



# **CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO**

**CNA-SGT-GASIR-09/2014**

**ORGANISMO DE CUENCA X  
GOLFO CENTRO**

*ZONA DE ESTUDIO*

*CIUDAD DE VERACRUZ, VERACRUZ RÍOS JAMAPA Y  
COTAXTLA*

Elaborado para  
Comisión Nacional del Agua



DICIEMBRE 2014



# **CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO**

**CONVENIO CNA-SGT-GASIR-09/2014**

## **ORGANISMO DE CUENCA X GOLFO CENTRO**

***CIUDAD DE VERACRUZ, VERACRUZ  
RÍOS JAMAPA Y COTAXTLA***

Óscar Arturo Fuentes Mariles	*
Victor Franco	*
Faustino de Luna Cruz	**
Laura Vélez Morales	***
Hipólito Lorenzo Morales Rodríguez	***

**Elaborado para  
Comisión Nacional del Agua**

\* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM  
\*\* Técnico Académico, Instituto de Ingeniería, UNAM  
\*\*\* Asesor externo, Instituto de Ingeniería, UNAM

DICIEMBRE 2014

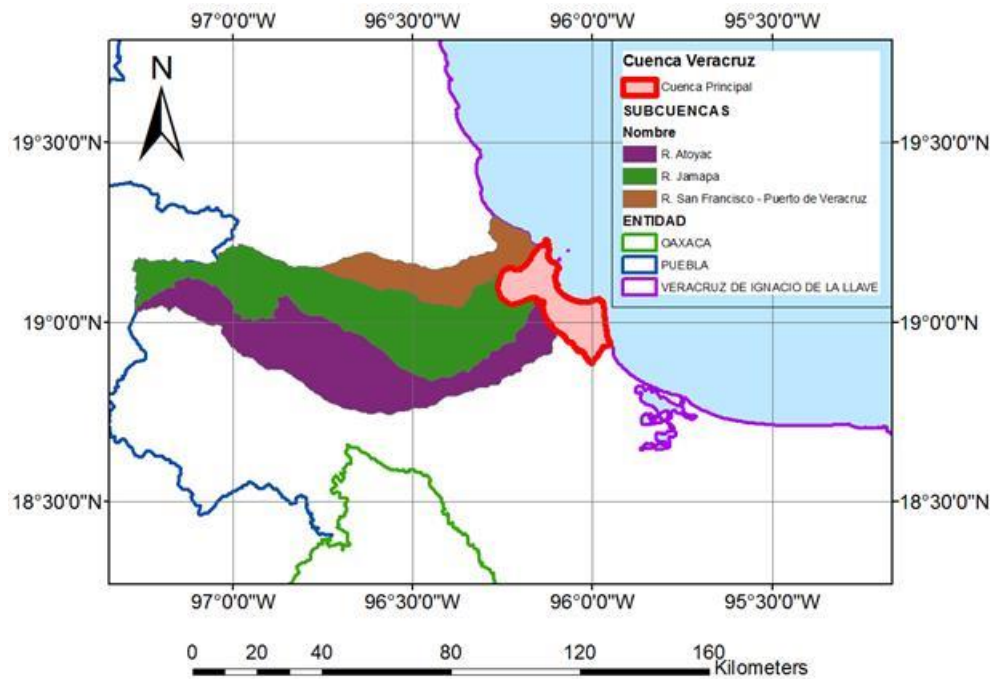
## INTRODUCCIÓN

La Cuenca en estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica Administrativa X Golfo Centro (RHA X GC). La cual abarca 445 municipios de cuatro entidades de la República: 189 de Veracruz, 161 de Oaxaca, 90 de Puebla y cinco de Hidalgo.

En la Región Hidrológica 28 está la cuenca del río Papaloapan, la cual ocupa el 41.11% del total de la superficie territorial estatal con una extensión de 28,636 km<sup>2</sup>, también aporta la mayor parte de descarga de agua dulce con aproximadamente 44,829 millones de metros cúbicos por año que representa el 42.28% del total para el estado. El sistema fluvial determinante para esta región hidrológica es la cuenca del río Papaloapan, y de manera secundaria los ríos Actopan, La Antigua y Jamapa.

La RH28 se divide en dos, la cuenca río Papaloapan RH28A, y la Cuenca río Jamapa y otros RH28B.

La cuenca del río Jamapa se encuentra ubicada entre los 18°45' y 19°14' latitud norte, y entre 95°56' y 97°17' longitud oeste (Comisión Nacional del Agua, Conagua, 2005). Tiene un área aproximada de 3,929 km<sup>2</sup>, distribuida totalmente dentro del estado de Veracruz. Figura I.



**Figura I. Localización de la cuenca piloto. Fuente: CONABIO, 2014.**

El río Jamapa está compuesto de dos corrientes que en su confluencia se conocen con los nombres de río Cotaxtla y Jamapa. El río Cotaxtla drena un área de 1,679 km<sup>2</sup> y nace gracias

---

a los deshielos del volcán Citlaltépetl o pico de Orizaba a una elevación de 5610 msnm en una zona limítrofe de los estados de Puebla y Veracruz llamada río Barranca de Chocomán. Avanza en dirección oriente a través de terrenos de topografía accidentada, de fuertes pendientes, colectando a su paso las corrientes formadas en las laderas nororientales del Pico de Orizaba. Alcanzando las cercanías de la población de Coscomatepec, Ver., varía su curso hacia el sureste fluyendo 25 km en esta dirección y captando en su recorrido, por ambos márgenes, corrientes de pequeña magnitud. A la altura de la ciudad de Córdoba, Ver., desvía su curso hacia el este-sureste y cambia su nombre a río Seco; fluye 22 km en terreno servible para el cultivo, rodea el Cerro Chiyoltuite y por su margen izquierda afluye el río Atoyac.

El río Atoyac tiene su origen 10 km al norte de Córdoba, Ver., en el Cerro Loma Grande a 1 750 msnm. Sobre este río se encuentra la presa derivadora Sta. Anita, de cuya margen derecha parte el canal principal que abastece el sistema de riego El Potrero. Aproximadamente, a 4 km de la presa la corriente varía su curso hacia el noreste bordeando los cerros La Perla y Chiyoltuite, pasa por Atoyac, Ver., y 1.5 km aguas abajo afluye por la margen izquierda el arroyo Chiquihuite; posteriormente a 11.5 km afluye al colector general a 450 msnm, conservando el nombre de río Atoyac. A partir de esta confluencia desvía su curso hacia el oriente y fluye por terreno de lomerío hasta la afluencia por la margen izquierda del arroyo Paso del Macho.

A 4.5 km aguas abajo de la confluencia anterior afluye por la margen derecha el arroyo Cuatro Caminos que nace a 1 km al sureste de Yanga, Ver., a 500 msnm. A partir de la confluencia con el arroyo Cuatro Caminos el colector general cambia su nombre a río Cotaxtla, penetrando en zonas cultivables; sigue su rumbo este-noreste, pasando por Cotaxtla, Ver.; aguas abajo de esta confluencia se une por la margen izquierda al río Jamapa.

El río Jamapa nace con el nombre de Barranca de Coscomatepec en el límite de los estados de Puebla y Veracruz, a 4 700 msnm. Su curso sigue un rumbo oriente, por terreno de topografía montañosa, en donde colecta corrientes que nacen en la Sierra Madre Oriental, en la zona comprendida entre las porciones norte del Pico de Orizaba y suroriente del cerro de La Cumbre. Aproximadamente, a 50 km de su nacimiento afluye por su margen izquierda el río Paso de los Gasparines, que se origina a 9 km al noreste de Huatusco, Ver., a 1 500 msnm, su cauce sigue un rumbo sureste en zonas de topografía media.

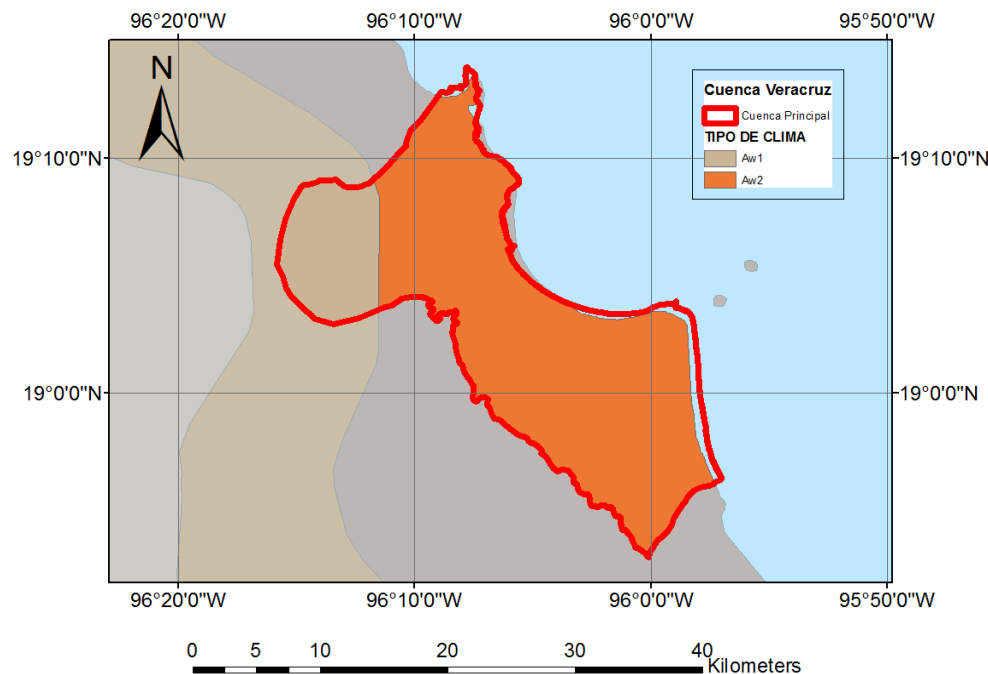
Después de la afluencia anterior, el colector de afluentes fluye como río Paso de los Gasparines bordeando cerro y cambiando la trayectoria de su curso, de oriente a suroriente, para continuar a través de 38 km en terreno de topografía accidentada y en parte plana. Al penetrar en la zona plana forma un gran número de meandros, cambiando su nombre a río Jamapa y afluyendo en él, por su margen izquierda, el río Xicuintla que nace en Tlaltetela, Ver., a 1 450 m de altitud.

---

A partir de esta confluencia el río Jamapa sigue un curso hacia el oriente, cruza terrenos de cultivo, forma meandros y terrazas aluviales hasta la afluencia, por la margen derecha, del arroyo Ixcualco. Este arroyo drena un área de 753 km<sup>2</sup> y se origina como arroyo Montalvo a 5 km al noreste de Paso del Macho, Ver., a 450 msnm.

El colector de afluentes, después de la aportación del arroyo Ixcualco, pasa por Medellín de Bravo, Ver., 5 km aguas abajo afluye en el río Cotaxtla conservando su nombre. A partir de esta confluencia el río Jamapa fluye con rumbo hacia el norte en terrenos planos cultivados; forma meandros y se desvía hacia el oriente adonde fluye por la margen izquierda y derecha el río Moreno y la Laguna Mandinga Grande, respectivamente; finalmente desemboca en el Golfo de México en la población de Boca del Río, Veracruz.

Entre las cuencas de los ríos Jamapa y Papaloapan se sitúa una pequeña cuenca de 456 km<sup>2</sup>, en la que confluyen algunas corrientes costeras de relativa importancia hidrográfica.



**Figura II. El clima que predomina en la cuenca piloto es de tipo cálido subhúmedo. Fuente, CONABIO, 2014.**

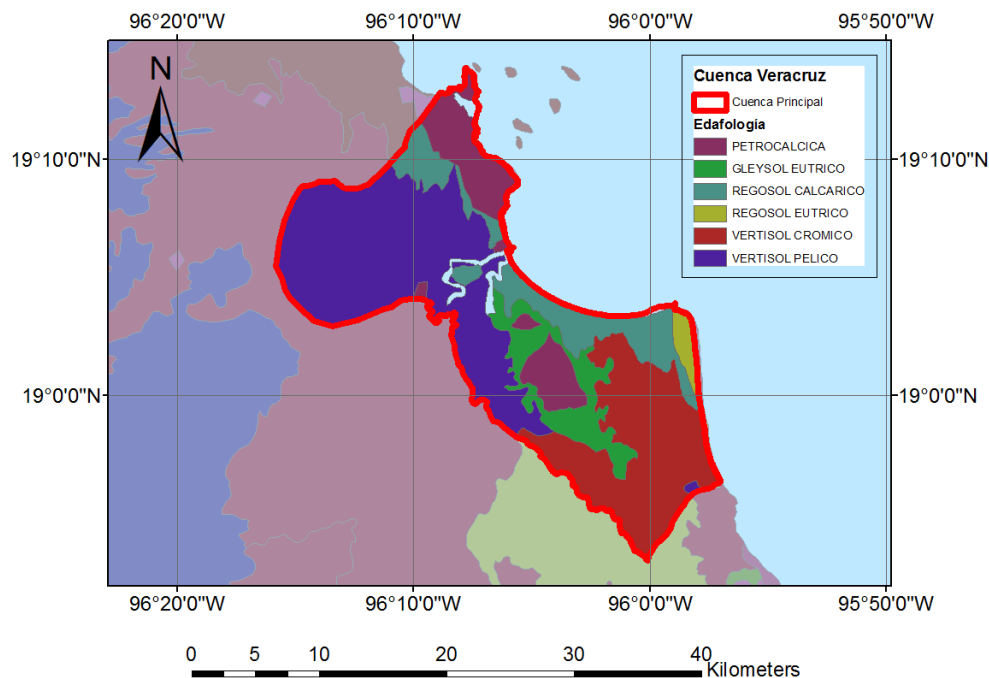
Los climas predominantes para la cuenca en estudio son: (Figura II)

**Aw1.** Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano

con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**Aw2.** Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 mm y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En cuanto a la edafología del sitio, la región presenta una gran variación de tipos de suelo, de un total de 6 tipos de suelo, los que presentan mayor predominancia son los de tipo Regozol y Vertisol (Figura III).



**Figura III. Edafología de la zona. Fuente, CONABIO, 2014.**

---

## 5.1 ANALISIS DE INUNDACIONES HISTÓRICAS

Los vientos polares provenientes de la zona norte del continente que siguen la trayectoria de la costa oriente de Estados Unidos, a su paso por el Océano Atlántico y el Golfo de México aumentan su humedad y temperatura, al chocar con la zona montañosa que se inclina al Golfo de México ascienden, por el efecto de los vientos Alisios, se enfrían adiabáticamente generando precipitación en las costas de México por el efecto orográfico. A fines del verano y principio del otoño las lluvias generadas de esta forma aumentan debido a los ciclones con origen en el mar de las Antillas.

La zona más lluviosa del país se encuentra al sur del paralelo 22° latitud norte, zona montañosa expuesta a los vientos húmedos del mar, asociados a los vientos Alisios, los nortes y ciclones tropicales.

El estado de Veracruz es una zona de alta precipitación pluvial, es la entidad con el mayor volumen de agua superficial vertida al mar por sus ríos. Sus principales ríos son el Pánuco (frontera con Tamaulipas), Tempoal y Tuxpan (parte del límite con el Estado de Puebla), Cazones, Tecolutla, Nautla, Misantla, Actopan, La Antigua, Jamapa, Blanco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá.

Los centros de población más importantes en la entidad son: Veracruz, Xalapa (capital), Córdoba, Orizaba, Poza Rica, Coatzacoalcos, Alvarado, Cosamaloapan, San Andrés Tuxtla, Martínez de la Torre, Papantla, Tuxpan, Coatepec, Perote, Minatitlán, Ciudad Mendoza y Cerro Azul.

La cuenca del río Jamapa tiene un área aproximada 3925 km<sup>2</sup>. El Río Jamapa lo conforma dos corrientes importantes el río Cotaxtla y el río Jamapa. El río Cotaxtla drena un área aproximada de 1679 km<sup>2</sup>, nace en el estado de Puebla a una altitud de 5700 msnm con el río Barranca de Chocomán. A la altura de Córdoba Ver., cambia su nombre a río Seco. En su margen izquierda confluye el río Atoyac y a partir de esta confluencia cambia su nombre a río Cotaxtla. El río Jamapa desemboca en el Golfo de México en la población de Boca del Río, Veracruz.

Sobre el río Atoyac se encuentra la presa derivadora Santa Anita de la que por la margen derecha parte el canal principal que abastece el sistema de riego El Potrero.

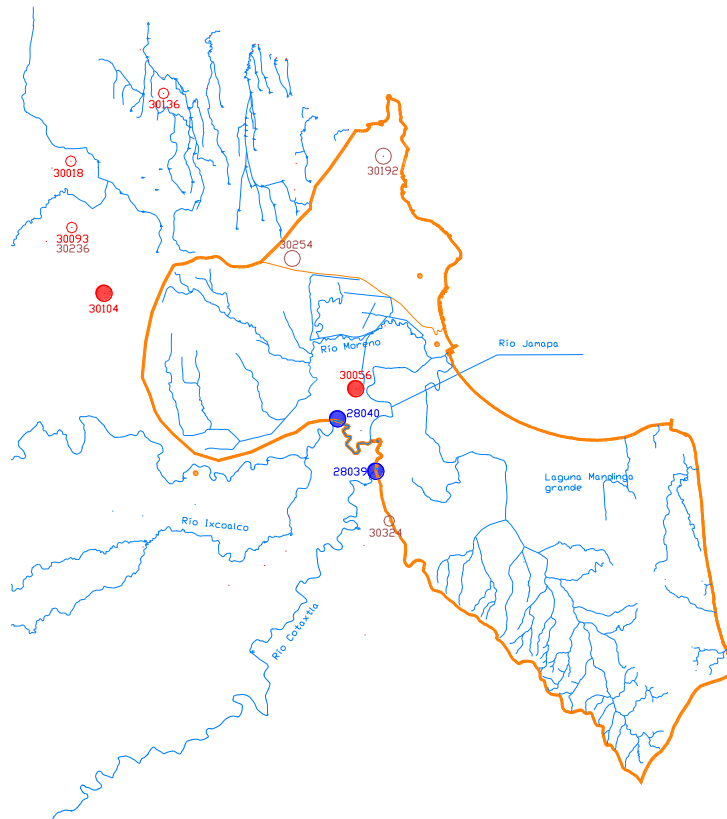
### 5.1.1 Datos de precipitación y escurrimientos

Para analizar las inundaciones históricas en la cuenca del río Jamapa se cuenta con datos de lluvia diaria de 29 estaciones climatológicas, todas en el Estado de Veracruz, datos de escurrimientos medios diarios de 2 estaciones hidrométricas ubicadas en el Estado de

---



Veracruz, que miden los escurrimientos de los ríos Jamapa y Cotaxtla, los cuales se muestran en la Figura 1.1



**Figura 1.1. Ubicación de estaciones climatológicas, hidrométricas**

Por el tamaño de la cuenca y por la ubicación de las estaciones climatológicas se utilizaron en el análisis sólo dos.

**Tabla 1.1. Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis**

Estación climatológica		Promedio		No. Años	Años con registro mayores a 90 %	Longitud	Latitud	Altitud
Clave	Nombre	No. Lluvias al año	No. Lluvias > 70 mm					
30056	El Tejar	106.7	3.71	51	1961 - 2011	-96.2	19.1	10
30104	Mata Anona	67.1	1.91	32	1964 - 1997	-96.3	19.1	250

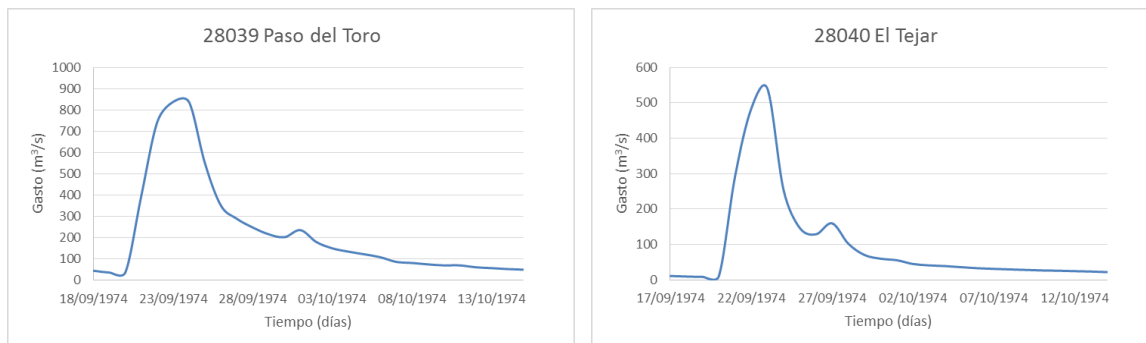
De la Tabla 1.1 se puede apreciar que la estación 30056 en promedio registra un mayor número de días con lluvia al año 106 días de las cuales 3 son de alto riesgo (> de 70 mm), mientras que la estación 30104 sólo registra 67. pero con dos de ella de alto riesgo.

**Tabla 1.2. Estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis**

Clave	Nombre	Años de registro	% de registro	Longitud	Latitud	Altitud
28039	Paso del Toro	1951 - 2006	92.4	-97.0	19.2	1860
28040	El Tejar	1951 - 2010	80.4	-96.2	19.1	10

La estación Paso del Toro en el año de 1974 en el mes de septiembre el día 23 registró un gasto promedio diario de 838.8 m<sup>3</sup>/s que es el máximo de todo el registro de esta estación. Se consideró los registros próximos anteriores y próximos posteriores a esta fecha y se obtuvo el hidrograma de la Figura 1.2. En la estación El Tejar, en esa misma fecha, registra su cuarto mayor dato de 540.28 m<sup>3</sup>/s, el hidrograma formado con datos anteriores y posteriores a la fecha señalada se muestra en la Figura 1.2.

En esta fecha se presentó un evento extraordinario ya que tanto el río Jamapa como el río Cotaxtla conducían gastos importantes en sus cauces. Otro evento parecido se presenta en el año de 1972 el 29 de julio, la estación El Tejar registra su máximo gasto promedio diario de 591.32 m<sup>3</sup>/s y la estación Paso del Toro su cuarto mayor gasto de 747 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 1.2 Hidrogramas de la estación Paso del Toro y El Tejar de septiembre de 1974**

## 5.1.2 Ciclones tropicales

Se buscaron ciclones tropicales que pudieron haber influido sobre la zona de estudio, en la Figura 1.3 se muestran los resultados de la búsqueda de eventos hidrometeorológicos en la cuenca del río Jamapa; en la información se distinguen tres tipos de fenómenos:

D.T. (Depresión Tropical)

T.T. (Tormenta Tropical)

H1 a H5 (Huracán de categorías 1 a 5)

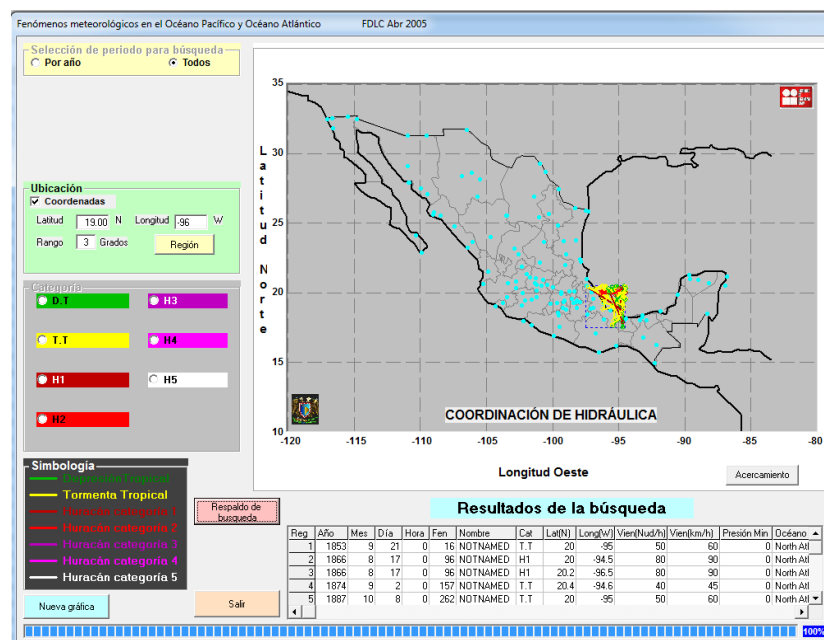


Figura 1.3 Búsqueda de eventos hidrometeorológicos sobre la cuenca de interés

La Tabla 1.3 muestra las fechas y lugares en que se presentaron los eventos hidrometeorológicos más importantes, dentro y cerca de la cuenca de estudio. Se localizó de las estaciones climatológicas (E.C.) que pudieron haber registrado la magnitud de los eventos.

Tabla 1.3. Fecha y ubicación de eventos hidrometeorológicos registrados.

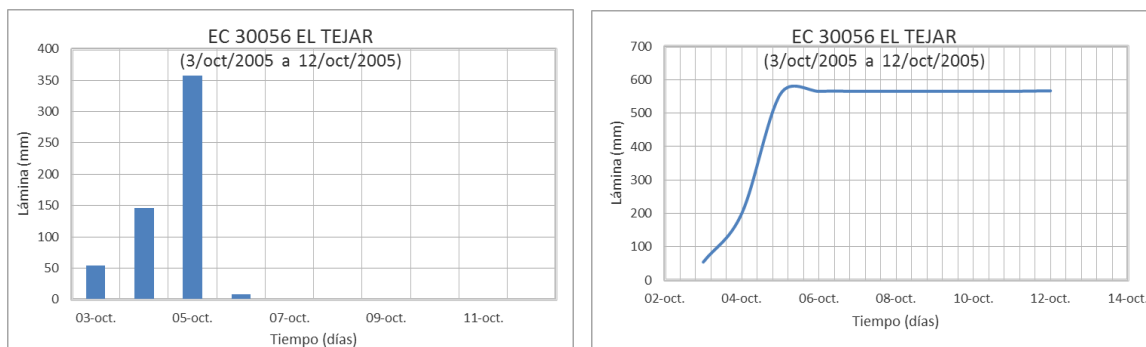
Año	Mes	Día	Nombre	Tipo de fenómeno	Lat(N)	Long(O)
1931	9	16	S/N	H1	18.8	96.2
1932	10	3	S/N	T.T.	19.3	96.2
1949	9	26	S/N	T.T.	18.8	96.2
1931	8	18	S/N	T.T.	19.6	96.3

Los registros de lluvia diaria de las dos estaciones climatológicas se obtuvieron de la base de datos denominada Clicom (Clima Computarizado del Servicio Meteorológico Nacional).

Para los eventos hidrometeorológicos mostrados en la Tabla 1.3 no se tienen datos de lluvia de las dos estaciones climatológicas utilizadas en el análisis.

Los registros de gastos medios diarios de las dos estaciones hidrométricas, Paso del Toro (28039) y El Tejar (28040) que se obtuvieron de la base de datos denominada Bandas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) del IMTA, los registros de dichas estaciones no comprenden las fechas de los eventos hidrometeorológicos.

