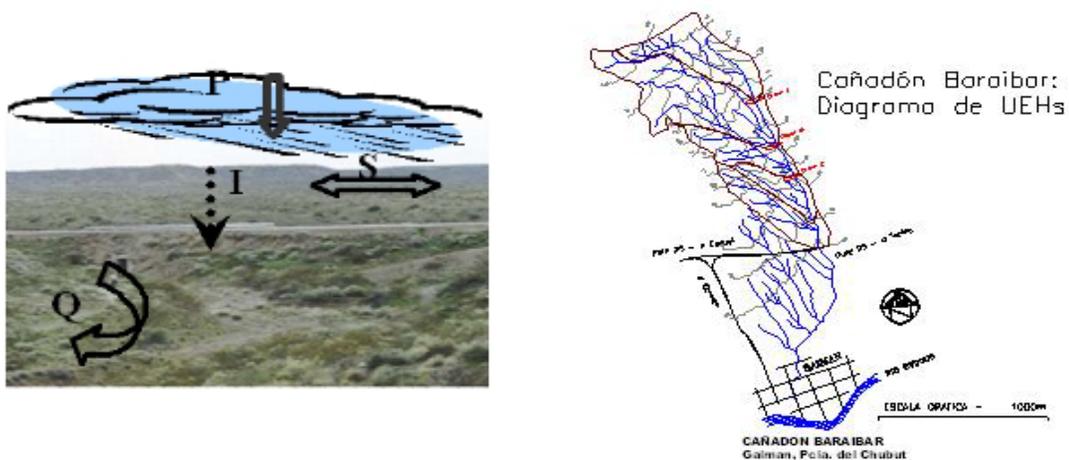
Posteriormente, es utilizado por distintos proyectos de la misma línea de investigación dirigidos por el autor. En orden sucesivo, los proyectos "PI Nro. 138, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut", "PI Nro. 194, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique-Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut" y "PI Nro. 274: Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos".

Con estos dos trabajos, el modelo es readaptado para su funcionamiento bajo control de sistema operativo Windows y programado en Visual Basic para Aplicaciones Excel (VBA). Las modificaciones introducidas permitieron su explotación para el cálculo de máximas crecidas simultáneas en 32 cuencos independientes e interrelacionados en un cuenco de orden mayor cercano a los 1000 km<sup>2</sup> y para más de 100 tormentas sintéticas seleccionadas,

Entre los años 1996 y 1997, el modelo GAIMAN ha sido utilizado por la institución universitaria citada en Convenio con la Corporación de Fomento del Chubut

(CORFO), para el estudio y proyecto de “Obras Complementarias de Control de Crecidas en Cuencas Urbanas de Puerto Madryn, Dolavon -y Gaiman”. El informe final, incluyó los proyectos ejecutivos de la Presa de Laminación de Crecidas “Felipe” en el Cañadón Dolavon, de obras de sistematización de cauce y márgenes del tramo inferior de este cañadón y del Baraibar en Gaiman, y de las presas de laminación de crecidas en cuencos 3 y 4, la toma y su conducto entubado en el Parque Industrial Liviano de Puerto Madryn. Finalmente, se destaca la aplicación en un Convenio similar por el “Estudio y proyecto de refacciones y mejoras del sistema de presas del Cañadón del Parque Industrial de Trelew”.

Entre otras aplicaciones importantes se destacan las incluidas en el “Plan de Obras de Emergencia de Control de Crecidas Aluvionales”, Informe de Revisión, Volumen 1 a 8, producido por el Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas (MESOP) y del Instituto Provincial de la Vivienda y Desarrollo Urbano (IPVyDU) de la Provincia del Chubut, en el período Mayo a Octubre de 1992. Este plan, incluyó un conjunto de tres presas de laminación de crecidas en el Cañadón del Parque Industrial de Trelew, una presa en el Cierre “Gasoducto” del Cañadón Dolavon, una presa en el Cuenco Aluvional Nro. 2 de Puerto Madryn, tres presas en el Cañadón Baraibar de Gaiman, y también de canales de drenaje o colectores urbanos en Rawson (Barrio 490 Viviendas y El Sombrerito) y desagüe del Barrio Norte de la ciudad de Trelew. Todas las obras citadas están construidas y en servicio.



**Fig. : 7. Principales Iconos de MHIG: Cañadón Baraibar (Presas de Laminación de Crecidas). A la derecha, diagrama de UEHs para sección de control en Ruta 25.**

En el año 2000, el modelo GAIMAN (Fig. : 7) tuvo su última actualización de versión, incorporando subrutinas y formatos especiales para la carga de variables y parámetros salida de resultados tabulados y en formato gráfico. El trabajo posee derechos de autor, inscripto en el Registro Nacional de Derechos de Autor, propiedad Intelectual como obra inédita de software (Serra, 2004a).

En el año 2004, comienza el diseño para el desarrollo en interfase grafica de usuario y 32 bits, inscripto con derecho de autor para obra de software inédita (Serra, 2004b).

### **8.3. DESCRIPCIÓN GENERAL**

En general, se pretende resolver con simulación de MHIG problemas de análisis de crecidas máximas con escasez o ausencia de aforos y datos hidrométricos.

Los modelos de procesos y subprocesos hidrológicos se aplican discretos en tiempo y espacio. La unidad de superficie menor para el cálculo agregado es la *Unidad de Estudio Hidrológico* (UEH), denominada también *Unidad Elemental Hidrológica*. La UEH es la menor unidad de cálculo donde las magnitudes son promediadas en el espacio para cada período de tiempo; se resuelven aquí las abstracciones, balance de aguas, cálculo del hidrograma de escorrentía directa, y la propagación de la onda de crecida hasta el componente siguiente.

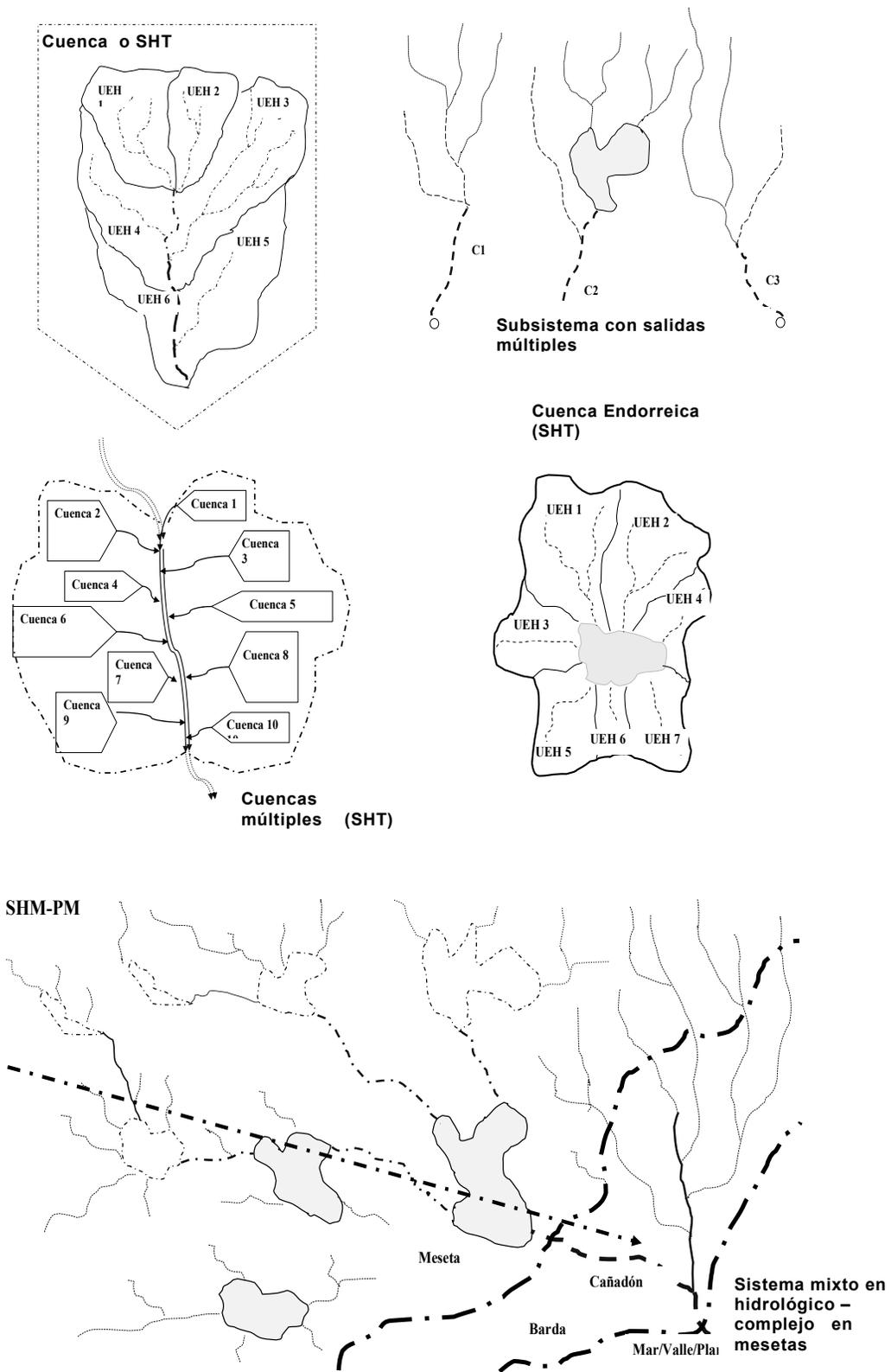
La conformación de las múltiples UEHs permite también iterar el proceso de cálculo para un grupo de varias cuencas independientes que aportan hacia un cauce central, a una depresión endorreica, o el mar.

Un ejemplo de este esquema de agrupamiento es el Cuenco Aluvional del área comprendida entre el Dique Florentino Ameghino y “Boca Toma”, en el VIRCh, Chubut (Fig. : 3), donde se identifican 32 unidades hidrológicas en dos grupos de 16 para cada margen del Río, todas ellas con sus respectivas subcuencas.

Pueden también conformarse unidades abiertas con salidas múltiples (sistemas múltiples), características muy comunes en unidades hidrológicas de mesetas, y particularmente para tormentas donde no se logra el desarrollo completo de la crecida.

Las características morfo-hidrológicas descriptas para los PMP definen las condiciones de borde del modelo. Con algunas limitaciones, puede aplicarse a diversos casos de SHM y a SHT en general.

La Fig. : 8 muestra distintas configuraciones posibles, como cuencas o sistemas hidrológicos típicos, abiertos o cerrados, y de sistemas hidrológicos mixtos de tipo complejo, en paisaje de terrazas y bardas, con salidas simples o múltiples.



*Fig. : 8. Ejemplo de conformaciones de cuencas y unidades hidrológicas de estudio para sistemas hidrológicos típicos, y sistemas hidrológicos mixtos en mesetas*

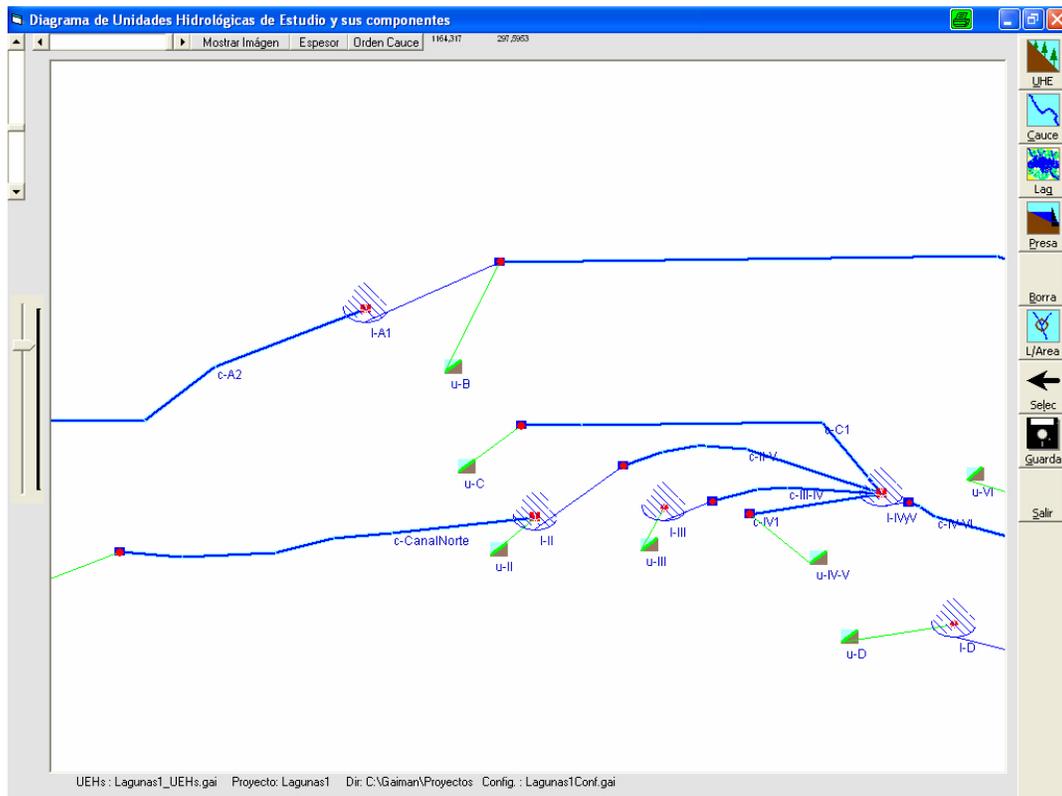
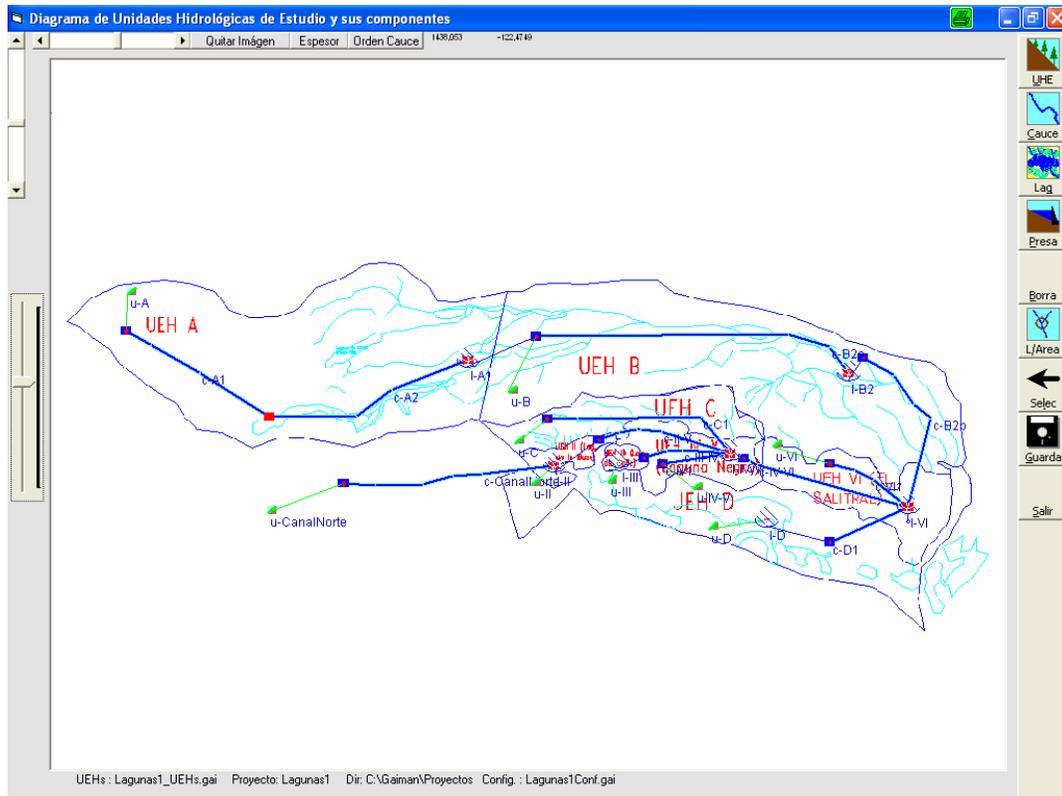
#### 8.4. RESUMEN DE CAPACIDADES DE MHIG

- **Herramientas de Diseño:**
  - Diseño modular de sistemas hidrológicos simples y complejos (sistemas independientes múltiples)
  - Diseño gráfico (Fig. : 9) del sistema hidrológico y de sus componentes (diagrama y jerarquización):
    - Subcuencas o Unidades de Estudio Hidrológico(UHE);
    - Cauces;
    - Represas;
    - Lagos/Lagunas;
  - Imagen de fondo (opcional) para apoyar el diagrama;
  - Escala de dibujo (opcional), estimador de superficies y longitudes.
- **Carga de parámetros y variables:**
  - Formularios para la carga de parámetros por cada componente (UHE, cauce, represa, lago/laguna);
  - Tablas de visualización y de edición para acceso directo a datos;
  - Edición avanzada (acceso directo a archivos de texto);
  - Formularios de opciones de carga de datos de precipitación:
    - Lluvia hipotética, distribución espacial y temporal;
    - Lluvia real;
    - Serie de tormentas PDR: Precipitación-Duración-Recurrencia); distribución temporal.
- **Opciones de Explotación o Proceso**
  - Corrida, para una tormenta;
  - Corrida, para una serie o conjunto de tormentas PDR (corridas anidadas);
- **Salidas**
  - Hidrograma, por componente, (para una tormenta);
  - Tabla resumen, por componente, (para una tormenta);
  - Tabla detallada de proceso de cálculo, por componente, (para una tormenta);
  - Ábaco y Tabla resumen, por componente, (para una serie o conjunto de tormentas PDR):
    - Caudales máximos, duración, recurrencia ( $Q_{pDR}$ );
    - Escorrentía, duración, recurrencia, (EDR);
    - Coeficientes de Escorrentía, duración, recurrencia (CDR);
- **Misceláneas**
  - Cálculo rápido de tiempo de concentración y caudal máximo por fórmulas empíricas;
  - Pantalla de Opciones de Configuración de proyecto;

## 8.5. RESUMEN DE MODELOS DE PROCESOS Y SUB-PROCESOS

Se resumen a continuación, a modo de listado jerárquico, los modelos de de procesos y sub-procesos hidrológicos de MHIG para la simulación hidrológica de crecidas máximas.

- **Modelo de Retención Superficial (intercepción y almacenamiento superficial)**
  - Método Directo o de tasa de retención superficial (Boldakov);
- **Modelo de infiltración (If)**
  - Modelo de Kostiakov;
- **Modelo de Escorrentía Directa**
  - Balance de aguas superficiales en UHE;
  - Propagación directa o método de los paralelogramos de escorrentía;
- **Modelo de Escurrimiento Subterráneo (abatimiento o recesión)**
  - Modelo de Singh y Stall;
- **Modelos de Propagación en cauce**
  - Método de los paralelogramos de escorrentía o directo
  - Método de Muskingum;
- **Modelos de propagación en embalses, lagos y lagunas**
  - Método de Piscina Nivelada;
  - Método de Muskingum;
  - Runge Kutta;
- **Modelos de Precipitación**
  - Lluvia sintética o hipotética (Precipitación, Duración y Recurrencia, PDR)
  - Modelos teóricos de distribución temporal de tormenta;
  - Modelos experimentales regionales de distribución temporal de tormenta en Meseta Patagónica (Zona del Valle Inferior del Río Chubut ;
  - Lluvias reales;
  - Series hipotéticas de tormentas (Tablas PDR)
- **Otros Modelos y funciones**
  - Ruteo y jerarquización de componentes (gráfico analítico);
  - Funciones teóricas de descarga de vertederos. Tablas de relaciones altura-caudal (vertederos) y altura, superficie, volumen almacenamiento (embalses, lagos y lagunas).



**Fig. : 9.MHIG: Diagrama en el Editor Gráfico de Componentes: UEHs, Cauces, Lagos o Represas. El editor admite una imagen auxiliar de fondo (satelital, foto aérea, diagrama o plano). Ejemplo para caso de “Laguna Negra”, Trelew, Pcia. del Chubut**

## **8.6. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, CLIMATOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE LA SIMULACIÓN**

La selección de los principales modelos que representan los distintos procesos y subprocesos hidrológicos han sido seleccionados de métodos y procedimientos conocidos, introduciendo modificaciones para adaptarlo a la discretización areal y temporal, y para interrelacionar con los algoritmos y procedimientos computacionales específicamente desarrollados.

La modelación hidrológica privilegia procesos y subprocesos para la modelación hidrológica de sistemas en las condiciones que se resumen. En general, la incorporación de nuevas funciones o mejoras en los distintos procesos han respetado la evolución en la disponibilidad de datos de campo para la resolución del problema, o particularidades de nuevos cuencos sometidos a estudio que son agregadas como opciones en los mismos.

### **8.6.1. Aspectos físicos de UEHs**

- UEH pequeñas a medianas. Escaso desarrollo del cauce principal, tiempos de concentración reducidos.
- Vegetación de tipo esteparia o arbustiva, a suelos desnudos. Intercepción reducida.
- Faldeos o laderas de taludes bien conformados, con escasas depresiones. retención superficial reducida a moderada.
- Suelos superficiales variados, aunque predominan los suelos de matriz arcillosa, de reducida infiltración.
- El flujo subterráneo inicial es reducido, sin desarrollo durante la crecida con impacto relevante en la conformación del hidrograma de crecida superficial (flujo de base nulo o reducido).
- Red de drenaje bien conformada, generalmente activa solo durante crecidas por lluvias.

### **8.6.2. Aspectos climáticos**

- Clima árido a semiárido. Precipitación anual y media mensual reducida, con chubascos y eventos meteorológicos torrenciales extremos.
- Pocas tormentas de importancia durante el año hidrológico, dispersas espacialmente, y temporalmente concentradas. Presencia de tormentas extraordinarias y excepcionales producidas generalmente por centros estacionarios de baja presión en la zona costera del Océano Atlántico Sur, de escasa frecuencia de ocurrencia.

- Nieve: Escaso a nulo impacto en la determinación del hidrograma de crecidas máximas (Las crecidas máximas quedan determinadas solo por lluvias).
- Hipótesis de lluvias agregadas (supuesta uniforme en toda la UEH).
- Disponibilidad de las ecuaciones de precipitación/intensidad, duración y recurrencia de tormenta que caracterizan el área de estudio (PDR / IDR).

#### **8.6.3. Depresiones y cuerpos de aguas**

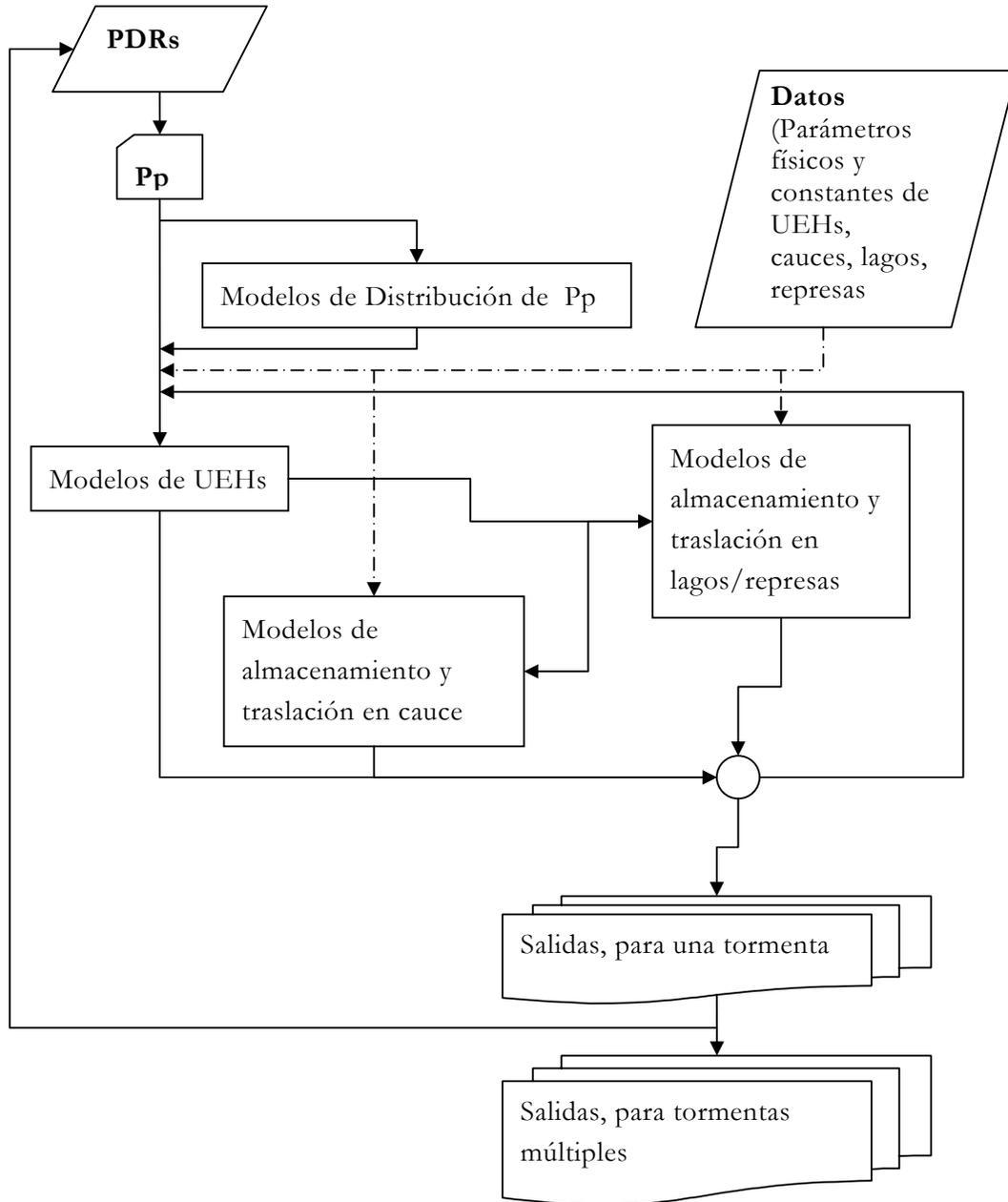
- Lagos, lagunas, humedales, embalses artificiales, con o sin estructuras de regulación, abiertas, endorreicas o cuasi-endorreicas.

#### **8.6.4. Aspectos funcionales**

- Integración (anidamiento) de UEHs y sus componentes, jerárquicas y ordenadas o bien independientes con descarga a un curso central.
- Lluvia pseudo-distribuida por discretización areal y temporal.
- Distribución areal de parámetros físicos en Cuenca principal (a un punto de síntesis único), Cuencas independientes y Subcuencas o Unidades de Estudio Hidrológico (UEHs).
- Propagación cinemática de onda de crecida en cauce principal por cuenca y en cauce central.
- Anidamiento de tormentas (matriz PDR / IDR) para la obtención de  $Q_{pDR}$  / EDR / CDR (matrices de Caudales pico, escorrentías, coeficientes de escorrentía simulados).
- Entorno de soporte de la aplicación de simple importación y exportación de datos

### 8.7. MODELOS Y ALGORITMOS BÁSICOS DE CÁLCULO A NIVEL DE UEH

Los modelos de procesos y subprocesos interactúan entre las *entradas* y *salidas* conforme el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. : 10.



*Fig. : 10. Diagrama de bloques de interacción entre los macroprocesos de modelos para UEHs, traslación en cauces y represas.*

Se presentan a continuación los modelos y algoritmos de los principales modelos de procesos y subprocesos.

### 8.7.1. Resumen de variables y parámetros utilizados en componentes UEHs, cauces, represas o lagos

En la Tabla Nro.: 3 se muestra un detalle de las variables y parámetros que intervienen en los procesos y subprocesos de cálculo de componentes hidrológicos en UEHs; se incluyen las unidades utilizadas en los distintos métodos de propagación en cauce o en embalses.

Variable/ Parámetro	Denominación	Unidad	Notas
<b>En Componentes UEHs, o en general</b>			
P, Pp	Precipitación total	mm	Variable. Total para la tormenta
$p_k$	Precipitación en el período	mm/período	Medida en el período k
$P_{kt}$	Precipitación acumulada	mm	Precipitación acumulada al final del período de cálculo k
D	Duración de la tormenta	minutos	Variable. Total para la tormenta.
R	Retorno	años	Recurrencia o período de retorno asociado para la tormenta
$I_p$	Intensidad de Precipitación	mm/minutos	
A	Área	Has	Área tributaria (superficial)
Lc	Longitud máxima de escorrentía superficial	m	Parámetro de drenaje. Longitud máxima de escorrentía en ladera y/o cauce primario al pie de la UEH
Vm	Velocidad media de la “gota de agua”	m/s	Parámetro de ajuste, estimado en base a la velocidad media de escurrimiento en la UEH.
Z	Retenciones Superficiales	mm	Almacenamiento e Intercepción (total). Parámetro de estimación y ajuste.
$z_k$	Retención superficial en el		

	período k		
a b	Parámetros de Infiltración de Kostiakov	mm/min Adim., para 't' en minutos	Parámetros de estimación y ajuste
$t_{inicial}$	Parámetro de humedad inicial	minutos	Equivalente al tiempo en minutos necesario para humectar la UEH, a carga constante y suficiente. Parámetro de estimación y ajuste.
$Q_{inicial}$ $K_{inicial}$			Condiciones iniciales del flujo al pie de UEH. Parámetros de Singh y Stall (estimación y ajuste)
Drena a	Selector indicador		Indicador de componente hidrológico receptor
T	Período o paso de cálculo	minutos	Paso del modelo
Ts	Paso de salidas	minutos	Se utiliza en el formato de salidas de los hidrogramas
k	Contador de períodos		
$t_i, t_f$	Tiempo inicial y final	minutos	Referido al período de cálculo
$I_f$	Tasa de Infiltración	mm/min	
$F_k$	Lámina infiltrada en el período k		
<b>En componentes con embalses:</b>			
<b>Variable/ Parámetro</b>	<b>Denominación</b>	<b>Unidad</b>	<b>Notas</b>
A	Área	Has	Referida a la superficie de agua en el embalse a la altura 'h'
h	Altura de agua en el embalse	m	
S	Almacenamiento	m <sup>3</sup>	Almacenamiento de agua en el

			embalse, a la altura 'h'
$Q_e$	Caudal de entrada	$m^3/s$	Referido al embalse
$Q_s$	Caudal de salida	$m^3/s$	Referido al embalse
$T, \Delta t$	Período de tiempo o paso de cálculo	minutos	
k	Contador de pasos de cálculo		
C1, C2, C3	Coefficientes		Coefficientes de Muskingum
K		minutos	Parámetro de Muskingum, (proporcionalidad)
Lc	Longitud del tramo de cauce	m	Parámetro de drenaje. Longitud máxima de escorrentía en ladera y/o cauce primario al pie de la UEH

**Tabla Nro.: 3. Detalle de las variables y parámetros que intervienen en los procesos y subprocesos de cálculo de componentes hidrológicos.**

### 8.7.2. Precipitaciones

$P_t$ , es la parte de la lluvia o precipitación equivalente producida durante el intervalo de tiempo de cálculo definido por el *paso* del modelo.

La precipitación total "P" caída durante la tormenta admite la subdivisión en intervalos iguales e independientes del paso de cálculo del modelo, que representan la distribución temporal de la tormenta. En la búsqueda de caudales máximos, esta distribución puede asumir valores teóricos propuestos por distintos autores o bien medidos en tormentas extremas en el PMP. Una distribución de lluvias con intensidades menores al principio y mayores al final genera como respuesta un mayor caudal pico y escorrentía que su inversa. El modelo dispone para su opción de distintas distribuciones y tormentas tipo:

- Distribución lineal o uniforme,
- Distribución de López Cadenas (López Cadenas y Soba Baro, 1982)
- Distribuciones de tormentas extraordinarias en el VIRCh (tormenta de Mayo de 1992, tormenta de Abril de 1998), (Fig. : 12 y Fig. : 13).
- Distribuciones Personalizadas
- Tormentas Reales

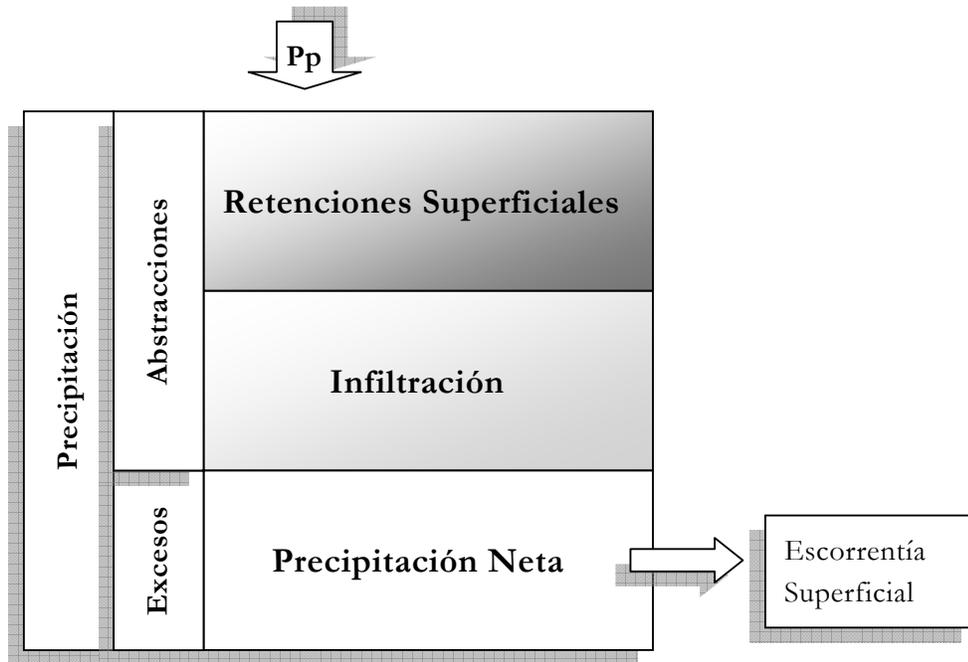


Fig. : 11. Diagrama de lluvia, abstracciones y excesos en UEH

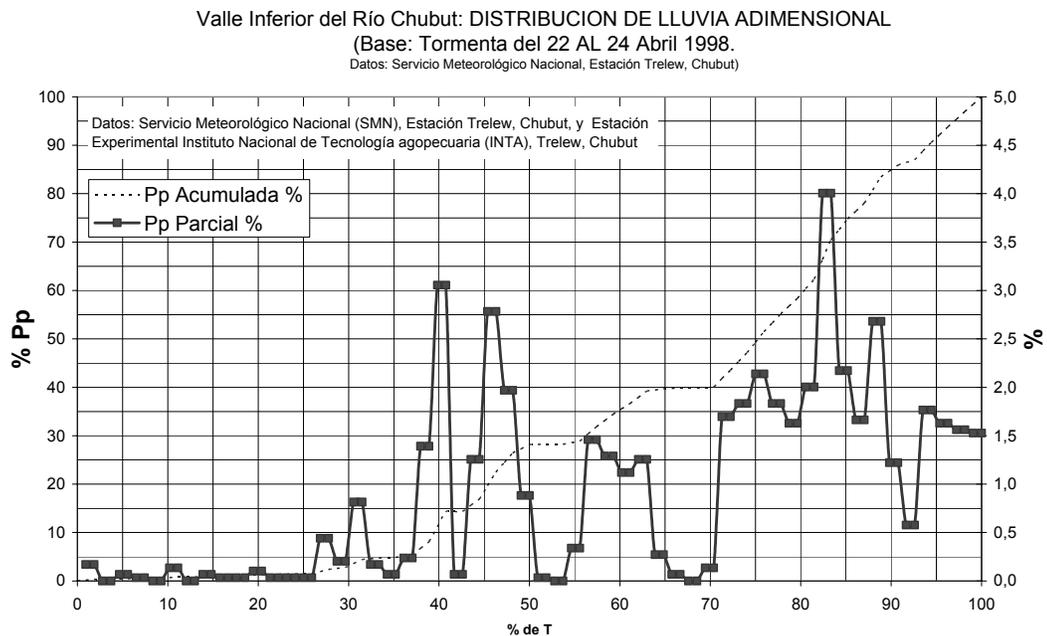
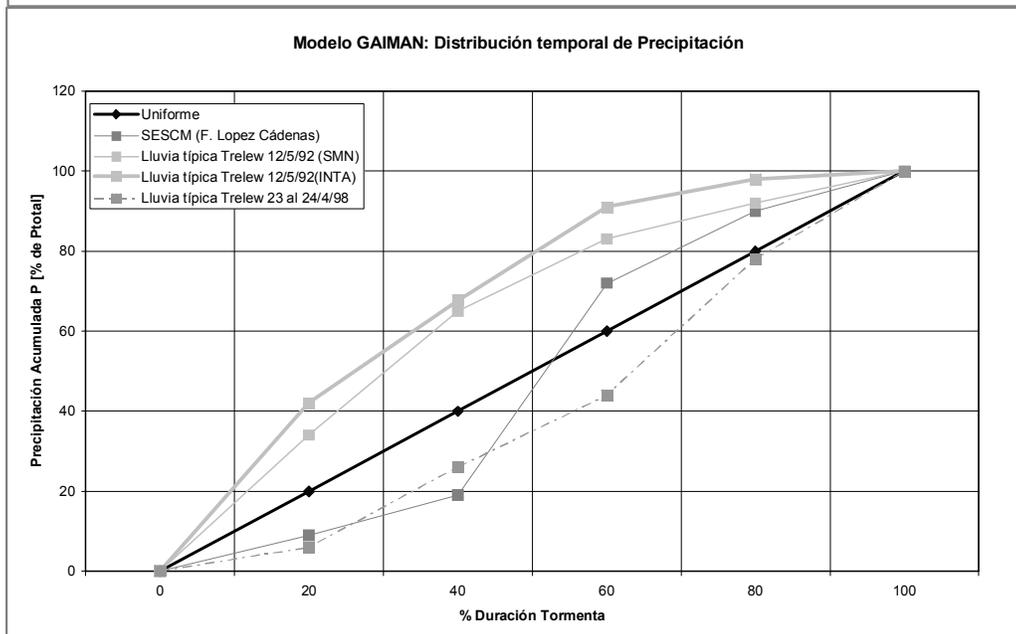
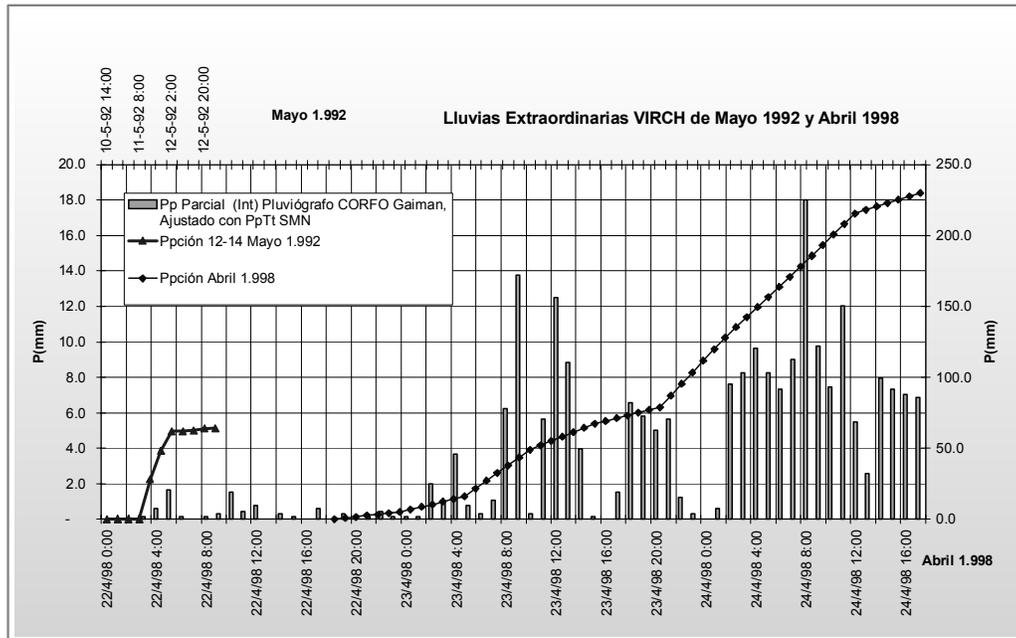


Fig. : 12. Ej.: Distribución de Tormenta en el VIRCh s/ Mayo 1998 (adimensional)



Modelo GAIMAN: Distribución de temporal de lluvia [%]							
Tipo de Distribución	Período	Intervalo de lluvia					
		1	2	3	4	5	6
Uniforme	Parcial	20	20	20	20	20	0
	Acumulada	0	20	40	60	80	100
SESCM (F. Lopez Cádenas)	Parcial	9	10	53	18	10	0
	Acumulada	0	9	19	72	90	100
Lluvia típica Trelew 12/5/92 (SMN)	Parcial	34	31	18	9	8	0
	Acumulada	0	34	65	83	92	100
Lluvia típica Trelew 12/5/92(INTA)	Parcial	42	26	23	7	2	0
	Acumulada	0	42	68	91	98	100
Lluvia típica Trelew 23 al 24/4/98	Parcial	6	20	18	34	22	0
	Acumulada	0	6	26	44	78	100

Fig. : 13. MHIG: Distribución temporal de precipitaciones

La tormenta extraordinaria de Abril de 1998, se concentró en la región costera, constituyendo la máxima tormenta histórica registrada. Totalizó un registro en la ciudad de Trelew de 230,1mm en 63 horas de lluvia, superando en más del doble a la máxima tormenta diaria registrada hasta la fecha.

### 8.7.3. Procesos y subprocesos en UEHs. Modelos

Se considera Unidad de Estudio Hidrológico, o Unidad Elemental Hidrológica, (UEH), la unidad elemental de proceso donde todos los fenómenos hidrológicos que se miden y procesan son ponderados en su espacio y para el período de tiempo de cálculo. En SHT las UEHs se tratan como Subcuencas. Es decir, para una UEH, todas las variables y parámetros son constantes a lo largo de un período de cálculo.

#### a. Abstracciones y balance de agua superficial, en el período

La Fig. : 11 muestra un esquema para la determinación de la Precipitación Neta de una tormenta a partir de las abstracciones, y la escorrentía producida. En un período de cálculo, el esquema se reduce a analizar retenciones producidas por intercepción, almacenamiento superficial (retenciones superficiales) y la infiltración.

Para un período de cálculo dado, "T", en el período 'k', se tienen (X) y (XI) :

$$(X) \quad t_f = kT \quad ; \quad t_i = t_f - T$$

$$(XI) \quad P_{kt} = \sum_{k=1}^k p_k \quad P = \sum_{k=1}^{k=n} p_k \quad ; \text{ n nro. de períodos de lluvia}$$

P y D, en el período T, es determinada según el formato de entrada de datos de la tormenta. Si la tormenta es 'real', el dato es directo, si es una lluvia sintética, se aplica una de las funciones de distribución detalladas.

Las *retenciones superficiales* en el período son evaluadas por el método directo o de tasa Boldakov (XII) , citado por López Cadenas y Soba Baro (1982), según las condiciones siguientes:

$$(XII) \quad \begin{aligned} & Si \ P_{kt} \geq Z \rightarrow z_k = 0 \\ & Si \ P_{kt} < Z \wedge p_k < Z - P_{kt} \rightarrow z_k = p_k \\ & Si \ P_{kt} < Z \wedge p_k \geq Z - P_{kt} \rightarrow z_k = Z - P_{kt} \end{aligned}$$

Para evaluar las retenciones por infiltración, que no aportan al flujo superficial, se aplica el modelo de Kostiakov para la capacidad de infiltración (XIII) , con parámetros medios en la UEH, según la expresión:

$$(XIII) \quad I_f = a t^b \quad ; \text{ Ecuación de Kostiakov}$$

Se evalúa la tasa al inicio y al final del período de cálculo (XIV) ,

$$(XIV) \quad F_k = a \left[ (k_f T + K_{inicial})^b - (k_f T + K_{inicial} - T)^b \right] \quad ; \text{ donde } k_f \text{ es un contador de períodos en que la infiltración no es nula.}$$

Análogamente a la expresión de Retención Superficial, se evalúa la disponibilidad de agua superficial para la infiltración, según la intensidad de la lluvia. Si la intensidad de precipitación satisface la capacidad de infiltración, la lámina infiltrada se evalúa con la expresión anterior. Si la lluvia es nula o la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración, la lámina de infiltración en el período se asigna nula, o a lo sumo igual al agua disponible, respectivamente.

La Tabla Nro.: 4 muestra valores del parámetro Z (Intercepción y Retención Superficial) recomendados por Boldakov, y de una selección de experiencias en modelación de pequeñas cuencas en PMP.

#### ***b. Precipitación Neta, en el período***

La Precipitación Neta ( $P_N$ ) que genera escorrentía superficial en el período se evalúa con las expresiones (XV) y (XVI) :

$$(XV) \quad p_N = p_k - z_k - F_k \quad ;$$

$$(XVI) \quad I_p = p_N / T \quad ; \text{ intensidad media de la lluvia neta, en el período } k$$

#### ***c. Escorrentía superficial, en el período***

La escorrentía superficial en el período se evalúa por la expresión racional (XVII) :

$$(XVII) \quad q_k = 0,166667 I_p A \quad ; \text{ donde } 0,166667 \text{ es un factor de conversión de unidades para expresar } q_k \text{ en } m^3/s$$

#### ***d. Propagación, a “pie de UEH”***

La propagación, o traslación del hidrograma unitario obtenido para la UEH y el período de cálculo k considerados, al “pie de la UEH”, se efectúa por el método directo (traslación temporal sin deformación de la onda), mediante los parámetros estimador de la velocidad media del agua en laderas y la longitud máxima al pie de UEH. El tiempo de retardo ( $T_r$ ) para la traslación al pie de UEH queda determinado por la expresión (XVIII) :

$$(XVIII) \quad T_r = V_m / L_c \quad ;$$

Descripción		Boldakov	
Terreno liso, sin vegetación; roca		1	
Terreno liso, débilmente enyerbado		2	
Terreno con microdepresiones en Superficie; terreno débilmente enyerbado, con escasos matorrales		3-5	
Terreno bien enyerbado; terreno con matorrales; bosque poco denso		6-10	
Bosque medianamente espeso, pastizales en muy buen estado		10-15	
Bosque adulto y espeso, con sotobosque y horizonte A desarrollado		10-15	
<b>PHMP: valores de Z experimentados en cuencas del VIRCh y Puerto Madryn</b>			
Cobertura vegetal/Superficial		Morfología	
		Pendientes débiles /Microdepresiones	Pendientes moderadas a fuertes
Tipo	Densidad	Z[mm]	Z[mm]
Suelos desnudos		1-6	1-2
Estepa	Pobre	2-8	2-3
	Alta	4-10	3-5
Monte bajo, matorrales altos	Pobre	4-8	3-6
	Alta	5-10	4-8
Pasturas naturales	Alta	>12	7-12

**Tabla Nro.: 4. Parámetro Z – Intercepción y Retención Superficial. Tabla de valores recomendados por Boldakov, y de experiencias en modelación de pequeñas cuencas en PMP**

**e. Escorrentía superficial de la tormenta**

La escorrentía superficial total de la tormenta para la UEH, queda determinada por la suma de escorrentías de cada período (XIX) :

$$(XIX) \quad E_{UEH} = NT \sum_{k=1}^{k=N} q_k \quad ; \text{ donde } N \gg n,$$

La escorrentía total para todos los componentes UEH que definen entradas por lluvias, queda determinada por la expresión (XX) :

(XX) 
$$E = \sum_{UEH=1}^{nUEHs} \left[ NT \sum_{k=1}^{k=N} q_k^{UEH} \right]$$
 ; donde nUEHs es el número total de UEHs de la simulación hidrológica.

Los parámetros de *retención superficial*, *infiltración*, y *velocidad media* se estiman en base a determinaciones de campo, ajustadas por medio de tablas experimentales conforme se ha visto detalladamente en la tesis en PMP (Serra, 2003).

El parámetro Z evalúa las retenciones superficiales y la intercepción. En cuencas de topografía bien conformada, con taludes moderados a fuertes y escasas depresiones el valor del parámetro Z es prácticamente la intercepción. En caso de UEH con depresiones suaves y homogéneas puede utilizarse Z como de evaluación conjunta de la intercepción y el almacenamiento superficial.

Este parámetro interviene en la calibración del modelo, particularmente de la curva de subida del hidrograma y se estima en base a coeficientes propuestos por distintos investigadores o bien adoptando las experiencias en PMP estimadas a partir de calibraciones de tormentas medidas, según se muestra en la Tabla Nro.: 4.

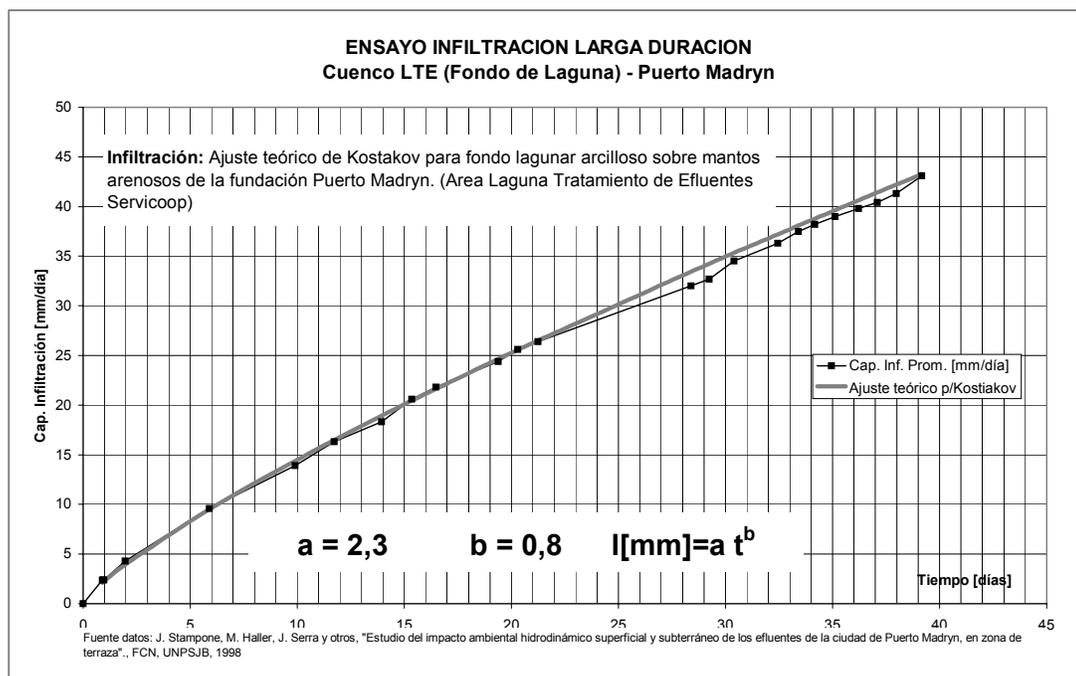


Fig. : 14. Ensayo de larga duración. Fondo de laguna, área de Meseta, Zona de Puerto Madryn

Para la estimación y ajuste de los parámetros 'c' y 'b' de Kostiakov, se recurre a determinaciones y ensayos de campo, con una red de infiltrómetros que miden este proceso en distintos suelos representativos de la UEH. Para estimaciones de menor

precisión, puede recurrirse a curvas características de suelos recomendados por distintos autores, o de funciones teóricas para suelos característicos experimentados en PMP.

En la Fig. : 14 se muestra un Ensayo de Infiltración de larga duración, para suelos de la terraza alta (Cota 130m), al NO de la ciudad de Puerto Madryn, realizados con motivos de estudios de lagunas de estabilización de efluentes urbanos (Stampone et al., 1998) La función de ajuste de Kostiakov (XXI) resulta:

$$(XXI) \quad I[mm] = 2,3t[\text{min}]^{0,8}$$

Donde 'I' es la lámina infiltrada y 't' el tiempo desde el inicio del ensayo. El Ensayo, verifica con una Infiltración Básica Ib cercana a 1mm/día.

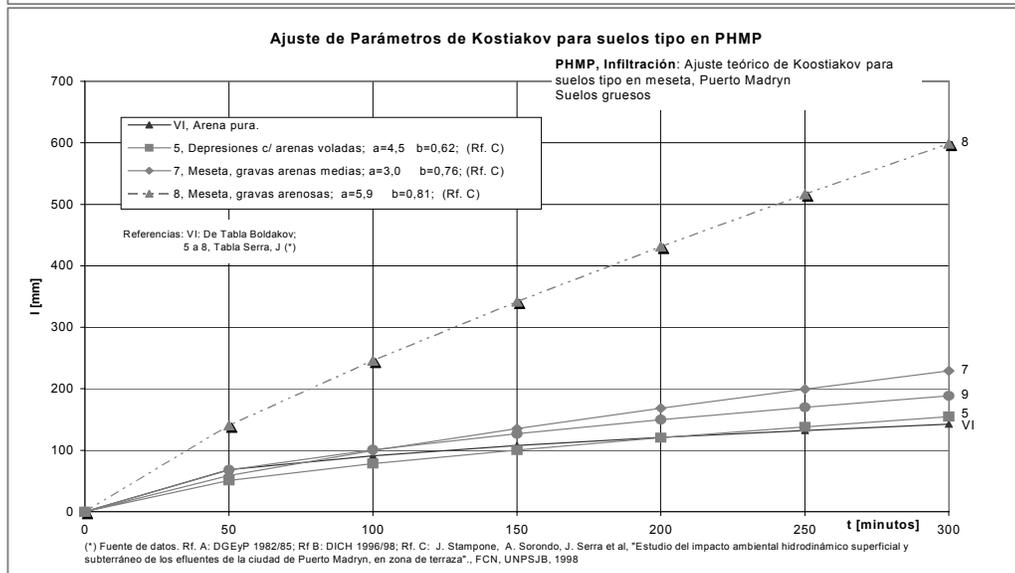
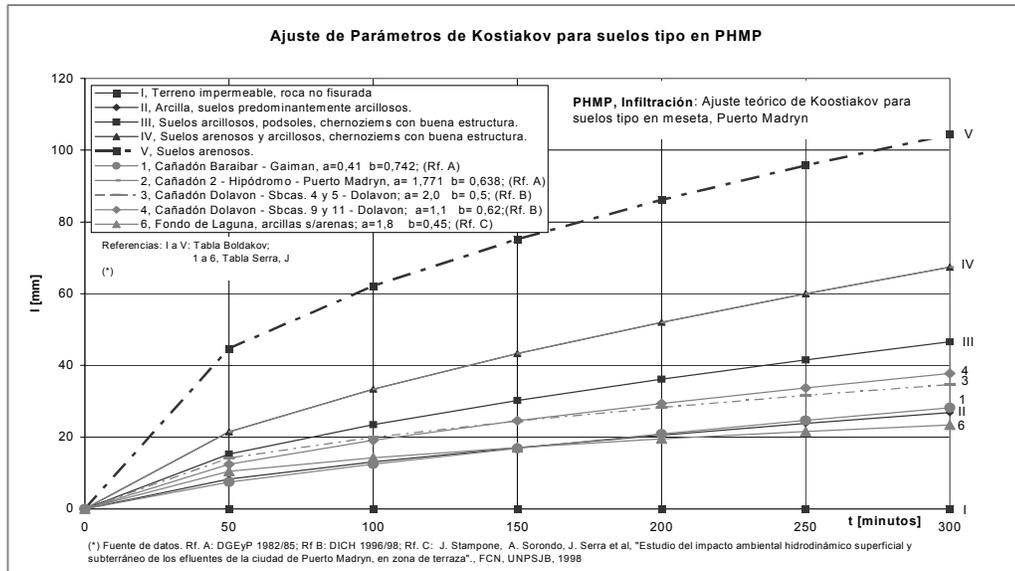
El modelo dispone de información recopilada y seleccionada para la conformación de curvas tipo de suelo, basadas en ensayos de infiltración efectuados por la Dirección General de Estudios y Proyectos de la Provincia (MESOP, 1982/89) en Cañadón Baraibar de Gaiman, cañadón Dolavon, Cañadones 1 a 5 del cuenco Aluvional de Puerto Madryn, ensayos realizados por la Facultad de Ciencias Naturales de la UNPSJB para zona de terraza en Puerto Madryn y otros ensayos, algunos de los cuales se presentan en la Fig. : 15, y en la Tabla Nro.: 26 (apéndice).

A estos datos, se agregan nuevas experiencias desarrolladas para el área de mesetas y lagunas en la planicie aluvial del Río Chubut, en la parte final del Valle Inferior del Río Chubut.

El método de propagación adoptado para el hidrograma elemental, desde el pié de la UEH hasta la salida de la cuenca es un método *directo* derivado del método conocido de los lineal de los paralelogramos de escorrentía, con parámetros adaptados para el caso.

#### ***f. Método de propagación por paralelogramos de escorrentía***

Siguiendo la teoría del hidrograma unitario (HU), propuesto inicialmente por Sherman en 1932, se tiene una *función tiempo-respuesta* de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal, donde se cumple el principio de superposición y proporcionalidad entre los excesos y la escorrentía directa. Aunque en la revisión de Chow (1994) queda demostrado que el flujo superficial no es una función lineal: "...cuando la información hidrológica que va a utilizarse se selecciona cuidadosamente... los resultados obtenidos por el modelo de hidrograma unitario generalmente son aceptables para propósitos prácticos".



**Modelo GAIMAN: Parámetros de Infiltración (Kostiakov), Tabla de Boldakov y experiencias en PHMP**

t[min]	I	II	III	IV	V	VI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	8.3	15.3	21.5	44.7	68.6	7.5	21.5	14.1	12.4	50.9	10.5	58.7	140.3	67.9
100	0.0	13.1	23.5	33.4	62.1	91.1	12.5	33.4	20.0	19.1	78.2	14.3	99.3	246.0	100.8
150	0.0	17.1	30.2	43.3	75.2	107.4	16.9	43.3	24.5	24.6	100.6	17.2	135.2	341.6	127.0
200	0.0	20.6	36.2	52.0	86.2	120.8	20.9	52.0	28.3	29.4	120.2	19.5	168.2	431.2	149.6
250	0.0	23.9	41.6	60.0	95.8	132.3	24.7	60.0	31.6	33.7	138.0	21.6	199.3	516.6	169.9
300	0.0	26.9	46.5	67.4	104.4	142.6	28.2	67.4	34.6	37.8	154.5	23.4	228.9	598.9	188.5

**Referencias**

I, Terreno impermeable, roca no fisurada	1, Cañadón Baraibar - Gaiman, a=0,41 b=0,742; (Rf. A)
II, Arcilla, suelos predominantemente arcillosos.	2, Cañadón 2 - Hipódromo - Puerto Madryn, a= 1,771 b= 0,638; (Rf. A)
III, Suelos arcillosos, podsoles, chernoziems con buena estructura.	3, Cañadón Dolavon - Sbcas. 4 y 5 - Dolavon; a= 2,0 b= 0,5; (Rf. B)
IV, Suelos arenosos y arcillosos, chernoziems con buena estructura.	4, Cañadón Dolavon - Sbcas. 9 y 11 - Dolavon; a=1,1 b= 0,62;(Rf. B)
V, Suelos arenosos.	5, Depresiones c/ arenas voladas; a=4,5 b=0,62; (Rf. C)
VI, Arena pura.	6, Fondo de Laguna, arcillas s/arenas; a=1,8 b=0,45; (Rf. C)
Referencias: I a VI, Tabla de Boldakov	7, Meseta, gravas arenas medias; a=3,0 b=0,76; (Rf. C)
1 a 9, Serra J. (*)	8, Meseta, gravas arenosas; a=5,9 b=0,81; (Rf. C)
	9, Meseta, gravas con arenas y finos menores; a= 7,3 b= 0,57; (Rf. C)

(\*) Fuente de datos: Rf. A: DGEyP 1982/85; Rf B: DICH 1996/98; Rf. C: J. Stampone, A. Sorondo, J. Serra et al, "Estudio del impacto ambiental hidrodinámico superficial y subterráneo de los efluentes de la ciudad de Puerto Madryn, en zona de terraza", FCN, UNPSJB, 1998

**Fig. : 15. Infiltración y Suelos Tipo: Valores teóricos de la expresión de Kostiakov para una selección de suelos s/ a) Boldakov y b) Parámetros obtenidos en base a Ensayos de Infiltración medidos en PHMP de la región del VIRCh.**

Se puede asumir que se cumple la función respuesta de pulso discreto de Chow (XXII), donde:

$$(XXII) \quad Q_n = \sum_{M=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1}$$

En la que 'U' es la función respuesta de pulso discreto, con dimensiones de L<sup>2</sup>/T y P es la Precipitación en unidades de lámina; 'M' es la cantidad de pulsos de entrada y 'n' el contador de intervalos de salida.

