

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESQUEMA DE DIAGNÓSTICO-PRONÓSTICO DE
SITUACIONES DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN
VILLAHERMOSA, TABASCO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA GEOFÍSICA
P R E S E N T A:
NADXIELI DE LA ROSA PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. VÍCTOR O. MAGAÑA RUEDA

MÉXICO, D.F. 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-814

SRITA. NADXIELI DE LA ROSA PEREZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Víctor O. Magaña Rueda y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

ESQUEMA DE DIAGNOSTICO-PRONOSTICO DE SITUACIONES DE RIESGO DE
INUNDACION EN VILLAHERMOSA, TABASCO

- OBJETIVO
- I INTRODUCCION
- II DATOS Y METODOLOGIA
- III RESULTADOS
- IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

Cd. Universitaria, D. F., a 4 de julio de 2001

EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR^gtg

A mis padres

Agradezco sinceramente

A mis padres, María Teresa Pérez y Jaime De La Rosa, por su amor y gran apoyo para poder caminar por el sendero de la vida.

A mi hermano Víctor Jaime, por confiar en mí y ser mi mejor amigo.

Al Dr. Víctor O. Magaña, por su tiempo y dedicación en la atinada dirección de este trabajo.

A los miembros de la Comisión Revisora de la tesis, los Ings. Enrique Del Valle Toledo, Francisco A. Arroyo Carrasco, Alberto Arias Paz y el M.C. José Luis Pérez López, por sus aportaciones que sin duda mejoraron este trabajo.

A todos mis profesores, de quienes a lo largo de mi vida aprendí todo lo que sé ahora.

A mis compañeros y amigos, que aunque no los mencione explícitamente, me han apoyado siempre y han compartido maravillosas experiencias conmigo.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del proyecto financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT): " Variabilidad Climática Regional"; y al proyecto IAI-CRN73

Índice

Objetivos.....	1
Capítulo 1. Introducción.....	2
1.1. La vulnerabilidad de México ante lluvias intensas.....	2
1.2. Los regímenes lluviosos en el sudeste mexicano.....	3
1.3. Precipitación y escurrimiento.....	8
1.4. Inundaciones.....	11
1.5. El Estado de Tabasco.....	12
Capítulo 2. Datos y metodología.....	22
2.1. Datos.....	22
2.2. Metodología.....	23
Capítulo 3. Resultados.....	39
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones.....	52
Anexo. Fechas de eventos extremos de precipitación de junio a octubre (1961-1964). ..	55
Bibliografía.....	60

Objetivo general

Desarrollar un esquema de diagnóstico-pronóstico de aumentos de caudales que permita aprovechar la información meteorológica de precipitación diaria para determinar situaciones de riesgo de inundación en Tabasco.

Objetivos específicos

- Analizar la relación existente entre la precipitación diaria y el gasto medio diario en la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta, principalmente en la cuenca del Río Grijalva-Villahermosa.
- Examinar las respuestas del gasto medio diario medido en una estación hidrométrica situada en Villahermosa, Tabasco cuando se presentan eventos extremos de precipitación.
- Determinar la utilidad del esquema para diferentes meses en el verano.
- Sentar las bases para investigaciones posteriores sobre inundaciones.

Capítulo 1. Introducción.

1.1. La vulnerabilidad de México ante lluvias intensas.

Por su situación geográfica México se ve afectado por lluvias derivadas de diversos fenómenos meteorológicos. En ocasiones se presentan condiciones extremas de precipitación que originan inundaciones de diversas magnitudes y duración.

Las inundaciones no solamente dañan propiedades y ponen en peligro vidas humanas, la flora y la fauna, también producen escurrimientos rápidos que causan erosión del suelo y depósito de sedimentos. En México, prácticamente cada año ocurren inundaciones por desbordamiento de grandes ríos (Fig. 1.1). Algunos ejemplos extremos son los desbordamientos del Grijalva en 1963, 1973 y 1980. Éste último dejó un saldo de 9 muertos, 78 heridos, 6674 damnificados y pérdidas totales valuadas en \$ 2 947 350 000 00, que incluyen daños a casa-habitación, caminos, puentes, desagües, agricultura, avicultura, ganadería, industria y comercio (SARH, 1980).

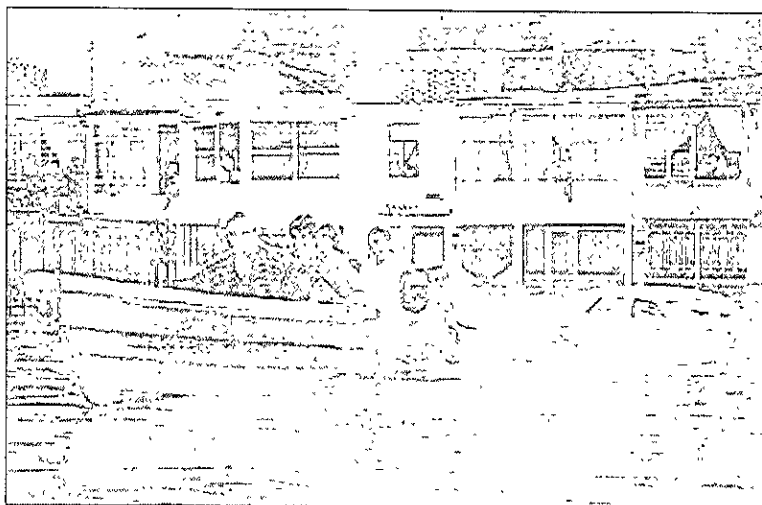


Fig. 1.1. Daños ocasionados por una inundación en Tabasco

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, se estima que entre 1973 y 1990, el promedio anual de daños por inundaciones fue de 173,000 millones de pesos de 1990, sin incluir daños no cuantificables, como la afectación a las condiciones normales de vida y de producción, así como la muerte de aproximadamente 104 personas por año (CNA, 1990).

Las pérdidas humanas y materiales van en aumento debido al rápido incremento de la población y de la vulnerabilidad. Los órganos gubernamentales responsables, como protección civil, no cuentan con sistemas de alerta temprana de riesgo de inundación. Así, la importancia de la prevención de desastres queda de manifiesto, pues hasta ahora sólo se reacciona ante eventos hidrometeorológicos extremos.

1.2. Los regímenes lluviosos en el sudeste mexicano.

México es afectado por distintos sistemas meteorológicos: los sistemas de latitudes medias en invierno, como los nortes, y los sistemas tropicales en verano, como los huracanes. Aunque llueve en invierno (Fig. 1.2 a), las lluvias más intensas ocurren en el verano (Fig. 1.2 b).

En México, se considera que el inicio del periodo de lluvias va de mayo a julio (Fig. 1.2 b), finalizando entre los meses de septiembre a octubre. Aunque depende de la zona de interés, son principalmente los estados del sudeste los que son más afectados por precipitaciones intensas, muchas veces asociadas a los huracanes.

Como se menciona en diversos estudios (Magaña, 1999a), las lluvias de verano están asociadas a sistemas meteorológicos como:

- La Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC),
- El monzón mexicano,
- Las Ondas del Este,
- Los huracanes, en el Pacífico, el Caribe y el Golfo de México

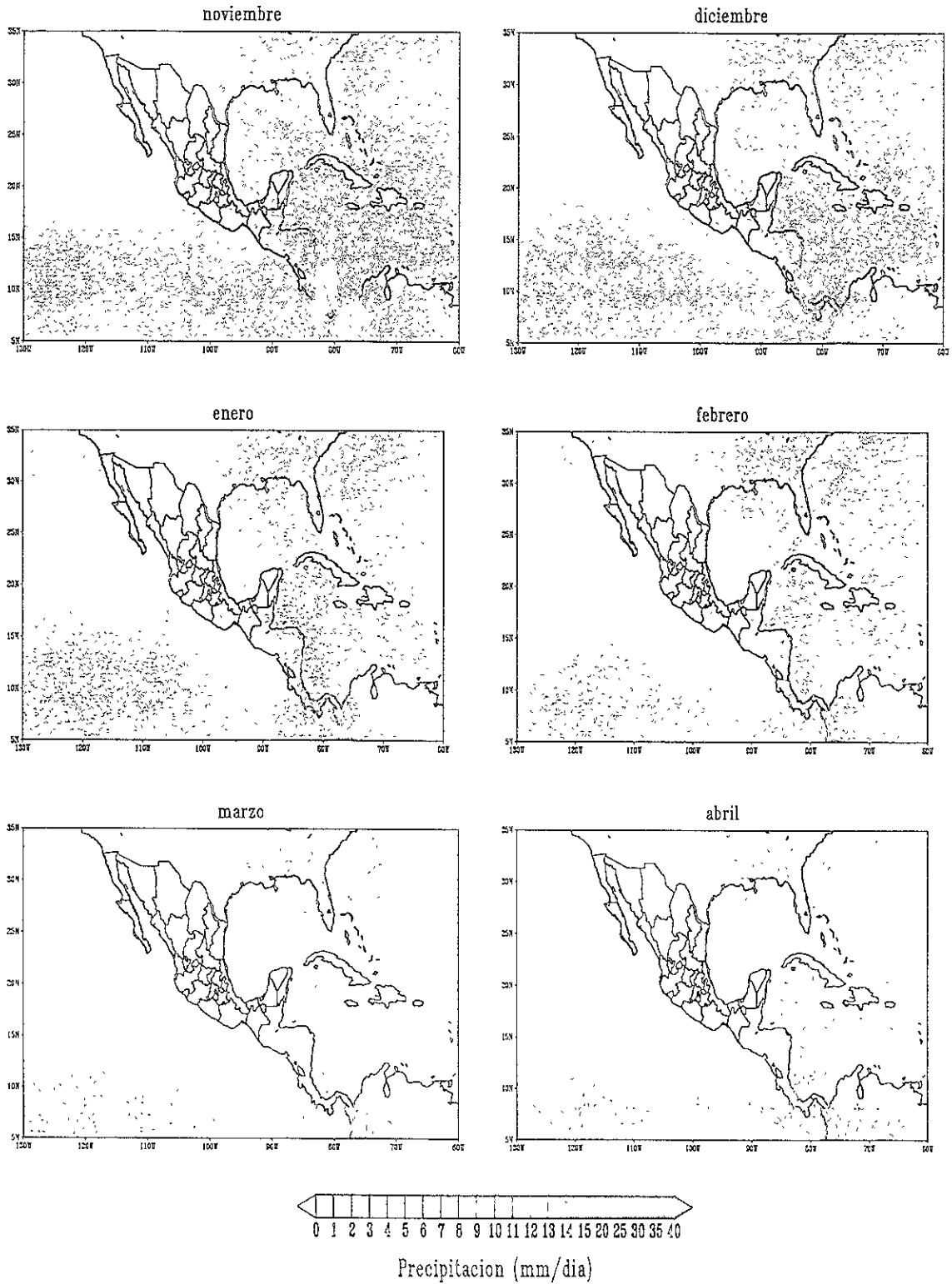


Fig. 1.2 a. Climatología de precipitación en invierno para el período 1958-1999 (Magaña et al., 1999a).

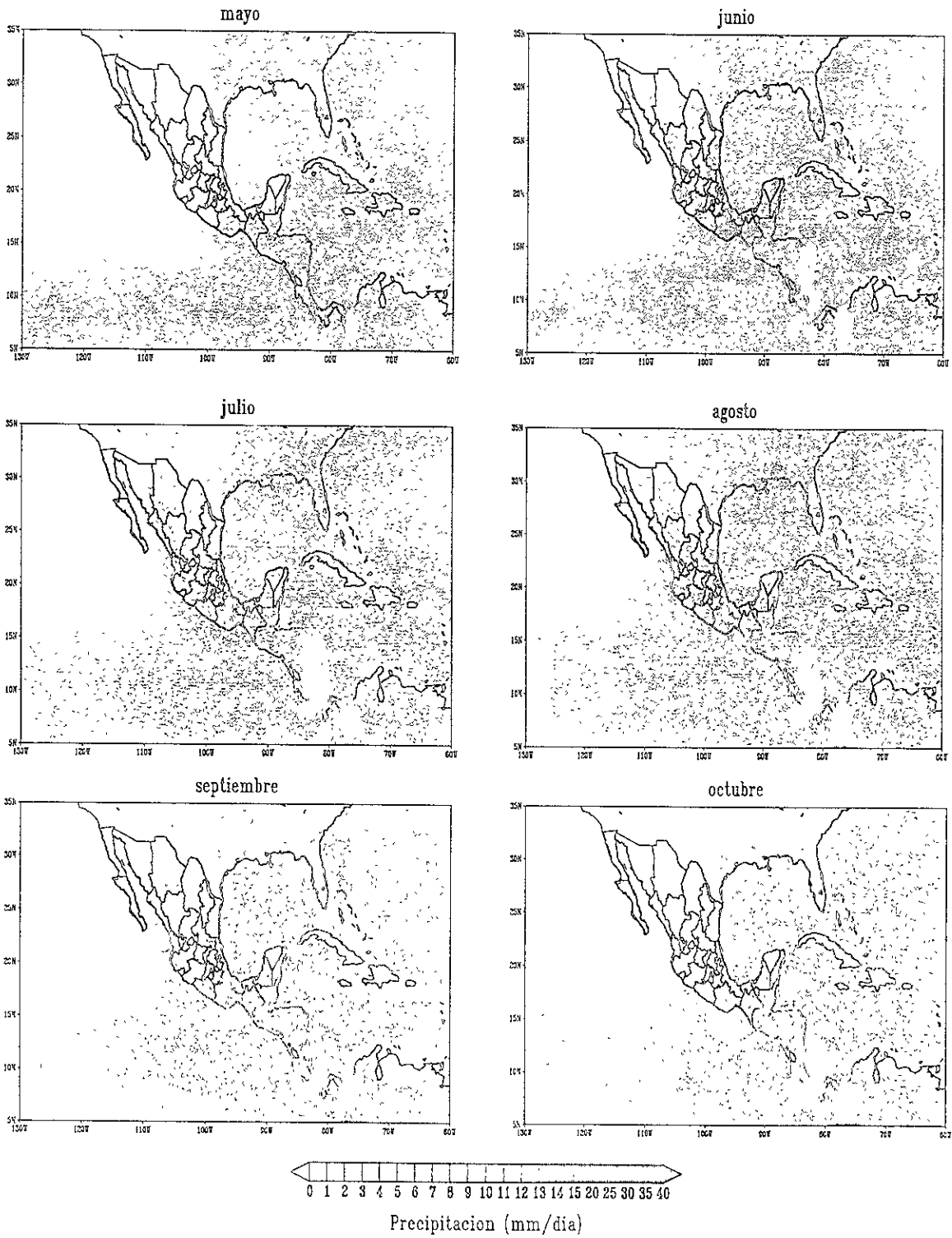


Fig. 1 2 b Climatología de precipitación en verano para el periodo 1958-1999 (Magaña et al., 1999a)

Dentro del ciclo anual de las lluvias de verano, desde la región centro-sur de México hasta Centroamérica, se presentan dos valores máximos en la precipitación, en junio y septiembre y un mínimo relativo entre julio y agosto. A este periodo de disminución de lluvias se le conoce como sequía de medio verano, intraestival, canícula o veranillo. Este valor mínimo que se registra en la precipitación, está relacionado con la menor formación de nubes convectivas profundas asociada a cambios en la temperatura de superficie del mar y en la radiación solar que llega a la superficie (Magaña, 1999b).