En el año del 2005 los día 3, 4 y 5 de octubre entró en el sureste de la República Mexicana el Huracán Stan, para esta fecha la estación climatológica 30056 (El Tejar) registró el evento como se muestra en la Figura 1.4.



**Figura 1.4. Hietograma y curva masa de la estación climatológica 30056 del 3 al 12 de octubre de 2005**

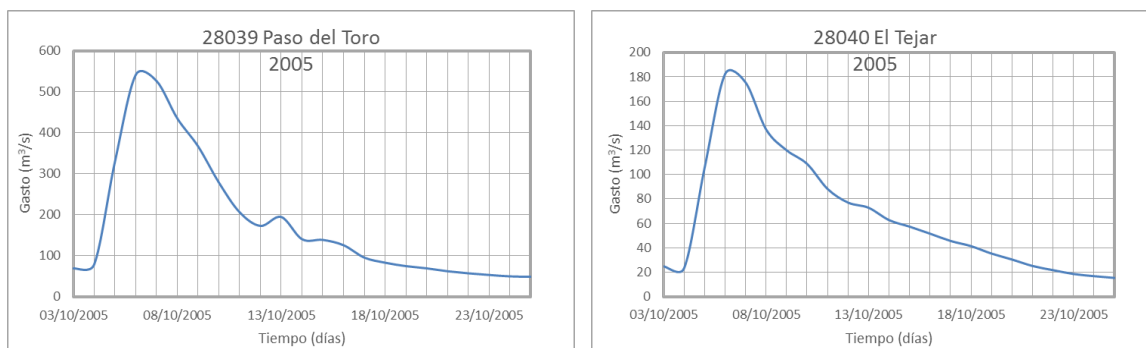
Con respecto a las estaciones hidrométricas se registraron escurrimientos grandes inmediatamente que paso el evento meteorológico, como se muestra en la Tabla 1.4.

La estación Paso del Toro registra el día 6 un gasto promedio diario de 541 m<sup>3</sup>/s, mientras que la estación El Tejar ese mismo día registra un gasto de 182 m<sup>3</sup>/s.

Con los datos inmediatamente próximos anteriores y posteriores a la fecha del evento se construyó los hidrogramas de las estaciones hidrométricas en cuestión, los cuales se muestran en la Figura 1.5.

**Tabla 1.4. Gastos promedios diarios (m<sup>3</sup>/s) relacionados con evento hidrometeorológico Stan**

Año	Mes	Día	28039	28040
2005	9	23	81.4	38.1
2005	9	24	71.0	39.3
2005	9	25	63.9	38.6
2005	9	26	55.8	36.0
2005	9	27	50.9	33.8
2005	9	28	45.0	31.1
2005	9	29	45.9	26.6
2005	9	30	50.5	26.6
2005	10	1	50.4	20.0
2005	10	2	44.8	17.2
2005	10	3	69.0	24.8
2005	10	4	79.0	23.2
2005	10	5	329.8	105.4
2005	10	6	541.5	182.4
2005	10	7	526.7	175.4
2005	10	8	435.1	137.0
2005	10	9	367.1	119.9
2005	10	10	278.7	108.7
2005	10	11	206.2	88.2
2005	10	12	172.9	77.0
2005	10	13	194.6	72.8
2005	10	14	140.5	62.7
2005	10	15	138.7	57.3

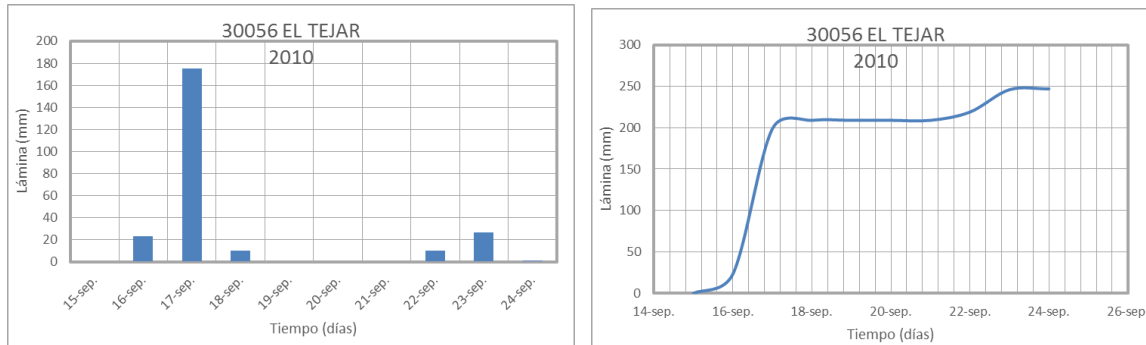


**Figura 1.5. Hidrogramas de la estación Paso del Toro y El Tejar de octubre del 2005**

Los hidrogramas de las estaciones hidrométricas Paso del Toro y El Tejar, son muy semejantes en su forma sobre todo y en la fecha que aparece el gasto pico, aunque un poco menor en magnitud, 182 m<sup>3</sup>/s en El Tejar y 541 m<sup>3</sup>/s en Paso del Toro.

En el 2010 en el mes de septiembre el día 17 apareció el huracán Karl, categoría 3, con vientos de 120 km/h provocando inundaciones en varios municipio de Veracruz.

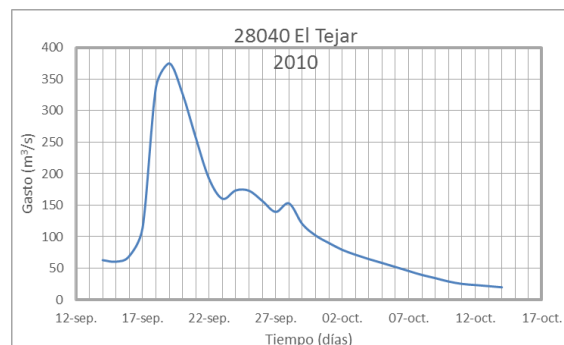
Las estaciones climatológicas no detectaron en sus registros el paso del huracán Karl excepto la estación El Tejar que registro ese día 175 mm cuando un día anterior registró 23.5 mm y un días después registraría 10 mm.



**Figura 1.6. Hietograma y lluvia acumulada de la estación 30056 durante el huracán Karl**

Para las estaciones hidrométricas sólo contamos con datos de la estación El Tejar que mide los escurrimientos del río Jamapa antes de la confluencia con el río Cotaxtla. La estación registra un aumento significativo durante el evento y días después de éste. Se construyó un hidrograma con días próximos anteriores y posteriores al evento.

El hidrograma de la estación El Tejar se muestra en la Figura 1.7. es parecida al hidrograma de la misma estación de la Figura 1.5 pero con un gasto pico menor.



**Figura 1.7. Hidrogramas de la estación El Tejar, septiembre del 2010**



## 5.2. ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN Y OTRAS PÉRDIDAS

Para estimar la lámina de precipitación efectiva o en exceso a partir de la precipitación total al descontar la que se pierde por principalmente por infiltración (en ella se considera incluidas la evapotranspiración, la interceptación y el almacenamiento superficial) se empleó el método de Número de curva propuesto en los Estados Unidos en 1964 por el Soil Conservation Service S.C.S. (actualmente National Resources Conservation Service N.R.C.S.) tanto para una tormenta o para un conjunto de tormentas durante varios días consecutivos (trenes de lluvias).

### 5.2.1 Lluvia efectiva de una tormenta aislada

El método del Número se usa para estimar la lámina lluvia efectiva que produce una tormenta en función de las características del uso y cubierta vegetal del suelo.

En el método se considera antes de la ocurrencia de la precipitación, que el suelo tiene cierta cantidad de humedad y que conforme llueve, la humedad del suelo aumenta y la precipitación efectiva crece. También contempla, el caso opuesto, que cuando disminuye la humedad del suelo, la precipitación efectiva se reduce.

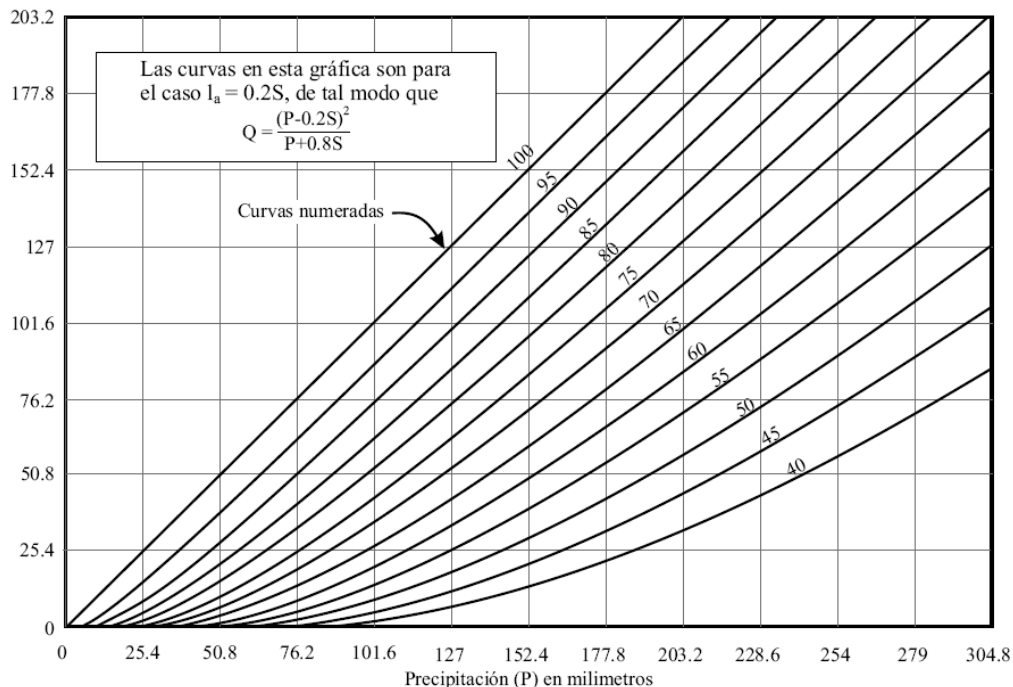


Figura 2.1. Cálculo de precipitación efectiva con el método de curva



El método del Número de curva se apoya en estas hipótesis:

Los números de curva  $N$  se aplican para diferentes condiciones de humedad de los cinco días previos a la precipitación, conocida como precipitación antecedente. La condición II, corresponde a humedad media del suelo, la cual corresponde a la precipitación que ocurre sobre un suelo con determinado contenido de agua por las lluvias en el período de 5 días anteriores. Se supone un aumento de la lluvia efectiva cuando el suelo está húmedo (condición III); por el contrario, si el suelo está relativamente seco, la infiltración predomina, por lo que la lluvia efectiva disminuye (condición I). En la tabla 2.2 aparecen los factores por los que se multiplica a la lámina de infiltración máxima  $S$  de la ecuación 1 para obtener la precipitación neta de acuerdo con la precipitación antecedente.

$$S = \frac{25400}{N} - 254 \quad (1)$$

Tabla 2.1 Valores del Número de curva N

Uso de la tierra	Pendiente	A	B	C	D
Barbecho R	mayor o igual al 3%	77	68	89	93
Barbecho N	mayor o igual al 3%	74	82	86	89
Barbecho R/N	menor al 3%	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	mayor o igual al 3%	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	mayor o igual al 3%	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	menor al 3%	64	73	78	82
Cereales de invierno R	mayor o igual al 3%	63	75	83	86
Cereales de invierno N	mayor o igual al 3%	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	menor al 3%	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	mayor o igual al 3%	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	mayor o igual al 3%	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	menor al 3%	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	mayor o igual al 3%	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos N	mayor o igual al 3%	54	69	78	82
Rotación de cultivos densos R/N	menor al 3%	52	67	76	79
Pradera pobre	mayor o igual al 3%	68	78	86	89
Pradera media	mayor o igual al 3%	49	69	78	85
Pradera buena	mayor o igual al 3%	42	60	74	79
Pradera muy buena	mayor o igual al 3%	9	55	69	77
Pradera pobre	menor al 3%	46	67	81	88
Pradera media	menor al 3%	9	59	75	83
Pradera buena	menor al 3%	29	48	69	78
Pradera muy buena	menor al 3%	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	mayor o igual al 3%	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	mayor o igual al 3%	9	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	mayor o igual al 3%	3	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	menor al 3%	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	menor al 3%	5	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	menor al 3%	25	50	67	76
Masa forestal (bosques monte bajo ) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques monte bajo ) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques monte bajo ) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques monte bajo ) espesa		6	52	62	69
Masa forestal (bosques monte bajo ) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	mayor o igual al 3%	94	94	94	94
Rocas impermeables	menor al 3%	91	91	91	91
Rocas impermeables	mayor o igual al 3%	96	96	96	96
Rocas impermeables	menor al 3%	93	93	93	93
N el cultivo sigue las curvas de nivel					
R el cultivo sigue la línea de máxima pendiente					

**Tabla 2.2 Factores que intervienen en el cálculo de la infiltración máxima según la precipitación antecedente**

Condición de humedad previa	Precipitación total en los 5 días anteriores		Multiplicar lámina de infiltración máxima $S$ por
	Plantas en periodo latente	Plantas en periodo de crecimiento	
I seca	Menor a 13 mm	Menor de 35mm	2.4
II normal	De 13 a 32 mm	De 35 a 52 mm	1
III húmeda	Mayor a 32 mm	Mayor de 52 mm	0.4

### 5.2.2 Tormentas con varias láminas de lluvias diarias

Para representar las condiciones de humedad del suelo en los modelos de predicción del escurrimiento a partir de la precipitación Sittner et al 1969 propusieron considerar la infiltración ocurrida el día anterior  $I_{ant}$

$$I_{ant} = C I_{i-1} \quad (11)$$

donde  $I_{i-1}$  es la lámina de infiltración del día anterior y  $C$  es una constante, llamada coeficiente de recesión, que representa a la "memoria" de la cuenca por efecto de lluvia previa, suele tener un valor de 0.7 para lluvias diarias. De valor de este coeficiente depende que tan rápido decae la lámina de infiltración del suelo en el tiempo.

Para encontrar la precipitación efectiva tomando en cuenta la lluvia del día anterior se establece las hipótesis de que la lámina infiltración máxima ( $S$ ) no cambia, que solamente dependen del número de escurrimiento que se asignó con la ecuación 1 y que la lámina de infiltración mínima se mantiene como el 20% de la lámina de infiltración máxima.

Para una precipitación total mayor a la lámina de infiltración mínima ( $P \geq 0.2S$ ), al considerar la infiltración del día anterior  $I_{ant}$  en la ecuación 7 se tiene que

$$I = (P - P_n) + I_{ant} \quad (12)$$

Para estimar la precipitación neta se toma cuenta a la ecuación 12 en la ecuación 8, quedando como

$$F = I - I_{\min} = (P - P_n) + I_{ant} - I_{\min} \dots (13)$$

Al sustituir la ecuación 13 en la 6 resulta

$$P_n = (P - I_{\min}) \left( \frac{(P - I_{\min}) - P_n + I_{ant}}{S} \right) = \frac{(P - I_{\min})^2 - (P - I_{\min})P_n + I_{ant}}{S}$$

al despejar a la lámina de lluvia efectiva  $P_n$

$$P_n = \frac{(P - I_{\min})^2}{S + P - I_{\min}} + \frac{(P - I_{\min})}{S + P - I_{\min}} I_{ant}$$

Después de considerar la hipótesis c:

$$P_n = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} + \frac{(P - 0.2S)}{P + 0.8S} I_{ant} \quad (14)$$

Como antes, el valor de la precipitación efectiva  $P_n$  obtenido con la ecuación 14 y el de la infiltración  $I$  calculada con la ecuación 12, son correctos sí  $0.2S \leq I \leq S$  de otro modo, se tiene dos casos distintos.

En el primero, cuando la infiltración obtenida con la ecuación 12 resulta ser  $I < 0.2S$ , se considera que la infiltración es  $I = 0.2S$  y que la precipitación neta es

$$P_n = \begin{cases} P - I & \text{sí } P \geq I \\ 0 & \text{sí } P < I \end{cases}$$

En el segundo, ocurre que la infiltración calculada con la ecuación 12 es  $I > S$ , la infiltración está dada como  $I = S$  y que la precipitación neta es

$$P_n = P - S \quad \text{e} \quad I = S$$

### c) Tormenta con láminas de lluvias en intervalos de tiempo menores de un día

Se propone emplear la ecuación siguiente en lugar de la ecuación 11

$$I_{ant} = C' I_{i-1} \quad (16)$$

donde

$$C' = C^{1/m} \quad (17)$$

siendo

$$m = 24 / \Delta t \quad (18)$$

$\Delta t$  es el intervalo de tiempo en horas e  $I_{i-1}$  la infiltración ocurrida entre los tiempos  $(i-1)\Delta t$  e  $(i-2)\Delta t$  ( $C' = 0.9852$  si  $C = 0.7$  para intervalos de tiempo de una hora).

Tomando como base la ecuación 14, se emplea

$$(P_n)_i = \frac{(P_i - 0.2S)^2}{P_i + 0.8S} + \frac{(P_i - 0.2S)}{P_i + 0.8S} I_{ant} \quad (19)$$

En la ecuación anterior,  $P_i$  y  $(P_n)_i$  son la precipitación total y precipitación total y neta respectivamente en los tiempos  $i\Delta t$  e  $(i-1)\Delta t$ .

Luego se calcula la infiltración  $I_i$  con una ecuación similar a 12 que es,

$$I_i = [P_i - (P_n)_i] + C' I_{i-1} \quad (20)$$

Sí  $0.2S \leq I_i \leq S$  son correctos los valores de la precipitación neta  $(P_n)_i$  y la lámina de infiltración  $I_i$ . De otra manera, se tienen dos casos:

a)  $I_i < 0.2S$ ,  $I_i = 0.2S$  y  $(P_n)_i = P_i - 0.2S$

b)  $I_i > S$ ,  $I_i = S$  y  $(P_n)_i = P_i - S$

Cuando se tiene que la precipitación total  $P_i$  es menor o igual a la lámina de infiltración mínima  $P_i \leq 0.2S$ , se consideran 2 situaciones distintas. Si  $P_i + C' I_{i-1} < S$  se considera  $I_i = P_i + C' I_{i-1}$  y la precipitación neta es  $(P_n)_i = 0$  ó sí  $P_i + C' I_{i-1} > S$ , se acepta que  $I_i = S$  y que la precipitación neta es  $(P_n)_i = P_i + C' I_{i-1} - S$ .

Una vez obtenida la precipitación neta  $(P_n)_i$  y la infiltración  $I_i$ , se incrementa el valor del índice  $i$  en uno y se realiza el cálculo correspondiente al tiempo  $i\Delta t$  hasta concluir con el último tiempo de interés.

### 5.2.3 Lluvia efectiva en intervalos de tiempo menores de un día

Se propone emplear la ecuación siguiente en lugar de la ecuación 11

$$I_{ant} = C' I_{i-1} \quad (16)$$

donde

$$C' = C^{1/m} \quad (17)$$

siendo

$$m = 24 / \Delta t \quad (18)$$

$\Delta t$  igual a 1 (en horas) e  $I_{i-1}$  la infiltración ocurrida entre los tiempos  $i\Delta t$  e  $(i-1)\Delta t$  ( $C' = 0.9852$  para intervalos de tiempo de una hora sí  $C = 0.7$ ).

Tomando como base la ecuación 14, se emplea

$$(P_n)_i = \frac{(P_i - 0.2S)^2}{P_i + 0.8S} + \frac{(P_i - 0.2S)}{P_i + 0.8S} I_{ant} \quad (19)$$

En la ecuación anterior,  $P_i$  y  $(P_n)_i$  son la precipitación total y precipitación total y neta respectivamente en los tiempos  $i\Delta t$  e  $(i-1)\Delta t$ .

Luego se calcula la infiltración  $I_i$  con una ecuación similar a 12 que es,

$$I_i = [P_i - (P_n)_i] + C' I_{i-1} \quad (20)$$

Sí  $0.2S \leq I_i \leq S$  son correctos los valores de la precipitación neta  $(P_n)_i$  y la lámina de infiltración  $I_i$ . De otra manera, se tienen dos casos:

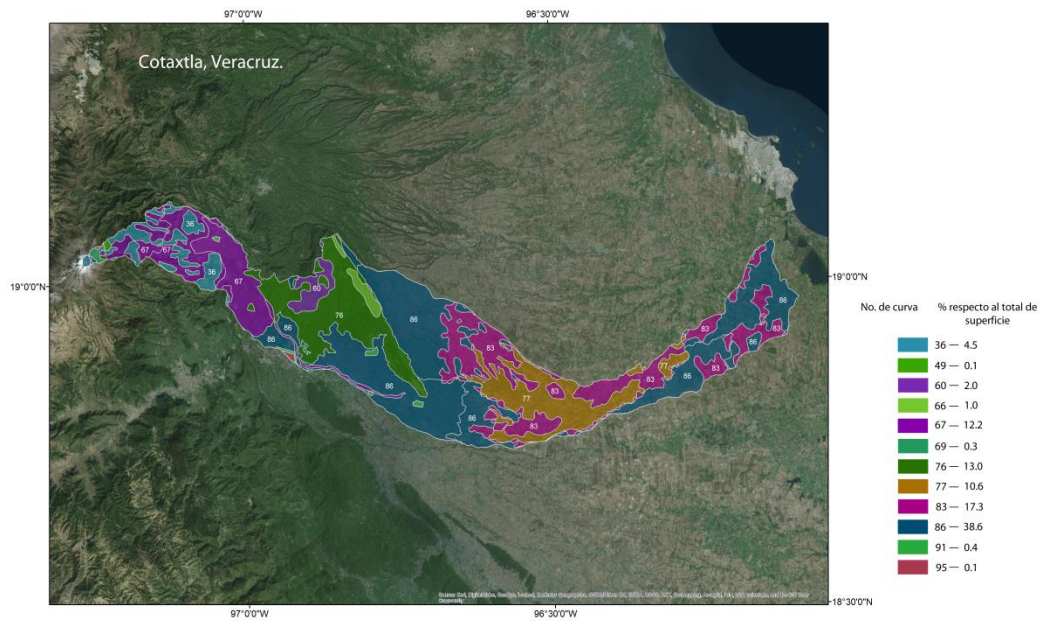
a)  $I_i < 0.2S$ ,  $I_i = 0.2S$  y  $(P_n)_i = P_i - 0.2S$

b)  $I_i > S$ ,  $I_i = S$  y  $(P_n)_i = P_i - S$

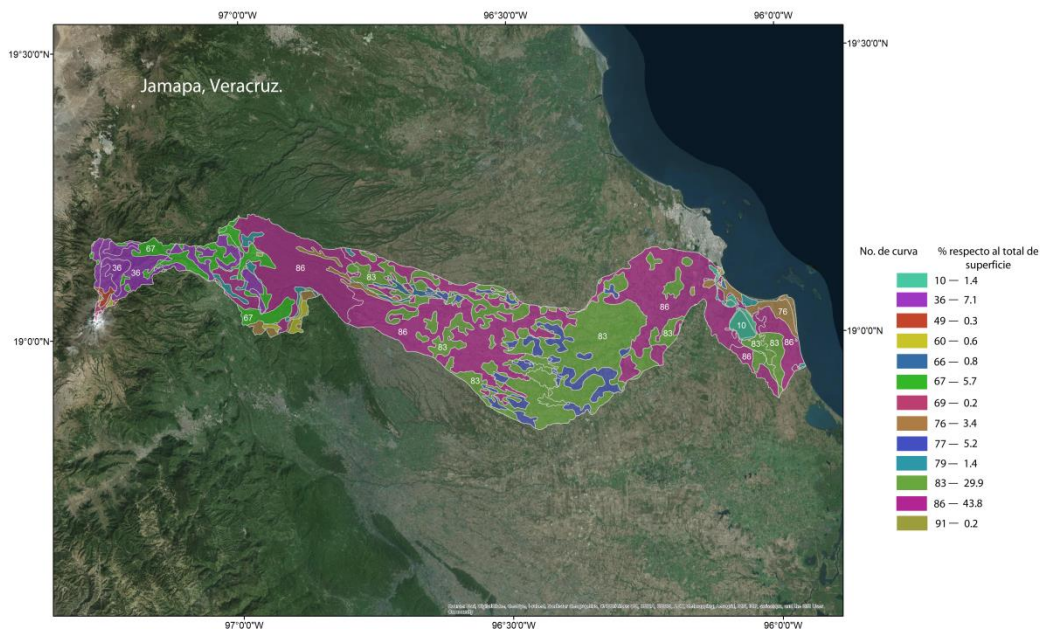
Cuando se tiene que la precipitación total  $P_i$  es menor o igual a la lámina de infiltración mínima  $P_i \leq 0.2S$ , se consideran 2 situaciones distintas. Si  $P_i + C' I_{i-1} < S$  se considera  $I_i = P_i + C' I_{i-1}$  y la precipitación neta es  $(P_n)_i = 0$  ó sí  $P_i + C' I_{i-1} > S$ , se acepta que  $I_i = S$  y que la precipitación neta es  $(P_n)_i = P_i + C' I_{i-1} - S$ .

Una vez obtenida la precipitación neta  $(P_n)_i$  y la infiltración  $I_i$ , se incrementa el valor del índice  $i$  en uno y se realiza el cálculo correspondiente al tiempo  $i\Delta t$  hasta concluir con el último tiempo de interés.

La Figura 2.2 presenta la distribución de los valores del número de curva o escurrimiento representativos de la superficie de las dos cuencas en estudio pertenecientes a los ríos Cotaxtla y Jamapa, respectivamente.



**Figura 2.2 Distribución de los números de curva o escurrimiento sobre la superficie del Río Cotaxtla.**



**Figura 2.3 Distribución de los números de curva o escurrimiento sobre la superficie del Río Jamapa.**

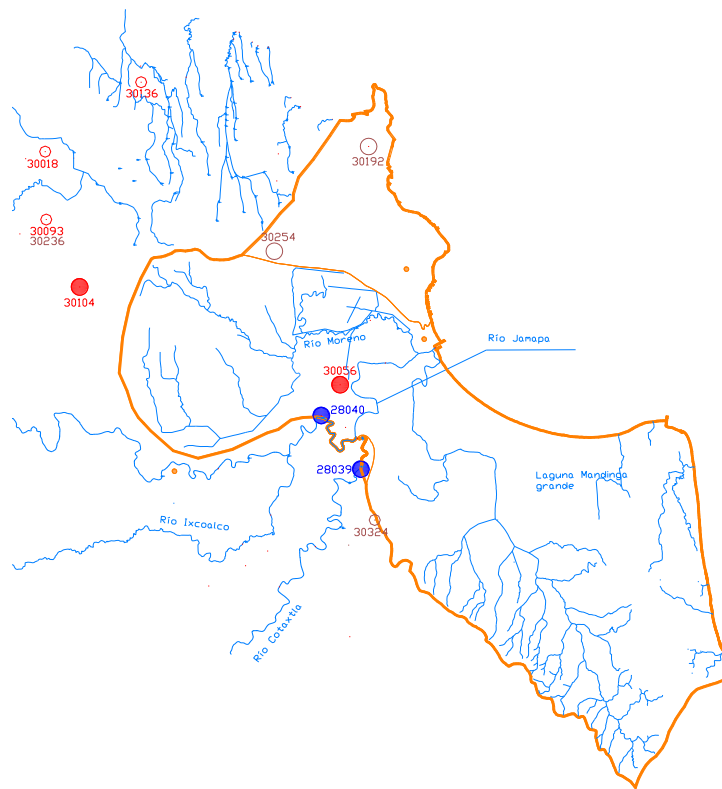
Para los cálculos de precipitación efectiva por tormentas aisladas o continuas se consideró un valor medio del número de escurrimiento de la cuenca en estudio, el cual se estimó de 78. A partir de la ecuación 3, la lámina de pérdida máxima  $S$  resulta igual a 71.4 mm, y el umbral de lámina de pérdida inicial  $I_0$  es igual a 14.3 mm.