Derivado del principio del HU. Monteanu, citado por López Cadenas y Soba Baro, (1982), desarrolla el *método de los paralelogramos de escorrentía* aplicado al cálculo de caudales máximos en cuencas torrenciales,

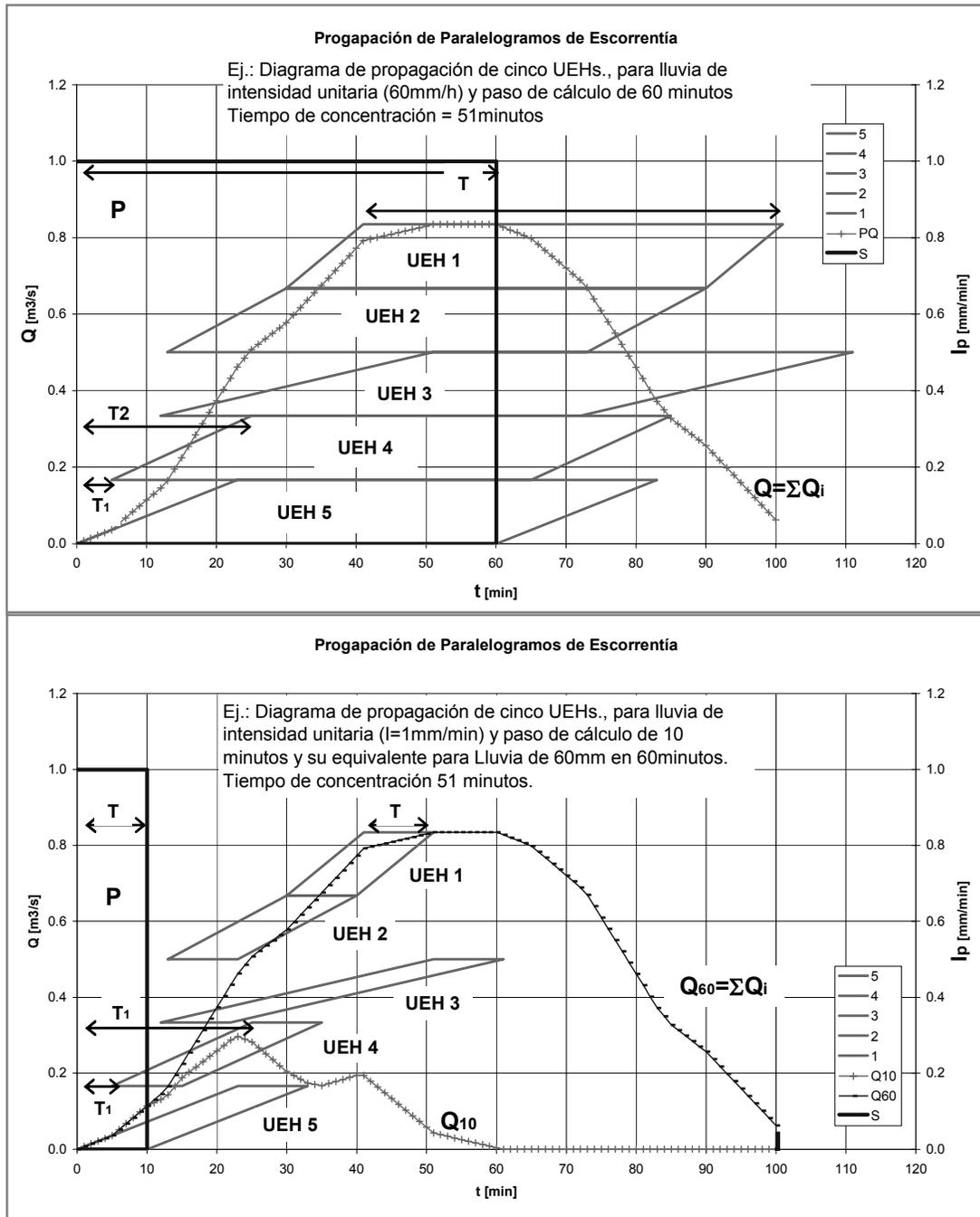
Con relación al caso que se desarrolla, se deduce que los hidrogramas resultantes de cada UEH y en cada período de cálculo pueden ser acumulados en sus respectivas bandas temporales para la obtención del hidrograma resultante de la lluvia total ingresada. Para mejorar este procedimiento de traslación de crecida a nivel de cuenca y su integración en unidades hidrológicas de orden mayor, MHIG modifica este método para agregar discretización areal y temporal de variables y parámetros.

En el esquema de la Fig. : 16, cada paralelogramo representa la escorrentía E de cada UEH causada por una Lluvia Neta Pt, de un ancho T uniforme e igual al paso del modelo. La altura del paralelogramo, representa el caudal medio en el intervalo de cálculo. La suma de los caudales parciales de cada UEH representa el caudal medio de toda la cuenca en la sección de control o salida y en el período T de cálculo.

En la gráfica siguiente, los tiempos t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub> representan, los tiempos *más temprano* y *más tardío* de llegada de la gota *hidrológicamente* más *cercana* y más *alejada* respecto a la sección de control o síntesis y tomados desde el inicio de la precipitación.

Para estos algoritmos de propagación y como se observa en el esquema, el resultado es independiente del paso del modelo. Si se tienen en cuenta todos los submodelos que intervienen en el procedimiento y los datos con que se cargan, se deduce que un paso de modelo menor al tiempo de concentración permite discretizar mejor los parámetros de entrada. Pero un paso muy chico no agrega precisión, siendo aconsejable adoptar con criterio práctico entre un tercio y un cuarto del tiempo de concentración de la cuenca, similar al recomendado por López Cadenas y otros autores ya citados.

Finalizado el cálculo del hidrograma para una lluvia completa y una cuenca dada, el modelo puede repetir el procedimiento para un grupo de cuencas.



**Fig. : 16. Diagrama de Propagación, (paralelogramos de escorrentía): Esquema un periodo de cálculo, para una lluvia unitaria (1mm/minuto) en cinco UEHs unitarias, de tiempos desplazados y en. Comparación de un “paso” de cálculo similar al tiempo de concentración y un “paso” de 1/6 Tc.**

En la simulación por componentes y en la opción de utilización de este método, los algoritmos han sido aplicados por separado para cada elemento hidrológico simulado, y los parámetros deben en consecuencia ser estimados para cada uno de ellos.

#### 8.7.4. Cauces. Propagación en cauces

Para la traslación de onda de crecida en tramos de cauces, se han seleccionado dos métodos. El método directo, derivado del método ya expuesto como método de los paralelogramos de escorrentía. Y el método cinemático de Muskingum, (USACE, 2000), citado por Ferrer Polo (1993), Linsley et al. (1977), y otros autores.

##### *a. Método de propagación directa en cauce*

El algoritmo adoptado es similar al expuesto para UEHs. La crecida se “traslada” en el tiempo sin deformación de la onda. Los parámetros que intervienen son la longitud del cauce ( $L_c$ ) y la velocidad media de traslación ( $V_c$ ). En términos prácticos puede utilizarse para este parámetro un estimador de ‘c’, celeridad de la onda de crecida. El tiempo de traslado es el que resulta de la relación entre la longitud del tramo y la velocidad de propagación.

##### *b. Propagación por el método de la onda cinemática de Muskingum*

El método de propagación directa de los paralelogramos de escorrentía produce un desplazamiento de la onda y no su atenuación. El método cinemático de Muskingum permite simular ambos efectos. Los caudales de un grupo de cuencas obtenidos al pie o salida de cada una, si descargan a un tramo de *cauce*, pueden ser propagados en dicho tramo hasta una sección de control única ubicada al final del mismo. El método cinemático de *Muskingum* de traslación agregada de ondas de crecidas en cauces naturales modela el almacenamiento volumétrico que produce la creciente en forma de cuña dentro del cauce y su valle de inundación.

Muskingum utiliza dos parámetros de ajuste, ‘k’ y ‘x’. La constante de almacenamiento “K”, expresa en unidades de tiempo la relación entre *almacenamiento* y *descarga*. Por defecto, se la estima como similar al tiempo de viaje de la onda de crecida y en función de su celeridad. El parámetro “x”, es adimensional para  $0 \leq x \leq 0,5$ , con valores prácticos que varían entre 0,1 a 0,3 en la mayoría de los casos, y expresa la importancia relativa entre las entradas y las salidas del tramo de cauce.

Para Muskingum, cuando la creciente comienza a desarrollarse (curva de ascenso del hidrograma), los caudales ingresantes al tramo son mayores que los salientes, produciéndose un incremento del almacenamiento en un período de cálculo, al que representa por simplicidad en forma de cuña (Fig. : 17).

Durante el descenso, los caudales salientes son mayores a los entrantes produciéndose el efecto inverso. Para caudales entrantes y salientes iguales, el almacenamiento presente puede asimilarse a un prisma de sección transversal constante. Ambos almacenamientos (prisma y cuña) pueden valorarse y sumados representan el almacenamiento total en el cauce.

Muskingum supone un parámetro de proporcionalidad 'K', tal que el almacenamiento en prisma es el producto  $A_p = K Q_s$ , es decir, que el almacenamiento en el prisma es proporcional al caudal saliente. Mientras que el almacenamiento en cuña, es proporcional al producto de  $K \cdot x \cdot (Q_e - Q_s)$ , o producto de la constante de proporcionalidad por la diferencia de caudales entrantes y salientes, afectado de un coeficiente de ponderación de entras y salidas.

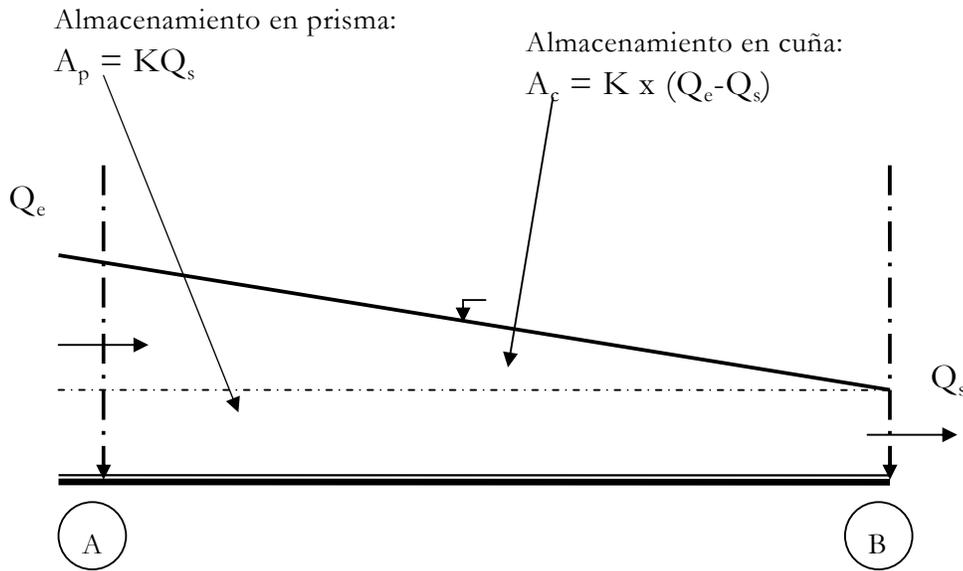


Fig. : 17. Esquema de almacenamiento en un cauce (prisma - cuña), para la crecida.

Luego, el almacenamiento 'S' en el tramo de cauce será (XXIII) :

$$(XXIII) \quad S = K[xQ_e + (1-x) Q_s] \quad ; \quad 0 \leq x \leq 0,5 \quad ;$$

El coeficiente 'x' depende de la geometría de la sección transversal, variando entre un valor nulo para embalses ( $x=0$ ), hasta un valor máximo de  $x=0,5$  para cuñas totalmente desarrolladas. Los valores prácticos para tramos de arroyos y ríos varían entre 0,1 y 0,2.

Si los valores de 'K' y 'x' se suponen constantes y considerando un período dado de tiempo 'k', con un paso de cálculo t, se tiene (XXIV) para el inicio y fin del período:

$$(XXIV) \quad S_{k+1} - S_k = K \{ [xQ_{e_{k+1}} + (1-x) Q_{s_{k+1}}] - [xQ_{e_k} + (1-x) Q_{s_k}] \}$$

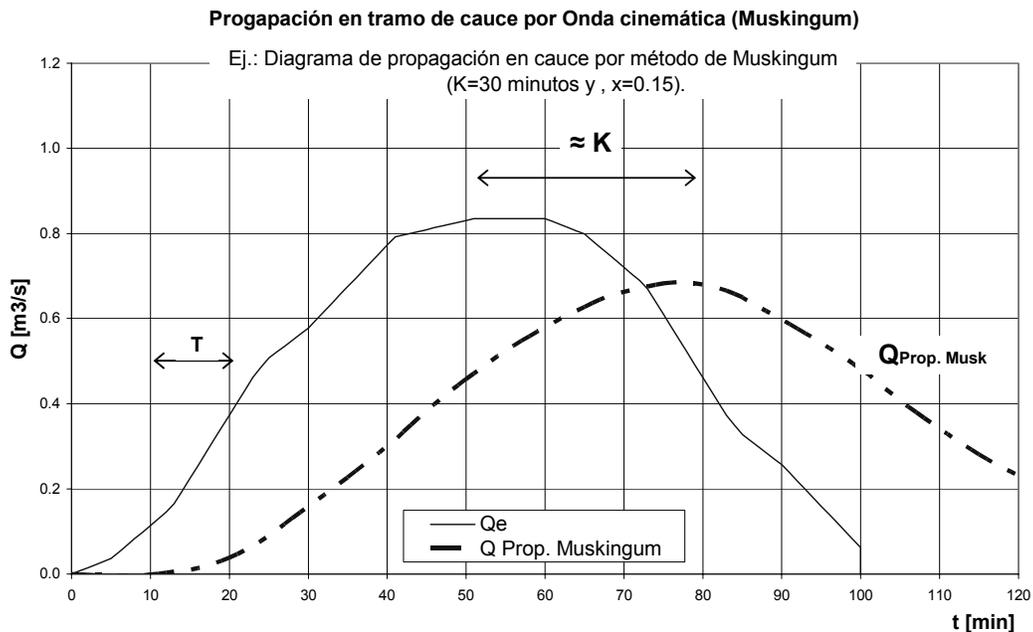
Reagrupando los términos (XXV) , se arriba a la conocida expresión lineal para el tránsito agregado de crecidas:

$$(XXV) \quad Q_{S_{k+1}} = C_0 * Q_{e_{k+1}} + C_1 * Q_{s_k} + C_2 * Q_{s_k}$$

Donde, Q = Caudal expresado en [m<sup>3</sup>/s], el Subíndice “S” indica en la salida del tramo, el subíndice “E” indica entrada al tramo, el Subíndice “1”, al comienzo del período y el Subíndice “2” al final del período de cálculo. Los coeficientes “C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>” de Muskingum (XXVI) se deducen de su procedimiento en función de los parámetros “K” y “x” y de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$(XXVI) \quad C_0 = -\frac{Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t} \quad ; \quad C_1 = \frac{Kx + 0,5t}{K - Kx + 0,5t} \quad ; \quad C_2 = \frac{K - Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t}$$

Donde, ( C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>) = 1 , y 0 <= x <= 0,5



**Fig. : 18. Propagación en cauce, Método de Muskingum**

Si se conocen ambos hidrogramas de entrada y salida en un tramo de cauce representativo del que se intenta simular, K puede ser medido despejando y resolviendo la ecuación Muskingum. Existen otros diversos métodos para la estimación de ‘K’, (Linsley et al., 1977, Chow, 1994). La interpretación física más simple de ‘k’ es que representa la celeridad de la onda de crecida y en ausencia de datos puede estimarse como la velocidad de traslación de la onda de crecida entre los dos picos de hidrogramas (entrad y salida).

En MHIG, los parámetros “K” y “x” son ingresados como datos para cada tramo de cauce, en función de las características morfológicas, de la celeridad estimada para la onda de crecida y de la longitud del tramo.

En la Fig. : 18, puede verse un diagrama de propagación por Muskingum, para un hidrograma elemental producido en una UEH que es trasladado al final de un tramo de cauce.

#### 8.7.5. Represas y estructuras hidráulicas de evacuación

Las represas y sus órganos hidráulicos de regulación o evacuación (orificios, vertederos, compuertas) pueden ser simulados de manera muy sencilla, insertando en el ruteo del diagrama un componente represa.

El programa analiza en forma aislada las entradas y salidas al embalse de una represa, produciendo como resultado, para cada período de cálculo, las variables de embalse: altura de agua, superficie inundada y almacenamiento, y los caudales salientes en dicho período.

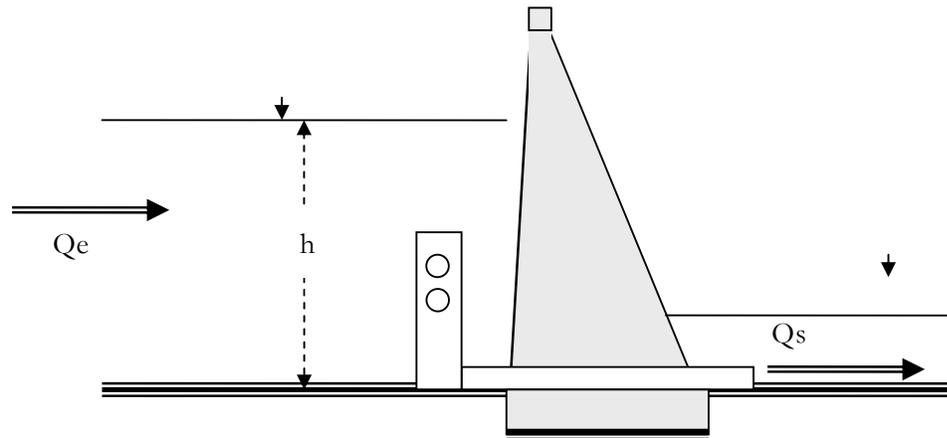


Fig. : 19. Esquema de cálculo para una Represa

##### a. Tránsito de crecidas en embalses de represas

Para un modelo agregado, el tránsito de crecidas es el procedimiento por el cual puede determinarse la forma del hidrograma de aguas abajo a partir de conocer el Hidrograma en una sección de aguas arriba. En este caso, conocido el hidrograma de entrada al canal o tramo de cauce, deducir el hidrograma en el final.

El proceso de cálculo de una represa (Fig. : 19) se resume en aplicar: a) Modelo de balance de aguas superficiales (entradas y salidas al embalse, y b) Modelo de traslación de onda de crecida en embalse. Los modelos de traslación de onda de crecida que se

computan opcionalmente son: a) Propagación directa (paralelogramo de escorrentía; b) Muskingum (lagos); y c) Runge Kutta.

En todos los casos, la información de entrada son los caudales entrantes, en tanto los parámetros de ajuste dependen del método de propagación elegido.

Chow (1994), analiza el tránsito agregado de crecidas (XXVII) partiendo de la ecuación de continuidad, dada en (V) .

$$(XXVII) \quad \frac{dS}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t)$$

La ecuación diferencial, establece para el almacenamiento una función de las entradas y las salidas. Una segunda relación que me permita resolver la ecuación, podría obtenerse de la función de almacenamiento, que en un desarrollo de Taylor (XXVIII) en función *no lineal* de las *entradas* y las *salidas* puede expresarse como:

$$(XXVIII) \quad S = f(Q_e + \frac{dQ_e}{dt} + \frac{d^2Q_e}{dt^2} + \dots; Q_s + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{d^2Q_s}{dt^2} + \dots)$$

El sistema de ecuaciones diferenciales puede resolverse por diferencias finitas, según el sistema que se esté analizando. Chow considera tres métodos de resolución: *piscina nivelada*, *Muskingum*, y *Runge Kutta*.

### **b. Método de propagación de Piscina Nivelada**

Se supone aquí que el almacenamiento es una función *no lineal* solo de las salidas, según una serie de Taylor, puede expresarse como (XXIX) :

$$(XXIX) \quad S = Q_s + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{d^2Q_s}{dt^2} + \dots$$

Si el embalse es ancho y profundo, las velocidades y pérdidas de carga son despreciables, la superficie de agua puede asimilarse a una superficie horizontal, donde la variación del almacenamiento debida a las entradas puede aceptarse despreciable, solo es función de los caudales salientes.

Integrando la ecuación diferencial (XXIX) , y resolviendo para intervalos finitos en el período 'k', de ancho de intervalo  $T = \Delta t$ , se tienen (XXX) (XXXI) :

$$(XXX) \quad \int_{S_k}^{S_{k+1}} dS = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} Q_e(t) dt - \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} Q_s(t) dt \quad , \text{para variación lineal en el intervalo:}$$

$$(XXXI) \quad S_{k+1} - S_k = \frac{Q_{e_k} + Q_{e_{k+1}}}{2} \Delta t - \frac{Q_{s_k} + Q_{s_{k+1}}}{2} \Delta t$$

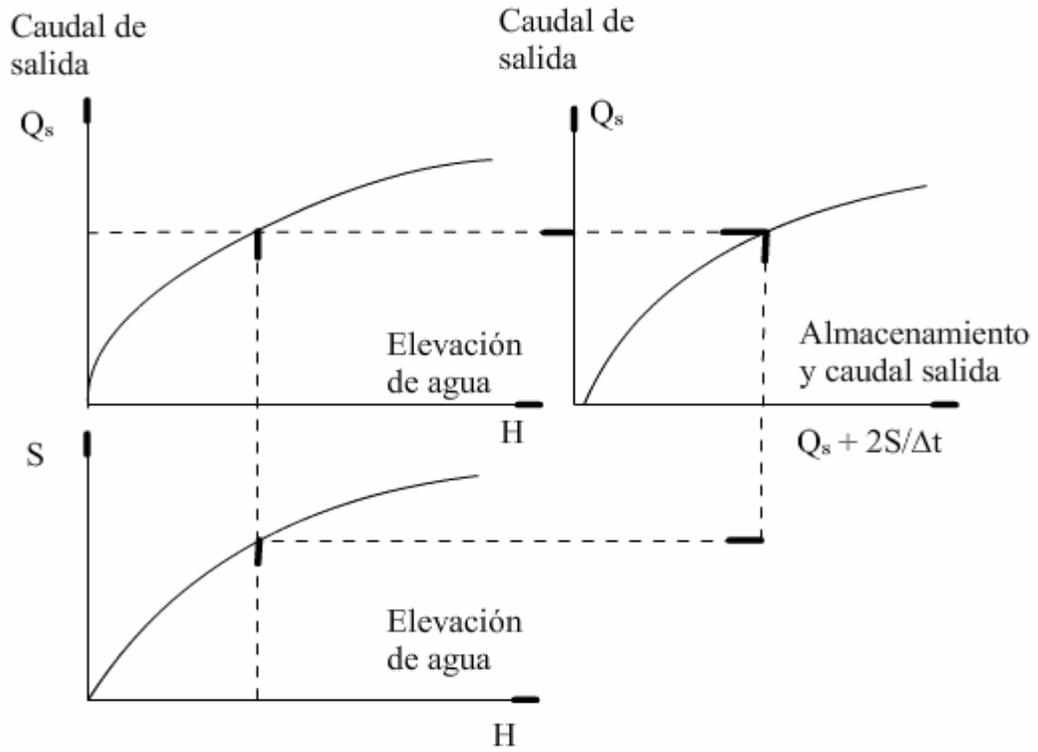
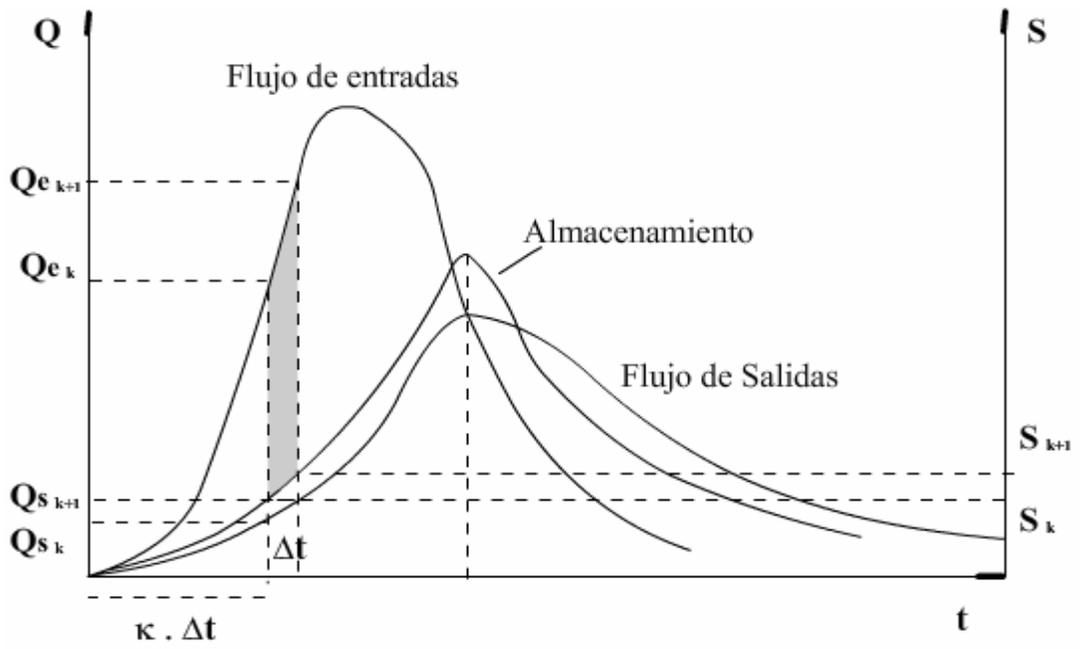


Fig. : 20. Piscina Nivelada: Diagrama para Almacenamiento, flujos de entradas y salidas

Reagrupando los términos conocidos a la derecha de la ecuación, se tiene (XXXII)

$$(XXXII) \quad \left( \frac{2S_{k+1}}{\Delta t} + Q_{s_{k+1}} \right) = (Q_{e_k} + Q_{e_{k+1}}) + \left( \frac{2S_k}{\Delta t} - Q_{s_k} \right)$$

Para el cálculo de  $Q_{k+1}$ , se recurre a una función de *almacenamiento-caudal de salida*, que relacione  $2S/\Delta t + Q_s$  con  $Q_s$ . Esta función se puede obtener de relacionar el *almacenamiento* con la *altura de agua* en el embalse.

Esta relación, puede obtenerse con trabajos topográficos. La relación elevación del agua-caudal saliente puede obtenerse de aforos o de funciones de los órganos de regulación de la presa (vertederos, compuertas). Para un valor conocido de 'H' de la elevación de agua en el embalse, se determina el almacenamiento 'S', y el caudal saliente 'Q<sub>e</sub>'. Seguidamente, para esos valores conocidos se calcula la función  $2S/\Delta t + Q_s$  y con ella, el valor del caudal saliente. (Fig. : 20)

### c. Método de propagación de (Muskingum)

En esta opción, el método adoptado para la propagación de crecida en un tramo de cauce es el de onda cinemática de Muskingum, expuesto en 8.7.4. b. , donde el parámetro de ponderación 'x' es nulo (x=0). Luego, el almacenamiento es función proporcional del caudal de salida; se tienen (XXXIII) y (XXXIV) :

$$(XXXIII) \quad S = KQ_s \quad ;$$

$$(XXXIV) \quad C_0 = -\frac{0,5t}{K+0,5t} \quad ; \quad C_1 = \frac{0,5t}{K+0,5t} \quad ; \quad C_2 = \frac{K-0,5t}{K+0,5t}$$

### d. Método de propagación de Runge-Kutta

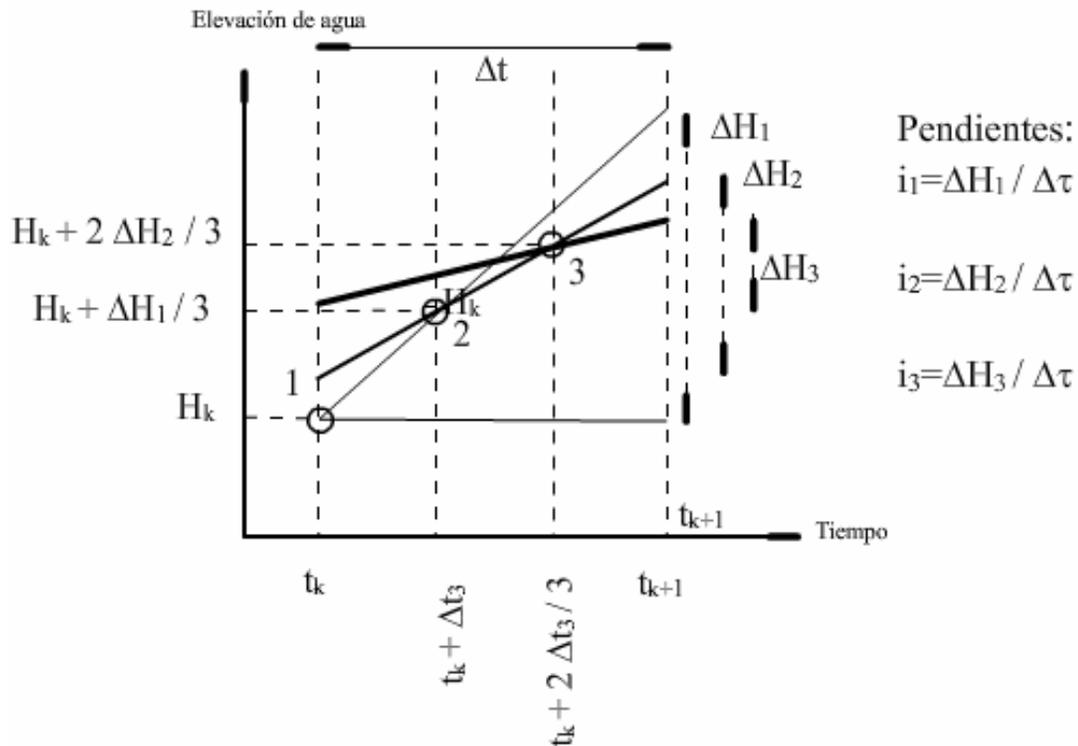
Chow explica un procedimiento alternativo para el tránsito agregado de crecidas que surge de resolver las ecuaciones de continuidad por el método numérico de Runge-Kutta. La ventaja de este método es que no requiere de la función *almacenamiento-caudal de salida*,  $S = f(Q_s)$ . Sostiene que pueden adoptarse varios esquemas de Runge-Kutta de diferente orden, del que selecciona un *esquema de tercer orden*. Cada intervalo de tiempo es subdividido en tres partes, y calcula valores sucesivos de la elevación del agua y el caudal de salida del embalse para cada incremento.

En la ecuación de continuidad (V) , la variación del almacenamiento en relación a la elevación y superficie de agua embalsada, puede expresarse en función de la altura del embalse como (XXXV) :

$$(XXXV) \quad dS = A(h)dh$$

Donde 'h' es la elevación de agua en el embalse, y 'A(h)' es el área de la *superficie de agua* a la altura 'h'. Reemplazando en la ecuación de continuidad, resulta(XXXVI) :

$$(XXXVI) \quad \frac{dh}{dt} = \frac{Q_e(t) - Q_s(h)}{A(h)}$$



**Fig. : 21. Tránsito agregado en embalses: Incrementos de elevación para la resolución por método numérico de Runge Kutta, de tercer orden**

La resolución numérica, toma pequeños intervalos de la variable dependiente 'h' dentro del intervalo 't'. En un esquema de tercer orden, se toman tres intervalos de 'h' en cada período 'Δt', truncando los términos subsiguientes de la serie de Taylor.

Cada uno de los tres intervalos en 'h', dan una aproximación mayor al valor de la solución. Tomando intervalos finitos, resulta:

Primera aproximación (XXXVII) :

$$(XXXVII) \quad \Delta h_1 = \frac{Q_e(t_k) - Q_s(h_k)}{A(h_k)} \Delta t$$

Segunda aproximación (XXXVIII) :

$$(XXXVIII) \quad \Delta h_2 = \frac{Q_e(t_k + \frac{\Delta t}{3}) - Q_s(h_k + \frac{\Delta h_1}{3})}{A(h_k + \frac{\Delta h_1}{3})} \Delta t$$

Segunda aproximación (XXXIX) :

$$(XXXIX) \quad \Delta h_3 = \frac{Q_e(t_k + \frac{2\Delta t}{3}) - Q_s(h_k + \frac{2\Delta h_1}{3})}{A(h_k + \frac{2\Delta h_1}{3})} \Delta t$$

La elevación de agua en el período, es la elevación de agua en el período anterior más la variación ‘ $\Delta h$ ’, de donde se deduce que (XL) :

$$(XL) \quad \Delta h = \frac{\Delta h_1}{4} + \frac{3\Delta h_3}{4}$$

La Fig. : 21, muestra una diagrama para las tres aproximaciones de ‘ $\Delta h_1$ ’, ‘ $\Delta h_2$ ’ y ‘ $\Delta h_3$ ’. La pendiente de la solución  $dh/dt$ , queda resuelta por aproximación ‘ $\Delta h/\Delta t$ ’. Se calcula primero en  $(h_k ; t_k)$ , luego en  $(h_k + \Delta h_1/3 ; t_k + \Delta t/3)$ , finalmente en  $(h_k + 2\Delta h_2/3 ; t_k + 2\Delta t/3)$ .

#### ***e. Datos y parámetros de entradas de componentes Represas***

Los datos y parámetros a ingresar para un componente represa, se agrupan en:

*Relaciones h-A-S:*

Las relaciones de *almacenamiento* ‘S’ y *área* de la superficie de agua ‘A’ embalsada a la *elevación* ‘h’, se ingresan para cada uno de los componentes en formato de tabla.

*Relaciones h-Q,*

La función de descarga del embalse, se puede conformar por un conjunto de ecuaciones de opción potencial o poli nómica de Q (h). Opcionalmente, puede ingresarse en forma de tabla discreta de valores h-Q.

#### **8.7.6. Componentes lagos / lagunas / mallines**

El análisis es similar que para represas, admitiendo las mismas opciones de propagación de la crecida. Los datos se cargan solo en formato de tabla para h-A-S-Qs.

## 8.8. CALIBRACIÓN

Luego de la diagramación y carga de componentes de la simulación hidrológica, se requiere la fase de calibración, en la cual se ajustan los parámetros que mejor resultados producirán.

Esta fase requiere ser validada con investigaciones de campo y laboratorio, y corridas de ajustes en gabinete, que permitan reproducir de manera abstracta el fenómeno torrencial que se modela, arribando a resultados confiables en un entorno de error conocido y aceptable para el propósito perseguido.

El procedimiento correcto de calibración requiere de al menos una tormenta observada, y su correspondiente hidrograma medido en una sección de control.

En la tesis en PMP (Serra, 2003), se han desarrollado los criterios que permiten acotar el error aceptable, en función de la *finalidad del estudio*, la *información técnica disponible*, y la *certidumbre y calidad de los resultados* esperados (Serra, 2003). Dependiendo de ello, muchos parámetros con dificultad de ser medidos en campo pueden ser reemplazados con estimaciones basadas en experiencias en unidades hidrológicas similares.

La calibración en una simulación de crecidas máximas en torrentes de PM, admite simplificaciones de simulación hidrológica que acotan el problema, por cuanto se suponen:

- Condiciones previas de humedad en la cuenca cercana a la infiltración básica;
- Caudal superficial inicial nulo (aunque el modelo admite como dato un caudal inicial mayor que cero);
- Condiciones previas de humedad de suelos, de media a elevada;
- Unidades hidrológicas pequeñas a medianas. En consecuencia, la lluvia puede suponerse generalizada en todo el cuenco; aunque el modelo admite discretizar la lluvia en tantas áreas como en UEHs se haya subdividido a la zona de estudio.
- Laderas y red de drenaje de pendientes bien conformadas, sin depresiones extensas. (Aunque el modelo admite retardos para la mejor simulación de UEHs con pendientes reducidas y elevado almacenamiento);

## 8.9. EXPLOTACIÓN

La fase de explotación, corresponde a las corridas que se efectúan con el modelo ya calibrado, para explorar comportamientos en diferentes escenarios de tormentas. Las fases de la explotación del programa, comprenden:

### 8.9.1. Primer paso

- Diagramación de los componentes (Editor Gráfico),

- Carga de componentes UEHs, cauces, represas, lagos/lagunas/mallines,
- Vinculación y jerarquización de componentes (ordenamiento de la descarga de un componente a otro),
- Carga de datos físicos y parámetros de las UEHs:
  - Área o superficie tributaria, longitud al pie de UEH o cauce más cercano,
  - Parámetros de retención superficial e infiltración, parámetros de humedad y de escurrimiento iniciales,
- Carga de datos físicos y parámetros de cauces,
  - Longitud de cauce,
  - Opción de método y parámetros de propagación,
- Carga de datos físicos y parámetros de represas y lagos/lagunas/mallines,
  - Altura inicial de embalse,
  - Funciones h-A-S,
  - Funciones h-Q,
  - Opciones de método y parámetros de propagación,
- Carga de parámetros estimadores de Propagación:
- Verificación de todos los datos cargados (formato detallado en tabla):

### **8.9.2. Segundo paso**

Una vez cargados los datos físicos y parámetros del modelo, se cargan los datos de la tormenta en el módulo de precipitaciones,

- Opción de la forma de ingresar los datos de la tormenta,
- Carga de la tormenta o del grupo de tormentas (corrida anidada para un conjunto de tormentas PDR),
- Selección o carga de la distribución de la tormenta, en caso de optar por un evento no real o sintético,
- Selección del paso de cálculo del modelo y de las salidas del modelo (hidrograma),

### **8.9.3. Tercer paso**

Correr el modelo en una de las dos opciones (una tormenta o tormentas múltiples).

### **8.9.4. Cuarto paso**

Despliegue de informes de salidas en formato tabla y gráfico.

## **8.10. PRUEBA Y VALIDACIÓN**

Muchas pruebas de modelos simples se consideran validadas en la tesis en PMP (Serra, 2003). Siendo que el modelo ha sido rehecho por completo, se vuelven a verificar la consistencia numérica de los modelos de procesos y subprocesos.

Todos los modelos de procesos y subprocesos de cálculo han sido sometidos a distintas pruebas, cuyas características y resultados se resume a continuación:

### **8.10.1. Pruebas de consistencia numérica de los modelos básicos**

#### ***a. Prueba de casos simples***

Refiere a pruebas del programa para los modelos de procesos y subprocesos, de manera aislada, confrontados con pruebas de cálculo convencional, resueltas en hoja de cálculo.

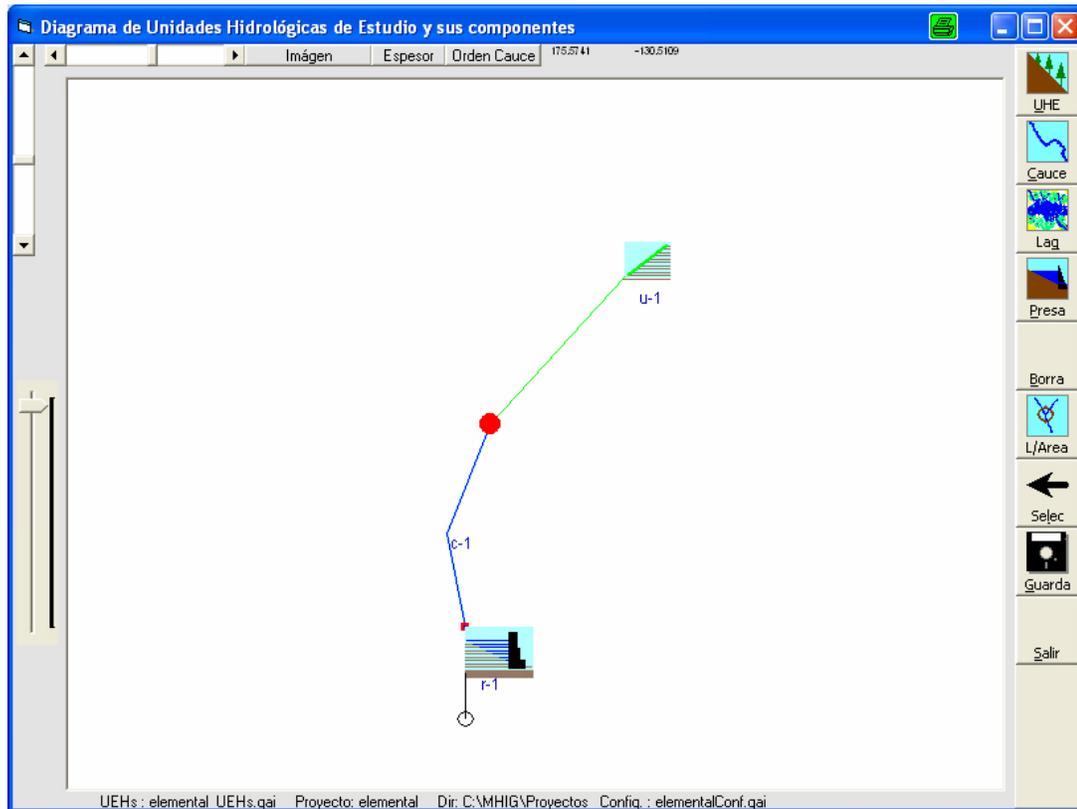
Las pruebas comienzan con un componente UEH único, de manera de analizar los resultados de cada uno de los procesos y subprocesos en este tipo de componentes, al que se le va agregando otros modelos y componentes, sumando así diferentes grados de complejidad. De cada una de las pruebas se conoce previamente sus resultados.

Todas las pruebas detalladas resultaron consistentes para los resultados observados.

En la Tabla Nro.: 5, se muestra un resumen de las condiciones ensayadas con MHIG, con solo algunos resultados testigos más relevantes. La Fig. : 22, muestra el diagrama de componentes probados que se resumen la tabla citada.

Caso N°	Descripción	Variabes sometida a prueba	Resultados testigos
1	UEH única, sin drenajes. Área 100 has. (1000m x 100m), supuesta en dos planos inclinados con drenaje central, impermeable (sin abstracciones); Vel.Med. 1m/s; Lluvia uniforme de intensidad unitaria, en toda el área, $D > t_c$	Forma del hidrograma Caudal Máximo Caudales intermedios Tiempo al pico Tiempo de base Escorrentía	Q máximo: 16,67 m <sup>3</sup> /s. E = 60mm, 60.000 m <sup>3</sup> $t_p = 25$ min $t_b = 85$ min
2	Igual Prueba N° 1, con retenciones superficiales de 10 mm	Igual a Prueba N° 1	Q máximo: 16,67 m <sup>3</sup> /s. E = 50mm, 50000 m <sup>3</sup> $t_p = 35$ min $t_b = 85$ min
3	Igual Prueba N° 1 excepto infiltración ( $a=0,5$ , $b=0,5$ )	Igual a Prueba N° 1	Q máximo: 16,06 m <sup>3</sup> /s. E = 56,1mm, 56127 m <sup>3</sup> $t_p = 60$ min $t_b = 85$ min
4	Igual a Prueba 1, más un tramo de cauce de 6000m, Vel. Med. 1m/s, Propagación directa.	Igual a Prueba N° 1, observados al final de la UEH (entrada al cauce) y al final del cauce	Final cauce: Q máximo: 16,67 m <sup>3</sup> /s. E = 60 mm, 60.000 m <sup>3</sup> $t_p = 125$ min $t_b = 185$ min
5	Igual Prueba 4, excepto propagación, Muskingum, $K=100$ min, $x=0.2$	Igual a Prueba N° 4	Final cauce: Q máximo: 10,93 m <sup>3</sup> /s. E = 60 mm, 60.000 m <sup>3</sup> $t_p = 85$ min $t_b = 880$ min
6	Igual a Prueba 4, más una Represa, función de descarga potencial de $a=10$ y $b=0.7$ ; para $2m < h < 5m$ . Almacenamiento igual a un cubo de 1 Ha de superficie y 5m máximo de altura. Propagación: Piscina nivelada. Altura de agua inicial: 0.	Igual a Prueba N° 5, y mismos parámetros, a la salida del embalse.	Salida de la presa: Q máximo: 12,8 m <sup>3</sup> /s. $E_{s\text{ale}} = 40.044$ m <sup>3</sup> $t_{\text{inicio}} = 235$ min $t_p = 265$ min $t_b = 335$ min Almac. Residual= 19.971m <sup>3</sup>

**Tabla Nro.: 5. Resumen de pruebas de consistencia de casos simples (modelos de procesos y subprocesos para componentes aislados)**



*Fig. : 22. Diagrama de MHIG para Pruebas de consistencia numérica 1,2,3,4 y 5*

***b. Prueba de consistencia numérica de propagación en embalses (Métodos numéricos de Piscina Nivelada y Runge Kutta, y método cinemático del modelo lineal de Muskingum)***

Seguidamente, se muestran tres pruebas de consistencia numérica, una para cada uno de los tres métodos de propagación en embalses que usa MHIG: b1) Piscina Nivelada, b2) Muskingum, 3, Runge Kutta.

Para contrastar la prueba, se comparan los resultados de MHIG con los dados en el ejemplo de Chow (1994), para Piscina Nivelada y Runge Kutta, agregando además el tránsito por Muskingum. Los valores del ejemplo, se han convertido previamente a unidades métricas.

*Descripción del ejemplo:*

Embalse de un área horizontal de 0,4047 Has. (1 acre) y lados verticales, con un conducto de evacuación circular de 1,52m de diámetro (5 ft). El paso de cálculo elegido es de 10 minutos. (Para todas las elevaciones la superficie es la misma: 0,4047 Has).

En la Tabla Nro.: 6, se muestran las relaciones de elevación del agua, almacenamiento y caudal de salida.

H [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	S [m <sup>3</sup> ]
0	0	0
0,15	0,085	617
0,30	0,227	1,233
0,46	0,481	1,850
0,61	0,850	2,467
0,76	1,218	3,084
0,91	1,699	3,700
1,07	2,209	4,317
1,22	2,747	4,934
1,37	3,313	5,551
1,52	3,879	6,167
1,68	4,417	6,784
1,83	4,899	7,401
1,98	5,380	8,018
2,13	5,805	8,634
2,29	6,173	9,251
2,44	6,541	9,868
2,59	6,853	10,485
2,74	7,164	11,101
2,90	7,476	11,718
3,05	7,787	12,335

**Tabla Nro.: 6. Relaciones elevación y almacenamiento en el embalse, y caudal de salida**

La Fig. : 23 muestra resultados de la propagación con MHIG en embalse por el método de Piscina Nivelada; la Tabla Nro.: 7 los resultados tabulados por el método de Runge Kutta; la Fig. : 24 los resultados para el método de Muskingum.

La Fig. : 25 muestra un gráfico comparativo de la función de entrada con los tres hidrogramas propagados por los métodos de Muskingum, Piscina Nivelada y Runge Kutta, para del ejemplo desarrollado por Chow.

Los resultados para los tres métodos, calculados por MHIG, son consistentes y verifican correctamente los ejemplos de Chow.

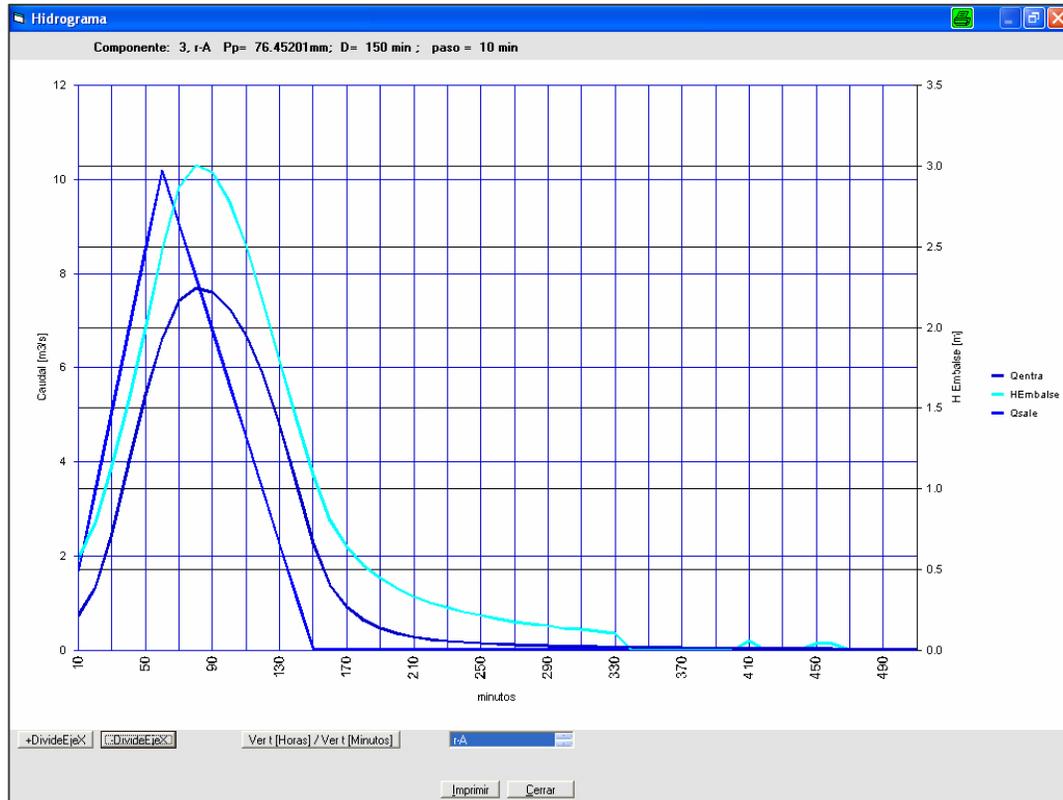


Fig. : 23. MHIG: Resultados de tránsito por Método de Piscina Nivelada

Pizarra de Variables y Salidas

Planilla detallada de cálculo de propagación en Represa

Componente: Represa r-A Método de Propagación: Runge Kutta

k	t	qe(i, k)	dH1	dH2	dH3	q(i, k)			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	1.699003	-8.590364E-02	8.506668E-03	7.996098E-02	.6740972	.5384948	2172.875	
2	20	3.398007	.1519558	.2174481	.2670886	1.271873	.7768002	3152.993	
3	30	5.09701	.3152273	.4392376	.3727513	2.442745	1.13517	4585.068	
4	40	6.796013	.4935296	.6406457	.4122162	3.955379	1.542715	6254.595	
5	50	8.495018	.6721161	.8352085	.4478332	5.390994	1.98388	8033.935	
6	60	10.19402	.8502122	.103129	.5070779	6.622623	2.479242	10029.42	
7	70	11.89303	1.0283083	.1624173	.5318535	7.398892	2.860509	11565.71	
8	80	13.59204	1.2064044	.2112424	.5472424	7.679279	2.998045	12121.29	
9	90	15.29105	1.3845005	-.2.276137E-02	-.7.029685E-02	7.58916	2.954579	11942.5	
10	100	17.0	1.5626016	-.1175942	-.1615388	-.1974491	7.236332	2.777093	11244.04
11	110	18.7	1.7407027	-.2332651	-.2659861	-.2913233	6.666392	2.500285	10115.97
12	120	20.4	1.9188038	-.3165977	-.3375428	-.3504075	5.870158	2.15833	8743.246
13	130	22.1	2.0969049	-.3665296	-.3735881	-.3725147	4.761827	1.787311	7225.407
14	140	23.8	2.275006	-.3706313	-.3672105	-.3625532	3.512	1.422739	5767.58
15	150	25.5	2.4531071	-.3527182	-.3429365	-.3375195	2.249957	1.081419	4363.971
16	160	27.2	2.6312082	-.3335856	-.2803602	-.2445358	1.393152	.8146211	3308.311
17	170	28.9	2.8093093	-.206553	-.1754085	-.157917	.9347506	.6445451	2609.095
18	180	30.6	2.9874104	-.138589	-.1217741	-.1090136	.6486185	.5281376	2130.273
19	190	32.3	3.1655115	-.9.616619E-02	-.8.447471E-02	-.7.562605E-02	.4609603	.4473765	1801.321
20	200	34.0	3.3436126	-.6.834339E-02	-.6.298146E-02	-.5.846087E-02	.3642315	.386445	1566.354
21	210	35.7	3.5217137	-.5.400209E-02	-.4.976531E-02	-.4.619333E-02	.2878005	.3382995	1380.693
22	220	37.4	3.7008148	-.4.267019E-02	-.3.932246E-02	-.3.650003E-02	.2274079	.3002569	1233.991
23	230	39.1	3.8789159	-.3.371619E-02	-.3.211436E-02	-.3.068683E-02	.1974761	.2688128	1104.924
24	240	40.8	4.057017	-.2.927842E-02	-.2.790862E-02	-.2.666699E-02	.1716133	.2414929	992.7309
25	250	42.5	4.2351181	-.2.544392E-02	-.2.425352E-02	-.2.231745	.1491377	.2177511	895.231
26	260	44.2	4.4132192	-.2.211161E-02	-.2.107712E-02	-.2.013942E-02	.1296056	.1971186	810.5004
27	270	45.9	4.5913203	-.1.921573E-02	-.1.831672E-02	-.1.750183E-02	.1126316	.1791883	736.8666
28	280	47.6	4.7694214	-.1.669911E-02	-.1.591784E-02	-.1.520967E-02	.9.788061E-02	.1636063	672.8765
29	290	49.3	4.9475225	-.1.451208E-02	-.1.383313E-02	-.1.321771E-02	.8.506151E-02	.150065	617.2668
30	300	51.0	5.1256236	-.1.261148E-02	-.1.225463E-02	-.1.192143E-02	.7.818358E-02	.137971	567.5208
31	310	52.7	5.3037247	-.1.159174E-02	-.1.126711E-02	-.1.096066E-02	.7.188314E-02	.1268526	521.787
32	320	54.4	5.4818258	-.1.065762E-02	-.1.035915E-02	-.1.0100774	.6.609042E-02	.1166302	479.7387
33	330	56.1	5.6609269	-.9.79877E-03	-.9.524353E-03	-.9.265305E-03	.6.076451E-02	.1072315	441.0788
34	340	57.8	5.839028	-.9.009134E-03	-.8.75683E-03	-.8.51866E-03	.5.586778E-02	.9985902	405.5344
35	350	59.5	6.0171291	-.8.28313E-03	-.8.051159E-03	-.7.832181E-03	.5.136566E-02	.9.064528E-02	372.8542
36	360	61.2	6.1952302	-.7.615631E-03	-.7.402354E-03	-.7.201022E-03	.4.722634E-02	.8.334061E-02	342.8077
37	370	62.9	6.3733313	-.7.001924E-03	-.6.805833E-03	-.6.620726E-03	.4.342059E-02	.7.662458E-02	315.1824
38	380	64.6	6.5514324	-.6.437672E-03	-.6.257383E-03	-.6.087192E-03	.3.992153E-02	.7.044977E-02	289.7834
39	390	66.3	6.7295335	-.5.91889E-03	-.5.75313E-03	-.5.596655E-03	.3.670445E-02	.6.477255E-02	266.4311
40	400	68.0	6.9076346	-.5.441915E-03	-.5.289513E-03	-.5.145647E-03	.3.374661E-02	.5.955284E-02	244.9607
41	410	69.7	7.0857357	-.5.003376E-03	-.4.863256E-03	-.4.730983E-03	.3.102713E-02	.5.475376E-02	225.2204
42	420	71.4	7.2638368	-.4.600178E-03	-.4.471349E-03	-.4.349736E-03	.2852568	.5.034141E-02	207.071
43	430	73.1	7.4419379	-.4.229472E-03	-.4.111024E-03	-.3.999211E-03	.2.622796E-02	.4.628463E-02	190.3841

Tabla Nro.: 7. MHIG: Resultados de tránsito por Método de Runge Kutta

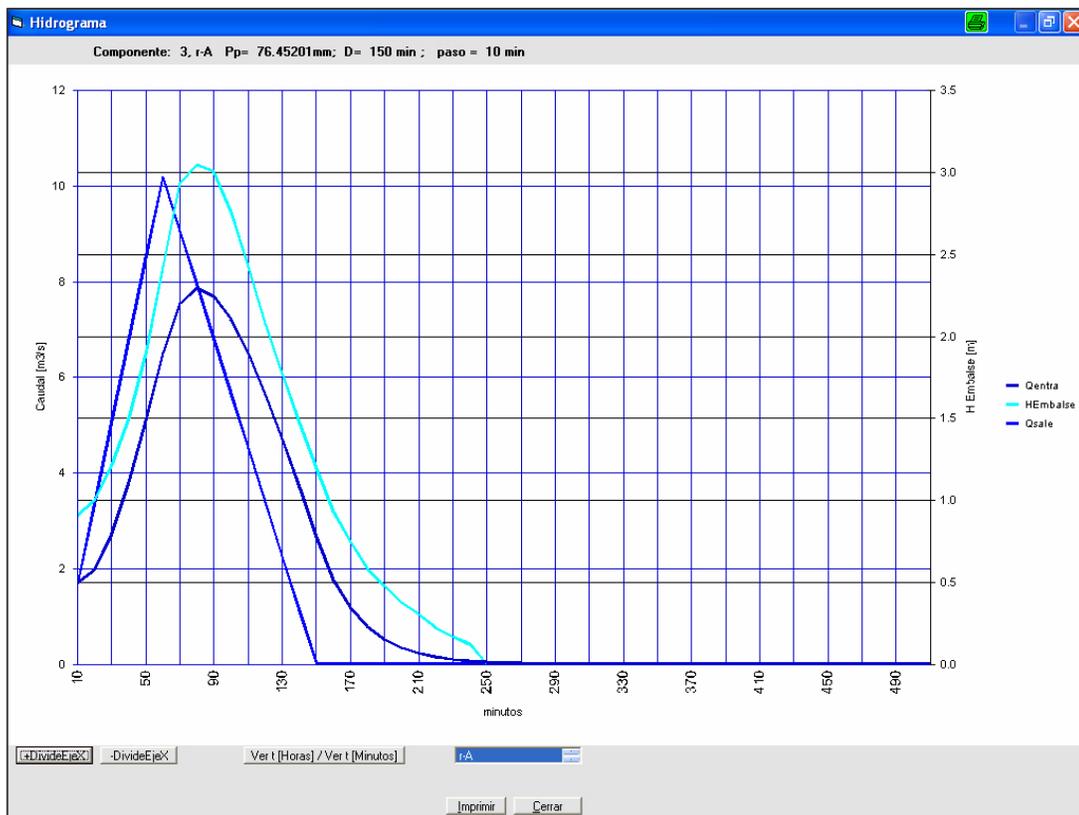


Fig. : 24. MHIG: Resultados de tránsito por Método de Muskingum

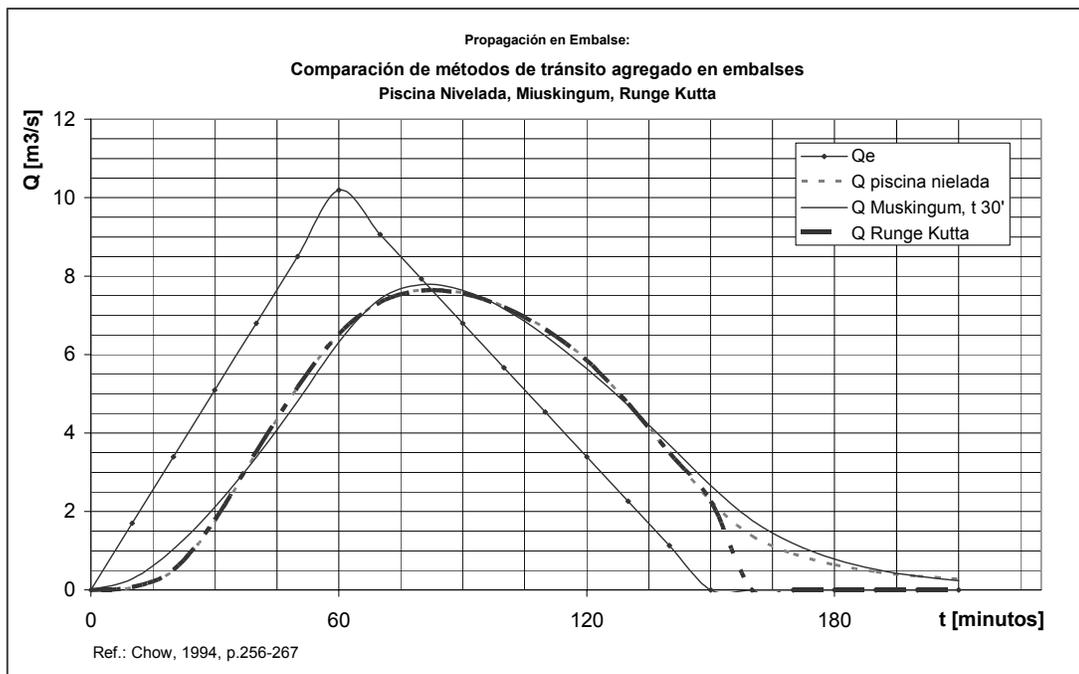


Fig. : 25. MHIG, prueba y validación: Métodos de tránsito agregado de Piscina Nivelada, Muskingum y Runge Kutta. Soluciones al ejemplo de Chow.

### **8.10.2. Prueba de un caso real: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut.**

La prueba siguiente corresponde a la descripción detallada para el Cañadón Baraibar, Gaiman, Provincia del Chubut. Es una pequeña cuenca, en zona de bardas, que desagua hacia el Río Chubut en la referida localidad.

En la tesis en PMP (Serra, 2003), se describe con mayor detalle las características topográficas, morfológicas, de suelos, e hidrológicas en general.

La sección de control principal se ha ubicado en el cruce con Ruta Nacional N° 25, en cercanías del acceso a la ciudad. La superficie de la cuenca es de 77,8 Has. y la longitud del cauce principal de 2,06 km.

Se evalúan dos escenarios: situación natural (sin presas) y situación con proyecto (tres presas en cascada).

#### ***a. Escenario para Cañadón Baraibar, SIN PRESAS***

En la Fig. : 26. se muestra el diagrama de componentes, en este caso UEHs y tramos de cauces. El diagrama muestra las conexiones entre componentes que definen el *ruleo* del agua superficial.

Se ha elegido para el caso un conjunto de tormentas sintéticas, para distintas duraciones y periodo de retornos (PDR). Para este ejemplo, se supondrá distribución de lluvias uniforme e intensidad constante.

Efectuada la simulación con MHIG, se obtienen resultados que se muestran con los formatos del ábaco de la Fig. : 27 y Tabla Nro.: 8.

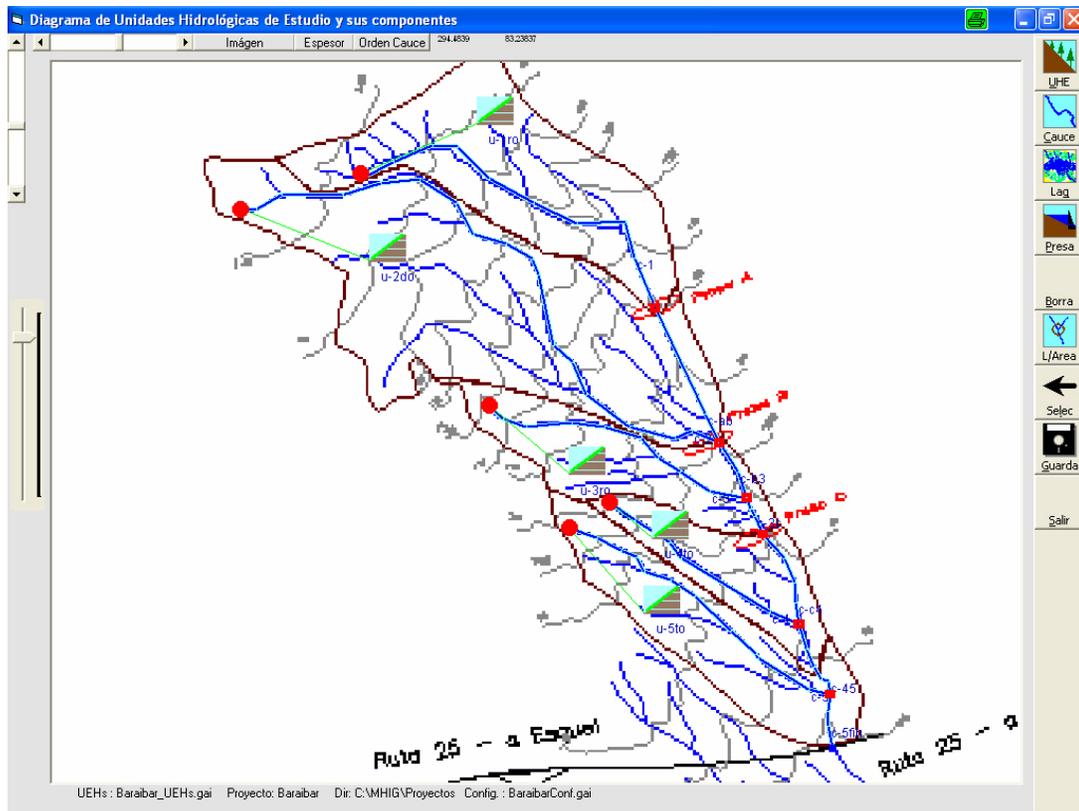


Fig. : 26. Cañadón Baraibar, Gaiman, Chubut (Sin Presas): Diagrama de Componentes UEHs y cauces.