La ZITC en el Pacífico Este, modula gran parte de la variación anual de lluvias en México. La ZITC no llega a desplazarse hasta el área de México, sino que su posición se asocia dinámicamente a la alberca de agua caliente del Pacífico Mexicano y a los gradientes latitudinales de la temperatura de superficie del mar, que determinan condiciones para la generación de la convección profunda. La posición, intensidad y densidad de la convección profunda en la ZITC, puede resultar en periodos de intensas lluvias o de sequías. A pesar de que su variabilidad es un tema poco estudiado, se sabe que experimenta periodos de intensa y débil actividad convectiva, en gran parte controlados por ondas tropicales (Magaña y Yanai, 1995).

Los ciclones tropicales son sistemas organizados de nubes cumulonimbus que poseen circulación ciclónica. Existen varias regiones ciclogénicas en los trópicos: El Pacífico Noreste, en la región de la India y al sur del Océano Índico, el Caribe, el Golfo de México y el Pacífico del oeste. Estas zonas se encuentran entre las latitudes de 35° Norte y Sur, y se caracterizan por estar rodeadas de mares con temperaturas elevadas ($>26^{\circ}\text{C}$). Alrededor de México, los ciclones tropicales ocurren de principios de verano hasta finales de otoño, aunque algunas veces la temporada se prolonga.

El ciclo de vida de los ciclones tropicales ha sido descrito con la escala de Saffir-Simpson (Tabla 1.1), considerando los parámetros de presión y vientos. A pesar de ser un parámetro de importancia, no existe una escala que relacione la cantidad de precipitación que dejan los ciclones tropicales con la intensidad

TIPO	CATEGORÍA	PRESIÓN (mb)	VIENTO (km/h)
Depresión Tropical	DT	<1008.0	<0=60.0
Tormenta Tropical	TT	990.0	61.0-118.0
Huracán	1	>980.0	119.0-153.0
Huracán	2	979.0-965.0	154.0-177.0
Huracán	3	964.0-945.0	178.0-209.0
Huracán	4	944.0-920.0	210.0-249.0
Huracán	5	<920.0	>249.0

Tabla 1. 1. Categorías de escalas de ciclones tropicales de Saffir-Simpson (Simpson, 1974).

Por otra parte, el invierno se caracteriza por condiciones secas en la mayor parte del territorio, excepto en el noroeste y en la vertiente del Golfo de México. En términos de dinámica atmosférica, en el período de invierno se presentan ciclones de gran escala en latitudes medias que afectan el norte del país y que en ocasiones se propagan hacia el sur, sobre el Golfo de México y el sudeste, provocando disminución de temperatura, vientos intensos y lluvias desde Veracruz, hasta Yucatán, que pueden incluso alcanzar Centroamérica. Tales sistemas se conocen como Nortes y pueden resultar en lluvias extremas en Veracruz y Tabasco (Magaña et al., 1999a).

Los Nortes son ondas de escala sinóptica de latitudes medias que se forman al este de las Montañas Rocallosas o de la Sierra Madre y se propagan hacia los trópicos. Las circulaciones anticiclónicas asociadas a la onda pueden ocasionar en el Golfo de México vientos del norte por arriba de los 30 m/s, descensos de temperatura desde 2° hasta 15°C en 24 horas, baja nubosidad y precipitación sobre las cordilleras del este de México y Centroamérica (Schultz et al, 1998). Generalmente los nortes tienen una duración de más de un día, aunque su permanencia en el Golfo de México varía dependiendo de la velocidad con que se desplaza la onda proveniente de latitudes medias. La mayor actividad de nortes durante el año se presenta entre los meses de noviembre a abril. De este modo, aunque el invierno se distingue por las condiciones secas en la mayor parte de la región, se puede

hablar de un régimen de lluvias para el invierno sobre la vertiente del Golfo de México (Magaña et al., 1999a).

1.3. Precipitación y escurrimiento.

El término precipitación agrupa todas las formas de agua que se depositan en la superficie terrestre, provenientes del vapor atmosférico. Las formas de precipitación principales son rocío, llovizna, lluvia, granizo, escarcha y nieve, de las cuales la más común es la lluvia. La precipitación es el producto del enfriamiento y condensación del vapor atmosférico.

Para determinar en forma objetiva la cantidad de lluvia que cae en un sitio específico, se utilizan dos instrumentos de medida: el pluviómetro y el pluviógrafo.

El pluviómetro consta esencialmente de un recipiente cilíndrico con un embudo en la parte superior que descarga a un vaso colector de menor diámetro que el recipiente. Midiendo la altura alcanzada por el agua en el colector y multiplicándola por la relación de áreas transversales de colector y receptor, se obtendrá la altura de precipitación.

El pluviógrafo consiste en un recipiente que descansa sobre un resorte. Conforme se acumula el agua en el recipiente, el resorte se contrae. Un estilote acoplado al resorte, grafica las contracciones del mismo sobre un tambor de eje vertical que gira mediante un mecanismo de relojería. Las gráficas así obtenidas, muestran la relación de la altura de lluvia acumulada con respecto al tiempo. En una gráfica de este tipo, el incremento de altura de lluvia en un intervalo de tiempo dado, nos dará la rapidez media de precipitación; así mismo, la pendiente de la gráfica para un tiempo dado, representará la rapidez instantánea de precipitación. La rapidez con que aumenta la altura de lluvia se llama intensidad de lluvia. Se mide generalmente en mm/hora.

Hietograma es una gráfica que relaciona la intensidad y duración de la precipitación. Generalmente se trabaja con intensidades medias de lluvia en cada uno de los intervalos de

tiempo en que se divide la duración de la precipitación, de ahí que el hietograma resulte un diagrama de barras.

El origen principal de las inundaciones es la lluvia. Antes de que las inundaciones ocurran se da un proceso de escurrimiento. Por eso, las medidas dirigidas a disminuir los riesgos ocasionados por inundaciones se deben basar en una adecuada medición de la precipitación y en el conocimiento preciso de su transformación en escurrimiento.

El proceso de transformación de lluvia en escurrimiento puede resumirse de la siguiente forma:

Al iniciarse la lluvia una parte de ella es interceptada momentáneamente por la vegetación, las construcciones y en general todo tipo de obstáculos que le impiden alcanzar la superficie del suelo. Este fenómeno es conocido como "retención del agua de lluvia". El agua que logra alcanzar la superficie del suelo se infiltra. El resto del agua escurre superficialmente y se almacena en las depresiones naturales del terreno. Una vez que la cantidad de agua supera las posibilidades de almacenamiento en las depresiones del terreno, se inicia el escurrimiento por los cauces de pequeños arroyos, aunque una parte continúa alimentando el proceso de infiltración.

La lluvia que escurre superficialmente, denominada lluvia efectiva, pasa por un proceso de regulación a través del almacenamiento temporal en arroyos y de retraso en el tiempo de salida del agua de la cuenca, posteriormente escurre por el cauce o lecho del río, sufriendo nuevamente un proceso de regulación y retraso que depende de las características de cada lecho o cauce.

Por otra parte, las condiciones de la cuenca cambian de una época del año a otra; así, por ejemplo, la humedad del suelo y la cubierta vegetal pueden transformarse radicalmente del verano al invierno. Sin embargo, los cambios más importantes son los derivados de la actividad humana, la disminución de la permeabilidad debida a la urbanización,

deforestación y modificaciones del uso del suelo, traen generalmente un aumento considerable en el volumen del escurrimiento y la velocidad con que se presenta su valor máximo.

Para modelar correctamente el proceso descrito, es necesario considerar que tanto las características de la precipitación como las de la superficie del terreno, varían de un punto a otro de la cuenca. En consecuencia, lo que realmente ocurre es el resultado de la superposición de muchos factores del área de estudio.

Durante los procesos anteriores de precipitación, retención, infiltración, almacenamiento en depresiones y escurrimiento superficial, el agua está sujeta también a evaporación, tanto directamente de las superficies expuestas y capas superiores del suelo, como indirectamente mediante transpiración de las plantas.

Un intento por valuar la cantidad de agua en cada uno de los procesos anteriores es la llamada "ecuación del balance hidrológico", que establece lo siguiente:

$$\text{Precipitación} = \text{Escurrecimiento} + \text{Infiltración} + \text{Evapotranspiración}.$$

A pesar de la relativa simplicidad de la expresión anterior, su aplicación correcta presenta muchas dificultades, debido a la gran cantidad de factores inherentes en la evaluación de cada uno de los términos de la ecuación.

La infiltración depende de muchos factores, como son tipo de suelo, tipo de vegetación, temperatura, humedad del suelo, profundidad del nivel freático, intensidad de lluvia, etc.

La evaporación depende de factores, principalmente de tipo meteorológico, como son la radiación solar, la temperatura, la presión del vapor atmosférico y el viento. La transpiración depende de los factores meteorológicos antes mencionados y también del tipo y uso del suelo y la vegetación.

El proceso de evaporación es el que presenta mayores dificultades para su medición correcta debido a que existe durante la precipitación, la retención, la infiltración, el almacenamiento y el escurrimiento superficial.

Podemos concluir que la ecuación del balance hidrológico es útil, muchas veces, sólo desde el punto de vista cualitativo.

1.4. Inundaciones.

Se considera inundación al flujo o a la invasión de agua por exceso de escurrimientos superficiales o por acumulación en terrenos planos, ocasionada por falta o insuficiencia de drenaje tanto natural como artificial (Delgadillo, 1996).

De acuerdo con su origen, las inundaciones se clasifican en: pluviales, fluviales, lacustres, costeras, por rotura de bordos, diques y presas, y por mala operación de las compuertas de las presas (Domínguez, 1995).

Las inundaciones pluviales se deben a la acumulación del agua precipitada (lluvias, granizo y nieve, principalmente), que se concentra en terrenos de topografía plana o en zonas urbanas con insuficiencia o carencia de drenaje. Las fluviales son aquellas que se originan cuando los escurrimientos superficiales son mayores a la capacidad de conducción de los cauces. Cuando esto sucede, el exceso de agua escurre fuera de su cauce, sin control, hacia las partes bajas. Las lacustres se originan en los lagos o lagunas por el incremento de sus niveles y son peligrosas debido al riesgo que representan para los asentamientos humanos cercanos a las áreas de embalse.

Las inundaciones costeras se originan en las zonas costeras que son afectadas por las mareas de tormenta, particularmente en el Golfo de México, donde la sobreelevación del nivel medio del mar hace que éste penetre tierra adentro afectando en ocasiones zonas muy

amplias. A este fenómeno se suma el del oleaje y juntos causan daños muy importantes, como la socavación de los cimientos en los edificios costeros, el naufragio de las embarcaciones, la demolición y destrucción de instalaciones portuarias, la rotura de las obras de defensa costera y la erosión de las playas y riscos. El efecto del agua no sólo es destructivo al avanzar tierra adentro, sino también en su retirada hacia el mar.

En cuanto a las inundaciones derivadas de la insuficiencia de las obras de almacenamiento y control, afortunadamente, éstas han sido poco frecuentes. Es particularmente importante evitar el desbordamiento de las presas, ya que en caso de ocurrir, provocaría su propia destrucción en pocas horas y el volumen de agua almacenado sería descargado súbitamente, superando la capacidad del cauce.

Las inundaciones en las cuencas que han sido urbanizadas y los daños que éstas producen son cada vez mayores debido a que, por un lado, las modificaciones del terreno producen crecientes varias veces mayores que las de la cuenca natural y, por otro, afectan bienes de alto valor económico.

1.5. El Estado de Tabasco.

Geografía física y elementos naturales.

El Estado de Tabasco abarca una extensión de 24 475.24 km², representando el 1.3% de la superficie del país. Colinda al norte con el Golfo de México y Campeche; al este con Campeche y la República de Guatemala; al sur con Chiapas; y al oeste con Veracruz (Fig. 1.3) Sus coordenadas extremas son al norte 18°39', al sur 17°15' de latitud norte; al este 91°00', al oeste 94°07' de longitud oeste (INEGI, 1986).