## 5.3 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Para conocer el comportamiento de las tormentas que frecuentemente se presentan en la zona de estudio, se procedió a la recopilación de información de lluvia promedio diaria registrada en las estaciones climatológicas existentes dentro o próximas a la zona de estudio, utilizando para este propósito, la base de datos Clicom.

El procedimiento consiste en seleccionar las estaciones climatológicas que cuenten con registros amplios. Primero se confirmó que las estaciones seleccionadas cumplieran con un periodo grande de registro, agregando además que el porcentaje de datos que se tenían por año fluctuara entre 90 y 100 % para que la calidad del análisis sea adecuada. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Ubicación de estaciones climatológicas y eventos hidrometeorológicos**

En la Tabla 3.1 muestra las características de las estaciones seleccionadas



**Tabla 3.1. Estaciones climatológicas utilizadas para el análisis de precipitación**

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Años de registro	% de datos por año
30104	MATA ANONA	-96.5	19.2	34	97.7
30056	EL TEJAR	-96.2	19.1	51	99.9

### 5.3.1 Hietogramas, con intervalo de un día, asociados a distintos periodos de retorno de las estaciones climatológicas

#### 5.3.1.1 Duración de los hietogramas

Para saber el número de días que se deben considerar en la construcción de los hietogramas se utilizaron los espectros de densidad de potencia, se calcularon con un programa de cómputo elaborado para este fin, el cual utiliza la Transformada Rápida de Fourier (TRF). Se escogieron conjuntos de gastos medios diarios con 128 elementos, de diferentes estaciones climatológicas, porque el algoritmo empleado de la TRF considera números en base 2, y por ello se recomienda emplear un número de datos por transformar que sea igual a una potencia entera del número 2 (128, 64 ó 32), de manera que se consiga una mejor aproximación que no requiere mayores correcciones o filtros para reducir el error de cálculo.

En la Figura 3.2 se muestran algunos de los espectros de densidad de potencia y en la Tabla 3.2 se muestran las características de los espectros.

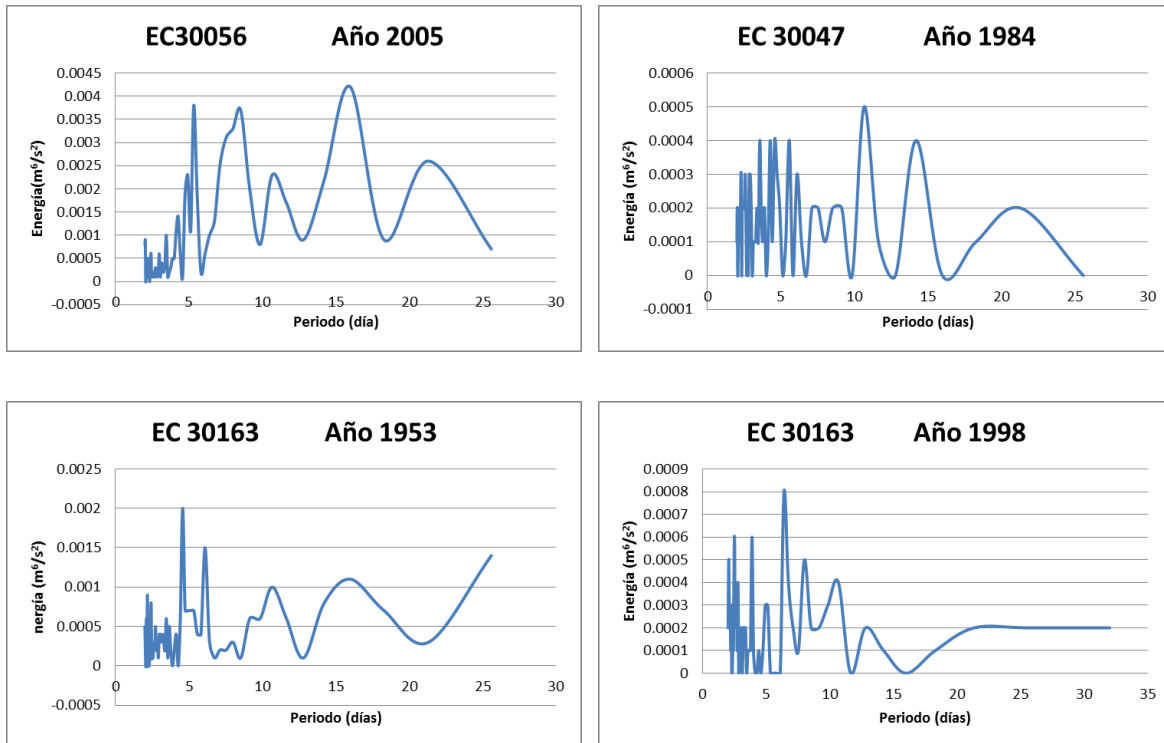


Figura 3.2. Espectros de densidad de potencia de las estaciones El Tejar (30056), El Coyol (30047) y Soledad Doblado (30163)

Tabla 3.2. Características de los espectros de densidad de potencia

Estación	Año	frecuencia (1/día)	periodo (día)	energía (m <sup>6</sup> /s <sup>2</sup> )
30056	2005	0.0625	16	0.0042
		0.117	8.533	0.0037
		0.0188	5.33	0.0038
		0.094	10.67	0.0023
30047	1984	0.094	10.67	0.0005
		0.0703	14.22	0.0004
30163	1953	0.219	4.57	0.002
		0.164	6.1	0.0015
		0.094	10.67	0.001
	1998	0.016	6.4	0.0008
		0.125	8	0.0005
		0.094	10.67	0.0004

---

En los cuatro espectros de densidad de potencia que se muestran coinciden en el periodo de 10.67 días por lo que se decidió que los trenes de lluvia fueran de 10 días.

#### ***5.3.1.2 Láminas de lluvia diaria de 1 a 10 días consecutivos***

En la Tabla 3.3 y en la Tabla 3.4 se muestran los máximos acumulados de lluvia diaria consecutiva de 10, 9, 8, ..., 2 y 1 día, de las estaciones 30056 y 30104 respectivamente.

**Tabla 3.3. Máximos acumulados anuales (mm) de diez a un día**

EC 30056 EL TEJAR										
Año	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1961	341.7	324.5	295.5	290.8	280.5	200.7	183.4	173.1	156.7	129.5
1962	341.1	333.9	323.3	306.6	296.0	210.9	201.8	184.5	174.5	121.5
1963	303.3	282.3	253.0	238.4	219.9	216.4	187.9	156.3	144.0	103.0
1964	413.7	413.2	405.6	402.1	396.9	389.3	372.3	282.3	240.5	150.5
1965	247.6	225.5	209.5	205.4	190.7	171.6	157.4	150.3	123.2	103.2
1966	352.9	333.6	327.4	294.9	246.5	223.9	218.3	173.5	141.2	135.0
1967	222.8	222.8	212.8	178.8	176.6	166.6	134.8	134.8	133.3	89.0
1968	214.0	192.8	192.4	185.7	185.3	184.9	183.4	176.7	141.7	91.8
1969	489.2	477.3	436.3	429.0	424.8	384.8	284.0	244.0	200.0	132.5
1970	268.0	268.0	268.0	268.0	267.0	251.5	209.5	206.0	190.5	110.0
1971	480.3	445.3	442.3	407.3	346.8	324.8	319.0	286.8	281.0	206.0
1972	707.4	689.4	638.2	560.7	526.4	489.0	448.0	370.5	290.5	198.5
1973	274.5	269.6	267.2	262.2	257.7	245.5	225.5	195.5	157.5	100.0
1974	310.9	300.9	293.4	279.1	250.8	240.5	226.2	213.5	199.2	178.0
1975	523.3	503.6	476.4	448.9	399.7	376.2	349.0	279.0	198.0	111.5
1976	312.6	303.1	246.6	214.6	200.6	192.6	178.6	150.3	124.5	94.2
1977	279.7	279.7	256.7	256.7	241.0	223.0	218.0	177.0	156.0	151.0
1978	277.5	271.3	269.8	240.4	228.9	188.7	165.2	153.3	138.0	120.5
1979	251.6	239.3	238.5	235.3	235.3	218.8	213.7	183.7	176.5	122.5
1980	354.7	331.2	330.5	322.1	316.4	275.9	270.4	264.7	206.0	136.0
1981	385.6	385.6	385.6	385.6	365.6	298.6	269.5	247.9	218.5	151.5
1982	246.9	215.8	205.8	205.8	204.0	199.8	190.3	174.5	165.0	94.2
1983	344.3	323.7	323.7	306.0	291.8	271.1	249.5	217.5	162.0	118.0
1984	452.3	434.7	431.3	405.5	405.5	357.8	356.5	332.0	220.0	180.0
1985	317.3	306.1	304.9	261.6	256.4	250.9	238.9	224.7	223.5	211.5
1986	248.0	224.8	212.7	204.1	176.9	170.8	166.8	158.2	123.8	83.0
1987	297.2	262.6	252.3	232.3	193.6	188.7	184.5	163.5	143.0	123.0
1988	382.4	380.4	348.7	327.2	295.5	269.5	269.5	237.5	198.5	122.0
1989	306.1	306.1	302.9	288.1	282.6	282.6	257.8	231.0	203.0	120.0
1990	42.3	42.3	42.3	41.5	41.5	41.5	41.5	39.7	39.7	35.0
1991	372.9	346.9	314.4	312.4	306.9	292.2	260.0	206.0	201.5	142.0
1992	480.0	436.5	413.5	386.0	373.5	361.0	270.0	242.5	201.0	201.0
1993	291.7	283.7	272.4	269.7	219.7	203.5	166.5	158.5	129.8	77.0
1994	224.2	217.2	214.7	203.7	201.2	168.7	168.3	167.5	159.0	132.0
1995	302.2	281.7	273.0	231.0	212.0	195.5	195.5	161.5	147.0	134.0
1996	325.0	307.4	287.0	269.4	249.4	237.3	237.1	219.5	189.0	129.0
1997	311.4	308.9	284.9	250.9	239.4	206.1	205.4	186.4	183.0	113.0
1998	232.4	230.2	217.3	200.8	181.1	181.1	168.7	167.4	165.2	112.2
1999	280.9	273.2	257.2	243.7	233.2	221.5	218.7	218.7	178.2	133.5
2000	196.6	185.9	169.1	156.0	155.8	155.5	147.0	147.0	111.6	111.5
2001	333.9	313.9	296.6	271.8	258.3	233.5	179.2	176.7	130.7	128.2
2002	271.4	254.1	253.8	242.4	242.2	241.8	235.3	235.3	225.5	122.0
2003	278.8	278.8	278.8	273.5	273.5	270.5	246.5	214.0	170.5	121.5
2004	298.9	297.4	297.4	294.0	279.0	242.2	232.8	217.8	152.8	109.8
2005	596.3	572.3	565.5	565.5	565.5	565.5	565.5	557.5	503.0	357.0
2006	483.1	453.2	416.1	415.1	413.1	394.1	364.2	334.2	261.7	156.7
2007	171.1	167.0	167.0	167.0	162.9	155.0	155.0	155.0	148.0	108.0
2008	289.3	287.5	248.2	244.1	233.9	222.7	218.3	218.3	205.5	157.0
2009	227.4	226.8	223.2	190.1	169.6	165.6	156.9	143.6	143.6	140.0
2010	319.5	319.5	319.0	305.0	290.3	227.5	214.6	214.6	200.6	175.5
2011	237.2	237.2	237.2	236.2	234.5	230.5	208.5	183.5	144.0	125.0

**Tabla 3.4. Máximos acumulados anuales (mm) de diez a un día**

EC 30104 MATA ANONA										
Año	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1964	135.5	133.5	128.0	127.9	127.9	127.9	125.9	120.4	88.2	65.2
1965	216.7	216.7	193.7	180.7	153.7	128.9	128.3	103.5	91.5	85.8
1966	355.3	337.6	334.6	316.9	257.0	257.0	252.6	250.3	232.6	167.5
1967	267.5	256.6	256.4	238.4	191.6	180.1	174.1	169.0	163.0	145.0
1968	203.2	203.2	203.2	157.7	122.8	117.9	116.9	98.7	97.0	87.5
1969	326.1	308.1	301.1	288.1	272.2	229.8	229.5	222.1	210.7	130.7
1970	195.1	175.2	175.2	175.2	175.2	175.2	140.0	105.1	99.9	99.9
1971	191.7	191.7	191.7	191.7	167.5	158.8	158.4	122.3	108.4	63.1
1972	480.6	471.6	453.3	382.3	362.5	321.3	294.3	266.8	202.6	131.6
1973	208.8	208.8	192.8	185.2	181.7	175.5	162.5	160.1	147.7	133.2
1974	426.4	410.7	410.7	382.9	370.9	370.9	370.9	336.9	276.5	185.0
1975	343.2	343.2	343.2	343.2	291.6	255.2	228.2	182.7	153.9	117.9
1976	525.1	496.6	454.6	448.1	419.6	395.1	366.6	303.6	210.6	120.6
1977	141.7	133.0	133.0	123.7	107.5	107.5	95.5	89.5	61.9	50.2
1978	183.7	174.9	174.9	154.0	134.5	134.5	121.3	118.8	107.6	73.1
1979	168.3	140.0	129.9	129.9	115.4	115.4	112.3	110.9	79.2	66.1
1980	280.8	279.0	276.6	262.7	220.7	218.3	215.8	201.9	173.9	111.4
1981	269.0	269.0	269.0	263.7	219.0	201.8	200.5	193.0	181.7	118.5
1982	159.8	142.5	122.5	114.2	114.2	114.2	114.2	77.1	70.0	70.0
1983	452.2	439.4	436.0	423.2	414.2	393.8	358.3	275.4	225.2	127.0
1984	347.1	325.8	312.9	286.4	254.3	231.8	214.0	187.5	170.7	144.2
1985	208.3	208.3	208.3	208.3	208.3	203.8	203.8	203.8	180.0	108.0
1986	221.3	221.3	219.8	197.1	168.4	139.9	139.9	139.9	139.9	103.4
1987	187.1	161.3	159.3	153.1	129.5	125.7	108.8	84.8	81.0	74.8
1988	223.2	208.2	190.4	181.6	175.4	174.1	159.1	137.3	113.4	77.4
1989	179.2	179.2	179.2	172.3	112.7	101.1	99.1	99.1	99.1	92.2
1990	183.6	183.6	183.2	167.0	149.5	145.3	145.3	129.1	104.5	67.4
1991	303.3	267.5	239.9	211.1	204.4	203.3	157.0	125.3	112.1	100.0
1992	317.8	304.8	282.7	243.5	241.8	232.6	206.7	181.9	153.9	107.0
1993	116.9	116.9	116.9	111.1	93.1	89.8	84.0	53.0	49.8	47.2
1994	151.3	144.3	125.4	118.4	87.9	87.9	87.9	75.7	72.3	70.5
1995	98.0	89.0	77.0	76.0	74.2	68.5	59.5	56.2	50.1	50.1
1996	146.0	144.5	140.5	122.4	104.2	103.2	101.2	97.2	78.9	60.0

Posteriormente, a cada uno de los diez conjuntos de valores así obtenidos se ajustó a una función de distribución de probabilidad por medio del programa AX del Centro Nacional de Desastres (Cenapred).

En todos los casos, los valores de precipitación se ajustaban de mejor manera a la distribución Doble Gumbel, y a partir de ella se obtuvieron las láminas de lluvia acumulada por trenes de tormenta para  $n$  días consecutivos, siendo  $n = 1, 2, \dots, 10$ , para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 años que aparecen en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

**Tabla 3.5. Láminas de lluvia acumulada (mm) de varios días consecutivos de la E.C. 30056**

Periodo de retorno (año)	Número de días consecutivos de lluvia									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
2	289.1	278.0	266.1	251.6	238.4	219.4	205.5	187.6	162.8	119.4
5	411.9	395.6	381.8	369.8	349.5	314.7	282.7	249.6	212.2	157.0
10	491.8	472.3	452.9	433.5	414.3	384.5	350.3	310.8	261.5	195.8
20	552.0	530.5	505.2	477.9	460.4	436.2	408.6	369.6	314.5	232.8
50	623.1	599.3	566.7	529.8	514.4	496.8	478.5	441.3	381.6	277.5
100	674.4	649.1	611.1	567.3	553.4	540.5	529.1	493.2	430.6	309.9
200	725.0	698.2	654.8	604.1	591.8	583.4	578.9	544.2	478.8	341.6
500	791.3	762.4	712.1	652.4	642.0	639.8	644.2	611.1	541.8	383.2
1000	841.3	810.9	755.4	688.7	680.1	682.4	693.2	661.3	589.5	414.5

**Tabla 3.6. Láminas de lluvia acumulada (mm) de varios días consecutivos de la E.C. 30104**

Periodo de retorno (año)	Número de días consecutivos de lluvia									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
2	217.5	208.2	200.6	187.2	166.3	158.3	149.3	133.0	117.9	90.4
5	357.8	346.5	344.8	326.0	287.1	264.1	247.6	232.3	200.1	133.9
10	424.7	410.3	400.2	377.6	348.2	325.0	305.2	272.3	225.9	151.7
20	471.0	453.9	436.4	410.3	389.0	367.8	346.1	299.2	244.0	165.4
50	525.1	504.7	478.5	448.3	436.6	417.8	394.0	330.6	265.8	181.9
100	564.2	541.5	508.9	475.7	470.9	453.8	428.6	353.3	281.8	193.9
200	602.6	577.5	538.8	502.6	504.6	489.3	462.5	375.5	297.8	205.8
500	652.9	624.8	577.9	538.0	548.6	535.7	507.1	404.8	319.2	221.5
1000	690.7	660.4	607.5	564.6	582.1	570.9	540.8	426.6	335.8	233.3

Los datos de la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6 son acumulados de 10 a 1 día y se requieren acumulados de un solo día por lo que se procede de la siguiente manera:

- Al acumulado de 10 días se le resta el acumulado de 9 días y se tiene el acumulado de un día.
- Al acumulado de 9 días se le resta el acumulado de 8 días y se tiene el acumulado de un día.
- Se procede de la misma manera para los acumulados de 8 hasta 2 días para obtener acumulados de un día.

En la Tabla 3.7 y en la Tabla 3.8 se muestra la lámina total de un día de una tormenta de diez días consecutivos de lluvia, para diferentes periodos de retorno de las dos estaciones climatológicas analizadas.

**Tabla 3.7. Láminas de lluvia total (mm) de un día durante 10 días consecutivos para distintos periodos de retorno de la estación 30056**

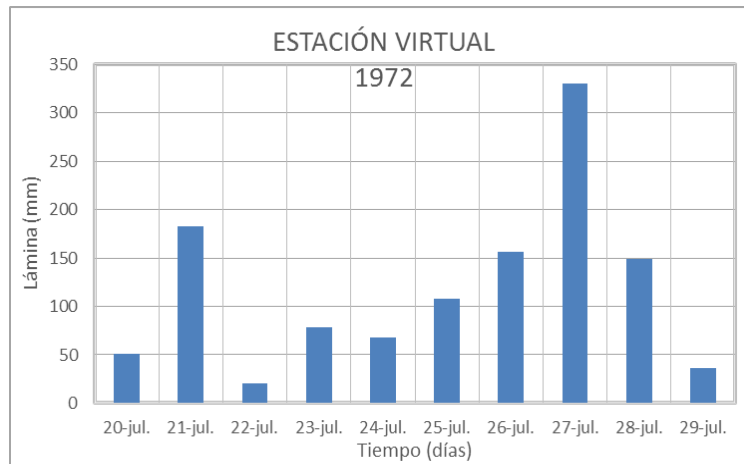
Día	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	11.1	16.3	19.5	21.5	23.7	25.3	26.9	28.9	30.4
9	11.9	13.7	19.4	25.3	32.7	38.0	43.4	50.3	55.5
8	14.5	12.1	19.5	27.3	36.9	43.8	50.7	59.7	66.7
7	13.2	20.3	19.2	17.5	15.4	13.9	12.3	10.4	8.6
6	19.0	34.7	29.8	24.2	17.7	13.0	8.4	2.3	1.0
5	14.0	32.1	34.2	27.5	18.2	11.3	4.5	2.0	1.0
4	17.9	33.1	39.5	39.0	37.3	35.9	34.8	33.0	31.9
3	24.9	37.4	49.3	55.1	59.6	62.6	65.4	69.3	71.8
2	43.3	55.3	65.7	81.7	104.1	120.7	137.1	158.6	175.1
1	119.4	157.0	195.8	232.8	277.5	309.9	341.6	383.2	414.5

**Tabla 3.8. Lámina de lluvia total (mm) de un día durante 10 días consecutivos para distintos periodos de retorno de la estación 30104**

Día	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	9.2	11.3	14.4	17.1	20.4	22.8	25.1	28.2	30.4
9	7.7	1.7	10.1	17.5	26.2	32.6	38.7	46.8	52.9
8	13.4	18.8	22.6	26.1	30.2	33.2	36.2	40.0	42.9
7	20.9	39.0	29.4	21.3	11.7	4.8	-2.0	-10.6	-17.5
6	7.9	23.0	23.2	21.3	18.9	17.1	15.3	12.9	11.1
5	9.0	16.5	19.8	21.6	23.8	25.3	26.8	28.7	30.2
4	16.4	15.3	32.9	46.9	63.4	75.3	87.0	102.3	114.2
3	15.1	32.3	46.5	55.2	64.8	71.5	77.8	85.5	90.9
2	27.5	66.2	74.2	78.6	83.9	87.9	92.0	97.8	102.4
1	90.4	133.9	151.7	165.4	181.9	193.9	205.8	221.5	233.3

### 5.3.1.3 Forma de los hietogramas de lluvia diaria

Siguiendo con el procedimiento, el siguiente paso es definir la forma del hietograma (orden de las láminas de un día del hietograma), para eso se utilizó los datos históricos de un registro virtual, que se construyó con la suma de las láminas diarias de cada una de las estaciones climatológicas que se analizan (30056 y 30104), con un intervalo de tiempo que va desde el 1 de enero de 1964 al 31 de diciembre del 1997. Del registro virtual se obtuvieron los máximos promedios anuales de 10 días consecutivos del registro diario, de estos promedios se escogieron los cuatro mayores y se analizaron para escoger el más apropiado para darle forma a los hietogramas de las estaciones climatológicas ya señaladas. El máximo anual de diez días seleccionado fue el que inicia el 20 de julio de 1972 (Figura 3.3). Se les asignó un orden como lo muestra la Tabla 3.9.



**Figura 3.3. Arreglo histórico**

**Tabla 3.9. Arreglo histórico de 10 días**

20/07/1972	
Orden	[mm]
10	51.2
9	182.6
8	20
6	78.6
5	68
4	107.5
2	156.2
1	330.1
3	148.5
7	36.3

Para obtener los hietogramas el procedimiento es el siguiente:

Los datos de las tablas 3.7 y 3.8 indican las láminas de lluvia de un día durante 10 días, mientras que los datos de la Tabla 3.9 indica el orden en que deben ir apareciendo esas láminas de lluvia en el hietograma.

Para ejemplificar el método se utilizara los datos de la Tabla 3.7 (estación climatológica El Tejar) para el periodo de retorno de 2 años. El hietograma tendrá como primer lámina de lluvia la del día diez (11.1mm), como segunda lámina la del día nueve (11.9 mm), la tercer lámina es la del día ocho (14.5 mm), así hasta llegar a la lámina diez del hietograma que es la del día 7 (13.2 mm). Los datos del hietograma de la estación El Tejar aparecen en la Tabla 3.10 y en la Tabla 3.11 los de la estación Paso del Toro.



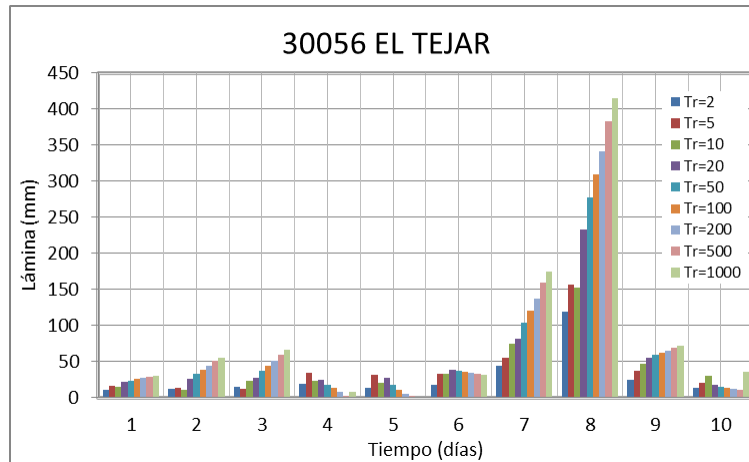
**Tabla 3.10. Hietograma de lluvia total (mm) de 10 días consecutivos asociadas a distintos periodos de retorno, estación 30056**

Orden	Periodos de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	11.1	16.3	19.5	21.5	23.7	25.3	26.9	28.9	30.4
9	11.9	13.7	19.4	25.3	32.7	38.0	43.4	50.3	55.5
8	14.5	12.1	19.5	27.3	36.9	43.8	50.7	59.7	66.7
6	19.0	34.7	29.8	24.2	17.7	13.0	8.4	2.3	8.6
5	14.0	32.1	34.2	27.5	18.2	11.3	4.5	2.0	1.0
4	17.9	33.1	39.5	39.0	37.3	35.9	34.8	33.0	31.9
2	43.3	55.3	65.7	81.7	104.1	120.7	137.1	158.6	175.1
1	119.4	157.0	195.8	232.8	277.5	309.9	341.6	383.2	414.5
3	24.9	37.4	49.3	55.1	59.6	62.6	65.4	69.3	71.8
7	13.2	20.3	19.2	17.5	15.4	13.9	12.3	10.4	35.9

**Tabla 3.11. Hietograma de lluvia total (mm) de 10 días consecutivos asociadas a distintos periodos de retorno, estación 30104**

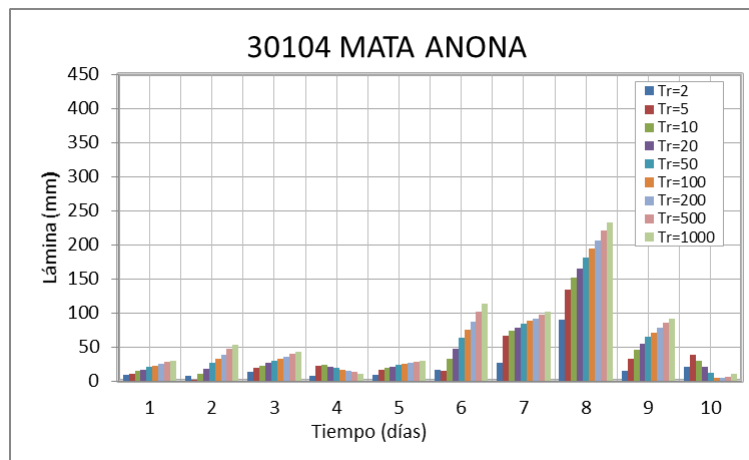
Orden	Periodos de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	9.21	11.32	14.39	17.11	20.39	22.76	25.14	28.18	30.38
9	7.68	1.70	10.07	17.48	26.23	32.55	38.68	46.82	52.90
8	13.36	18.78	22.60	26.07	30.20	33.21	36.20	39.96	42.86
6	7.93	23.02	23.17	21.28	18.85	17.05	15.29	12.86	11.12
5	9.00	16.49	19.77	21.63	23.77	25.26	26.78	28.68	30.16
4	16.36	15.26	32.90	46.94	63.42	75.32	86.97	102.29	114.17
2	27.51	66.18	74.15	78.64	83.91	87.88	91.99	97.78	102.44
1	90.35	133.87	151.70	165.40	181.86	193.88	205.77	221.45	233.31
3	15.12	32.25	46.49	55.15	64.81	71.49	77.76	85.54	90.86
7	20.93	38.95	29.44	21.26	11.69	4.81	5.00	6.00	10.00

En la Figura 3.4 se grafican los valores de la Tabla 3.10 que corresponden a la estación climatológica El Tejar.