Serie de Tormentas Sintéticas: Resumen Qp-D-R - E-D-R - CE-D-R por Componente							
Componente	Nro.	P[mm]	D[min]	R[años]	Qp[m3/s]	E[m3]	C[%]
C:\MHIG\Proyectos\Baraibar_Conf.gai							
Estimación de crecidas máximas, Cañadón Baraibar - S/ Presas							
Ubicación: Gaiman, Pcia del Chubut - Cuenca: Valle Inferior del Río Chubut							
SubCuenca: Cañadón Baraibar							
Operador: JJS - 9/23/2006 8:21:56 PM							
		5	10	2	0.66		
		7	20	2	1.67		
		9	30	2	2.5		
		12	60	2	1.83		
		14	120	2	0.86		
		19	360	2	0.1		
		22	720	2	0		
		24	1080	2	0		
			1440	2	0		
		8	10	5	3.73		
		12	20	5	5.5		
		14	30	5	4.8		
		18	60	5	3.5		
		22	120	5	2.03		
		31	360	5	0.68		
		37	720	5	0.24		
		40	1080	5	0.06		
0-04	14						

Tabla Nro.: 8. MHIG: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. Ej.: Planilla detallada de Cálculo, por componente

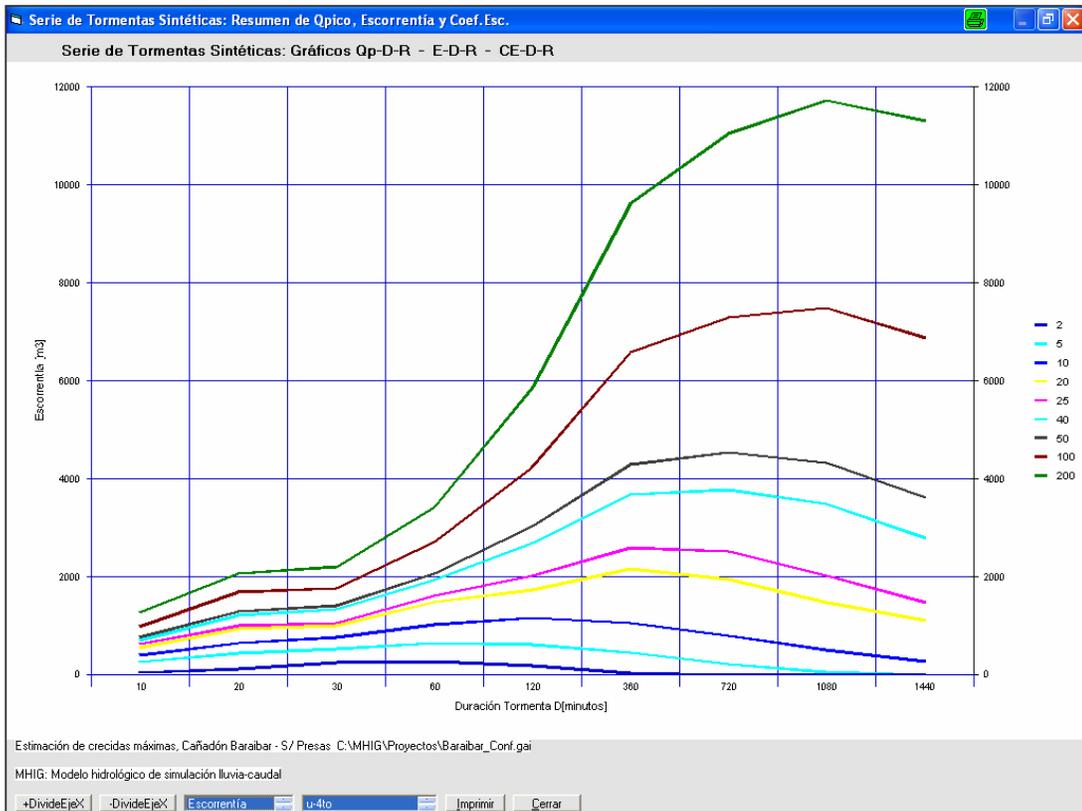
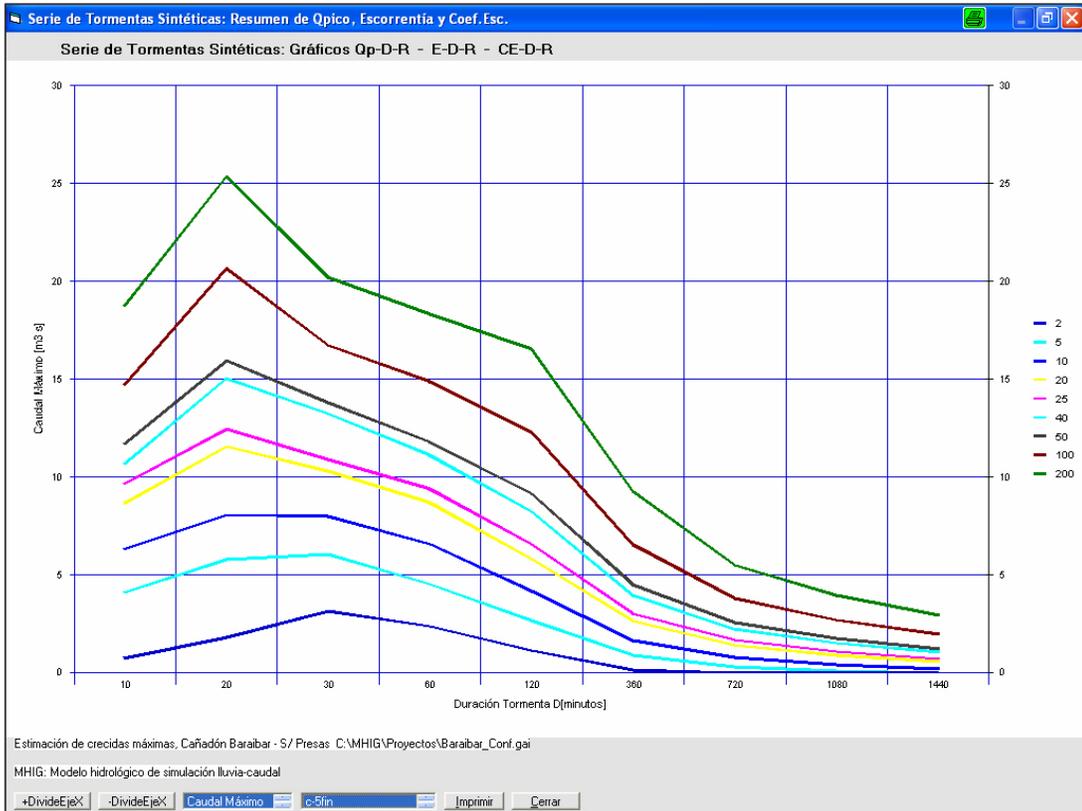


Fig. : 27. MHIG: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. Gráfica de Caudales Máximos y Escorrentía - Duración - Recurrencia, para un conjunto de tormentas PDR

## 8.11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS MODELOS

Características de la prueba: Tormenta de recurrencia centenaria, duración 30 minutos, precipitación total de 32,4 mm. La Tabla Nro.: 9, muestra una copia del resumen de MHIG para los datos y parámetros de entradas de UEHs y tramos de cauces.

Tabla de datos de Entradas: Parámetros Físicos de las UHEs													
Baraibar06		Estimación de crecidas máximas, Cañadón Baraibar - S/ Presas							Baraibar06_				
Componente	Nro.	Nombre	#Fuente de	Método	Vértices	Ind.Vért.	Vel.Medía	Longitud	Orden	k Musk.	x Musk.		
Cauce	1	c-1	c-ab	Directo	11	1	1	895	1	0	0		
	2	c-2	c-b3	Directo	18	12	1.84	1320	1	0	0		
	3	c-3	c-3c	Directo	10	30	1.72	616	1	0	0		
	4	c-4	c-45	Directo	6	40	2.2	513	1	0	0		
	5	c-5	c-5fin	Directo	12	48	1.8	676	1	0	0		
	6	c-ab	c-b3	Directo	3	58	1.4	277	1	0	0		
	7	c-b3	c-3c	Directo	3	61	2.4	164	2	0	0		
	8	c-3c	c-4	Directo	4	64	2.4	62	2	0	0		
	9	c-4	c-45	Directo	5	68	2.4	239	2	0	0		
	10	c-5fin	0	Directo	4	73	2.4	114	2	0	0		
	11	c-45	c-5fin	Directo	6	77	2.4	190	2	0	0		
					Área	Long. Máx	Vel. Media	Infil.'a'	Infil.'b'	Humd	Q ini	'K' Rec.	Retens..
UEH	1	u-1ro	c-1	Directo	17.5	121	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	2	u-5to	c-5	Directo	11.3	97	0.5	0.41	0.74	0	0	0	3
	3	u-2do	c-2	Directo	32	142	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	4	u-3ro	c-3	Directo	9.8	135	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	5	u-4to	c-4	Directo	7.2	48	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
					k Musk.					Hmin	HMáx	HInicio	
Lag./Mallin	1				0					0	0	0	

Tabla Nro.: 9. MHIG: Cañadón Baraibar, Tabla resumen de parámetros para UEHs y tramos cauces

Los resultados pueden observarse para cada componente UEH o cauce. Componente: Tramo de Cauce c-5fin

Per.k t[min] Qentra[m3/s] Qsale[m3/s]

Volumen Escurrido. Entra = 18913 m3 ; Sale = 18913 m3

Caudal Máximo = 12.15 m3/s

Seleccionando al fin de la prueba el último tramo de cauce, se obtienen como resultados un volumen escurrido de 18913 m3, caudal máximo 12,15m3/s, y el hidrograma que se muestra en la Tabla Nro.: 10.

Los resultados obtenidos y expuestos en el punto anterior, se contrastan con los resultados de distintos modelos empíricos y de un modelo lluvia-caudal similar, de tipo determinístico y agregado.

El cálculo del tiempo de concentración, estimado por el método del SUCS, es (XLI) :

$$(XLI) \quad t_c = 0,87 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 0,87 \left( \frac{2,06^3}{70} \right)^{0,385} = 0,426 \text{ hs} \equiv 26 \text{ min}$$

t [min]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
0	0
5	0
10	0.818
15	4.237
20	7.286
25	9.596
30	11.129
35	12.154
40	8.544
45	5.28
50	2.766
55	1.233
60	0

**Tabla Nro.: 10. Cañadón baraibar: Resumen de resultados Q-t para el último componente (cauce), tormenta P 32,4mm, D 30 min., R 100años**

Si se desea ajustar el resultado de MHIG a un tiempo de concentración similar, deben ajustarse los parámetros de velocidades de la onda de crecida en UEHs y cauces, siendo posible lograr total coincidencia.

Para el resultado mostrado, se presenta una comparación de hidrogramas de crecidas máximas que resultan de simular tormentas con el conocido modelo hidrológico HEC HMS. (Hydrologic Model System) HEC HMS, es producido por Hydrologic Engineering Center, US Federal Government:

Las variables de entrada y los parámetros de carga utilizados para ambos modelos son los mismos, o similares, como también son similares los criterios para el caso de aquellos parámetros de modelos diferentes.

Para las abstracciones se utiliza el método de “Initial-Constant”; el modelo de transformación del hidrograma utilizado es US Soil Conservation Service (SCS, 1971); por simplicidad se supone sin flujo base, conforme al Manual del Usuario y Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS. La Tabla Nro.: 11, reproduce un esquema de los elementos hidrológicos con los parámetros físicos cargados en la rutina “Basin Model”

La Fig. : 28 resume en una gráfica los resultados del hidrograma obtenido por ambos métodos para el componente final en una sección de control ubicada en Ruta Nacional N° 25.

UEH	Initial loss [mm]	Constant Rate [mm/h]	SCS Lag [min]	Base Flow
1	3	5.16	15.5	No
2	3	5.16	17	No
3	3	5.16	11.4	No
4	3	5.16	7.7	No
5	3	5.16	9.3	No

Cauces	Lag [min]	Cauce Principal
R1	1.11	x
R2	1.11	x
R12	0.27	
R3	0.61	
R13	0.51	x
R4	0.27	
R14	0.28	x
R5	0.5	
R15	34	x
RS	0	x
<b>t Cauce Principal</b>	<b>37,0</b>	

Tabla Nro.: 11. HEC-HMS("Basin Model"): Cañadón Baraibar, Parámetros Físicos

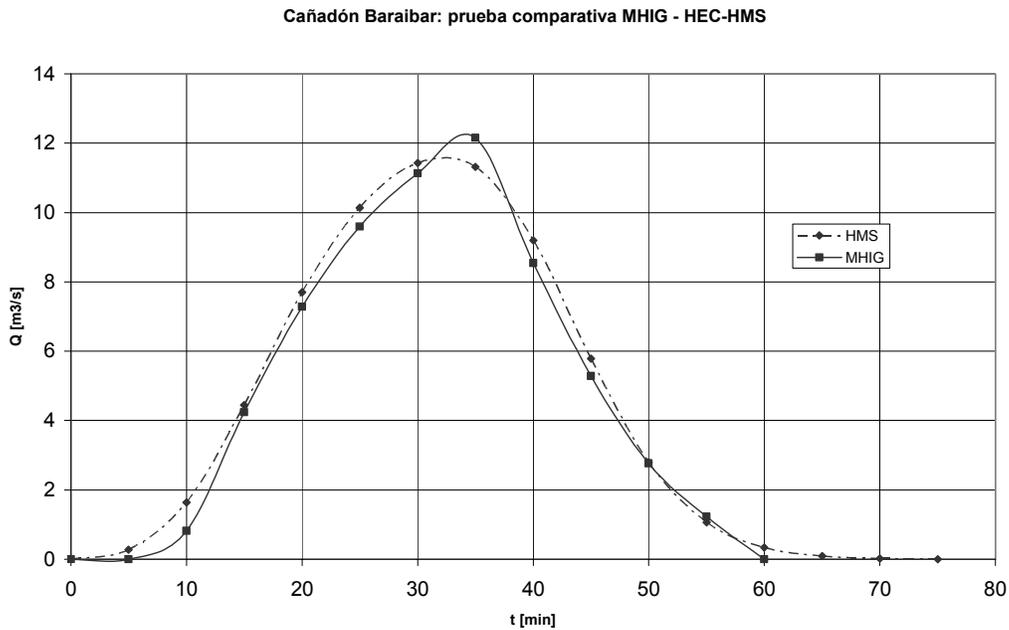


Fig. : 28. Prueba comparativa MHIG y HEC-HMS. Tormenta de 32,4mm, Duración 30 minutos y período de retorno de 100 años

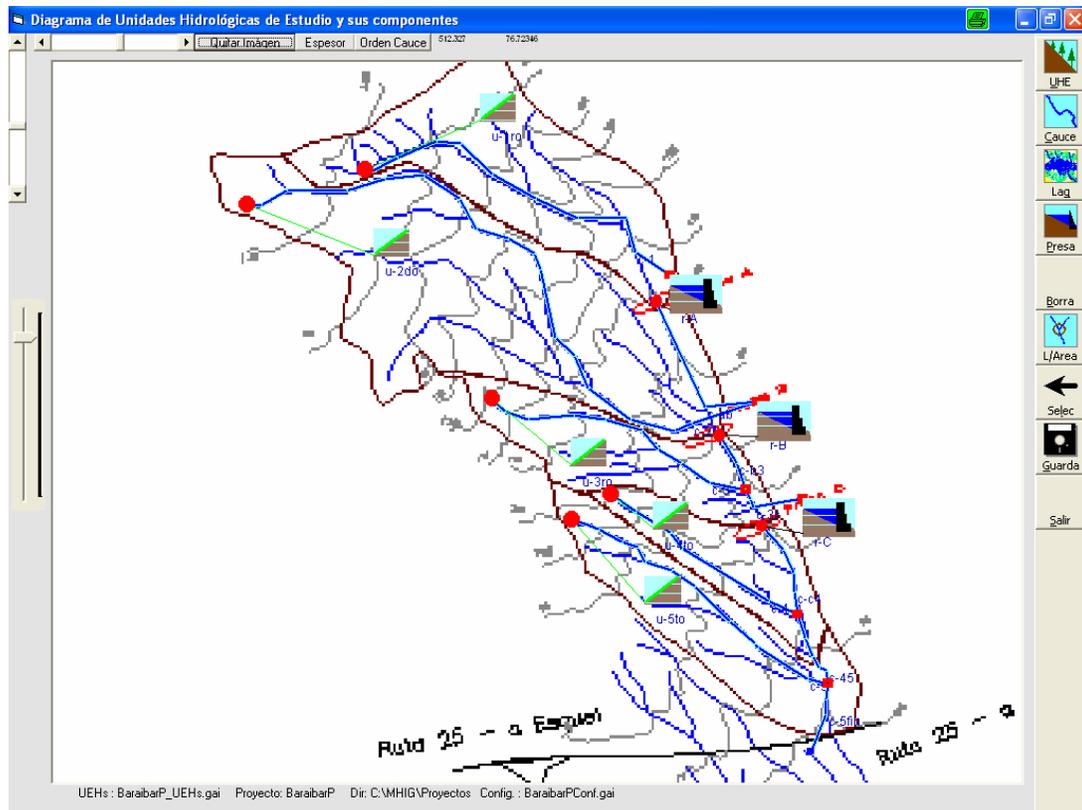
### *a. Escenario para Cañadón Baraibar, CON PRESAS*

Se analiza a continuación un caso aplicado para el cálculo de crecidas en la misma cuenca, “con presas”, de acuerdo a la conformación actual existente de tres pequeñas presas de control de crecidas, dispuestas “en cascada” en el cauce principal.

Cada una de las presas dispone de una estructura hidráulica de regulación y descarga, consistente en un dispositivo de toma con orificios y vertederos, y conducto bajo el cuerpo de la presa. Como estructura adicional, disponen de vertederos laterales, fuera del cuerpo de la presa, que en casos extremos producen descargas hacia el cauce principal. Las características de las presas y estructuras se describen con mayor detalle en la tesis en PMP (Serra, 2003).

Esta nueva versión de MHIG permite disponer de componentes “represas”, cargar sus parámetros de elevación, almacenamiento, superficie y descarga, y efectuar la simulación conjunta con la modelación hidrológica de la lluvia.

La conformación de componentes que resulta es la que se muestra en la Fig. : 29.

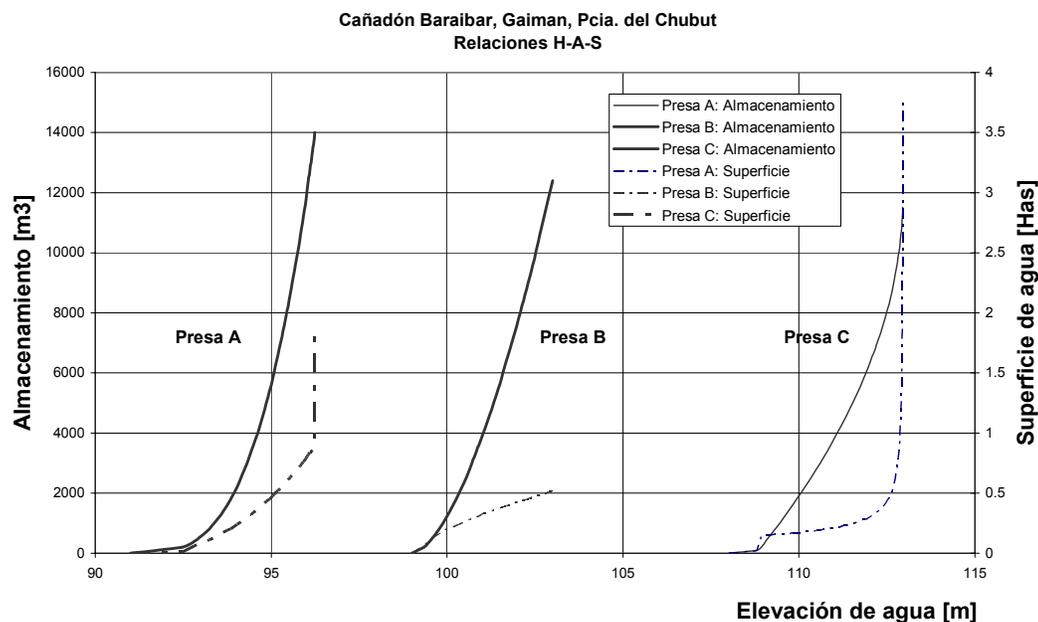


*Fig. : 29. MHIG: Cañadón Baraibar, diagrama de componentes, con las tres pequeñas presas de control de crecidas actualmente en servicio, A, B y C.*

La Fig. : 30 muestra gráficas de las funciones elevación almacenamiento en represas.

Los parámetros de las estructuras hidráulicas no han sido objeto de medición y ajuste previo. Aunque se han aproximado en base a relevamientos existentes, estos

parámetros no son verificados conforme a la obra existente, y solo se adoptan de manera aproximada al solo fin del presente ejercicio demostrativo.



**Fig. : 30. MHIG: Cañadón Baraibar, Funciones elevación, superficie y almacenamiento de agua en embalses de presas A, B y C**

El procedimiento para *lagos/lagunas/mallines* es análogo al realizado para represas, solo que se omiten las funciones teóricas de estructuras hidráulicas de regulación, y se reemplazan por una función estimada de la *elevación de agua-caudal de salida*.

Las pruebas de consistencias numéricas y comparativas realizadas para MHIG, y el contraste con otros modelos hidrológicos, resultaron consistentes y satisfactorias al objeto de la simulación de crecidas máximas, siendo una herramienta válida para este propósito en SHT o en SHM de PM.

La Fig. : 31 muestra un ejemplo de diagramas de salidas (hidrogramas) para una represa y en la sección de control final de la cuenca.

Un detalle mayor de las referencias técnicas de MHIG pueden ser obtenidas del sitio [www.mhig.com.ar](http://www.mhig.com.ar).

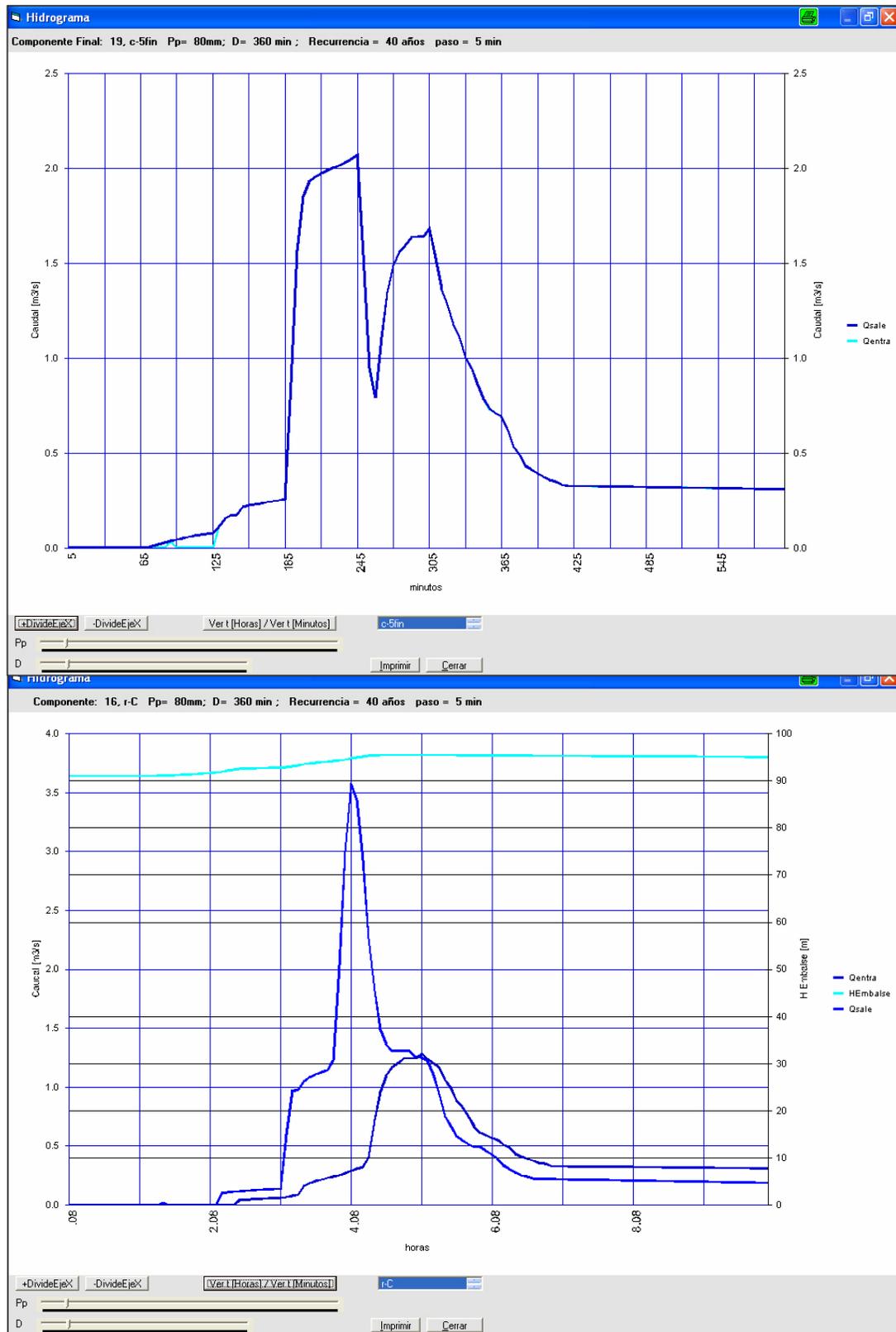


Fig. : 31. MHIG: Cañadón Baraibar. Resultados de hidrograma para P 80mm, D 360min., R 40 años, en salida de Presa C (arriba) y tramo de cauce final (Ruta Nacional N° 25)

# **MHIG-SIG**

**MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN  
(PARA SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)**

# MHIG-SIG: MODELO HIDROLOGICO GAIMAN PARA SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

## 9. MHIG-SIG: DESARROLLO Y REFERENCIAS TÉCNICAS

### 9.1. INTRODUCCIÓN

MHIG-SIG, o *Modelo Hidrológico Gaiman SIG*, es un modelo de simulación *lluvia-caudal*, para el análisis y pronóstico de crecidas máximas en pequeños y medianos sistemas hidrológicos, físicamente basado en Modelo Digital de Terreno (MDT).

La modelación sistémica es de tipo *abstracto, determinística, distribuida* y de flujo *no permanente*, dado por la variabilidad espacial y temporal de la tasa de flujo producida por una lluvia neta. En sentido estricto, puede definirse como modelo *pseudo-distribuido*, por cuanto el área rectangular sometida a simulación (MDT) es subdividida en celdas o píxeles (unidades de discretización espacial de la superficie), donde cada porción geográfica del sistema es promediada en tiempo y espacio (porciones espaciales múltiples donde los parámetros son uniformes).

Los distintos procesos y subprocesos de la simulación están constituidos por una selección ordenada de algoritmos matemáticos que partiendo de premisas y modelos básicos conocidos, generan procedimientos y algoritmos computacionales nuevos, que completan el desarrollo de una herramienta orientada particularmente al análisis hidrológico en paisaje de meseta, y de pequeñas y medianas cuencas en general.

Las *salidas* de MHIG-SIG permiten estimar los resultados de una crecida distribuida en el área de estudio, proporcionando valores en cada celda del MDT, de:

- niveles máximos (mapa temático de *pronóstico de inundabilidad*),
- caudales máximos (mapa temático de *pronóstico de torrencialidad*),
- *caudales-tiempo (hidrograma de píxel)*, en un píxel dado o en una selección lineal de celdas (sección transversal). Matriz de *caudales*, en el espacio (X-Y) y el tiempo (t) (opción válida solo para trabajo en pequeñas áreas).

Los resultados son fácilmente *exportables* en formato texto, a hojas de cálculo, GIS (particularmente IDRISI) u otras aplicaciones. El trazado de una nueva ruta u obra de infraestructura puede ser analizado con mapas temáticos simulados "*antes*" y "*después*" de la obra, y sus resultados representarlos superpuestos sobre la imagen satelital, donde cada píxel informa su caudal, escorrentía, altura de agua, u opcionalmente producción de erosión o sedimentos.

La simulación hidráulica con MHIG-SIG permite abordar el análisis de una diversidad de casos donde es necesario investigar crecidas máximas, y es particularmente útil en el

análisis del riesgo hidrológico de crecidas en ambientes torrenciales. Esta técnica es aplicable a problemas de evaluación y diagnóstico hidrológico, manejo de aguas, o estudios de impacto de distintas obras de infraestructura en PM, y puede ser aplicada a Sistemas Hidrológicos Típicos (cuencas de montaña), No Típicos (llanuras) o Mixtos (caso de mesetas), por cuanto son simulaciones basadas físicamente en MDT.

## 9.2. ANTECEDENTES DE MHIG-SIG. EL MODELO PÍXEL.

La simulación distribuida de MHIG SIG tiene por antecedente directo el modelo de PÍXEL, o de celdas (Serra, 2003), cuyos principales aspectos se resumen en este capítulo.

La vertiginosa expansión de la informática de fines del siglo XX, de la tecnología satelital, de los SIG, y la mayor disponibilidad de uso civil de estas innovaciones, tuvieron también su impacto en las ciencias hídricas y la modelación hidrológica.

En los últimos años, los modelos hidrológicos agregados basados en técnicas vectoriales, fueron perdiendo espacio para dar lugar al nacimiento de una nueva generación de modelos que crece al amparo de estas nuevas tecnologías y de la enorme capacidad de memoria de las computadoras personales actuales. Son los modelos distribuidos, físicamente basados en MDT, o *Modelos Digitales de elevación del Terreno*, (DEM, Digital Elevation Models).

Estas técnicas han dado origen a modelos en formato *raster*, que tienen la particularidad de analizar el balance hidrológico a nivel de pequeñas celdas, rectangulares y uniformes, a partir del procesamiento de información satelital y de una base de datos DEM del área de estudio. En este contexto de oferta tecnológica, el PÍXEL es un modelo de simulación hidrológica que actualmente está en experimentación y desarrollo.

Los diagramas básicos del modelo PÍXEL se formularon en el Proyecto de Investigación “*Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos*”, de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

### 9.3. PROCEDIMIENTOS Y ALGORITMOS BÁSICOS DEL MHIG-SIG

Tomando las experiencias del modelo *PÍXEL*, (Serra, 2003), se desarrollan a continuación dos procedimientos básicos que mejoran el análisis del flujo distribuido en la malla de cálculo, pudiendo optarse en la corrida de explotación del modelo por uno u otro procedimiento:

- a) *Método empírico de propagación en “cascada”*; denominación propuesta en esta investigación para referir al método modificado del algoritmo original propuesto en *PÍXEL*. El almacenamiento de cada celda es proporcional al caudal que eroga hacia un píxel contiguo, ( $S=k.Q$ ), el modelo propuesto se comporta en “cada celda” como un modelo *agregado*, de tránsito de caudal para un embalse lineal.
- b) *Método de Flujo Superficial Laminar y Flujo Turbulento encauzado*: Se evalúa primeramente el régimen de flujo en la celda (Número de Reynolds). En función del mismo, se resuelve con ecuaciones para flujo superficial laminar, o para flujo encauzado turbulento donde es aplicable la expresión de Manning.

Ambos métodos, están físicamente basados en un MDT, representado por una malla X-Y de celdas, donde cada una de ellas o píxel, de resolución predefinida, asocia un valor promedio de la *cota* para el espacio discreto que representa.

	<i>c-2</i>	<i>c-1</i>	<b><i>c</i></b>	<i>c+1</i>	<i>c+2</i>
<i>f-2</i>	...	...	...	...	...
<i>f-1</i>	...	55,0	54,9 <b>1</b>	54,0	...
<b><i>f</i></b>	...	54,5 <b>4</b>	<b>54,0</b>	<b>2</b> 53,0	...
<i>f+1</i>	...	53,0	<b>3</b> 52,5	50,0	...
<i>f+2</i>	...	...	...	...	...

**Tabla Nro.: 12. Matriz de MDT, “celda de cálculo” de fila “*f*” columna “*c*” y celdas contiguas Ref. 1, 2, 3 y 4. (Kernell)**

En la Tabla Nro.: 12, donde “*f*” expresa “fila” y “*c*”, “columna”, se referencia la propagación de escorrentía de *celda a celda* en la forma de un kernell o grupo de píxeles de cálculo de dimensiones 3x3. El balance de continuidad propuesto, efectúa el cálculo de las celdas en sus dos direcciones (indizados en “*f*” y “*c*”), donde “*b<sub>x</sub>*” y “*b<sub>y</sub>*” son el

ancho de píxel en las direcciones X e Y respectivamente, prefijados según el MDT que se utilice.

Para un flujo de densidad constante la *ecuación de continuidad* puede expresarse como (XLII) , Chow (1964):

$$(XLII) \quad \iiint_{vc} dv + \iint_{sc} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad ; \text{ es decir, } \frac{dS}{dt} = Q(t) - I(t)$$

Donde dS/dt expresa la variación del almacenamiento en relación al tiempo, dentro del volumen de control y Q(t) e I(t) son la suma de caudales *salientes* y *entrantes* respectivamente. Si el flujo es permanente, dS/dt = 0, resulta (XLIII) :

$$(XLIII) \quad \iint_{sc} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad , \text{ es decir, } I(t) = Q(t)$$

La ecuación (XLIV) , para un marco de referencia espacial X-Y, puede expresarse en ecuaciones derivadas parciales como (XLIV) y (XLV) :

$$(XLIV) \quad \iiint_{vc} dv + \iint_{sc} V_x \cdot dA + \iint_{sc} V_y \cdot dA = 0 \quad ; \text{ de donde se deduce que:}$$

$$(XLV) \quad \frac{dS_x}{dt} = Q_x(t) - I_x(t) \quad ; \quad \frac{dS_y}{dt} = Q_y(t) - I_y(t)$$

Se abordan seguidamente los dos procedimientos enunciados, de manera que permita aproximar una solución a estas ecuaciones diferenciales, en un “*kernel*” de 3x3 celdas donde interactúan el *píxel central* con las cuatro celdas contiguas en X e Y.

La Fig. : 32 muestra un esquema básico para el análisis del flujo *desde* y *hacia* un píxel o celda basada en MDT, con la propagación de caudal de *celda a celda* en la forma de un *kernel* o grupo de píxeles de cálculo de 3x3. El balance de continuidad propuesto, efectúa el cálculo de las celdas en sus dos direcciones (f,c), donde “b<sub>x</sub>” y “b<sub>y</sub>” son el ancho de píxel en las direcciones X e Y respectivamente, prefijados según el MDT que se utilice.

Asimismo, para la *celda central del Kernell*, o *celda cálculo*, de fila “f” y columna “c”, la ecuación diferencial que expresa la variación del flujo de escurrimiento superficial en ambas direcciones, puede expresarse según el esquema de la Fig. : 33:

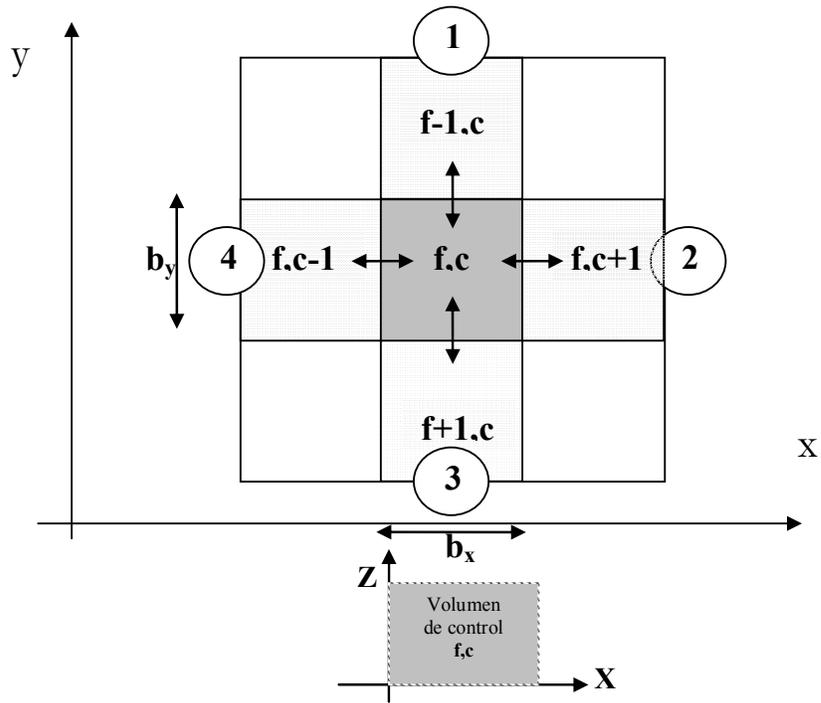


Fig. : 32. Esquema de cálculo del flujo en celdas o píxeles de MHIG-SIG

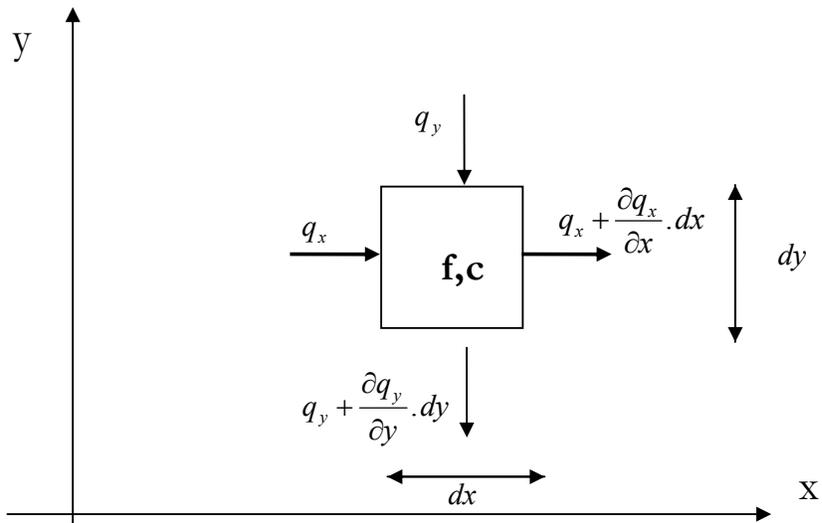


Fig. : 33. Celda central o "celda de cálculo": Variación del flujo de escurrimiento superficial en las direcciones X e Y (Caudal entrante y caudal saliente en píxel)

### 9.3.1. Método de propagación en “cascada” (embalses simples)

Se desarrolla a continuación un *método empírico*, basado en el principio de continuidad y de propagación lineal de caudales -tal sucede con el método de propagación de embalse lineal-, adaptado para el tránsito de caudales *píxel a píxel*. Se asume aquí que el almacenamiento en cada celda es función del caudal de salida:  $S=k.Q$ , y se propone una expresión empírica simplificada para el cálculo. Si bien el análisis en este método carece de un modelo abstracto de mejor representación del fenómeno real, tiene una mayor simplicidad y un reducido número de parámetros de ajustes del modelo, cuyos valores pueden ser estimados en base a experiencias en paisaje similar. La propagación del caudal superficial cumple el principio de continuidad, la distribución es función de las pendientes de la superficie de agua entre celdas, y el almacenamiento total en el píxel es función del caudal de salida hacia los píxeles contiguos.

Para un período dado, se compara la *cota del pelo de agua* ( $H_{pa}$ ) del píxel “f,c” con cada una de las cotas de sus celdas “i,j” vecinas (Fig. : 34). Si esta diferencia es positiva en un valor “ $ddb$ ”, la celda *eroga* en el período un volumen  $ddb \cdot b_x \cdot b_y$  hacia las celdas que cumplen esa condición. El valor  $ddb$  (lámina) expresa el derrame total por unidad de superficie en el período que eroga una celda hacia las celdas vecinas, y queda determinado por la diferencia de cotas de la superficie de agua. Este derrame, supone la búsqueda de equilibrio de niveles entre las cinco celdas; distribuido proporcionalmente al número de celdas contiguas en condición de recibir agua y a la pendiente de la superficie de agua entre celdas, según los siguientes criterios (Tabla Nro.: 13):

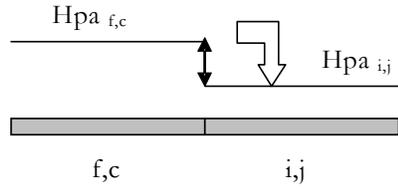
- *a) Condición normal (pendiente reducida)*: En primera aproximación, si la celda central de análisis supera en cota de pelo de agua a una o más de las vecinas, el volumen de derrame  $ddb$  se distribuye con las siguientes proporciones en  $db1$ ,  $db2$ ,  $db3$  y  $db4$ :

Cantidad de Celdas contiguas, donde $H_{pa}$ es menor al $H_{pa}$ de la <i>celda central del kernell</i>	Proporción de volumen que derrama (salida)
1	1/2
2	1/3
3	1/4
4	1/5

**Tabla Nro.: 13. Proporción de derrames a celdas contiguas**

- *b) Condición para pendiente muy fuerte*: Si  $H_{pa_{f,c}} \gg H_{pa_{i,j}}$  (pendiente muy fuerte de la superficie de agua, de la celda central respecto al píxel de comparación), y se satisface también la condición de que la cota del terreno natural  $C_{tn_{f,c}}$  del píxel en análisis es mayor que la cota de la superficie de agua del píxel de comparación  $H_{pa_i}$ , se asume que el primero derrama el máximo volumen posible hacia el segundo.

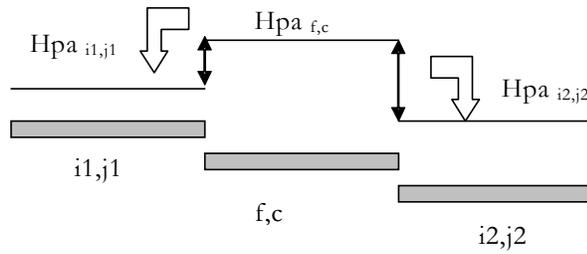
Caso de una sola celda vecina donde  $H_{pa_{i,j}} < H_{pa_{f,c}}$



$$dh_p = \frac{H_{pa_{f,c}} - H_{pa_{i,j}}}{2}$$

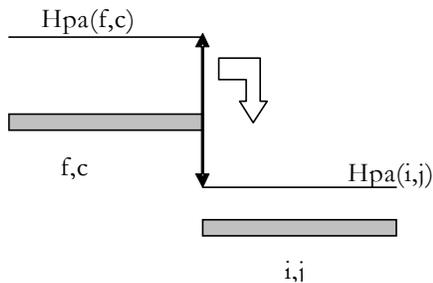
$p = 1$  a  $4$ , índice de celda vecina:  
 $p=1$ , para  $i=f-1, j=c$   
 $p=2$ , para  $i=f, j=c+1$   
 $p=3$ , para  $i=f+1, j=c$   
 $p=4$ , para  $i=f, j=c-1$

Caso de dos celdas vecinas con  $H_{pa_{i,j}} < H_{pa_{f,c}}$



$$dh_p = \frac{(H_{pa_{f,c}} - H_{pa_{i1,j1}}) + (H_{pa_{f,c}} - H_{pa_{i2,j2}})}{3}$$

Caso de una celda vecina con  $H_{pa_{i,j}} < H_{pa_{f,c}}$ , y  $Ctn_{f,c} > H_{pa_{i,j}}$   
 (pendiente muy fuerte de superficie de agua)



$$dh_p = H_{pa_{f,c}} - C_{m_{f,c}}$$

1ra. Aproximación:  $ddh = dh_1 + dh_2 + dh_3 + dh_4$   
 $nddh = \text{Nro. de Celdas con } dh_p > 0$

1er. ajuste: Si  $ddh > 0$  Y  $nddh > 0$   
 $dh_p = dh_p / (1 + nddh), 1 \leq p \leq 4$

2do. ajuste: Si  $ddh > |H_{pa_{f,c}} - Ctn_{f,c}|$  Y  $ddh > 0$   
 $fddh = |H_{pa_{f,c}} - Ctn_{f,c}| / ddh$   
 $ddh = |H_{pa_{f,c}} - Ctn_{f,c}|$   
 $dh_p = dh_p * fddh, 1 \leq p \leq 4$

$ddh = dh_1 + dh_2 + dh_3 + dh_4$

$Q_{f,c} = ddh * b_x * b_y / \Delta t$  (caudal medio de salida de píxel en el período)

Fig. : 34. Criterios de propagación entre celdas vecinas

### a. Ajuste de propagación de los caudales obtenidos:

El volumen por unidad de superficie de la escorrentía en el período (*ddb*) hacia las celdas contiguas (*caudal saliente*), puede opcionalmente ser corregido -para su mejor ajuste- mediante un modelo de propagación análogo a la conocida expresión de *Singh y Stall*: para la curva de recesión de un hidrograma (XLVI)

$$(XLVI) \quad dh_k = hd_k * e^{KT}$$

donde K es un parámetro de recesión e píxel que se adopta constante en cada celda. K representa la cantidad de minutos necesarios para reducir el *caudal máximo disponible* en la duración de la lluvia al 36% de su valor. Si K es muy grande la corrección tiende a 'cero'. "T" es el *paso* de cálculo o *período de tiempo*.

Seguidamente, se muestra un ejemplo teórico de lluvia neta y su propagación sobre un área cuyo modelo numérico representa un área hidrológica con divisorias, laderas (planos inclinados), vaguadas, depresiones y un cauce central de drenaje

### 9.3.2. Flujo laminar (Superficial) en Píxel ( $R_e \leq 2000$ )

En la parte superior de las laderas, antes de la concentración del flujo en regueras o canales, el flujo ocurre generalmente en forma de manto o lámina delgada, o *flujo superficial*.

La expresión de continuidad (V) aplicada a la *celda central*, o *celda de cálculo*, puede ser resuelta en espacio (X-Y) y tiempo discreto, para diferencias finitas en  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta t$ .

En el esquema de la Fig. : 35,  $\Delta x$  y  $\Delta y$  son las resoluciones  $b_x$  y  $b_y$  del píxel en los ejes X e Y respectivamente.

Si Q es el caudal superficial medio y total de "salida", y  $Q_e$  el caudal superficial medio y total de "entrada" a un píxel dado, desde y hacia los píxeles vecinos, y considerando que la lluvia que ingresa es neta de abstracciones, para pendiente suave, la ecuación de continuidad para un elemento de cálculo puede expresarse como (XLVII) :

$$(XLVII) \quad \frac{\Delta S}{\Delta t} = i_p b_x b_y \cos \alpha + Q_e - Q$$

Donde  $i_p$  es la intensidad de la lluvia neta de abstracciones,  $Q_e$  y Q representan los flujos de entradas y salidas superficiales hacia los cuatro píxeles contiguos. Para taludes suaves,  $\cos \alpha \approx 1$ .

Según Roberson y Crowe citado por Chow (1994) para la ecuación de *momentum*, puede expresarse por (XLVIII) :

$$(XLVIII) \quad V = \frac{g I_0 y^2}{3\nu}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido, “ $y$ ” el tirante,  $V$  la velocidad promedio a lo largo de un plano inclinado. Suponiendo flujo uniforme, las pendientes de fondo y de energía son iguales (XLIX) :

$$(XLIX) \quad I_0 = I_f = \frac{h_f}{L}$$

Las pérdidas de carga, pueden ser estimadas con la expresión de Darcy-Weisbach (L) :

$$(L) \quad h_f = f \frac{LV^2}{8Rg}$$

El factor de fricción y el número de Reynolds pueden estimarse con (LI) (LII) :

$$(LI) \quad f = \frac{96}{R_e} \quad ; \text{ Donde el Nro. de Reynolds se calcula con la expresión:}$$

$$(LII) \quad R_e = \frac{4VR}{\nu} \quad (R, \text{ Radio Hidráulico})$$

Para las condiciones de flujo superficial se tendrá que  $R \approx y$ , siendo el flujo laminar para  $R_e < 2000$ ). EL factor de fricción “ $f$ ” se incrementa con la intensidad de la lluvia, y puede estimarse (LIII) con la expresión de Chow y Yen en Chow (1994):

$$(LIII) \quad f = \frac{C_l}{R_e} = \frac{96 + 108 i_p^{0.4}}{R_e}$$

Suponiendo flujo uniforme, se relaciona el tirante hidráulico en función del caudal  $q_0$ , pendiente de fondo  $I_0$  y factor de fricción  $f$ , resultando (LIV) :

$$(LIV) \quad y = \left( \frac{f q_0^2}{8g I_0} \right)^{1/3}, \text{ donde } q_0 = V \cdot y = A/b, \quad b = \text{ancho de flujo}$$

Volviendo al esquema de celdas de la Fig. : 35, si se considera una *celda de cálculo* y una celda contigua hacia donde se dirige el flujo, se tiene (LV) :

$$(LV) \quad Q = b \left( \frac{8 g I y^3}{f} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ Caudal de salida en dirección al píxel vecino}$$

I= Pendiente media de línea de energía entre el píxel de cálculo y el píxel de salida,

y = Tirante medio de p.a. en el píxel de cálculo, obtenido por diferencia entre la cota de p.a. y la Cota del t.n.,

b= Ancho del píxel en dirección transversal al flujo de cálculo.

El *caudal de salida* de una celda hacia otra contigua se convierte en el *caudal de entrada* (parcial) de esta última celda.

La Fig. : 35 muestra como se interpreta el cálculo de las pendientes medias entre dos celdas consecutivas, estimada como la diferencia de *Cotas de t.n.* y de *Cotas de p.a.* de ambos píxeles (celda “f,c” y celda “i,j”), en relación a la distancia o resolución del mismo en la dirección del flujo. Se supone pendiente suave.

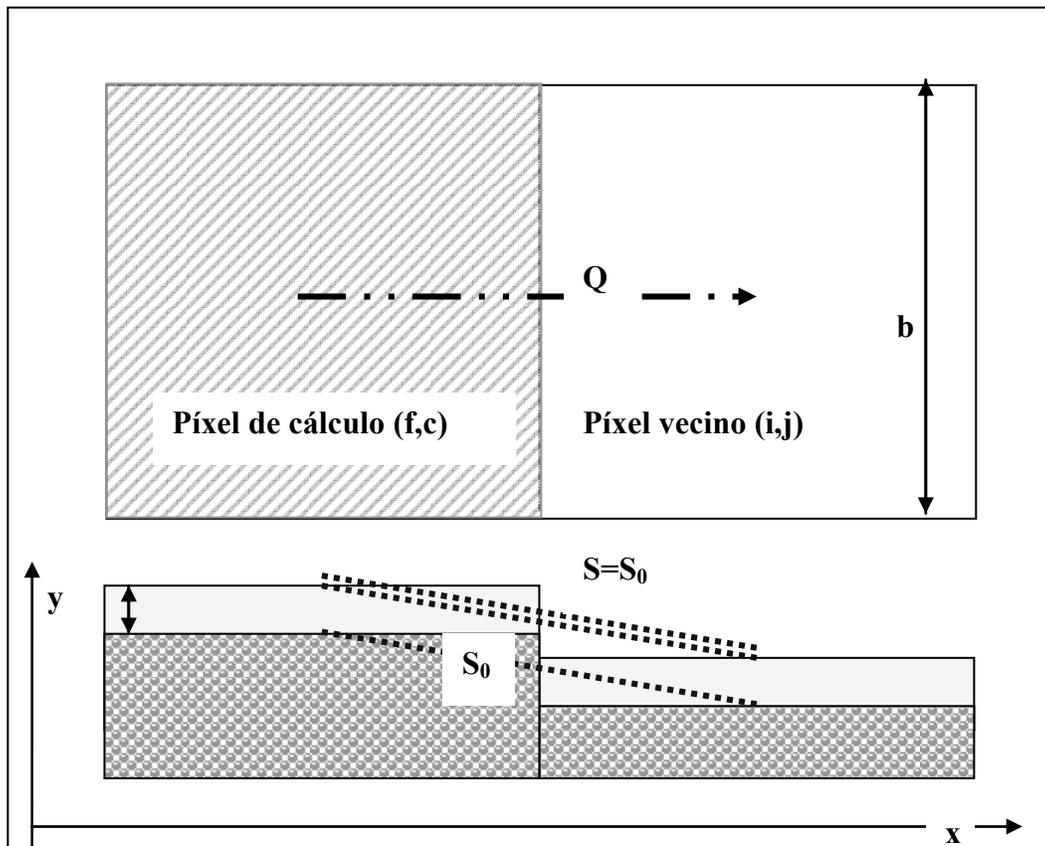


Fig. : 35. Esquema de cálculo para celdas contiguas

### 9.3.3. Flujo turbulento (canal) en Píxel (Re>2000)

Si  $Re > 2000$ , el flujo en el píxel es turbulento y el cálculo entre dos celdas contiguas se efectúa a través de la expresión de Manning para flujo en canales abiertos, bajo régimen permanente y uniforme, teniendo presente el tirante en ambas celdas y la pendiente del pa.a en la dirección del flujo (LVI) :

$$(LVI) \quad V = \frac{1}{n} y^{2/3} I^{1/2} \quad ; \quad Q = V \cdot y \cdot b \quad ;$$

### 9.3.4. Lluvia Total. Lluvia Neta. Abstracciones

El análisis de MHIG-SIG se concentra en el flujo superficial de una crecida y su distribución espacial y temporal. No se considera la evapotranspiración durante el cálculo.

La lluvia se considera *netas de abstracciones*, uniformemente distribuida durante un período de cálculo, ocurrida sobre en un área rectangular dentro del área total cubierta por el MDT, siendo posible computarla en dos formatos:

- *Lluvia total*: Precipitación Neta o exceso total (de intensidad constante a lo largo del período de duración de la tormenta),
- *Lluvia real, o lluvia sintética con distribución temporal*.

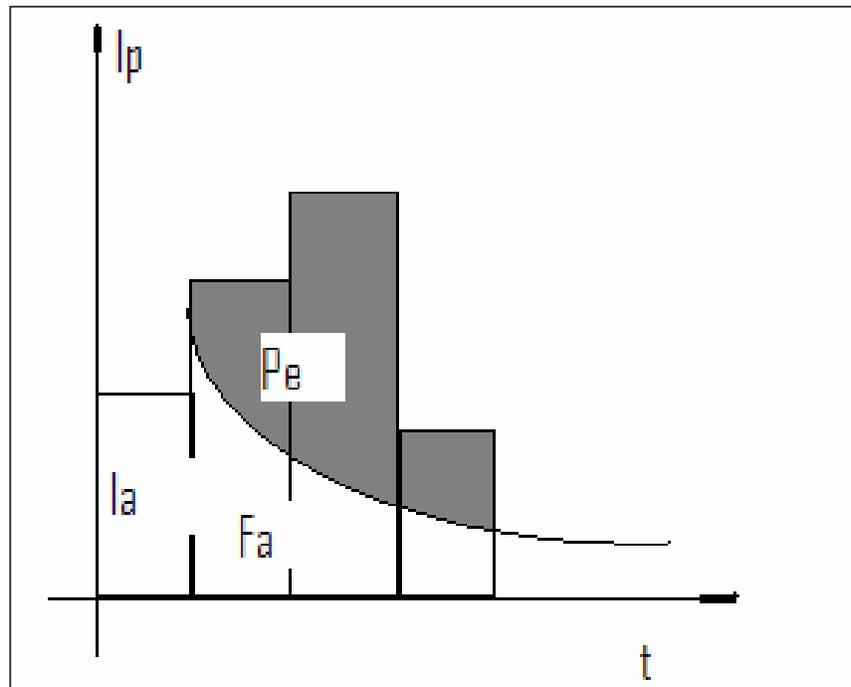


Fig. : 36. Diagrama del SCS para el cálculo de abstracciones

El hietograma de precipitaciones netas o *excesos* es evaluado respecto a la precipitación total de acuerdo al método de SCS (USACE, 2000), (Fig. : 36), discretizado en el espacio X-Y, adaptado al cálculo *celda a celda* según (LVII) (LVIII) :

$$(LVII) \quad P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P - I_a + S} \quad ; \quad P_e = P - I_a - F_a \quad ; \quad I_a = 0,2 S \quad ; \quad \text{para } P > I_a$$

$$(LVIII) \quad F_a = \frac{S(P - I_a)}{P - I_a + S}$$

La *distribución temporal* se obtiene diferenciando respecto a ‘t’, según la expresión (LIX) :

$$(LIX) \quad \frac{dF_a}{dt} = \frac{S^2 I_p}{(P - I_a + S)^2}$$

Donde  $F_a$  es el valor de las abstracciones acumuladas,  $I_a$  es la abstracción inicial, P la precipitación total, S la retención potencial máxima.  $I_p$  es la intensidad media de la lluvia en el período.

Puede observarse que la tasa de abstracciones crece con la intensidad de la lluvia y decrece con el tiempo de duración de la tormenta.

Se adopta un valor medio de “S” e “ $I_a$ ” constantes para toda el área de estudio, y se determina el histograma de los excesos de lluvia para cada período de tiempo o *paso* del modelo, valores que ingresan como variable de “*entrada*” de la simulación *lluvia-caudal* distribuida. En una versión posterior del programa, se adaptará la rutina para considerar la variación geográfica de “S” e “ $I_a$ ” .

### 9.3.5. Flujo, de píxel de cálculo a píxel contiguo, en el período ‘Δt’

Se adoptan dos formas de aproximación del flujo en el píxel: como flujo laminar superficial ( $R_e \leq 2000$ ) y como flujo turbulento encauzado ( $R_e > 2000$ ). Para cada período de cálculo de la matriz, el modelo evalúa en cada píxel la condición de Reynolds (diagramas de Fig. : 37 y Fig. : 38):

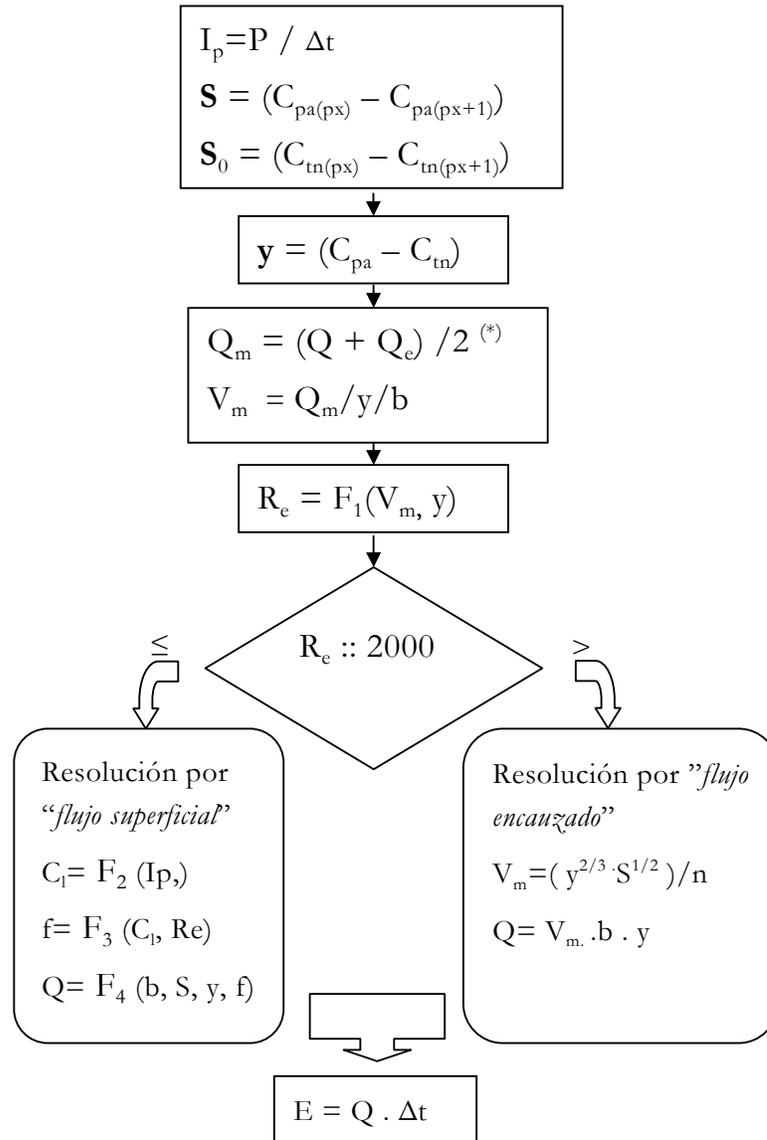
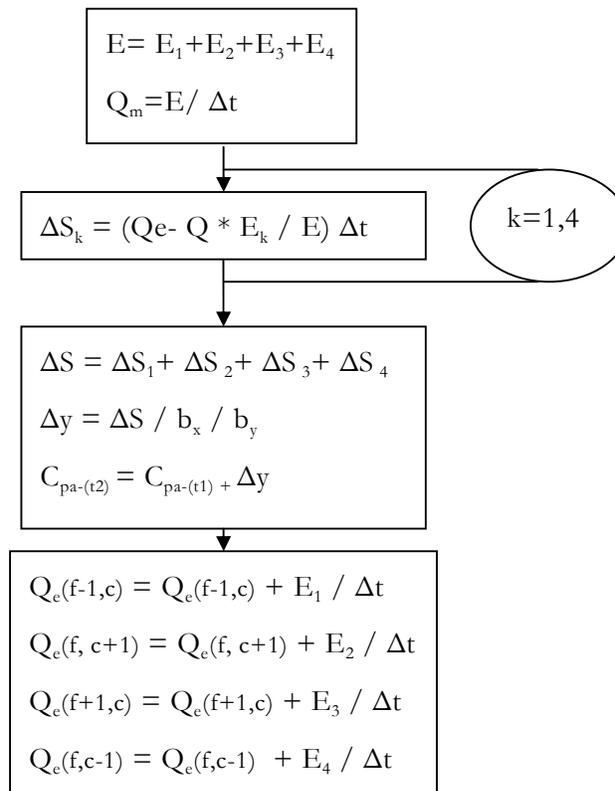


Fig. : 37. Diagrama de flujo para el método de cálculo de flujo entre celdas contiguas. Primera parte (escorrentía)

(\*) El flujo medio entre el píxel de cálculo (f,c) y el contiguo se estima distribuyendo el caudal total de la celda proporcionalmente a la raíz cuadrada de la relación de pendientes del p.a., de acuerdo a la expresión deducida de la ecuación de Manning, y a la condición de borde dada por la suma de los caudales parciales (LX) :

$$(LX) \quad \frac{Q}{Q_1} = \left( \frac{S}{S_1} \right)^{1/2} \quad ; \quad Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

El procedimiento se repite para las cuatro celdas contiguas al píxel de cálculo, a fin de componer luego el flujo entrante y saliente total.