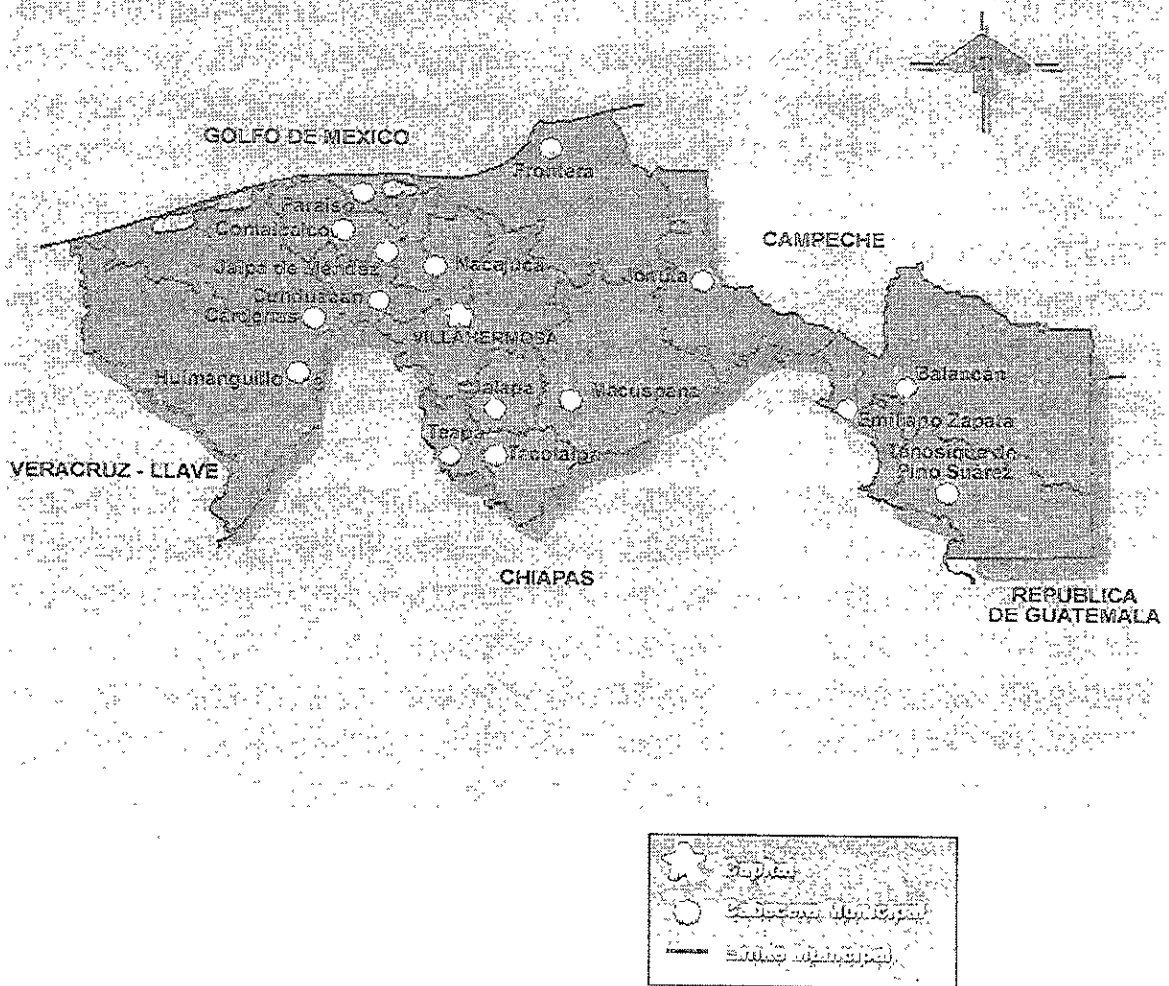


Fig. 1.3 Mapa del Estado de Tabasco

El Estado de Tabasco está integrado por 17 municipios (Tabla 1.2 y Fig. 1.3)

CLAVE	MUNICIPIO	CABECERA MUNICIPAL
001	Balancán	Balancán
002	Cárdenas	Cárdenas
003	Centla	Frontera
004	Centro	Villahermosa
005	Comalcalco	Comalcalco
006	Cunduacán	Cunduacán
007	Emiliano Zapata	Emiliano Zapata
008	Huimanguillo	Huimanguillo
009	Jalapa	Jalapa
010	Jalpa de Méndez	Jalpa de Méndez
011	Jonuta	Jonuta
012	Macuspana	Macuspana
013	Nacajuca	Nacajuca
014	Paraíso	Paraíso
015	Tacotalpa	Tacotalpa
016	Teapa	Teapa
017	Tenosique	Tenosique de Pino Suárez

Tabla 1 2. Municipios y cabeceras municipales del Estado de Tabasco.

En Tabasco la mayoría de los asentamientos humanos que conforman las principales localidades están ubicados en las márgenes de los ríos Grijalva, Usumacinta y varios más.

La ubicación del Estado de Tabasco en la zona tropical, su escasa elevación con respecto al nivel del mar (Fig. 1.4) y su cercanía al Golfo de México, determinan el desarrollo de climas cálidos con influencia marítima, en los que la variación de la temperatura es moderada. La invasión de las masas de aire húmedo tropical en la entidad es directa y provoca gran parte de la precipitación total anual.

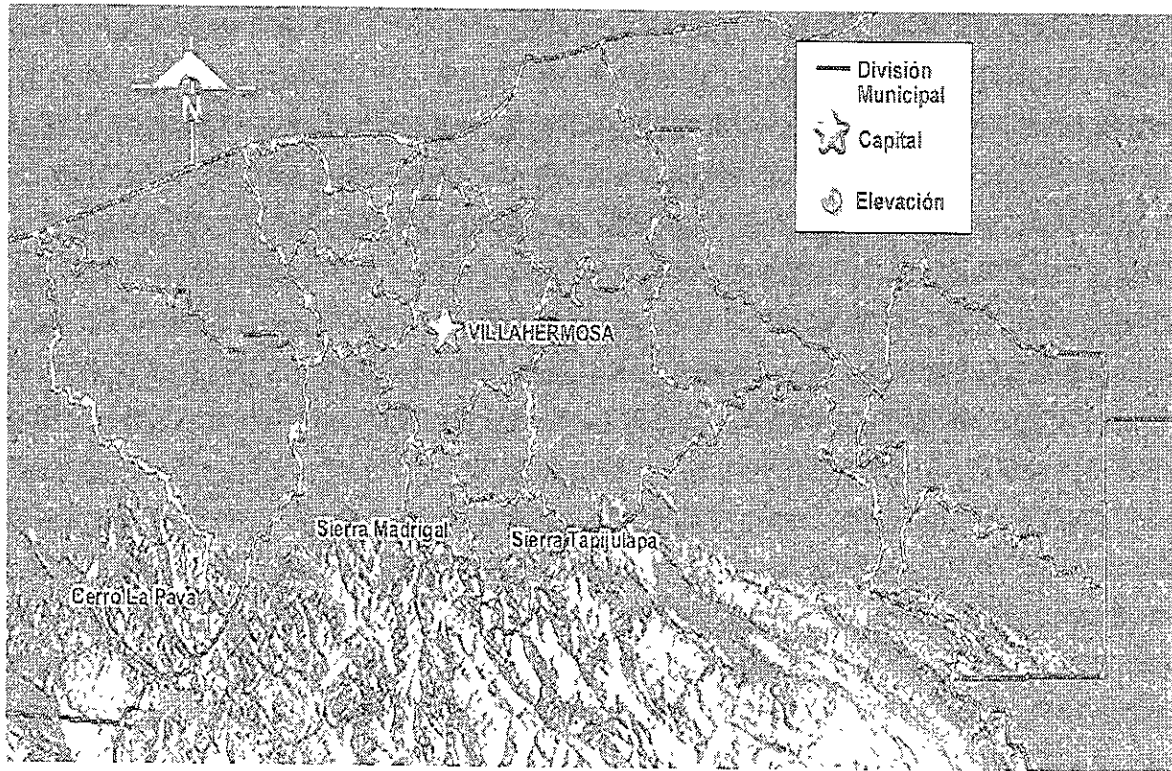


Fig. 1.4 Topografía y elevaciones principales del Estado de Tabasco.

Tabasco por sus climas, se puede dividir en dos regiones: la llanura; y la sierra y su zona de transición hacia la llanura.

La llanura bordea al Golfo de México por el sur y tiene elevaciones menores a los 100 m. En ella los climas son cálidos con lluvias en verano, y van de los húmedos a los subhúmedos. El clima cálido húmedo con abundantes lluvias de verano (Fig. 1.5) se distribuye en gran parte de la entidad, desde la zona costera hasta las estribaciones de las sierras ubicadas en el sur. En esta región se localizan las poblaciones de Villahermosa, Frontera, Heroica Cárdenas, Emiliano Zapata, Comalcalco, Cunduacán, Paraíso, Tenosique y Balancán, entre otras. Su régimen térmico medio anual oscila entre 25.8°C y 27.8°C (Fig. 1.6). La vegetación que se desarrolla es de selva alta perennifolia asociada con pastizal, pero en las zonas lacustres hay tular y en las pantanosas popal.

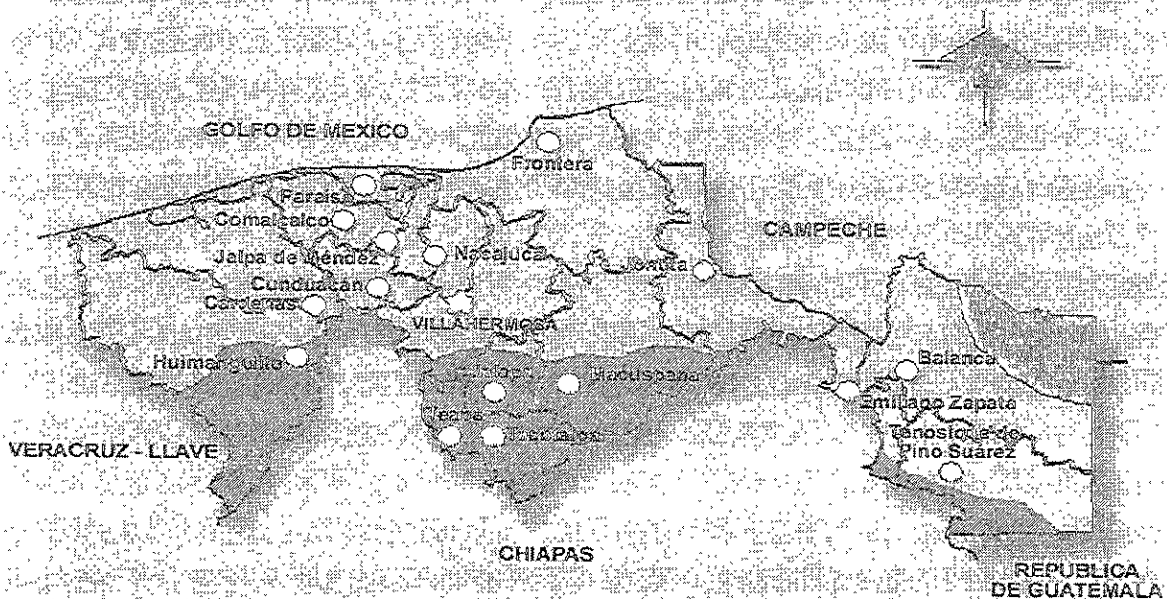


Fig 1.5. Climas del Estado de Tabasco.

El clima cálido subhúmedo con lluvias de verano (Fig. 1.5) abarca la porción nordeste del estado, limítrofe con Campeche, en la cual se encuentra parte del complejo agropecuario Tenosique-Balancán. Esta zona es la menos húmeda de la entidad, su régimen pluviométrico es mayor de los 1 500 mm (Fig 1.7) y su temperatura media anual oscila entre 26.5°C y 26.8°C (Fig. 1.6) En esta porción hay pastizal cultivado, pero en el oeste se desarrolla una pequeña área de sabana.