**Figura 3.4. Hietogramas para diferentes periodos de retorno de la EC El Tejar**

Con el procedimiento antes descrito se obtuvo la Figura 3.5.



**Figura 3.5. Hietograma para diferentes periodos de retorno de la EC Mata Anona**

En el capítulo 5.5.1 “Factores de simultaneidad entre hietogramas” se detalla la obtención de los factores de simultaneidad para los diferentes periodos de retorno entre hietogramas (Tabla 3.12 ).

**Tabla 3.12 factores de simultaneidad**

Periodo de retorno (años)	FS
2	0.95
5	0.93
10	0.92
20	0.92
50	0.92
100	0.92
200	0.92
500	0.92
1000	0.93

Con los factores de simultaneidad de la Tabla 3.12 y la lluvia total, Tablas (3.10 y 3.11) se obtienen los datos de los hietogramas de lluvia total con factor de simultaneidad Tabla 3.13 y Tabla 3.14.

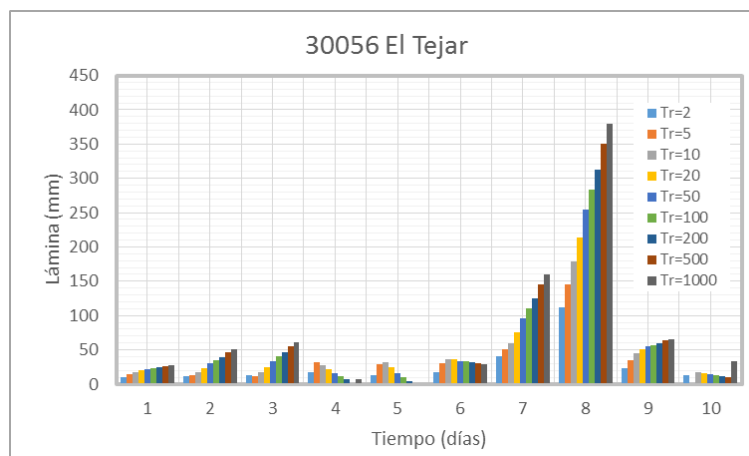
**Tabla 3.13. Hietograma de lluvia total (mm) de 10 días consecutivos asociadas a distintos periodos de retorno, estación 30056 con factor de simultaneidad correspondiente a precipitaciones**

Orden	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	10.39	15.06	17.87	19.66	21.72	23.16	24.59	26.47	27.88
9	11.08	12.69	17.77	23.21	29.91	34.83	39.71	46.08	50.84
8	13.55	11.15	17.84	25.01	33.77	40.15	46.42	54.70	61.05
6	17.76	32.12	27.32	22.20	16.18	11.88	7.67	2.08	7.87
5	13.04	29.63	31.34	25.21	16.69	10.39	4.12	1.83	0.92
4	16.70	30.57	36.27	35.75	34.14	32.91	31.83	30.25	29.20
2	40.50	51.10	60.30	74.89	95.34	110.55	125.59	145.24	160.36
1	111.63	145.14	179.58	213.32	254.20	283.77	312.85	350.96	379.61
3	23.24	34.57	45.21	50.47	54.63	57.35	59.91	63.48	65.75
7	12.34	18.77	17.63	16.04	14.11	12.68	11.28	9.49	32.91

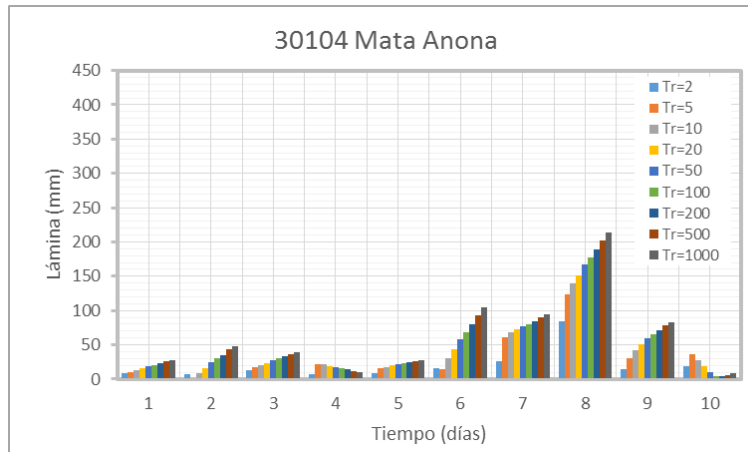
**Tabla 3.14. Hietograma de lluvia total (mm) de 10 días consecutivos asociadas a distintos periodos de retorno, estación 30104 con factor de simultaneidad correspondiente a precipitaciones**

Orden	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	8.61	10.47	13.20	15.68	18.68	20.84	23.02	25.81	27.83
9	7.18	1.57	9.24	16.02	24.03	29.81	35.42	42.88	48.45
8	12.49	17.36	20.73	23.89	27.66	30.42	33.15	36.60	39.26
6	7.41	21.28	21.25	19.50	17.27	15.62	14.00	11.78	10.19
5	8.41	15.25	18.14	19.82	21.77	23.13	24.53	26.27	27.62
4	15.29	14.11	30.18	43.01	58.09	68.98	79.65	93.68	104.57
2	25.72	61.19	68.02	72.06	76.86	80.48	84.25	89.55	93.83
1	84.46	123.78	139.16	151.55	166.57	177.56	188.45	202.81	213.69
3	14.13	29.82	42.65	50.53	59.36	65.47	71.21	78.34	83.22
7	19.56	36.01	27.01	19.48	10.71	4.41	4.58	5.49	9.16

En la Figura 3.6 se grafican los valores de la Tabla 3.13 que corresponden a la estación climatológica El Tejar y en la Figura 3.7 los de la Tabla 3.14 que corresponde a la estación climatológica Paso del Toro.



**Figura 3.6. Hietogramas de lluvia total (mm) con factor de simultaneidad para diferentes periodos de retorno de la EC El Tejar**



**Figura 3.7. Hietograma de lluvia total (mm) con factor de simultaneidad para diferentes periodos de retorno de la EC Mata Anona**

### 5.3.2. Hietogramas de lluvia diaria efectiva

Para obtener la lluvia efectiva se utilizó el número de curva para la zona de estudio, método descrito en el capítulo 5.2 de este mismo reporte. Se utilizó una  $N$  (número de curva) para esta cuenca igual 78 a los datos de la Tabla 3.10 para obtener los hietogramas de lluvia efectiva, Tabla 3.15 correspondiente a la estación climatológica El Tejar. Figura 3.8.

**Tabla 3.15 Hietograma de lluvia diaria efectiva (mm) para la estación pluviométrica 30056**

Orden	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	0	0.45	1.32	1.96	2.77	3.38	4.02	4.91	5.62
9	0	0	1.29	3.40	6.76	9.76	13.04	17.72	21.46
8	0.04	0	1.31	4.38	9.79	14.45	19.47	26.56	32.25
6	1.18	7.74	5.31	3.18	1.01	0	0	0	0
5	0.00	7.31	8.06	4.37	0.95	0	0	0	0
4	0.86	7.52	11.38	10.54	9.08	8.36	7.75	6.87	6.31
2	12.53	21.47	29.81	42.46	61.03	75.25	89.67	108.80	123.76
1	75.46	110.88	148.30	185.44	230.80	263.70	296.00	338.33	370.08
3	5.34	13.54	22.45	26.90	30.33	32.56	34.67	37.63	39.52
7	0.00	1.77	1.54	0.99	0.33	0	0	0	10.30

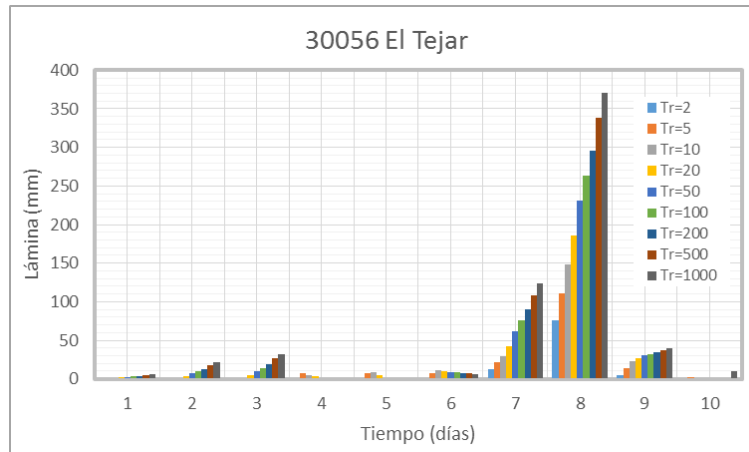


Figura 3.8. Hietograma de lluvia diaria efectiva para diferentes periodos de retorno de la EC El Tejar

### 5.3.3 Hietogramas con intervalos de una hora asociados a distintos periodos de retorno de las estaciones climatológicas.

Las láminas de lluvia de cada uno de los días del hietograma se disgregaron 8 láminas de lluvia de una hora. Para tal efecto se utilizaron ciertos factores para obtener las láminas de lluvia acumuladas a cada hora. Dichos factores fueron escogidos a partir de valores propuestos por Chen (1983) que aparecen en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Factores de duración de Chen

No	d(min.)	d(hrs)	Tabla original de Chen								Factor para k=65
			0.15	0.2	0.3	0.35	0.4	0.6	0.65	0.7	
1	5	0.083	0.25	0.27	0.29	0.29	0.29	0.3	0.3	0.3	0.195
2	10	0.167	0.36	0.4	0.43	0.44	0.45	0.47	0.475	0.48	0.30875
3	15	0.25	0.46	0.49	0.54	0.55	0.56	0.59	0.595	0.6	0.38675
4	30	0.5	0.67	0.7	0.74	0.755	0.77	0.8	0.805	0.81	0.52325
5	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.65
6	120	2	1.49	1.41	1.32	1.285	1.25	1.18	1.17	1.16	0.7605
7	240	4	2.23	1.99	1.72	1.625	1.53	1.34	1.32	1.3	0.858
8	360	6	2.81	2.44	2	1.715	1.72	1.43	1.4	1.38	0.91
9	480	8	3.32	2.81	2.23	1.86	1.86	1.49	1.46	1.43	0.949

Para las estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis el factor que se utilizó fue de  $k = 0.45$  y de acuerdo al Tabla 3.16 los porcentajes de lluvia por hora fueron:

**Tabla 3.17. Factores de duración de Chen**

Chen k=45	
h	0.45
1	0.45
2	0.55
3	0.61
4	0.67
5	0.70
6	0.74
7	0.77
8	0.80

Aplicando estos factores a cada estación se obtienen los hietogramas de diez días con barras de una hora.

En las tablas de 3.18 a 3.19 se muestran las láminas de lluvia efectiva horaria (mm) con factor de simultaneidad.

**Tabla 3.18. Estación Pluviométrica 30056 El Tejar (láminas de lluvia efectiva horaria (mm) con factor de simultaneidad)**

Periodo de retorno 2 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0.02	0	0.01	0.27	1.69	0.11	0
2	0	0	0	0.03	0	0.02	0.36	2.24	0.14	0
3	0	0	0	0.05	0	0.03	0.60	3.77	0.24	0
4	0	0	0	0.09	0	0.06	1.14	7.13	0.46	0
5	0	0	0	0.37	0	0.25	4.90	30.66	1.98	0
6	0	0	0	0.05	0	0.03	0.62	3.89	0.25	0
7	0	0	0	0.03	0	0.02	0.45	2.82	0.18	0
8	0	0	0	0.02	0	0.02	0.32	1.99	0.13	0

Periodo de retorno 5 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.00	0	0	0.16	0.15	0.15	0.45	2.46	0.29	0.03
2	0.01	0	0	0.21	0.19	0.20	0.60	3.27	0.38	0.04
3	0.01	0	0	0.36	0.33	0.34	1.02	5.51	0.64	0.07
4	0.02	0	0	0.67	0.62	0.64	1.92	10.41	1.21	0.13
5	0.07	0	0	2.89	2.66	2.75	8.26	44.77	5.20	0.55
6	0.01	0	0	0.37	0.34	0.35	1.05	5.68	0.66	0.07
7	0.01	0	0	0.27	0.24	0.25	0.76	4.12	0.48	0.05
8	0.00	0	0	0.19	0.17	0.18	0.54	2.91	0.34	0.04

Periodo de retorno 10 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.02	0.02	0.02	0.10	0.16	0.23	0.63	3.28	0.48	0.02
2	0.03	0.03	0.03	0.14	0.21	0.31	0.84	4.36	0.63	0.03
3	0.05	0.05	0.05	0.23	0.35	0.51	1.41	7.34	1.07	0.05
4	0.09	0.09	0.09	0.44	0.67	0.97	2.66	13.86	2.02	0.10
5	0.39	0.37	0.38	1.90	2.88	4.18	11.45	59.62	8.69	0.43
6	0.05	0.05	0.05	0.24	0.37	0.53	1.45	7.57	1.10	0.06
7	0.04	0.03	0.04	0.17	0.27	0.38	1.05	5.48	0.80	0.04
8	0.03	0.02	0.02	0.12	0.19	0.27	0.74	3.88	0.56	0.03

Periodo de retorno 20 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.03	0.06	0.08	0.06	0.08	0.21	0.91	4.11	0.58	0.01
2	0.05	0.08	0.11	0.08	0.11	0.28	1.20	5.46	0.76	0.02
3	0.08	0.14	0.18	0.13	0.19	0.47	2.03	9.20	1.29	0.03
4	0.14	0.27	0.34	0.24	0.35	0.89	3.83	17.39	2.43	0.05
5	0.62	1.16	1.48	1.04	1.51	3.83	16.46	74.80	10.47	0.23
6	0.08	0.15	0.19	0.13	0.19	0.49	2.09	9.50	1.33	0.03
7	0.06	0.11	0.14	0.10	0.14	0.35	1.51	6.88	0.96	0.02
8	0.04	0.08	0.10	0.07	0.10	0.25	1.07	4.86	0.68	0.01

Periodo de retorno 50 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.13	0.05	0.19	0.01	0.01	0.18	1.31	5.14	0.65	0
2	0.18	0.07	0.26	0.02	0.02	0.24	1.74	6.83	0.87	0
3	0.30	0.11	0.44	0.03	0.03	0.41	2.94	11.50	1.46	0
4	0.56	0.21	0.82	0.05	0.06	0.78	5.55	21.73	2.75	0
5	2.42	0.92	3.54	0.23	0.25	3.34	23.87	93.47	11.84	0
6	0.31	0.12	0.45	0.03	0.03	0.42	3.03	11.87	1.50	0
7	0.22	0.08	0.33	0.02	0.02	0.31	2.19	8.59	1.09	0
8	0.16	0.06	0.23	0.02	0.02	0.22	1.55	6.08	0.77	0

Periodo de retorno 100 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.06	0.19	0.29	0	0	0.17	1.63	5.89	0.70	0
2	0.08	0.26	0.39	0	0	0.22	2.16	7.82	0.93	0
3	0.14	0.43	0.66	0	0	0.38	3.64	13.17	1.57	0
4	0.27	0.82	1.25	0	0	0.71	6.88	24.88	2.96	0
5	1.15	3.52	5.36	0	0	3.06	29.60	107.0	12.74	0
6	0.15	0.45	0.68	0	0	0.39	3.76	13.59	1.62	0
7	0.11	0.32	0.49	0	0	0.28	2.72	9.84	1.17	0
8	0.07	0.23	0.35	0	0	0.20	1.92	6.96	0.83	0

Periodo de retorno 200 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.08	0.26	0.40	0	0	0.16	1.95	6.62	0.75	0
2	0.10	0.35	0.54	0	0	0.21	2.59	8.79	0.99	0
3	0.17	0.59	0.90	0	0	0.35	4.36	14.81	1.67	0
4	0.32	1.11	1.71	0	0	0.66	8.24	27.98	3.16	0
5	1.40	4.78	7.33	0	0	2.83	35.42	120.3	13.59	0
6	0.18	0.61	0.93	0	0	0.36	4.50	15.28	1.72	0
7	0.13	0.44	0.67	0	0	0.26	3.26	11.07	1.25	0
8	0.09	0.31	0.48	0	0	0.18	2.30	7.82	0.88	0

Periodo de retorno 500 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.10	0.36	0.56	0	0	0.14	2.37	7.58	0.81	0
2	0.13	0.48	0.74	0	0	0.18	3.15	10.07	1.08	0
3	0.21	0.81	1.25	0	0	0.31	5.31	16.96	1.82	0
4	0.40	1.54	2.36	0	0	0.58	10.04	32.04	3.44	0
5	1.74	6.61	10.15	0	0	2.49	43.18	137.8	14.78	0
6	0.22	0.84	1.29	0	0	0.32	5.48	17.49	1.88	0
7	0.16	0.61	0.93	0	0	0.23	3.97	12.67	1.36	0
8	0.11	0.43	0.66	0	0	0.16	2.81	8.96	0.96	0

Periodo de retorno 1000 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.11	0.44	0.68	0	0	0.12	2.71	8.30	0.85	0.21
2	0.15	0.59	0.91	0	0	0.17	3.60	11.03	1.14	0.28
3	0.25	0.99	1.53	0	0	0.28	6.06	18.57	1.91	0.46
4	0.47	1.88	2.89	0	0	0.53	11.45	35.09	3.61	0.88
5	2.01	8.07	12.43	0	0	2.27	49.27	150.9	15.54	3.77
6	0.25	1.02	1.58	0	0	0.29	6.25	19.16	1.97	0.48
7	0.18	0.74	1.14	0	0	0.21	4.53	13.88	1.43	0.35
8	0.13	0.52	0.81	0	0	0.15	3.20	9.81	1.01	0.25



**Tabla 3.19. Estación Pluviométrica 30104 Mata Anona (láminas de lluvia efectiva horaria (mm) con factor de simultaneidad)**

Periodo de retorno 2 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0.01	0.09	1.05	0	0.03
2	0	0	0	0	0	0.01	0.12	1.40	0	0.04
3	0	0	0	0	0	0.01	0.20	2.35	0	0.07
4	0	0	0	0	0	0.02	0.37	4.44	0	0.14
5	0	0	0	0	0	0.10	1.60	19.12	0	0.61
6	0	0	0	0	0	0.01	0.20	2.43	0	0.08
7	0	0	0	0	0	0.01	0.15	1.76	0	0.06
8	0	0	0	0	0	0.01	0.10	1.24	0	0.04

Periodo de retorno 5 años											
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	0.02	0.05	0.01	0	0.60	2.03	0.20	0.21
2	0	0	0	0.02	0.06	0.01	0	0.80	2.69	0.26	0.28
3	0	0	0	0.04	0.11	0.01	0	1.34	4.54	0.44	0.48
4	0	0	0	0.08	0.20	0.02	0	2.54	8.57	0.84	0.90
5	0	0	0	0.32	0.86	0.09	0	10.92	36.87	3.61	3.89
6	0	0	0	0.04	0.11	0.01	0	1.39	4.68	0.46	0.49
7	0	0	0	0.03	0.08	0.01	0	1.00	3.39	0.33	0.36
8	0	0	0	0.02	0.06	0.01	0	0.71	2.40	0.23	0.25

Periodo de retorno 10 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0.04	0.05	0.02	0.14	0.75	2.38	0.41	0.12
2	0	0	0.06	0.06	0.03	0.18	1.00	3.16	0.55	0.15
3	0	0	0.10	0.10	0.05	0.30	1.69	5.33	0.92	0.26
4	0	0	0.18	0.20	0.10	0.58	3.19	10.06	1.74	0.49
5	0	0	0.77	0.85	0.42	2.47	13.73	43.27	7.48	2.11
6	0	0	0.10	0.11	0.05	0.31	1.74	5.49	0.95	0.27
7	0	0	0.07	0.08	0.04	0.23	1.26	3.98	0.69	0.19
8	0	0	0.05	0.06	0.03	0.16	0.89	2.81	0.49	0.14

Periodo de retorno 20 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.01	0.01	0.07	0.03	0.04	0.31	0.88	2.65	0.56	0.04
2	0.01	0.01	0.09	0.04	0.05	0.41	1.17	3.52	0.75	0.06
3	0.02	0.02	0.16	0.08	0.08	0.68	1.96	5.93	1.26	0.09
4	0.03	0.04	0.30	0.14	0.15	1.29	3.71	11.21	2.37	0.18
5	0.14	0.17	1.28	0.61	0.64	5.55	15.95	48.23	10.20	0.75
6	0.02	0.02	0.16	0.08	0.08	0.71	2.02	6.12	1.30	0.10
7	0.01	0.02	0.12	0.06	0.06	0.51	1.47	4.43	0.94	0.07
8	0.01	0.01	0.08	0.04	0.04	0.36	1.04	3.13	0.66	0.05

Periodo de retorno 50 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.07	0.03	0.11	0.02	0.05	0.55	1.01	2.99	0.74	0
2	0.09	0.04	0.15	0.03	0.07	0.73	1.35	3.97	0.98	0
3	0.16	0.06	0.25	0.04	0.11	1.22	2.27	6.69	1.65	0
4	0.30	0.11	0.47	0.08	0.22	2.31	4.29	12.64	3.12	0
5	1.30	0.49	2.00	0.35	0.93	9.94	18.45	54.35	13.44	0
6	0.16	0.06	0.25	0.04	0.12	1.26	2.34	6.90	1.71	0
7	0.12	0.04	0.18	0.03	0.09	0.91	1.70	5.00	1.24	0
8	0.08	0.03	0.13	0.02	0.06	0.65	1.20	3.53	0.87	0

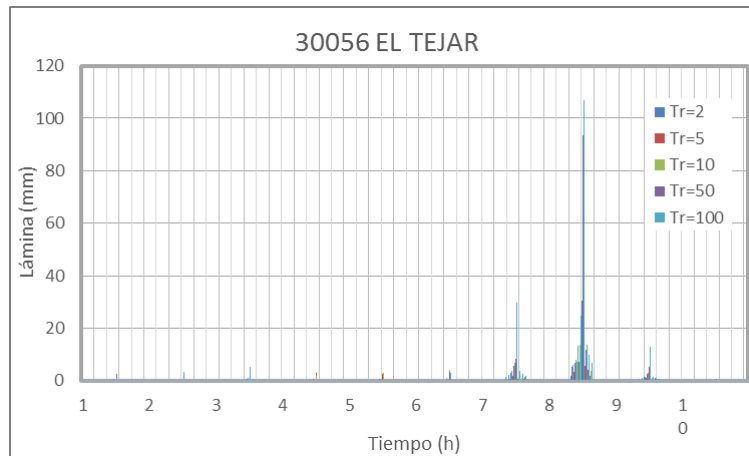
Periodo de retorno 100 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.04	0.13	0.15	0.01	0.06	0.74	1.11	3.24	0.87	0
2	0.06	0.18	0.20	0.01	0.08	0.99	1.48	4.30	1.15	0
3	0.10	0.29	0.34	0.02	0.14	1.66	2.49	7.25	1.94	0
4	0.18	0.56	0.64	0.04	0.27	3.14	4.71	13.70	3.66	0
5	0.79	2.40	2.76	0.15	1.15	13.49	20.25	58.90	15.76	0
6	0.10	0.30	0.35	0.02	0.15	1.71	2.57	7.48	2.00	0
7	0.07	0.22	0.25	0.01	0.11	1.24	1.86	5.42	1.45	0
8	0.05	0.16	0.18	0.01	0.07	0.88	1.32	3.83	1.02	0

Periodo de retorno 200 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.06	0.20	0.20	0	0.08	0.95	1.21	3.49	0.99	0
2	0.08	0.27	0.26	0	0.10	1.26	1.61	4.64	1.31	0
3	0.14	0.45	0.44	0	0.17	2.13	2.71	7.81	2.21	0
4	0.26	0.85	0.83	0	0.32	4.02	5.12	14.76	4.18	0
5	1.13	3.65	3.57	0	1.39	17.29	22.01	63.48	17.99	0
6	0.14	0.46	0.45	0	0.18	2.19	2.79	8.06	2.28	0
7	0.10	0.34	0.33	0	0.13	1.59	2.02	5.84	1.65	0
8	0.07	0.24	0.23	0	0.09	1.12	1.43	4.13	1.17	0

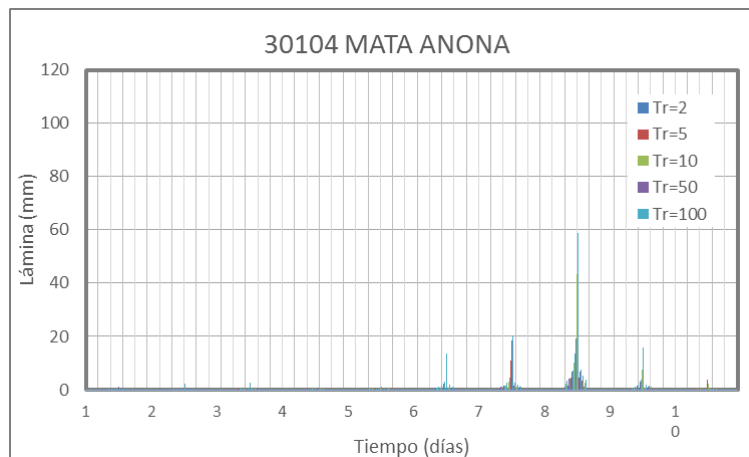
Periodo de retorno 500 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.09	0.31	0.26	0	0.09	1.24	1.34	3.83	1.14	0
2	0.12	0.42	0.34	0	0.12	1.65	1.78	5.08	1.52	0
3	0.20	0.70	0.57	0	0.21	2.77	3.01	8.56	2.56	0
4	0.38	1.32	1.08	0	0.40	5.24	5.68	16.18	4.84	0
5	1.61	5.68	4.66	0	1.70	22.54	24.43	69.59	20.81	0
6	0.20	0.72	0.59	0	0.22	2.86	3.10	8.83	2.64	0
7	0.15	0.52	0.43	0	0.16	2.07	2.25	6.40	1.91	0
8	0.10	0.37	0.30	0	0.11	1.47	1.59	4.52	1.35	0

Periodo de retorno 1000 años										
hora/día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.11	0.40	0.30	0	0.11	1.47	1.45	4.08	1.25	0
2	0.15	0.54	0.40	0	0.14	1.96	1.92	5.43	1.66	0
3	0.25	0.91	0.68	0	0.24	3.30	3.24	9.14	2.80	0
4	0.46	1.71	1.29	0	0.46	6.23	6.13	17.27	5.29	0
5	2.00	7.36	5.53	0	1.96	26.78	26.34	74.26	22.77	0
6	0.25	0.93	0.70	0	0.25	3.40	3.34	9.43	2.89	0
7	0.18	0.68	0.51	0	0.18	2.46	2.42	6.83	2.09	0
8	0.13	0.48	0.36	0	0.13	1.74	1.71	4.83	1.48	0

En las figuras 3.9 a 3.10 se muestran las láminas de lluvia efectiva horaria con factor de simultaneidad de las estaciones pluviométricas de interés.