**Fig. : 38. Diagrama de flujo para el método de cálculo de flujo entre celdas contiguas. Segunda parte (caudales transferidos en el período)**

Donde, “S” es almacenamiento, “E”, la Escorrentía en el período; “f” y “c” representan los respectivos índices de filas y columnas de la matriz del MDT; k y los subíndices 1,2,3 y 4 representan cada una de las celdas contiguas al píxel de cálculo:

Cuando la iteración del cálculo *celda a celda* para la matriz MDT se efectúa en forma ordenada conforme un vector indizado de “*mayor a menor*”, los resultados obtenidos muestran mayor consistencia y reducen el error del procedimiento. La solución alcanzada logra buenos resultados con pocos parámetros de ajustes del modelo, donde el *paso de tiempo* elegido es un parámetro sujeto a un análisis de estabilidad y convergencia.

### 9.3.6. Divisorias. Líneas de frontera tributaria

Los métodos convencionales, determinan la línea divisoria de aguas superficiales a partir de la topografía, con o sin apoyo de campo, fotogramas o imágenes satelitales. Los modelos modernos físicamente basados, que utilizan SIG y MDT, tienen por lo general herramientas para la determinación de las divisorias de aguas, basadas en algoritmos topográficos.

Tomando las consideraciones hechas para paisaje de meseta o de llanuras, y la amplitud de concepto dado a la *línea de frontera tributaria*, se procura acá lograr herramientas de análisis que agreguen criterios de flujo y de inundabilidad para su determinación, según sean las características de cada tormenta.

Se ha preferido incorporar una herramienta mixta, donde en parte sea determinada por el algoritmo de la simulación y en parte por el ojo experto desde la visualización gráfica de los resultados. Es decir, lograr resultados que muestren gráficamente una nube o franja de puntos más probables donde cae la línea de frontera tributaria, para su selección final manual.

#### ***a. Líneas de Frontera: Primer paso:***

Para la determinación de líneas de *frontera tributaria* en el espacio en análisis, el modelo incorpora algoritmos basados en determinar para cada simulación de tormenta, los píxeles de menor actividad hídrica superficial, con los siguientes criterios de cálculo:

- 1) Método de caudal mínimo
- 2) Método de caudal y tirante mínimos

El método de *caudal mínimo*, explora en la matriz de resultados, al finalizar la simulación, los píxeles de “*caudal máximo erogado ( $Qm_{f,c}$ )*”, no nulos, menores a un valor dado (QM), y le asigna un valor arbitrario (LXI) para su representación y fácil identificación gráfica.

$$(LXI) \quad 0 < Qm_{f,c} \leq QM$$

EL principio de este método, es que los píxeles de las *divisorias* de agua o *líneas de frontera tributaria* producen un caudal saliente muy reducido, pues solo reciben lluvia directa, o el caudal descargado por otro píxel vecino perteneciente a la misma divisoria o frontera). La condición de que no sea un valor nulo, descarta interpretar como divisorias aquellos píxeles pertenecientes a cuerpos de agua superficial.

El parámetro QM debe ajustarse según el caso, dependiendo de la intensidad máxima de la lluvia que se simula y de la resolución del píxel. Un valor práctico surge de cuadruplicar el máximo caudal teórico posible, que surge de suponer un máximo de 4

píxeles aportando, pero el mejor criterio es por prueba y error de algunas corridas de exploración (LXII) :

$$(LXII) \quad QM \approx 4 * 0,167 i_M L_x L_y / 10000$$

Donde  $L_x$  y  $L_y$  son la resolución del píxel en X e Y,  $i_M$  la *intensidad máxima* de la lluvia en un período expresada en [mm/min]; 0,167 es el factor de dimensionamiento para expresar QM en unidades de [m<sup>3</sup>/s].

El método exploratorio se mejora para la generalidad de los casos, agregando un criterio similar de selección para las *alturas máximas de p.a.* (tirante) en el píxel (LXIII) :

$$(LXIII) \quad 0 < Hm_{f,c} \leq HM$$

El criterio suma a la condición de caudal máximo en el píxel que el tirante máximo no supere el valor de HM, ni sea nulo. En una primera estimación, HM puede estimarse como la *altura de agua* equivalente al cuádruplo de la lluvia en el período (LXIV) , y ajustarse por prueba y error hasta lograr información gráfica consistente:

$$(LXIV) \quad HM = 4 i_M \Delta t$$

A diferencia de los métodos usuales de trazado de divisorias de agua basados en la divisoria topográfica (aplicable a cuencas de montaña), estos métodos muestran líneas o franjas de menor actividad hídrica superficial, por donde se supone existe una *divisoria* o una línea de *frontera tributaria*. Esto es particularmente útil en PM, y eventualmente en llanuras. La interpretación y ajuste final puede efectuarse en forma visual y gráfica.

#### ***b. Líneas de Frontera: Segundo paso:***

Finalizado el cálculo por uno u otro método, se dispondrá de una imagen don una franje o nube de puntos más probables (menor actividad hídrica superficial), para la línea de frontera tributaria.

El segundo paso, consiste en depurar los puntos de esta franja con las cotas máximas de terreno natural, para obtener una imagen más acotada de los puntos singulares donde coinciden los criterios de flujo y los criterios topográficos.

Finalmente, se cotejan estos resultados con la imagen original, o la imagen clasificada, y se retocan manualmente con “lápiz” y “pincel” digital las líneas de frontera tributaria.

La imagen final que se obtiene permite distinguir las fronteras tributarias de cada tormenta sintética o real explorada, y cotejar coincidencias y diferencias.

En SHT, debieran resultar iguales o similares, pero diferencias en SHNT o SHM, es esperable diferencias sustanciales según sea la intensidad y duración de la tormenta.

### 9.3.7. Hidrograma en una selección de píxeles

De manera predeterminada, puede seleccionarse un píxel, o una línea de píxeles, definida entre sus celdas extremas (f1,c1) y (f2,c2), ordenarlas en un vector indizado, y contabilizar la suma de sus resultados en cada período de cálculo (LXV). El vector es resguardado en un archivo de formato texto, para su disponibilidad de análisis posterior. Representa el flujo saliente acumulado desde los píxeles seleccionados. Si la línea seleccionada es una *sección transversal* a un valle o cauce, representa el hidrograma de escurrimientos salientes de la sección (Tabla Nro.: 14).

$$(LXV) \quad Q_t = \sum_{k=1}^{k=n} q_t^k$$

Donde, 'q' es el caudal saliente en el período t, de la celda indizada en 'k', para un total de 'n' celdas, y Q<sub>t</sub>, la suma de caudales salientes de la línea de píxeles en el período 't'.

	<i>c1-1</i>	<i>c1</i>	<i>c1+1</i>	<i>c1+2</i>	<i>c1+3</i>	<i>c1+4</i>	<i>c1+5</i>
	...	...	...	...	...	...	...
<i>f-2</i>	...	10,1	5,7	...	3,5	0,5	...
<i>f2</i>	...	55,1	27,3	...	21,6	17,4	...
<i>f</i>	...	...	...	...	...	...	...
<i>f1</i>	...	38,7	25,4	...	17,6	5,6	...
	...	...	...	...	...	...	...

Tabla Nro.: 14. Hidrograma en línea Píxeles: Esquema de traza indizada en 'k'

### 9.3.8. Otras habilidades del MHIG-SIG

Para apoyar el análisis, MHIG-SIG incorpora otras herramientas auxiliares:

#### a. Importación directa de imágenes desde IDRISI

Permite importar imágenes en formato "ASCII", desde Idrisi 16 y 32 bits.

### ***b. Modificar valor de Píxel***

Permite modificar (forzar) valores de una matriz de datos de una imagen. Pueden modificarse datos de un recuadro de filas y columnas, o bien modificar valores que cumplen una condición dada.

### ***c. Recortar Imagen***

Permite recortar una imagen a un recuadro menor de filas y columnas.

### ***d. Operador de Imagen***

Permite aplicar un operador (polinomio de grado tres) a los valores de la imagen o a un recuadro de filas y columnas. Puede en consecuencia, sumar, restar, dividir, multiplicar, obtener raíz, elevar a un número o aplicar expresiones algebraicas más complejas.

### ***e. Editor de imágenes vectoriales***

Permite habilitar un editor gráfico para el uso de “lápiz” y “píncel” digital, para modificar de manera directa y gráfica valores de píxeles de una imagen clasificada. Con esta herramienta, puede afinarse el trazado de líneas de frontera tributaria, clasificar en forma gráfica, etc.

### ***f. Clasificar imágenes***

Permite clasificar los valores de una imagen con criterio definido para un intervalo constante, o clasificaciones variables.

### ***g. Superponer imágenes***

Permite superponer (“*overlay*”), dos imágenes, una sobre la otra, dando prioridad según sea el criterio elegido. También permite sumar, restar, dividir o multiplicar los valores de dos imágenes.

### ***h. Herramientas accesorias y de visualización***

MHIG-SIG dispone de herramientas auxiliares de visualización, tales como distintas paletas de colores y tamaños de resolución de pantalla, estándar o personalizados, y una pizarra de visualización de determinados datos o resultados.

### 9.3.9. Consistencia de los procedimientos propuestos

Para analizar la consistencia de ambos procedimientos se efectuaron dos pruebas sobre MDT sintéticos, de modo de comparar los resultados simulados con los esperados de fórmulas y métodos de cálculo convencionales.

#### a. Prueba 1: Plano inclinado y canal central

MDT: Matriz sintética, 21 filas x 25 columnas. Resolución de píxel 30m x 30m. (Tabla Nro.: 15)

100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	75	75	75	75	75	75	74	73	72	71	70	69
91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla Nro.: 15. MDT: Matriz sintética, 21 filas x 25 columnas. Resolución de píxel 30mx30m. Prueba de consistencia N° 1.

Área de aportes: filas 1 a 21; columnas 1 a 10 (divisoria resaltado en oscuro, valores en negrita; vaguada: resaltado en celeste, valores en negrita). Representa sendos planos inclinados aportando a una vaguada central

Canal: fila 11, columnas 11 a 25. Fuera del área de aportes la matriz es “0”, excepto en el canal central de fila 11. La pendiente del canal es uniforme, excepto entre columnas 15 a 20 donde su valor “0” (pendiente nula), para valorar también la consistencia de la propagación en el cambio de pendiente del canal

En la (Tabla Nro.: 16) se presentan un resumen de los parámetros y variables de la simulación. En la Tabla Nro.: 17 y Fig. : 39 se muestran los parámetros hidráulicos de un canal semejante al simulado en el MDT, con los resultados esperados del cálculo como canal rectangular de sección y pendiente constante y régimen de flujo permanente y uniforme.

En las Fig. : 40, Fig. : 41 y Fig. : 42 se muestran los resultados de la simulación en Caudal y Cota Máxima de p.a. (elevación máxima de la superficie de agua), comparados con los valores esperados. La verificación se efectúa en píxel de control (limnigrama, hidrograma) y a lo largo del canal (propagación).

El tiempo de concentración esperado en el píxel de control de f=11, c=13, estimado por el método de California Culvert, es de 11 minutos.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad / Notas</b>
Nº de filas	21	
Nº de columnas	25	
Resolución X	30	m
Resolución Y	30	m
<i>Parámetros característicos deducidos:</i>		
Nº de píxeles	525	
Superficie píxel	900	m <sup>2</sup>
Superficie MDT	47,25	Has
X Máximo	750	m
Y Máximo	630	m
L Máximo	35 píxeles	píxeles
L Máximo	1050	m
Valor Máximo	100	m
Valor Mínimo	50	m
Valor no contabilizado	0	
Pendiente media canal (tramo inicial y final)	0,033	
Pendiente media canal (tramo medio)	0	
Píxel f=11, c=25	----	Colector final
<i>Parámetros y variables de lluvia:</i>		
Área de lluvia	210	Píxeles
Área de lluvia	18,9	Hectáreas
Precipitación Neta	60	mm
Duración	60	minutos
Intensidad de Lluvia (constante)	1	mm/minutos
<i>Resultados lógicos esperados (por método de cálculo convencional):</i>		
Escorrentía	60	mm
Escorrentía	11.340	m <sup>3</sup>
Caudal máximo de entrada al canal	3,15	m <sup>3</sup> /s
Tirante 'h' en tramo inicial del canal	0,126	m, (tirante normal en canal a régimen uniforme)
Tirante máximo en píxel colector final (f11, c25)	12,6	m, (píxel colector final, de prueba y verificación)
Tiempo de concentración esperado (al píxel de control, en f=11, c=13)	11	Minutos (s/Método California Culvert)

**Tabla Nro.: 16. Tabla resumen de parámetros y variables de la prueba de consistencia N° 1.**

Hidráulica de Canales - Flujo Uniforme - Fórmula de Manning: PLANILLA H - Q								
h	Q	A	Chi	T	R	D	C	V
-	-	-	30,00	30,00	-	-	-	-
0,010	0,05	0,30	30,02	30,00	0,01	0,01	8,44	0,15
0,020	0,15	0,60	30,04	30,00	0,02	0,02	9,47	0,24
0,030	0,29	0,90	30,06	30,00	0,03	0,03	10,13	0,32
0,040	0,47	1,20	30,08	30,00	0,04	0,04	10,63	0,39
0,050	0,67	1,50	30,10	30,00	0,05	0,05	11,03	0,45
0,060	0,91	1,80	30,12	30,00	0,06	0,06	11,37	0,51
0,070	1,18	2,10	30,14	30,00	0,07	0,07	11,66	0,56
0,080	1,47	2,40	30,16	30,00	0,08	0,08	11,92	0,61
0,090	1,79	2,70	30,18	30,00	0,09	0,09	12,16	0,66
0,100	2,14	3,00	30,20	30,00	0,10	0,10	12,37	0,71
0,110	2,50	3,30	30,22	30,00	0,11	0,11	12,57	0,76
0,120	2,89	3,60	30,24	30,00	0,12	0,12	12,75	0,80
0,130	3,30	3,90	30,26	30,00	0,13	0,13	12,92	0,85
0,140	3,74	4,20	30,28	30,00	0,14	0,14	13,08	0,89
0,150	4,19	4,50	30,30	30,00	0,15	0,15	13,23	0,93
0,160	4,66	4,80	30,32	30,00	0,16	0,16	13,37	0,97
0,170	5,16	5,10	30,34	30,00	0,17	0,17	13,51	1,01
0,180	5,67	5,40	30,36	30,00	0,18	0,18	13,63	1,05
0,190	6,20	5,70	30,38	30,00	0,19	0,19	13,76	1,09
0,200	6,75	6,00	30,40	30,00	0,20	0,20	13,87	1,13

Tabla Nro.: 17. Tabla de cálculo de parámetros hidráulicos de un canal rectangular,  $b=30\text{m}$ , pendiente constante ( $i=0,033$ ), régimen uniforme,  $n$  de Manning  $n=0,055$ .

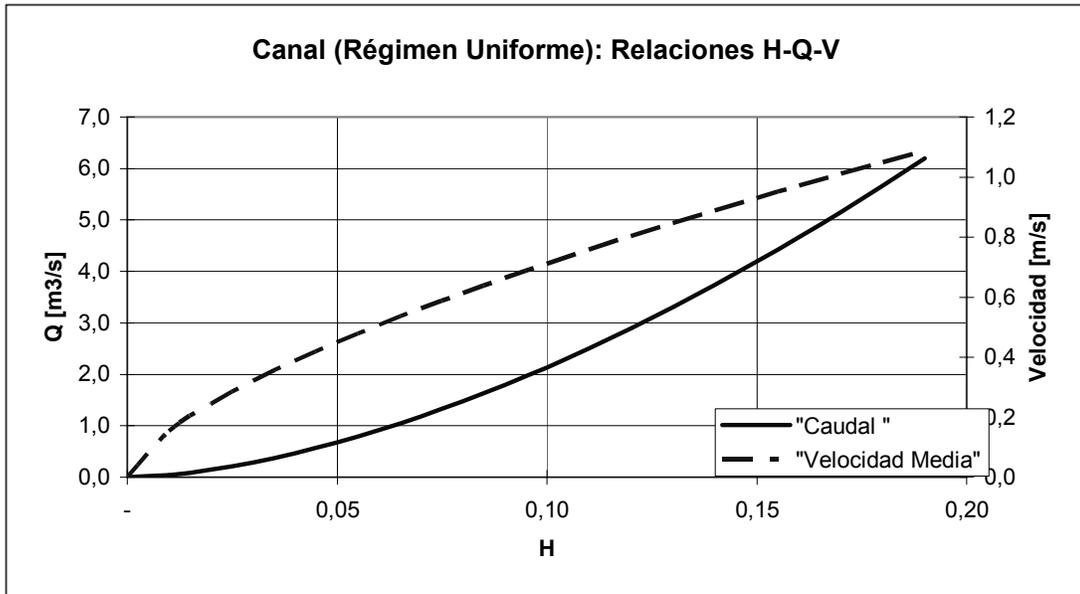
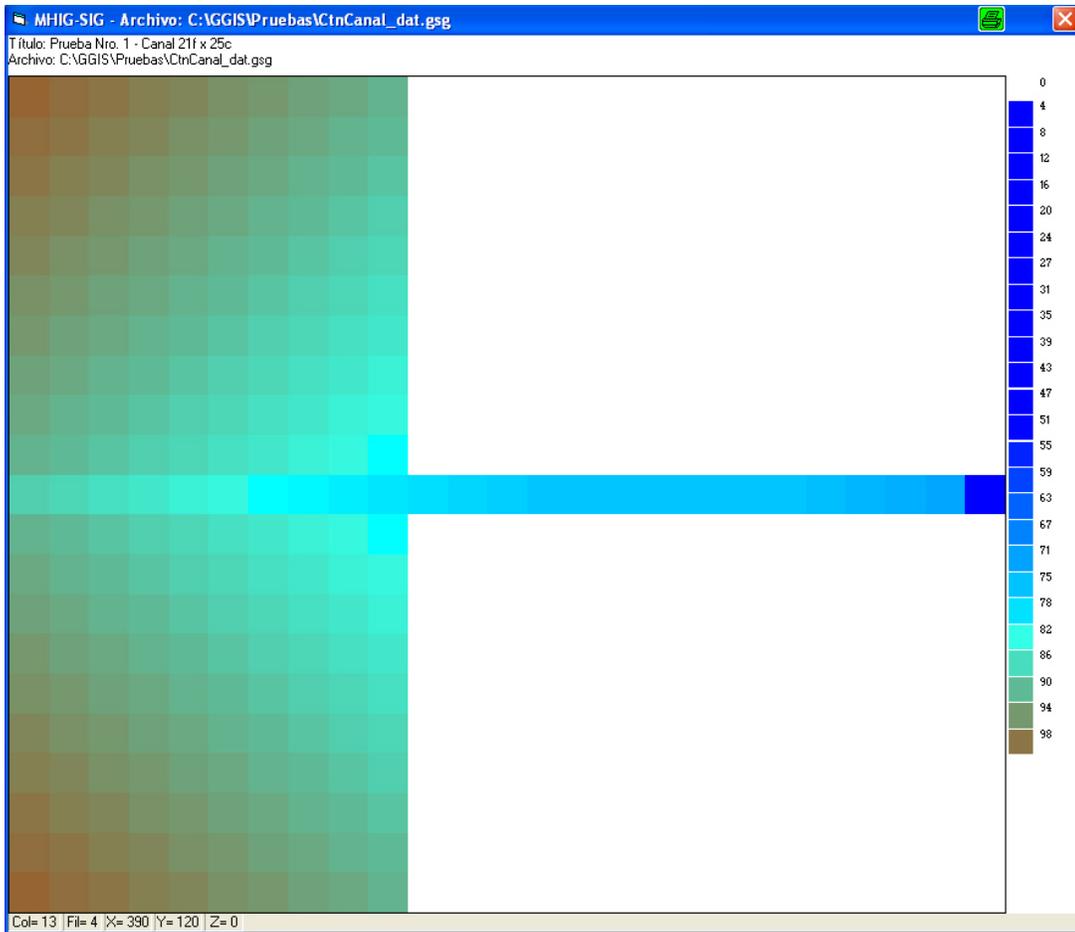
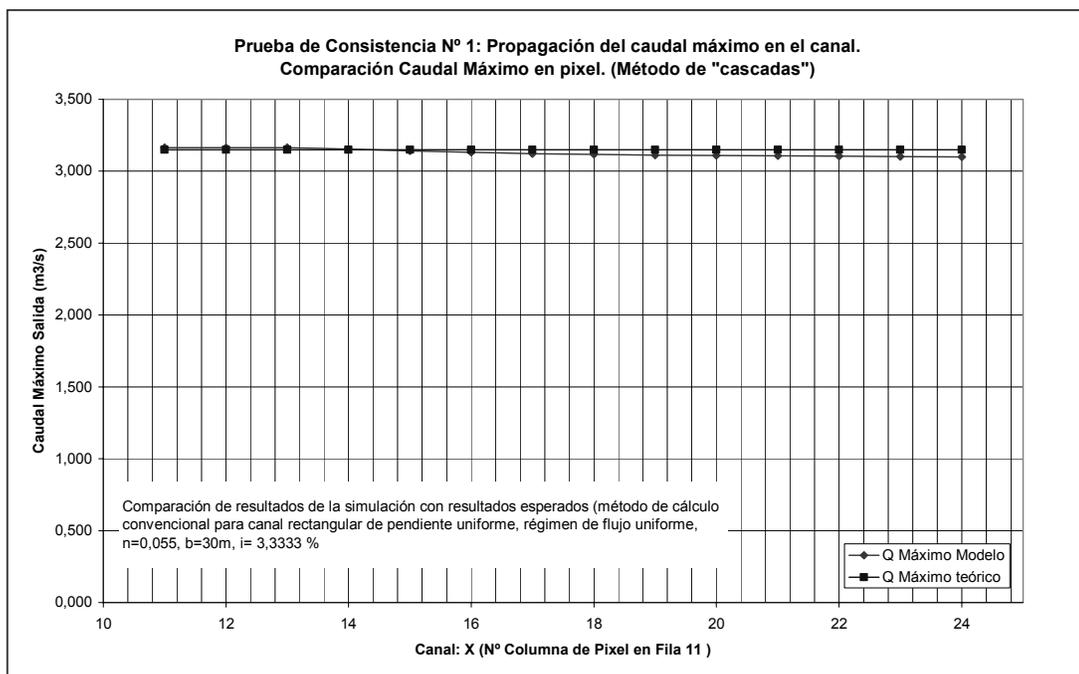
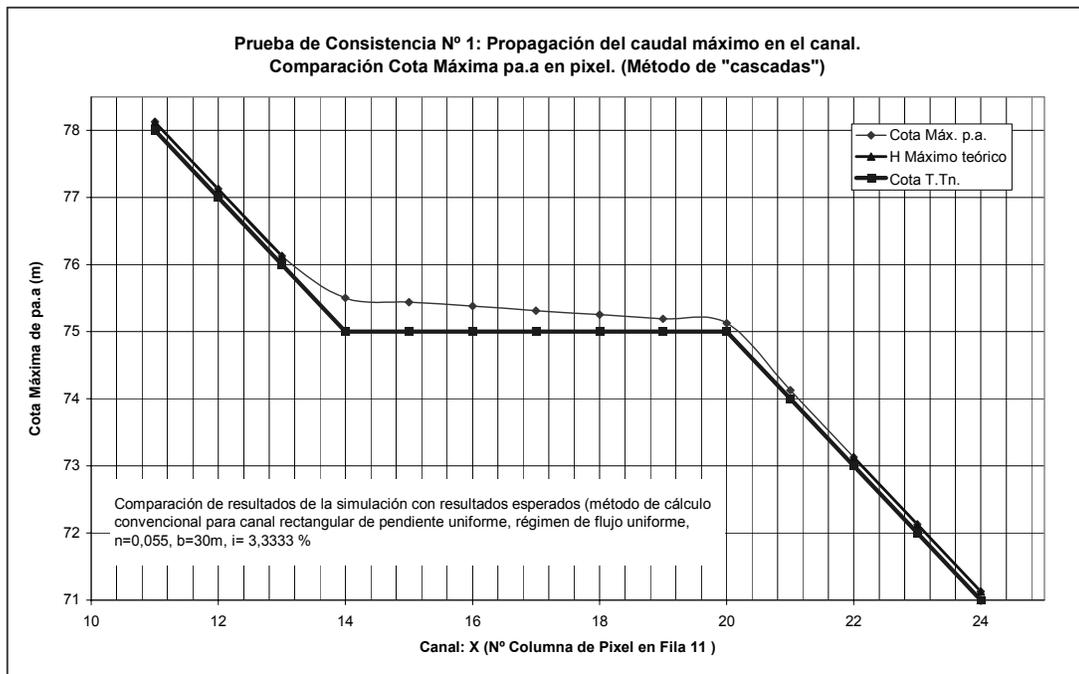


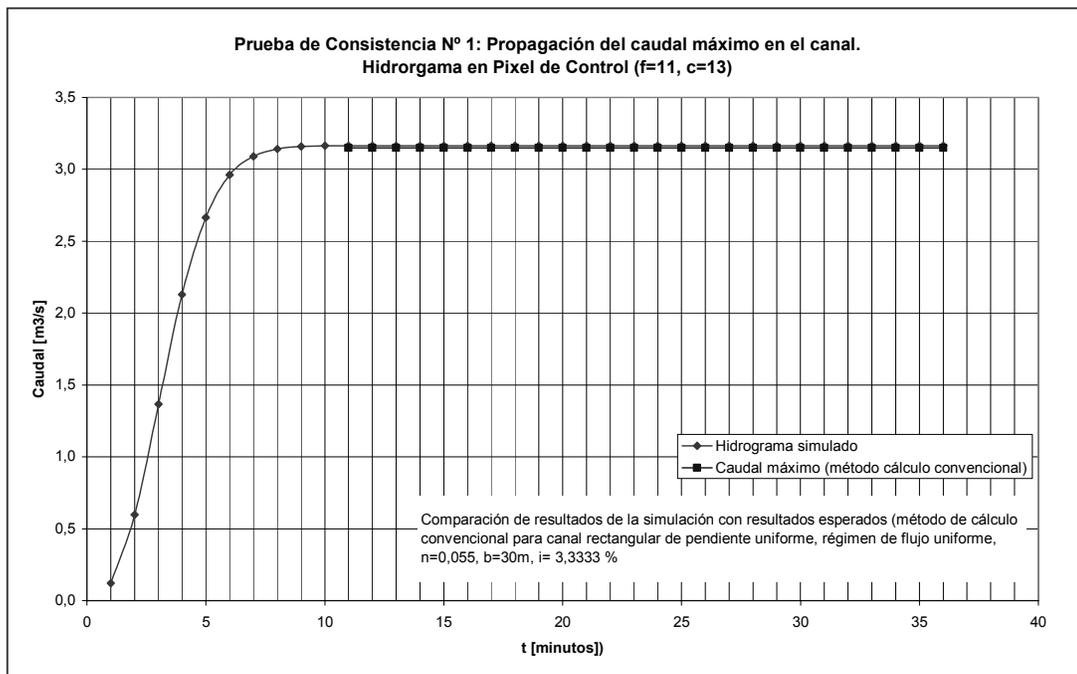
Fig. : 39. Prueba de consistencia N° 1: Gráfica H-Q-V en el tramo inicial del canal



**Fig. : 40.** Vista en MHIG-SIG del MDT, (dos planos inclinados con aportes hacia una vaguada central y drenaje en canal)



**Fig. : 41. Prueba de consistencia N° 1: Propagación de caudal en canal; comparación de Caudal Máximo de salida y Cota Máx. de p.a. en el canal, en relación al máximo esperado (cálculo convencional)**



**Fig. : 42. Prueba de consistencia N° 1: Hidrograma en píxel de control (f=11, c=13), y caudal máximo esperado (cálculo convencional)**

Los valores de simulación ajustan para el ejemplo con un coeficiente de rugosidad “n” de Manning de 0,055, y un *período de cálculo* o *paso* de tiempo de discretización del modelo de  $t = 0,33$  minutos. La celda final del canal (f=11, c=25) sirve de colectora final, donde se concentra el 100% de la escorrentía superficial producida ( $H_{pa} = 12,6m$ ).

Los resultados obtenidos para el ejemplo son consistentes. La diferencia entre ambos métodos (simulación y cálculo convencional del canal), apreciada en caudales y alturas máximas de p.a, en píxeles de control son muy satisfactorios.

Obsérvese asimismo el remanso producido en el canal en el cambio de pendiente de fondo. El método de simulación propuesto (cascada) ofrece buenos resultados con rapidez de proceso, simplicidad de cálculo y pocos parámetros de ajuste.

***b. Prueba 2: MDT sintético para una “cuenca” con divisorias, planos inclinados, vaguadas, depresiones lagunares, canal central de drenaje***

En la prueba siguiente, se agrega la validación del método de propagación de la crecida en “*cascada*”, en un MDT teórico o sintético, con divisorias de aguas, laderas, valles, depresiones lagunares, y un canal central de drenaje principal. El fin de la prueba es validar la consistencia del modelo en el cálculo de caudales y tirantes máximos en píxeles de los distintos componentes señalados.

*MDT*: Matriz sintética, 30 filas x 30 columnas. Resolución de píxel 30m x 30m (Tabla Nro.: 18). Las filas y columnas 1 y 30 contienen el valor “0” que garantiza el control de flujo dentro del sistema. El canal central de drenaje se encuentra en la fila 22, con pendiente de fondo en parte uniforme, y en parte diseñado a pendiente nula para valorar también la consistencia de la propagación en el cambio de pendiente del canal. El píxel de fila 22, columna 30 oficia de colector final de control.

En la Tabla Nro.: 19 se presentan un resumen de los parámetros y variables de la simulación con los resultados esperados del cálculo como canal rectangular de sección y pendiente constante y régimen de flujo permanente y uniforme.

En las Fig. : 43, Fig. : 44 y Fig. : 45 se muestran los resultados de la simulación en Caudal y Cota Máxima o elevación de la superficie de agua, comparados con los valores esperados. La verificación se efectúa en el píxel de control de fila 22 y columna 28, (limnigrama, hidrograma), y a lo largo del canal (propagación en fila 22). Para comparar y ajustar la propagación de la crecida se adopta el equivalente al tiempo de concentración estimado por el método de California Culvert. El tiempo de concentración esperado en el píxel de control de  $f=11$ ,  $c=28$ , estimado por el método de California Culvert, es de 19,2 minutos.

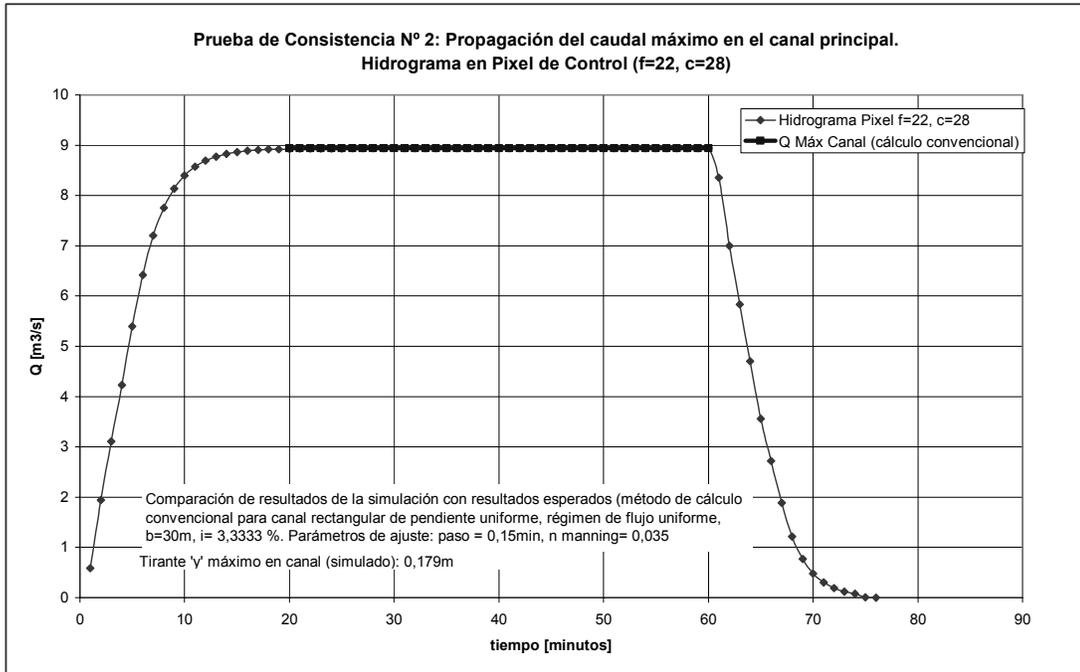
Los resultados obtenidos, utilizando como parámetros de mejor ajuste un paso de cálculo de 0,15 minutos y Coeficiente de Manning ‘ $n$ ’ =0,035, muestran:

- Identificación en la simulación de los componentes simulados (laderas, divisorias, vaguadas, depresiones lagunares, cauces principales y secundarios),
- Escorrentía en el píxel de control final ( $f=22$ ,  $c=30$ ) y almacenamiento en depresión lagunar, iguales al valor teórico esperado.
- Caudal máximo, tiempo al pico, tiempo de descenso (del hidrograma del píxel de control) iguales al esperado,
- Propagación de caudales máximos y alturas máximas de pelo de agua en el cauce principal (Fila  $f=22$ ), consistentes con los resultados esperados (comparado con el cálculo convencional como canal rectangular, de pendiente uniforme, régimen de flujo permanente y uniforme).

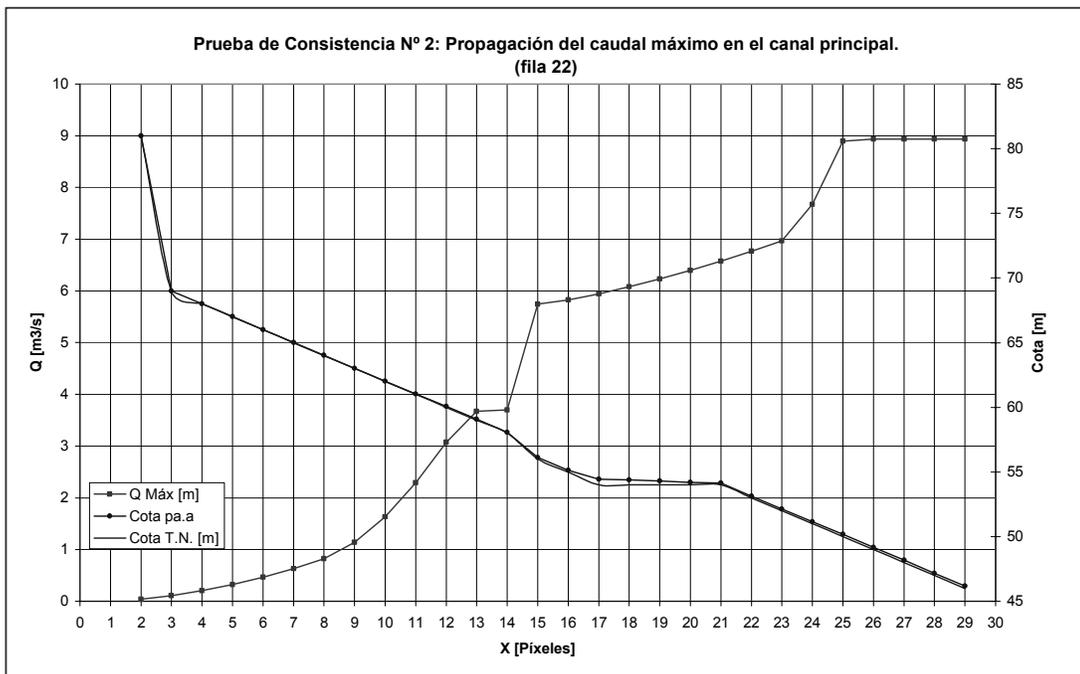


<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad / Notas</b>
Nº de filas	30	
Nº de columnas	30	
Resolución X	30	m
Resolución Y	30	m
<i>Parámetros característicos deducidos:</i>		
Nº de píxeles MDT	900	píxeles
X Máximo	900	m
Y Máximo	900	m
Píxel de control	22, 28	Fila, columna
L Máximo (a px. control)	49	píxeles
L Máximo (a px. control)	1470	m
Valor Máximo	100	m
Valor Mínimo	2	m
Valor no contabilizado	0	
Pendiente media canal (tramo inicial y final)	0,033	
Pendiente media canal (tramo medio)	0	
Píxel f=22, c=30	----	Colector final
<i>Parámetros y variables de lluvia:</i>		
Área de lluvia	661	píxeles
Área de lluvia	59,49	Has
Precipitación Neta	60	mm
Duración	60	minutos
Intensidad de Lluvia (constante)	1	mm/minutos
Área aportes canal (sin lagunas)	596	píxeles
Área aportes canal (sin lagunas)	53,64	Has
Coef. 'n' Manning (ajuste)	0,035	
Paso de cálculo	0.15	min
<i>Resultados lógicos esperados (por método de cálculo convencional):</i>		
Escorrentía	60	mm
Escorrentía	35.694	m <sup>3</sup>
Almacenamiento laguna	3510	m <sup>3</sup>
Escorrentía canal	32183	m <sup>3</sup>
Caudal máximo canal en píxel de control	8,94	m <sup>3</sup> /s, (píxel f=22,c=28)
Tirante 'h' en tramo inicial del canal	0,18	m, (tirante normal en canal a régimen uniforme)
Tirante máximo en píxel colector final (f22, c30)	35,76	m, (píxel colector final, de prueba y verificación)
Tiempo de concentración esperado (al píxel de control, en f=22, c=28)	19,2	Minutos (s/Método California Culvert)

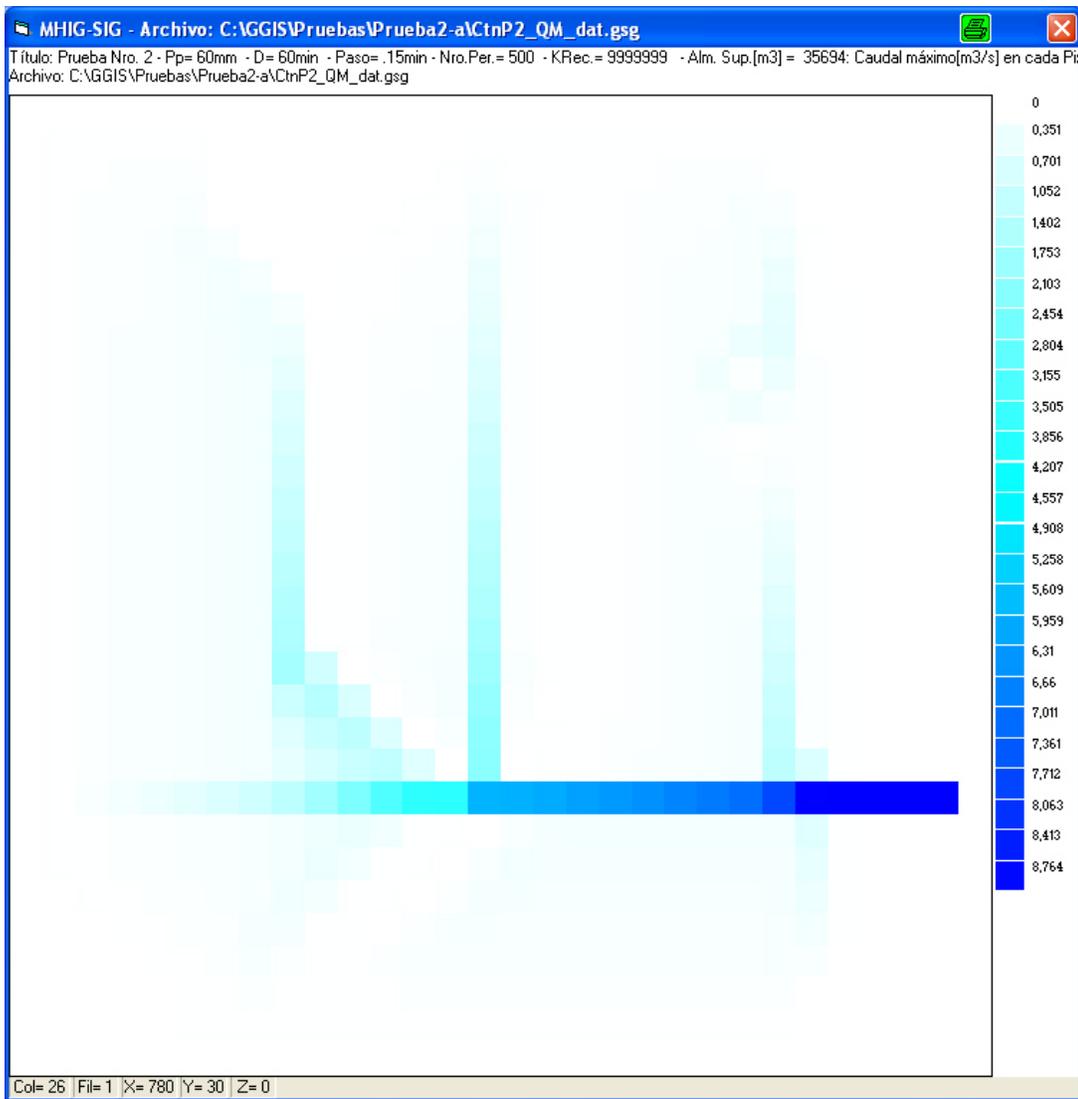
**Tabla Nro.: 19. Tabla resumen de parámetros y variables de la prueba de consistencia N° 1.**



**Fig. : 44.** Prueba de consistencia N° 2: Hidrograma resultante en píxel de control (f=11, c=13), y caudal máximo esperado (cálculo convencional)



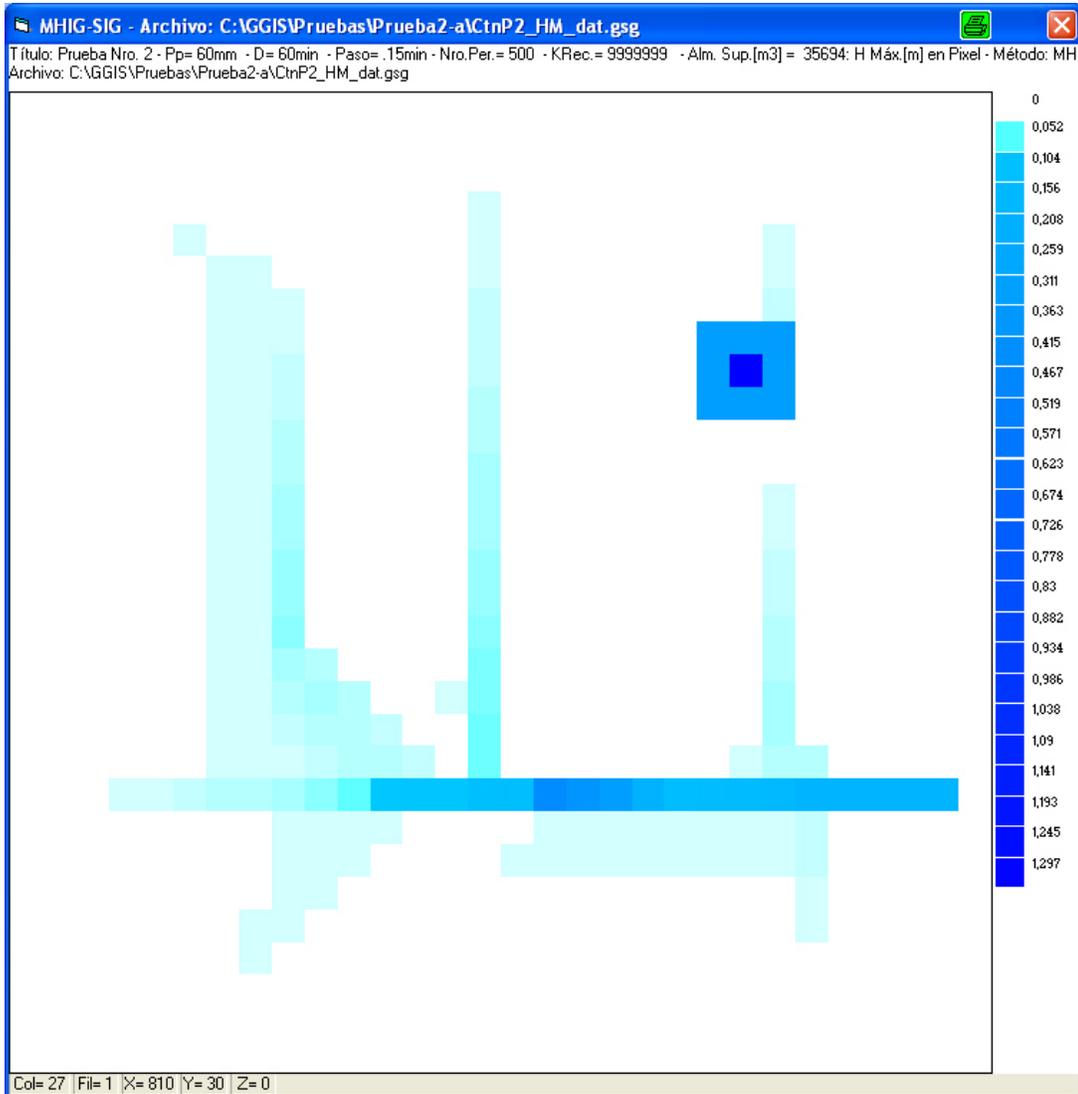
**Fig. : 45.** Prueba de consistencia N° 2: Propagación de caudal en canal; comparación de Caudal Máximo de salida y Cota Máx. de p.a. en el canal, en relación al máximo esperado (cálculo convencional).



**Fig. : 46. Prueba de consistencia N° 2: Mapa temático SIG de torrencialidad. Visualización del ‘Caudal Maximo’ saliente para cada píxel, par una tormenta sintética de Lluvia Neta 60mm, Duración, 60 minutos.**

La Fig. : 46, muestra una salida típica de MHIG-SIG para los resultados de *caudal máximo* en cada celda, o mapa temático de torrencialidad. Los colores e intensidades son optativos, para su mejor visualización y distinción.

El ejemplo resulta de simular una tormenta de intensidad unitaria y duración 60 minutos. Pueden observarse con claridad las líneas de flujo encontradas por la simulación, que resultan coincidentes con valles y vaguadas del MDT. Asimismo, es demostrativo de la concentración del flujo en el cauce principal, con valores crecientes de izquierda a derecha, conforme ingresan los flujos -concentrados o mantiformes- desde área de drenaje. La celda central del área de “laguna” muestra un valor nulo de “caudal máximo”, lo cual es correcto. Las celdas de *divisorias* y zonas altas presentan menor flujo.



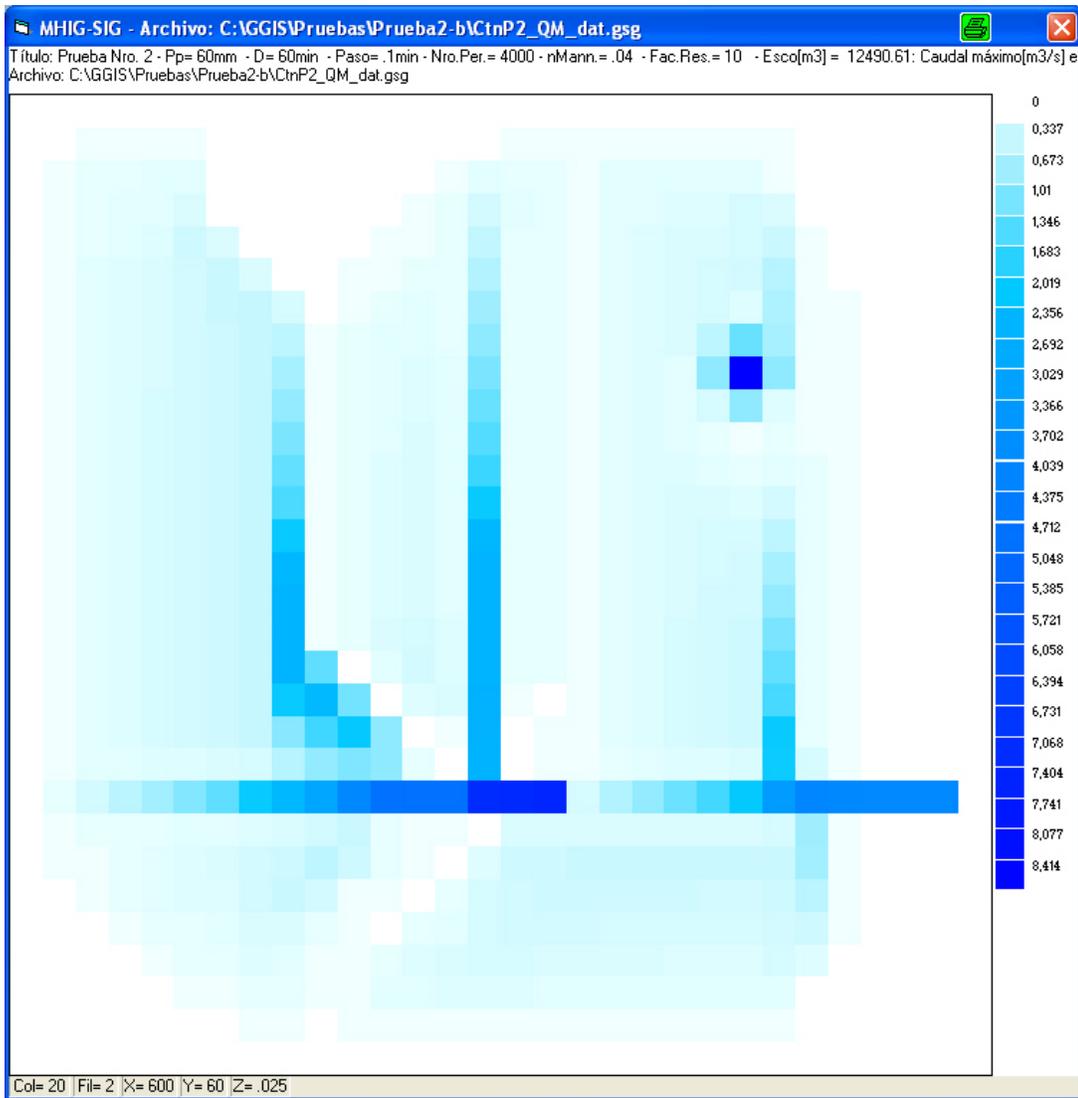
**Fig. : 47. Prueba de consistencia N° 2: . Mapa temático SIG de inundabilidad. Visualización de ‘Tirante Máximo’ o altura máxima de agua sobre el T.N. para cada píxel, para una tormenta sintética de Lluvia Neta 60mm, Duración, 60 minutos.**

La Fig. : 47, muestra una salida típica de MHIG-SIG para los resultados de *tirante o altura máxima de p.a. sobre el T.N.*, en cada celda (mapa temático de inundabilidad).

El ejemplo resulta de simular una tormenta de intensidad unitaria y duración 60 minutos. Se identifican claramente los componentes conformados por depresiones inundables, valles y cauces, que resultan coincidentes con depresiones, valles y vaguadas del MDT. Asimismo, se observa la concentración de agua en el cauce principal, con valores crecientes de izquierda a derecha, conforme ingresan los flujos - concentrados o mantiformes- desde el área de drenaje. La celda central del área de “laguna” muestra el mayor valor de almacenamiento, seguido de las celdas contiguas de la depresión. Las celdas de *divisorias* y zonas altas presentan menor almacenamiento máximo.

Simulación por el método de “Flujo Superficial Laminar y Flujo Turbulento encauzado”:-

Las Fig. : 48 y Fig. : 49 muestran los resultados de las corridas de prueba por el método de cálculo de “Flujo Superficial laminar y Flujo Turbulento encauzado). Existen diferencias evidentes entre ambos métodos de propagación. En este caso, se observa la influencia del Número de Reynolds y del factor de fricción (Darcy-Weisbach) incorporados en el algoritmo del espacio discreto de resolución de la ecuación diferencial. El factor de fricción depende del “coeficiente de resistencia”), el que a su vez depende de la intensidad de la lluvia. Nótese en la Fig. : 50 la influencia del cese de la lluvia en la variación brusca del hidrograma (reducción brusca de la fricción por lluvia), coincidente con el pico de caudal.

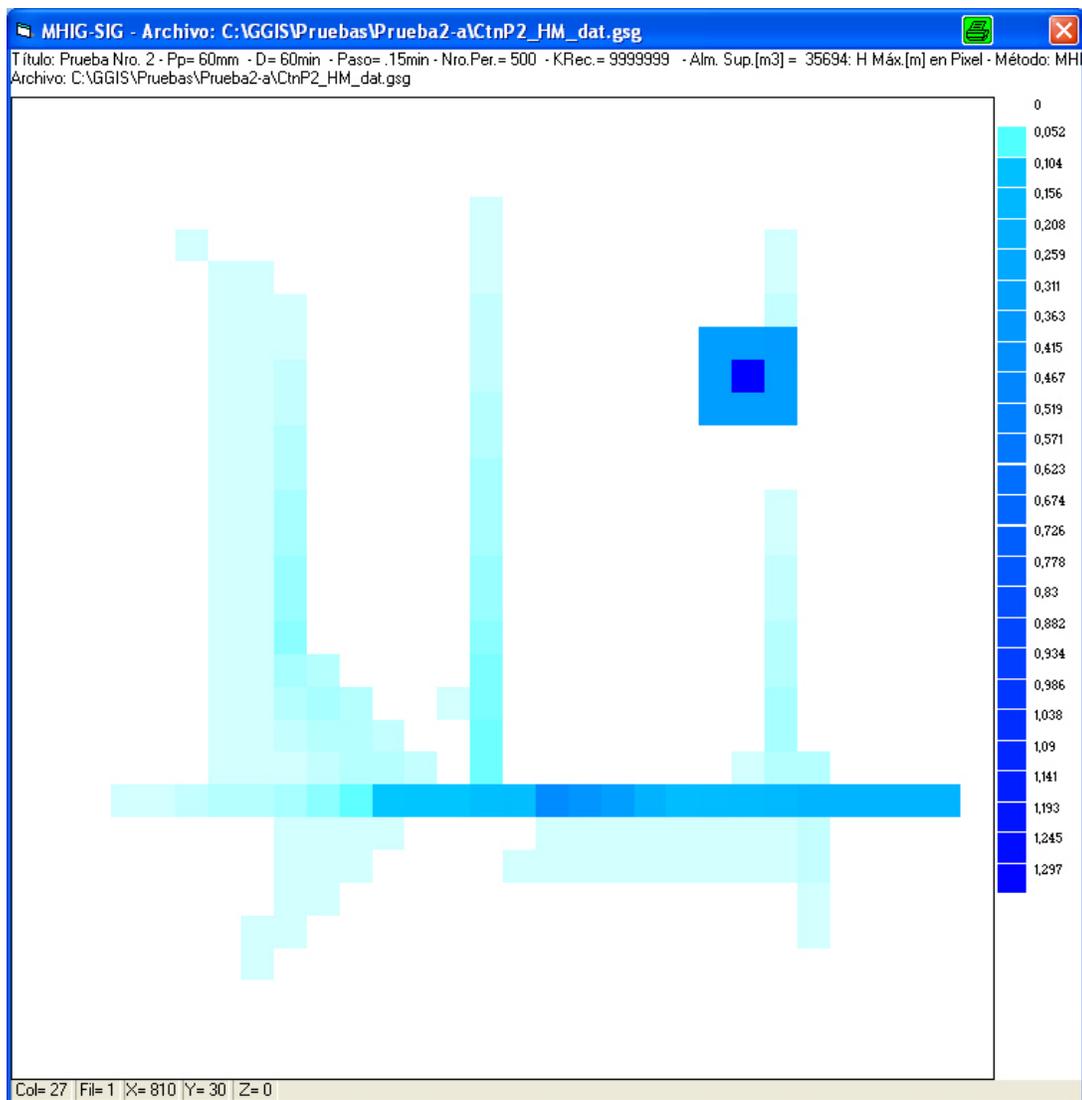


**Fig. : 48. Prueba de consistencia N° 2: Mapa temático SIG de torrencialidad. Visualización del ‘Caudal Maximo’ saliente para cada píxel, par una tormenta sintética de Lluvia Neta 60mm, Duración, 60 minutos. (Método de Flujo Superficial Laminar y Flujo Turbulento encauzado)**

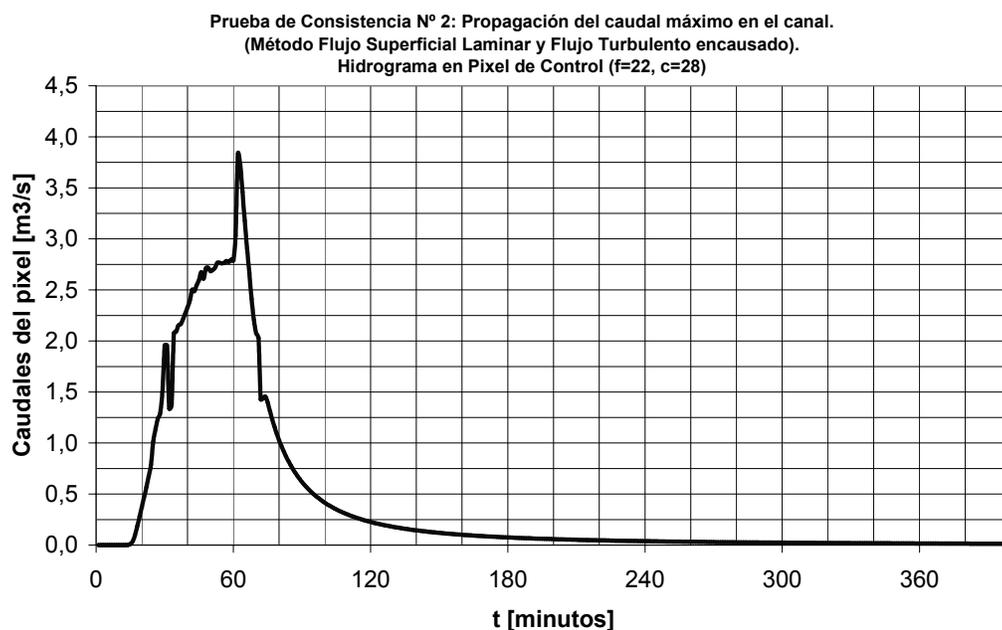
Al cesar la lluvia, cesa también la mayor fricción causada por la energía cinética de salpicadura, produciendo un “aceleramiento” repentino del flujo que se manifiesta en el algoritmo de cálculo en los primeros periodos o pasos de modelación subsiguientes.

Por lo general, los caudales máximos dan valores algo por debajo y la recesión suele resultar algo mayor, respecto a los valores esperados. En el ejemplo, el tiempo al pico coincide con el final de la tormenta.

Este método de cálculo define mejor la solución teórica en relación al proceso físico real, pero tiene el inconveniente de disponer de más parámetros de ajuste, es más sensible, requiere más datos y una mayor destreza y tiempo de calibrado del modelo para obtener resultados confiables.



**Fig. : 49. Prueba de consistencia N° 2: Mapa temático SIG de inundabilidad. Visualización de ‘Tirante Máximo’ o altura máxima de agua sobre el T.N. para cada píxel, para una tormenta sintética de Lluvia Neta 60mm, Duración, 60 minutos. (Método de Flujo Superficial Laminar y Flujo Turbulento encauzado)**



**Fig. : 50. Prueba de consistencia N° 2: Hidrograma resultante en píxel de control (f=22, c=28) (Método de Flujo Superficial laminar y Flujo Turbulento Encauzado), y caudal máximo esperado (cálculo convencional)**

En el ejemplo, se utilizan como parámetros de ajuste un *paso de cálculo* de 0,10 minutos, *coeficiente de Manning 'n'* =0,040, *Factor de Incremento de Fricción (FIC)* = 10. Los resultados obtenidos por medio de este procedimiento de cálculo son suficientemente consistentes para identificar los componentes simulados (laderas, divisorias, vaguadas, depresiones lagunares, cauces principales y secundarios). Los valores máximos de caudal y tirante en cada píxel dependen esencialmente de la calidad del ajuste que se realice para los parámetros del modelo.

#### 9.4. APLICACIÓN CON DEM DE SRTM

Las primeras experiencias con MHIG-SIG, físicamente basadas en MDT, se efectuaron con DEM de SRTM, obtenido del sitio de la NASA (<http://seamless.usgs.gov>). SRTM, Shuttle Radar Topography Mission, es un proyecto común entre NASA y NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), para trazado del mundo en tres dimensiones. (Aplicados en la región del VIRCh).

SRTM utilizó técnicas de interferometría de radar para obtener la información de elevación de la superficie, utilizando dos instrumentos: el Spaceborne Imaging Radar (SIR-C) y el 1 X-band dual Synthetic Aperture Radar (X-SAR), configurado como interferómetro de la línea de fondo, adquiriendo dos imágenes en el mismo tiempo.

Estas imágenes, combinadas, pueden producir una sola imagen 3-D.

Lanzado a bordo de NASA Space Shuttle Endeavour el 11 de Febrero de 2000, SRTM ha colectado con éxito datos sobre el 80% de la superficie de la tierra de la tierra, para toda la área entre 60 grados N y 56 grados de latitud de S. Los datos de SRTM se utilizan para generar un mapa topográfico digital de la superficie de la tierra de la tierra, con píxel de 1° arco en segundo para los Estados Unidos (aproximadamente 30 metros).

Para la región inferior del VIRCH, que compone el área de trabajo de estos estudios, los datos disponibles tienen una resolución de 3" de arco (aproximadamente 90m de valor nominal), cuya resolución espacial es aproximadamente de 92,8m en dirección meridiana (Eje X de GK) y 67,5m en dirección de paralelos (eje Y de GK).