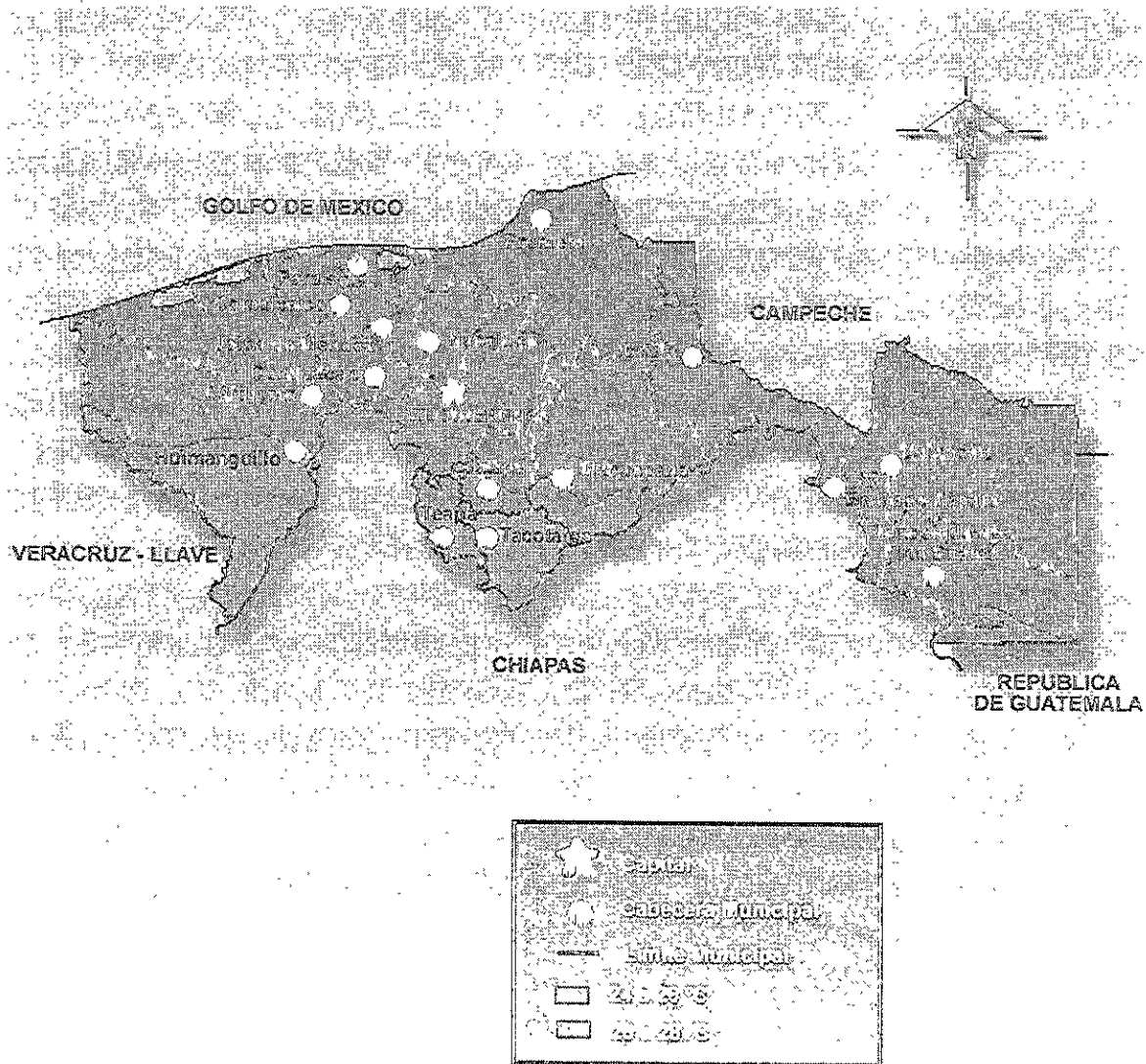
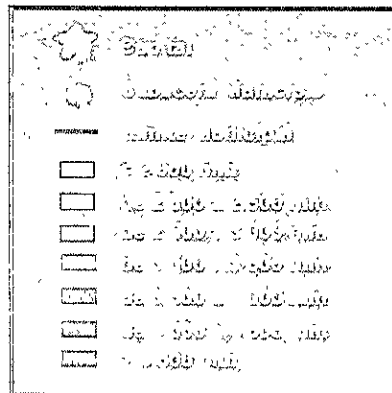
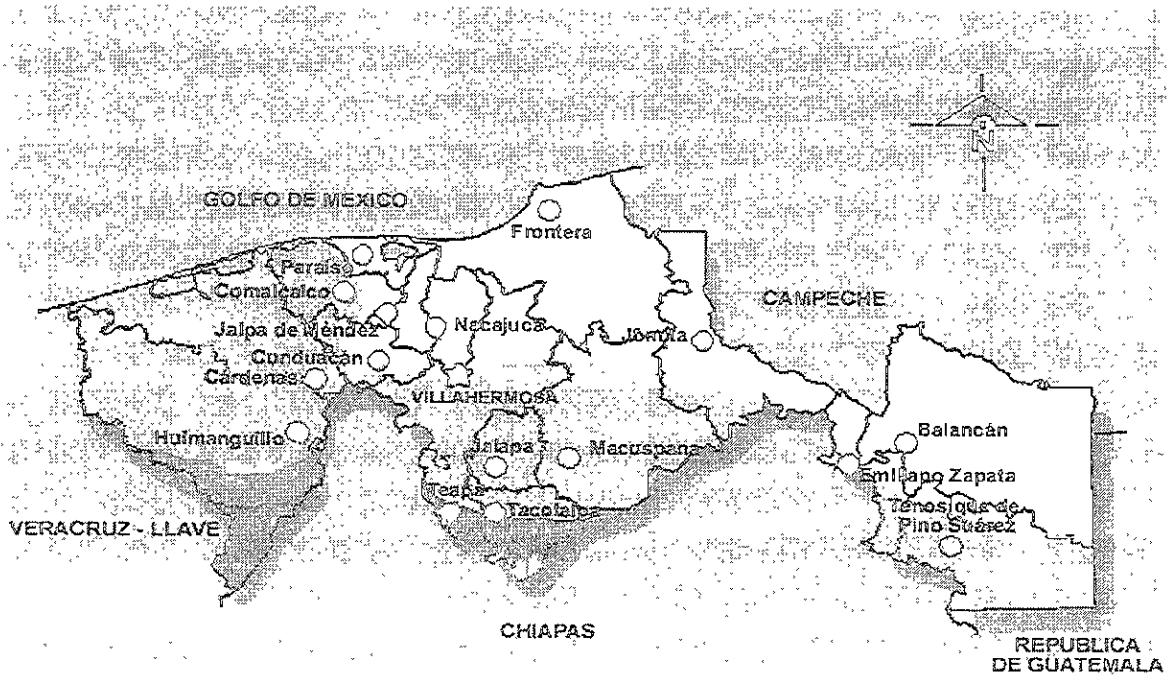


Fig 1.6. Temperatura media anual del Estado de Tabasco.

La sierra y la zona de transición hacia la llanura es una región constituida por sierras y lomeríos asociados con llanuras, y es una de las más húmedas del país. En ella el clima es cálido húmedo con lluvias todo el año (Fig. 1.5) Comprende tres zonas del sur de la entidad. La temperatura media anual en esta región oscila de 25.4°C a 26.9°C (Fig. 1.6), las lluvias se presentan durante todo el año, pero decrecen ligeramente en el invierno, periodo en el cual se registra el 14.4% del total anual precipitado, cuyo volumen va de 2 211 mm a

3 862 mm (Fig.1.7). La vegetación que comúnmente se desarrolla es la de selva alta perennifolia.



1.7 Precipitación total anual del Estado de Tabasco

El Estado de Tabasco es la región donde se localiza la red hidrológica más compleja, por ser la que registra mayores precipitaciones. Aquí, a diferencia de otras entidades de la República, es el excedente y no la falta de agua lo que ocasiona problemas, pues se carece de infraestructura adecuada para drenarla.

Uno de los aspectos que caracteriza a los ríos del territorio tabasqueño es la formación de meandros, debido al terreno plano y al abundante acarreo de materiales. Esta particularidad está íntimamente ligada con las inundaciones provocadas por la continuidad de las lluvias.

En Tabasco se localizan partes de las regiones hidrológicas Coatzacoalcos (No. 29) y Grijalva-Usumacinta (No. 30) (Fig.1.8). La primera está situada en la porción occidental, abarca 5915.15 km² y está representada por una parte de la cuenca del río Tonalá y las lagunas del Carmen y Machona. La segunda región está situada en el resto del estado y ocupa una extensión de 18560.09 km². Esta región se encuentra constituida por el sistema Grijalva-Usumacinta. En la porción tabasqueña de esta región hidrológica están ubicadas poblaciones relevantes como Villahermosa, Cárdenas, Comalcalco, Jalpa, Frontera, Teapa, Macuspana, Paraíso, Tenosique y otras, y comprende parte de tres cuencas, la cuenca del Río Usumacinta, Laguna de Términos y la cuenca del Río Grijalva-Villahermosa.

La cuenca del Río Usumacinta abarca en la entidad un área de 7021.83 Km². La corriente principal de esta cuenca, el Usumacinta, es la más oriental de la región 30, y tiene como afluente derecho al Río San Pedro. Algunas de las localidades que se encuentran asentadas en esta zona son Jonuta, Balancán de Domínguez, Emiliano Zapata y Tenosique de Pino Suárez.

La cuenca del río Grijalva-Villahermosa abarca un área en la entidad de 10586.60 km², en ella desembocan gran parte de los ríos que cruzan la llanura del estado, como es el Usumacinta.

De las subcuencas correspondientes a la cuenca Río Grijalva-Villahermosa quedan íntegramente en Tabasco las del Río Grijalva, Río Chilapilla, Río Carrizal, Río Samaria, Río Cunduacán y Río Caxuchapa; casi la totalidad de las de Río Viejo Mezcalapa, Río Mezcalapa, Río de la Sierra, Río Tacotalpa y Río Chilapa; así como una pequeña porción de las subcuencas Río Almendro, Río Puxcatán, Río Macuspana y Río Tabasquillo.

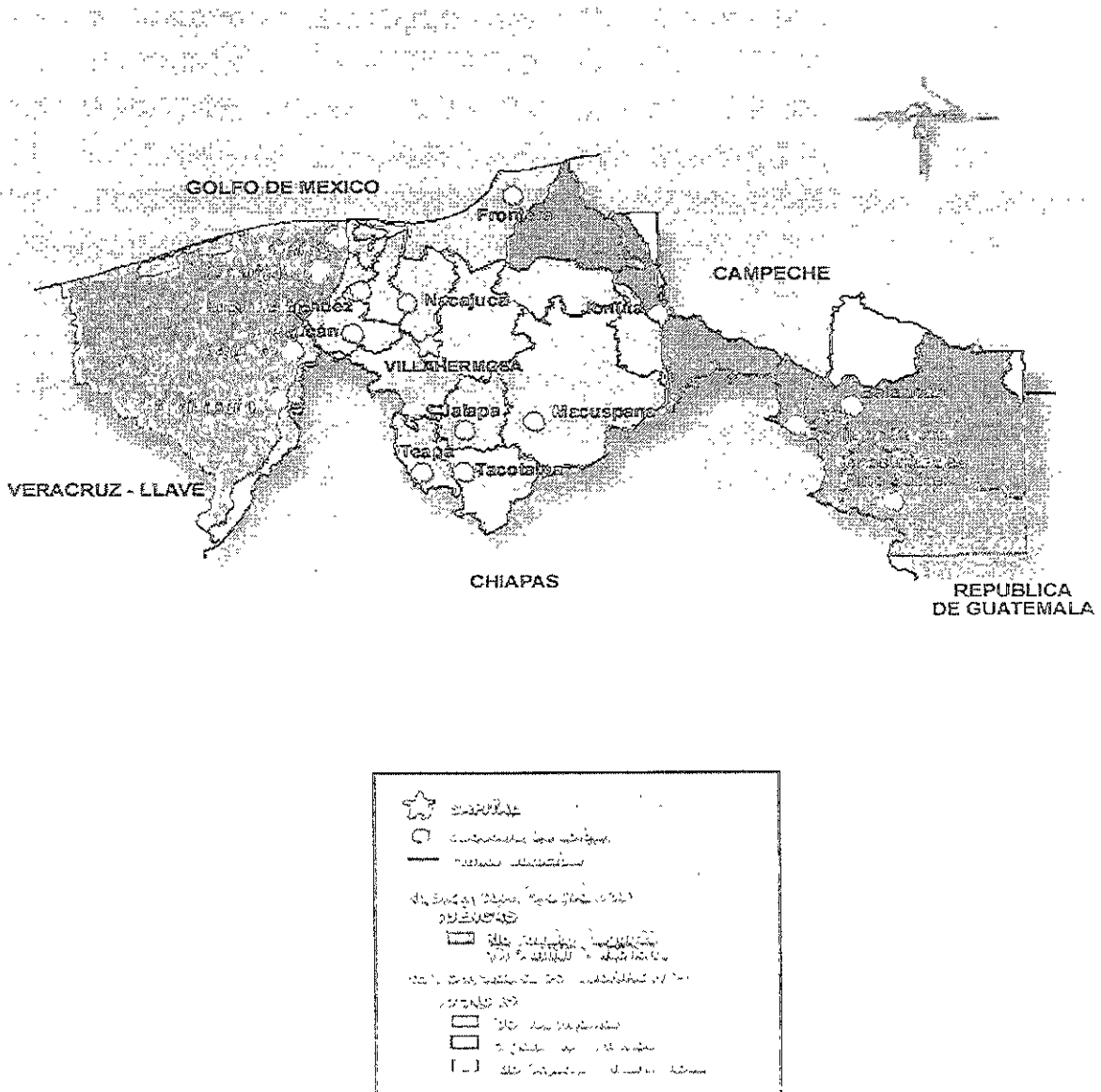


Fig. 1.8. Regiones y cuencas hidrológicas del Estado de Tabasco

La cuenca del Río Grijalva-Villahermosa es la mayor y más importante de Tabasco, por lo tanto el desarrollo del presente trabajo estará enfocado en el análisis de la relación existente entre la información meteorológica de precipitación y la información hidrométrica de dicha cuenca para determinar un esquema que permita diagnosticar situaciones de riesgo de inundación en esta área, principalmente en la ciudad de Villahermosa.

Capítulo 2. Datos y metodología.

2.1. Datos.

Los datos de precipitación diaria utilizados en el presente estudio fueron obtenidos del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC (Quintas, 1996), elaborado por la Comisión Nacional del Agua. Las unidades en que se presentan los datos de precipitación son los milímetros, con una resolución de 0.1 milímetro.

En la base de datos meteorológicos ERIC se encuentran 93 estaciones climatológicas para el Estado de Tabasco con datos de precipitación pertenecientes al período de años comprendido entre 1961 y 1985, pero no todas las estaciones cubren completamente dicho período, pudiéndose encontrar estaciones que cuentan con apenas algunos meses de datos.