**Figura 3.9. Hietogramas para diferentes periodos de retorno, considerando la lluvia efectiva horaria con factor de simultaneidad de eventos extraordinarios**



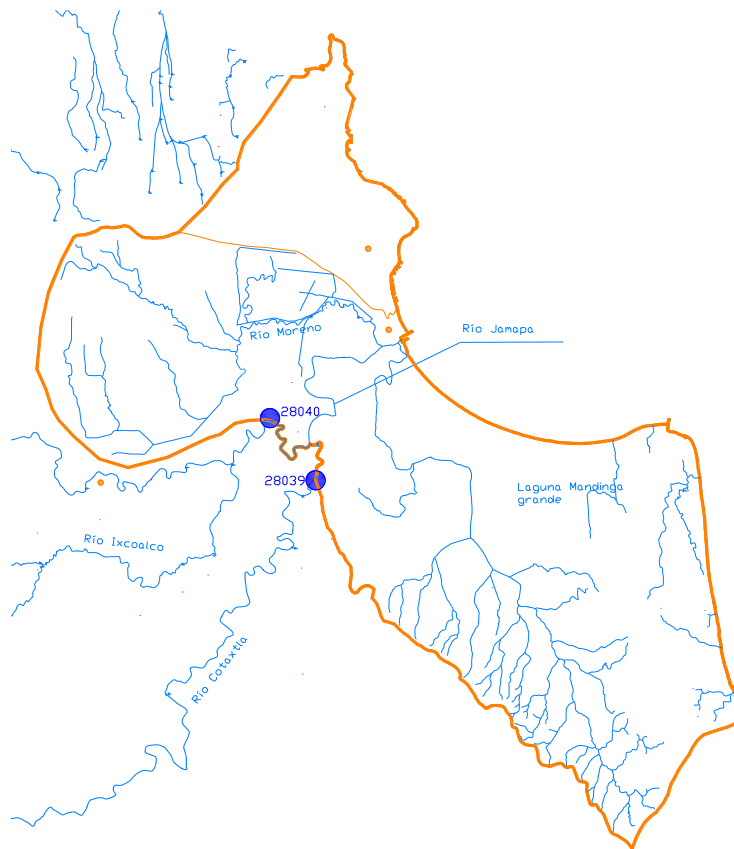
**Figura 3.10. Hietogramas para diferentes periodos de retorno, considerando la lluvia efectiva horaria con factor de simultaneidad de eventos extraordinarios**

## 5.4 ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES

Con la intención de verificar el funcionamiento hidráulico de la cuenca de estudio correspondiente al Organismo de Cuenca Golfo Centro, se revisó los registros de las estaciones hidrométricas sobre los cauces que componen la red de drenaje de dicha cuenca.

### 5.4.1 Registros de escurrimiento diario

Como se aprecia en la Figura 4.1, la región de interés sí cuenta con registros de escurrimiento que permiten conocer la variación de los gastos en el tiempo sobre sus cauces.



**Figura 4.1. Localización de estaciones hidrométricas**

De acuerdo a la disposición de las estaciones hidrométricas 28039 y 28040, resultó conveniente practicar el análisis estadístico de sus registros hidrométricos de gastos medios diarios disponibles.

Los registros medios diarios de las estaciones hidrométricas se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), información proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los datos básicos relativos a las estaciones consideradas se consignan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Estaciones hidrométricas utilizadas para el análisis del escurrimiento**

Clave	Nombre	Años de registro	% de registro	Longitud	Latitud	Altitud
28039	Paso del Toro	56	92.4	-97.0	19.2	1860
28040	El Tejar	60	80.3	-96.2	19.1	10

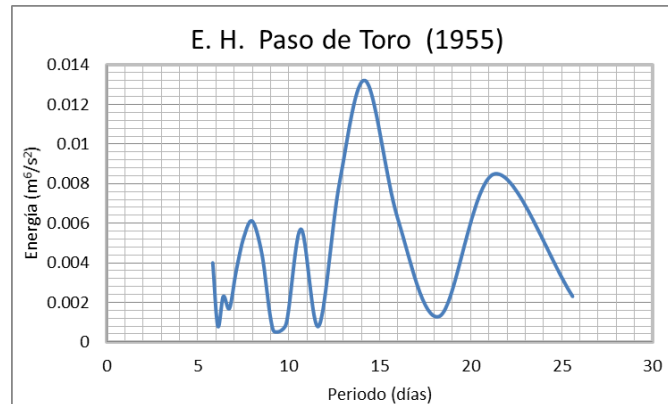
Para calcular la evolución en el tiempo de las inundaciones, se requiere la determinación de los volúmenes de agua que escurren en la red de drenaje de la cuenca. Como la precisión en el cálculo de dichos volúmenes depende a su vez de la estimación de los hidrogramas en algunos puntos de la cuenca, es necesario definir la duración del tiempo base de tales hidrogramas.

Para saber tiempo base de los hidrogramas se utilizaron los espectros de densidad de potencia, se calcularon con un programa de cómputo elaborado para este fin, el cual utiliza la Transformada Rápida de Fourier (TRF). Se escogieron conjuntos de gastos medios diarios con 128 elementos, de las estaciones hidrométricas, porque el algoritmo empleado de la TRF considera números en base 2, y por ello se recomienda emplear un número de datos por transformar que sea igual a una potencia entera del número 2 (como serían 128, 64 ó 32), de manera que se consigue una mejor aproximación que no requiere mayores correcciones o filtros para reducir el error de cálculo.

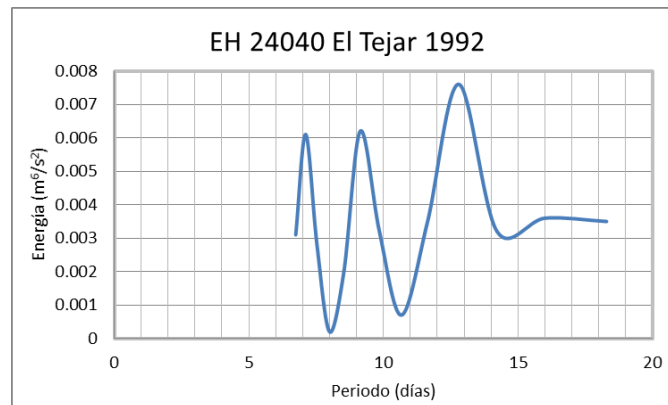
A manera de ejemplo, las Figura 4.2, y Figura 4.3 son representaciones gráficas de los espectros de densidad de potencia de los datos de las estaciones hidrométricas Paso del Toro y El Tejar, correspondientes a los años 1955 y 1992. Puede observarse que en el eje horizontal se prefirió utilizar una escala de periodos en lugar de frecuencias, lo que permitió determinar directamente los intervalos de tiempo dentro de los cuales se presentan las funciones sinusoidales de mayor amplitud.

Las amplitudes más grandes en la gráfica de la estación hidrométrica Paso del Toro y El Tejar se presentan en la Tabla 5.2.

De la Tabla 4.2 la amplitud del periodo de 10.67 de la estación Paso del Toro es el que tiene la mayor energía, la amplitud del periodo de 9.14 de la estación El Tejar es la que tiene la mayor energía. Por lo anterior se puede concluir que el tiempo base para los hidrogramas es de diez días, si se considera el promedio de los espectros de las dos estaciones.



**Figura 4.2. Espectro cuyas abscisas son los periodos obtenido a partir de los 128 gastos medios diarios más grandes de Paso del Toro, en el año 1955**



**Figura 4.3. Espectro cuyas abscisas son los periodos obtenido a partir de los 128 gastos medios diarios más grandes de El Tejar, en el año 1969**

**Tabla 4.2. Frecuencias principales y densidades espectrales obtenidas de los espectros de potencia de los registros de las E.H. Paso del Toro y El Tejar**

Estación	Año	frecuencia (1/día)	Periodo (días)	Energía (m <sup>6</sup> /s <sup>2</sup> )
24039 Paso del Toro	1955	0.0781	12.8	0.0081
		0.0859	11.64	0.0008
		0.0938	10.67	0.0057
		0.1016	9.85	0.0009
		0.1094	9.14	0.0006
Estación	Año	frecuencia (1/día)	Periodo (días)	Energía (m <sup>6</sup> /s <sup>2</sup> )
24040 El Tejar	1992	0.086	11.64	0.0035
		0.094	10.67	0.0007
		0.102	9.85	0.0032
		0.109	9.14	0.0062
		0.117	8.53	0.002
		0.125	8	0.0002

Una vez definido el tiempo base, se procedió a definir la magnitud y forma de los hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno en la ubicación de la hidrométrica considerada.

#### **5.4.2 Esguerrimiento diario promedio en varios días consecutivos**

Del registro de la estación hidrométrica 28039 de gastos medios diarios, se identificaron los valores promedio máximos anuales, en intervalos de 1, 2, 3, ..., 9 y 10 días.

**Tabla 4.3. Promedios máximos anuales de la estación hidrométrica Paso del Toro**

Año/ día	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1952	317.9	310.7	302.1	324.4	348.3	376.1	410.0	440.3	448.4	456.0
1953	130.3	134.1	137.7	141.5	153.2	166.8	182.3	206.8	240.6	279.4
1954	263.0	263.1	270.7	284.8	284.4	287.6	289.1	312.4	377.4	467.9
1955	353.2	344.5	352.5	374.4	395.2	395.5	398.3	445.7	549.9	566.2
1956	241.7	253.3	266.6	268.3	267.9	269.1	287.7	317.4	331.7	348.4
1957	155.5	162.5	169.6	178.7	188.4	199.0	201.7	217.8	272.1	326.0
1958	259.2	267.7	284.8	299.4	316.3	334.0	343.0	383.8	449.8	470.8
1959	261.6	269.5	280.8	291.2	309.0	326.4	346.3	362.7	382.3	399.4
1960	248.4	259.4	274.8	290.9	308.1	331.5	363.5	387.3	431.9	457.1
1961	224.2	235.7	245.6	250.2	256.6	283.8	315.5	349.5	408.8	448.5
1962	145.6	156.9	170.2	185.3	200.3	209.3	220.6	251.0	278.4	329.9
1963	114.0	120.6	128.0	138.6	152.7	171.7	194.8	223.5	271.5	275.5
1964	106.1	103.6	108.2	116.0	121.2	133.2	145.9	158.2	175.4	204.3
1965	105.8	106.9	111.4	117.8	124.5	133.1	141.8	157.8	183.5	201.2
1966	195.5	207.8	220.4	237.8	258.2	283.9	308.6	316.6	350.7	378.6
1967	212.0	227.7	246.4	268.7	293.5	311.7	317.9	340.3	364.1	387.9
1968	138.9	144.1	150.1	151.4	152.0	151.3	165.1	181.8	206.5	221.2
1969	376.7	390.4	395.3	397.8	392.5	416.2	458.0	488.4	543.5	616.0
1970	214.2	228.6	246.4	267.5	290.9	310.6	331.2	373.1	396.9	403.6
1971	106.9	110.4	113.9	116.6	118.5	121.0	132.6	150.5	181.7	195.9
1972	306.7	323.7	343.7	368.6	400.2	443.5	505.6	602.8	658.1	747.0
1973	234.9	234.3	235.8	244.5	258.3	264.4	267.5	286.7	322.2	396.8
1974	467.6	497.0	532.1	572.7	619.9	673.5	742.6	806.8	838.5	838.8
1975	533.0	563.7	583.2	594.2	603.2	609.6	598.7	616.3	670.0	754.0
1976	273.7	285.9	302.7	321.7	340.6	362.1	389.9	433.0	464.9	476.0
1977	108.4	114.7	121.6	128.0	135.8	136.3	143.7	158.4	184.1	224.0
1978	128.8	135.8	143.7	152.8	159.5	167.3	183.9	219.4	266.2	279.0
1979	246.2	255.4	272.0	286.8	303.9	299.9	300.6	333.9	395.4	408.5
1980	217.1	228.4	244.6	265.6	291.0	320.5	363.0	416.4	460.4	515.9
1981										
1982										
1983										
1984										
1985										
1986	166.3	171.5	175.2	174.0	172.4	188.2	206.2	214.3	230.3	280.9
1987	130.9	130.6	132.3	140.4	150.2	162.8	178.4	201.7	232.5	244.3
1988	252.9	267.0	283.8	303.9	329.4	354.3	373.2	388.1	393.0	395.6
1989										
1990										
1991	280.4	292.2	301.1	311.1	320.2	328.8	346.1	369.6	377.1	407.2
1992	179.5	184.9	195.7	209.4	222.7	229.8	238.9	255.9	273.8	314.8
1993	241.0	247.2	259.8	273.1	285.3	301.6	321.9	336.2	355.3	409.6
1994	123.4	128.2	132.6	137.8	140.0	144.9	145.0	159.6	182.5	190.7
1995										
1996										
1997										
1998										
1999										
2000	249.0	268.1	289.9	314.5	342.5	373.1	383.9	385.4	396.2	462.4
2001										
2002										
2003	257.9	263.7	271.5	283.3	295.3	308.9	333.4	339.2	349.0	415.6
2004										
2005	319.3	339.2	357.2	383.6	413.1	440.0	467.6	501.1	534.1	541.5

En la Tabla 4.3 se muestran los promedios máximos anuales de la estación hidrométrica Paso del Toro. Posteriormente, se obtienen los acumulados de 10, 9, ..., 2 y 1 día (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4. Acumulados máximos anuales (m<sup>3</sup>/s) de la estación hidrométrica Paso del Toro**

Año\ día	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1952	3179	2797	2416	2271	2090	1881	1640	1321	897	456
1953	1303	1207	1101	990	919	834	729	620	481	279
1954	2630	2368	2165	1994	1707	1438	1157	937	755	468
1955	3532	3101	2820	2621	2371	1978	1593	1337	1100	566
1956	2417	2279	2133	1878	1608	1346	1151	952	663	348
1957	1555	1463	1357	1251	1130	995	807	653	544	326
1958	2592	2409	2278	2096	1898	1670	1372	1151	900	471
1959	2616	2425	2247	2039	1854	1632	1385	1088	765	399
1960	2484	2335	2198	2037	1849	1658	1454	1162	864	457
1961	2242	2122	1965	1751	1540	1419	1262	1048	818	449
1962	1456	1412	1362	1297	1202	1047	882	753	557	330
1963	1140	1086	1024	970	916	859	779	670	543	276
1964	1061	933	866	812	727	666	584	475	351	204
1965	1058	962	891	825	747	666	567	473	367	201
1966	1955	1870	1763	1665	1549	1420	1234	950	701	379
1967	2120	2050	1971	1881	1761	1559	1272	1021	728	388
1968	1389	1297	1201	1060	912	757	661	545	413	221
1969	3767	3513	3163	2784	2355	2081	1832	1465	1087	616
1970	2142	2057	1972	1873	1745	1553	1325	1119	794	404
1971	1069	994	912	816	711	605	530	451	363	196
1972	3067	2914	2750	2580	2401	2218	2022	1808	1316	747
1973	2349	2109	1886	1712	1550	1322	1070	860	644	397
1974	4676	4473	4257	4009	3719	3368	2970	2421	1677	839
1975	5330	5073	4666	4159	3619	3048	2395	1849	1340	754
1976	2737	2573	2422	2252	2044	1810	1560	1299	930	476
1977	1084	1032	973	896	815	681	575	475	368	224
1978	1288	1223	1150	1070	957	836	736	658	532	279
1979	2462	2299	2176	2008	1824	1500	1202	1002	791	409
1980	2171	2056	1957	1859	1746	1602	1452	1249	921	516
1986	1663	1543	1401	1218	1034	941	825	643	461	281
1987	1309	1176	1058	983	901	814	713	605	465	244
1988	2529	2403	2270	2128	1976	1772	1493	1164	786	396
1991	2804	2630	2409	2178	1921	1644	1384	1109	754	407
1992	1795	1664	1566	1466	1336	1149	956	768	548	315
1993	2410	2225	2079	1912	1712	1508	1288	1009	711	410
1994	1234	1154	1061	965	840	724	580	479	365	191
2000	2490	2413	2319	2201	2055	1865	1536	1156	792	462
2003	2579	2373	2172	1983	1772	1545	1334	1017	698	416
2005	3193	3053	2858	2685	2479	2200	1870	1503	1068	541



### 5.4.2.1 Esguerrimiento diario promedio en varios días consecutivos para distintos periodos de retorno

A cada uno de los 10 conjuntos de valores de los acumulados máximos anuales se les practicó un ajuste con respecto a diferentes funciones de distribución de probabilidad, verificándose que la magnitud de los esguerrimientos tiene un comportamiento que se describe de mejor manera mediante la función de distribución Doble Gumbel. Empleando el programa AX, se obtuvieron los gastos acumulados correspondientes a  $n$  días consecutivos, siendo  $n = 1, 2, \dots, 10$ , para los periodos de retorno de interés ( $T_r = 2, 5, 10, 50, 100, 200, 500$  y  $1000$  años).

**Tabla 4.5. Gastos acumulados de 10 a 1 día para diferentes periodos de retorno de la estación hidrométrica Paso del Toro, en  $m^3/s$**

Periodo de retorno (año)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
2	2091	1952	1816	1673	1510	1329	1132	926	687	377
5	2970	2779	2585	2384	2157	1900	1614	1309	951	515
10	3568	3342	3109	2869	2599	2291	1943	1568	1127	607
20	4151	3892	3621	3342	3031	2673	2264	1820	1297	695
50	4924	4621	4299	3970	3605	3180	2689	2153	1519	810
100	5517	5181	4820	4453	4047	3570	3017	2408	1688	896
200	6121	5753	5352	4946	4498	3970	3351	2668	1859	983
500	6945	6532	6077	5618	5113	4514	3807	3022	2089	1101
1000	7596	7148	6651	6149	5600	4945	4167	3300	2270	1192

### 5.4.3 Hidrogramas de para distintos periodos de retorno

Para obtener hidrogramas de 10 días de tiempo base, se realizó el cálculo de los esguerrimientos de cada uno de los 10 días de duración de los hidrogramas. Esto se obtuvo al realizar las diferencias de los gastos acumulados entre  $n+1$  y  $n$  días consecutivos. Los valores de esguerrimiento de un día, ajustados a diferentes periodos de retorno se encuentran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Escurrecimientos diarios ( $m^3/s$ ) para diferentes periodos de retorno, para la E.H. Paso del Toro**

Día	Periodo de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	138.7	191.0	225.7	259.0	302.3	335.1	368.2	412.7	447.4
9	136.6	194.2	233.4	271.6	322.3	361.2	400.9	454.9	497.6
8	142.7	200.9	240.2	278.4	328.7	367.2	406.3	459.4	501.2
7	162.9	226.9	269.8	311.2	365.4	406.6	448.4	504.8	549.1
6	180.9	256.8	308.3	358.6	425.1	476.1	528.2	599.1	655.0
5	196.9	286.3	348.1	409.1	490.6	553.7	618.6	707.5	778.3
4	206.1	305.3	374.7	443.5	536.2	608.3	682.6	785.0	866.8
3	239.4	357.9	440.9	523.3	634.3	720.7	809.8	932.4	1030.4
2	310.2	435.5	519.9	601.7	709.4	791.7	875.2	988.4	1077.5
1	376.7	515.4	607.1	695.1	809.5	896.1	983.4	1100.7	1192.4

Con el procedimiento anterior se obtuvieron los valores de escurreimiento de un día, ajustados a diferentes periodos de retorno para la estación hidrométrica El Tejar (28040). Tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Escurreimientos diarios para diferentes periodos de retorno, para la E.H. El Tejar, en  $m^3/s$**

Día	Periodo de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
10	78.7	111.5	112.4	117.8	127.0	136.4	148.3	169.5	191.9
9	70	125.0	130.5	136.6	146	153.5	163.1	178.7	193.3
8	62	137.3	143.9	146.4	149.5	152.3	156.1	162.5	169.2
7	64	147.9	160.9	164.8	168.5	171	173.5	177.3	179.4
6	72.3	173.4	172.5	163.9	153.2	146.2	140.3	134.9	134.5
5	84.9	165.3	182.4	191.1	201.1	208.5	215.9	227.1	235.1
4	95.9	192.8	215.2	228.0	242.8	253.8	265	280.2	292.9
3	119.2	240.5	289.0	324	365	394.5	423.7	461.6	489.6
2	165.6	287.2	366.8	430.8	505	555.8	602.3	657.3	695
1	250.8	448.2	506.5	554	615.4	664.1	716.3	791.6	852.9

### 5.4.3.1 Forma de los hidrogramas

Para dar forma a los hidrogramas se utilizaron valores históricos de cada estación, a estos valores se les asignó un orden, el número 1 se le asignó al máximo valor, al resto de los valores se le asignó el orden de acuerdo a su magnitud y su posición con respecto al valor máximo. En la Tabla 4.8 se muestran los valores históricos y el orden que se le asignó a cada valor.

**Tabla 4.8. Hidrograma histórico de 10 días de duración en la E.H. El Tejar**

28040 El Tejar				
Orden	Año	Mes	Día	m <sup>3</sup> /s
10	1974	SEP	20	10.8
3	1974	SEP	21	292
2	1974	SEP	22	483.1
1	1974	SEP	23	540.3
4	1974	SEP	24	254
5	1974	SEP	25	147
6	1974	SEP	26	129
7	1974	SEP	27	160.1
8	1974	SEP	28	102.7
9	1974	SEP	29	70.8

La asignación de un orden a los valores de escurrimiento para dar forma al hidrograma se desarrolló de la siguiente manera:

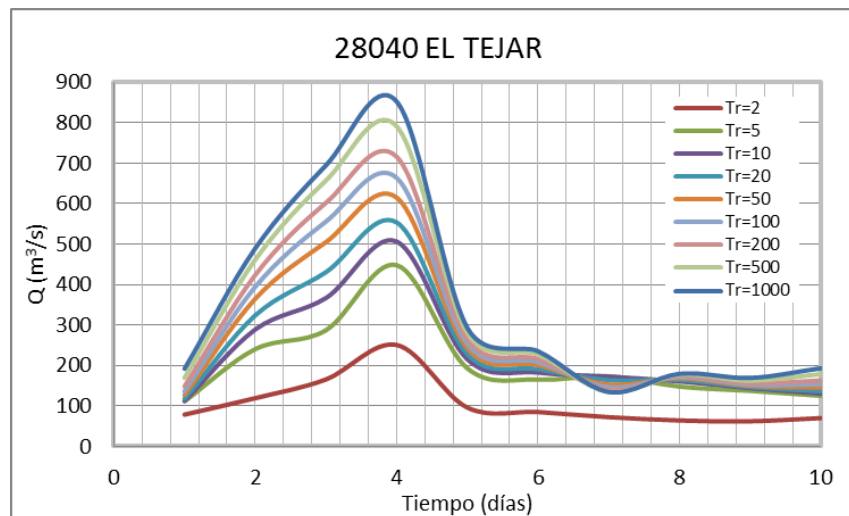
Los datos de las tablas 4.6 y 4.7 indican los escurrimientos diarios durante 10 días, mientras que los datos de la Tabla 4.8 indica el orden en que deben ir apareciendo esos escurrimientos en el hidrograma.

Para ejemplificar el método se utilizara los datos de la Tabla 4.7 (estación hidrométrica El Tejar) para el periodo de retorno de 2 años. El hidrograma tendrá como primer gasto el del día diez (78.65 m<sup>3</sup>/s), como segundo escurrimiento el del día tres (119.22 m<sup>3</sup>/s), el tercer escurrimiento es el del día dos (165.59 m<sup>3</sup>/s), así hasta llegar el escurrimiento diez del hietograma que es la del día nueve (70 m<sup>3</sup>/s). Los datos del hidrograma de la estación El Tejar se consignan en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9. Hidrograma de la estación E.H. El Tejar**

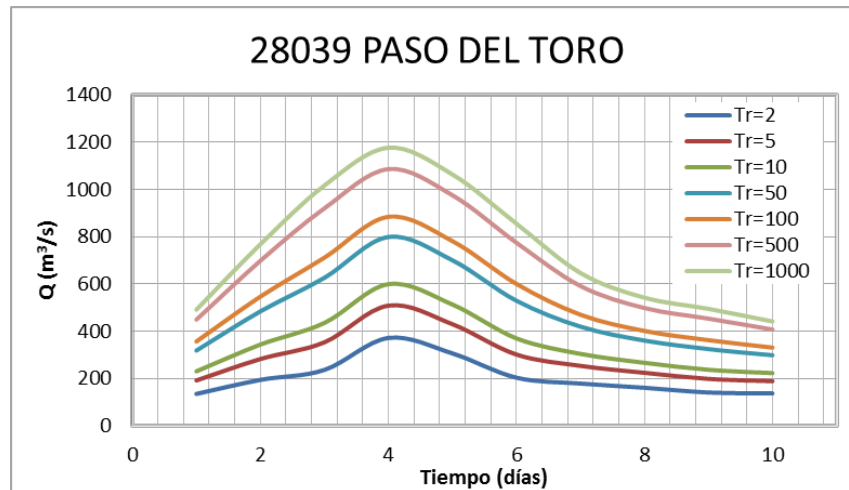
Día	Periodo de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	78.7	111.5	112.4	117.8	127.1	136.4	148.3	169.5	191.9
2	119.2	240.5	289	324	365	394.5	423.7	461.6	489.6
3	165.6	287.2	366.8	430.8	505	555.8	602.3	657.3	695.0
4	250.8	448.2	506.5	554	615.4	664.1	716.3	791.6	852.9
5	95.9	192.8	215.2	228	242.8	253.8	265	280.2	292.9
6	84.9	165.3	182.4	191.1	201.1	208.5	215.9	227.1	235.1
7	72.3	173.4	172.5	163.9	153.2	146.2	140.3	134.9	134.5
8	64	147.9	160.9	164.8	168.5	171	173.5	177.3	179.4
9	62	137.3	143.9	146.4	149.5	152.3	156.1	162.5	169.2
10	70	125	130.5	136.6	145.6	153.5	163.1	178.7	193.3

El la Figura 4.4 se grafica los datos de la Tabla 4.9, hidrograma de la estación El Tejar.