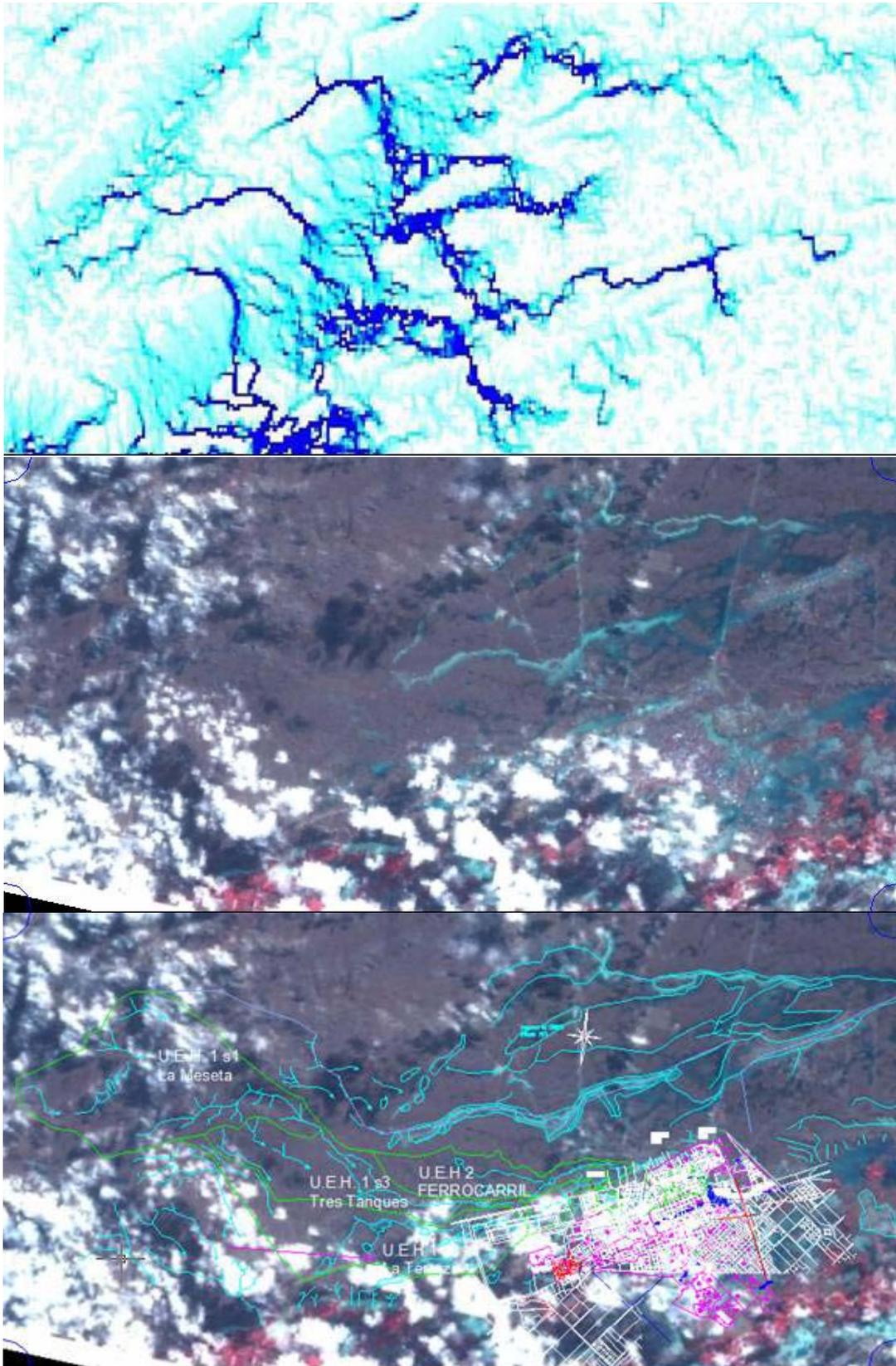
Los datos procesados de SRTM resuelven las coordenadas horizontales y verticales. La precisión vertical de diseño es menor que los 16 metros; en tanto la resolución obtenida finalmente para todo el globo es más cercano a +/- 10 metros.

La validación del MDT se efectuó mediante el levantamiento en campo de una selección de puntos y su comparación con los mismos puntos pre-identificados en la matriz digital, hallando un error espacial despreciable en X-Y, un error muy reducido en cotas absolutas, y un error muy satisfactorio en cotas relativas, para los fines de la modelación pretendida. (Scalise, en Serra et al., 2006).

El recorte de MDT utilizado, georeferenciado, se localiza en coordenadas Latitud/Longitud, expresadas en grados entre las esquinas NO y SE: min. X: -65.5327230, max. X: -65.2403400, min. Y: -43.2902330, máx. Y: -43.1802770, y comprende el área urbana de Trelew, y el área de influencia aluvional convergente al Parque Industrial de Trelew (PIT). (Scalise, en Serra et al., 2006).

Si bien el MDT logrado representa adecuadamente la topografía del área suburbana, debe entenderse que en la ciudad propiamente dicha se esperan errores apreciables por efecto de la edificación y la escala de trabajo.

En la Fig. : 51 se compara el resultado de la simulación lograda con MHIG-SIG para caudal máximo en píxel (arriba), en condiciones similares a la tormenta extraordinaria de Abril de 1998, con la misma ventana de la imagen satelital LANDSAT TM del 25 de Abril de 1998 (medio), y con esta imagen superpuesta a mapa de Unidades Hidrológicas de Estudio (UEH), dinámica hídrica superficial y de la planta urbana de Trelew (abajo). Obsérvese la concordancia de líneas preferenciales de flujo y principales rasgos hidrológicos de su dinámica hídrica superficial, y la identificación de los principales cuerpos de agua en el Parque Industrial de Trelew (Presas), Laguna I (Chiquichano), Laguna II (De la Base). Aunque no existen datos de aforos, las magnitudes de caudales estimadas en el Cañadón del Parque Industrial para la crecida de Abril de 1998 y las estimaciones de la simulación MHIG-SIG para la selección de celdas transversales al cañadón son de órdenes similares.



**Fig. : 51.** Arriba: Simulación MHIG-SIG, Caudal Máximo en pixel, tormenta Abril 1998. Medio: Imagen Satelital LANDSAT TM 25 Abr 1998. Abajo: Superposición de mapa de Unidades Hidrológicas de Estudio (Sub-cuencas), dinámica hídrica superficial y planta urbana

**ESTIMACIÓN DE CRECIDAS MÁXIMAS  
EN PAISAJE DE MESETA**

## IV. ESTIMACIÓN DE CRECIDAS MÁXIMAS EN PAISAJE DE MESETA

### 10. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN. TEÓRICO. CONCEPTUAL

La investigación bibliográfica, la experimentación, la disponibilidad de abundante información de apoyo existente junto a nuevos datos incorporados en estos trabajos, constituyen la base de comprobación y respuesta de la hipótesis.

De la revisión bibliográfica efectuada que aporta al diseño del marco teórico de este trabajo, surge una primera clasificación en tres grandes áreas temáticas: a) bibliografía consultada sobre hidrología general, b) bibliografía consultada sobre modelación hidrológica, especialmente la simulación con modelos distribuidos, y c) bibliografía consultada en relación al paisaje de meseta y a sistemas hidrológicos mixtos.

Del primer grupo, -en relación específica con este desarrollo-, se destacan por la aplicación directa a este trabajo, obras de Chow (1964, 1989, 1994) y Rafael Heras (1976). Del segundo grupo, en relación directa a los modelos hidrológicos que se utilizan, se destacan trabajos del Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida y Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua, trabajos y seminarios dictados por los Dres. López Cadenas y Soba Baro (1982), Madrid, España, publicaciones específicas de *Frontiers in Flood Research*, IAHS (Moore et al., 2006) y material del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX), Madrid, España. Entre los trabajos de autores nacionales que específicamente se han tenido presente en la construcción de modelos de precipitaciones se destaca uno sobre lluvias de diseño, (Caamaño y Dasso, 2003), y el análisis relativo de la determinación del tiempo de concentración aplicado a cuencas urbanizadas (Zucarelli y Morresi, 2004).

En relación al tercer grupo, se destacan estudios e investigaciones iniciales en la Argentina para Sistemas Hidrológicos No Típicos, producidos por autores como Fertoni (1978), Caamaño et al. (1979), y distintos trabajos sobre *hidrología de llanuras* de las instituciones de investigación citadas en el párrafo anterior, la Facultad de Ciencias Hídricas de la U. N. del Litoral y el Centro Universitario de Investigaciones Hidroambientales de la Universidad Nacional de Rosario. En el contexto internacional de la ciencia hídrica, se destacan por ejemplo aquellos bajo el tema de “*Shallow Water System*”. Un detalle de las referencias bibliográficas citadas y de la bibliografía consultada se expone en el capítulo de “Bibliografía”.

## 11. SISTEMAS HIDROLÓGICOS EN MESETAS. MARCO CONCEPTUAL

A mediados de la década de 1970, la Argentina se introduce en un nuevo paradigma para la ciencia hídrica, la hidrología en zona de llanuras, a través de trabajos producidos por autores como Fertonani (1978), Caamaño et al. (1979). Estos trabajos de investigación producen la discusión sobre las diferencias entre el sistema hidrológico típico (SHT), en montaña, y el sistema hidrológico no típico, en llanura (SHNT).

Tal se desarrolla en la tesis en PMP (Serra, 2003), en la problemática aluvional de las terrazas patagónicas los dos sistemas hidrológicos extremos están presentes. Una u otra clasificación, le cabe a una unidad hidrológica cuando existen características claramente definidas o preponderantes de una sobre la otra. Pero también puede verificarse la existencia de *Sistemas Hidrológicos Mixtos (SHM)*, donde coexisten ambas tipologías básicas, en proporciones impactantes como para ser consideradas como tales, y en manifestaciones simples o más complejas.

Se reserva el término “*cuenca*” para referir a un SHT, y denominar al área tributaria de un SHM de orden mayor, que conserva la propiedad fundamental de los SHT de identificar una “*envolvente*” de la superficie tributaria definida por la Precipitación Máxima Probable (PMP). A los sub-sistemas que lo componen, se ha dicho que se prefiere referir como *Unidades de Estudio Hidrológico (UEHs)*.

### 11.1. SISTEMAS HIDROLÓGICOS MIXTOS EN PAISAJE DE MESETAS

En las terrazas patagónicas suele encontrarse un paisaje compuesto, cuyas conformaciones sistémicas pueden sumar la combinación simple de ambos sistemas básicos. En algunos casos, pueden presentar manifestaciones más complejas.

Un *sistema hidrológico es mixto (SHM)*, cuando ambas configuraciones básicas (SHT y SHNT) coexisten en proporciones e impacto sensibles a la conformación de la estructura de disipación de los excedentes hídricos.

Hay casos de SHM, donde la conformación sistémica mayor corresponde a la de un sistema hidrológico Típico, pero incluye en su superficie tributaria un área menor. Aunque es más raro encontrarlos, también puede darse el caso contrario.

Un subsistema de un SHM es *cuasi-endorreico (SHM-CE)*, cuando puede identificarse una unidad de comportamiento espacial dentro de una frontera que define una superficie tributaria de crecientes ordinarias (a extraordinarias) hacia una depresión interior, pero que puede resultar desbordada en crecientes extraordinarias. Suelen presentarse en terrazas con una red de drenaje débilmente lineal, escasamente organizada y generalmente no jerárquica. Las aguas escurridas durante las lluvias se resuelven por lo general por evaporación-infiltración, pero en casos extraordinarios (o excepcionales),

derraman fuera de este subsistema para integrarse a un sistema lagunar o encauzado de orden mayor.

Este concepto resulta fundamental, puesto que reconoce movilidad o variabilidad espacial a la superficie tributaria, delimitada por un “contorno” o “frontera” definido en una porción de espacio físicamente determinable.

A diferencia del concepto primario de “divisoria” en una “cuenca”, o del concepto moderno de “envolvente” en un sistema no típico, en esta definición deja de ser una línea de continuidad física “estática” para ser espacial y temporalmente dinámica.

Estas cualidades de los SHM en PM son sinérgicas para la generación de escorrentías en condiciones de extrema pluviosidad.

Un caso singular lo constituye el subsistema de la Laguna Chiquichano, que recibe las aguas del cañadón del Parque Industrial de Trelew, y que drena hacia un subsistema mayor de lagunas existentes entre esta ciudad y la ciudad de Rawson.

Un *Subsistema Lagunar Encadenado* ( $SHM_{LE}$ ), de un SHM, se compone de dos o más subsistemas cuasi-endorreicos y adyacentes. En algunos casos y condiciones, la intensidad y ubicación de una tormenta intensa y de reducido tamaño en este tipo de paisajes puede ser determinante de la composición e integración del “*trenzado*” lagunar (chubasco en “mangas”).

En su conformación, estos subsistemas suelen encadenarse en una dirección estructural (alineamiento geológico) y converger a sistemas de orden mayor, abiertos o cerrados (endorreicos).

Se dará en denominar como atípicos ( $SHM_{AT}$ ), a aquellas unidades hidrológicas que por sus características geomorfológicas particulares y en sinergia con la ocurrencia de eventos de pluviosidad extrema y recurrencia excepcional, producen en sus componentes y por erosión severa alteraciones físicas localizadas o linealizadas, que modifican sustancialmente la estructura de disipación superficial. Son muy poco comunes y se los observa en zona de bardas.

Por ejemplo, en algunas circunstancias extremas, las aguas torrenciales alcanzan la montura de la suave frontera de la superficie tributaria. Si la conformación geológica presenta suelos susceptibles de ser erosionados, el torrente puede “cortar” tal divisoria, modificar su rumbo y alterar sensiblemente la estructura de la red de drenaje. Se han comprobado casos de “cambio” del destino final de las aguas del torrente. Tales “divisorias” son consideradas con “*debilidad hidrológica estructural*”. Dos ejemplos de ello se detallan en la tesis en PMP (Serra, 2003).

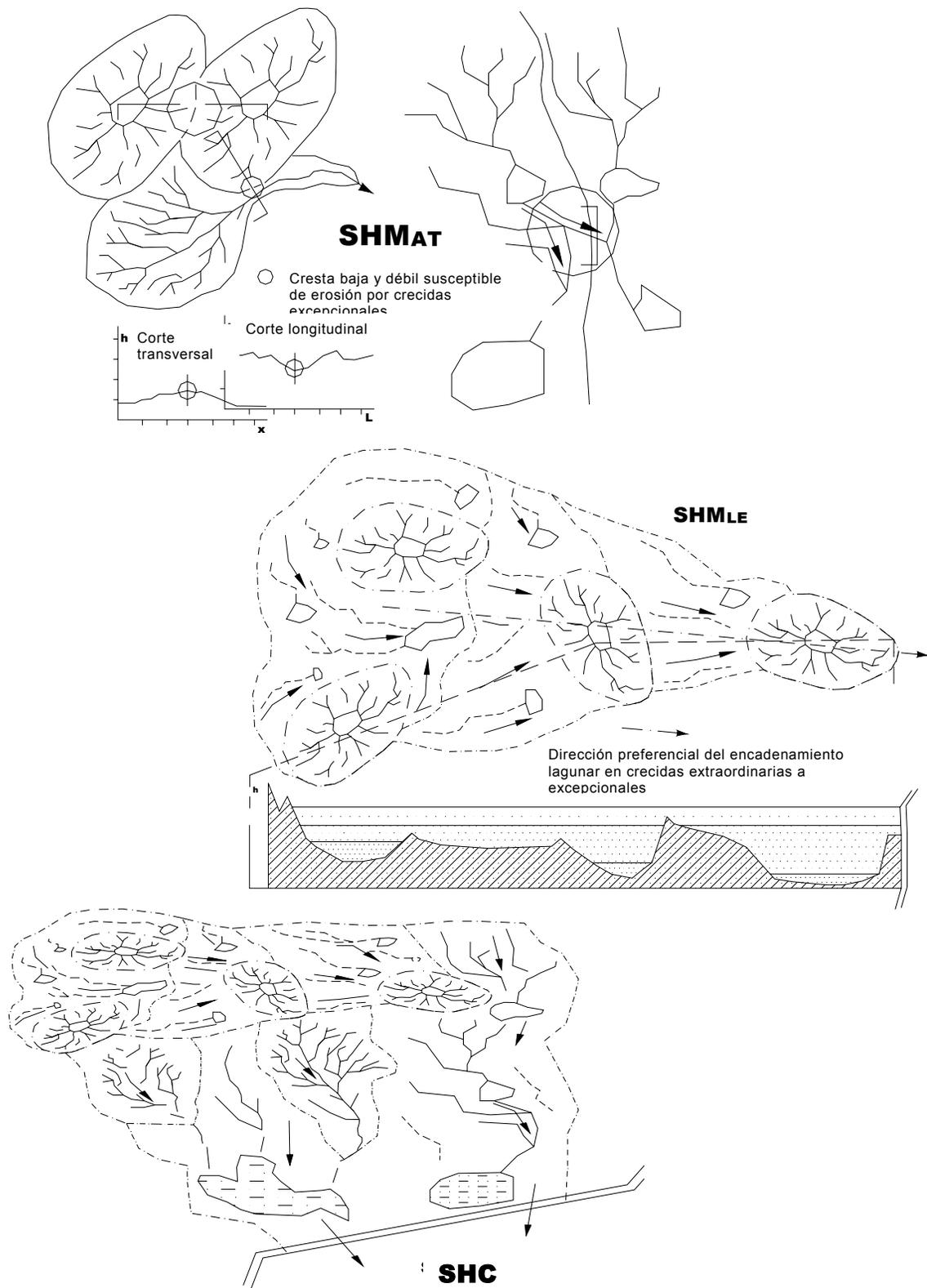


Fig. : 52. Esquemas de Sistema Hidrológico Mixto. Arriba: Subsistema Atípico ( $SHM_{AT}$ ); medio: Lagunar encadenado (LE); abajo: Sistema Hidrológico Complejo ( $SHC$ )

Los *sistemas hidrológicos complejos (SIC), o compuestos*, son un caso particular de sistemas mixtos, en los que un área hidrológica identifica una envolvente tributaria generalmente bien definida, pero en su interior se manifiesta la coexistencia de una combinación de subsistemas como los descriptos. La Fig. : 52 muestra estas configuraciones básicas.

Estos sistemas, son una característica muy común en mesetas, y explican la fenomenología torrencial de alternancia entre largos períodos en que los excedentes hídricos superficiales se resuelven en subsistemas cuasi cerrados y los cortos lapsos de torrencialidad excepcional, con “*encadenamientos*” lagunares y de pequeños cursos en una dirección estructuralmente condicionada por la geología regional. El tamaño, complejidad y combinación de componentes, sugieren considerarlos una categoría especial dentro de los sistemas torrenciales mixtos de meseta.

## 11.2. DESCRIPCIÓN FÍSICA

La tesis en PMP (Serra, 2003) describe las principales características físicas de las mesetas patagónicas, su topografía, geología y suelos, morfología, aspectos de infraestructura y socio-productivos, para desarrollar en base a ellos un análisis de las características mofo-hidrológicas de este paisaje.

La morfología de la meseta, tiene en general extensas superficies de suaves ondulaciones que combinan con esporádicos afloramientos rocosos de formas erráticas y quebradas. La erosión eólica es un agente erosivo muy importante en el tallado de las superficies. El modelado de estos agrestes paisajes que siguieron a la glaciación tiene por agentes erosivos que energizan su dinámica erosiva a ambos: *precipitaciones-vientos*. Aunque estos agentes se presentan en una combinación aleatoria, la intensidad y duración tienen una marcada distribución estacional.

Sus sistemas de drenajes son generalmente cursos temporarios, fuertemente erosionados, convergentes hacia lagunas temporarias, más o menos encadenadas y ordenadas jerárquicamente hacia sistemas cerrados, o cuasi-cerrados pero que descargan en años de extrema pluviosidad a sistemas de orden mayor.

La vegetación que prevalece es la estepa, con presencia de grandes superficies de suelos desnudos a causa de la salinización de las áreas más deprimidas o de la erosión eólica, hídrica o antrópica.

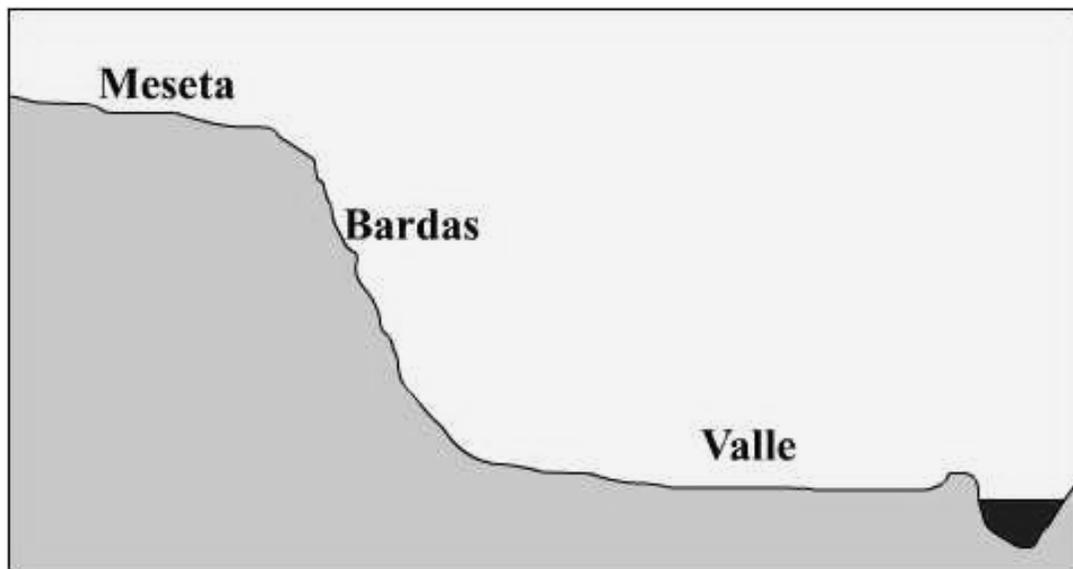
En la meseta, las suaves ondulaciones morfológicas, la mayor indefinición de sus contornos, o la movilidad de éstos por la susceptibilidad a ser erodado por la acción del agua y el viento, hacen que la dinámica hídrica superficial y su problemática se asemejen en algunos casos de llanura.

En los valles de ríos de meseta, confluyen los cañadones, normalmente sin aguas superficiales pero que ocasionalmente se transforman en grandes torrentes que drenan desde la meseta. Sus contornos naturales, generalmente bien definidos, son suficientes

para interpretar una envolvente de aportes de los excedentes hídricos hacia un punto de síntesis dado, tal lo explica la definición clásica de cuenca.

La zona de contacto *meseta-valle* presenta particularidades geomorfológicas y una dinámica hídrica que la distinguen del PM o de *valle fluvial* al caracterizar una unidad hidrológica. En la región del VIRCh su conformación tiene desniveles del orden de 20 a 50m en la zona intermedia y de hasta 200 metros en la alta meseta. La erosión hídrica talla los cañadones de pendientes escarpadas y drenajes bien estructurados, los que en ocasiones a su vez se ordenan en cuencas imbríferas torrenciales de sistemas de un orden mayor. (Fig. : 53).

Su red de drenaje tiene manifestaciones diversas y pueden coexistir estructuras de sistemas hidrológicos *Típicos*. Pero también se identifican sistemas o *subsistemas mixtos (SHM)*, cuyas características no responden en plenitud a una u otra de las dos configuraciones extremas del paisaje. En algunos casos se identifican subsistemas donde las características que lo definen son fuertemente dinámicas con alteraciones temporales erráticas de sus componentes o “*sistemas atípicos*”.



**Fig. : 53.** *Esquema de bardas, en la franja de contacto la meseta y el valle*

En la zona de estos estudios la geología regional costera se asienta en sedimentitas cenozoicas sobre las que descansan mantos sedimentarios de rodados patagónicos -conglomerados del pleistoceno-, en estratos que en ocasiones son de matriz arcillosa, o bien limo arenosa. También, de arenas, limos, arcillas de origen eólico, aluvial, coluvial, con predominancia de superficie de las arenas finas de voladuras. Estos estratos generalmente se apoyan en sustratos de sedimentitas más duras como limolitas, arcilitas, areniscas, hasta la roca firme impermeable (tobas). Meseta adentro, hacia el oeste, pueden verse en zonas de rocas volcánicas del terciario. Como en la región del Valle Medio del Río Chubut y la cuenca alta del Valle Inferior (*Área Aluvional Dique-*

*Boca Toma*), predominan los afloramientos volcánicos de pórfidos. En los valles de inundación y particularmente en el valle inferior, se encuentran suelos arenosos, limo-arenosos y limo-arcillosos, propios de planicies de inundación.

Con excepción de los estratos de gravas de matriz arcillosa, o los rocosos y tobáceos, los suelos en general están sometidos a procesos severos de erosión tanto hídrica como eólica y sujetos en consecuencia a procesos dinámicos de remoción, transporte y sedimentación permanente. Y en zonas de bardas, la potencia erosiva de los caudales torrenciales eroda los suelos más duros de las tobas y gravas arcillosas.

Estos y otros detalles se describen con mayor detalle en la tesis citada, basado en trabajos de caracterización geológica regional de Stampone et al. (1997) y Haller (1981).

Las retenciones por intercepción son reducidas y tiene poca escasa incidencia en la determinación del pico de la crecida. Ello, a excepción de mallines, orillas de cauces o en áreas bajo riego, donde la vegetación alóctona o comercial, forestaciones, montes de frutas y hortalizas, parquizaciones, etc., pueden ser importantes.

En la tesis en PMP (Serra, 2003) se describen, caracterizan y detallan parámetros de infiltración de suelos tipo para esta zona de estudios. Se agregan nueve ensayos realizados durante el verano de 2006, en la zona Trelew, del VIRCh. Las determinaciones se realizaron en el marco del estudio del “Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes de la ciudad de Trelew” (Serra et al, 2006), y se muestran en el Apéndice (Tabla Nro.: 26).

En la Fig. : 94 del Apéndice se muestra un gráfico de ubicación de los ensayos de infiltración, junto a una selección de ensayos de suelos (calicatas y perforaciones), y pozos freáticos, ejecutados durante el citado estudio, cuya información ha servido de apoyo a la caracterización y parametrización de modelos hidrológicos.

## **12. PROCESOS HIDROLÓGICOS Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS**

Las relaciones funcionales que *transforman* en espacio y tiempo al ciclo del agua en un sistema hidrológico, pueden analizarse separando los *procesos hidrológicos*, sea con el concepto clásico de *sistémico* (cantidad de materia constante), o como un *volumen de control* (volumen fijo y determinado).

Sea un volumen de control que surge de proyectar en vertical la divisoria de aguas, o la frontera tributaria en un SHT. Los límites superior e inferior son -por simplicidad- una proyección horizontal de la superficie de la cuenca. Este volumen de control puede ser subdividido en dos partes claramente identificadas: una porción de espacio superficial-atmosférica y una porción de espacio subterránea. Las variables de almacenamiento, entradas y salidas para la ecuación de continuidad, tienen las siguientes características:

- $S_{It}$  , Almacenamiento por Intercepción de lluvias o en la masa vegetal (transitorio);
- $S_A$  , Almacenamiento superficial (cuerpos de agua -lagos y lagunas; mallines, bañados y esteros; charcos-; y en flujos encauzados y mantiformes, permanentes o temporarios);
- $S_{ss}$  , Almacenamiento sub-superficial;
- $S_{st}$  Almacenamiento subterráneo, en acuíferos libres y confinados;

El flujo que ingresa ( $I_t$ ) al sistema a través de la superficie de control es principalmente por precipitación ( $dP/dt$ , para “P” expresada en unidades de volumen), y entendida por tal a toda forma atmosférica del agua que ingresa al sistema. Los otros flujos ingresantes a este sistema quedan expresados por:

- $I_{sf}$ , Flujo de ingresos superficiales (encauzados y mantiformes);
- $I_{ss}$ , Flujo de ingresos sub-superficiales;
- $I_{st}$ , Flujo de ingresos subterráneos;

El flujo saliente a través de la superficie de control ( $Q_s$ ), está determinado por la suma de todas las formas de flujo saliente y es una característica del proceso de transformación dentro del sistema. Generalmente, este flujo está principalmente determinado por escorrentías ( $Q_{E_s}$ ) es decir, por caudales superficiales de agua que “salen” del sistema. Pero también, componen el flujo saliente:

- $Q_{Ev}$  , Flujo de Evapotranspiración,
- $Q_{Fp}$  , Flujo de Infiltración profunda (percolación), hacia capas inferiores al plano o base del V.C.

En la tesis en PMP (Serra, 2003) se ha visto con mayor detalle este análisis comparativo, que permite clasificar y caracterizar cada una de estas variables según sea un SHT, SHNT, o SHM con sus variantes.

Las planillas de la Tabla Nro.: 20 y Tabla Nro.: 21 resumen estas características, que refuerzan el marco conceptual de esta tesis.

Sistema	UEH o Subsistema	Síntesis	Envolvente	Movilidad de la envolvente		Red Drenaje		
				Espacial	Temporal	Linealidad	Organización	Jerarquía
Sistemas Hidrológicos Básicos (Fertonani, (1978); Caamaño, et al,1979) :								
<b>Típico (SHT)</b>	---	Puntual de Continuidad	Sí	No	No	Si	Si	Si
<b>No Típico (SHNT)</b>	---	No Puntual o Areal discontinuo	No	---	---	No	No	No
Sistemas Mixtos y Complejos en Terrazas (Serra, 2003):								
<b>Mixto (SHM)</b>	Típico-No Típico (INT)	Puntual de Cuasi-Continuidad	Si	No	No	Si/No	Si/No	Si/No
	No Típico-Típico (NTT)	No Puntual o Areal discontinuo	No	---	---	No/Si	No/Si	No/Si
	Cuasi-Endorreico (CE)	Areal Unico	Si	No	Si ó No	Si	Si ó No	No
	Lagunar Encadenado (LE)	Areal Múltiple	Si ó No		Si	Si ó No	No	No
	Atípico (AT)	Temporal Indeterminado	---	Si	Si	Si ó No	Si ó No	No
<b>Complejos (SHC)</b>	---	Singular	Si	No ó Si	Si	Si ó No	No	No

*Tabla Nro.: 20. Clasificación de los Sistemas y Subsistemas Hidrológicos Mixtos. Características que los definen.*

SISTEMAS Y PROCESOS HIDROLÓGICOS, EN AMBIENTES TORRENCIALES PARA PAISAJES DE MESETA DE LA REGIÓN PATAGÓNICA (PMP)												
Cuadro comparativo de Flujos de Ingresos y Egresos y variaciones temporales de almacenamiento (*)												
Sistema	UEH o Subsistema	Flujos de Ingresos				Variaciones temporales de Almacenamiento (dS/dt)				Flujos de Egresos		
		Ip=(dP/dt)	I <sub>Sf</sub>	I <sub>Ss</sub>	I <sub>St</sub>	S <sub>It</sub>	S <sub>A</sub>	S <sub>Ss</sub>	S <sub>St</sub>	Q <sub>Es</sub>	Q <sub>Ev</sub>	Q <sub>Fp</sub>
Típico (SHT)	---	Si		x	x	X	X / XX	x	X	XXX	X	x / X
No Típico (SHNT)	---	Si	X / XX	x / X	x / X	X	XXX	X	X / XX	x / X	XXX	x / X
Mixto (SHM)	Típico-No Típico (TNT)	Si		x	x	X	X / XXX	x	X / XX	XX	XX	x / X
	No Típico-Típico (NTT)	Si	X / XX	x / X	x / X	X	XX / XXX	X	X / XX	X	XXX	x / X
	Cuasi-Endorreico (CE)	Si	x	x	x	X	XXX	X	XX	x	XX	x / X
	Lagunar Encadenado (LE)	Si	x	x	x	X	XXX	X	XX	X / XX	XX	x / X
	Atípico (AT)	Si	X / XX	x / X	x / X	X	X / XX	x	X	X / XXX	X	x / X
Complejos (SHC)	---	Si	/ XX	x / X	x / X	X	X / XXX	x / X	X / XX	x / XXX	X / XXX	x / X
<b>Referencias:</b>								<b>Ref:</b>				
Pp	Flujo de Precipitaciones (en todas su formas)							Nulo / no corresponde				
I <sub>Sf</sub>	Flujo de ingresos superficiales (encausados y mantiformes)							x				
I <sub>Ss</sub>	Flujo de ingresos sub-superficiales							X				
I <sub>St</sub>	Flujo de ingresos subterráneos							XX				
S <sub>It</sub>	Almacenamiento por Intercepción de lluvias o en la masa vegetal (transitorio)							XXX				
S <sub>A</sub>	Almacenamiento superficial (cuerpos de agua -lagos y lagunas; mallines, bañados y esteros; charcos-; y en flujos encausados y mantiformes, permanentes o temporarios)											
S <sub>Ss</sub>	Almacenamiento sub-superficial											
S <sub>St</sub>	Almacenamiento subterráneo, en acuíferos libres y confinados											
Q <sub>Es</sub>	Flujo por escorrentías superficial, subsuperficial, subterránea; encauzado o mantiforme											
Q <sub>Ev</sub>	Flujo de Evapotranspiración											
Q <sub>Fp</sub>	Flujo de Infiltración profunda (percolación), hacia capas inferiores al plano o base del V.C..											

Tabla Nro.: 21. *Sistemas y procesos hidrológicos de ambientes torrenciales en paisaje de meseta, en la región patagónica (PMP)*

### 13. ANÁLISIS DE CASOS. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

En el Capítulo III se desarrollan y verifican los dos modelos de simulación hidrológica propuestos en el primer objetivo específico, con un detalle de las referencias técnicas que utiliza cada proceso y subproceso. En este Capítulo se analizan dos casos con estos modelos, apoyados con otras aplicaciones. En el primer caso se analiza las respuestas hidrológicas de un SHM en PM para tormentas de distintas duraciones y recurrencias. En el segundo caso se analizan y comparan resultados con un SHT en PM.

#### 13.1. CASO 1: TRELEW, CAÑADÓN DEL PARQUE INDUSTRIAL DE TRELEW, LAGUNA CHIQUICHANO (SHM)

##### 13.1.1. Ubicación

Para el análisis que sigue se considera un área o “ventana” rectangular, que comprende al Cañadón del Parque Industrial de Trelew, Calle Canal, Laguna Chiquichano, y áreas aledañas (VIRCH-Trelew), limitada por las siguientes coordenadas latitud (Sur)/longitud (Oeste), expresadas en grados. Esquina NO: 43.1802770, 65.5327230, Esquina SE: 43.2902330, 65.2403400.

##### 13.1.2. Descripción física del área

Comprende al área urbana de Trelew, y el área de influencia aluvional convergente al Parque Industrial de Trelew (PIT), al Norte y Oeste de la ciudad. (Fig. : 54)



*Fig. : 54. Vista de Imagen Google Earth para la región del Valle Inferior del Río Chubut, Área de Trelew, (Ventana del Caso 1)*

Para esta ventana de trabajo se ha obtenido el MDT del sitio en Internet de SRTM-NASA, con una resolución de 3" de arco (aproximadamente 90m de valor nominal). La resolución espacial resulta aproximadamente de 92,8m en dirección meridiana y 67,5m en dirección de paralelos. Las características técnicas del MDT, sistema de coordenadas, plano de cotas de referencia y detalles de SRTM se exponen en 9.4.

Al Sur de la ventana se observa el tramo inferior del Río Chubut, el valle de inundación; al SE puede apreciarse una parte de la planicie fluvio-marítima que conforma el sistema de lagunas entre las ciudades de Trelew y Rawson.

Al NO se desarrolla la meseta (a cotas máximas de 160m), con declinación estructural en dirección al Este (Mar). Puede observarse una primer franja de bardas que se desarrolla con rumbo SSO-NNE, y que delimita físicamente un nivel menor de aterramiento, denominado "Terraza (o Meseta) Intermedia" (cotas de 30 a 100m).

Los suelos superficiales en la terraza son arcillosos, de escasa potencia, desarrollados por acción erosiva de vientos y del agua. Debajo, un estrato inferior que varía de 1 a 2m compuesto de gravas con matriz arcillosa (conocidas como "rodados patagónicos") generalmente plásticos e impermeables aunque con cierta variabilidad. Por debajo, se ubican mantos potentes de tobas, altamente impermeables.

En ensayos de suelos (Tabla Nro.: 26 y Fig. : 94) efectuados al norte del Cañadón del Parque Industrial (Moreno, 2006, en Serra et al., 2006), el perfil encontrado corresponde a la conformación típica de la zona de meseta baja. Se aprecian materiales de grano fino predominante en estado denso en la parte superior de la excavación.

Se observa un suelo de grano fino con clastos dispersos en su matriz en el manto superior del perfil explorado. Se trata de un suelo consistente, de color marrón claro, con características cohesivas, material que se emplaza entre el plano del terreno natural y 0,60 m. de profundidad. Este material identifica como Arena Arcillosa (SC) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Subyace un estrato de suelo de grano grueso de color marrón claro, conformado por una estructura granular fina acompañada de una matriz fina cohesiva con alta compacidad. Este material se emplaza entre 0,60 m. y 1,30 m. de profundidad y se identifica como Grava Arcillosa (GC) en el SUCS.

Debajo de esta formación y hasta el final de la exploración ubicada a una profundidad de 2,00 m. se encuentra un material granular, típica formación de cantera, con apreciable compacidad. Este material identifica como Grava Limosa pobremente Graduada (GP - GM) en el SUCS.

En la zona central de la ventana, de Oeste a Este, se desarrolla una segunda franja de bardas de elevaciones variables entre 8 y 30m que separan la terraza intermedia del valle del Río. En el centro de la figura y sobre estas bardas, se desarrolla el denominado "Cañadón del Parque Industrial" de Trelew, (PIT), el cual drena a través de populosos

barrios urbanos hacia la Laguna Chiquichano, y ésta, hacia el sistema de lagunas. La ciudad ocupa parte de bardas y parte del valle propiamente dicho.

### **13.1.3. Suelos y vegetación. Intercepción e infiltración.**

El contraste meseta-valle es muy marcado. En el valle, hay vegetación arbórea (cortinas de salicáceas, especies ornamentales), con mayor densidad en orillas del río. En todo el valle inferior se desarrollan áreas bajo riego, en parcelas de dimensiones variables entre 4 y 100 has.

Las chacras menores se dedican a producción intensiva de productos como frutas finas, huerta, manzanas, frutas secas, o destinadas a esparcimiento. En parcelas mayores se destina a producción de forrajes y ganadería bovina u ovina.

En la región, la vegetación en la zona de mesetas es de estepa, con densidad de plantas media, a reducida. La intercepción durante una tormenta se asume en el orden de 3 a 8 mm (Serra, 2003).

En la descripción física del área de estudios se han citado mediciones recientes de campo en la determinación de parámetros de infiltración (Tabla Nro.: 26 y Fig. : 94), que suman a la información existente publicada en trabajos anteriores.

En el capítulo referido a la información de apoyo, en la presentación del problema, y más detalladamente en la tesis en PMP (Serra, 2003), se amplía la información del medio físico de este caso.

### **13.1.4. Análisis del caso con MHIG-SIG**

#### ***a. Selección de tormentas***

Del estudio e precipitaciones para la zona del VIRCh (Chachero, 1998 en Serra et al., 1998) se seleccionaron 7 tormentas sintéticas diferentes, en magnitud creciente, de duraciones variables entre 60' y 720' y retornos entre 5 y 100 años. Se agrega el caso de la máxima tormenta registrada (Abril 1998), de duración  $D=3.780\text{min}$ , lluvia total  $P=230,1\text{mm}$  ( $P_n=187,0\text{mm}$  para  $CN=86$ ). Para cada tormenta, se dedujeron las abstracciones según el método del SCS (1971) modificado, descrito en 8.7.3. y en 9.3.4. máxima citada.

#### ***b. Determinación de excesos (Lluvia Neta)***

A partir de una selección de tormentas sintéticas (Tabla Nro.: 22) obtenidas de las curvas PDR determinadas para la región del VIRCh, (Fig. : 6), se estiman los valores equivalentes de *Precipitación Neta*, resultantes de aplicar el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USACE, 2000), modificado, resultando los valores que se muestran en la Tabla Nro.: 23 (resaltadas en negrita, las tormentas tipo seleccionadas para esta comparación).

Pn (Excesos) [mm]	D[min]	R [años]	Tipo
1,9	60	5	Sintética
7,3	120	10	Sintética
7,3	60	20	Sintética
16,6	180	20	Sintética
45,8	360	40	Sintética
71,4	720	50	Sintética
124,6	1080	100	Sintética
187,0	3780	150	Real, Abril de 1998

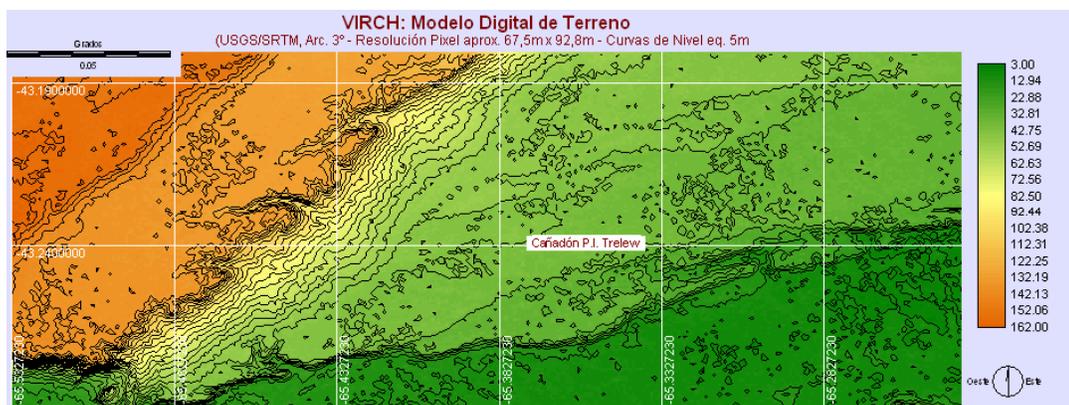
*Tabla Nro.: 22. MHIG, Selección de tormentas (PDR) para el análisis de casos en el VIRCh: Lluvias Netas.*

Precipitación Máxima en el período, Neta de Abstracciones: Método SCS-US										
Precipitación Neta máxima en el período [mm]										
R/D	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440
2				0.2	0.7	1.1	2.3	3.6	4.1	4.2
5		0.2	0.6	1.9	3.5	4.5	7.9	11.9	13.6	14.0
10	0.1	0.9	1.6	4.1	7.3	9.2	15.6	22.5	25.7	26.5
20	0.4	2.1	3.0	7.3	13.4	16.6	27.6	38.5	44.0	45.3
25	0.6	2.6	3.6	8.6	15.9	19.8	32.7	45.1	51.6	53.2
40	1.0	3.7	5.1	11.6	22.4	27.8	45.8	61.9	70.9	73.1
50	1.3	4.4	5.9	13.3	26.1	32.5	53.3	71.4	81.7	84.4
100	2.4	6.9	8.9	19.5	40.6	50.8	83.0	108.9	124.6	129.0
200	3.8	10.2	12.6	27.4	60.7	76.8	125.4	161.5	184.8	191.9
1000	9.1	21.6	25.1	53.7	138.8	181.3	300.9	374.9	430.7	450.3

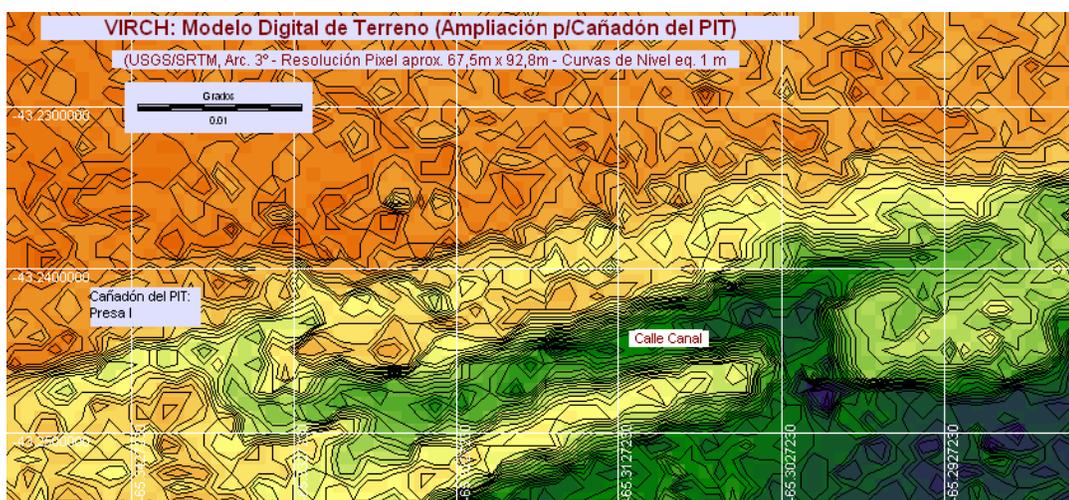
*Tabla Nro.: 23. VIRCh: Precipitación Neta Máxima, en el período; método del Nro. de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-USACE)*

### 13.1.5. Ajuste de parámetros del modelo

Para el área indicada y para los parámetros establecidos se efectuaron corridas previas de consistencia de resultados. El análisis con este modelo no tiene por objeto establecer valores absolutos de crecidas, sino los espacios de inundación relativos para cada tormenta y órdenes de magnitud de los máximos. En consecuencia, y siendo que no se disponen de estaciones de aforos en el área, la calibración del modelo se basa en la búsqueda de consistencia en sectores de control y ajuste de magnitudes de sus parámetros. Por caso, una sección transversal al “Cañadón del PIT”, donde se conocen magnitudes de la crecida de referencia (Abril de 1998). La ventana ocupa 132 filas x 351 columnas, el paso de cálculo elegido fue de 0,33 minutos, con resolución de píxel de 67,5m x 92,8m.



*Fig. : 55. Vista del Modelo Digital de Terreno, área del Caso 1 (VIRCh-Trelew)*



*Fig. : 56. Vista ampliada del Modelo Digital de Terreno para Cañadón del Parque Industrial de Trelew*

### 13.1.6. Resultados de Simulación con MHIG-SIG

Las Fig. : 55 y Fig. : 56 muestran el MDT para el caso que se presenta.

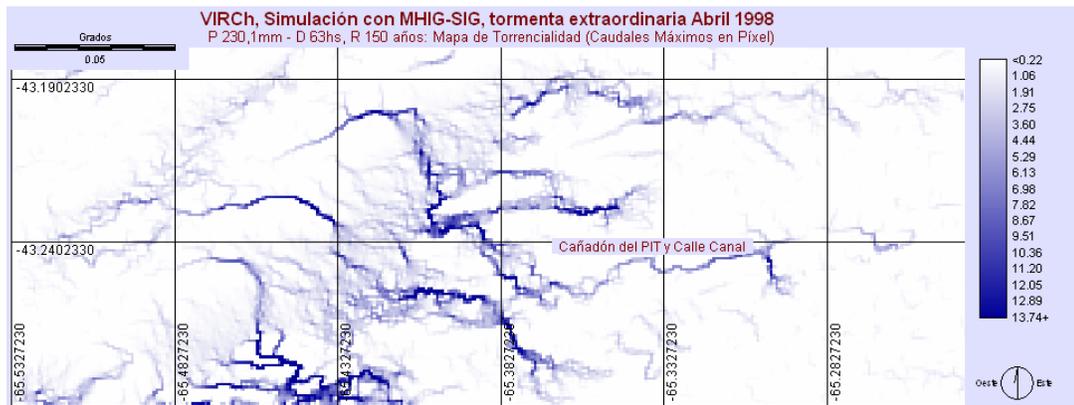
La Tabla Nro.: 24 muestra un resumen de resultados de caudales máximos obtenidos todo el área para cada tormenta.

P netas mm	D min	R años	Qmáx Píxel m3/s
187,0	3780	150	56.73
124.6	1080	100	23.30
129	1440	100	18.12
71.4	720	50	19.48
45.8	360	40	24.67
16.6	180	20	8.65
7.3	60	20	4.16
7.3	120	10	2.08

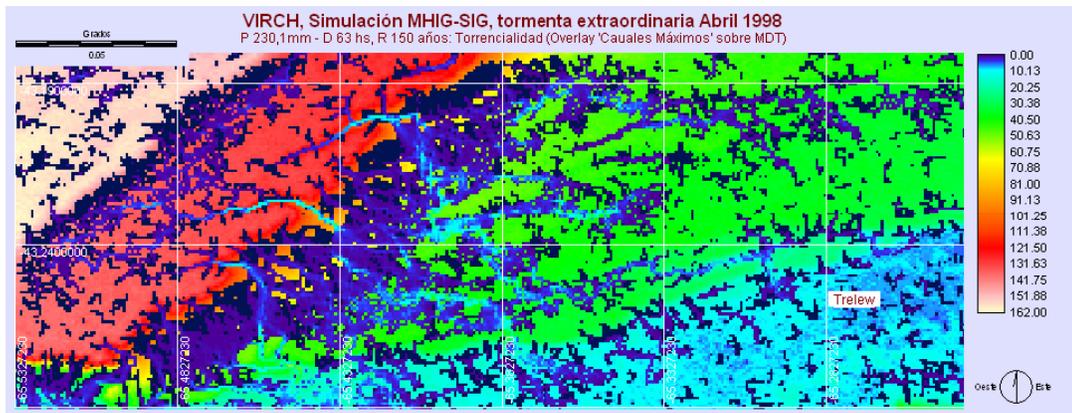
*Tabla Nro.: 24. MHIG, Caso 1 (Virch-Trelew). Resumen resultados, caudal máximo estimado en píxel, para la tormenta. Método: Cascada.*

La Fig. : 57 muestra la gráfica resultante de caudales máximos por píxel, obtenida de la simulación de la tormenta extraordinaria de referencia (Abril de 1998). Obsérvese la correcta demarcación de los “cañadones” de bardas entre la terraza y la meseta intermedia. Al centro y a la derecha de la figura, se delinea el cañadón del Parque Industrial y Calle Canal de Trelew.

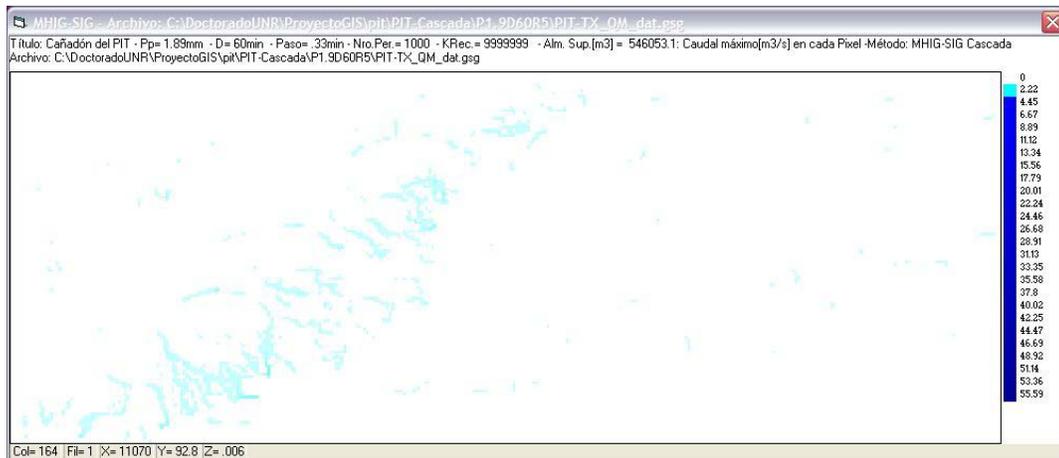
La Fig. : 58 muestra una imagen similar a la anterior, superpuesta (Overlay) sobre el MDT. La diferencia de coloración de la imagen permite ver la coincidencia de las líneas de concentración de mayor flujo con los cañadones en zona de bardas.



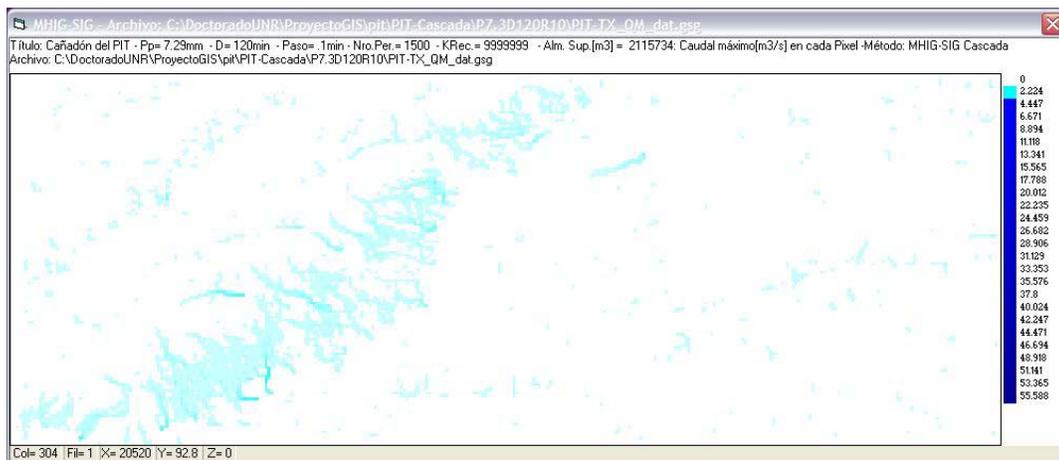
**Fig. : 57. Caso 1 (VIRCh-Trelew): Resultados simulación MHIG SIG, tormenta extraordinaria de Abril 1998, (P230,1mm, D 63 hs., R 150 años)**



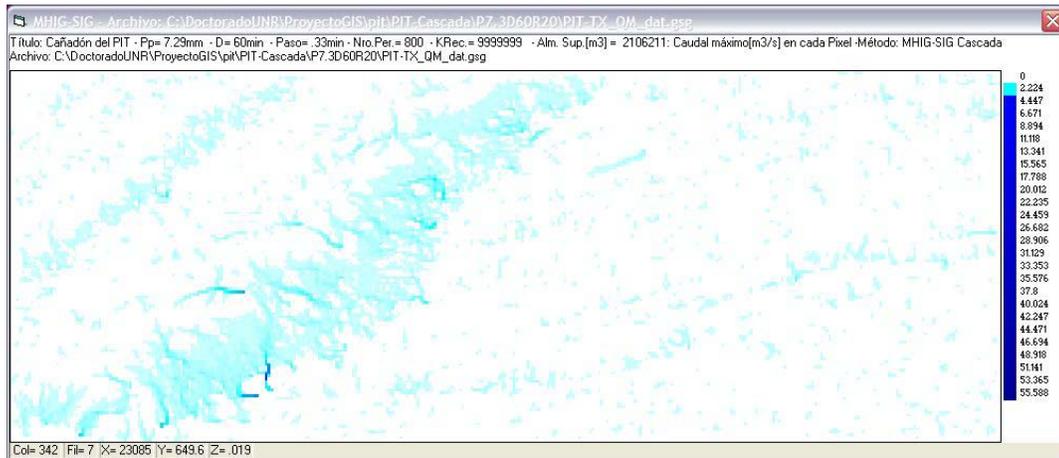
**Fig. : 58. Caso 1 (VIRCh-Trelew): Vista de imagen de resultados simulación MHIG-SIG, tormenta extraordinaria de Abril 1998, (P 230,1mm, D 63 hs., R 150 años), superpuesta sobre imagen de MDT.**



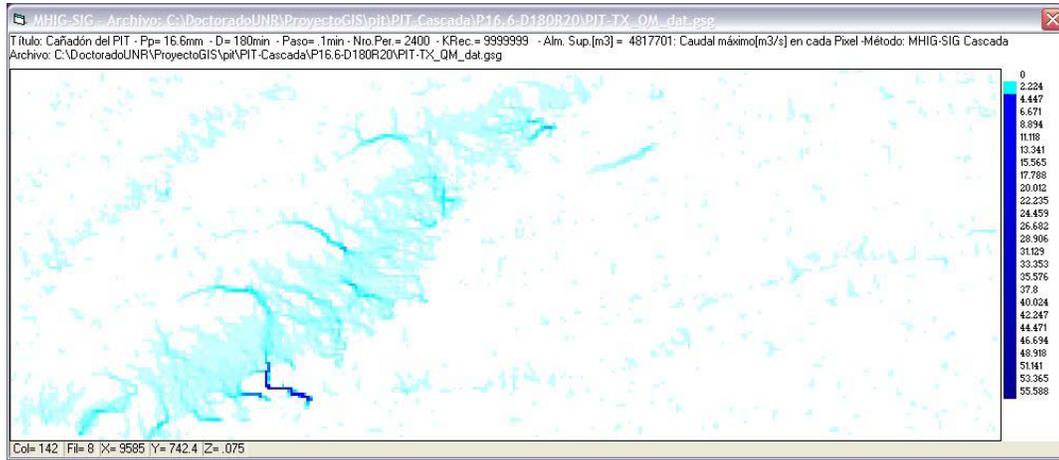
**Fig. : 59.** Tormenta: P 1,9 mm, D 69min., R 5 años. Resultados de Caudal Máximo



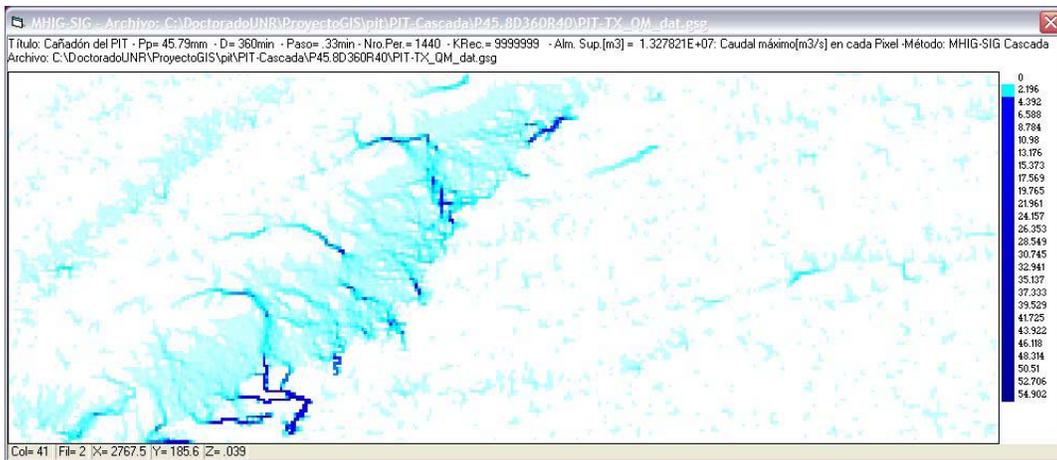
**Fig. : 60.** Tormenta: P 7,3 mm, D 120 min., R 10 años. Resultados de Caudal Máximo



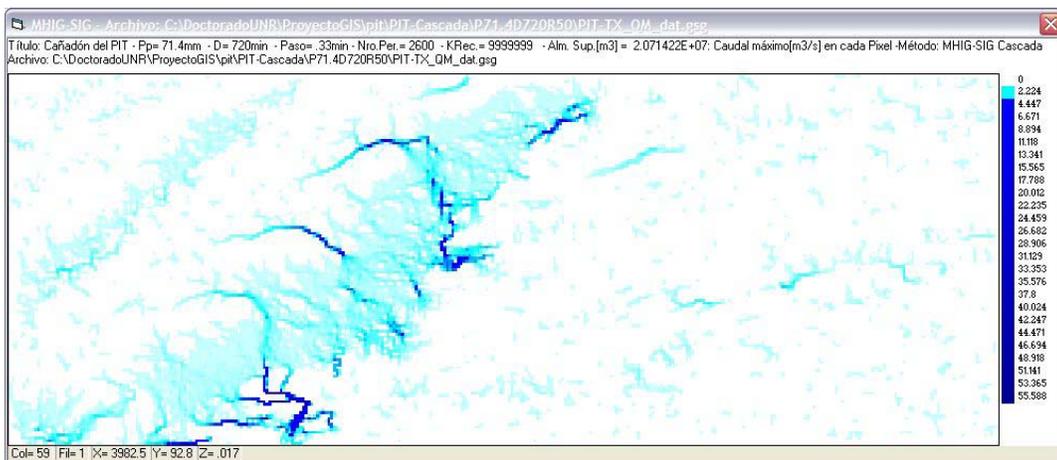
**Fig. : 61.** Tormenta: P 7,3 mm, D 60 min., R 20 años. Resultados de Caudal Máximo



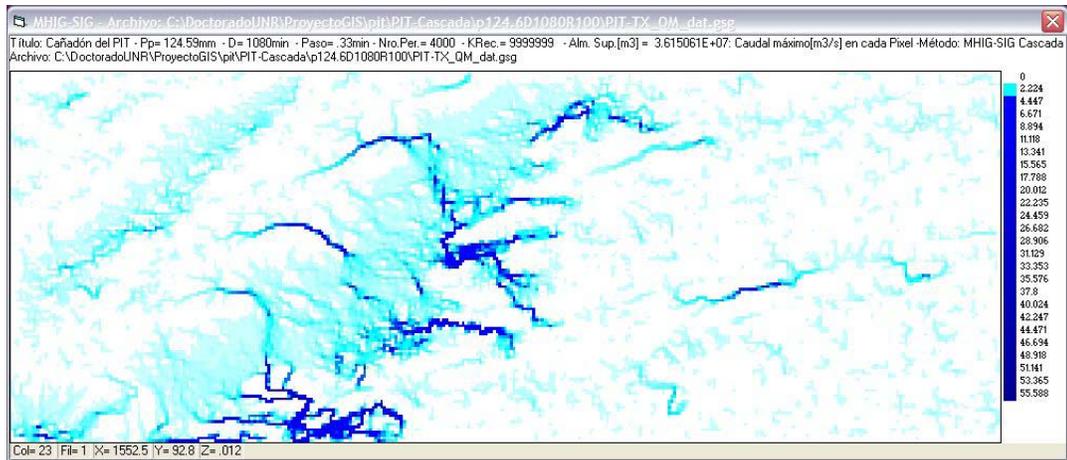
**Fig. : 62.** Tormenta: P 16,6 mm, D 180 min., R 20 años. Resultados de Caudal Máximo



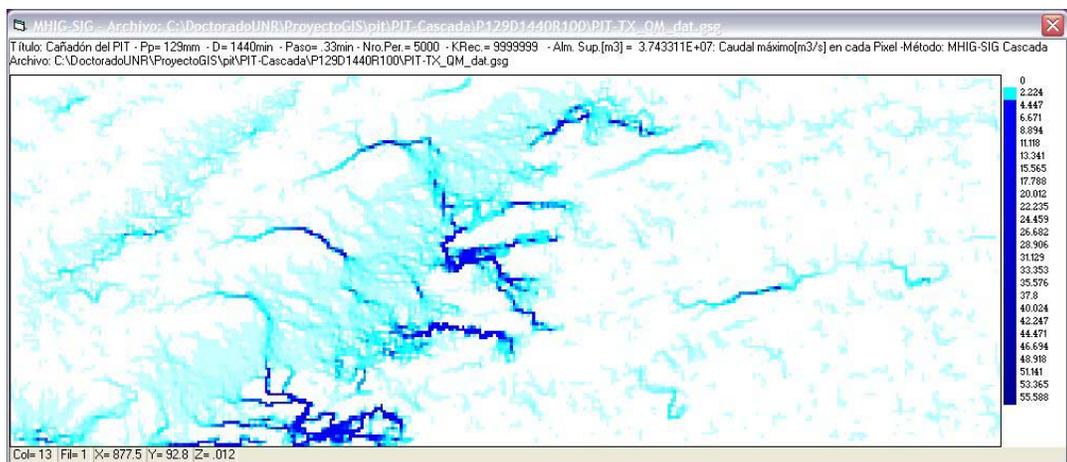
**Fig. : 63.** Tormenta: P 45,8 mm, D 360 min., R 40 años. Resultados de Caudal Máximo



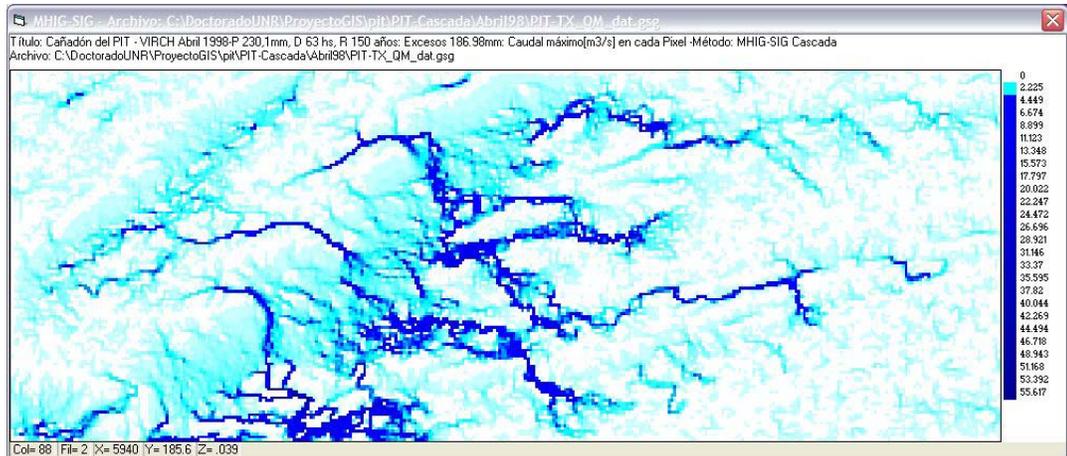
**Fig. : 64.** Tormenta: P 71,4 mm, D 720 min., R 50 años. Resultados de Caudal Máximo



**Fig. : 65.** *Tormenta: P 124,6 mm, D 1080 min., R 100 años. Resultados de Caudal Máximo*

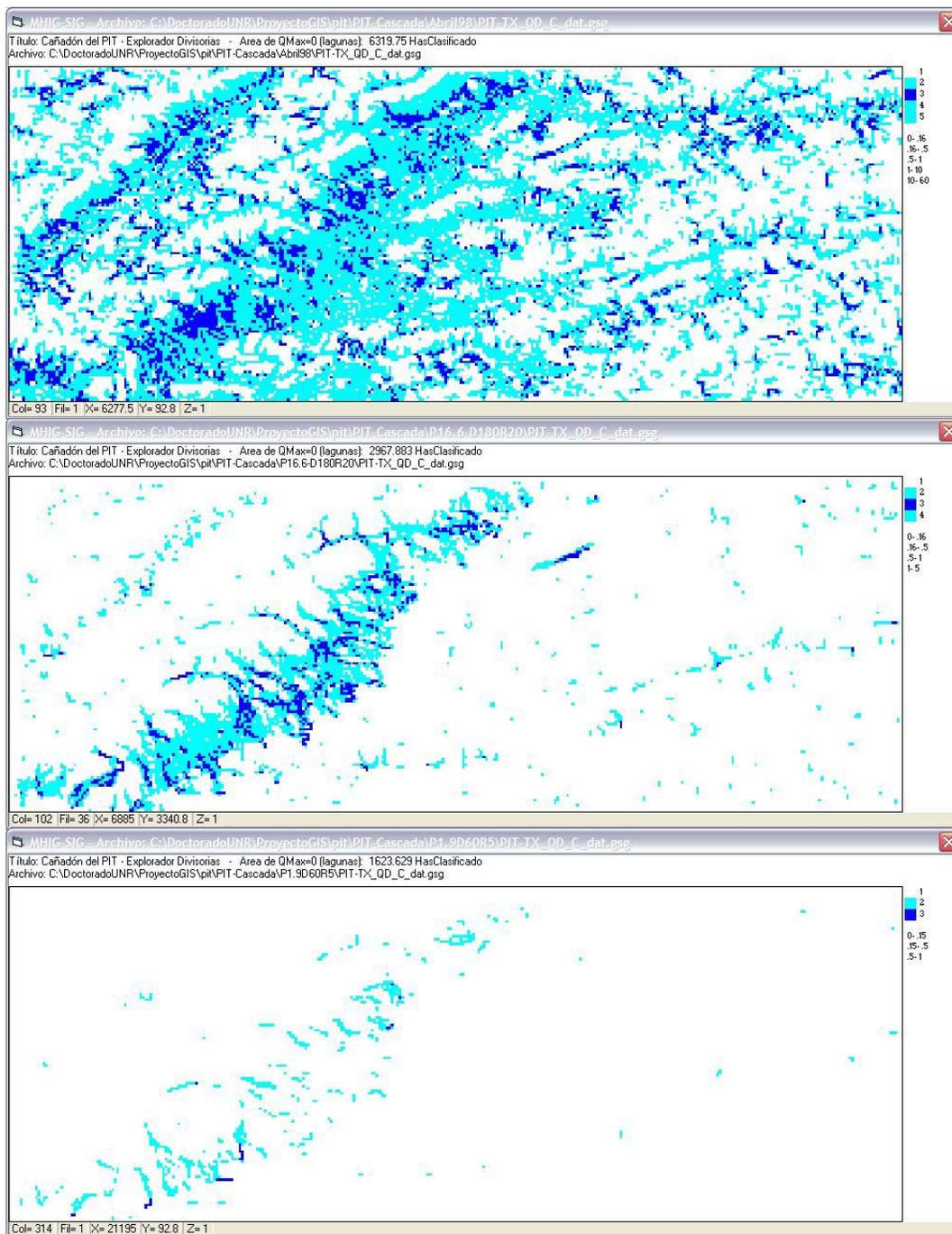


**Fig. : 66.** *Tormenta: P 129 mm, D 1440 min., R 100 años. Resultados de Caudal Máximo*



**Fig. : 67.** *Tormenta: P 230,1 mm, D 3780 min., R 150 años. Resultados de Caudal Máximo*

Las Fig. : 59 a Fig. : 67, muestran resultados de caudales máximos en píxel para tormentas de duración y recurrencia crecientes. En blanco, áreas con actividad hídrica superficial muy reducida, donde se definen las fronteras tributarias.