Con el fin de actualizar los datos de precipitación disponibles y mejorar así la calidad del estudio se utilizó el Sistema de Consulta Dat322 V. 1.0, el cual contiene información climatológica de 322 estaciones de referencia seleccionadas por la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional, entre las cuales se encuentran las estaciones Boca del Cerro, Dos Patrias, Macuspana y Samaria, pertenecientes al Estado de Tabasco, y cuyos datos de precipitación se encuentran actualizados hasta el año 1994. Dicho sistema fue desarrollado por la Subcoordinación de Aprovechamientos Hidráulicos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Los datos de gasto medio diario fueron obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Las unidades en que se presentan los datos de gasto son metros cúbicos/segundo. En este banco de datos se encuentran 21 estaciones hidrométricas para el Estado de Tabasco, algunas de ellas con datos actualizados hasta el año 1994

Estos datos serán utilizados en el desarrollo de este estudio para determinar la relación existente entre la precipitación diaria registrada y los datos de gasto medio diario medidos, para desarrollar un esquema de pronóstico de aumento de caudales.

2.2. Metodología.

De las estaciones climatológicas existentes en la base de datos ERIC, se seleccionaron sólo aquellas que tienen un período largo de datos y además que exista una estación hidrométrica en el mismo sitio (Tabla 2.1). De las diez estaciones seleccionadas, ocho de ellas se localizan en la cuenca del Río Grijalva-Villahermosa y dos en la cuenca del Río Usumacinta (Fig.2.1).

Estación climatológica	Localización	Estación Hidrométrica	Corriente	Cuenca	Período de años analizado
27004 Boca del Cerro	Lat. 17°26' Long. 91°31'	30019 Boca del Cerro	Río Usumacinta	Río Usumacinta	1961-1985
27030 Macuspana	Lat. 17°46' Long. 92°35'	30055 Macuspana	Río Macuspana	Río Tultija	1961-1994
27037 Pueblo Nuevo	Lat. 17°50' Long. 92°54'	30016 Pueblo Nuevo	Río de la Sierra	Río Viejo Mezcalapa	1961-1985
27039 Samaria	Lat. 18°01' Long. 93°16'	30005 Samaria	Río Rompido	Río Mezcalapa	1961-1994
27040 San Pedro	Lat. 17°46' Long. 91°10'	30088 San Pedro Tabasco	Río San Pedro	Río Usumacinta	1961-1985
27042 Tapijulapa	Lat. 17°28' Long. 92°47'	30093 Tapijulapa	Río Tapijulapa	Río Tacotalpa	1962-1985
27044 Teapa	Lat. 17°33' Long. 92°58'	30032 Teapa	Río Teapa	Río de la Sierra	1961-1985
27054 Villahermosa	Lat. 17°59' Long. 92°57'	30083 Gaviotas II	Río Grijalva	Río Grijalva	1961-1994
27060 González	Lat. 17°56' Long. 92°59'	30062 González	Río Carrizal	Río Grijalva	1972-1983
27070 Oxolotán	Lat. 17°22' Long. 92°45'	30111 Oxolotán	Río Oxolotán	Río Grijalva	1974-1983

Tabla 2.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas correspondientes seleccionadas para el primer análisis

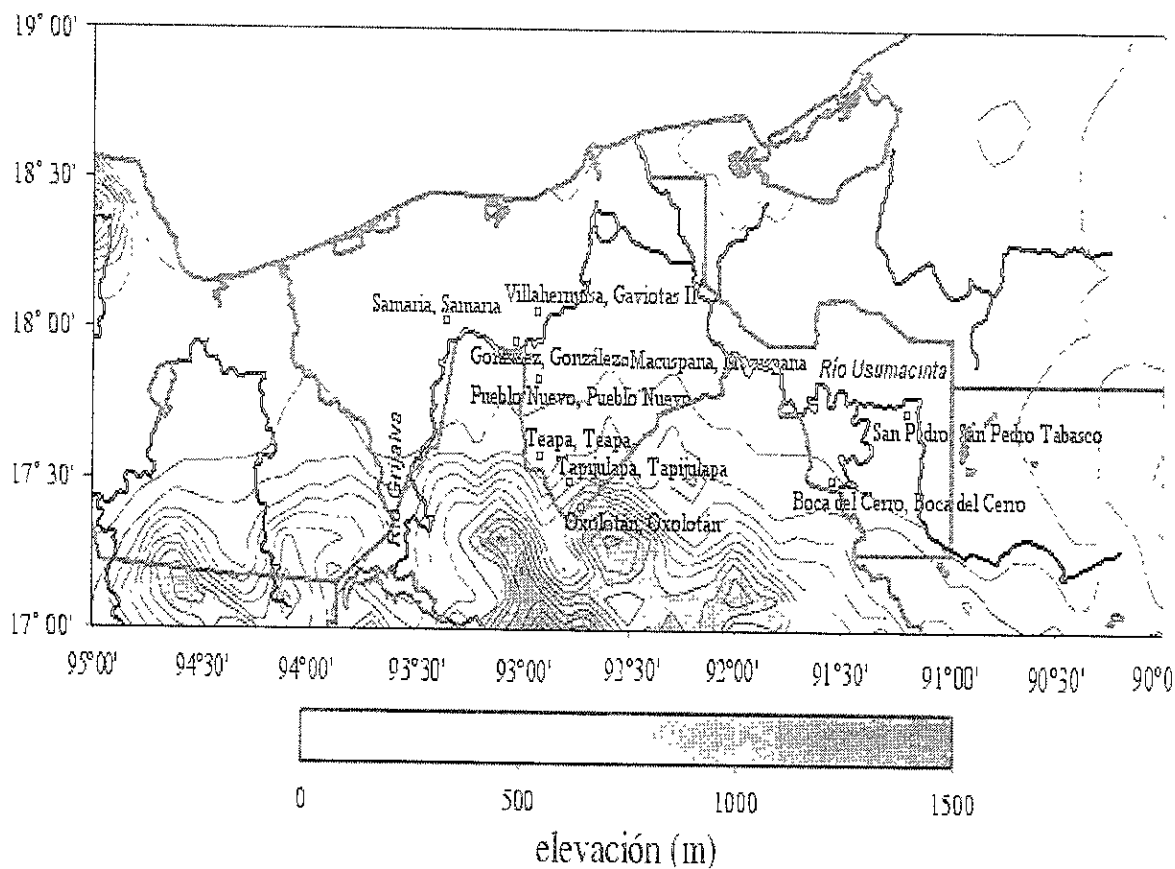


Fig. 2.1 Localización de las estaciones climatológicas y sus correspondientes estaciones hidrométricas seleccionadas para el primer análisis.

El primer análisis que se realizó con los datos de precipitación diaria de las estaciones seleccionadas fue la climatología de cada estación, calculándose promedios de lluvia mensual para cada año y posteriormente un promedio de lluvia mensual para todo el período de años analizado (Figs. 2.2 y 2.3).

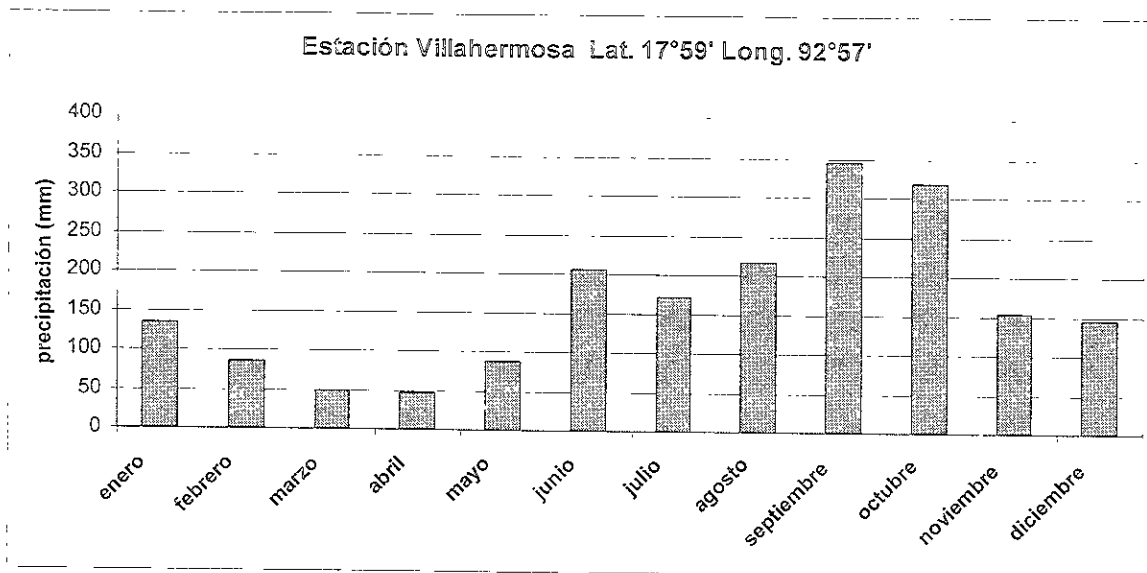


Fig 2.2. Climatología de la estación Villahermosa para el período 1961-1994.

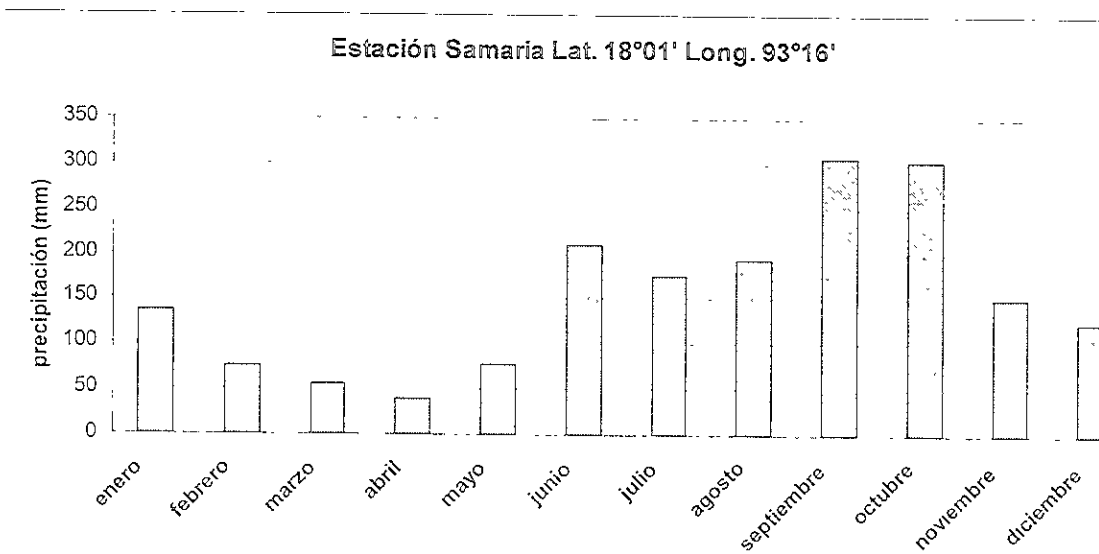


Fig. 2.3 Climatología de la estación Samaria para el período 1961-1994

De este análisis y como se muestra en los ejemplos de las Figs 2.2 y 2.3 se reconoce a los meses de junio a octubre como los meses de mayor precipitación en la región, existiendo un valor máximo en el mes de septiembre y un valor mínimo relativo en el mes de julio

Se realizó un análisis de las series de tiempo de los datos de precipitación diaria para cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas anteriormente y de los datos de gasto medio diario de sus correspondientes estaciones hidrométricas. El análisis se realizó para cada uno de los meses comprendidos en el período de junio a octubre y para cada año comprendido en el período de años de datos disponibles. El objetivo de este análisis es determinar las relaciones existentes entre los datos de precipitación diaria y los datos de gasto medio diario, es decir las respuestas del caudal con respecto a los eventos de precipitación (Figs. 2.4-2.6).

En los ejemplos mostrados en las Figs. 2.4, 2.5 y 2.6 se observa que las respuestas del caudal para las diferentes estaciones estudiadas presentan desfases de 1 a 2 días con respecto a los eventos de precipitación. Es decir, si existe una elevación en el caudal debida a un evento de precipitación, ésta se presenta uno o dos días después del evento de precipitación que la originó.