**Figura 4.4. Hidrogramas en la E.H. El Tejar, para diferentes periodos de retorno**

Con el procedimiento anterior, se obtiene los hidrogramas para diferentes periodos de retorno de la E. H. Paso del Toro.



**Figura 4.5. Hidrogramas en la E.H. Paso del Toro, para diferentes periodos de retorno**

---

## 5.5 SIMULTANEIDAD DE EVENTOS HIDROLÓGICOS

### 5.5.1 Factores de simultaneidad entre hietogramas

En vista de que la probabilidad de ocurrencia simultánea de lluvias extraordinarias sobre la totalidad del área de una cuenca grande es baja, es de esperarse que los mayores escurrimientos se presenten, en un momento dado, únicamente sobre cierta región de la misma. Para tomar en cuenta esta condición se utilizó el concepto de estación virtual. Aunque la cuenca analizada es de las que se consideran chicas ( $A=456 \text{ km}^2$ ) se realizó el análisis de simultaneidad.

Se generó un registro virtual de precipitación. El registro virtual consiste en la suma de las lluvias de los registros simultáneos de las estaciones climatológicas referidas a una cuenca en particular. Para la cuenca se utilizó un periodo comprendido del 1° de enero de 1965 al 31 de diciembre de 1996.

Posteriormente, se realizó el análisis de la información del registro virtual, obteniéndose las láminas de lluvia promedio máxima de diez días consecutivos de cada año, así como las correspondientes láminas acumuladas de diez días de precipitación. A este conjunto se le ajustaron diferentes funciones de distribución de probabilidad, y la función Doble Gumbel permitió estimar las precipitaciones acumuladas de diez días de lluvia, para los diferentes periodos de retorno de la cuenca.

En la Tabla 5.1 muestra de manera concentrada las láminas de precipitación acumulada de diez días consecutivos de lluvia para diferentes periodos de retorno, de las estaciones seleccionadas para el análisis de la cuenca bajo estudio, además de las correspondientes a la estación virtual. En la misma Tabla se aprecia un conjunto de factores de simultaneidad de eventos que corresponden a cada periodo de retorno. Cada factor se obtiene con el cociente de la lámina acumulada ajustada del registro virtual entre la suma de las láminas acumuladas ajustadas de las estaciones climatológicas

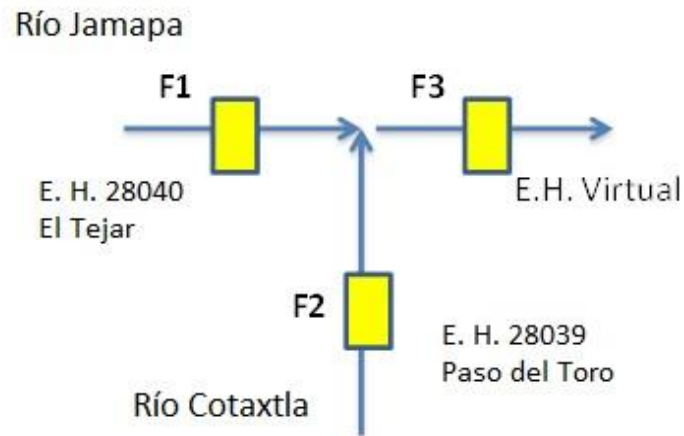
**Tabla 5.1. Láminas de precipitación acumulada de 10 días consecutivos para diferentes periodos de retorno y factor de simultaneidad para la cuenca bajo estudio**

periodo de retorno (año)	30104	30056	VIRT	SUMA	FS
<b>2</b>	220.2	296.4	494.9	516.6	0.95
<b>5</b>	358.5	433.3	739.3	791.8	0.93
<b>10</b>	424.8	514.1	866.7	939	0.92
<b>20</b>	471	574.8	964.7	1045.9	0.92
<b>50</b>	525.2	646.6	1081.5	1171.8	0.92
<b>100</b>	564.3	698.5	1166	1262.8	0.92
<b>200</b>	602.6	749.7	1249.4	1352.4	0.92
<b>500</b>	652.9	816.7	1358.8	1469.7	0.92
<b>100</b>	690.7	867.6	1441.3	1558.3	0.93

Los factores de la Tabla 5.1 se utilizan para obtener las láminas de los hietogramas para eventos extraordinarios simultáneos en la ubicación de las estaciones climatológicas.

### 5.5.2 Factores de simultaneidad entre hidrogramas

El caso más simple de escurrimientos máximos en ríos en un mismo tiempo consiste en la unión de dos de ellos en un tercero. En la determinación de los gastos máximos anuales relativos a diferentes periodos de retorno, aguas abajo de la confluencia de dos corrientes naturales, a partir de los gastos medios diarios de los dos ríos que confluyen, es conveniente considerar varios escenarios de presentación de acontecimientos. La Figura 5.1 es un esquema en donde se aprecia la disposición de las corrientes de los ríos Jamapa y Cotaxtla, así como la ubicación de sus correspondientes estaciones hidrométricas, 28040 El Tejar y 28039 Paso del toro.



**Figura 5.1. Esquema de la distribución de los ríos y estaciones hidrométricas del sistema analizado**

Con la intención de estudiar los eventos más desfavorables en cada una de las corrientes que forman parte del sistema de ríos de la Figura 5.1, se consideraron tres escenarios de presentación de acontecimientos. En la Tabla 5.2 se muestra una descripción de las magnitudes de los eventos en la ubicación de cada estación hidrométrica, incluida la E.H. Virtual (VIR), que representa las condiciones de flujo como consecuencia de la unión de los ríos Jamapa y Cotaxtla. En dicha tabla se describe los escenarios de manera cualitativa, por lo que el indicador de 100% en una estación hidrométrica significa que el evento extremo se presenta en toda su magnitud. En otro caso, los eventos serán de magnitud menor, y por ello es necesaria la definición de factores de simultaneidad menores a la unidad (F1 a F3 en la Figura 5.1).

**Tabla 5.2. Distintos escenarios de presentación de acontecimientos para el cálculo de factores de simultaneidad**

Escenario	F1 (Jamapa)	F2 (Cotaxtla)	F3 (VIR)
1	100%	Menor	100%
2	Menor	100%	100%
3	Menor	Menor	100%

En el cálculo de los factores de simultaneidad de eventos se tomaron en cuenta los registros simultáneos de escurrimiento de las estaciones hidrométricas 28040 y 28039. Los años de registro considerados abarcan el periodo del 1° de enero de 1952 al 31 de diciembre de 1980.



Dado que la duración del tiempo base de los hidrogramas de eventos extraordinarios es de 10 días, para cada estación hidrométrica se obtuvieron los gastos promedio máximos anuales de 10 días consecutivos registrados en el periodo simultáneo de interés. Se calcularon también los máximos anuales de VIR, tomando en cuenta que dicha estación virtual se forma con la suma de los registros simultáneos de las estaciones 28040 y 28039.

Para estimar los eventos extremos requeridos, a los gastos promedio máximos anuales de 10 días calculados se les ajustaron diferentes distribuciones de probabilidad con el programa AX, y se encontró que los errores estándar de menor magnitud se obtienen con la distribución Doble Gumbel. Los valores de gasto para distintos periodos de retorno en la ubicación de las estaciones hidrométricas se muestran en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3. Valores promedio en 10 días estimados para las estaciones hidrométricas analizadas, y con diferentes periodos de retorno, en m<sup>3</sup>/s**

Periodo de retorno (años)	Q <sub>J</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>VIR</sub>
	28040	28039	Virt
2	2332	4247	6497
5	4601	6869	11473
10	5029	8449	13376
20	5319	9649	14675
50	5681	11071	16200
100	5966	12101	17304
200	6281	13115	18389
500	6771	14445	19819
1000	7214	15443	20894

A continuación se describirán los planteamientos requeridos para obtener los factores de simultaneidad de los escenarios 1 y 3 (Tabla 5.3). Los escenarios 1 y 2 se analizan de manera similar.

Escenario 1. En la E.H. El Tejar se presenta el hidrograma con periodo de retorno  $T_r$  ( $F_1 = 1$ ), mientras que en la estación Paso del Toro ocurre un evento menor, que se calcula con el producto de su hidrograma con periodo de retorno  $T_r$  por el factor de simultaneidad  $F_2$ . El factor  $F_3$  que corresponde a la estación virtual también es igual a la unidad. El factor  $F_2$  se obtiene considerando lo siguiente:

$$Q_J + F_2 Q_C = Q_{VIR} \quad (5.1)$$

$$F_2 = (Q_{VIR} - Q_J) / Q_C \quad (5.2)$$

Escenario 3. De acuerdo con la Tabla 6.1, el Escenario 3 es tal que en la estación Virtual VIR se presenta el hidrograma con periodo de retorno  $T_r$  ( $F_3 = 1$ ), mientras que en las estaciones El Tejar y Paso del Toro los eventos son menores a los extremos. Bajo estas condiciones, la magnitud de los factores  $F_1$  y  $F_2$  será la misma, y se obtienen de la manera siguiente:

$$F_1(Q_J + Q_C) = Q_{VIR} \quad (5.3)$$

$$F_1 = F_2 = Q_{VIR} / (Q_J + Q_C) \quad (5.4)$$

Los factores de simultaneidad de eventos se calcularon para los periodos de retorno de interés, y los resultados aparecen en la Tabla 5.4

**Tabla 5.4. Factores de simultaneidad de eventos de escurrimiento por periodo de retorno**

Periodo de retorno (año)	Escenario 1	
	F1	F2
2	1	1
5	1	1
10	1	0.99
20	1	0.97
50	1	0.95
100	1	0.94
200	1	0.92
500	1	0.9
1000	1	0.89

Periodo de retorno (año)	Escenario 2	
	F1	F2
2	1	1
5	1	1
10	0.98	1
20	0.94	1
50	0.90	1
100	0.87	1
200	0.84	1
500	0.79	1
1000	0.76	1

Periodo de retorno (año)	Escenario 3	
	F1	F2
2	1	1
5	1	1
10	0.99	0.99
20	0.98	0.98
50	0.97	0.97
100	0.96	0.96
200	0.95	0.95
500	0.93	0.93
1000	0.92	0.92

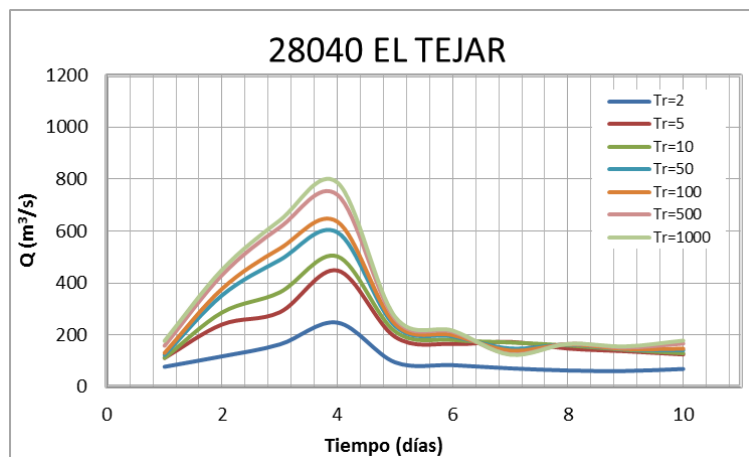
De acuerdo con la magnitud de los factores de la Tabla 5.3, se considera que los eventos correspondientes al escenario 3 implican condiciones más desfavorables para el drenaje de los flujos en la red de estudio. Con estos factores se obtienen los datos de los hidrogramas con factor de simultaneidad los cuales se consignan en las tablas 5.5 y 5.6. Las gráficas de los hidrogramas anteriores se muestran en las figuras 5.2 y 5.3, para las estaciones El Tejar y Paso del Toro, respectivamente.

**Tabla 5.5. Hidrograma (m<sup>3</sup>/s) de la estación hidrométrica El Tejar con factor de simultaneidad**

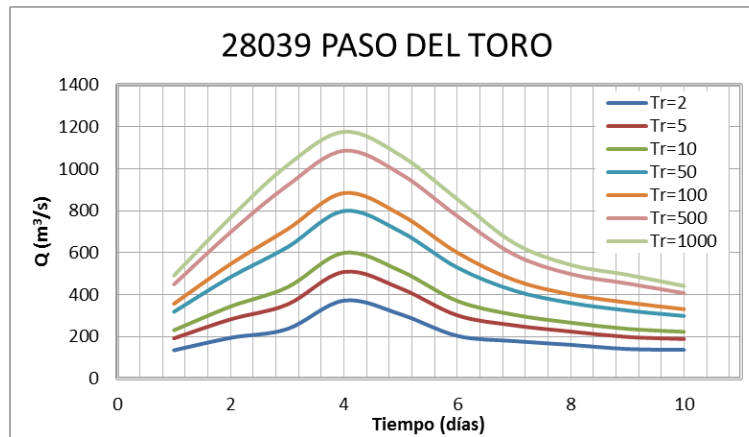
Día	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	77.67	111.54	111.52	115.48	122.87	130.65	140.60	158.37	176.98
2	117.73	240.57	286.84	317.62	352.99	377.87	401.74	431.19	451.49
3	163.52	287.25	364.05	422.35	488.41	532.35	571.01	614.06	640.92
4	247.62	448.32	502.65	543.10	595.11	636.05	679.12	739.45	786.51
5	94.71	192.81	213.54	223.53	234.79	243.06	251.26	261.73	270.07
6	83.84	165.39	181.01	187.37	194.44	199.65	204.73	212.12	216.82
7	71.40	173.46	171.16	160.70	148.11	140.03	133.04	126.00	124.06
8	63.20	147.90	159.68	161.54	162.96	163.74	164.46	165.61	165.46
9	61.23	137.31	142.83	143.51	144.60	145.89	147.95	151.78	156.05
10	69.13	125.06	129.52	133.95	140.80	147.01	154.62	166.96	178.23

**Tabla 5.6. Hidrograma (m<sup>3</sup>/s) de la estación hidrométrica Paso del Toro con factor de simultaneidad**

Orden	Periodo de retorno (año)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	134.94	191.79	230.49	268.25	318.26	356.67	395.86	449.22	491.41
2	194.41	282.69	343.74	403.95	484.45	546.81	610.85	698.68	768.56
3	236.4	353.43	435.39	516.81	626.39	711.72	799.70	920.81	1017.50
4	371.98	508.94	599.55	686.42	799.43	884.9	971.09	1087	1177.6
5	306.35	430.05	513.39	594.23	700.57	781.77	864.25	976.09	1064.1
6	203.51	301.49	369.99	437.99	529.46	600.68	674.11	775.24	855.97
7	178.66	253.55	304.44	354.11	419.80	470.20	521.60	591.58	646.86
8	160.91	224.11	266.41	307.27	360.79	401.52	442.77	498.5	542.23
9	140.95	198.4	237.2	274.91	324.59	362.57	401.21	453.65	494.97
10	136.94	188.61	222.86	255.75	298.56	330.95	363.61	407.54	441.86



**Figura 5.2. Hidrogramas en la E.H. El Tejar, considerando simultaneidad de eventos extremos, para diferentes periodos de retorno**

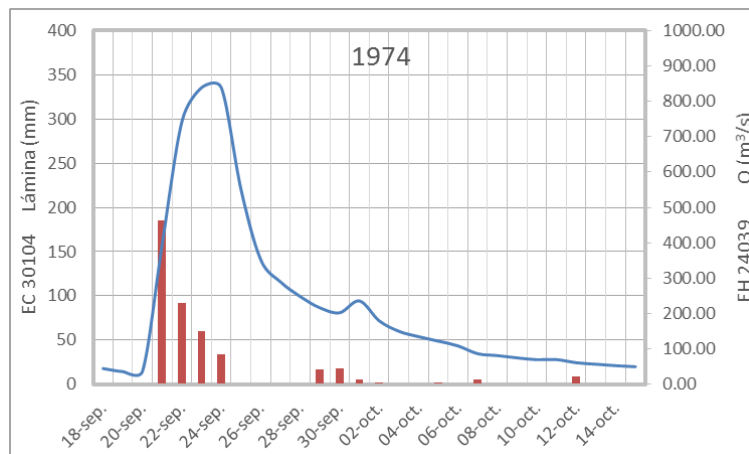


**Figura 5.3. Hidrogramas en la E.H. Paso del Toro, considerando simultaneidad de eventos extremos, para diferentes periodos de retorno**

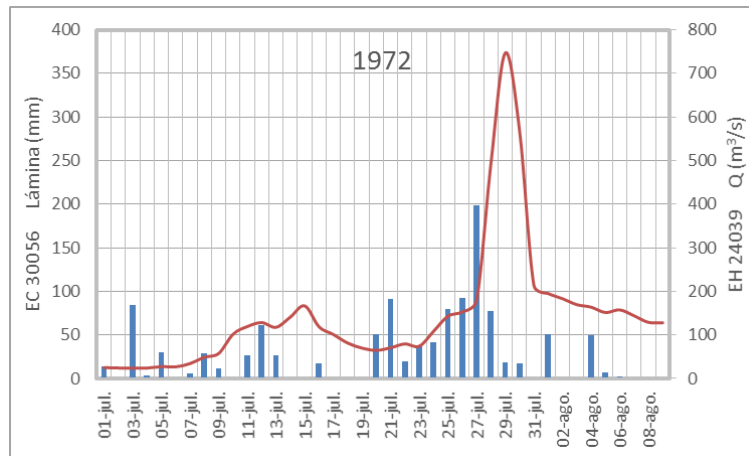
### 5.5.3 Simultaneidad entre hietogramas e hidrogramas

Adicionalmente, respecto a los hidrogramas calculados en la ubicación de las estaciones hidrométricas 28040 y 28039, es conveniente revisar las condiciones de simultaneidad entre los fenómenos de precipitación y escurrimiento históricos en dichas cuencas.

Para el caso de la E.H. 28039, se revisó la simultaneidad de estos escurrimientos respecto a las láminas de precipitación diaria registradas en las E.C. 30056 y 30104, mismas que se eligieron por su ubicación respecto a la localización de la estación hidrométrica. La Figura 5.4 y 5.5 es la representación de los escurrimientos (24039) y precipitaciones (30104 y 30056) registradas simultáneamente.

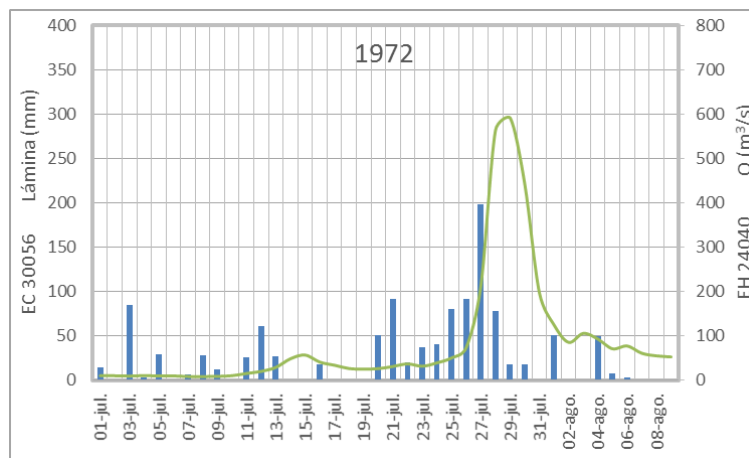


**Figura 5.4. Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos, para la E.H. 28039, Paso del Toro**

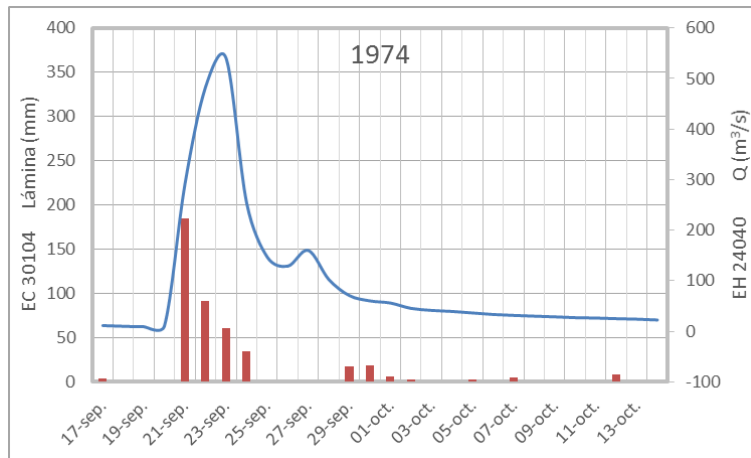


**Figura 5.5. Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos, para la E.H. 28039, Paso del Toro**

La revisión de eventos históricos de precipitación y escurrimiento simultáneos para la estación hidrométrica 24040 también se practicó, obteniéndose los resultados que se presentan en las figuras 5.6 y 5.7.



**Figura 5.6. Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos, para la E.H. 28040, El Tejar**



**Figura 5.7. Simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento históricos, para la E.H. 2804, El Tejar**

Con base en los análisis de las figuras 5.4 a 5.7, se consideró que existe un desfase de dos días entre las precipitaciones máximas y caudales máximos.

## 5.6 MODELADO MATEMÁTICO DE LAS INUNDACIONES

La distribución de los fenómenos sobre un continuo espacial hace necesario la descripción con magnitudes evaluadas en cada instante y en cada punto del espacio. Así es como en los modelos que expresan la rapidez de cambio de las variables descriptivas aparecen las derivadas parciales, para tener también en cuenta la variación espacial. Para ciertas clases de ecuaciones diferenciales parciales se conocen las soluciones analíticas, pero en general es necesario buscar soluciones aproximadas, tanto como posible o necesario, a las soluciones exactas (desconocidas). Para calcular el flujo de agua de lluvia sobre el terreno se utilizan de conservación de la cantidad de movimiento para un flujo bidimensional (Mahmood y Yevjevitch, 1975)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_x - S_{fx}) \quad 6.1$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_y - S_{fy}) \quad 6.2$$

Debido a que los cambios de la velocidad del agua sobre el terreno son pequeños, las derivadas de  $u$  y  $v$  con respecto a  $x$  y  $y$  son eliminadas de las ecuaciones anteriores, por lo que, al dividir entre la aceleración de la gravedad se encuentra

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} = (S_x - S_{fx}) \quad 6.3$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial y} = (S_y - S_{fy}) \quad 6.4$$

Para el cálculo de las pendientes de fricción, se propone el uso de la fórmula de Manning-Strickler:

$$S_{fx} = \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} \quad 6.5$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} \quad 6.6$$

Si se considera a las ecuaciones 5 y 6 en las ecuaciones 3 y 4 se tiene

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad 6.7$$



$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad 6.8$$

Las ecuaciones 7 y 8 son ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento considerando que el flujo se lleva a cabo en una llanura. El principio de conservación de masa en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = q \quad 6.9$$

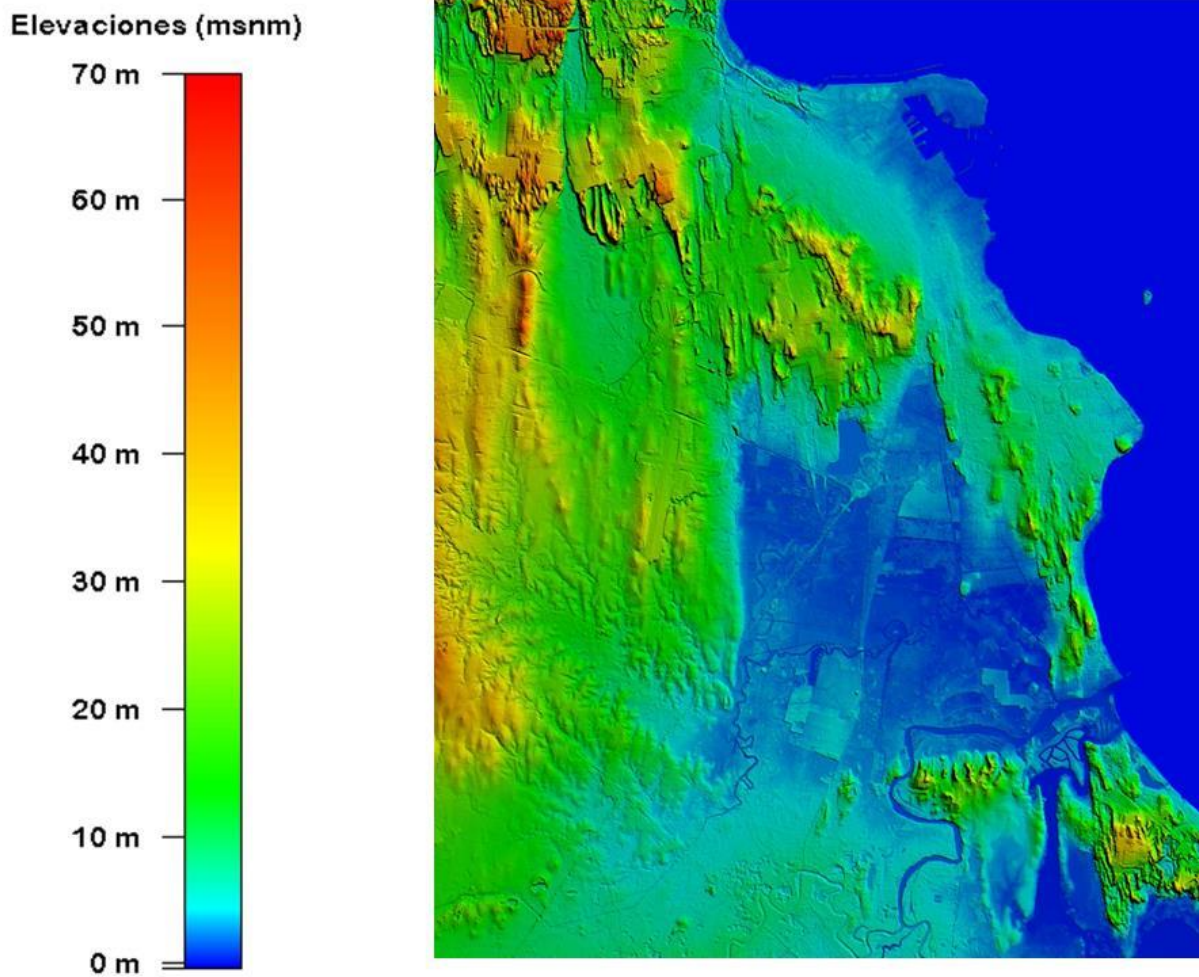
Siendo que el volumen de agua de lluvia efectiva que ingresa por unidad de tiempo y unidad de área. A esta expresión también se le llama ecuación de continuidad. Para calcular el flujo del agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales formado por las expresiones 7, 8 y 9 considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

Como no existe un método analítico para encontrar la solución de las ecuaciones mencionadas, para dar con una solución aproximada de las mismas, se propone un método de diferencias finitas. Para la aplicación del modelo matemático se escribieron varios programas de cómputo en lenguaje Visual Basic. La aplicación de los programas de cómputo fue exhaustiva ya que hubo necesidad de simular numerosas opciones de condiciones hidráulicas posibles para definir para varias probabilidades de ocurrencia las inundaciones por desbordamiento de río y por lluvia de cuenca propia.