**Fig. : 68.** Análisis con MHIG-SIG: Áreas de mayor (color) y menor (blanco) dinámica hídrica superficial, para tres tormentas seleccionadas: a) Arriba: Abril 1998 (R 150años), b) Medio: D 180min, R 20; c) Abajo: D 60min, R 5 años.

En la Fig. : 68, las áreas en blanco representan las celdas de menor dinámica hídrica superficial, para tres tormentas seleccionadas, de R 150, 20 y 5 años respectivamente. Las celdas de color representan áreas con actividad hídrica superficial, en manto o encauzada. En la figura inferior, el flujo encauzado es prácticamente limitado a la zona de bardas, el flujo se resume en los primeros bajos sin drenar hacia el Este. En la figura

del medio, aparecen formas de flujo encauzado, sin que los mismos se integren mayormente. En la figura superior, una gran proporción de celdas muestra flujo encauzado y flujos encadenados desde una depresión hacia otra, siguiendo la dirección estructural Oeste-Este. La asociación en las figuras entre área tributaria de aportes y la magnitud de la tormenta es directa.

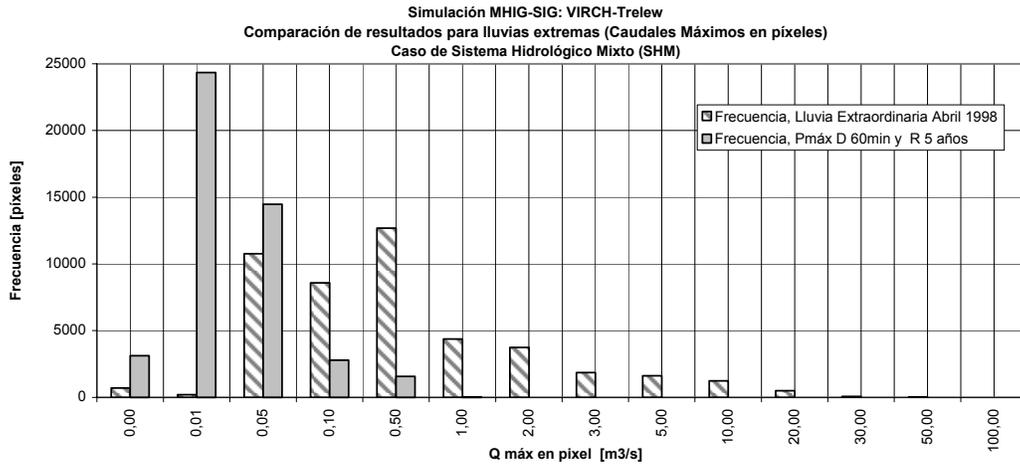


Fig. : 69. *MHIG-SIG: Caso 1, VIRCh-Trelew, polígono de frecuencias de caudales máximos, Tormentas de Abril 1998 (R 150años) y D 60min, R 5 años*

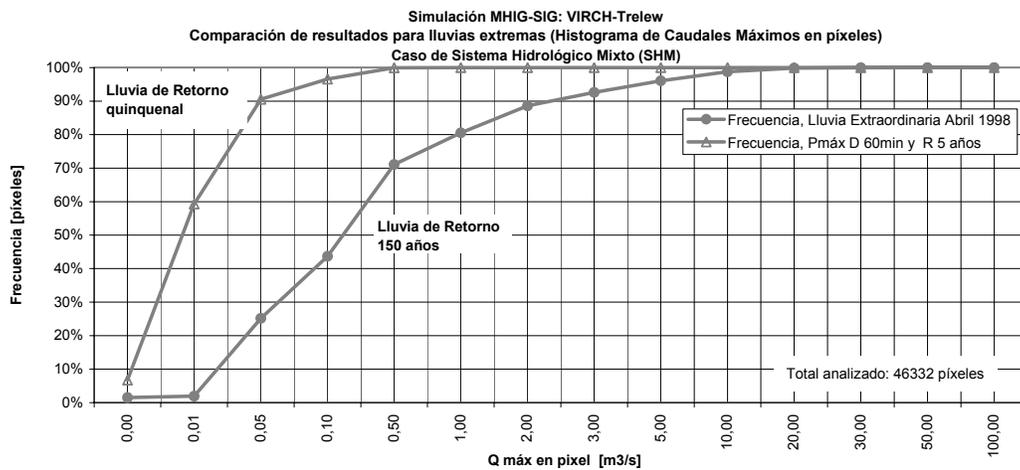
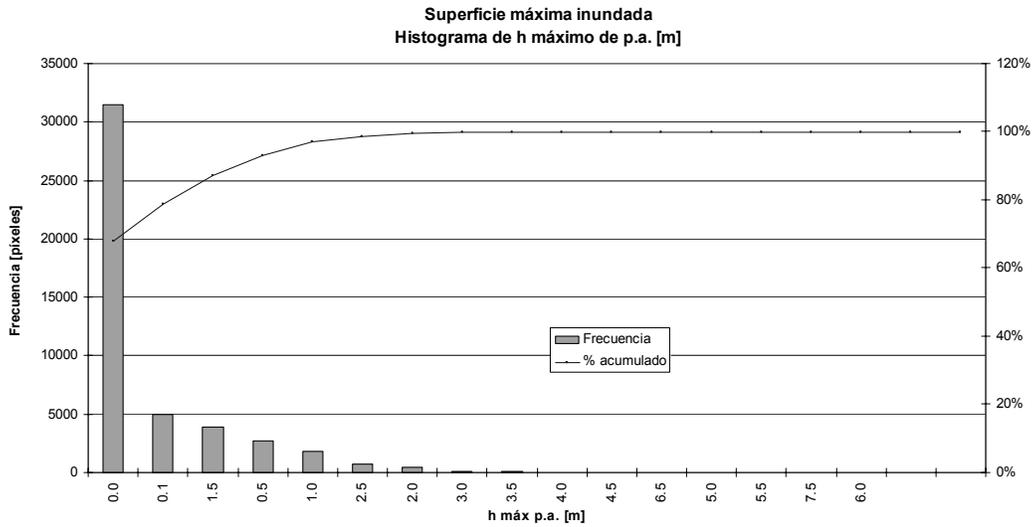


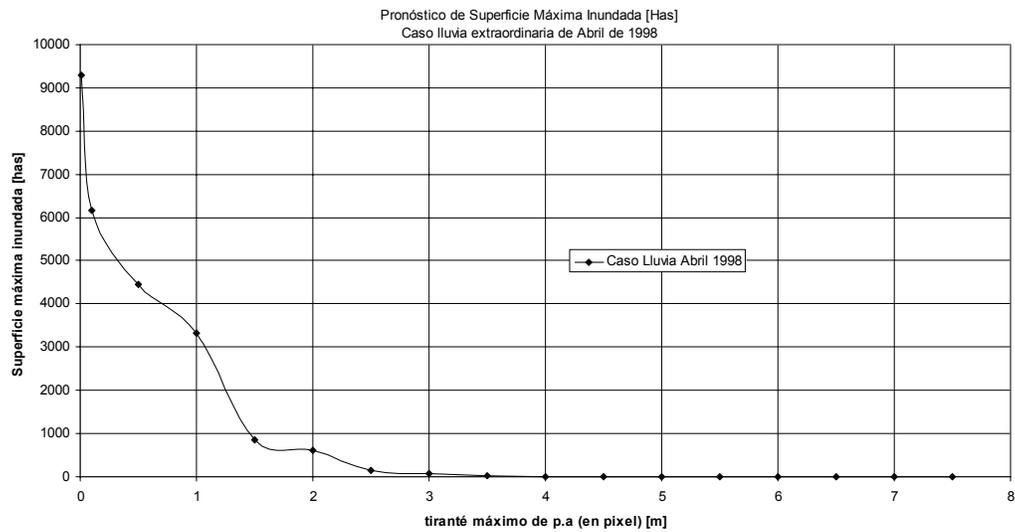
Fig. : 70. *MHIG-SIG, Caso 1, VIRCh-Trelew, histograma de frecuencias acumuladas de caudales máximos en píxel, Tormenta Abril 1998 (R 150años) y Tormenta D 60min, R 5 años*

En la Fig. : 69 y Fig. : 70 se muestra el polígono de frecuencias e histograma de frecuencias acumuladas de caudales máximos en píxeles obtenidos con MHIG-SIG, para la tormenta de Abril de 1998.

En la Fig. : 71 y Fig. : 72, el polígono de frecuencias y las frecuencias acumuladas de los niveles máximos de agua alcanzados, para la tormenta de referencia (Abril de 1998).



**Fig. : 71.** *MHIG-SIG, aplicación al Caso 1 (VIRCh-Trelew), Ej. de polígono de frecuencias e histograma de frecuencias acumuladas de alturas máximas de agua en píxeles. Escenario: Lluvia Abril de 1998.*



**Fig. : 72.** *MHIG-SIG, aplicación al Caso 1 (VIRCh-Trelew), Ej. de pronóstico de superficie máxima inundada. Escenario: Lluvia Abril de 1998.*

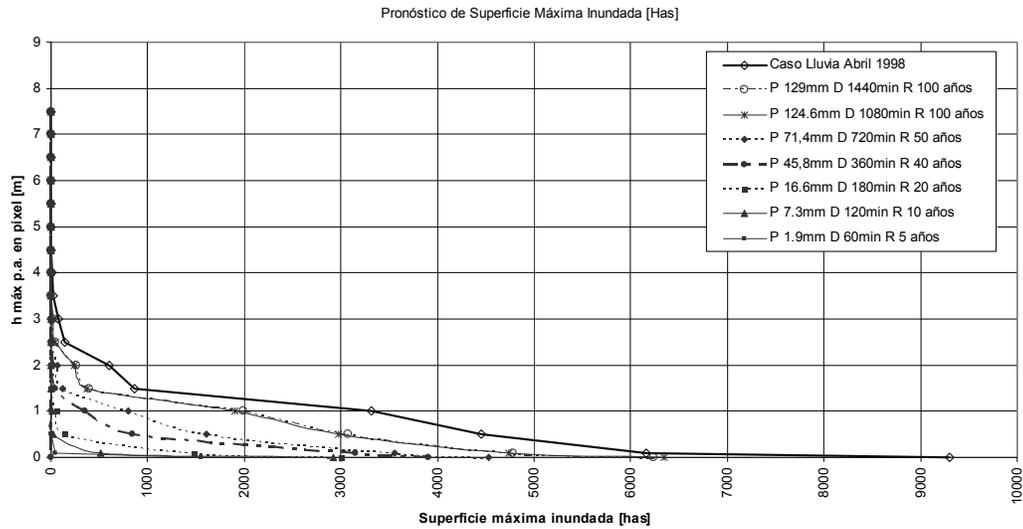


Fig. : 73. *MHIG-SIG, aplicación al Caso 1 (VIRCh-Trelew), pronóstico de superficie máxima inundada para una selección de tormentas de diferente duración y recurrencia.*

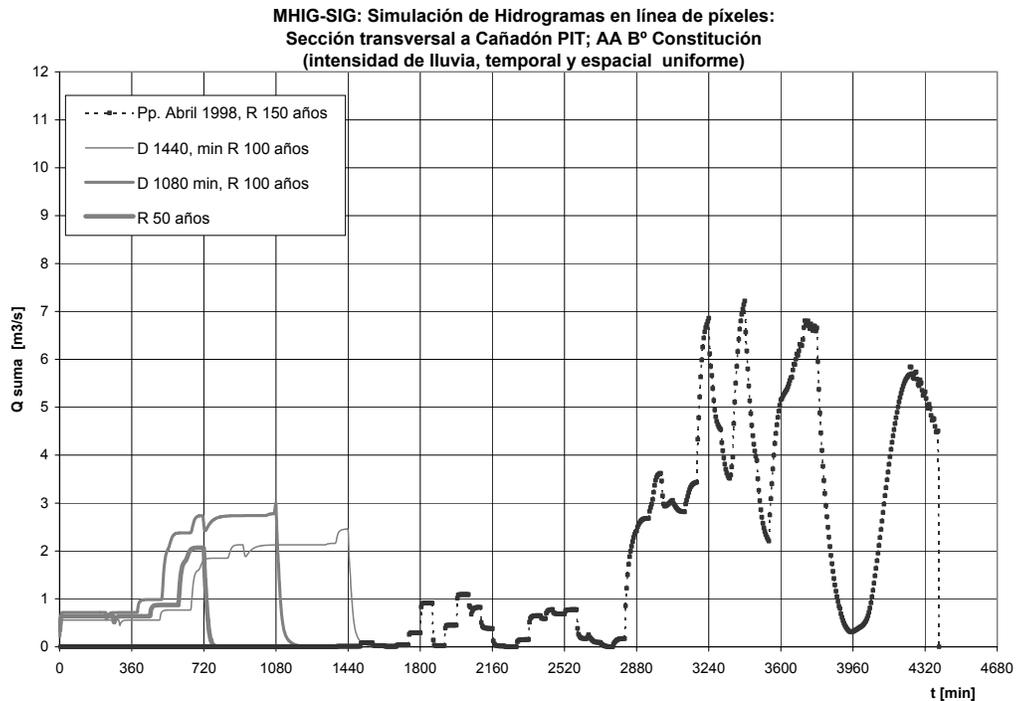
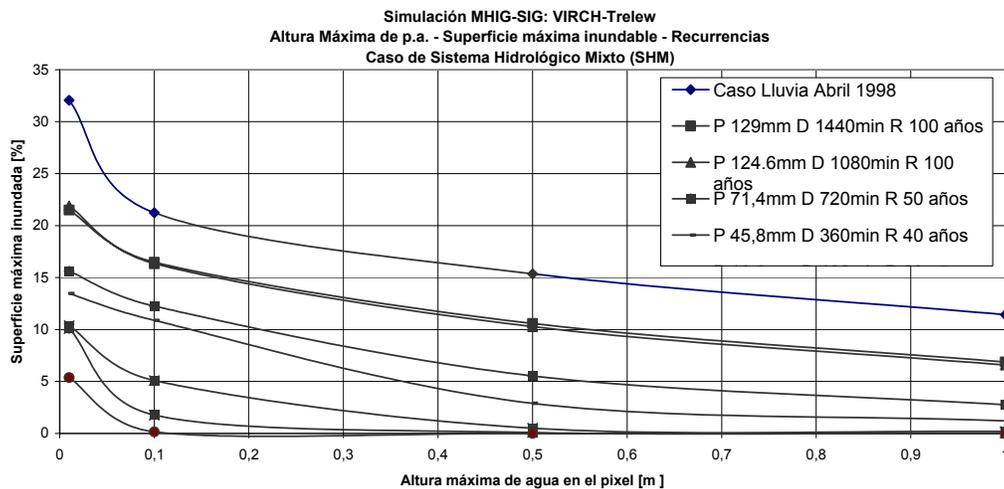
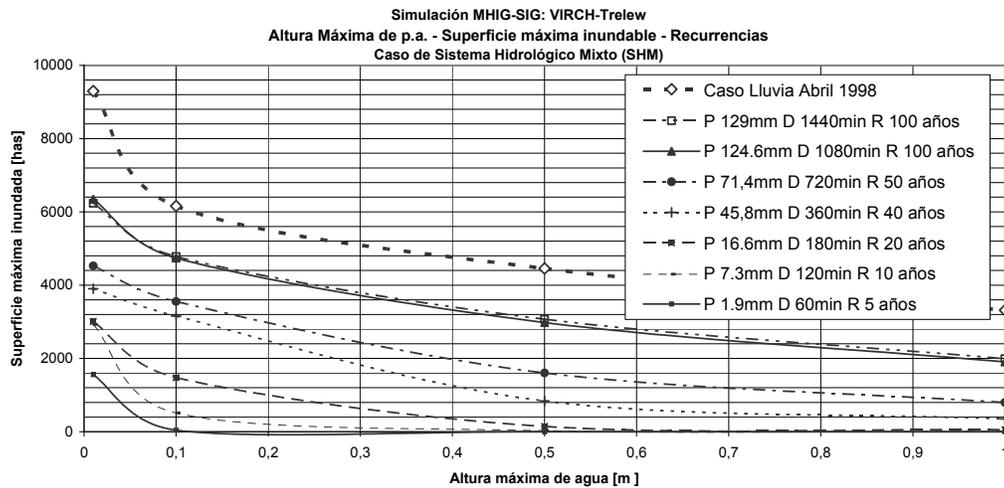


Fig. : 74. *MHIG-SIG, Caso 1, VIRCh-Trelew, Hidrogramas para distintas tormentas en una misma selección de píxeles, transversales al cañadón del Parque Industrial de Trelew, zona AA de B° Constitución.*

La Fig. : 73 representa las relaciones de la elevación media máxima de agua en píxeles con la superficie total inundada en el área. La Fig. : 74 muestra la gráfica de caudales máximos en un grupo seleccionado de píxeles (sección transversal en cañadón Parque Industrial de Trelew), para distintas tormentas.

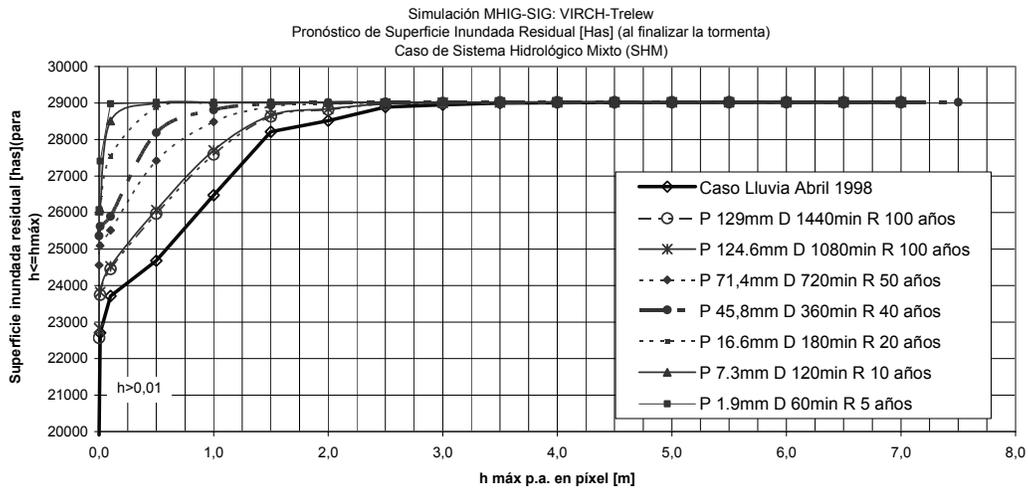


**Fig. : 75.** *MHIG-SIG, Caso 1, VIRCh-Trelew, Relaciones Superficie Máxima Inundada y Altura Media Máxima de agua en píxeles, para tormentas de diferente duración y recurrencia. Arriba: en valores absolutos [has], Abajo: valores relativos [%]*

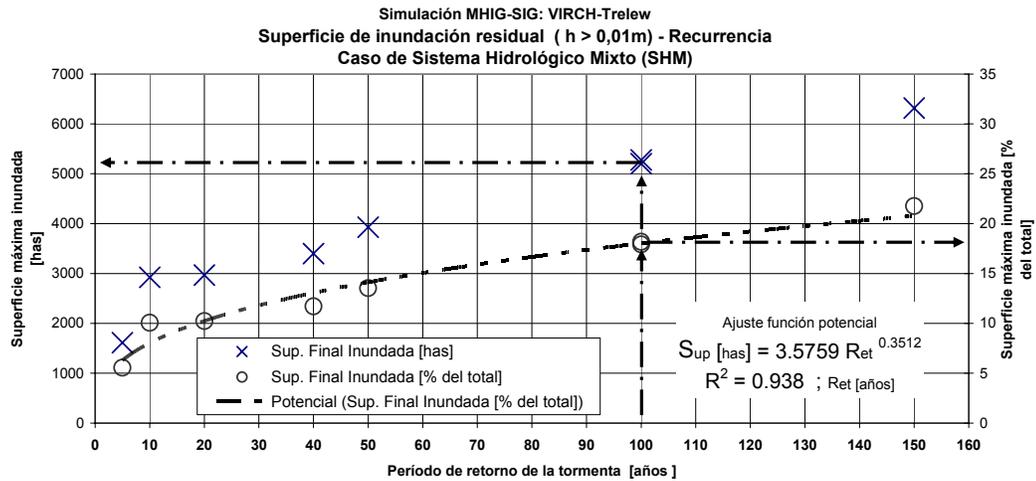
La Fig. : 75 muestra dos ábacos que relacionan la superficie máxima inundable en función de la elevación media máxima de agua en píxeles, en valores absolutos y en valores relativos (porcentuales).

Como criterio comparativo, se asume una celda con “inundación residual” cuando al finalizar la “corrida” de simulación de la tormenta la altura media de agua es mayor a 0,01m. Un parámetro de inundación residual resulta del conteo de celdas con “inundación residual”. La Fig. : 76 relaciona la elevación media y la superficie inundada residual para una selección de tormentas.

La Fig. : 77 resume los valores obtenidos de superficie máxima inundable en función del período de retorno de la tormenta. La gráfica, muestra valores absolutos y relativos o porcentuales, y el ajuste teórico obtenido para una función de tipo potencial.



**Fig. : 76.** *MHIG-SIG, Caso 1, VIRCh-Trelew, Superficie Inundada Residual ( $0,01m > h > h_{m\acute{a}x}$ ) y Altura Media Máxima de agua, luego de la tormenta, para una selección de tormentas de diferente duración y recurrencia*



**Fig. : 77.** *MHIG-SIG, aplicación al Caso 1 (VIRCh-Trelew), Relación entre superficie inundada residual y el periódo de retorno, para una selección de tormentas de diferente duración y recurrencia*

## **13.2. CASO 2: PUERTO MADRYN, CUENCO ALUVIONAL N° 2 (SHT)**

### **13.2.1. Ubicación**

Para el análisis que sigue, se considera un área o “ventana” rectangular, que comprende al Cuenco Aluvional N° 2 de Puerto Madryn, ubicado en zona de bardas al SO de la ciudad. La ventana de análisis queda determinada por las siguientes coordenadas latitud (Sur) y longitud (Oeste), expresadas en grados (Fig. : 78):

- Esquina NO : 42.7496160, 65.1303840
- Esquina SE: 42.8045940, 65.0504160

### **13.2.2. Breve Descripción de la cuenca**

La metodología de trabajo a seguir es similar a la efectuada para el Caso 1, pero se apoyará el análisis inicial con una selección de procesos en GIS IDRISI.

El cuenco se desarrolla en zona de bardas, entre cotas superiores cercanas a 130m e inferiores cercanas a 10m. Su conformación geomorfológica responde a un SHT; su topografía tiene la forma ideal de un vaso sección parabólica, que drena hacia el mar.

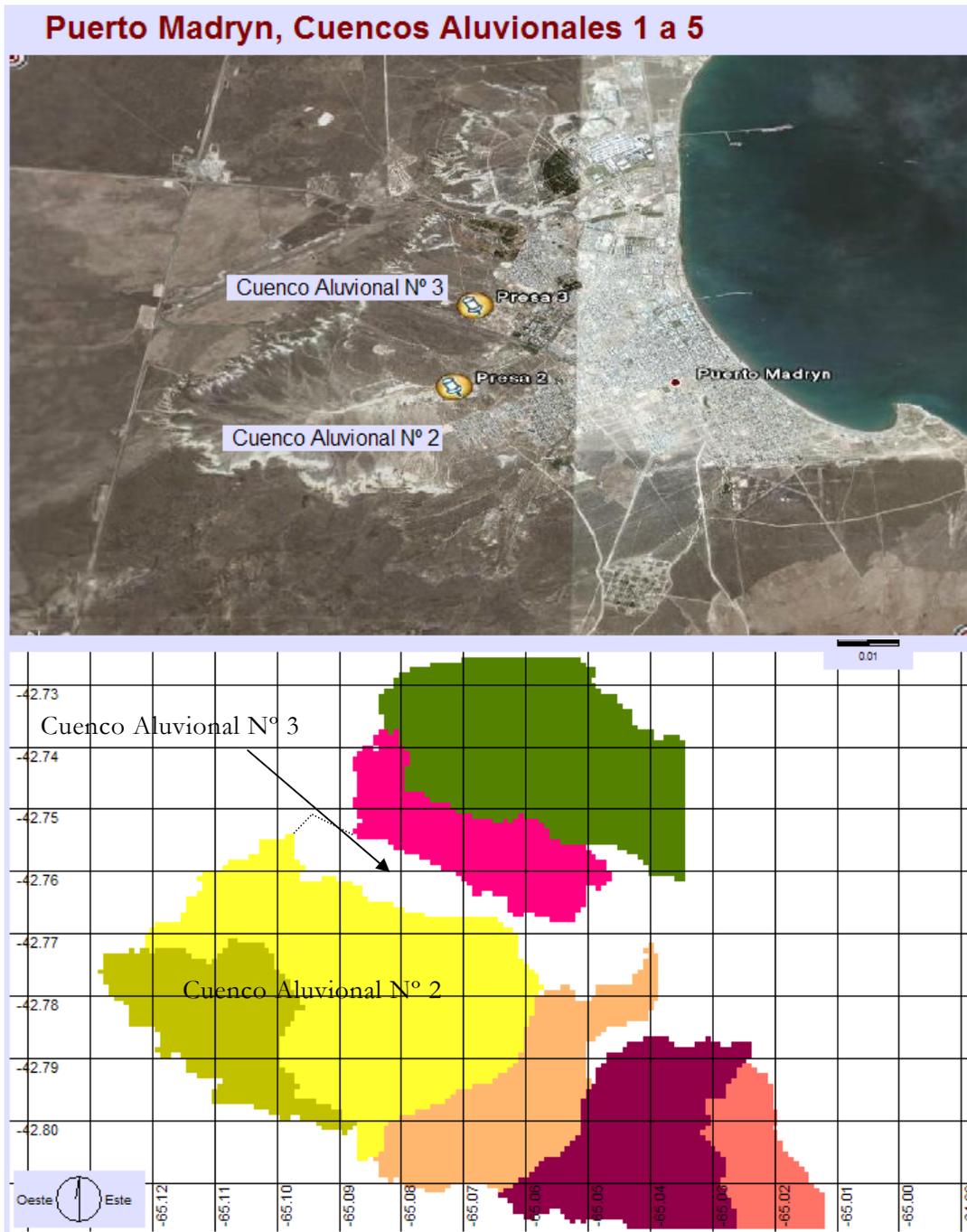
Los suelos superficiales de la zona alta son gravas matriz arcillosa (rodados patagónicos), pero en la zona de bardas aflora la toba, arcillosa e impermeable. En su base, se desarrolla una gran depresión con suelos altamente impermeables.

La vegetación es muy escasa y solo se desarrollan matas en la zona media y alta de la cuenca. La infraestructura existente es reducida, pero la ciudad comienza a expandirse hacia el sector este de la cuenca, lindante con el Cuenco Aluvional N° 1.

Debido a las periódicas crecidas que afectaban el Parque Industrial Liviano y barrios urbanos de Puerto Madryn, luego de la crecida extraordinaria de Mayo de 1992 se ejecutaron diversas obras de emergencia hídrica. Entre ellas una pequeña represa en este cuenco de 1 Hm<sup>3</sup> de capacidad. Dicha obra se compone de un terraplén de unos 5 m de altura máxima, con una toma circular y conducto bajo presa de hormigón, para la regulación de caudales de salida. Como seguridad adicional, la presa cuenta con un canal y vertedero lateral al cuerpo de la presa, sobre su margen izquierda.

Durante la tormenta excepcional ocurrida en Abril de 1998, de recurrencia estimada en 300 años, -150 años si se incorporan a la serie los datos de la tormenta-, la presa colmó su capacidad, sin verter por el canal de seguridad.

Como sección de control, se adopta aproximadamente la traza de la actual “Presa 2”, una pequeña represa de laminación de crecidas construida en el año 1993. Se cuenta con el MDT obtenido de la forma ya detallada (SRTM-NASA), pero se han modificado píxeles en la sección de control a fin de analizar los efectos “sin la presa”



**Fig. : 78. Vista de Puerto Madryn, zona de estudios ampliada p/Cuencos Aluvionales (SHT); imagen Google Earth, Visualización IDRISI**

La Fig. : 79 muestra el MDT del área de estudios del Caso 2, presentada con visualizador SIG IDRISI, y la Fig. : 80 el análisis de escurrimientos a lluvia infinita con la herramienta “*Runoff*” de esta aplicación.

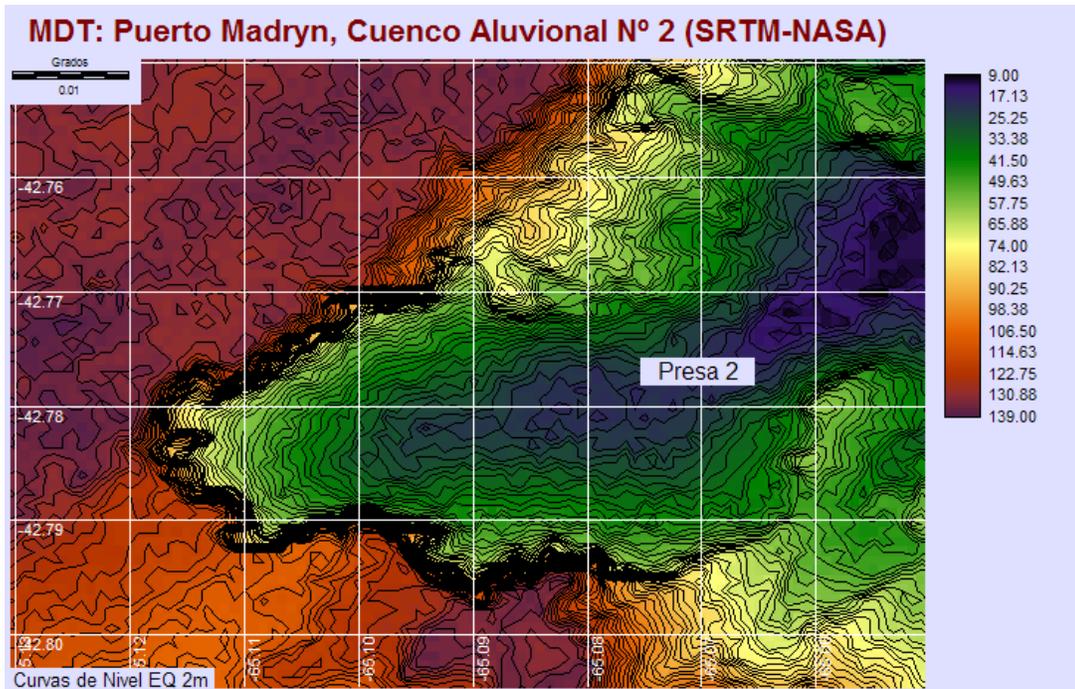


Fig. : 79. Vista de Puerto Madryn, zona de estudios ampliada p/Cuencos Aluvionales (SHT); imagen Google Earth, Visualización IDRISI

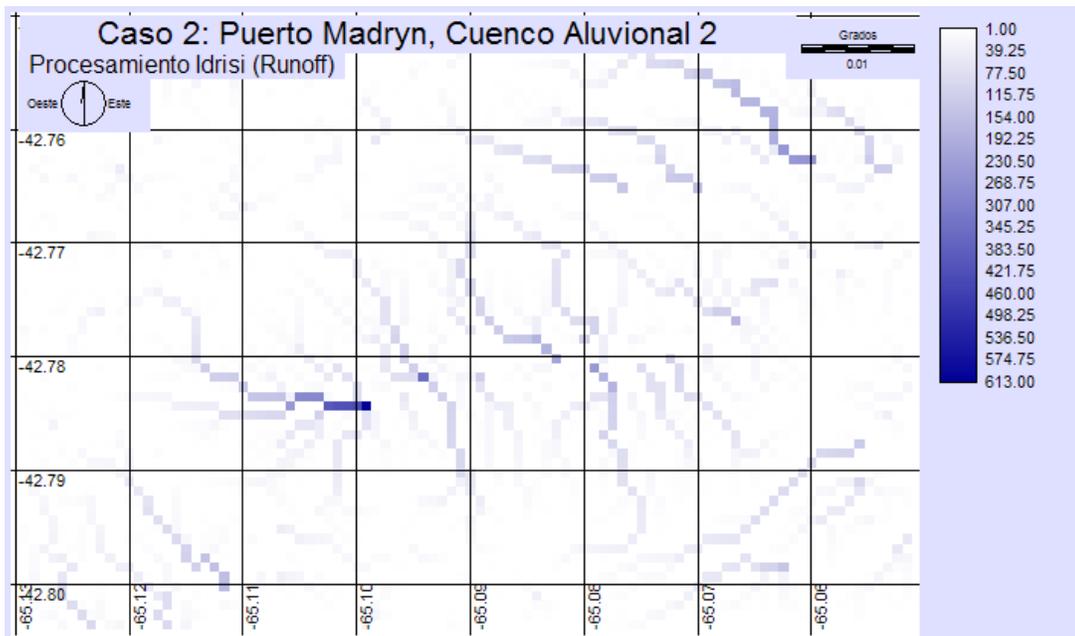
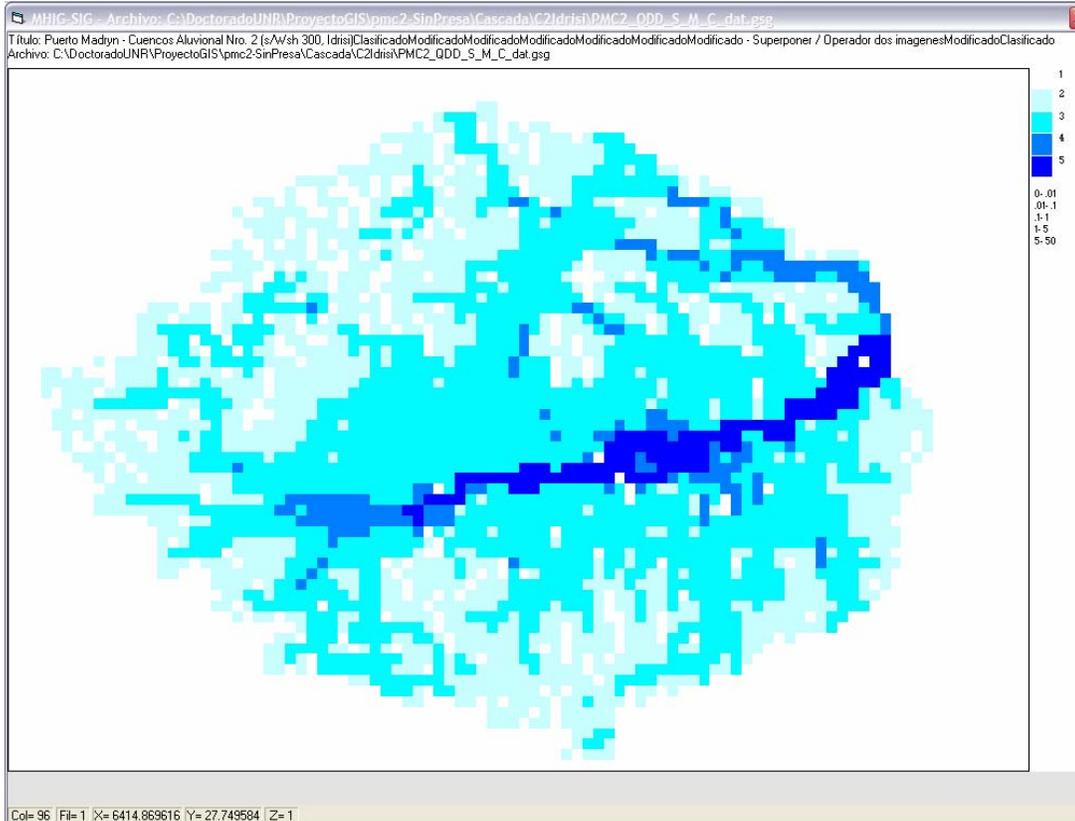
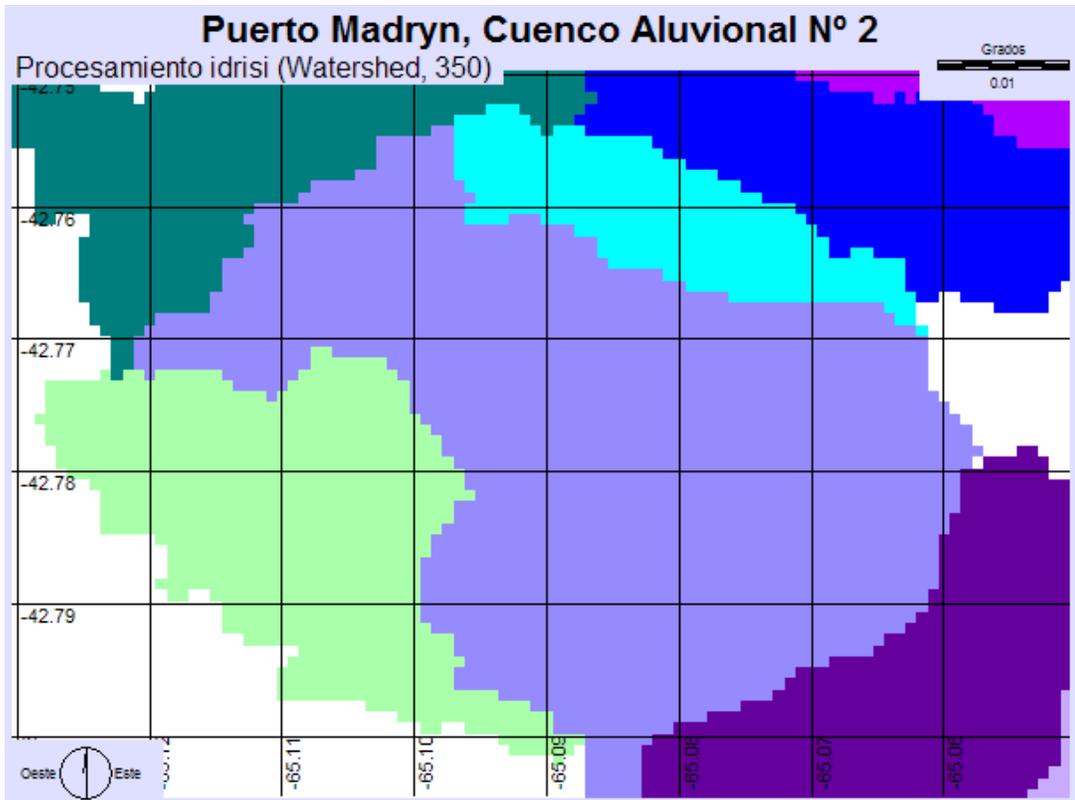
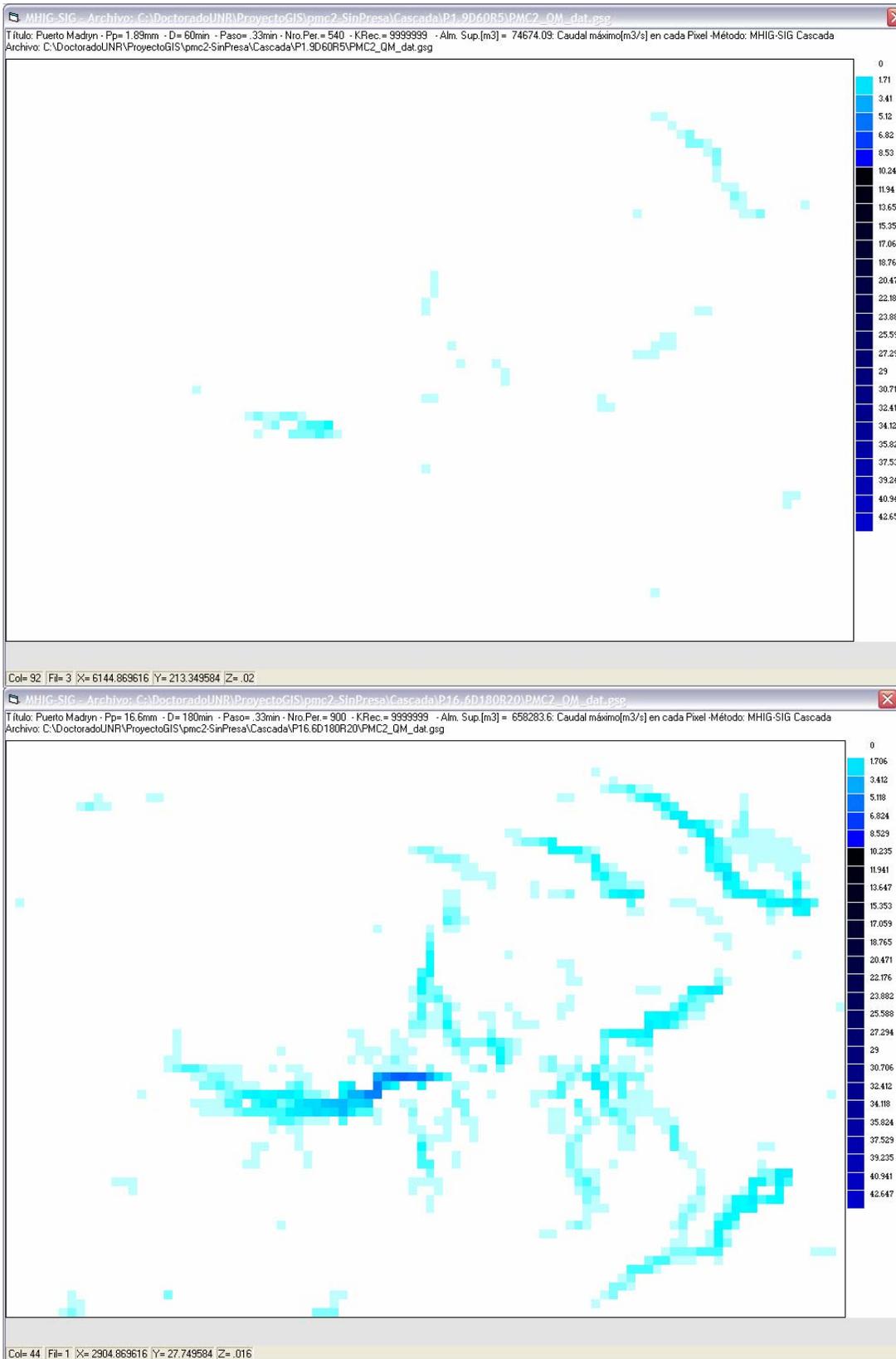


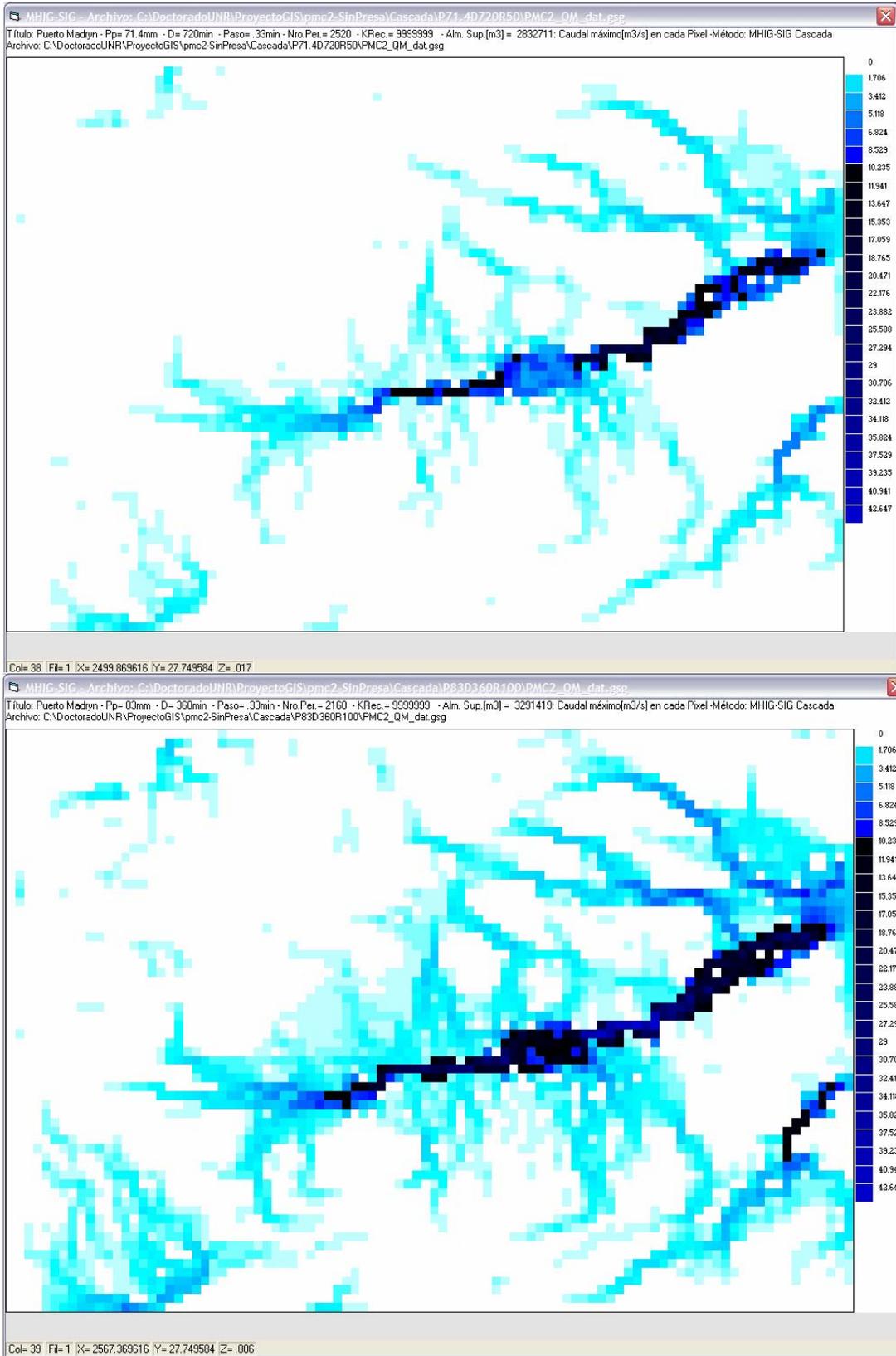
Fig. : 80. Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2. Procesamiento Idrisi (Runoff)  
 La Fig. : 81, arriba, muestra la Cuenca Aluvional N° 2, subcuencas y sectores de cuencas vecinas, analizados con la herramienta "Watershed" de SIG IDRISI. Abajo, resultados de una tormenta centenaria, procesada con MHIG-SIG, caudales máximos clasificados, y determinada su frontera tributaria, en este caso la divisoria de aguas.



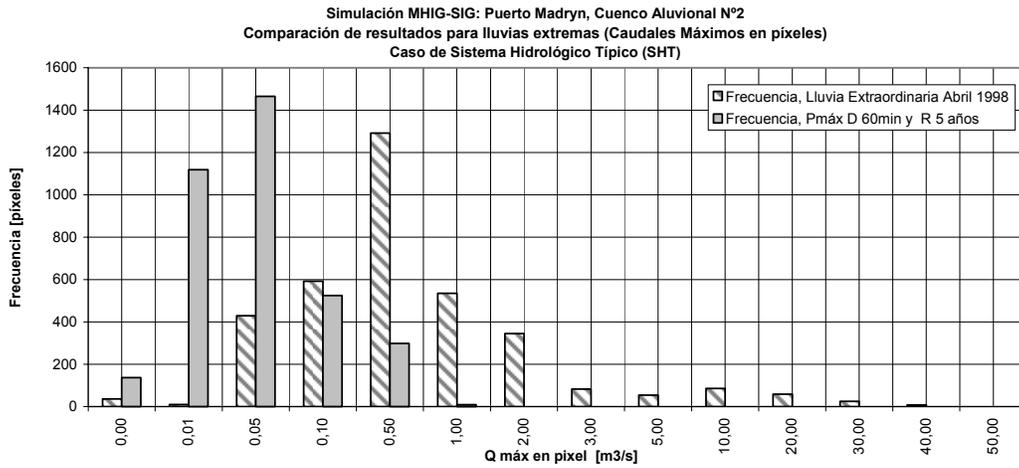
**Fig. : 81.** MHIG-SIG, Resultados para caudal máximo en píxel, clasificados, y frontera tributaria (blancos), para tormenta extraordinaria D 1080min. R 100 años



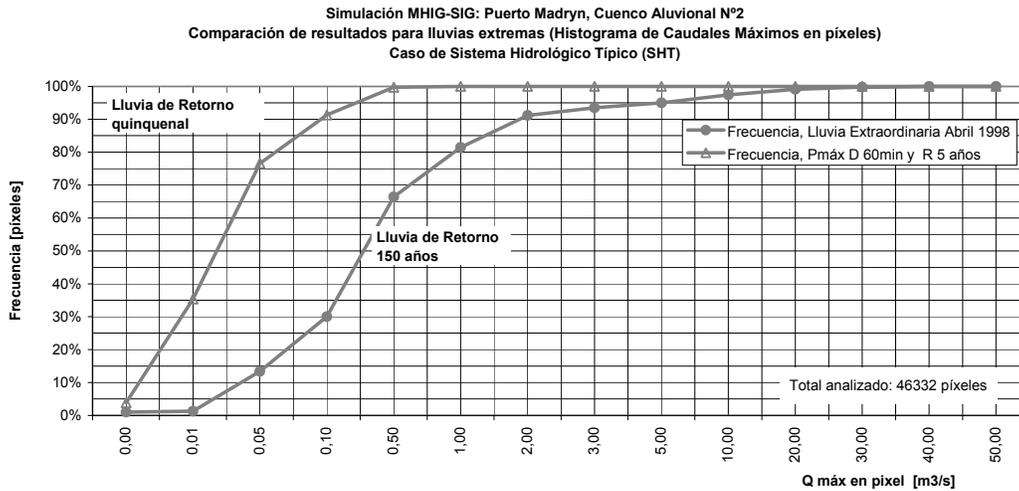
**Fig. : 82. MHIG-SIG, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2, caudal máximo e píxel.  
 Arriba: P 1,89mm, D 60min, R 5 años; P 16,6mm, D 180min., R 20 años**



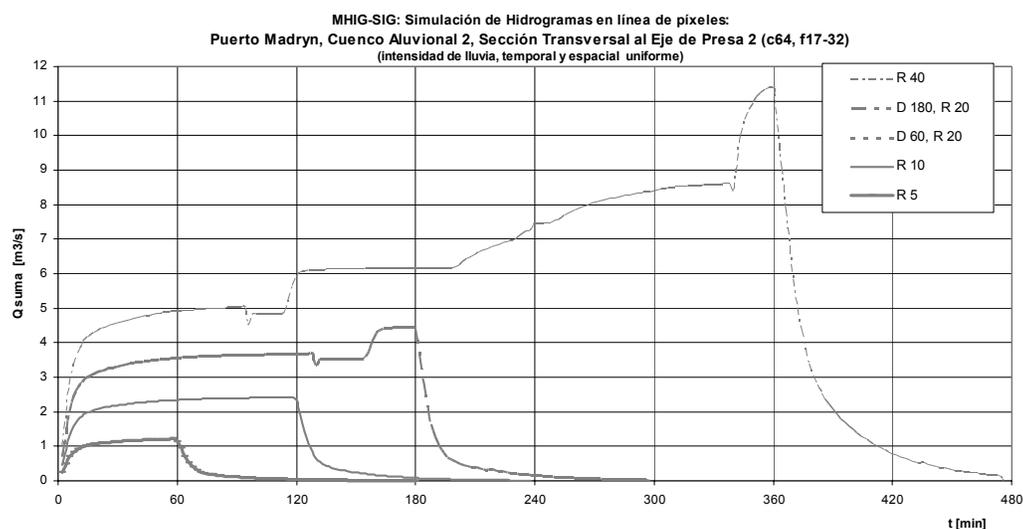
**Fig. : 83. MHIG-SIG, Puerto Madryn, Cuenca Aluvional N° 2, caudal máximo e píxel.**  
**Arriba: P 71,4mm, D 720min, R 50 años; P 83mm, D 360min., R 100 años**



**Fig. : 84.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional n° 2, polígono de frecuencias de caudales máximos, Tormentas de Abril 1998 (R 150años) y D 60min, R 5 años*



**Fig. : 85.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2, histograma de frecuencias de caudales máximos en píxel, Tormenta Abril 1998 (R 150años) y Tormenta D 60min, R 5 años*



**Fig. : 86. MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2, Hidrogramas para distintas tormentas en una misma selección de píxeles (Sección Transversal en Eje de Presa 2)**

Las Fig. : 82 y Fig. : 83 muestran los resultados de caudales máximos en píxeles estimados para cuatro tormentas seleccionadas, de duraciones y recurrencias crecientes.

Las Fig. : 84 y Fig. : 85 muestran polígono e histograma de frecuencias acumuladas para caudales máximos de una tormenta de R 5 años y la tormenta extraordinaria de Abril de 1998.

La Fig. : 86 muestra hidrogramas estimados con MHIG-SIG en la sección de control y para una selección de tormentas.

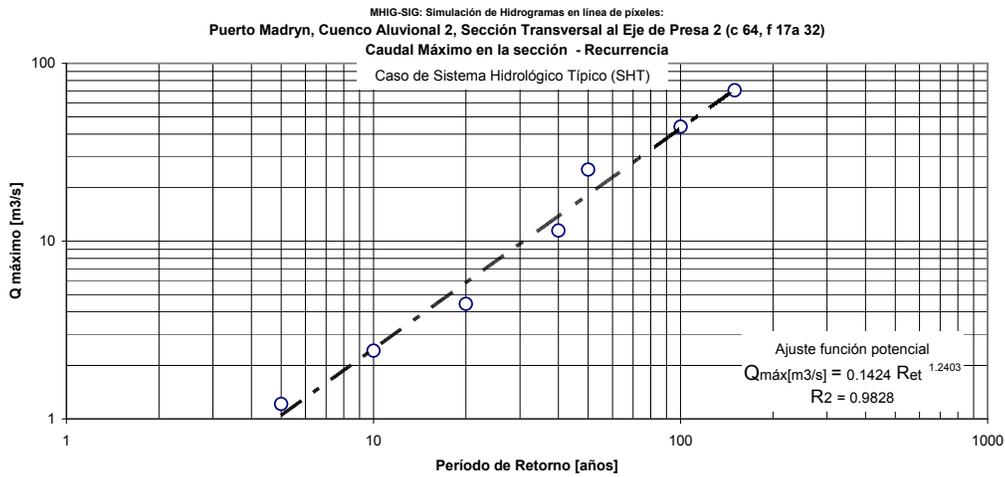
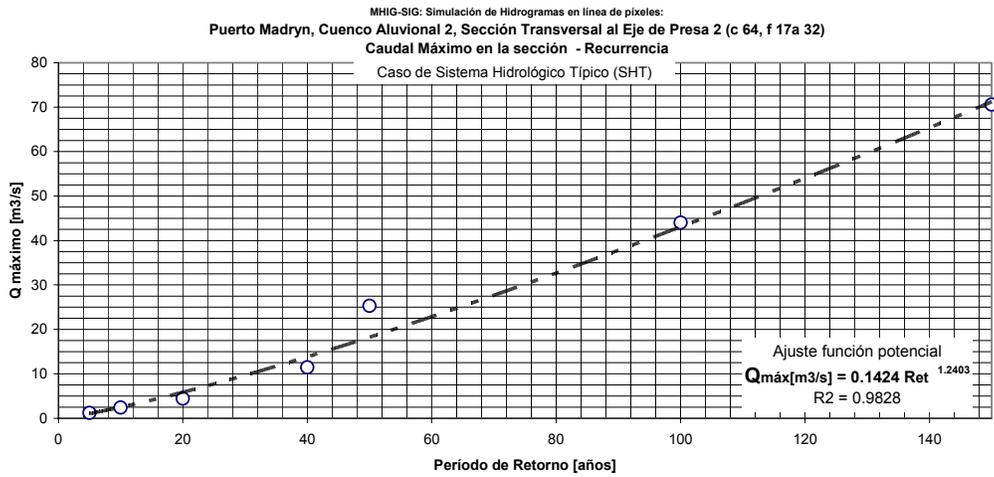
La Fig. : 87 muestra las gráficas en escala aritmética y en escala logarítmica, del Caudal Máximo en un grupo de celdas o sección transversal sobre el eje de Presa 2, en relación al Período de Retorno de la tormenta. Obsérvese que la forma de la misma es propia de un SHT.