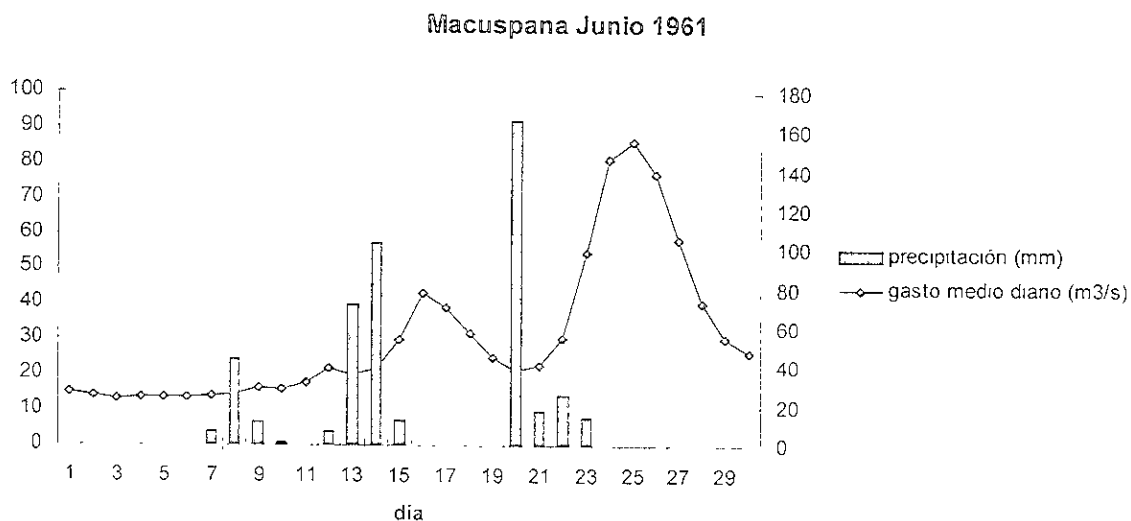


Fig. 2.4 Precipitación diaria y gasto medio diario de la estación Macuspana para el mes de junio de 1961

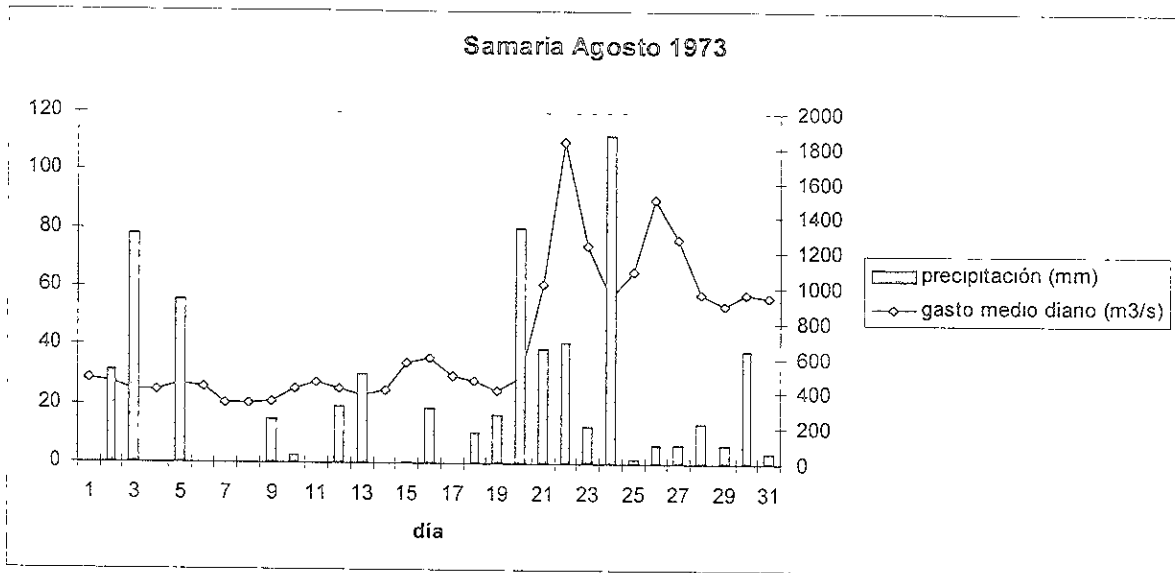


Fig. 2.5. Precipitación diaria y gasto medio diario de la estación Samaria para el mes de agosto de 1973.

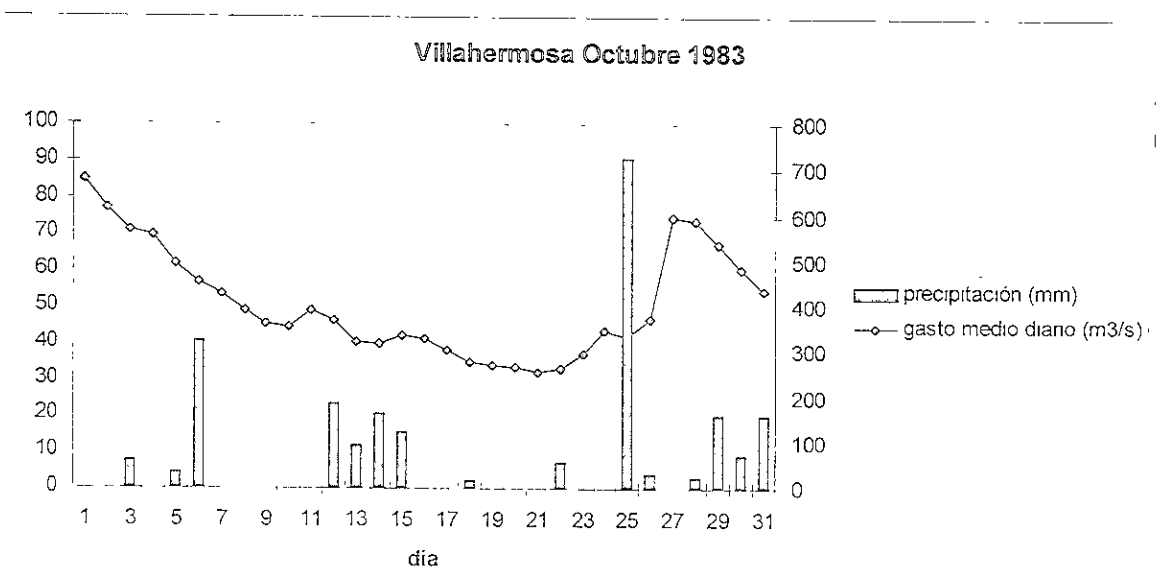


Fig. 2.6. Precipitación diaria y gasto medio diario de la estación Villahermosa para el mes de octubre de 1983.

En un análisis posterior de las series de tiempo de los datos de precipitación diaria, pero ahora considerando las diferencias o variaciones de gasto medio diario correspondientes, definidas como el valor del gasto medio diario de un día menos el valor de gasto medio

diario del día anterior, se observan los mismos desfases (Figs. 2.7-2.9). Se consideran elevaciones del caudal a las diferencias positivas y disminuciones del caudal a las diferencias negativas.

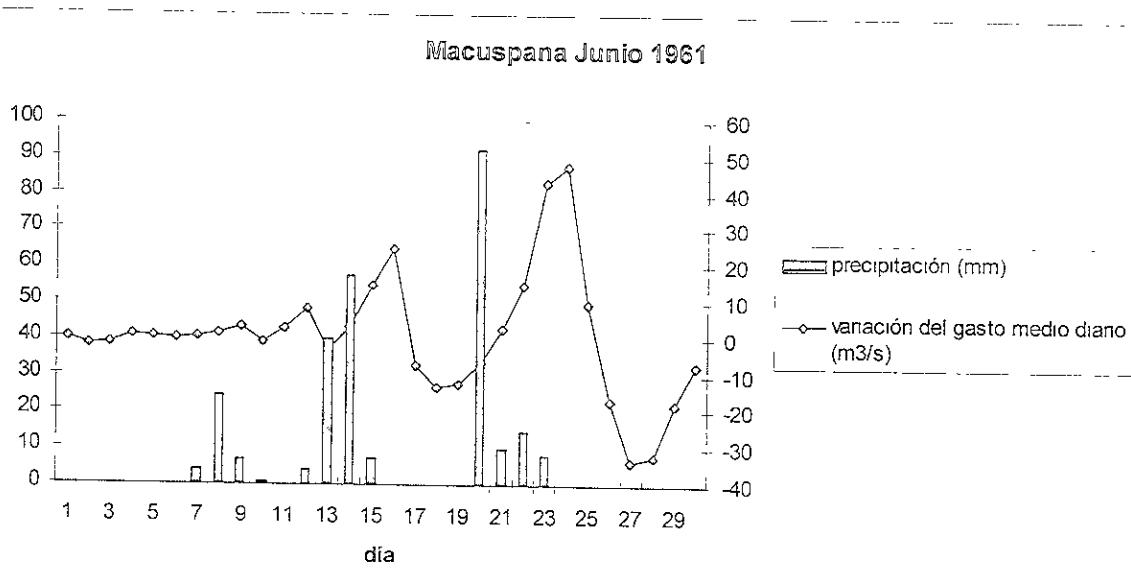


Fig. 2.7. Precipitación diaria y variación del gasto medio diario de la estación Macuspana para el mes de junio de 1961.

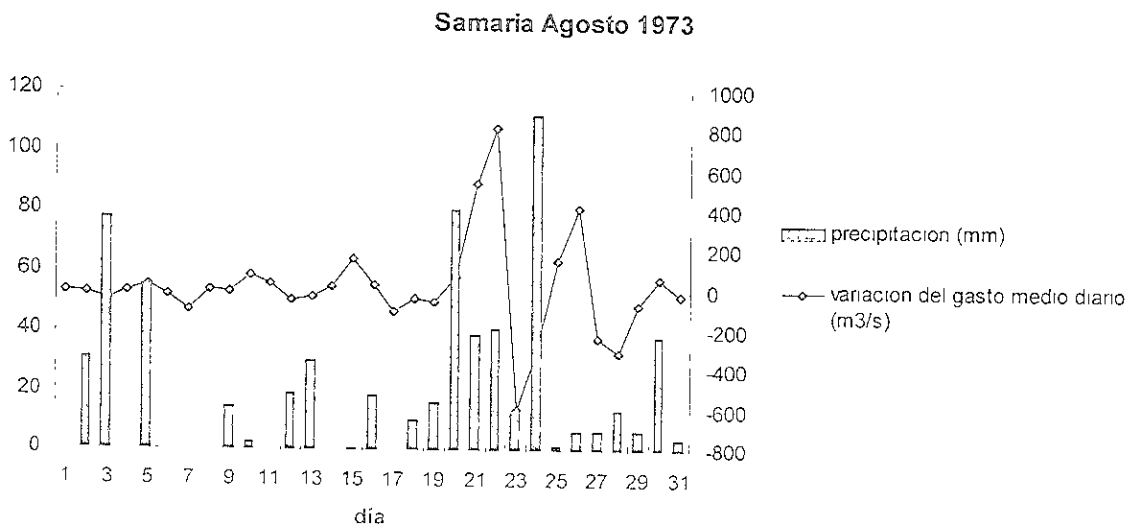


Fig. 2.8. Precipitación diaria y variación del gasto medio diario de la estación Samaria para el mes de agosto de 1973.

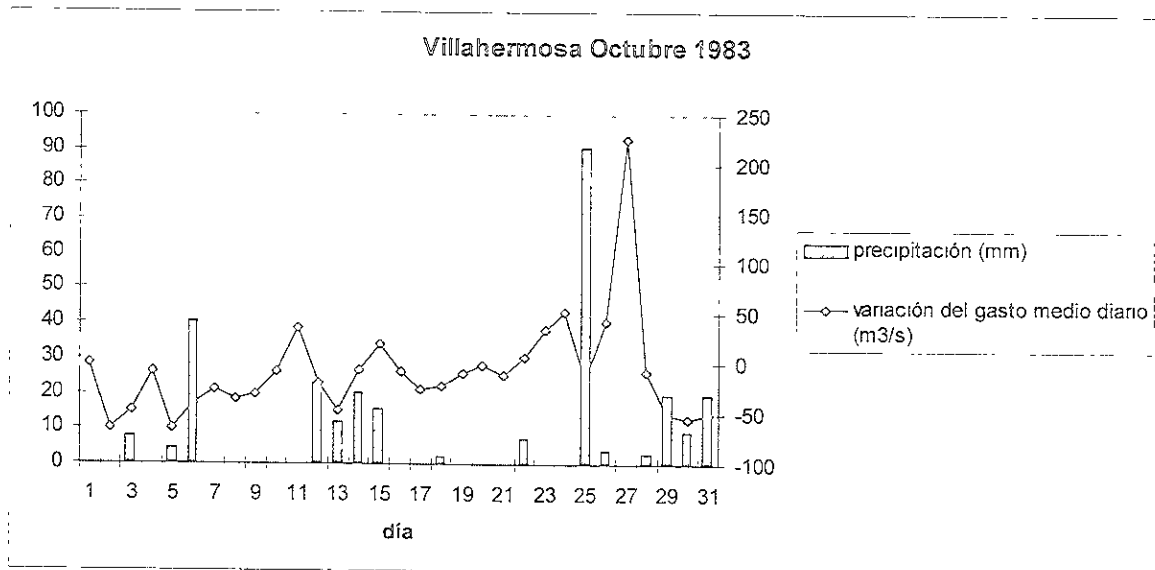


Fig. 2.9. Precipitación diaria y variación del gasto medio diario de la estación Villahermosa para el mes de octubre de 1983.

Los análisis posteriores desarrollados en el presente trabajo se enfocan en el estudio de los aumentos del caudal sólo del Río Grijalva, por ser éste el principal responsable de las inundaciones en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco.

Se efectuó un análisis de los datos de precipitación diaria de seis estaciones climatológicas localizadas en las orillas del Río Grijalva, así como su relación con los datos de gasto medio diario de las dos estaciones hidrométricas existentes en la cuenca del Río Grijalva (Tabla 2.2). La localización de estas estaciones situadas en la cuenca del Río Grijalva-Villahermosa, en las orillas de éste, se presenta en la Fig. 2.10. El análisis se realizó mes por mes en el período de junio a octubre, para todo el período de años de datos disponibles (Figs. 2.11 y 2.12).

Estación Climatológica	Localización	Período de datos analizados
27032 Mezcalapa, Huimanguillo	Lat. 17°38' Long. 93°25'	1961-1978
27035 Paredón, Huimanguillo	Lat. 17°47' Long. 93°22'	1964-1984
27017 Huimanguillo	Lat. 17°50' Long. 93°24'	1961-1981
27039 Samaria	Lat. 18°01' Long. 93°16'	1961-1994
27036 Paso de Cunduacán	Lat. 18°00' Long. 92°07'	1970-1983
27054 Villahermosa	Lat. 17°59' Long. 92°57'	1961-1994
Estación Hidrométrica	Localización	Período de datos analizados
30005 Samaria	Lat. 17°58' Long. 93°17'	1961-1985
30083 Gaviotas II	Lat. 17°58' Long. 92°55'	1962-1994

Tabla 2.2. Estaciones climatológicas e hidrométricas localizadas en las orillas del Río Grijalva.