Los insumos al programa de cómputo fueron las precipitaciones en cada celda de la malla de cálculo a cada hora durante 2 días determinados de un estudio hidrológico y una malla con elevaciones de terreno específico para la zona de interés.

### 5.6.1 Modelo digital de elevaciones

El modelo digital de elevaciones utilizado para la simulación numérica fue de LiDAR con resolución de 5 m por 5 m, que cubre la mayor parte del área en estudio de interés (Figura 6.1).



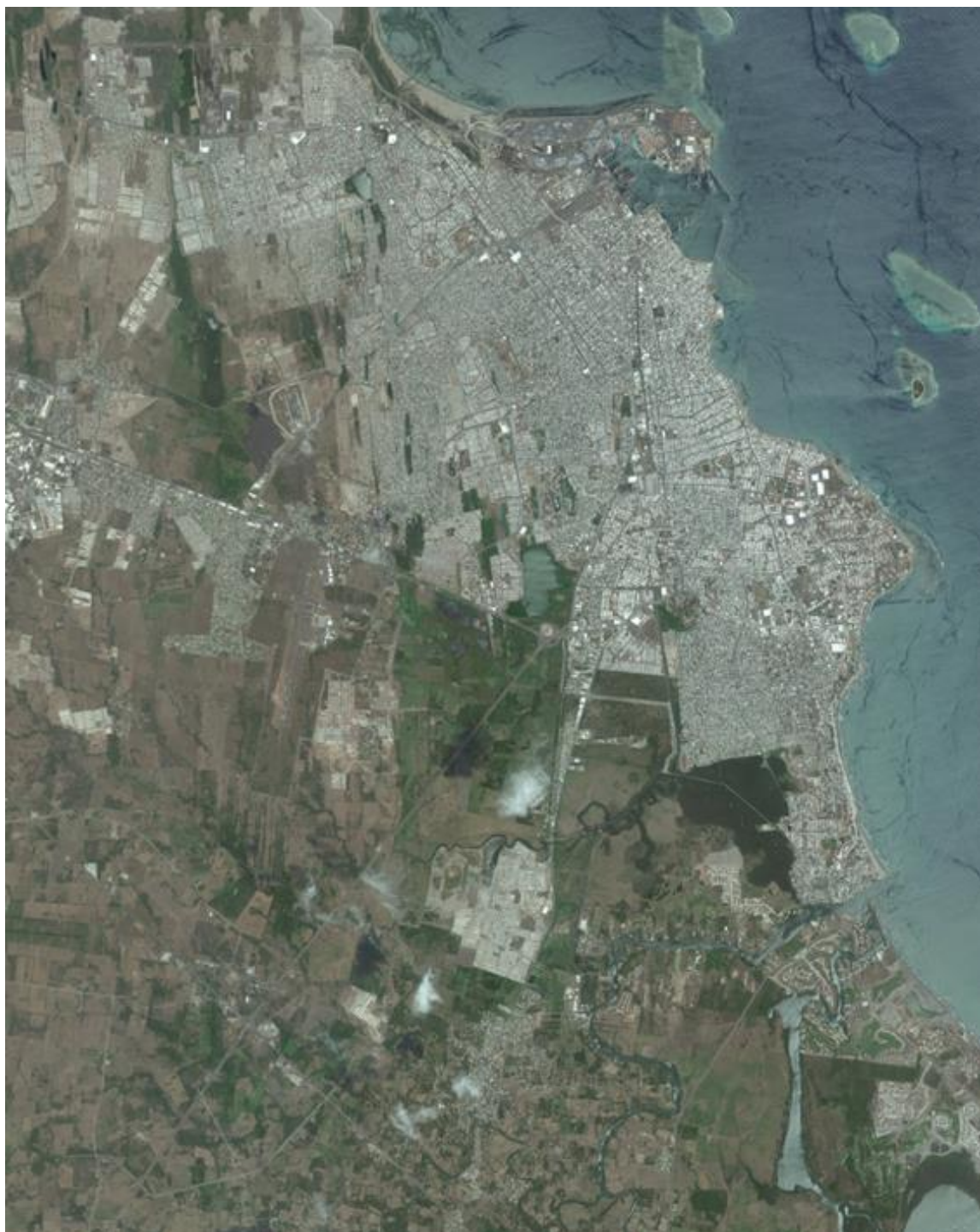
**Figura 6.1. Modelo digital de elevaciones en la zona de estudio**

Para llevar a cabo la modelación matemática se utilizó un modelo digital de elevaciones con resolución de 10 m por 10 m ya que se consideró que con dicha resolución se obtenían resultados con la suficiente resolución y en un tiempo de proceso casi de la mitad que el que necesita la resolución de 5m por 5m. También se utilizaron cartas topográficas de INEGI, (figura 6.2) e imágenes satelitales figura 6.3.



Figura 6.2. Carta topográfica e14b49 inegi 1:50,000





**Figura 6.3 Imagen satelital**

La malla considerada en el modelo matemático 1,601 columnas por 2,001 renglones. Para lograr la estabilidad numérica en la modelación matemática considerando el tamaño de celda de 10 m por 10 m y tomando en cuenta que la pendiente del terreno es muy suave en su mayoría, el paso de tiempo considerado es de 0.2 segundos.

## 5.6.2 Precipitación

Los datos considerados para la modelación matemática en la zona donde interesa analizar las inundaciones referentes a la precipitación durante varios días consecutivos se obtuvieron en el capítulo 3, en las figuras 3.9 y 3.10 se presentan los hietogramas de lluvia horaria durante 10 días consecutivos: la estación el Tejar cubrió el 91.5% del área debajo de las estaciones hidrométricas y la de Mata Anona el 8.5%.

## 5.6.2 Escurrimiento

Para la modelación matemática de las inundaciones referentes al agua que se desborda de los ríos Jamapa y Cotaxtla se obtuvieron en el capítulo 4, en las figuras 4.4 y 4.5 se mostraron se presentan los hidrogramas durante 10 días consecutivos de las estaciones El Tejar y Paso del Toro.

### 5.6.2.1 Eventos históricos

Se consideraron datos de lluvia y escurrimiento importantes ocurridos en la zona en estudio, como fueron los de los años 2005 y 2010. Ellos consisten en caudales medidos en las estaciones hidrométricas Paso del Toro Y El Tejar que proporcionó personal de Conagua Veracruz.

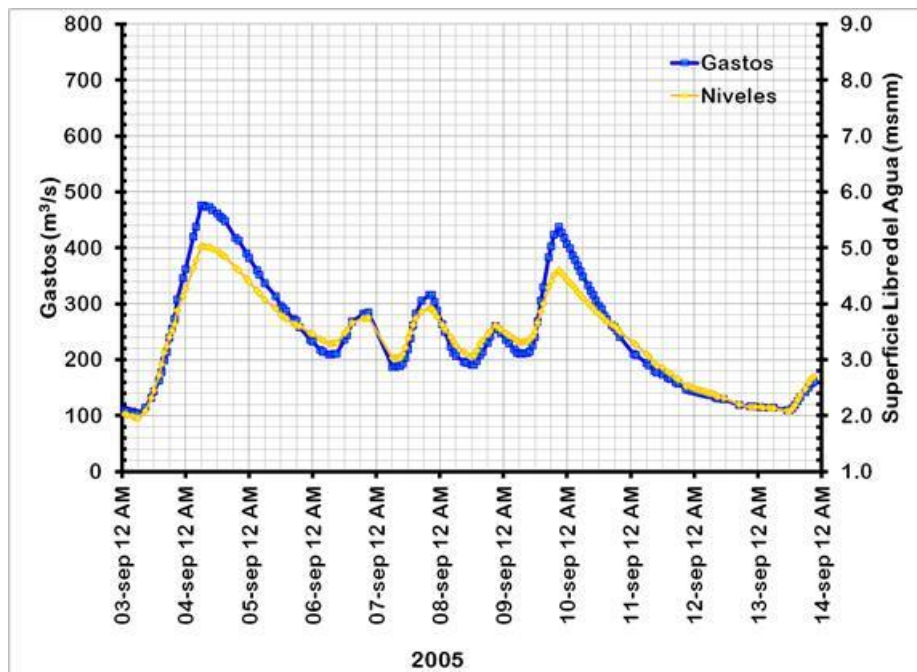
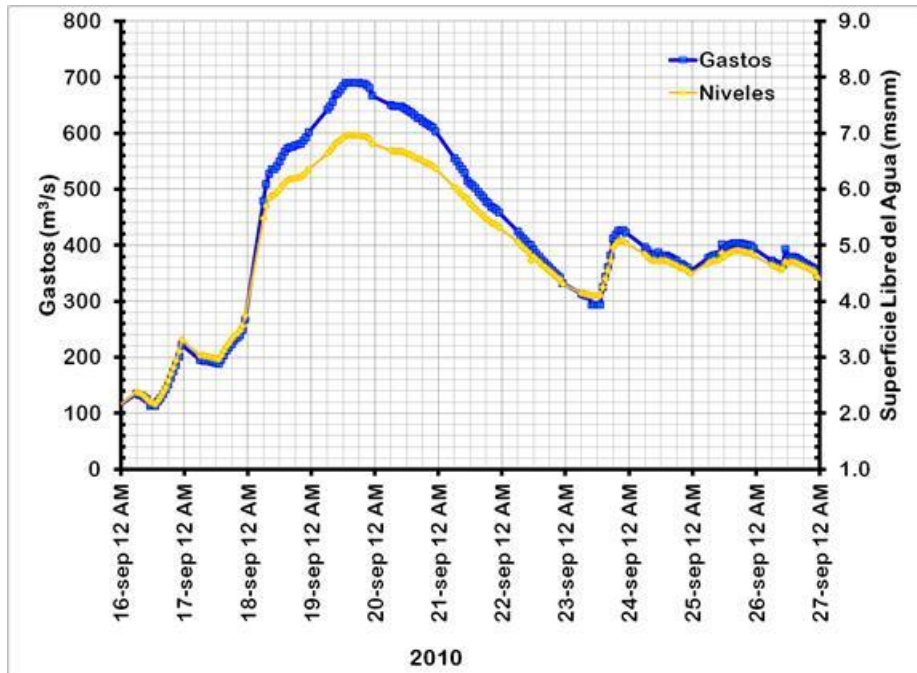


Figura 6.4. Registro histórico del evento de 2005 en la estación hidrométrica Paso del Toro.

En la gráfica de la Figura 6.4 se muestran gastos ( $m^3/s$ ) medidos a las 12:00 horas durante los días del 3 al 14 de septiembre del 2005 y la superficie libre del agua (msnm) para la estación Paso del Toro. Para esa misma estación se hace la gráfica de las mismas variables para los días 16 al 27 de septiembre del 2010, se muestran en la Figura 6.5.



**Figura 6.5. Registro histórico del evento de 2010 en la E. H. Paso del Toro**

En la Figura 6.6 se muestra los gastos ( $m^3/s$ ) y la superficie libre del agua (msnm) medidos los días 3 al 14 de septiembre del 2005 a las 12:00. En la Figura 6.7 se muestra la gráfica de los gastos ( $m^3/s$ ) y superficie libre del agua (msnm) de la estación El Tejar, medidos los días 16 al 27 de septiembre del 2010 a la 12:00 horas.



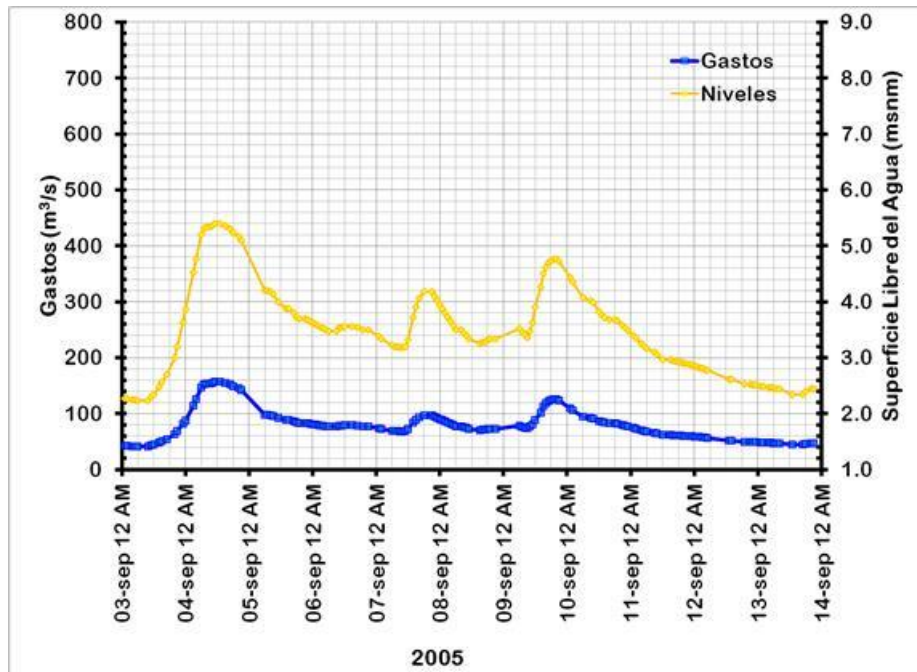


Figura 6.6. . Registros históricos del evento de 2005 en la estación hidrométrica El Tejar.

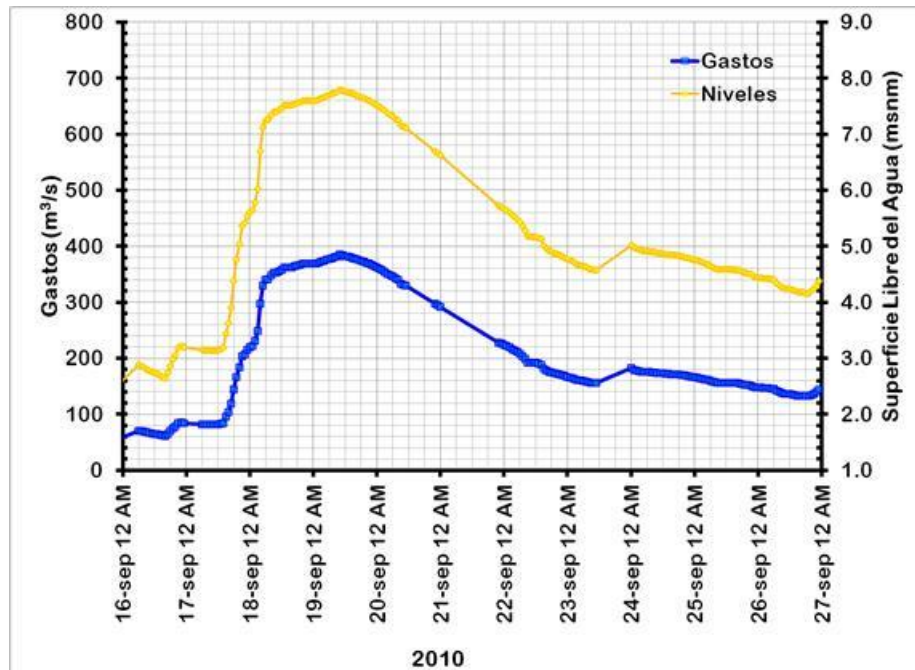
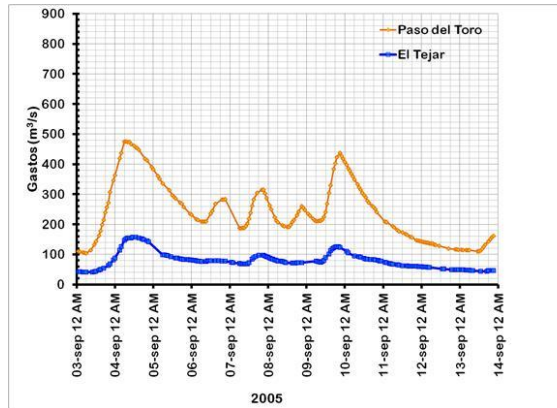
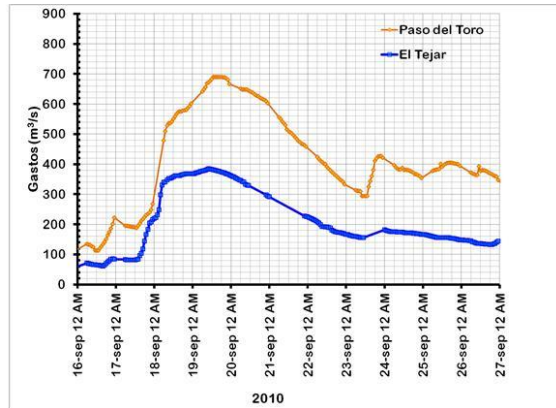


Figura 6.7. Registros históricos del evento de 2010 en la estación hidrométrica El Tejar.

En la Figura 6.8 a) se muestran los gastos ( $m^3/s$ ) de las estaciones Paso del Toro y El Tejar medidos del 3 al 14 de septiembre del 2005 a las 12:00 horas. En la Figura 6.8 b) se grafican los gastos ( $m^3/s$ ) medidos el 2010 del 16 al 27 de septiembre a las 12:00 horas de las mismas estaciones.



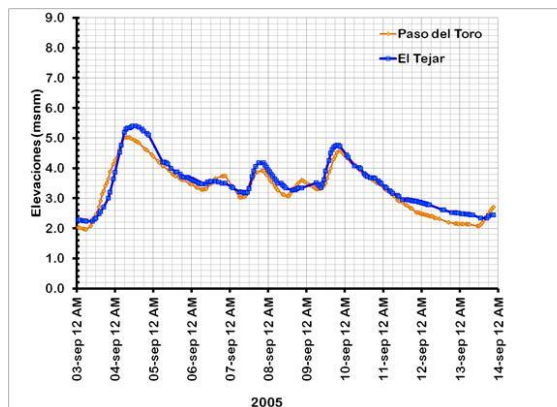
a)



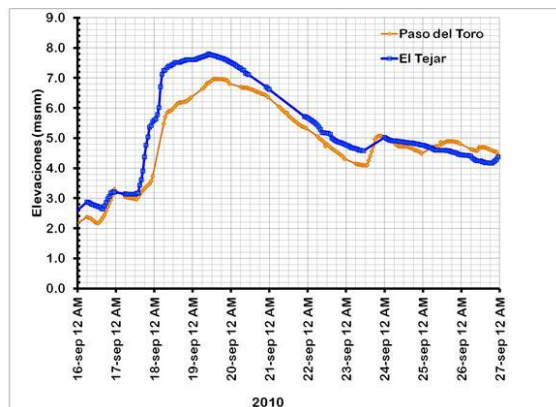
b)

**Figura 6.8. Comparación de hidrogramas 2005-2010 en las estaciones hidrométricas**

En la Figura 6.9 a) se se comparan los niveles medidos (msnm) en septiembre del 2005 durante los días 3 al 14 en las estaciones Paso del Toro y El Tejar. Para esas mismas estaciones en la Figura 6.9 b) se comparan los niveles medidos en septiembre del 2010 del día 16 al 27.



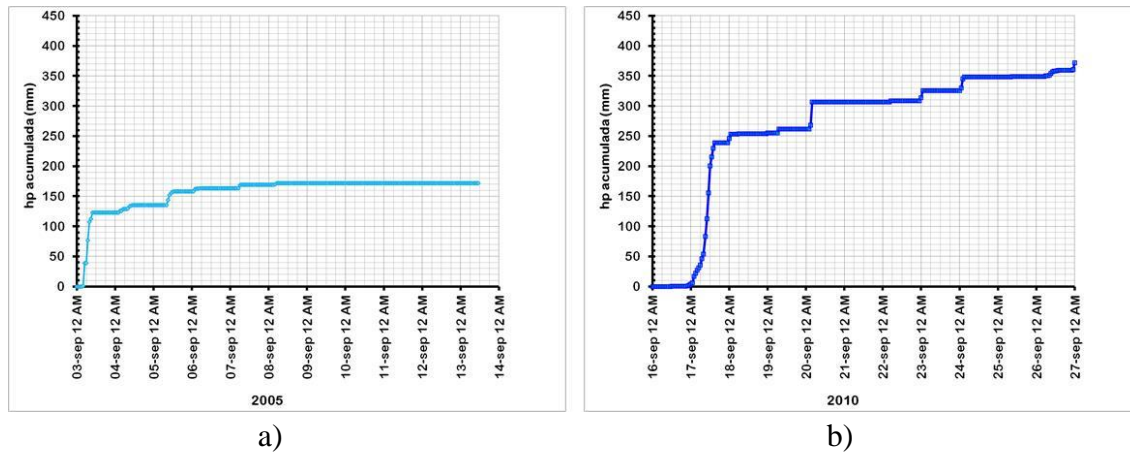
a)



b)

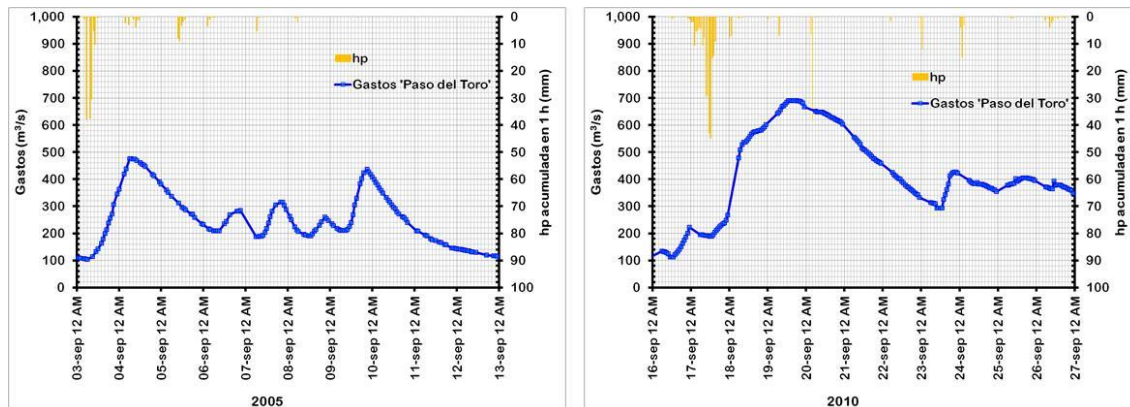
**Figura 6.9. Comparación de registros 2005-20110**





**Figura 6.10. Comparación de registros 2005-2010 de precipitación en el Centro de Previsión del Golfo de México**

En las gráficas de la Figura 6.10 se muestran los acumulados de lluvia medidos en septiembre de los años 2005 y 2010 en el centro de prevención del Golfo de México. En la Figura 6.10 a) la mediciones se realizaron los días 3 al 14, mientras que en la Figura 6.10 b) las mediciones se realizaron los días 16 al 27.



**Figura 6.11. Comparación de análisis de lluvia-escurrimiento en los eventos de 2005-2010**

En la Figura 6.11 se presentan los escurrimientos y las lluvias de la estación Paso del Toro medidos en septiembre del 2005 y 2010.

En la Figura 6.12 muestra las curvas masa de la precipitación medida por el Centro de Previsión del Golfo de México en los años 2005 y 2010.

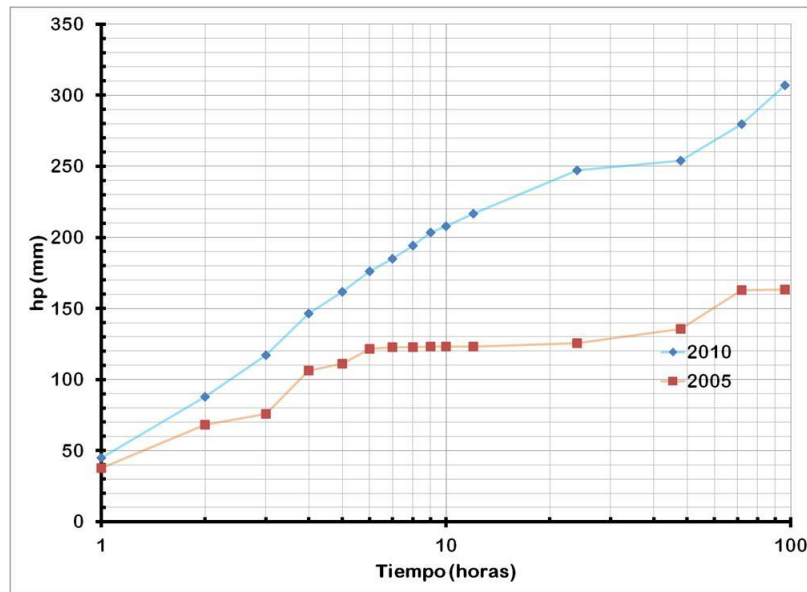


Figura 6.12. Comparación de curvas masa de precipitación 2005-2010 en el Centro de Previsión del Golfo de ec

### 5.6.2.2 Eventos asociados a distintos periodos de retorno

Entre los datos considerados para la modelación matemática de las inundaciones están los datos de escurrimiento de las estaciones hidrométricas Paso del Toro y El Tejar.