La Fig. : 88, representa un ábaco de curvas que relacionan altura media máxima de agua en píxeles, y superficie máxima inundada, en valores absolutos [Has].

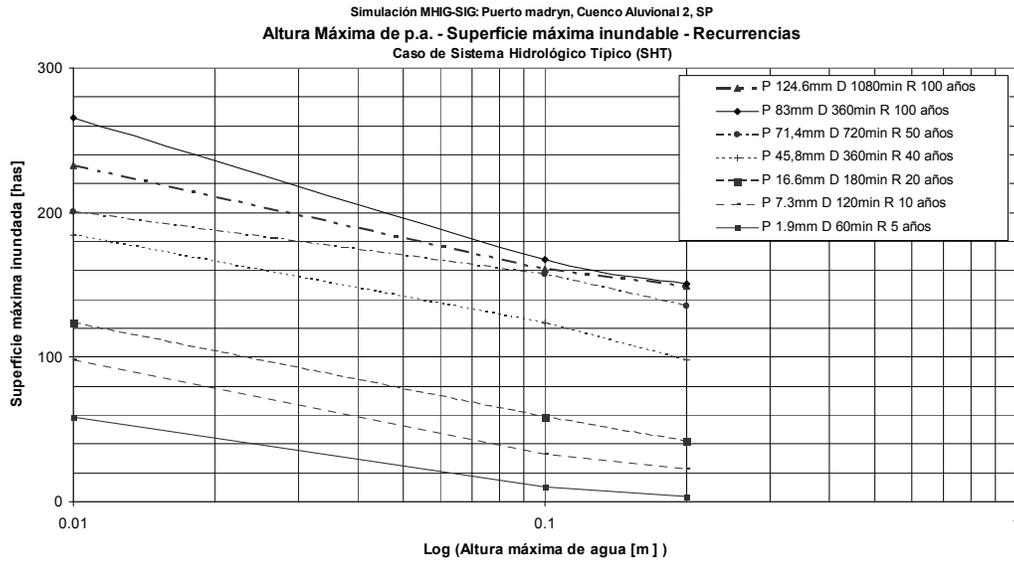
La Fig. : 89 es análoga a la anterior, con la superficie máxima inundada expresada en porcentuales respecto al área total.

La Fig. : 90 muestra la relación entre la superficie inundada residual (para  $h > 0,01$ m al finalizar la tormenta) y la altura media máxima de agua.

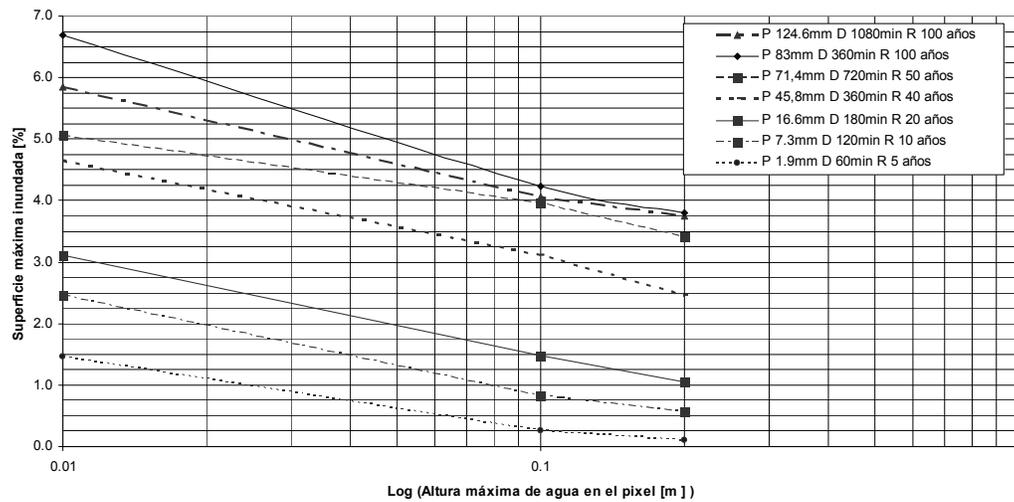
La Fig. : 91 muestra un resumen de valores máximos obtenidos con MHIG-SIG que relacionan la superficie máxima inundable con el período de retorno de la tormenta.



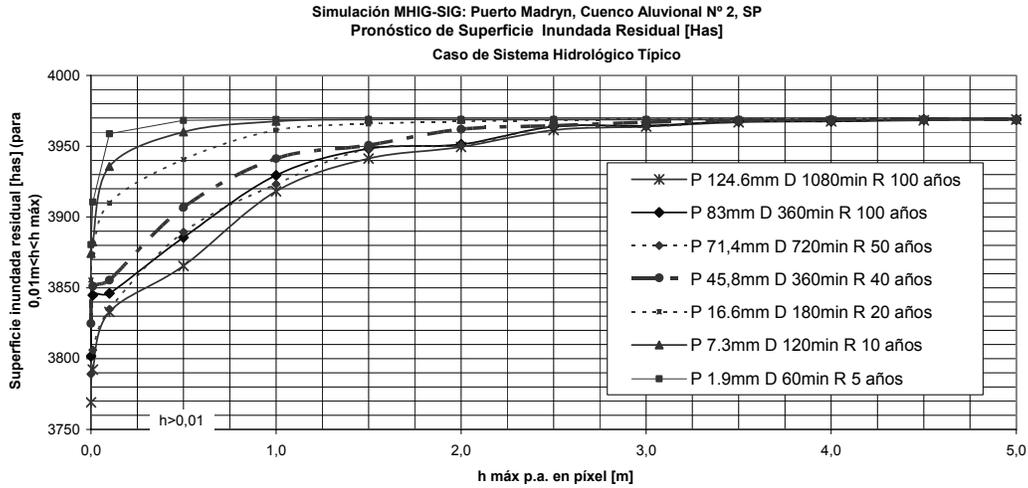
*Fig. : 87. MHIG-SIG: Caso 2 (Puerto Madryn, Cuenco Aluvional n° 2, Caudal Máximo en un grupo de celdas (Sección Transversal sobre el eje de Presa 2), en relación al Período de Retorno de la tormenta. Arriba: Ajuste de Función teórica potencial. Abajo: gráfica logarítmica.*



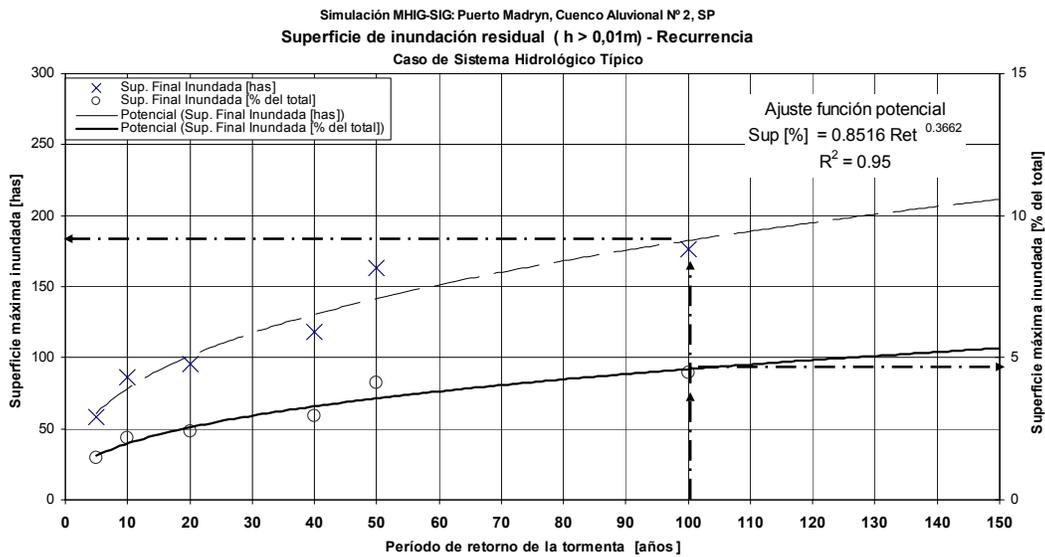
**Fig. : 88.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2, Relación Superficie Máxima Inundada y Altura Media Máxima de agua en píxeles, para tormentas de diferente duración y recurrencia. Valores absolutos [has]*



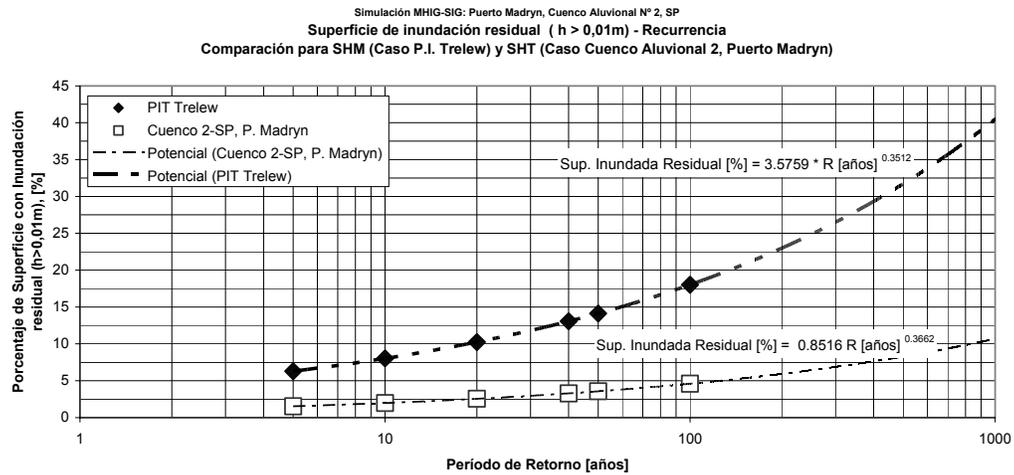
**Fig. : 89.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2, Relaciones Superficie Máxima Inundada y Altura Media Máxima de agua en píxeles, para tormentas de diferente duración y recurrencia. Valores relativos [%]*



**Fig. : 90.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenca Aluvional N° 2, Superficie Inundada Residual ( $0,01m \geq h \geq h \text{ máx}$ ) y Altura Media Máxima de agua, luego de la tormenta, para una selección de tormentas de diferente duración y recurrencia*



**Fig. : 91.** *MHIG-SIG: Caso 2, Puerto Madryn, Cuenca Aluvional N° 2, Relación entre superficie inundada residual y el período de retorno, para una selección de tormentas de diferente duración y recurrencia*



**Fig. : 92. MHIG-SIG: Comparación de resultados de Superficie de Inundación Residual (al finalizar la tormenta) para Caso 1 (VIRCh-Trelew) y Caso 2 (Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2), en relación al período de retorno.**

Las dos curvas de la Fig. : 92 comparan los resultados del Caso 1 (VIRCh-Trelew), para un SHM, con el Caso 2 (Puerto Madryn, Cuenco Aluvional N° 2) para un SHT, entre Superficie de Inundación Residual y Período de Retorno. Obsérvese la marcada diferencia de forma entre un SHM y un SHT, donde la superficie inundada para el SHM tiende a ser marcadamente creciente del período de retorno de la tormenta. Una diferencia que resulta sustancial para uno u otro paisaje.

## *Tercera Parte*

*Discusión de resultados y conclusiones*

**DISCUSIÓN, RESULTADOS,  
CONCLUSIONES**

## **V. DISCUSION, RESULTADOS, CONCLUSIONES**

En el Capítulo 8.10. se presentan los desarrollos y resultados de la prueba y validación del simulador hidrológico MHIG. En el Capítulo 9.3. se desarrollan procedimientos, algoritmos, prueba y verificación para MHIG-SIG.

### **14. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **14.1. EN RELACIÓN A LOS MODELOS MHIG Y MHIG-SIG**

Con MHIG se pueden simular crecidas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales para una tormenta y obtener el hidrograma resultante. O también, simular un amplio conjunto de tormentas, como por caso se ha efectuado con 100 tormentas sintéticas de diferentes duraciones y retornos, y extraer en una tabla los resultados característicos de una crecida (caudal pico, escorrentía, coeficiente de escorrentía) para determinar con ello la duración que maximiza el caudal (tormenta de diseño).

El Modelo MHIG ha incorporado respecto al anterior “Modelo Gaiman” (Serra, 2003) nuevos procesos hidrológicos para el procesamiento en represas y lagos, herramientas de diseño gráfico (apoyadas en esquemas de cuencas o imágenes satelitales de fondo), y procedimientos computacionales de moderna generación.

La simulación de represas permite modelar una conformación particular en la zona de estudios, tal es la existencia de muchas represas simples o en cascada para la laminación de crecidas torrenciales, sin perjuicio de permitir representar funciones de embalses y órganos de evacuación para presas en general.

La simulación de lagos (lagunas, humedales, mallines) incorpora la representación de depresiones lagunares y componentes hidrológicos con funciones de almacenamiento y descarga que son comunes en el paisaje de meseta o de llanura.

En su forma más compleja MHIG puede simular un conjunto de componentes de Subcuencas o Unidades de Estudios Hidrológicos, cauces, represas, lagos/lagunas/mallines, combinados, de salidas simples o múltiples, para una o varias tormentas, y obtener los resultados en cada uno de sus componentes.

Como herramienta didáctica para la enseñanza hidrológica e hidráulica, MHIG permite simular los diferentes procesos hidrológicos en componentes simples, y funciones hidráulicas de represas, vertederos y conductos, o funciones de propagación en cauces y embalses.

Las pruebas comparativas con resultados procesados con otros modelos similares fueron consistentes.

El desarrollo del simulador MHIG-SIG, de tipo cuasi-distribuido, ha permitido experimentar simulaciones de flujos superficiales en laderas y cauces producidos por tormentas en SHM y en SHT. Si bien MHIG permite reflejar mejores resultados absolutos, este modelo distribuido logra conocer la distribución espacial del flujo, con resultados relativos en un entorno de error aceptable para conocer la función respuesta de la cuenca o sistema hidrológico que se analiza. La herramienta ha demostrado ser de gran utilidad para analizar SHM puesto que permite inferir el comportamiento del área tributaria de aportes superficiales en relación a la magnitud de la tormenta.

MHIG-SIG permite obtener resultados de elevación media del agua y caudal máximo en cada celda, o resguardar los valores para cada período de cálculo en un grupo de celdas (sección transversal a un cauce por ejemplo).

Las herramientas auxiliares de MHIG-SIG permiten operar con la matriz del MDT o de los resultados obtenidos para las operaciones habituales más comunes con imágenes SIG (recortar, clasificar, superponer, aplicar una función operador, detectar franjas de menor actividad hídrica (divisorias o fronteras tributarias), y otras operaciones rutinarias. El visualizador permite combinar selecciones de colores para diferenciar los valores de una representación.

Los resultados obtenidos con MHIG-SIG, han permitido estimar *elevación máxima de agua y caudal máximo saliente* en la matriz de celdas aledañas al Cañadón del Parque Industrial de Trelew, y los *hidrogramas* para una sección transversal de control ubicada aguas arriba del B° Constitución, en el citado Cañadón.

Con estos resultados para varias tormentas, se han podido construir los polígonos de frecuencias e histogramas de frecuencias acumuladas para alturas máximas de agua y caudales máximos salientes, y representado las gráficas para algunas tormentas.

Estos resultados permiten investigar relaciones de elevación media máxima con la superficie máxima inundada y la superficie inundada residual luego de la tormenta, como así también de la superficie inundada con el período de retorno de la tormenta.

Del análisis efectuado y los resultados obtenidos, se satisfacen el primer objetivo específico expuesto en el Capítulo 3.

En el Capítulo 13. se presentan los principales resultados de la investigación para dos casos seleccionados, un SHM en Trelew y un SHT en Puerto Madryn, que completan el desarrollo del segundo objetivo específico.

Del análisis para estos dos casos, se encuentran relaciones entre la superficie tributaria de aportes superficiales -a una sección dada o a un área deprimida interior- con el período de retorno de una tormenta, como se expone seguidamente.

#### **14.2. EN RELACIÓN AL CASO 1 (VIRCH-TRELEW, COMO SHM)**

Los resultados obtenidos con el simulador MHIG-SIG respecto a caudales y alturas máximas en píxeles para el Cañadón del PIT son consistentes con reconocimientos expeditivos en campo y crecientes observadas, como la tormenta extraordinaria de Abril de 1998. Así lo demuestran las coincidencias de líneas de flujos mayores que determinan los cañadones en zona de bardas, el Cañadón del PIT y otros cercanos al área urbana (Fig. : 51, Fig. : 57, Fig. : 58).

Los resultados de caudales máximos obtenidos para tormentas de duración y recurrencia crecientes de las Fig. : 59 a Fig. : 67, muestran claramente las zonas de mayor actividad hídrica separadas de las zonas de menor actividad hídrica. Para tormentas menores la dinámica superficial prácticamente se reduce a la zona de bardas y la aguas superficiales convergen hacia sistemas cerrados, donde se deduce que resuelven por evaporación, (la infiltración es muy reducida).

En tormentas de duración y recurrencia intermedias se aprecia la integración de subsistemas lagunares en órdenes mayores, es decir, lagunas que derraman a otras lagunas durante la persistencia de lluvias.

En tormentas de gran magnitud se observa la integración de sistemas que convergen desde la terraza, descienden la zona de bardas, continúan en la terraza intermedia y luego hacia el valle, siguiendo la traza de cañadones en la barda que delimita esta terraza baja con el valle. El sistema hidrológico alcanza pues su desarrollo en plenitud, pero solo en períodos de retornos muy elevados.

Esta hipótesis se afirma en los gráficos y ábacos subsiguientes donde se relacionan las elevaciones de agua en el área con la superficie media máxima inundada, y ambas con la recurrencia de la tormenta. Puede apreciarse una creciente dependencia de la superficie inundada máxima ocurrida durante la tormenta y de la inundación residual luego del evento.

Es impactante observar la elevada proporción de superficie inundada durante eventos de gran magnitud, comparada con la máxima posible (superficie de la ventana de análisis); para el caso, una tormenta centenaria puede alcanzar a inundar una tercera parte de la superficie total.

Finalmente, obsérvese para el caso la relación lograda entre la superficie máxima inundada y la recurrencia de la tormenta, -y su buen ajuste teórico- un indicador que sugiere una fuerte dependencia del área tributaria con el período de retorno.

#### **14.3. EN RELACIÓN AL CASO 2 (PUERTO MADRYN-CUENCO ALUVIONAL N° 2, COMO SHT)**

El análisis de este caso se efectúa al mero objeto de comparar resultados y parámetros característicos de un SHT con el SHM del Caso 1.

Los resultados obtenidos con el simulador MHIG-SIG respecto a caudales y alturas máximas en píxeles para el Cuenco Aluvional N° 2, en Puerto Madryn, son también consistentes con reconocimientos expeditivos en campo y crecientes observadas, incluida la tormenta extraordinaria de Abril de 1998.

El área de la cuenca de aportes determinada con SIG IDRISI y con MHIG SIG es concordante. Los resultados obtenidos son los esperados para una cuenca cuya forma es equivalente a la de un vaso o recipiente ideal.

#### **14.4. RELACIONES ENCONTRADAS EN SHM DE PM**

Para las tormentas de diferente duración y recurrencia que han sido simuladas, se han podido encontrar relaciones entre la “*elevación media máxima*” con la “*superficie máxima inundada*” y con la “*superficie inundada residual*” (luego de la tormenta). También se han encontrado relaciones entre la superficie inundada y el *período de retorno* de la tormenta; las funciones de ajuste teórico tienen buena correlación.

En SHM, los resultados muestran una gran variación relativa de la superficie inundada con la magnitud de la tormenta (intensidad y duración), y consecuentemente con la recurrencia del evento que la origina. Aunque este indicador por sí solo no alcanza para explicar la *variabilidad espacio-temporal* de la frontera tributaria y geometría del área de aportes superficiales, sí sugiere la dependencia del período de retorno de la tormenta. Las gráficas resultantes en SHM -comparadas con un SHT- muestran diferencias sustanciales que se deducen esencialmente de su conformación morfológica.

La variabilidad espacial y temporal de la frontera y superficie tributaria queda demostrada en las imágenes resultantes para cada tormenta y su recurrencia asociada. En las imágenes se manifiestan y diferencian con claridad las áreas de mayor flujo superficial de aquellas con flujo reducido. Esta información cruzada con la altura máxima de agua en la celda permite diferenciar áreas con dinámica superficial de aquellas donde es reducida solo a los aportes directos de la lluvia o de flujos de celdas inmediatamente vecinas. Ello es un indicador claro de una divisoria “dinámica” de aguas superficiales. En esta franja de menor dinámica hídrica superficial está la “divisoria de aguas” durante una tormenta; se la ha denominado “*frontera tributaria*” para diferenciarla de la “divisoria de aguas” que resulta del concepto topográfico clásico. Puede verse de los resultados hallados que esta frontera tributaria es variable con la magnitud de la tormenta, y por lo tanto con su recurrencia.

Las funciones de *superficie inundada* en relación al período de retorno para un SHM y para un SHT son muy distintas. Se ajustaron funciones potenciales que dan buena correlación para ambas. Si bien el exponente resulta similar en los dos casos, la superficie inundada en el SHT tiende a un valor asintótico de retorno mucho más reducido, mientras que en el SHM la superficie inundada residual crece significativamente con la recurrencia de la tormenta. Para el caso del ejemplo en Trelew, la tormenta centenaria alcanza una superficie de inundación residual (mayor a 0,01m) del 18%, mientras que en el ejemplo de SHT en Puerto Madryn la superficie inundada equivalente es del 4,6%. Para una tormenta de R 500 años, los valores proyectados son de 33% y 7% respectivamente.

#### **14.5. RELEVANCIA DE LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA FRONTERA Y SUPERFICIE TRIBUTARIA DE AGUAS SUPERFICIALES**

En el ejemplo de Trelew la propiedad de variación “*espacio-temporal*” de la frontera tributaria ha quedado demostrada. Esta propiedad puede ser relevante en la resolución de problemas usuales de gestión de uso y manejo del agua.

Por ejemplo, en un estudio de caudal máximo, será muy diferente el criterio de análisis a adoptar según sea el área de aportes hídricos superficiales a considerar. Uno, si se trata de un problema que admite resolución para caudales de crecidas de reducidas recurrencias, como por ejemplo una alcantarilla en un camino secundario y rural. En este ejemplo, tomar como criterio de diseño el área de aportes de una tormenta extraordinaria llevaría a sobredimensionar la obra.

Otro distinto, si se trata de la planificación de desarrollo de infraestructura barrial, vial o de seguridad urbana. En este ejemplo, de adoptar los criterios tradicionales de recurrencias de cálculo puede llevar a sub-dimensionar el problema. En efecto, si se adoptan criterios de diseño de obras pluviales urbanas de recurrencias 5 a 15 años, (un valor relativamente elevado para este tipo de obras), la urbanización quedará expuesta a inundaciones que pueden resultar de gran magnitud. Ello, porque para recurrencias mayores a las de diseño, el área tributaria de aportes no es la misma sino una superficie mucho mayor.

Es el caso de la ciudad de Trelew. Aún hoy -con posterioridad a los hechos producidos tras el episodio de Abril de 1998-, pueden verse trabajos de ingeniería y mapas con el trazado de “cuencas urbanas” que responden a la interpretación topográfica convencional de las “divisoria de aguas”. Sin embargo, como quedó de manifiesto durante el evento excepcional de 1998, tales “cuencas” se integraron en grandes superficies bajo aguas. Las consecuencias fueron gravísimas, con populosos barrios inundados y viviendas en las cuales el nivel de las aguas alcanzó la elevación de sus techos.

Tal circunstancia se infiere correctamente de los resultados de la simulación hidrológica efectuada en esta investigación, pues se observa que en tormentas extremas los torrentes alcanzan a la ciudad.

Este concepto de frontera y área tributaria dependiente de las características de la tormenta es importante en la región de meseta patagónica. El módulo pluviométrico es reducido y las lloviznas y lluvias son generalmente de baja intensidad, con chubascos intensos pero cortos y aislados o de escaso desarrollo. Pero estas características de años hidrológicos normales a extraordinarios, contrastan fuertemente con la ocurrencia extraordinaria a excepcional de eventos meteorológicos con lluvias de alta intensidad y duración.

De los interrogantes formulados al inicio de la investigación y los resultados obtenidos se plantea a modo de paradigma la seguridad hídrica en áreas urbanas de SHM sometidas a fenómenos torrenciales: ¿Cuál es el retorno válido para la planificación urbana?. Por ejemplo, hasta hace pocos años, los criterios de ingeniería recomendados para el diseño de redes de drenajes pluviales indicaban recurrencias de 3 a 5 años, admitiendo la ocurrencia de inundaciones menores para tormentas de recurrencias mayores. En la última década esta recomendación se extendió a recurrencias cercanas a la decenal. Este criterio es tomado de casos en sistemas típicos para los cuales se acepta el anegamiento de esquinas y cruces de calles urbanas en retornos mayores, cuyas aguas rara vez superan el nivel de veredas o ingresen a pisos de viviendas. Sin embargo aplicado a casos de SHM implica aceptar la inundación destructiva de barrios urbanos para tormentas de 20, 50 o más años de retorno.

Una reflexión final merece la frontera y área tributaria para eventos extremos. Aquí se manifiesta la coincidencia, o tendencia a coincidencia, con la divisoria de aguas topográfica que se deduce de una “lluvia intensa de duración infinita”. El contorno que delimita las más grandes crecidas de un SHM puede ser asimilado al que resulta de aplicar la precipitación máxima probable.

## 15. CONCLUSIONES

### 15.1. SUMARIO DE CONCLUSIONES

1- Los resultados de la investigación confirman la existencia de sistemas hidrológicos denominados mixtos, donde el área de aportes superficiales a un área interior cerrada (depresión, laguna), o convergente a una sección transversal de un valle o cañadón, no resulta constante y estacionaria sino variable con la precipitación en proporciones que justifican esta distinción.

2- La forma y el tamaño del área tributaria varía con la duración e intensidad de la lluvia y la ubicación del evento meteorológico, y consecuentemente, con el período de retorno de la tormenta.

3- El concepto topográfico clásico para el trazado de “divisoria de aguas” y cuencas resulta limitado e inconsistente para la determinación de crecidas máximas en sistemas hidrológicos mixtos, pudiendo derivar en el sub-dimensionamiento de la planificación u obras de infraestructura de envergadura, o el sobre-dimensionamiento de obras hidráulicas menores.

4- La movilidad espacio-temporal de la frontera y área tributaria de aportes superficiales en un sistema hidrológico mixto tiene relevancia, particularmente en el desarrollo de infraestructura en áreas urbanas y suburbanas, la planificación o el simple conocimiento del funcionamiento hidrológico de un sistema dado.

5- Estos resultados llevan a confirmar la hipótesis general de esta investigación, y a proponer en relación a ella dos enunciados derivados de esta premisa:

5.1. *De la frontera tributaria:* En un paisaje de meseta el área tributaria de aportes superficiales a una sección de control dada, o a un área interior cerrada (laguna, depresión), puede resultar dependiente de la magnitud de la tormenta, y consecuentemente de su período de retorno.

5.2 *De la Divisoria de Aguas:* En un paisaje de meseta la divisoria topográfica de aguas resulta un concepto limitado para abordar problemas hidrológicos de determinación de crecidas máximas en mesetas, pudiendo derivar en el sub-dimensionamiento del *caudal de diseño* para el tratamiento de algunos casos, o en el sobre-dimensionamiento de otros.

6- Los modelos hidrológicos MHIG y MHIG-SIG conforman dos herramientas válidas para el análisis y determinación de crecidas máximas en pequeños y medianos sistemas hidrológicos.

7- Por analogía y extensión, es posible generalizar estos conceptos y procedimientos al paisaje de meseta patagónica y otras regiones de características morfo-hidrológicas y climáticas semejantes.

## **15.2. SUMARIO DE CONTRIBUCIONES**

1- Se han desarrollado dos modelos hidrológicos determinísticos, uno de tipo agregado y otro pseudos-distribuido, para el análisis de crecidas máximas en pequeños y medianos sistemas hidrológicos en paisaje de meseta, sin perjuicio de su aplicabilidad a casos en sistemas típicos.

2- Se ha desarrollado una metodología innovadora para la identificación y determinación de la frontera y área tributaria de aportes superficiales en sistemas hidrológicos en paisaje de meseta. Especialmente, en sistemas hidrológicos mixtos donde el área de aportes superficiales es dependiente de la magnitud de la tormenta y consecuentemente de su período de retorno.

3- Se han incorporado nuevos conceptos hidrológicos, que permiten diferenciar conformaciones hidrológicas cuyas respuestas son sustancialmente diferentes a los conocidos problemas en montaña y en llanura.

## **15.3. TRABAJOS FUTUROS**

1- El simulador MHIG-SIG constituye una herramienta en desarrollo que puede ser mejorada. Resulta de interés sumar algoritmos y procedimientos distribuidos para el análisis de erosión, obras hidráulicas, mejoras en métodos numéricos y algoritmos computacionales.

2- Este trabajo, deja planteado para investigaciones futuras nuevos problemas, como por ejemplo el análisis en relación a los criterios de planeamiento y diseño de obras de infraestructura en urbanizaciones en zonas de torrentes de meseta.

**SÍMBOLOS Y REFERENCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

## VI. SÍMBOLOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### 1. GLOSARIO

- Baraibar**, Cañadón Baraibar, Gaiman (VIRCh)
- Chubut**, Pcia Del Chubut, Argentina
- CIHRSA**, Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, Carlos Paz, Córdoba
- CMP**, Crecida máxima probable
- Comodoro Rivadavia**, Ciudad de Comodoro Rivadavia, Pcia del Chubut
- CONICET**, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
- CORFO**, Corporación de Fomento del Chubut, Pcia del Chubut
- DAC (CAD)**, Diseño asistido por computador
- DGEyP**, Dirección General de Estudios y Proyectos, Subsecretaría de Servicios y Obras Públicas (SSOP), MESOP, Chubut, 1982/90
- DGRH**, Dirección General de Recursos Hídricos, Subsecretaría de Servicios y Obras Públicas (SSOP), MESOP, Chubut, 1980/82
- DICH**, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNPSJB
- Dolavon**, Localidad de Dolavon, Pcia del Chubut
- EROS**, Earth Resources Observation and Science
- Esquel**, Ciudad de Esquel, Pcia del Chubut
- Gaiman**, Ciudad del VIRCh, Pcia del Chubut
- HEC HMS**, Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System
- HEC RAS**, Hydrologic Engineering Center, River Analysis System
- IDRISI**, GIS, Clark University Graduate School of Geography
- INA**, Instituto Nacional del Agua
- INCYTH**, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas
- KINEROS**, Modelo Hidrológico pseudodistribuido (US Department of Agricultura) Michaud, Arizona (1992)
- MDT (DEM)**, Modelo Digital de Terreno
- MESOP**, Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas (Chubut, 1980/90)
- Método SCS**, Soil Conservation Service, Curve Number Loss Model
- MH, Modelo hiddrológico**
- N, S, E, O, NO, NE, SO, SE**, direcciones cardinales
- NGA**, (National Geospatial-Intelligence Agency)
- OMEGA**, Modelo hidrológico distribuido (Correia y Matias, 1991)
- OMM (MMO)**, Organización Meteorológica Mundial
- PDR**, Funciones de Precipitación-Duración-Recurrencia (ecuaciones regionales de tormentas)
- PIT**, Parque Industrial de Trelew, Pcia del Chubut
- PÍXEL**, Modelo hidrológico distribuido, (Serra, 1999)
- PM**, Paisaje de Meseta
- PMP**, Paisaje de Meseta Patagónica
- PMP**, Precipitación Máxima Probable

**Puerto Madryn**, Ciudad de Puerto Madryn,  
Pcia del Chubut

**Rawson**, Ciudad capital de la Provincia del  
Rawson, Chubut

**SCS**, Soil Conservation Service (US)

**SCyT**, Secretaría de Ciencia y Tecnología,  
UNPSJB

**SDDS**, Seamless Data Distribution System,

**SHC**, Sistema Hidrológico Complejo

**SHM**, Sistema Hidrológico Mixto

**SHT**, Sistema Hidrológico Típico (Fertonani,  
M, 1978)

**SIG (GIS)**, Sistema de Información Geográfica

**SRTM**, Seamless Shuttle Radar Topography  
Mission

**TOPMODEL**, Modelo hidrológico distribuido  
Beven y Kirby (1979)

**TRELEW**, Ciudad de Trelew, Pcia del Chubut

**UEH**, Unidad de Estudio Hidrológico

**UNPSJB**, Universidad Nacional de laPatagonia  
San Juan Bosco

**USACE**, U.S. Army Corps Of Engineers

**USGS**, US Geological Survey

**VB**, Visual Basic de Microsoft

**VBA**, Visual Basic para aplicaciones Microsoft

**VIRCh**, Valle Inferior del Río Chubut

**WMS**, Watershed Modeling System

**GAIMAN**, Modelo Hidrológico (Serra, 1983)

**CASC2D**, Modelo hidrológico distribuido,  
Colorado State University (Julien,  
1994)

## 2. BIBLIOGRAFIA

### 2.1. BIBLIOGRAFIA CITADA

- Ares, J. (2006) Informe de Impacto Ambiental, En: Serra et al (2006), Vol. VI. Biblioteca G. Puentes, UNPSJB, Trelew, Argentina.
- Bertoni, J., Ambrosino, Daniele, Maza, Paoli, Serra (2004) Inundaciones Urbanas En La Argentina. Ed. Universitas, U.N. Córdoba.
- Bertoni, J. (2006) Inondations Urbaines En Amérique Latine: Réflexions Sur Le Rôle Des Facteurs De Risque. *Frontiers In Flood Research. Le Point De La Recherché Sur Le Crues*, (305)-123-141.
- Beven, Keith J, (1997), Distributed Modelling In Hydrology: Applications Of Topmodel, Lancaster University, Wiley, Chichester, UK.
- Beven, Keith J. Y Kirkby, M. J. (1979) A Physically Based Variable Contributing Area Model Of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1):43-69, Uk.
- Blom, G. (1958) Statistical Estimates and Transformed Beta Variables, New York: John Wiley and Sons, Inc .
- Caamaño Nelli, G., Fertonani, M., Prendes, H. y Quinodoz, H. (1979) Análisis de Sistemas Hidrológicos No Típicos – Bases Teóricas y Criterios Metodológicos, Proyecto Generación y Aplicación de Metodologías Hidrológicas para Áreas de Llanura, Depto. de Hidrología Gral. y Aplicada, U.N. Litoral, Santa Fe, Argentina. Pub. IX Congreso Nacional del Agua, San Luis, Argentina, 1979.
- Caamaño Nelly, G., Dasso, C. (2003) Lluvias de Diseño. Ed. Científica Universitaria. Córdoba.
- California State Departament of Publica Works. (1923), Flow in California streams. *Bulletin* 5. Chapter 5.
- Cazorzi, Federico, (2002), Hydrological Grid 2002, Department Of Crop Science And Agricultural Engineering, University Of Udine. Disponible En: [Http://www.dpvta.uniud.it/~cazorzi/hydrogrid2k2/hygrid2k2.htm](http://www.dpvta.uniud.it/~cazorzi/hydrogrid2k2/hygrid2k2.htm)
- Chachero María, (1998) Actualización de las Ecuaciones de Tormentas en el Valle Inferior del Río Chubut, Monografía. En: Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia Y Tecnología, U. N. De La Patagonia San Juan Bosco. Pcia. Del Chubut.
- Chachero, M. (2006) Informe de Hidrometeorología. En: Serra et al (2006), Informe Parcial 3ª, Tomo I. Biblioteca G. Puentes, UNPSJB, Trelew, Argentina.
- Chow, Ven (1989) Manual De Hidrología Aplicada, Ed. Mc Graw-Hill.
- Chow, Ven (1964) Handbook Of Applied Hydrology, Ed. Mc Graw-Hill.
- Chow, V., Maidment, David R. y Mays, L. (1994) Hidrología Aplicada, Bogotá, Colombia: Ed. Mc Graw-Hill Interamericana S.A.. Isbn: 958-600-171-7.
- Custodio, E.; Llamas, M. (1976) Manual de Hidrología Subterránea; España, Edic. Omega.
- Doe, W., Saghafian, B. & Julien, P. (1996) Land-Use Impact On Watershed Response: The Integration Of Two-Dimensional Hydrologic Modeling And Geographic Information Systems, *Hydrological Processes Journal*, 10, 1503-1511, 1996.
- EVARSA (2004) Estadística Hidrológica de la República Argentina. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaria de Obras Públicas ISBN 987-98869-2-5. Ed. Trilogía Producción Gráfica.
- Ferrer Polo, F. (1993) Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas, Monografía M37, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, CEDEX, ISSN 0211-8203, Isbn: 84-7790-168-6.
- Fertonani, M. (1978) Lineamientos Básicos para el Desarrollo de la Investigación Hidrológica en Áreas de Llanura: Aspectos Conceptuales y Problemática, Informe del Centro Regional Litoral, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídrica (INCYTH), Santa Fe.
- Frances García, F. (1996) La Modelación Distribuida de Avenidas. Ed. Dpto. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente de la U. Pol. De Valencia, España.
- Frechet, M. (1927) Sur la loi de probabilité de l'écart maximum. *Annales de la Société Polonaise de Mathématique*, Cracovie Vol. 6, pp. 93-116. Bernier, J. (1956). Sur l'application des diverses lois limites des valeurs extrêmes au problème des débits de crue. *La Houille Blanche*. Vol. 5., pp. 718-725.
- Fuller (1987) Measurement Error Models, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Gauss, C. (1809) Théoria motus corporum coelestium. *Werke*, 7, 1-280.
- Gringorten, I. (1963) A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research* 68(3), pp. 813-814.

- Gumbel, E. (1954) Statistical theory of extreme values and some practical applications. National Bureau of Standards, Washington, 1954. In: Bernier, J. (1956). Sur l'application des diverses lois limites des valeurs extrêmes au problème des débits de crue. *La Houille Blanche*. Vol. 5., pp. 718-725.
- Gumbel E. (1958) Statistics of Extremes. New York, Columbia University Press.
- Haller, M. (1981) Descripción Geológica de la Hoja 43h, Puerto Madryn, Provincia del Chubut, *Boletín 184*, 5 Figs., 6 Lám., 8 Cuad., 1 Mapa, Servicio Geológico Nacional Buenos Aires.
- Hazen, A., (1930) Flood Flows. New York: John Wiley and Sons, Inc. 200 pp.
- Heras, R. (1976) Hidrología y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid: Ed. Cehydg.
- Hughes Williams M. (1926) A Orillas del Río Chubut, Pcia. del Chubut, Argentina: Ed. El Regional.
- Julien, P., Saghafian, B., & Ogden, F. (1995) Raster-Based Hydrological Modeling Of Spatially-Variied Surface Runoff, *Water Resources Bulletin, Arwa*, Vol. 31, No. 3, June 1995, Pp 523-536.
- Kolmogorov, A. (1933) Foundations of the theory of probability. Translated 2nd ed. in 1956.
- Linsley, R., Kohler, M. y Paulus, J. (1977) Hidrología Para Ingenieros, 2da. Edición, Colombia: Ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana SA.
- López Cadenas de Llano, F. y Pérez Soba Baro, A. (1982) Seminario s/Erosión y Sedimentación Cuencas de Montaña, 1982, CIHRSA, INCYTH, CONICET, Carlos Paz, Córdoba.
- Luce, R. & Tukey, J. (1964) Simultaneous conjoint measurement: A new type of fundamental measurement. *Journal of Mathematical Psychology*, 1, 1-27.
- Michaud, J. & Sorooshian, Soroosh (1994) Comparison of Simple Versus Complex Distributed Runoff Models on a Midsized Semiarid Watershed, *Water Resources Research*, Vol. 30, No 3, P. 593-606.
- Moore, R., Cole, S., Bell, V.. & Jones D. (2006) Issues In Flood Forecasting: Ungauged Basins, Extreme Floods And Uncertainty. *Frontiers In Flood Research. Le Point de la Recherche Sur le Crues*, (305)-103-122.
- Moreno, O. (2006) Informe de Estudios Básicos de Geotecnia, En: Serra et al (2006), Informe Parcial 3ª, Tomo I. Biblioteca G. Puentes, UNPSJB, Trelew, Argentina.
- Morse, P. & Kimball, G. (1951) Methods of operations research. New York: John Wiley and Sons, Inc .
- Ponce, V. (1989) Engineering Hydrology: Principles & Practices, Prentice Hall, isbn 0-13-277831-9
- Scalise, A. (2006) Informe de Estudios Básicos, En: Serra et al (2006), Informe Parcial 3ª, Tomo I.
- Serra, J. y Clérico, F. (1989) <Gaiman>, Modelo Matemático de Transformación Lluvia Caudal para Pequeñas Cuencas Aluvionales en Áreas de la Meseta Semiárida Patagónica, Informe Idth 7/89, Proyecto N°. 38/1986-1990, Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Virch; En Biblioteca de Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J., Malnero, H., Sainz Trápaga, J., Chachero, M. y Villegas, T. (1995) Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final, Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Malnero H., Chachero, M., Sainz Trápaga, J. y Sorondo, A. (1998) Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final, PI N° 194/1995-1998, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de La Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra, J. (2002) Lluvia Equivalente por Fusión de Nieves en la Estimación del Caudal Máximo en Cuencas Pluvionivales sin Datos Hidrométricos. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pub. XIX *Congreso Nacional del Agua*, Carlos Paz, Córdoba, Agosto 2002. Isbn: 987-20378-0-9.
- Serra, J. (2003) Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta en la región semiárida patagónica. En: Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura. Director de tesis: Dr. F. Horne; Tribunal: Pouey N., Vives, L. y Zimmermann E. Inédito. 168 pag. Escuela de Posgrado y Formación Continua, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. de Rosario. Rosario, Argentina.
- Serra, J., (2004a) TORDISE - Gaiman V-2000. Modelo Matemático De Simulación, Lluvia-Caudal Para Pequeñas Cuencas Torrenciales. Obra inédita de software, RNPI, E03802 Ex369879, DNDA, Buenos Aires, Rca. Argentina.
- Serra, J. (2004b) Gaiman V-04, Modelo Hidrológico de Simulación de Crecidas en Sistemas Torrenciales. Obra inédita de software, RNPI, E 03801 - Exp. 369865 - 6/12/2004, DNDA, Buenos Aires, Rca. Argentina.

- Serra, J. (2004c) Capítulo 7: Urbanización E Inundaciones En Sistemas Hídricos Del Centro de la Región Patagónica; En Bertoni, J.(Com. y Ed.) et al; Inundaciones Urbanas en la Argentina, Córdoba. Ed. Universitas, UNC.
- Serra, J., Ares, Chachero, Feller, González Gallastegui, Malnero, March, Nozijkowski, Pagnoni, Regnaudo, Scalise, Sainz Trápaga, Stampone, Testino, Villafaña, Wahler, (2006) Plan de Manejo y Gestión Integral de Efluentes Cloacales de la Ciudad de Trelew, Facultad de Ingeniería. En Biblioteca de U. N. Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- Shames, Irving H. (1967) Mecánica de los Fluidos, Madrid, España: Ed. Castillo.
- Sherman, L. (1932) Streamflow From Rainfall By The Unit Graph Method, Eng. News-Rec, Vol. 108, Pp. 501-505.
- Snyder, F. F. (1938) Synthetic Unit Hydrographs, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 19, Pt. 1, Pp. 447-454.
- Soil Conservaation Service (1971) Nacional engineering handbook. Section 4: Hydrology. USDA. Springfield. VA.
- Stampone, J., Ichazo, G., Santinelli, N., Sastre, V. y Furcci, M. (1997) Informe de Impacto Ambiental para la Etapa de Explotación, Minera Ameghino SAMIC, Facultad de Ciencias Naturales, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Pcia. del Chubut.
- Temez, J. (1978) Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España, isbn 84-7433-040-8.
- Tucci, Carlos E. Phd, Silveira A., Benetti, A., Lanna, A., Semmelman, F., Louzada, J., Bertoni, J., Filho, K., Beltrame, L., Bordas, M., Pessoa, M., Caicedo, N., Chevalier, P., Porto, R. y Clarke, R. (1993) Hidrologia: Ciência E Aplicação, São Paulo, Brasil: Editora Universidade De São Paulo. Isbn 85-7025-298-6.
- USACE, U.S. Army Corps Of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2000) HEC HMS, Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual. Davis CA.
- Villegas, T., Ferraria, S., Chachero, M. y Serra, J. (1994) Estudio de Precipitaciones en el Valle Inferior del Río Chubut, En: Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Weibull, W. (1939) A statistical theory of the strength of materials. Ingeniors Vetenskaps Akademiens Handlingar Nr 151. In Proceedings of *The Royal Swedish Institute for Engineering Research*. Stockholm, Sweden, p. 45.
- Williams, H., (1945) Discussion Of Military Airfields, Trans. Asce, Vol. 110, P. 820.
- Zucarelli, G., Morresi, M. (2004) Análisis Relativo de la Determinación del Tiempo de Concentración: Apliación a Cuencas Urbanizadas. *Cuadernos del CURIHAM*, 10, 45-55, Issn 1514-2906

## 2.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Aparicio Mendez, F. (1999) Fundamentos de Hidrología de Superficie, México: Editorial Limusa Sa. Isbn 968-18-3014-8.
- Ban, J. y Davies Sala, C. (1995) Determinación de la Tormenta de Diseño en el Cuenco Torrencial Experimental de Cañadón Baraibar - Gaiman, Pcia. del Chubut., Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- Bertoni, J. y Zamanillo, E. (1989) Modelación Matemática en Hidrología Superficial - Modelos de Tránsito de Crecidas, INCYTH - CIHRSA - CONICET, Carlos Paz, Córdoba.
- Bertoni, J., Chevallier, C. y Bouvier M. (2000) Análisis Relativo a la Estimación del Tiempo de Concentración: Aplicación a Tres Cuencas Semi Urbanizadas de la Región Central de Argentina. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Tomo II, Pp. 249-358. Córdoba.
- Bureau Of Reclamaton (1985) Diseño de Presas Pequeñas, 13ra., Usa: Impresión Cia. Edit. Continental
- Caamaño Nelli, G. y García C. (1999) Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a Través del Factor de Frecuencia, Caso Log-normal. *Ingeniería Hidráulica En México*. Vol. XIV, N° 3, Septiembre-Diciembre, Pp. 37-44. D.F., México.
- CAI, Centro Argentino de Ingenieros, (1999), Seminario de Definición y Manejo de La Zonificación en las Llanuras Inundables, Programa de Protección Contra Inundaciones, 19 y 20 Agosto 1999, Buenos Aires.
- Cuadernos del CURIHAM, *Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental*, Año 3, N° 3y4, 1997. Vol 4, N°2, 1998; Vol 5, N°2, 1999; Vol 6, N° 1y2, 2000; Vol 7, N° 1y2, 2001, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. Rosario. Issn 1514-2906.
- Estrela Monreal, T. (1991) Avenidas e Inundaciones, Centro de Estudios Hidrográficos, Cedex, Madrid, España.
- Estrela Monreal, T. (1996) Inundaciones: Impactos y Estrategias de Respuesta, Monografía, Centro de Estudios Hidrográficos, Cedex, Madrid, España.
- Fernández de Bobadilla, F. (1996) Corrección de Torrentes; Centro de Estudios Hidrográficos, Cedex, Madrid, España.
- Ferrer Polo, F. (1993) Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas, Monografía M37, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, Cedex, Issn 0211-8203, Isbn: 84-7790-168-6.
- Ferrer Polo, J. Análisis estadístico de caudales de avenida. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1992. 42 p., Monografía M 26, Cedex, Issn 0211-6499; M-26. 84-7790-140-6
- French, R. (1988) Hidráulica de Canales Abiertos, México: Ed. Mc.Graw-Hill Interamericana. Isbn 968-451-445-X, Isbn 0-07-022-134-0.
- Heras, R. (1983) Recursos Hidráulicos, Síntesis, Metodología y Normas, Madrid, España: Coop. de Publicaciones del Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Isbn: 84-380-0031-2.
- Kimball, B., (1960) On the choice of plotting positions on probability paper. Journal of the American Statistical Association 55: 546-560.
- Martinez M. (1986) Estadística Aplicada a la Hidrometeorología, Publicación D-47 del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, España, Isbn 84-505-7386-6.
- Monzalve Saenz, G. (1999) Hidrología En La Ingeniería, México: Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Isbn 958-682-106-4.
- Ogden, F. Ph.D. (1998) A Brief Description Of The Hydrologic Model Casc2d Associate Professor, Dept. Of Civil & Environmental Engineering, U-37, University Of Connecticut, Storrs, Ct 06269. [Http://Www.Eng2.Uconn.Edu/~Ogden/Casc2d/Casc2\\_Desc.Htm](http://Www.Eng2.Uconn.Edu/~Ogden/Casc2d/Casc2_Desc.Htm)
- Pouey, N. (1998) Erosión Hídrica en Cursos de Llanura sobre Lechos Cohesivos, U. N. Rosario, Rosario, Argentina: Ed. Unr Editora.
- Pouey, N. (1999) Azul, Marrón y Verde. Aspectos Metodológicos para la Elaboración de Modelos de EIA por Acciones Antrópicas en el Desarrollo de los Recursos Hídricos, U. N. Rosario, Rosario, Argentina: Ed. Unr Editora.
- Programa de Protección Contra Inundaciones, PPI - Supce - Dpoh-SFe - Succe, (2000), Seminario sobre Regulación del Uso del Suelo en Áreas Inundables, Santa Fe.
- PROINSA, (1994) Estudio Integral del Valle Inferior del Río Chubut: Obras para la Sistematización del Cauce y Protección Contra Inundaciones; Pcia. del Chubut.

- Sainz Trapaga J. y Malnero H. (1994) Operación de Embalse Ameghino bajo Severas Restricciones por Capacidad de Conducción del Cauce en el Valle Inferior del Río Chubut, Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Sainz Trapaga, J. (1996) Pequeñas Presas de Laminación de Crecidas Torrenciales en Proximidades de los Núcleos Urbanos del Valle Inferior del Río Chubut: Tipología de Obras y su Adaptación al Medio Ambiente. Monografía. Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior el Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- Schoklitsch, A. (1961) Tratado de Arquitectura Hidráulica, Barcelona, España: Edit. Gustavo Gili.
- Serra J. (1987) Virch: Problemática Hídrica: Pautas para su Estudio, Monografía, Informe Idth 2/87, Proyecto N°. 38/1986-1990, Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Virch, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. (1994) Caracterización Estadística Hidrológica del Río Chubut en Los Altares, Monografía, Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. (1994) Modelo <Rawson> Simulación Lluvia-Escorrentia en Pequeñas Áreas Llanas de la Meseta Semiarida Patagónica, con Escasez de Datos. Monografía. Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. (1994) Red de Monitoreo y Control Ambiental del Cauce del Valle Inferior del Río Chubut. Monografía. Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. (1999) El Riesgo Aluvional, Cuenco Aluvional del Área Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut. Monografía. Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos, Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. y Chachero M. (1995) Modelo <Virch> de Simulación de Hidrogramas de Crecidas Aluvionales y su Propagación en el Cauce Inferior del Río Chubut (Tomo I y Tomo II, Anexos), Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior el Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de La Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J. y Sainz Trapaga J. (1996) El Control Aluvional en Áreas Urbanas del Valle Inferior del Río Chubut, Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- Serra J., Ichazo, G., Sainz Trapaga, J., Clerici, F., Malnero, H.A. y Villegas, T. (1990) Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final, Proyecto N°. 38/1986-1990, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J., Malnero, H., Sainz Trapaga, J y Chachero, M.J., (2001) Caracterización de Crecidas y Riesgo Aluvional en el Valle Inferior del Río Chubut, Informe de Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos, Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J., Malnero, H., Chachero, M. y Sainz Trapaga, J. (2001) Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos, Informes de Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de La Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra J., Sainz Trapaga J., Malnero, H., Calderon, M., Chachero M., Rossi, C. y Ruibal, H. (2001) Estudios Básicos, Proyecto de Obras y Plan Director de Control de Crecidas para el Saneamiento del Arroyo Esquel, en la Provincia del Chubut. Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia

- San Juan Bosco y Consejo Federal de Inversiones. Pcia. del Chubut.
- Serra, J. (1997) Herramientas para la Evaluación de la Erosión Hídrica: Modelo <Laderas-V97.Xls>, de Estimación de Erosión en Laderas Torrenciales en el Área Aluvional Dique Ameghino - Boca Toma. Monografía. Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra, J. (1999b) Riesgo de Erosión Hídrica en el Cuenco Aluvional del Área Dique Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut, Pcia. del Chubut. Cuadernos del CURIHAM, Unesco, PHI, Issn No. 1514-2906, Rosario, Argentina, 5, (2), 67-88.
- Serra, J. (2000) Limitaciones de Disponibilidad Hídrica del Río Chubut para Nuevas Áreas Bajo Riego o Derivaciones para Otros Fines en el Valle Inferior, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Córdoba2000, Tomo II, Memorias, Área: Hidráulica de Riego y Drenaje, Pp. 693-702, Isbn 950-33-0267-6 / Isbn: 950-33-0270-6.
- Serra, J. y Bertoni, Juan C. (1982) Estudio y Proyecto de Control Aluvional Cerro La Zeta, Ciudad de Esquel, Inf. Bibl. Dgeyp, Mesop, Pcia. del Chubut.
- Serra, J. y Clérici, F. (1989) <Gaiman>, Modelo Matemático de Transformación Lluvia Caudal para Pequeñas Cuencas Aluvionales en Áreas de la Meseta Semiárida Patagónica, Informe Idth 7/89, Proyecto N°. 38/1986-1990, Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo Y Control del Virch, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Serra, J., (1984) Informe de Hidrología del Estudio de Control Aluvional Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut, Monografía, 43 Pgs., Inf. Bibl. Dgeyp, Mesop, Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J. y Sorondo, A. (1995) Reacondicionamiento de Cauce y Protección de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut: Plan Director, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (Corfo Chubut. Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J., Greco W., Malnero, H., Villegas, T. y Vazquez, V. (1992) Plan de Obras de Emergencia de Control de Crecidas Aluvionales, Informe de Revisión, Volumen 1 A 8, Mesop / Ipydu, Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J., Greco, W. y Malnero H. (1998) La Seguridad En Las Obras Hidráulicas de Control de Crecidas en Cuencos Aluvionales Urbanos del Valle Inferior del Río Chubut y Puerto Madryn. Documento de Evaluación Técnica. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Civil, Facultad de Ingeniería, U.N. de La Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J., Greco, W., Malnero, H., Vazquez, V. y Sorondo, A. (1997) Estudio Y Proyecto de Obras Complementarias de Control de Crecidas en Cuencas Urbanas de Puerto Madryn, Dolavon y Gaiman, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (Corfo Chubut. Pcia. del Chubut.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J., Malnero, H. y Chachero, María (2002a) Aspectos más Relevantes de la Problemática Hídrica en el Valle Inferior del Río Chubut, XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Abril de 2002, Centro Nacional Patagónico, Conicet, Puerto Madryn.
- Serra, J., Sainz Trapaga, J., Malnero, H., Greco W., Villegas, T. y Vazquez, V. (2000) Estudio de Refacciones y Mejoras al Sistema de Presas del Cañadón del Parque Industrial de Trelew, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (Corfo Chubut. Pcia. del Chubut.
- Sorondo, A., Serra, J. y Greco, W. (1984) Estudio de Control Aluvional y Desagües Pluviales de Puerto Madryn, Etapas I Y II, Tomos 1y2, 170 Pgs., Inf. Bibl. DGEyP, Mesop, Pcia. del Chubut.
- Stampone, J. y Cambra, H. (1990) Estudio Hidrogeológico de la Zona Central de la Meseta de Montemayor y su Vertiente Atlántica: Informe Final, Proyecto de Investigación 1988-1990, Secretaría de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- Stampone, J., Haller, M., Serra, J., Greco, W., Sorondo, A., Harvey, M. y Monti, A. (1998) Estudio del Impacto Ambiental Hidrodinámico Superficial y Subterráneo de los Efluentes de la Ciudad de Puerto Madryn, en Zona de Terraza, Informe de Convenio Facultad de Ciencias Naturales, U.N. Patagonia San Juan Bosco y Servicoop, Puerto Madryn.

### 3. INDICE DE CITAS

- B
- Bertoni, J., 27, 181, 183, 184, 186
- Beven, K., 180
- Beven, K., 33, 181
- C
- Caamaño Nelly, G., 22, 131, 132, 181, 184
- Chachero, M., 35, 143, 181, 182, 183, 185, 186
- Ch
- Chow, V., 23, 28, 32, 33, 43, 44, 66, 70, 72, 74, 81, 82, 84, 98, 102, 103, 131, 181, 203
- Clérici, F., 45
- D
- Doe, 181
- F
- Ferrer Polo, 68, 181, 184
- Fertonani, M., 180
- Fertonani, M., 21, 22, 131, 132, 181
- Francés García, F., 33
- H
- Haller, 137, 182, 186
- Heras, R., 27, 28, 29, 30, 31, 32, 131, 182, 184
- Horton, 196
- Hughes, W.*, 2, 182
- I
- Ichazo, 183, 185
- J
- Julien, 34, 180, 181, 182
- K
- Kirby, 180
- L
- Linsley, 31, 68, 70, 182
- Lopez Cadenas, 30, 57, 131, 182, 193
- M
- Malnero, H., 182, 183, 185, 186
- Michaud, 33, 179, 182
- Moore, 182
- O
- Ogden., F., 182, 184
- P
- Perez Soba Baro, A., 27, 28, 29, 30, 32, 60, 66, 131, 182
- Ponce, V., 33, 182
- S
- Saghafian, 181, 182
- Sainz Trápaga, J., 183
- Serra, J., 179, 180
- Serra, J., 1, 18, 27, 35, 38, 41, 43, 45, 46, 47, 77, 96, 97, 128, 132, 137, 142, 143, 170, 181, 182, 183, 185, 186
- Shames, 23, 183
- Sherman, 32, 64, 183
- Snyder, M., 32, 183
- Soba Baro, A., 27, 28, 29, 30, 32, 60, 66, 131
- Sorooshian, 33, 182
- Stampone, J., 137, 183, 186

T

Temez, 27, 183

Tucchi, 26

Tucchi, C., 26, 183

V

Villegas, 35, 182, 183, 185, 186

*W*

*Williams*, 2, 32, 182, 183

*Z*

Zucarelli, 131, 183

## *Apéndices*

## **VII. APÉNDICES**

### **1. MHIG, MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN. ASPECTOS FUNCIONALES**

#### **1.1. MENÚS, SUB-MENÚS Y BARRA DE HERRAMIENTAS:**

##### **○ MENU PRINCIPAL**

- Archivo
  - Nuevo Proyecto
  - Abrir un Proyecto Existente
  - Guardar Proyecto con otro nombre
  - Eliminar un Proyecto existente
  - Salir
  - Abrir el último archivo de trabajo
- Opciones
  - Opciones de Configuración
  - Ver funciones HSV en Represas
  - Ver funciones H-Q en Represas
- Entradas
  - Editor Gráfico de UEHs
  - Editor Tabla de UEHs y Componentes
  - Ver Tabla de parámetros físicos UEHs y componentes
  - Precipitaciones
- Proceso
  - Corre Proceso de cálculo para una tormenta
  - Corre Proceso de cálculo para varias tormentas PDR
  - Ver pizarra para variables y salidas parciales
- Salidas
  - Hietograma (Pp-t)
  - Hidrograma
  - Gráfico PDR por componente
  - Planilla PDR completa
  - Planilla PDR por componente
- Métodos empíricos
  - Fórmulas empíricas: estimación rápida de caudal pico y tiempo de concentración a partir de datos básicos en una cuenca
- Ayuda
  - Contenido
  - Acerca de MHIG 1.06
- Barra de Herramientas del Menú Principal

## 1.2. SUBPROGRAMAS Y FUNCIONALIDADES

Se describen a continuación un manual resumido para el usuario de MHIG.

### o **Archivo**

#### ▪ Nuevo Proyecto:

Genera un Proyecto nuevo. Un "Proyecto" es la unidad de trabajo para la simulación. En la ventana de diálogo que se despliega, ingresar un nombre para el Proyecto siguiendo las reglas usuales de denominación de archivos. Al aceptar, se creará un archivo de proyecto en el directorio de trabajo: "nombreConf.gai". Los archivos de proyecto son de formato texto y contienen la información básica y de configuración de un proyecto.

#### ▪ Abrir un Proyecto Existente:

Abre los archivos de trabajo de un Proyecto existente en el directorio de trabajo (archivos del tipo "nombreConf.gai" )

#### ▪ Guardar Proyecto con otro nombre:

Permite copiar un proyecto (guardar todos sus archivos con otro nombre).

#### ▪ Eliminar un Proyecto existente:

Permite eliminar todos los archivos de trabajo de un Proyecto. Al seleccionar esta opción, se despliega la ventana "Eliminar un Proyecto existente", con un mensaje de advertencia. Seleccionar el Proyecto ("nombreConf.gai"), al aceptar se eliminarán éste y todos los archivos relacionados.

#### ▪ Salir:

Opción de cerrar el programa MHIG 1.06.

#### ▪ Abrir el último archivo de trabajo:

La última línea de menú muestra el último archivo de proyecto utilizado. Clic para abrir el proyecto asociado.

### o **Opciones**

#### ▪ Opciones de Configuración:

Esta ventana muestra el formulario de carga de datos de configuración del Proyecto. Los datos sugeridos por defecto pueden modificarse. La ventana muestra bajo la barra el nombre del Proyecto activo, y debajo, 5 fichas:

Ficha Directorios: Establece el driver, directorio y archivo de trabajo, y otras opciones.

El archivo imagen (opcional) de la lista desplegable inferior, permite establecer una imagen de fondo para apoyar la construcción del diagrama de simulación. Se sugiere utilizar CAD u otra aplicación externa para dibujar un diagrama auxiliar de cuencas y subcuencas, divisorias principales y secundarias, cauces y otros elementos hidrológicos de interés, luego convertirla a formato imagen (admite formatos tipo bmp, jpg, gif o wmf). La imagen de fondo o mapa base solo interviene como auxiliar al diagrama de simulación; si se dibuja a escala, podrán estimarse luego longitudes y áreas desde el Editor Gráfico de UHE .

*Fichas Imagen y Ver*: Escala de la imagen de fondo: Ingresar el valor en metros/píxel. Permite estimar luego longitudes y superficies desde la pizarra del Editor Gráfico UHE. Ej.: El valor por defecto es '0' (sin escalar).