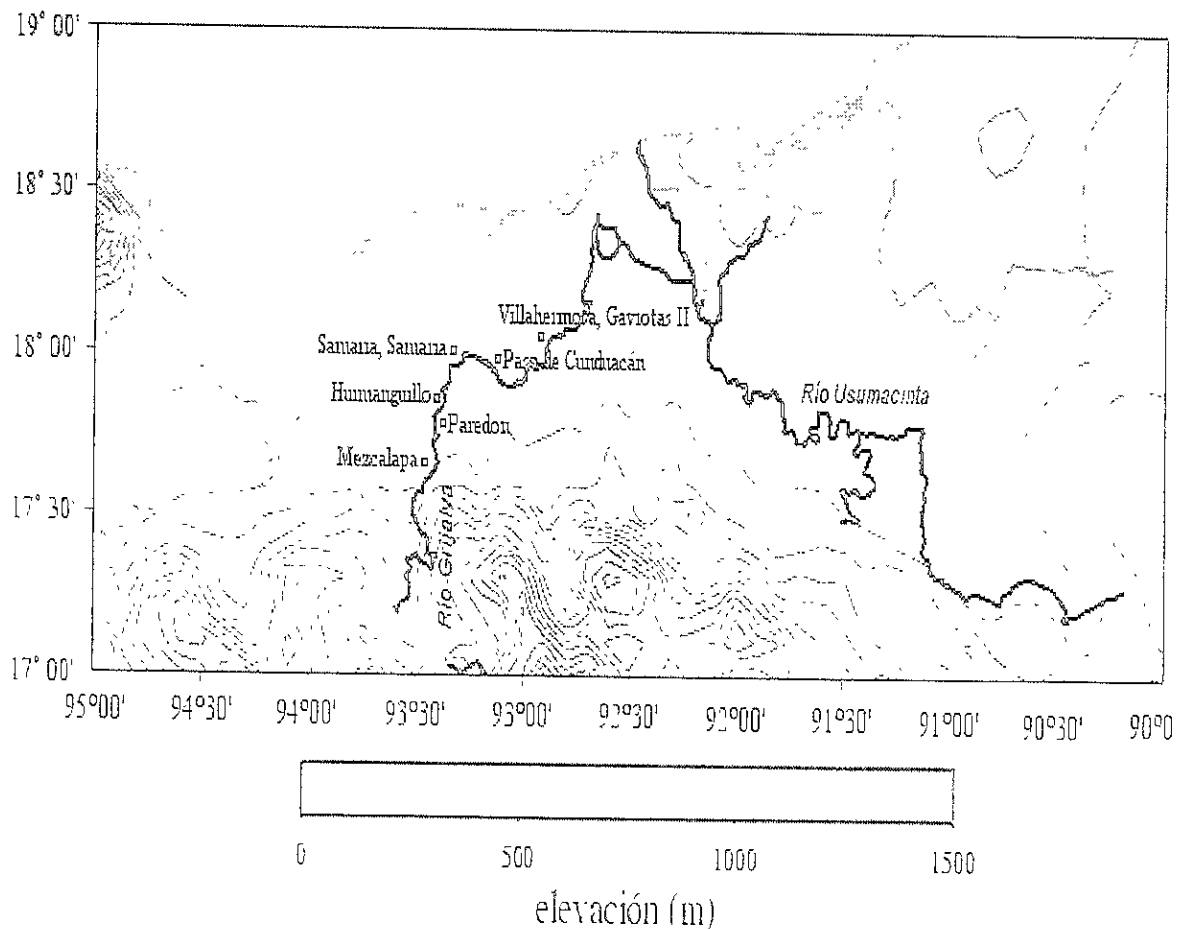


Fig. 2.10. Localización de las estaciones climatológicas e hidrométricas situadas en las orillas del Río Grijalva.

En el ejemplo mostrado en la Fig. 2.11 se observa que las variaciones en los valores de precipitación de las estaciones seleccionadas son coherentes, es decir, cuando existe un aumento en la precipitación en una de las estaciones, el resto de ellas también presentan un aumento en el valor de precipitación. La precipitación presenta un comportamiento regular o uniforme en la región que comprende dichas estaciones, aunque los valores de precipitación no son de la misma magnitud para todas las estaciones, esto último debido a variaciones locales de la actividad convectiva.

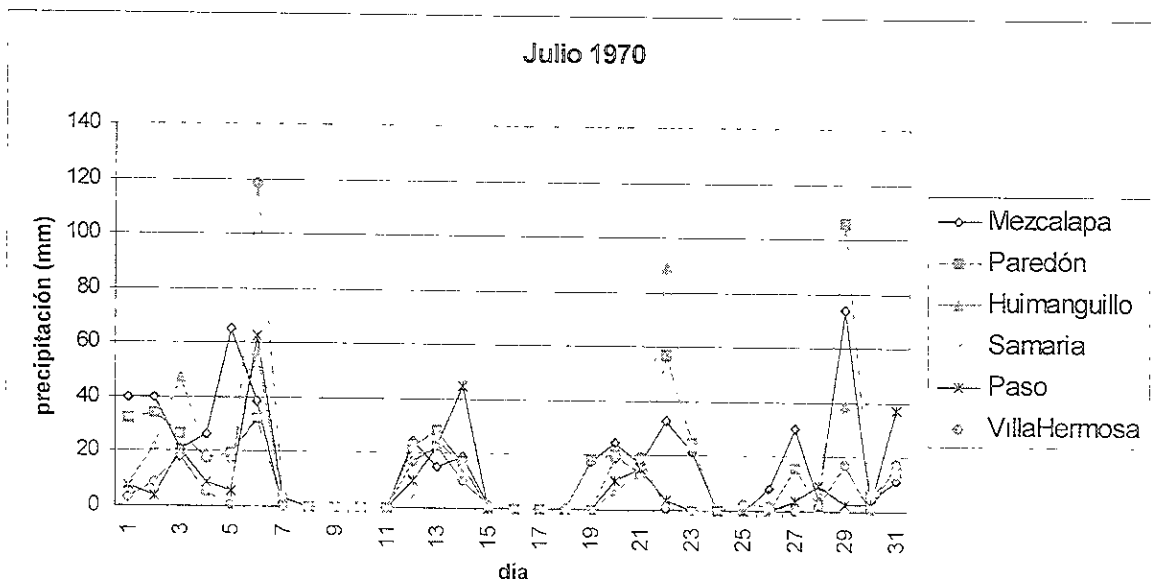


Figura 2.11. Precipitación de seis estaciones climatológicas localizadas en las orillas Río Grijalva para el mes de julio de 1970.

Al realizar las correlaciones de los datos de precipitación diaria entre las seis estaciones climatológicas anteriores se demuestra la coherencia de éstos, ya que los valores de las correlaciones presentan una alta significancia. Las correlaciones se calcularon mes por mes utilizando los datos de precipitación de cada estación de todos los años disponibles para cada uno de los meses comprendidos en el período de junio a octubre. Los valores resultantes de dicha operación se presentan en las Tablas 2.3-2.7.

Junio	Mezcalapa	Paredón	Huimanguillo	Samaria	Paso de Cunduacán	Villahermosa
Mezcalapa	1	.73	.63	.37	.56	.38
Paredón	.73	1	.62	.40	.47	.40
Huimanguillo	.63	.62	1	.59	.50	.40
Samaria	.37	.40	.59	1	.54	.41
Paso de Cunduacán	.56	.47	.50	.54	1	.63
Villahermosa	.38	.40	.40	.41	.63	1

Tabla 2.3. Resultados de las correlaciones de las precipitaciones de las estaciones climatológicas localizadas en el Río Grijalva para el mes de junio.

Julio	Mezcalapa	Paredón	Huimanguillo	Samaria	Paso de Cunduacán	Villahermosa
Mezcalapa	1	.65	.63	.45	.44	.33
Paredón	.65	1	.65	.34	.32	.23
Huimanguillo	.63	.65	1	.49	.40	.34
Samaria	.45	.34	.49	1	.68	.47
Paso de Cunduacán	.44	.32	.40	.68	1	.56
Villahermosa	.33	.23	.34	.47	.56	1

Tabla 2.4. Como en la tabla 2.3, pero para el mes de julio.

Agosto	Mezcalapa	Paredón	Huimanguillo	Samaria	Paso de Cunduacán	Villahermosa
Mezcalapa	1	.69	.67	.46	.54	.38
Paredón	.69	1	.73	.47	.41	.35
Huimanguillo	.67	.73	1	.57	.62	.45
Samaria	.46	.47	.57	1	.60	.46
Paso de Cunduacán	.54	.41	.62	.60	1	.35
Villahermosa	.38	.35	.45	.46	.35	1

Tabla 2.5. Como en la tabla 2.3 pero para el mes de agosto

Septiembre	Mezcalapa	Paredón	Huimanguillo	Samaria	Paso de Cunduacán	Villahermosa
Mezcalapa	1	.76	.75	.64	.63	.57
Paredón	.76	1	.81	.60	.53	.55
Huimanguillo	.75	.81	1	.72	.59	.59
Samaria	.64	.60	.72	1	.65	.61
Paso de Cunduacán	.63	.53	.59	.65	1	.53
Villahermosa	.57	.55	.59	.61	.53	1

Tabla 2.6. Como en la tabla 2.3, pero para el mes de septiembre

Octubre	Mezcalapa	Paredón	Huimanguillo	Samaria	Paso de Cunduacán	Villahermosa
Mezcalapa	1	.78	.76	.66	.70	.58
Paredón	.78	1	.88	.75	.60	.68
Huimanguillo	.76	.88	1	.76	.69	.68
Samaria	.66	.75	.76	1	.63	.75
Paso de Cunduacán	.70	.60	.69	.63	1	.67
Villahermosa	.58	.68	.68	.75	.67	1

Tabla 2.7 Como en la tabla 2.3, pero para el mes de octubre

Cabe resaltar que de los valores presentados en las Tablas 2.3-2.7, los valores de mayor significancia corresponden a los meses de septiembre y octubre.

En la Fig. 2.12 se puede observar que los valores de gasto medio diario para las dos estaciones hidrométricas analizadas también presentan coherencia, sin embargo, las magnitudes de los valores de gasto medio diario de la estación Samaria siempre son mayores que los valores de la estación Gaviotas II, ubicada cerca de Villahermosa.

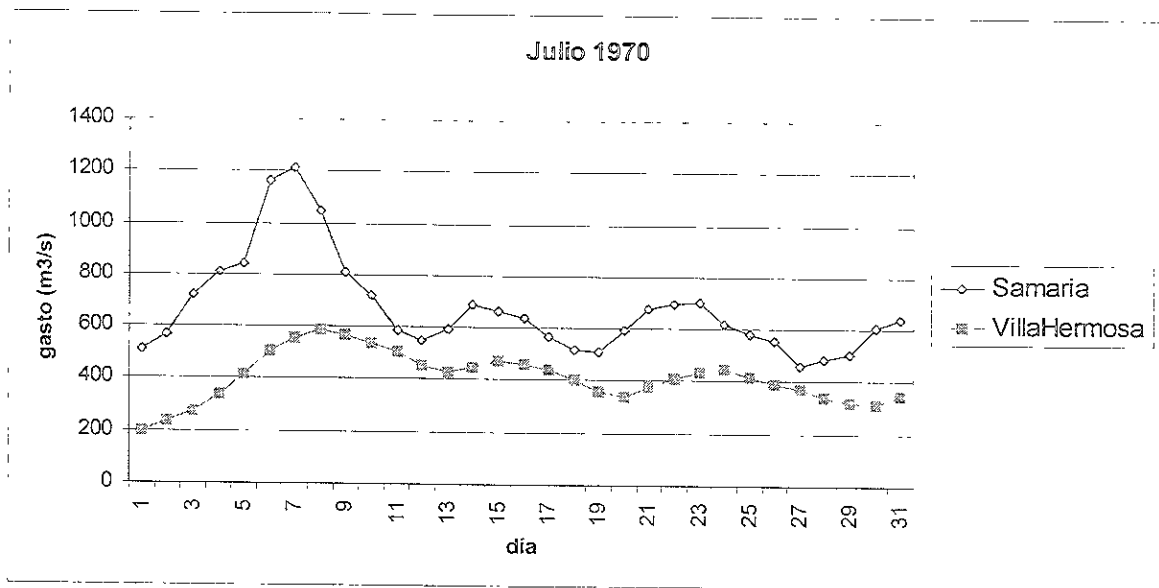


Fig. 2.12. Gasto medio diario de dos estaciones hidrométricas localizadas en el Río Grijalva para el mes de julio de 1970.

Los análisis posteriores se realizaron con los datos de precipitación de las estaciones climatológicas Samaria, Macuspana, Dos Patrias y Villahermosa, localizados en la cuenca del Río Grijalva (Fig. 2.13), por ser éstas las que cuentan con el período más grande de datos disponibles, de 1961 a 1994; y con los datos de gasto de la estación hidrométrica Gaviotas II, localizada cerca de Villahermosa (Tabla 2.8).