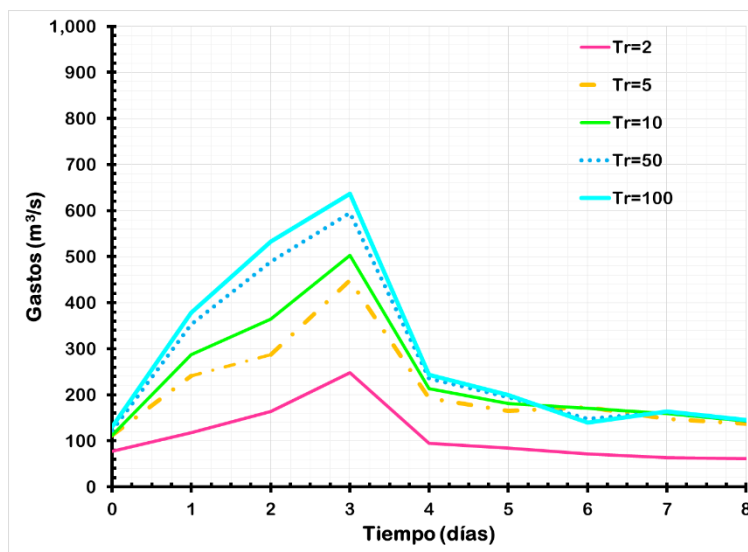
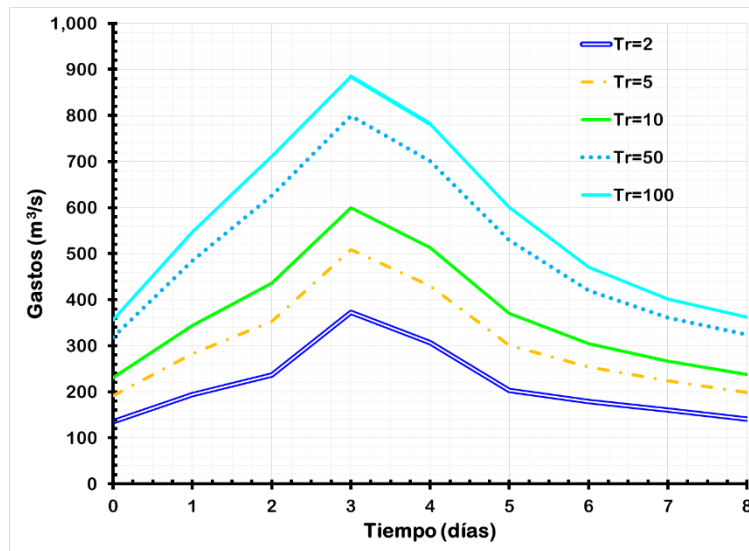


Figura 6.13 Hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno para la estación hidrométrica El Tejar

En la Figura 6.13 se muestran los hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno para la estación hidrométrica El Tejar, entre 2 y 100 años.



**Figura 6.14 Hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno para la estación hidrométrica Paso del Toro**

En la Figura 6.14 se muestran los hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno (entre 2 y 100 años) para la estación hidrométrica Paso del Toro.

### 5.6.3 Resultados de la modelación matemática

Un producto resultante de la modelación matemática corresponde a la envolvente de profundidades y velocidades máximas para todo el periodo de simulación; es decir, se obtiene un mapa con valores máximos que no necesariamente corresponden al mismo tiempo de simulación ya que por el proceso del tránsito del flujo en la cuenca debido al agua que salió de los cauces de los ríos y a la lluvia, pueden presentarse en tiempos diferentes pero el valor considerado más desfavorable es el que produce la inundación más grande.

### 5.6.3.1. Modelación matemática de inundaciones históricas

Para analizar y calibrar los resultados de la simulación de las inundaciones causadas por el desbordamiento del río Jamapa y las lluvias en la parte baja de la cuenca hasta el Golfo de México, se presentan en las figuras 6.15 a 6.16 se muestran tanto las profundidades de inundación como la velocidad del flujo del agua de la inundación más grande alcanzada para eventos hidrometeorológicos de distinto periodo de retorno.

Con el modelo matemático se obtiene en cada celda de la malla de la zona en estudio las profundidades de inundación y la velocidad con la que corre el agua durante su paso por la celda.

#### Evento histórico de septiembre de 2005

En la Figura 6.15 se muestra la envolvente de los valores máximos de profundidades y velocidades resultantes de la modelación del evento histórico del año 2005.

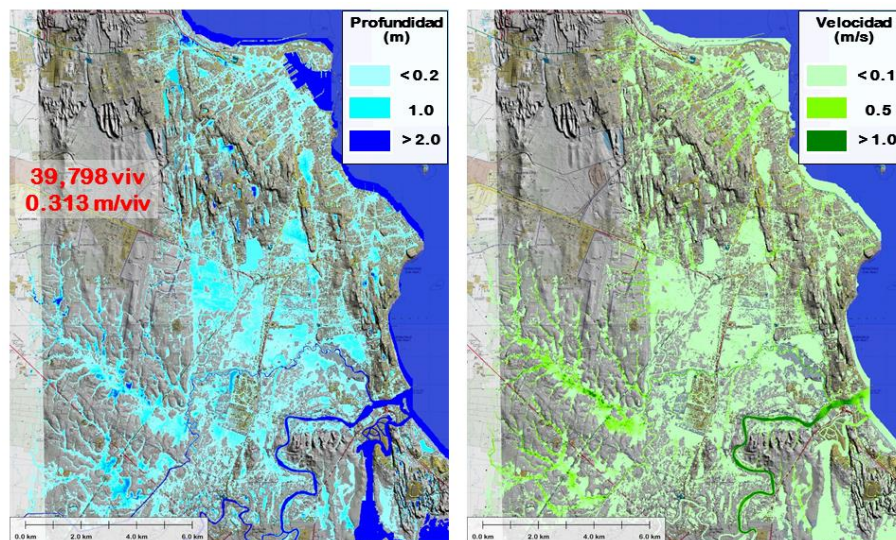
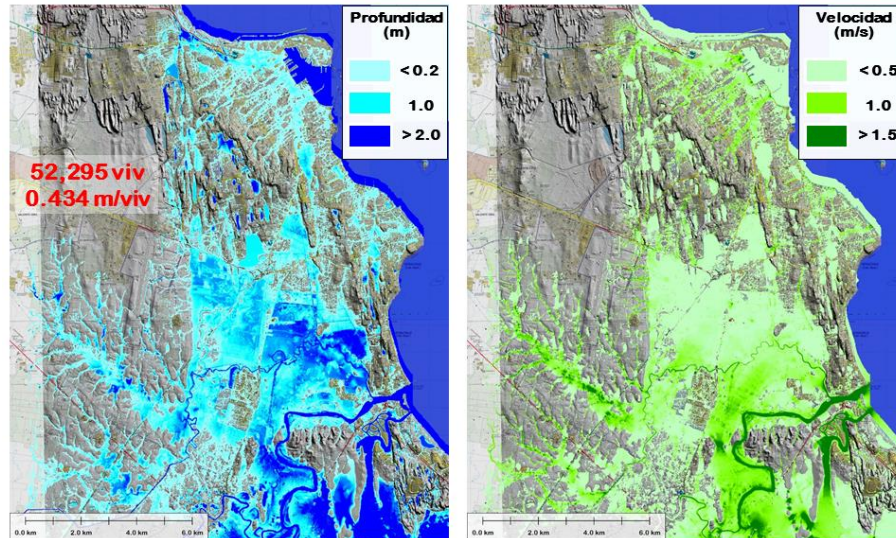


Figura 6.15. Envolvente de valores máximos para el evento histórico de 2005



a) **Evento histórico de septiembre de 2010**

En la Figura 6.16 se muestra la envolvente de los valores máximos de profundidades y velocidades resultantes de la modelación del evento históricos del año 2010.



**Figura 6.16. Envolvente de valores máximos para el evento histórico de 2010**

En las imágenes de las Figuras 6.17 a 6.19 se muestra el comportamiento de la superficie libre del agua, durante los días 17, 18, 19, 20 y 21 de septiembre del año 2010.



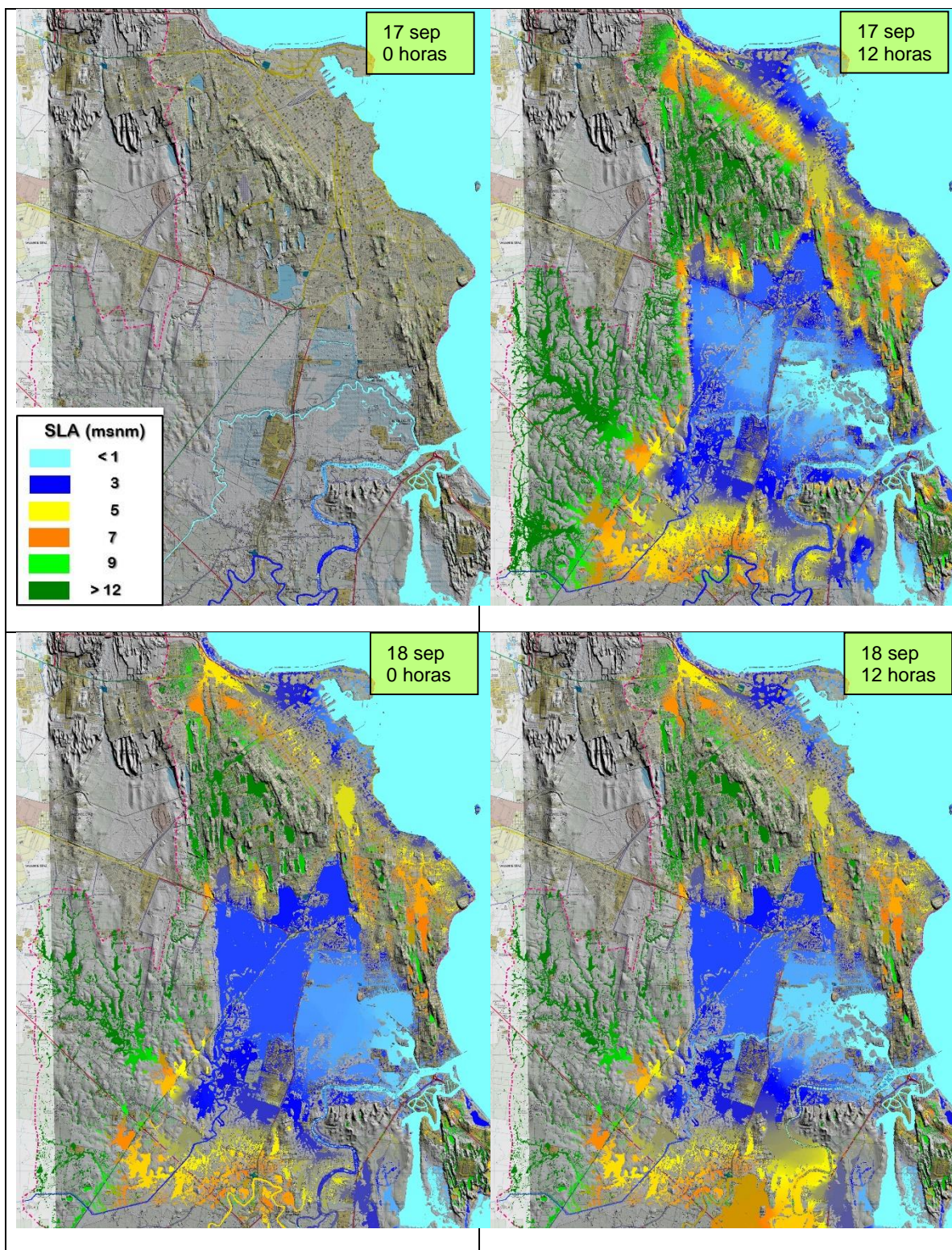


Figura 6.17. Comportamiento de la superficie libre del agua, durante los días 17 y 18 de septiembre del año 2010



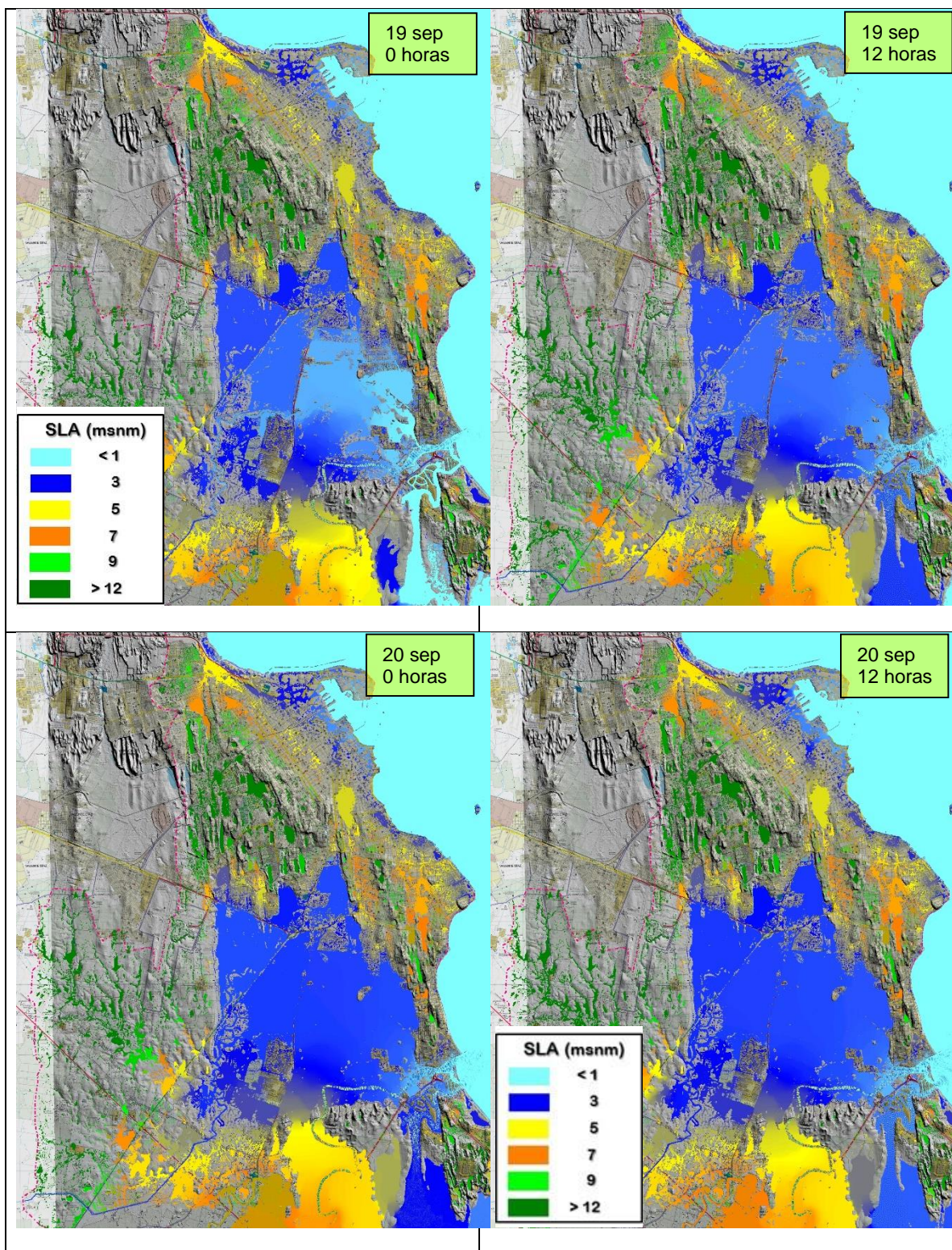


Figura 6.18. Comportamiento de la superficie libre del agua, durante los días 19 y 20 de septiembre del año 2010



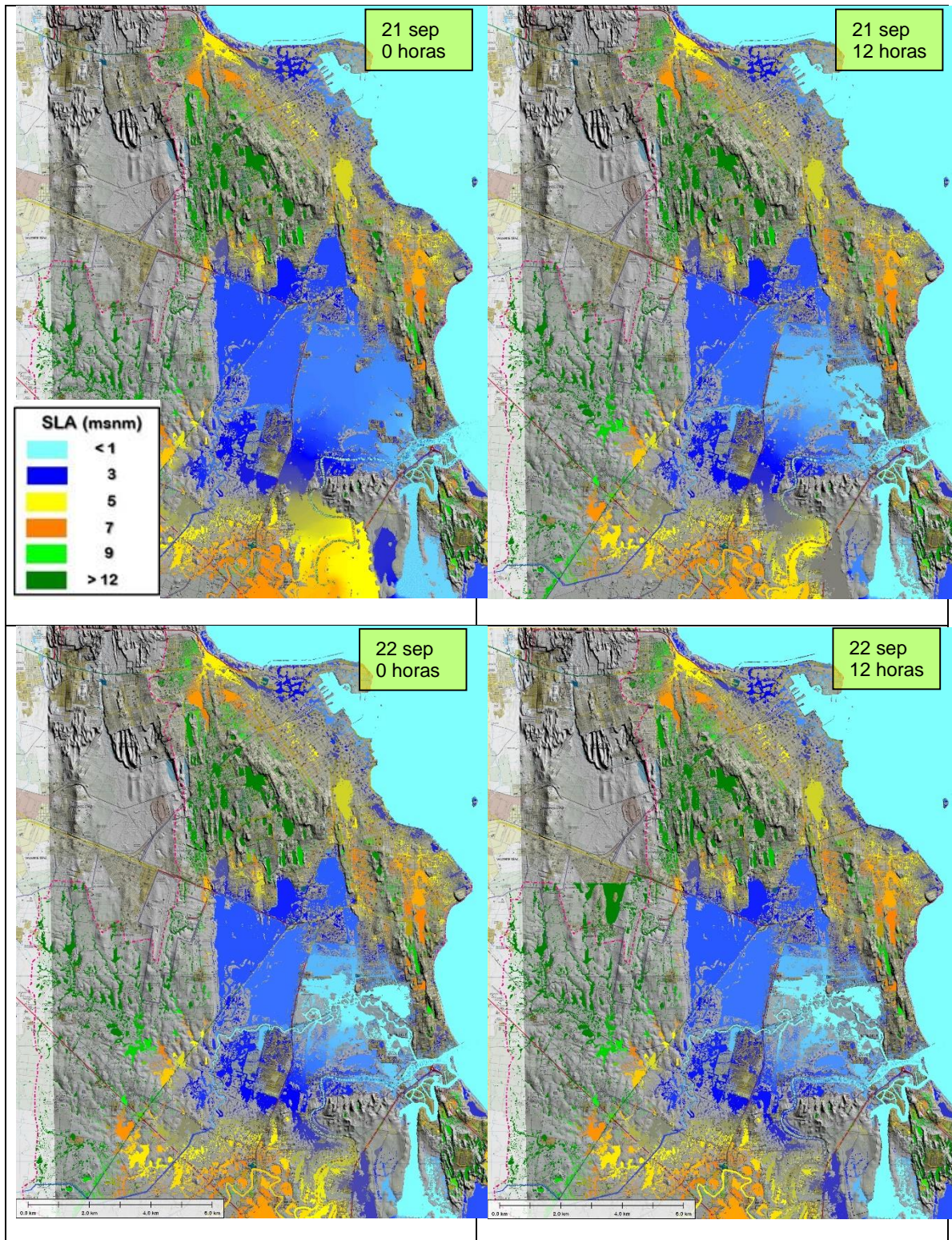


Figura 6.19. Comportamiento de la superficie libre del agua, durante los días 21 y 22 de septiembre del año 2010.



### 5.6.3.2. Modelación matemática de inundaciones para distintos periodos de retorno

En las figuras 6.20 a 6.24 se muestran tanto las profundidades de inundación como la velocidad del flujo del agua de la inundación más grande alcanzada para eventos hidrometeorológicos de distinto periodo de retorno como resultado del modelo matemático de simulación de las inundaciones.

#### a) Periodo de retorno 2 años

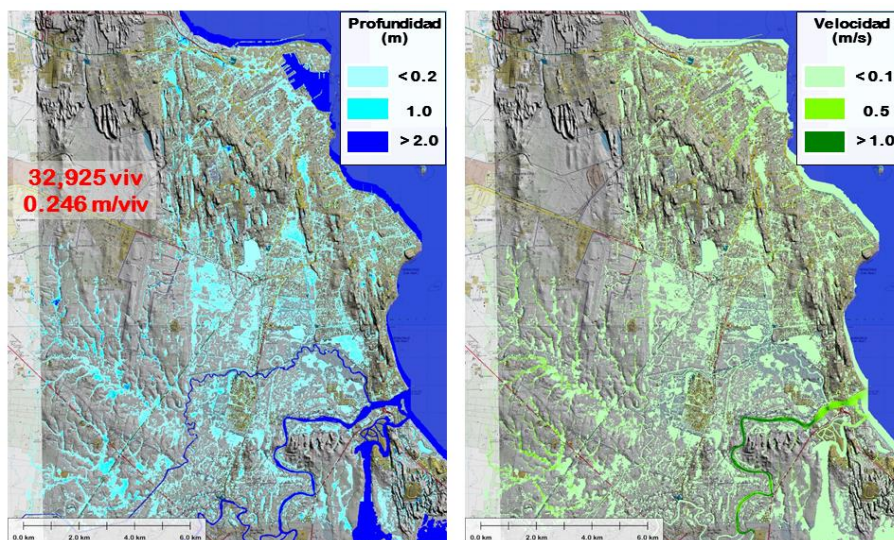


Figura 6.20 Envoltente de valores máximos para el periodo de retorno de 2 años

#### b) Periodo de retorno 5 años

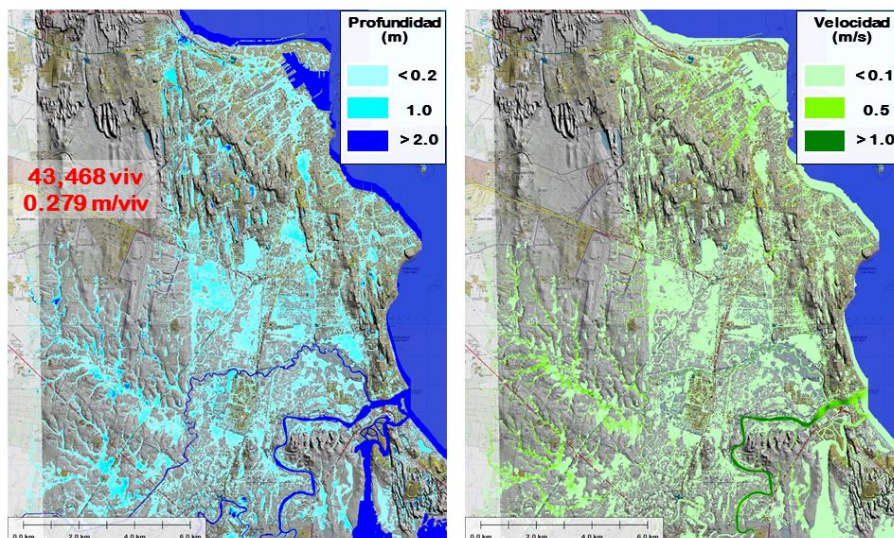


Figura 6.21. Envoltente de valores máximos para el periodo de retorno de 5 años



b) Periodo de retorno 10 años

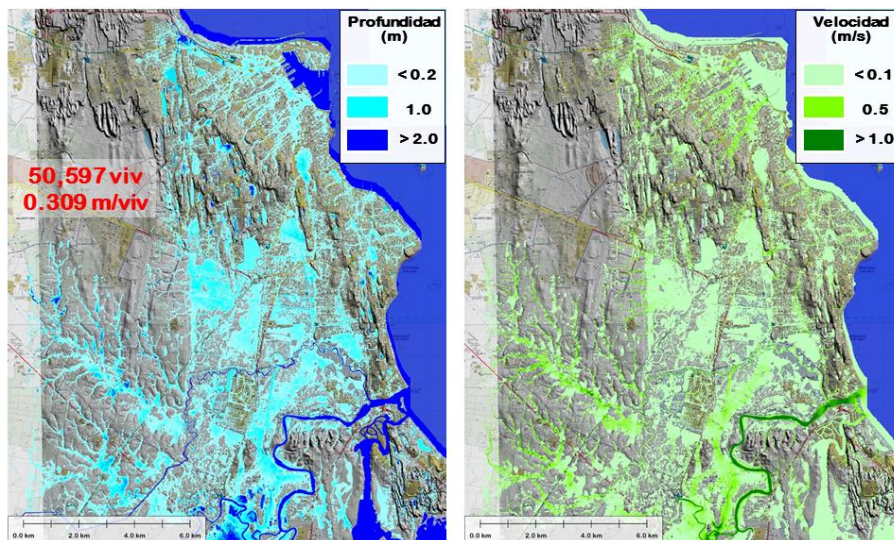


Figura 6.22. Envoltorio de valores máximos para el periodo de retorno de 10 años

c) Periodo de retorno 50 años

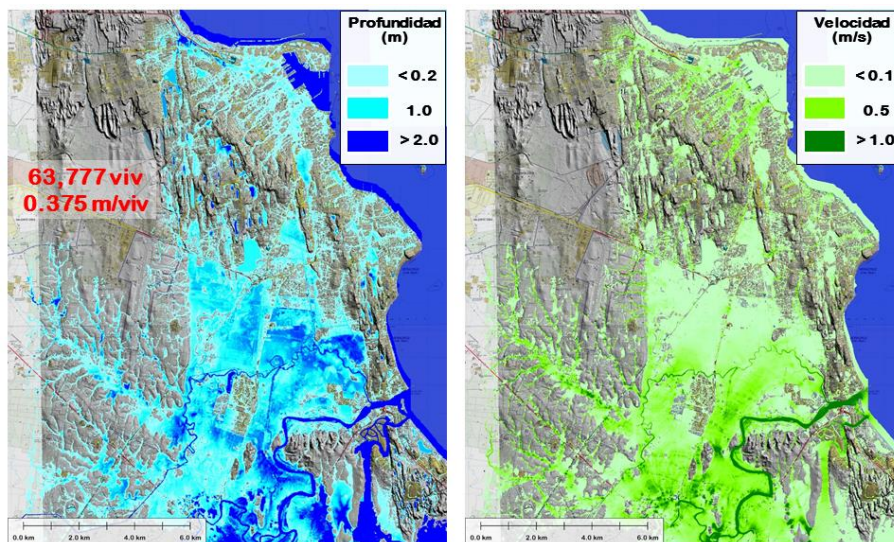


Figura 6.23. Envoltorio de valores máximos para el periodo de retorno de 50 años

d) Periodo de retorno 100 años

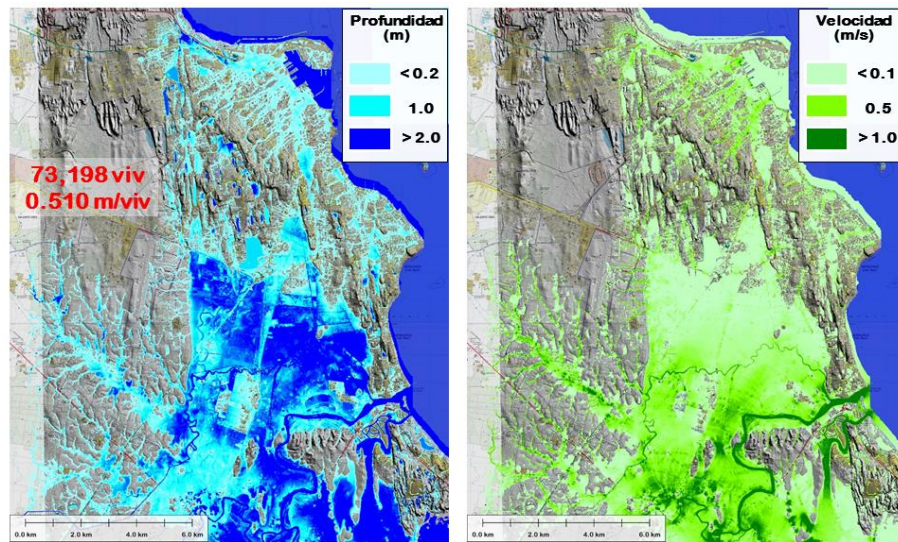


Figura 6.24 Envoltorio de valores máximos para el periodo de retorno de 100 años