Ancho máximo del diagrama en Píxel (opcional): Por defecto se adopta en 800. Parámetro de salida del Hidrograma: Es el tiempo (en minutos) adicional a la duración de la tormenta para el cálculo y dibujo del Hidrograma de salida de cada componente. Ej.: un valor de ' 120 ' indica que los gráficos y tablas de salidas de hidrogramas se extenderán 2 horas más de la duración de la tormenta.

Ficha Recurrencias (períodos de retorno, en años): Permite seleccionar los períodos de retorno o recurrencia (R) para los informes de salidas (Gráfico, Tabla). Por defecto, selecciona los períodos de 2, 5, 10, 20, 25, 40, 50, 100, 200. 1000 años. Cuando se corre la opción de proceso "Corre proceso de cálculo para varias tormentas PDR", solo se procesarán las tormentas seriadas de recurrencias seleccionadas.

Ficha DuraciónPp (Duración de la tormenta en minutos): Permite seleccionar la Duración (D) de tormentas para los informes de salidas (Gráfico, Tabla). Por defecto, selecciona los períodos de 2, 5, 10, 20, 25, 40, 50, 100, 200. 1000 años. Cuando se corre la opción de proceso "Corre proceso de cálculo para varias tormentas PDR", solo se procesarán las tormentas seriadas de Duraciones seleccionadas.

**Títulos:** Permite ingresar Título del Proyecto, Ubicación, Cuenca o Unidad Hidrológica de Estudio (UEH), Subcuenca o Unidad Hidrológica Elemental (UHE), Operador, Fecha. Los datos que se ingresen son ilustrativos (encabezado de informes) y no intervienen en el cálculo. Haciendo "doble Clic" en fecha se inserta automáticamente la fecha actual.

- **Ver funciones HAS en Represas:**

(Sugerencia: Ver primero el Menú de Entradas, Editor Gráfico, Propiedades de Represas). Permite verificar las funciones de Altura  $H$ [metros], Área  $A$ [has] y Almacenamiento o Volumen  $S$ [m<sup>3</sup>] de una represa cuando en un diagrama se han incluido una o más presas. Abrir previamente el Editor Gráfico de UHE, Clic en la pizarra para activar el editor. Pulsar el botón de comando "Editar Tabla HAS" y cargar los datos de la tabla (para mayor información ver el Menú Principal "Entradas", "Propiedades de Represa") . Observar el Nro de Represa asociado al nombre. Cerrar la ventana del editor y seleccionar Opciones\Ver funciones HAS en Represas, del MenúPrincipal. Responder al cuadro de diálogo el Nro. de Represa deseado. Se presentan dos opciones de verificación:

Opción 1) Tabla HAS: Responder el valor incremental de 'H' o aceptar el sugerido por defecto. Se mostrará la tabla de cálculo resultante de aplicar las funciones o tablas previamente cargadas .

Opción 2) Verificar todas las funciones:  $S(h)$ ,  $h(S)$ ,  $A(h)$  y  $h(A)$ . Se mostrará la tabla de cálculo resultante de aplicar las funciones o tablas previamente cargadas en función de la altura  $H$ , del Área  $A$  y del Almacenamiento  $S$ .

- **Ver funciones H-Q en Represas:**

(Para ver esta función vea primero el Menú de Entradas, Editor Gráfico, Propiedades de Represas).

Permite verificar las funciones de altura  $H$ [metros], Caudal  $Q$ [m<sup>3</sup>/s] de una represa cuando en un diagrama se han incluido una o más presas. Abrir previamente el Editor Gráfico de UHE, Clic en la pizarra. Cargar las funciones H-Q desde el menú Propiedades. Observar el Nro de Represa asociado al nombre. Cerrar la ventana del editor y seleccionar Opciones\Ver funciones H-Q en Represas, del MenúPrincipal. Responder al cuadro de diálogo el Nro. de Represa deseado. Ingresar luego el incremental  $dH$  deseado para verificar la tablaH-Q.

- **Entradas**

- **Editor Gráfico de UEHs (F2)**

Simulación hidrológica: La simulación hidrológica de uno o más sistemas o subsistemas independientes están conformados por cuatro componentes hidrológicos básicos, a saber:

- 1- UEHs (Unidades Hidrológicas Elementales o Subcuencas): es el área hidrológica menor en la simulación y sus características hidrológicas se consideran invariables en el espacio (modelo de tipo "agregado" o vectorial). En la práctica, constituyen subcuencas, aunque en áreas de llanura o de meseta se prefiere denominarlas como Unidad Hidrológica de Estudio (UHE)
- 2- Cauces: representa tramos de cauce o escurrimiento superficial. Puede ser temporario o permanente.
- 3- Represas: representa presas y embalses con sus estructuras hidráulicas de descarga.
- 4- Lagos o Lagunas: representa toda forma de almacenamiento superficial temporario o permanente, tales como lagos, lagunas, mallines, etc.

Cada componente se ordena y jerarquiza para conformar la ruta de escurrimiento superficial.

- **Editor Tabla de UEHs y Cauces (F3) :**

La ventana del Editor de UEHs y Cauces (en formato tabla) se abre desde el Menú Principal, o con la secuencia de teclas Alt, E, T, o con la tecla de función F3. Una vez efectuado el prediseño del diagrama desde el Editor Gráfico, el Editor Tabla facilita la modificación de determinados campos de datos precargados. Los campos de datos de UEHs y de cauces se alinean fila a fila por número de componente. Las celdas griseadas no pueden ser modificadas. Las celdas en fondo blanco pueden ser editadas y modificar su contenido en texto o en número (parámetros físicos). Una vez modificados los valores pulsar "Aceptar", o bien el botón "Cancelar" para anular los datos modificados.

- **Ver Tabla de parámetros físicos UEHs y componentes (F4)**

La ventana del Parámetros físicos de UEHs y Componentes (en formato tabla) se abre desde el Menú Principal, o con la secuencia de teclas Alt, E, F, o con la tecla de función F4. Una vez efectuado el prediseño del diagrama desde el Editor Gráfico, esta Tabla muestra fila a fila todos Los campos de datos cargados y para todos los componentes ordenados por su número de ID. El botón Actualizar cambios, asegura mostrar la última información modificada, en caso de que la ventana esté abierta con anterioridad al Editor Tabla.

### o **Precipitaciones (F5)**

Esta selección del Menú Principal abre la ventana del formulario de Carga de datos de Precipitación; (o la secuencia de teclas Alt, E, P, o la tecla de función F5). El formulario dispone de cuatro cuadros de carga: 1) Arriba, permite seleccionar la forma de ingresar datos de entrada de lluvias al modelo del modelo. Dependiendo de la forma elegida, se activan o desactivan opciones de carga de la lluvia, de su distribución areal o temporal, y del paso o intervalo de cálculo del modelo.

Forma de ingresar datos de Entrada de lluvias al modelo: Opciones "a" y "b", para correr una tormenta (PDR) de distribución espacial uniforme y presentar un informe detallado; opción "c", para correr una serie de tormentas (tormentas anidadas) y presentar un resumen de resultados; opción "d" para correr una tormenta de distribución espacial no uniforme; opción "e" para correr una tormenta real de distribución espacial uniforme.

a) Ingresar PDR: Permite ingresar una lluvia  $P_p$  [milímetros], su duración de tormenta asociada  $D$  [minutos], y su Recurrencia o Período de Retorno  $R$  [años];  $R=0$  es indicativo de período de retorno desconocido. El botón de comando "Carga tormenta a lista b)" permite guardar en memoria la terna PDR para futuras cargas rápidas de datos (con opción b). Ingresada una terna PDR, corresponde optar por una forma de "distribución temporal" de la tormenta; el cuadro de entrada inferior muestra distintas opciones teóricas (distribución uniforme, distribución de López Cadenas) y funciones de distribución temporal de tormentas tipo para la región del VIRCh (Valle Inferior del Río Chubut, Argentina); también permite generar hasta 3 distribuciones personalizadas

Distribuciones temporales personalizadas de  $P_p$ : optando por una de las tres funciones personalizadas y pulsando el botón de comando "cargar distribución personalizada" se accede al formulario de carga de una distribución temporal. El usuario dispone de hasta tres funciones personalizadas. El formulario dispone en su parte superior de un selector de número de función de distribución personalizada (1, 2 ó 3) y un cuadro de texto para observaciones o notas. A la derecha, un cuadro de texto para el número de filas de datos a ingresar en la tabla. El período de validez permite indicar la duración mínima y máxima de tormenta para la cual la distribución es aplicable. AL centro del formulario, la tabla permite ingresar para cada período  $t$  [%] los datos secuenciales de  $P_p$  parcial en [%]; a la derecha muestra los valores acumulados. El formulario dispone de botones de comandos para borrar la tabla, aplicar los datos, cancelar y cerrar. Nota: Observe que los períodos y precipitaciones parcial y total por cada período son expresados en porcentaje (%).

Paso del modelo: En la parte inferior, dos selectores permiten informar el intervalo de cálculo para las entradas de lluvia y el intervalo de salida del hidrograma, ambos expresados en [minutos]. El paso de Salida (hidrograma) debe ser igual o menor al de Entrada (lluvia).

Una vez cargados estos datos, la función  $P_p-t$  puede verse en forma gráfica (botón de comando "Gráfico P-T", o tabulada (botón de comando "Ver Tabla P-t").

El formulario dispone de botones de comando Aplicar, Cancelar y Aceptar.

b) Cargar una tormenta PDR desde lista archivada. Esta opción de forma de ingreso activa el cuadro "b) Ingresar tormenta PDR desde lista", cuyas ternas de datos PDR han sido cargadas pulsando el botón de comando del cuadro a) "Cargar tormenta a lista b)". El resto de las opciones es similar al descrito para la forma a) de ingreso de lluvias.

Distribución temporal y paso del modelo, botones de comando de formulario: ídem punto anterior ("a) Ingresar PDR")

c) Cargar una tabla P-D-R desde archivo. Esta opción permite cargar una tabla que contiene una serie de tormentas de PDR diferentes, para corridas seriadas (o "anidadas") del modelo. Esta opción activa el cuadro "c) Ingresar una tabla  $P_p-D-R$ ", que dispone a su vez de cuatro botones de opciones de carga. El primer botón de opción, carga la tabla PDR ara la región del VIRCh (100 tormentas hipotéticas o sintéticas). Los otros tres botones de opción permiten seleccionar y cargar hasta tres tablas personalizadas.

Cargar Tabla: El botón de comando adjunto permite abrir el formulario de carga personalizada. En su parte superior, el formulario dispone de un selector de cuatro opciones (0, para serie de tormentas PDRs en el VIRCh) y tres tablas personalizadas. Presenta un cuadro de texto para observaciones o notas. El "número de tormentas" es indicativo del número de filas a ingresar en la tabla. Definido el número de filas (o tormentas) deben ingresarse fila a fila la terna de valores PDR para cada tormenta hipotética o sintética.

Distribución temporal y paso del modelo, botones de comando de formulario: ídem punto anterior ("a) Ingresar PDR").

IMPORTANTE: Esta opción de forma (cargar una tabla PDR) es válida solo para "corridas anidadas" del modelo. La modelación se efectúa para una serie de tormentas y los resultados presentados resumen el caudal pico, escorrentía y coeficiente de escorrentía para cada tormenta y para cada componente.

4d ) Cargar una P-D-R por cada UHE. Esta opción permite cargar una lluvia diferente para cada UHE (asume una distribución temporal uniforme). El botón de comando "cargar datos" abre el formulario de carga para cada UHE, su duración de tormenta "D" y recurrencia "R" asociadas. Incluye botones de comando Borrar Tabla, Aplicar, Cancelar y Cerrar.

4d ) Lluvias Reales. Permite ingresar datos de una lluvia real.

Esta opción, habilita en el cuadro de carga de datos o de "variables y parámetros para formas de lluvia de distribución uniforme" un Selector de Caso de tormenta real. El selector muestra una lista de diferentes tormentas reales en la región del VIRCh. El botón de comando adjunto ("Cargar lluvia real P-T") abre el formulario para selección de una lluvia real existente o carga de una nueva tormenta.

Para "agregar una nueva tormenta" pulsar el botón adjunto con esa descripción, a fin de habilitar el formulario de carga; se abrirá un diálogo de consulta sobre el nombre de la nueva tormenta, sugiriendo un nombre por defecto. Al aceptar, se mostrará una ventana de carga compuesta de un selector para ingresar el paso o intervalo de tiempo (en minutos), la fecha (dd/mm/aa) y hora inicial (hh:mm) , la fecha y hora final y el número de filas para la tabla de carga de datos. En la tabla, ingresar en la columna habilitada (cuarta) la precipitación parcial ocurrida en el período (en milímetros). Al pie del formulario de carga, se presentan botones de comando de Borrar tabla, Aplicar, Cancelar y Cerrar.

El botón "Gráfico" muestra el gráfico resultante (Pp-t) para los datos cargados. En esta opción, solo se habilita informar el paso de tiempo (intervalo) de salida en el hidrograma.

#### o **Proceso**

Corre Proceso de cálculo para una tormenta (F11)

Una vez cargado los datos físicos del sistema hidrológico (diagrama y propiedades de componentes (UHE/Cauces/Lag/Represas) y de Precipitación, puede efectuarse la corrida del modelo para una tormenta o para una serie de tormentas. La corrida de "una tormenta" requiere que en el formulario de carga de Precipitaciones estén completos los datos requeridos para las formas de ingresos de lluvia "a", "b", "d" o "e". Las corridas del modelo dan como resultados el hidrograma y su tabla detallada para cada componente.

Corre Proceso de cálculo para varias tormentas PDR (F12)

Una vez cargado los datos físicos del sistema hidrológico (diagrama y propiedades de componentes (UHE/Cauces/Lag/Represas) y de Precipitación, puede efectuarse la corrida del modelo para una tormenta o para una serie de tormentas. La corrida de una "serie de tormentas" (tormentas anidadas) requiere que en el formulario de carga de Precipitaciones estén completos los datos requeridos para las formas de ingreso de lluvia "c". Las corridas del modelo dan como resultados el un ábaco resumen de caudal pico, escorrentía y coeficiente de escorrentía por tormenta y por cada componente. Las corridas seriadas pueden tardar varios minutos, dependiendo de la cantidad de componentes del diagrama de simulación, el paso de cálculo elegido, la cantidad de tormentas seleccionadas (PDR).

Ver pizarra para variables y salidas parciales (Ctrl+F11)

Cuando esta selección del menú principal está activada se muestra la pizarra de cálculo con un detalle de cada proceso sub-proceso de cálculo por componente.

#### o **Salidas**

Hietograma (Pp-t): Muestra el gráfico Pp-t para la lluvia cargada en el formulario de precipitaciones (función de Entrada del modelo)

Hidrograma: Una vez efectuada la carga de datos y corrida del modelo, la selección Hidrograma del menú principal muestra el gráfico de la función Q-t para cada componente. La ventana se abre automáticamente luego de cada corrida o bien se activa desde "Salidas" del Menú Principal, ( Ctrl+H ). El formulario gráfico de salida, presenta:

Sección de identificación del componente mostrado (títulos de la parte superior);

Selector de componente: un selector de componente, con la gráfica parcial resultante de cada uno de los componentes simulados;

Dos selectores desplazables, para redefinir gráficamente la duración D y o la Precipitación P de la tormenta (Hidrograma dinámico).

Dos botones de comandos para modificar la escala de los ejes ( en más o en menos);

Un botón de comando para alternar en el eje "X" unidades de [minutos] o de [horas],

Gráfico QDR por componente

Una vez efectuada la carga de datos y corrida del modelo, la selección de "Gráfico QDR por componente" del menú principal muestra el gráfico resumen para cada componente, resultante de las corridas para serie de tormentas. La ventana se abre automáticamente luego de cada corrida o bien se activa desde "Salidas" del Menú Principal. El formulario gráfico de salida, presenta:

Sección de identificación del componente mostrado (títulos de la parte superior e inferior);

Selector de componente: un selector de componente, con la gráfica parcial resultante de cada uno de los componentes simulados;

Selector de variable de representación (caudal pico, escorrentía, coeficiente de escorrentía);

Dos botones de comandos para modificar la escala de los ejes ( en más o en menos);

Planilla QDR completa / Planilla QDR por componente: Los resultados de la corrida para serie de tormentas mostrada en el ábaco "Gráfico PDR por componente" se puede observar en detalle en la tabla que se activa con la selección "Planilla PDR completa". Esta planilla muestra un detalle de resultado parcial para la corrida seriada, en dos formatos: completa y por componente.

#### o **Métodos empíricos**

Fórmulas empíricas: Contiene fórmulas empíricas conocidas para la estimación rápida (en orden de magnitud) de caudal pico y tiempo de concentración a partir de datos básicos en una cuenca. Apoyando el mouse (sin Clic) el nombre se despliega un texto rápido con la fórmula de cálculo.

Caudal Pico  $Q_p$  [m<sup>3</sup>/s] : Panel izquierdo del formulario. Arriba, se ingresa en el cuadro de texto el área de la cuenca en Km<sup>2</sup>. En el cuadro inferior se muestran distintas expresiones.

Tiempo de Concentración  $t$  [minutos]: Panel derecho del formulario. Arriba a la derecha, se ingresan datos en los cuadros de texto de longitud del cauce principal, desnivel máximo y pendiente media del cauce más largo. Abajo, se muestran los resultados de las expresiones de California Culvert, Ventura y SCS-US.

#### o **Ayuda**

Contenido

Esta ayuda de la Aplicación <MHIG 1.06>, incluye una introducción referida al modelo hidrológico, sus subprocesos y sub-modelos, recomendaciones para la instalación, la Guía de la Aplicación Gaiman (GAG) y la Guía de Ejemplos y Aplicaciones. Complementariamente a este menú de ayuda, el modelo incluye un archivo demo o guía rápida de la aplicación (demo.pps) y un archivo (GMRT.pdf) con la Guía de Modelos y Referencias Técnicas (GMRT). Ir al Menú Principal de la Ayuda de Gaiman.

## o El Editor Gráfico de UEHs:

Permite crear la simulación hidrológica a partir de sus componentes hidrológicos básicos y asignarle propiedades (ordenarlos, jerarquizarlos, y caracterizarlos por sus parámetros hidrológicos). La ventana del editor gráfico se abre desde "Entradas" del Menú Principal, o la tecla de Función F2 o el botón de la barra de herramientas. Con el Editor Gráfico de UHE, se puede:

- Crear componentes UEHs, Cauces, Represas o Lagos/Lagunas,
- Ubicar los componentes en el diagrama y ordenarlos,
- Jerarquizar los componentes conforme su descarga superficial (acoples),
- Caracterizar los componentes mediante parámetros físico-hidrológicos,
- Editar un componente para moverlo, modificar sus parámetros, o modificar su descarga,
- Eliminar un componente,
- Efectos visuales:
  - Zoom (aumentar o reducir la imagen ,o desplazar vertical u horizontalmente del diagrama,
  - Visualizar el "orden" (Criterio de Horton) de cada componente cauce,
  - Visualizar diferentes espesores de componentes,
  - Visualizar un mapa base imagen de fondo, auxiliar del diagrama,

La Ventana del "Editor Gráfico de UHE": Está compuesta por:

- La Barra de Herramientas superior,
- La Barra de Herramientas izquierda,
- La Barra de Herramientas derecha (botones) o principal,
- La Línea de Estado inferior,
- La pizarra de dibujo (diagrama del sistema o modelación)
- El Menú contextual (Clic botón secundario del mouse)

Cada elemento dispone de una ayuda rápida descriptiva, del tipo "Tip Text" que se despliega con solo apoyar el cursor sobre el mismo, sin pulsar.

La "Barra de Herramientas Superior", (de izquierda a derecha de la pantalla):

Barra de desplazamiento horizontal: desplaza horizontalmente el diagrama sin modificar la escala.

Botón "Imagen": Habilita / Deshabilita la imagen de fondo (admite formatos tipo bmp, jpg, gif o wmf) representativo del mapa base de la Cuenca o Unidad Hidrológica de Estudio. Nota: el Mapa Base debe estar previamente configurado (ver el archivo imagen en Ficha Directorio Opciones\Opciones de Configuración del Menú Principal).

Botón "Espesor": Permite variar el espesor de trazos y tamaño de íconos del diagrama en seis formas diferentes.

Botón "Orden de Cauce": Presenta el número de orden de cada tramo de cauce (Criterio de Horton). Pulsando nuevamente se deshabilita.

Variabes de Estado X, Y: Muestra a la derecha los valores X e Y de posición del cursor del mouse (sistema de coordenadas flotantes del gráfico). Son ilustrativas y no están escaladas.

La "Barra de Herramientas Izquierda": (de arriba a abajo),

Barra de desplazamiento vertical: desplaza verticalmente el diagrama sin modificar la escala.

Selector de Escala del diagrama: Permite modificar la Escala en pantalla del diagrama (zoom). Con un "doble Clic" se centra y escala automáticamente al tamaño completo en la pantalla.

La "Barra de Herramientas Derecha" (botones) o principal:

Dispone de los botones de comando para la creación y edición del diagrama. Para mejorar el diseño de los componentes hidrológicos del sistema es conveniente habilitar la función de imagen de fondo del mapa base, que contenga divisorias de aguas o línea de frontera tributaria, subcuencas o unidades hidrológicas de estudio, cauces, líneas preferenciales de flujo mantiforme, aguadas y depresiones lagunares, u otros componentes hidrológicos. La barra de herramientas principal del editor está compuesta por:4

Botón UHE, : Inserta en el diagrama una Unidad Hidrológica Elemental o Subcuenca. La acciones que habilita este botón son:

- Un Clic de botón principal del mouse: habilita la función de carga de UHEs, el cursor del mouse se transforma en "cruz",
- Desplazamiento: se desplaza libremente el cursor en cruz hasta el punto de inserción en la pizarra gráfica (diagrama),
- Se efectúa otro "Clic" para insertar el componente UHE, se abrirá una ventana de consulta por el nombre del componente; asignar un nombre de hasta 12 letras y aceptar. Deberá aparecer en el diagrama un ícono de UHE y su nombre, precedido del texto "u-" que identifica el tipo de componente (UHE). El cursor seguirá en "cruz" para habilitar nuevas inserciones de UHEs. Para desactivar, pulsar en cualquier otro botón o en Salir. Es conveniente "Guardar" periódicamente el diagrama para resguardar los cambios.
- El orden en que se ingresa cada UHE es indistinto.

Botón "Borra": Elimina todos los componentes del diagrama. Esta opción no se puede "deshacer", a menos que no guarde los cambios.

Botón Cauce, : Inserta en el diagrama un tramo de cauce o curso de agua superficial. Un tramo de cauce queda representado por una serie de segmentos trazados como una polilínea de puntos intermedios.

Las acciones que habilita este botón son:

- Un Clic de botón principal del mouse: habilita la función de carga de UHEs, el cursor del mouse se transforma en "cruz",
- Desplazamiento: se desplaza libremente el cursor en cruz hasta el lugar de inserción en la pizarra gráfica (diagrama) del "punto final o salida del tramo de cauce".

Trazar segmentos indicativos del tramo de cauce: Seguidamente, se desplaza el cursor hacia "aguas arriba" y pulsa otro "Clic" para marcar un segundo punto que define el primer segmento del cauce; se puede continuar el trazado de segmentos desplazando y pulsando el mouse repetidamente. El máximo número de puntos de trazado de un tramo es 20.

Finalizar el trazado del tramo: Al llegar al punto inicial o de entrada al tramo (aguas arriba) pulsar un "doble Clic" (o la tecla "enter") para finalizar el trazado del tramo. Se desplegará una ventana de consulta por el nombre del componente; asignar un nombre de hasta 12 letras y aceptar. Deberá aparecer en el diagrama un ícono de "cauce" y su nombre, precedido del texto "c-" que identifica el tipo de componente "cauce".

El cursor seguirá en forma de "cruz" para habilitar nuevas inserciones de tramos de cauces. Para desactivar, pulsar en cualquier otro botón o en Salir. Es conveniente pulsar "Guarda" para resguardar los cambios.

- IMPORTANTE: 1) Los tramos de cauce se trazan desde "aguas abajo" hacia "aguas arriba", es decir, se comienza con el primer punto de inserción en la "salida" del tramo y se finaliza con el último punto en la "entrada" del tramo. De esta forma el programa reconoce el sentido de la circulación del agua superficial. 2) La cantidad de puntos de trazado de cada tramo varía desde 2 (un segmento) a un máximo de 20 puntos. 3) una mayor cantidad de puntos puede asemejar mejor el tramo al mapa representativo del ícono de cauce y no interviene en el cálculo.

- El nombre del componente "cauce" se desplegará junto al primer segmento (2do. vértice).
- El orden en que se ingresan los tramos es indistinto, cada tramo es un componente independiente.

Botón LAG, : Inserta en el diagrama una depresión lagunar (Lago/Laguna/mallín). La acciones que habilita este botón son:

- Un Clic de botón principal del mouse: habilita la función de carga de LAGs, el cursor del mouse se transforma en "cruz",
- Desplazamiento: se desplaza libremente el cursor en cruz hasta el punto de inserción en la pizarra gráfica (diagrama),
- Se efectúa otro "Clic" para insertar el componente LAG, se abrirá una ventana de consulta por el nombre del componente; asignar un nombre de hasta 12 letras y aceptar. Deberá aparecer en el diagrama un ícono de LAG y su nombre, precedido del texto "u-" que identifica el tipo de componente (LAG). El cursor seguirá en "cruz" para habilitar nuevas inserciones de LAGs. Para desactivar, pulsar en cualquier otro botón o en Salir.
- El orden en que se ingresa cada LAG es indistinto.

Botón Represa, : Inserta en el diagrama una represa. Las acciones que habilita este botón son:

- Un Clic de botón principal del mouse: habilita la función de carga de Represas, el cursor del mouse se transforma en "cruz",
- Desplazamiento: se desplaza libremente el cursor en cruz hasta el punto de inserción en la pizarra gráfica (diagrama),
- Se efectúa otro "Clic" para insertar el componente Represa, se abrirá una ventana de consulta por el nombre del componente; asignar un nombre de hasta 12 letras y aceptar. Deberá aparecer en el diagrama un ícono de Represa y su nombre, precedido del texto "u-" que identifica el tipo de componente (Represa). El cursor seguirá en "cruz" para habilitar nuevas inserciones de Represas. Para desactivar, pulsar en cualquier otro botón o en Salir.
- El orden en que se ingresa cada Represa es indistinto.

Botón Borra: Elimina todos los componentes insertos en la pizarra, dejando el archivo del diagrama en blanco. Esta acción no se puede deshacer, (a menos que no se guarde al salir de la pantalla).

Botón L/Área : Permite estimar longitudes y superficies de polilíneas. Para una mejor precisión se recomienda el cálculo de longitudes y superficies en una aplicación específica (CAD). No obstante, esta herramienta permite al usuario una estimación rápida y aproximada si se activa la imagen del mapa de fondo y se Escala (ver archivo imagen y Escala de la imagen de fondo en Ficha Directorio del Opciones\Opciones de Configuración, del Menú Principal ). Una vez activada la imagen y la Escala, se puede aplicar la herramienta de medición. Pulsar el botón L/Área para activar la función, el cursor se transforma en "cruz". Desplazar el cursor al punto de inserción de la línea (longitud) o superficie (perímetro y área) a medir; recorrer la línea (o el perímetro de la figura plana en el sentido de las agujas del reloj) trazando pequeños segmentos de polilínea haciendo "Clic" con el mouse; finalizar con doble Clic o Enter; se desplegará una ventana de consulta si la poligonal trazada es abierta (línea) o cerrada (superficie). Al responder se mostrará un cuadro mensaje con la longitud (línea o el perímetro y superficie (figura plana).

Botón Selección: Permite seleccionar o deseleccionar un componente para editarlo (UHE, Cauce, LAG, Represa) . Las operaciones de edición permitidas son:4

Editar UHE: para entrar en modo edición pulsar el botón selección (flecha) y luego pulsar en el centro del ícono de la UHE a editar, deberá formarse una línea perimetral en rojo en el ícono. Para "deseleccionar" un elemento hacer Clic en otro elemento o bien en el botón de selección. En estado de edición del componente UEH, se puede:4

Mover UHE: mueve el ícono de la UHE. Si el ícono está "acoplado" a otro componente el ícono de UHE se desplaza pero no su conexión. Para desplazarlo debe tenerse pulsado el botón principal del mouse y soltarlo en la nueva posición (arrastre).

Editar Propiedades de UHE: La ventana de "Propiedades de UHE" se despliega haciendo doble Clic con el botón principal del mouse sobre un ícono de UHE seleccionado. También se accede desde el Pop-Up Menú o menú secundario del Editor, haciendo un "Clic" con el botón secundario del mouse sobre la pizarra y seleccionando "Editar Propiedades de UHE". Una tercer manera directa de acceder a este formulario -estando activa la pizarra de dibujo- es pulsar la tecla de función "F3".

Acoplar UHE: Un componente UHE debe ser conectado (acoplado) a un componente Cauce, LAG o Represa, para indicar al programa adonde descarga sus excedentes superficiales (un componente UHE no puede acoplarse a otro componente UHE). Los acoples de UHE pueden efectuarse por uno de los siguientes tres métodos:

Acople Gráfico: Para conectar una UHE a otro componente debe primero entrar el mismo en modo edición (perímetro de ícono en rojo), luego pulsar con el botón principal del mouse el "círculo" inferior y efectuar una operación de "arrastré" del punto rojo hacia una de estas tres opciones:

- a) el punto inicial de un tramo de cauce, (acople a cauce);
- b) el centro de un ícono de LAG, (acople a Lago/Laguna);
- c) el centro de un ícono de Represa, (acople a Represa).

Responder afirmativamente al mensaje de pedido de confirmación del acople. Al finalizar la acción deberá quedar unido (acoplado) el ícono de UHE con el componente pretendido (si es un tramo de cauce con su punto de entrada, aguas arriba).

Acople desde Propiedades UHE: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de UHE la ventana de "Propiedades de la UHE" (o seleccionar el ícono y pulsar F3); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente (Cauce, LAG o Represa) hacia el cual tributa.

Acople desde el Menú Contextual: habilitar la herramienta de selección, seleccionar el componente de la UHE, seleccionar el componente hacia el que tributa (Cauce, LAG, Represa); con los elementos seleccionados (íconos con bordes rojo) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra del diagrama para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ). Seleccionar "Acoplar UHE a..." (Cauce, Lago Represa).

Nota: Los acoples o conexiones UHE quedan identificados en el ícono por un punto rojo.

Desacoplar UHE: El desacople (desconectar) de un componente UHE de otro componente (Cauce, LAG o Represa), puede efectuarse por una de las siguientes dos maneras:

Desacople desde Propiedades UHE: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de UHE la ventana de "Propiedades de la UHE" (o seleccionar el ícono y pulsar F3); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente "0" o "Ninguno".

Desacople desde el Menú Contextual: habilitar la herramienta de selección, seleccionar el componente de la UHE a desconectar (ícono con bordes rojo) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra del diagrama para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ); seleccionar "Desacopla UHE".

Editar Cauce: para entrar en modo edición pulsar el botón selección (flecha) y luego pulsar uno de los vértices del ícono del tramo de Cauce a editar, deberá formarse un trazado color gris en el ícono. Para "deseleccionar" un elemento hacer Clic en otro elemento o bien en el botón de selección. En estado de edición del componente Cauce, se puede:4

Mover Cauce: modifica vértices de segmentos de trazado del ícono Cauce. Con el tramo seleccionado (color gris), hacer "Clic" con el botón principal del mouse sobre un vértice que se desee mover -deberá mostrar un pequeño cuadrado en rojo indicativo de "vértice en edición"-, mantener pulsado el botón y desplazar el cursor, soltarlo en la nueva posición (arrastré). Si se mueve el último vértice y éste está acoplado por otro componente tributario (punto rojo), el acople se mueve junto al vértice.

Editar Propiedades de Cauce: La ventana de "Propiedades de Cauce se despliega haciendo doble Clic con el botón principal del mouse sobre un ícono de Cauce seleccionado. También se accede desde el Pop-Up Menú o menú secundario del Editor, haciendo un "Clic" con el botón secundario del mouse sobre la pizarra y seleccionando "Editar Propiedades de Cauce". Una tercer manera directa de acceder a este formulario -estando activa la pizarra de dibujo- es pulsar la tecla de función "F4"

Acoplar Cauce: Un componente Cauce puede ser conectado (acoplado) a otro Cauce o a un componente LAG o Represa (para indicar al programa donde descarga sus excedentes superficiales); si no se acopla (acople "0") el tramo de cauce es un componente final o salida del sistema. Un elemento Cauce no puede ser tributario de un componente UHE. Los acople de Cauce pueden efectuarse por uno de las siguientes maneras:

Acople Gráfico:

Acople gráfico "Cauce a Cauce": Desde el modo edición, seleccionar el tramo de cauce tributario de otro cauce (deberá quedar el tazado en color gris); clic con el botón principal del mouse sobre el punto extremo de "aguas abajo" (deberá mostrar un pequeño recuadro rojo, indicativo de modo edición "mover vértice"); tomar el punto sin soltar el botón y desplazarlo hasta el punto extremo de "Aguas arriba" del Cauce receptor (arrastré) y soltar el botón; aceptar la consulta sobre la acción de conexión.

Acople gráfico de "Cauce a LAG o Represa": No se puede acoplar en forma gráfica directamente un cauce a una Represa o Lago/Laguna, pero sí de manera indirecta entre dos cauces: 1) Conectar primero un cauce tributario a otro cauce; b) Conectar luego una Represa o LAG al punto (rojo) de conexión entre ambos cauces (al confirmar, deberá quedar en el diagrama el primer cauce aportando a la represa o LAG, y ésta aportando al cauce receptor). (ver acople de Represa y LAG)

Acople desde Propiedades Cauce: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de Cauce la ventana de "Propiedades del Cauce" (o pulsar F4, estando activa la pizarra de dibujo); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente (Cauce, LAG o Represa) que recibe.

Acople desde el Menú Contextual: Seleccionar el componente del primer Cauce (tributario), seleccionar luego el componente receptor (Cauce, Represa o LAG); con los elementos seleccionados (íconos grises) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ). Seleccionar "Acoplar Cauce 1 a Cauce 2" (o "a Represa" o "a Lago" según corresponda).

Desacoplar Cauce: El desacople (desconectar) de un componente Cauce de otro componente (Cauce, LAG o Represa), puede efectuarse por una de las siguientes dos maneras:

Desacople desde Propiedades Cauce: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de Cauce la ventana de "Propiedades de Cauce" (o seleccionar el ícono y pulsar F4); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente "0" o "Ninguno".

Desacople desde el Menú Contextual: habilitar la herramienta de selección, seleccionar el componente de Cauce tributario a desconectar (ícono gris) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra del diagrama para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ); seleccionar "Desacopla Cauce".

Editar Lago o Represa: para entrar en modo edición pulsar el botón selección (flecha) y luego pulsar en el centro del ícono de la Lago o Represa a editar; deberá formarse una línea perimetral en rojo en el ícono. Para "deseleccionar" un elemento hacer Clic en otro elemento o bien en el botón de selección. En estado de edición del componente Lago o Represa, se puede:4

Mover Lago o Represa: mueve el ícono de Lago o Represa. Si el ícono está "acoplado" a otro componente el ícono de Lago o Represa se desplaza pero no su conexión. Para desplazarlo debe tenerse pulsado el botón principal del mouse y soltarlo en la nueva posición (arrastre).

Editar Propiedades de Lago o Represa: La ventana de "Propiedades de Lago" o "Propiedades de Represa" se despliega haciendo doble Clic con el botón principal del mouse sobre un ícono de Lago o Represa seleccionado. También se accede desde el Pop-Up Menú o menú secundario del Editor, haciendo un "Clic" con el botón secundario del mouse sobre la pizarra y seleccionando "Editar Propiedades de Lago" (o de "Represa"). Una tercer manera directa de acceder a este formulario - estando activa la pizarra de dibujo- es pulsar la tecla de función "F5" para Represa "F6" para Lago/Laguna.

Acoplar Lago o Represa: Un componente Lago o Represa puede ser conectado (acoplado) solamente a un componente Cauce; es indicativo hacia adonde descarga sus excedentes superficiales. Un componente Lago o Represa no puede acoplarse a otro componente Lago o Represa, sino por intermedio de un cauce). Los acoples de Lago o Represa pueden efectuarse por uno de los siguientes tres métodos:

Acople Gráfico: Para conectar una Lago o Represa a un cauce debe primero entrar el mismo en modo edición (perímetro de ícono en rojo), luego pulsar con el botón principal del mouse el "círculo" inferior y efectuar una operación de "arrastre" del punto rojo hacia una de estas opciones:

- a) el punto inicial del tramo de cauce receptor (acopla a un cauce de aguas abajo);
- b) el punto de confluencia de uno o más tramos de cauce con un Cauce receptor (acopla los cauces tributarios al lago o Represa y este componente al cauce inferior o receptor).

Responder afirmativamente al mensaje de pedido de confirmación del acople. Al finalizar la acción deberá quedar unido (acoplado) los cauces tributarios al ícono del componente (Lago / represa) y éste al cauce inferior.

Acople desde Propiedades Lago o Represa: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de Lago o Represa la ventana de "Propiedades de la Lago" (o "Represa"), (o seleccionar el ícono y pulsar F6 para Lagos o F5

para Represas); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente Cauce hacia el cual tributa.

Acople desde el Menú Contextual: habilitar la herramienta de selección, seleccionar el componente de la Lago o Represa (ícono en rojo), seleccionar el componente Cauce hacia el que tributa; con los elementos seleccionados (íconos en gris) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra del diagrama para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ). Seleccionar "Acoplar Lago a Cauce" (o "...Represa a... ").

Nota: Los acoples o conexiones Lago o Represa hacia un cauce quedan identificados en el ícono por un punto rojo.

Desacoplar Lago o Represa: El desacople (desconectar) de un componente Lago o Represa de otro componente Cauce puede efectuarse por una de las siguientes dos maneras:

Desacople desde Propiedades Lago o Represa: Abrir con "doble Clic" sobre el ícono de Lago o Represa la ventana de "Propiedades de la Lago" ( o "Represa") (o seleccionar el ícono y pulsar F5 o F6 según corresponda); verificar la identidad de la unidad o bien seleccionarla de la lista; ubicar con el selector de "Drena a" el componente "0" o "Ninguno".

Desacople desde el Menú Contextual: habilitar la herramienta de selección, seleccionar el componente de Lago/Represa a desconectar (ícono con bordes rojo) pulsar el botón secundario del mouse sobre un punto cualquiera de la pizarra del diagrama para abrir el Menú Contextual del Editor Gráfico ); seleccionar "Desacopla Lago" (o "Represa").

**IMPORTANTE:** Componente Final, (UHE, Cauce, Represa, LAG), es la "salida" del sistema o sub-sistema y se lo identifica cuando es tributario a un componente "0". El sistema hidrológico a modelar admite múltiples sub-sistemas independientes hasta un máximo de 10 unidades. Un componente que tributa a "Ninguno" es un componente "sin acoplar" y "sin salida" y dará un error de inconsistencia (falta de datos).

#### **Ventanas "Propiedades" de Componentes:**

Desde el Editor Gráfico, se accede a las ventanas o formularios de Propiedades de Componentes (UHE, Cauce / Lago/Laguna o Represa). Se puede acceder a las ventanas de propiedades con "doble Clic" en un componente, o bien pulsar la tecla de acceso abreviado correspondiente (F3 para UEH, F4 para Cauce, F5 para Represa, y F6 para LAG). (Si las ventana propiedades no se despliega, hacer "un Clic" con el botón principal del mouse en cualquier punto de la pizarra para activarla).

#### **La ventana "Propiedades de UHE" (F3)**

El formulario de "Propiedades de UHE" permite cargar los parámetros de "Entradas" que caracterizan la Unidad Hidrológica Elemental o Subcuenca y que se suponen representativos de los valores medio del área (modelos hidrológicos tipo determinístico-agregado o vectorial). El formulario en su parte superior muestra los datos de identificación del componente; luego las áreas de carga de los parámetros físicos:

Identificación del componente:

Selector de componente (lista desplegable, permite seleccionar un componente UHE),

Número de UHE (número interno secuencial, de identificación),

Nombre de la UHE,

Área de aportes y métodos de cálculo/ propagación

Modificar el nombre de la UHE: permite cambiar el nombre (hasta 13 caracteres),

Selector "Drena a": permite seleccionar de la lista de componentes existentes el acople (conexión) de la UHE a un componente Cauce, Lago o Represa, hacia el cual tributa sus aguas,

Método de Propagación: en esta versión, solo admite el método Directo o de los paralelogramos de escorrentía.

Área: cuadro de texto para el ingreso de la superficie tributaria de aportes [hectáreas],

Referencias: cuadro de texto para el ingreso de observaciones o notas indicativas,

Parámetros de propagación

Estado: arriba, muestra a izquierda y derecha el componente al que tributa y a la derecha el método de propagación elegidos,

Longitud máxima al cauce: cuadro de texto para ingreso del parámetro de longitud de recorrido de la "gota hidrológicamente más alejada" al cauce o componente al que tributa, de aguas abajo,

Velocidad media de la "gota" en ladera: cuadro de texto para el ingreso del parámetro de velocidad media de la gota hidrológicamente más alejada, en ladera, hasta el cauce o componente al que tributa, aguas abajo,

4Infiltración: Parámetros de Kostiakov

Permite ingresar en los cuadros de textos "a" y "b" los parámetros de la expresión de Kostiakov para el cálculo de Infiltración, donde  $I_f[\text{mm}] = a * t[\text{min}]^b$ .

4Intercepción - Almacenamiento Superficial

Permite ingresar en el cuadro de texto el parámetro o tasa de Retención Superficial [milímetros] (Boldaov).

Abatimiento o Recesión (Parámetros de Singh y Stall)

Permite ingresar en los cuadros de textos el caudal inicial "Qi" en  $[\text{m}^3/\text{s}]$  y la constante de recesión "k" en [horas], parámetros de la expresión del abatimiento o recesión del hidrograma (Singh y Stall). donde  $Q[\text{m}^3/\text{s}] = Q_i[\text{m}^3/\text{s}] * e^{-t/k}$ .

#### **La ventana "Propiedades de Cauce" (F4)**

El formulario de "Propiedades de un tramo de Cauce"

permite cargar los parámetros de "Entradas" que caracterizan un tramo de cauce o curso de agua superficial. Las características en el tramo se suponen representativas de sus valores medios. El formulario en su parte superior muestra los datos de identificación del componente; luego las áreas de carga de los parámetros físicos:

Identificación del componente:

Selector de componente (lista desplegable, permite seleccionar un componente Cauce),

Número del tramo de cauce (número interno secuencial, de identificación),

Nombre del tramo de Cauce,

Área de carga de "Parámetros" físicos

Modificar el nombre del Cauce: permite cambiar el nombre (hasta 13 caracteres),

Selector Tributa al (Cauce/Laguna/Represa): permite seleccionar de la lista de componentes existentes el acople (conexión) del Cauce a otro Cauce, o componente Lago o Represa, hacia el cual tributa sus aguas,

Longitud: permite ingresar en el cuadro de texto el parámetro de longitud [metros] del tramo de cauce. A la derecha, a título ilustrativo (no interviene en el cálculo), se muestra la "Longitud de Referencia" del ícono trazado en el diagrama, siempre y cuando se encuentre habilitada en Opciones\Opciones de Configuración (Fichas Directorios y Ver)la imagen de fondo (mapa base) y su Escala.

Método de Propagación en el tramo: admite uno de dos métodos de propagación de la onda de crecida (botón de opción):

Método Directo: Desplaza la onda de crecida (sin deformarla) conforme el parámetro de "Velocidad Media  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ,

Método de Muskingum: permite en los cuadros de texto ingresar los parámetros "k" y "x" del método de Muskingum.

#### **La ventana "Propiedades de LAG (Depresión, Mallin, Lago, Laguna" (F5)**

El formulario de "Propiedades de LAG (Depresión, Mallin, Lago, Laguna" Permite cargar los parámetros de "Entradas" que caracterizan una depresión lagunar con aguas superficiales permanentes o temporarias. Las características se suponen representativas de sus valores medios. El formulario en su

parte superior muestra los datos de identificación del componente; luego las áreas de carga de los parámetros físicos:

Identificación del componente:

Selector de componente (lista desplegable, permite seleccionar un componente LAG),

Número del LAG (número interno secuencial, de identificación),

Nombre del LAG,

4Área de carga de "Área de aportes y método de cálculo / propagación"

Modificar nombre LAG: permite cambiar el nombre (hasta 13 caracteres),

Selector Drena al Cauce: permite seleccionar de la lista de componentes existentes el acople (conexión) del LAG a un Cauce, indicativo de hacia adonde tributa sus aguas, o desconectarlo (acople "0") como componente final.

Altura inicial Embalse: permite ingresar en el cuadro de texto el parámetro de altura inicial [metros] del embalse.

(Nota: La altura inicial no puede ser menor al menor valor de H[metros] en la función altura-almacenamiento).

Propagación/Método: el selector, permite seleccionar uno de tres métodos de propagación posibles para el traslado de la onda de crecida desde la cola del embalse a la salida: Piscina Nivelada, Muskingum y Runge Kutta (Hidrología Aplicada, Chow, 1.994). La selección del método de Muskingum demanda cargar solo el parámetro "k"; (x=0).

Carga de Parámetros físicos: el botón de comando despliega una ventana de carga en forma de tabla de los datos relacionados del embalse de Altura [m], Área [hectáreas], Almacenamiento [m3] y Caudal [m3/s].

Identificación de la depresión lagunar/mallin: muestra los datos del componente en edición.

Ingrese Número de filas: permite ingresar en el cuadro de texto el número de filas de los datos a ingresar. Si hay una tabla cargada y se modifica por un número mayor, no se pierden los datos; si se modifica por un número menor de filas se pierden los datos de filas superiores a las indicadas.

Tabla: Una vez indicada la cantidad de filas, puede ingresar "columna a columna" o "fila a fila" los datos de la tabla, o bien editar un dato de una celda. El botón "Aplicar" asegura los datos ingresados sin cerrar la ventana de carga. El botón "Borrar Tabla", limpia los datos de toda la tabla (sin deshacer).

### **La ventana "Propiedades de Represa" (F6)**

El formulario de "Propiedades de Represas" Permite cargar los parámetros de "Entradas" que caracterizan una Represa con aguas superficiales permanentes o temporarias. Las características se suponen representativas de sus valores medios. El formulario en su parte superior muestra los datos de identificación del componente; luego las áreas de carga de los parámetros físicos:

Identificación del componente:

Selector de componente (lista desplegable, permite seleccionar un componente Represa),

Número del Represa (número interno secuencial, de identificación),

Nombre del Represa,

Modificación de Nombre - Cauce de descarga - Método de Cálculo HAS"

Modificar nombre: permite cambiar el nombre (hasta 13 caracteres),

Selector Drena al Cauce: permite seleccionar de la lista de componentes existentes el acople (conexión) de la Represa a un Cauce, indicativo de hacia adonde tributa sus aguas, o desconectarlo (acople "0") como componente final.

Propagación: el selector, permite seleccionar uno de tres métodos de propagación posibles para el traslado de la onda de crecida desde la cola del embalse a la salida en la presa: Piscina Nivelada, Muskingum y Runge Kutta (Hidrología Aplicada, Chow, 1.994). La selección del método de Muskingum demanda cargar solo el parámetro "k"; (x=0).

Área de Funciones Altura Caudal (H-Q):

Permite optar por una de dos formas para definir las relaciones H-Q de salida (vertederos), como una función  $Q[m^3/s]=f(H[m])$  o por tabla (botón de comando "Tabla", junto al botón de opción):

Funciones Q(h): pulsar el botón de opción "Funciones". Pueden definirse hasta ocho funciones, agrupadas en dos grupos:

funciones tipo  $Q= a h^b$  ; y,  $Q=a + b h + c h^2$  ,

Para cada función, los cuadros de texto a la derecha permiten ingresar los parámetros a, b, c, de ajuste, y los límites de altura mínima y máxima en que ajustan.

Las ocho funciones son independientes y en consecuencia acumulativas.

Edit Tabla H-Q: pulsar el botón de opción "Tabla" y luego el botón de comando adjunto "Edit"; se despliega una ventana de carga en forma de tabla para el ingreso en forma de tabla de la relación de descarga H[metros]-Q[m<sup>3</sup>/s]. El formulario contiene:

Identificación de la Represa en edición.

Ingrese Número de filas: permite ingresar en el cuadro de texto el número de filas de los datos a entrar en la tabla. Si hay una tabla cargada y se modifica por un número mayor, no se pierden los datos; si se modifica por un número menor de filas se pierden los datos de filas superiores a las indicadas.

Tabla H-Q: Una vez indicada la cantidad de filas, puede ingresar "columna a columna" o "fila a fila" los datos de la tabla, o bien editar un dato de una celda. El botón "Aplicar" asegura los datos ingresados sin cerrar la ventana de carga. El botón Borrar Tabla, limpia los datos de toda la tabla ( sin deshacer).

Tabla Altura (H), Área (A), Almacenamiento (S): el botón de comando despliega una ventana de carga en forma de tabla de los datos relacionados del embalse de Altura [m], Área [hectáreas] y Almacenamiento [m<sup>3</sup>]:

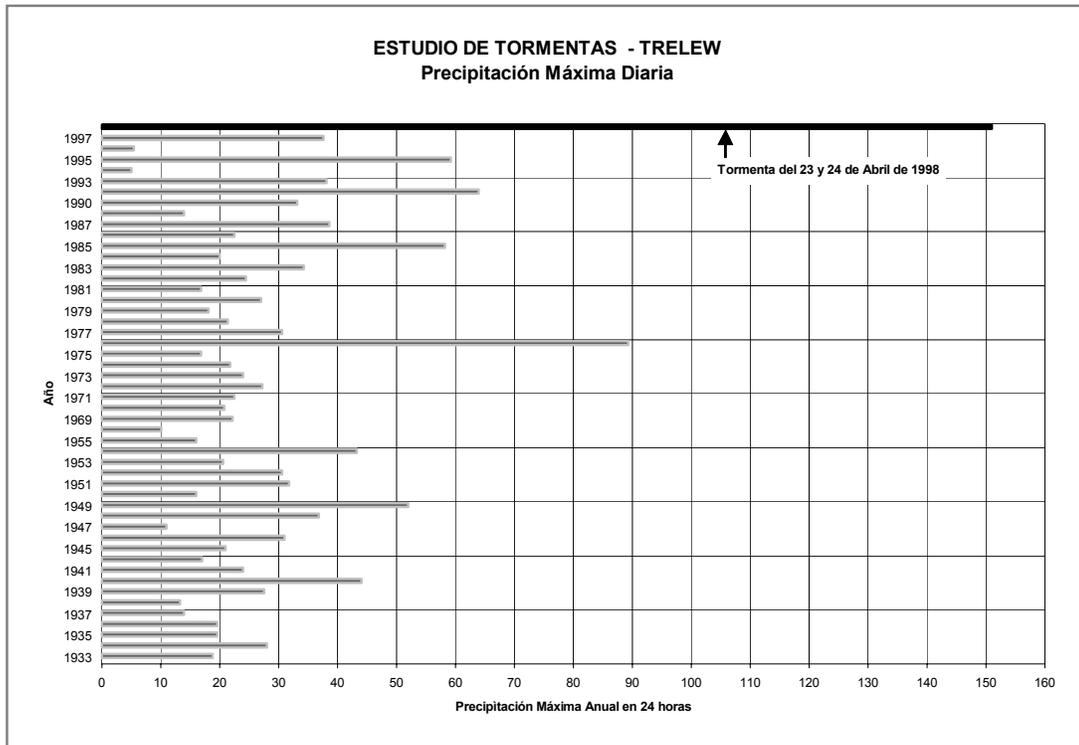
Identificación de la Represa.

Ingrese Número de filas: permite ingresar en el cuadro de texto el número de filas de los datos a entrar. Si hay una tabla cargada y se modifica por un número mayor, no se pierden los datos; si se modifica por un número menor de filas se pierden los datos de filas superiores a las indicadas.

Tabla: Una vez indicada la cantidad de filas, puede ingresar "columna a columna" o "fila a fila" los datos de la tabla, o bien editar un dato de una celda. El botón "Aplicar" asegura los datos ingresados sin cerrar la ventana de carga. El botón "Borrar Tabla", limpia los datos de toda la tabla (sin deshacer).

Altura inicial Embalse:

Permite ingresar en el cuadro de texto el parámetro de altura inicial [metros] del embalse. (Nota: La altura inicial no puede ser menor al menor valor de H[metros] en la función altura-almacenamiento).



**Fig. : 93. Lluvias máximas registrada en Trelew, Chubut.**

T [horas]	T [minutos]	Fecha	Pp Acumulada [mm]	Pp [mm]
0	0	22/4/98 21:00		
6	360	23/4/98 03:00	5,0	5,0
12	720	23/4/98 09:00	16,0	11,0
18	1080	23/4/98 15:00	49,0	33,0
24	1440	23/4/98 21:00	67,4	18,4
30	1800	24/4/98 03:00	78,9	11,5
36	2160	24/4/98 09:00	128,2	49,3
42	2520	24/4/98 15:00	171,0	42,8
48	2880	24/4/98 21:00	215,6	44,6
54	3240	25/4/98 03:00	230,1	14,5

**Tabla Nro.: 25. Lluvia máxima registrada en Trelew, Chubut. La precipitación máxima diaria de la tormenta duplicó el máximo registro histórico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) desde 1933 en adelante.**

Tiempo min	Lámina Infiltrada Acumulada [mm]								
	Ens. Nº1	Ens. Nº2	Ens. Nº3	Ens. Nº4	Ens. Nº5	Ens. Nº6	Ens. Nº7	Ens. Nº8	Ens. Nº9
-									
4	10.4								
5	12.7		21.2	14.7		1.1			4.5
6	15.0	0.1	28.0	16.7	6.8	1.1		5.1	4.8
7	17.3	0.1	34.7	18.6	7.3	1.2		5.2	5.2
9	22.0	0.2	41.7	22.5	8.1	1.3		5.4	5.9
10	23.6	0.2	45.2	24.5	8.5	1.3		5.5	6.3
11	25.2	0.3	48.7	24.5	8.9	1.4		5.6	6.5
12	26.9	0.3	51.9	26.4	9.3	1.4		5.7	6.7
14	30.1	0.4	58.3	28.4	9.7	1.5	2.4	5.9	7.2
15	31.8	0.4	61.6	32.4	9.9	1.6	2.5	6.0	7.4
18	36.7	0.7	71.2	34.3	10.4	1.7	3.0	6.2	8.1
20	40.0	0.9	77.4	44.2	10.8	1.8	3.4	6.4	8.5
22	43.2	1.0	83.6	48.2	11.2	2.0	3.7	6.6	9.0
23	44.9	1.1	86.7	50.3	11.3	2.0	3.8	6.7	9.3
25	47.3	1.2	92.9	54.3	11.7	2.1	3.9	6.9	9.7
26	48.5	1.2	96.0	56.4	11.9	2.2	3.9	7.0	9.9
30	53.2	1.4	111.5	64.5	12.6	2.4	4.2	7.4	10.4
32	55.6	1.5	118.1	68.4	12.8	2.5	4.3	7.5	10.7
33	56.7	1.6	121.4	70.4	12.8	2.6	4.4	7.6	10.9
38	62.1	1.9	137.9	80.2	13.2	3.0	4.7	7.9	11.6
40	64.3	2.0	142.6	84.2	13.3	3.2	4.8	8.0	11.8
41	65.4	2.1	145.0	86.3	13.4	3.3	4.8	8.1	12.0
43	65.4	2.2	149.7	90.5	13.7	3.5	5.0	8.2	12.5
44	68.0	2.3	152.1	92.6	13.8	3.5	5.0	8.2	12.7
48	69.2	2.6	161.5	101.0	14.3	3.9	5.5	8.6	13.5
50	74.4	2.7	167.3	105.2	14.5	4.1	5.8	8.7	13.9
51	78.3	2.8	174.1	106.9	14.7	4.2	5.9	8.8	14.1
57	83.6	3.3	187.6	117.2	15.4	4.2	6.6	9.3	14.9
60	86.3	3.5	195.5	122.3	15.8	4.2	7.0	9.5	15.3
61	87.2	3.6	198.1	124.8	15.8	4.2	7.1	9.6	15.5
63	90.0	3.7	203.4	129.8	15.9	4.2	7.2	9.7	15.8
65	92.7	3.8	208.6	134.8	16.0	4.2	7.2	9.9	16.0
66	94.1	3.8	211.3	137.3	16.1	4.2	7.3	9.9	16.2

70	99.6	4.0	227.4	147.3	16.3	4.2	7.4	10.1	16.6
72	101.9	4.1	235.5	151.7	16.4	4.2	7.4	10.3	16.9
77	107.7	4.4	246.0	162.8	16.6	4.2	7.6	10.5	17.5
80	111.1	4.5	252.3	169.4	16.7	4.2	7.6	10.7	17.9
82	113.0	4.7	256.5	173.6	16.8	4.2	7.7	10.8	18.2
90	120.6	5.2	276.7	190.2	17.7	4.2	7.9	11.3	19.5
92	120.6	5.3	281.8	194.2	17.9		7.9	11.4	19.6
100	133.2	5.8	297.6	210.4	18.7		8.1	11.9	20.0
102	134.8	5.9	301.6	214.4	18.9		8.2	12.0	20.2
103	135.6	6.0	303.6	216.4	19.0		8.3	12.1	20.4
110	141.2	6.5	324.5	230.6	19.7		9.5	12.6	21.2
111	142.0	6.5	327.5	232.7	19.8		9.5	12.7	21.3
115	145.2	6.8	336.9	240.8	20.3		9.8	13.0	21.8
116	146.0	6.9	339.2	242.8	20.4		9.8	13.1	21.9
120	149.2	7.2	348.6	251.4	20.8		10.0	13.4	22.4
121	150.0		350.9	253.5				13.5	22.6
124	152.4		357.8	259.9				13.6	22.9
125	153.2		360.1	262.6				13.7	23.1
130	158.3		371.5	276.2				14.0	23.7
131	159.3		373.8	278.1					
140	168.4		394.7	294.6					
142	170.4		399.3	298.6					
150	178.5		414.9	314.4					
152			418.8						

*Tabla Nro.: 26. Selección de Ensayos de Infiltración en el área de Estudio (Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes de la ciudad de Trelew)*

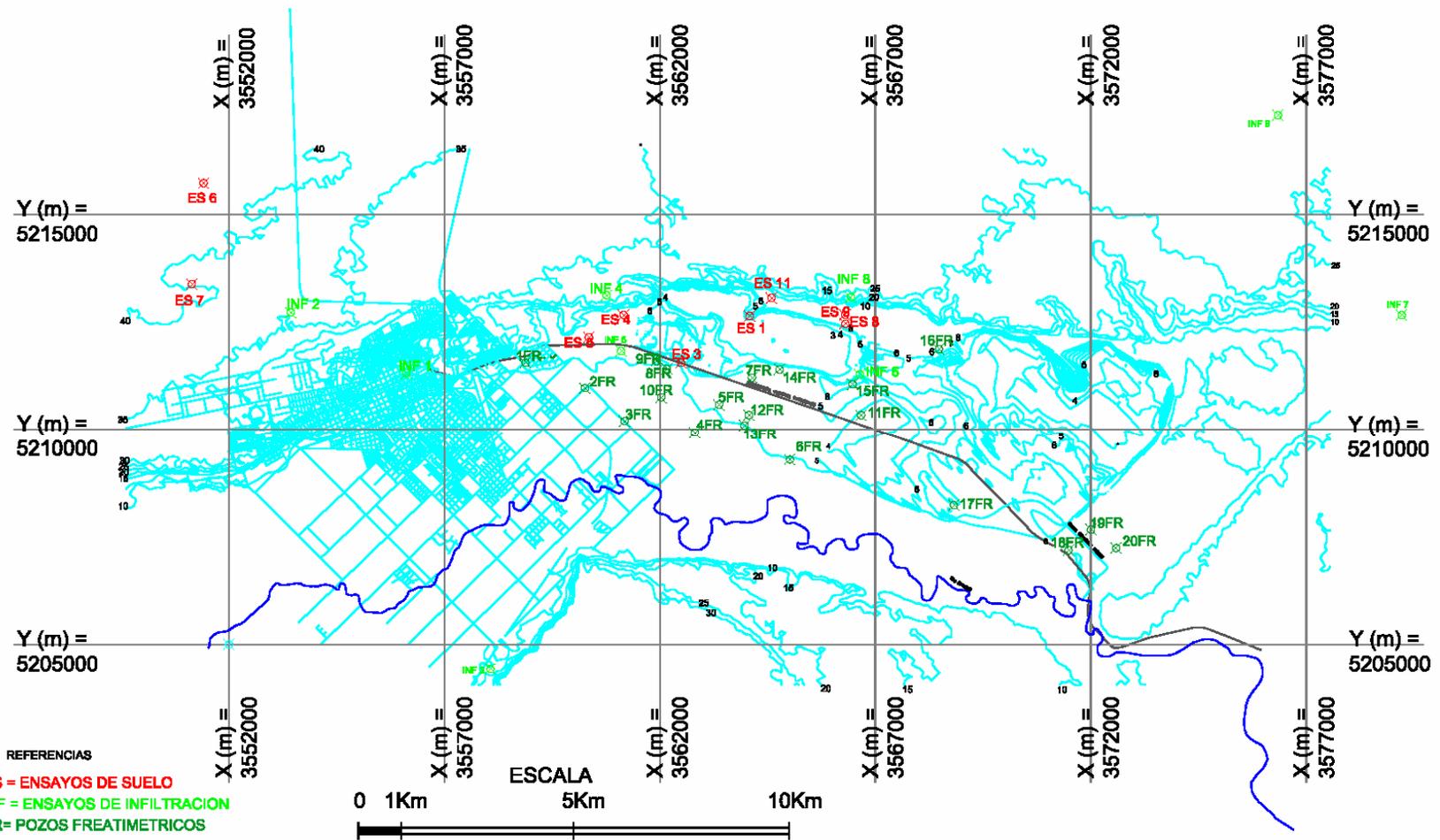


Fig. : 94. Ubicación de Ensayos de Infiltración, de Suelos y Pozos Freatimétricos (Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes de la ciudad de Trelew)

## RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A Nora Pouey, Directora de Tesis,  
A la Universidad Nacional de Rosario,  
A la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco,  
A todos aquellos que día a día, trabajan y luchan en defensa de las instituciones que  
hacen posible la Universidad y la Educación pública.

Juan Serra  
® Derechos de Propiedad Intelectual en trámite  
Rosario, Pcia. de Santa Fe, Rca. Argentina, 5 de Octubre de 2006