Estación Climatológica	Localización	Período de datos analizados
27039 Samaria	Lat 18°01' Long 93°16'	1961-1994
27011 Dos Patrias	Lat. 17°36' Long 92°50'	1961-1994
27030 Macuspana	Lat. 17°46' Long. 92°35'	1961-1994
27054 Villahermosa	Lat 17°59' Long. 92°57'	1961-1994
Estación hidrométrica	Localización	Período de datos analizados
30083 Gaviotas II	Lat 17°58' Long. 92°55'	1962-1994

Tabla 2.8. Estaciones seleccionadas para los análisis posteriores

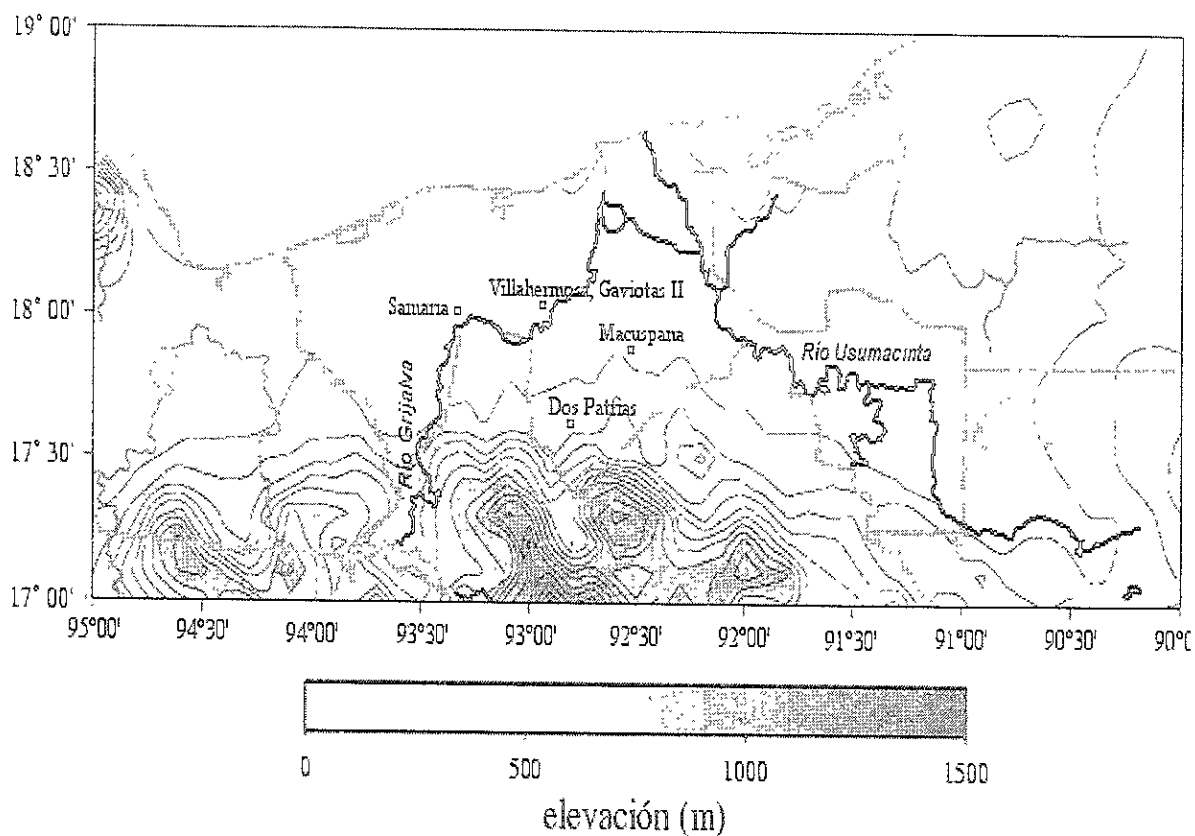
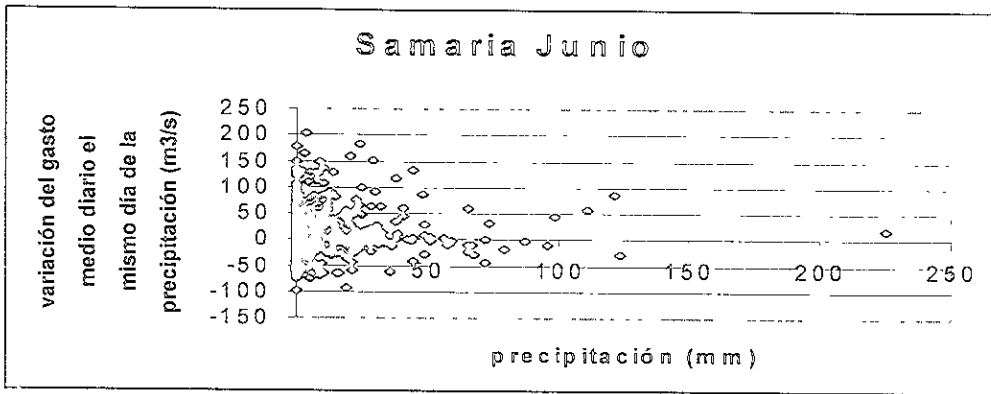


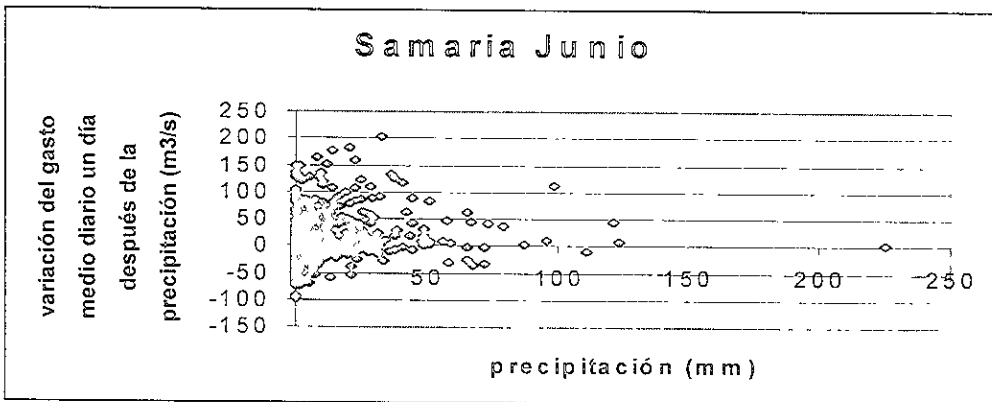
Fig. 2.13. Localización de las estaciones seleccionadas para los análisis posteriores.

Tomando en consideración el retraso en el tiempo de 1 a 2 días de la respuesta en el caudal al presentarse un evento de precipitación, se realizaron gráficas de dispersión de los datos de precipitación diaria contra las diferencias o variaciones en los valores de gasto medio diario para el mismo día que se presenta la precipitación, para un día después y para dos días después. El análisis se realizó mes a mes, graficando todos los datos del período de años disponible, para cada una de las cuatro estaciones climatológicas seleccionadas (Fig. 2.14).

a)



b)



c)

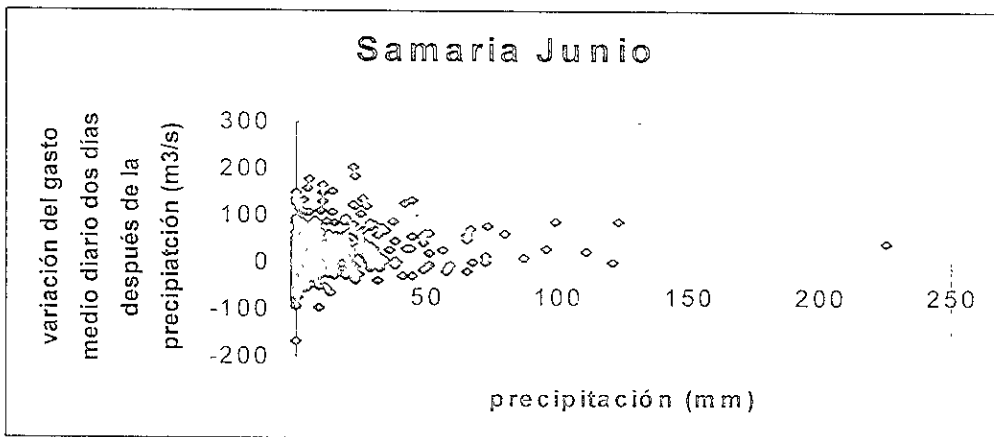


Fig. 2.14 Gráficas de dispersión de los datos de precipitación contra las variaciones en los datos de gasto medio diario para a) el mismo día que se presenta la precipitación, b) un día después y c) dos días después, para el mes de junio de la estación Samaria

En el ejemplo mostrado en la Fig. 2.14 se observa que aunque el gasto depende de la precipitación, éste no presenta un comportamiento lineal ya que no sólo depende de ella sino también de otros factores como la infiltración, velocidad de escurrimiento y la evaporación que no son considerados en este estudio. En la figura se muestran casos en que se presentan valores de precipitación elevados que no repercuten en una elevación del caudal y casos en que se presentan elevaciones en el caudal sin que exista un valor de precipitación que las originen. Sin embargo, cuando los valores de precipitación son extremos, la gráfica tiende a presentar un comportamiento lineal. Entonces lo siguiente es el cálculo del valor umbral extremo de precipitación mes a mes para cada una de las estaciones.

El cálculo del valor umbral extremo se realizó calculando el valor del percentil 90, así todos los valores mayores a éste son considerados como eventos extremos de precipitación. Los resultados se muestran en las Tablas 2.9-2.12.

Mes	Valor umbral extremo de precipitación (mm)
junio	32.76
julio	26.3
agosto	31
septiembre	44.73
octubre	53.48

Tabla 2.9. Valores umbrales extremos mes a mes para la estación climatológica Samaria

Mes	Valor umbral extremo de precipitación (mm)
junio	50.04
julio	33.6
agosto	37.94
septiembre	49.78
octubre	48.51

Tabla 2.10. Como la Tabla 2.9, pero para la estación climatológica Macuspana

Mes	Valor umbral extremo de precipitación (mm)
junio	50.04
julio	43.12
agosto	48.8
septiembre	60.86
octubre	62.11

Tabla 2.11. Como la Tabla 2.9, pero para la estación climatológica Dos Patrias.

Mes	Valor umbral extremo de precipitación (mm)
junio	36.58
julio	27.81
agosto	33.79
septiembre	47.52
octubre	50.62

Tabla 2.12. Como la Tabla 2.9, pero para la estación climatológica Villahermosa.

Para el análisis de los casos de eventos extremos de precipitación, se graficaron estos valores contra las variaciones o diferencias en los valores de gasto para el mismo día de la precipitación, un día después y dos días después. Este análisis también se efectuó mes a mes para cada estación climatológica. Los resultados de este último análisis se presentan en el siguiente capítulo.

Capítulo 3. Resultados.

Se presentan las respuestas del caudal del Río Grijalva medido en Villahermosa cuando se producen lluvias extremas en estaciones climatológicas aledañas localizadas en la misma cuenca. Cuando se presentan eventos extremos de precipitación en la estación climatológica Dos Patrias (Figs. 3.1-3.5):

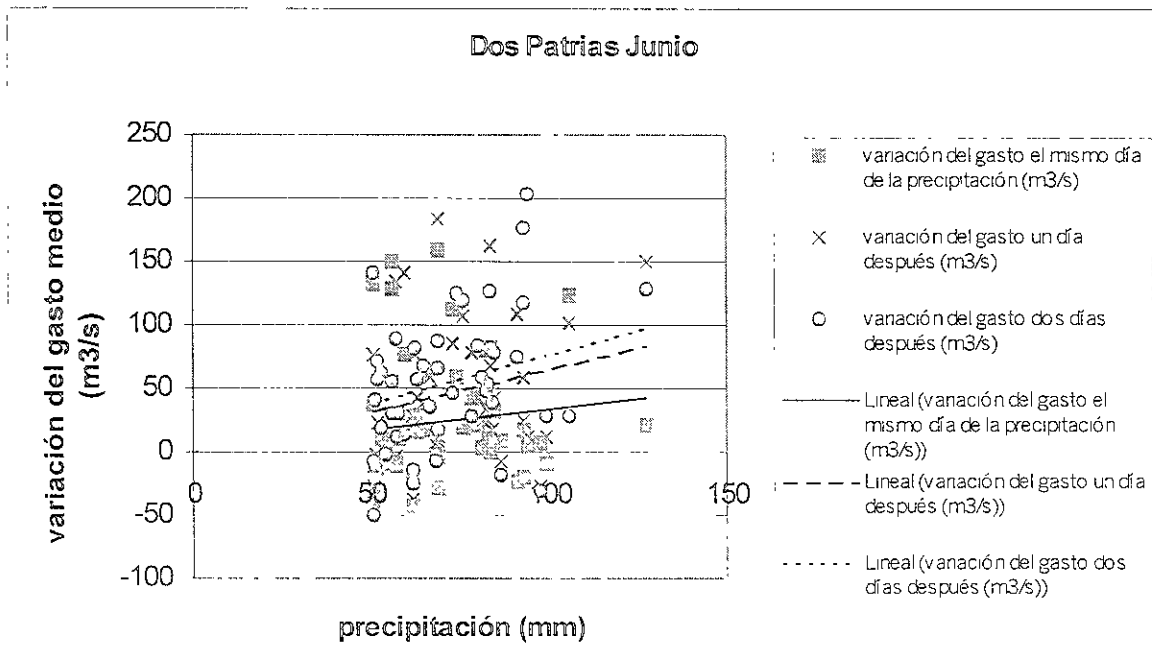


Fig. 3.1. Variaciones del gasto el mismo día que se presenta el evento extremo de precipitación, un día después y dos después en la estación Dos Patrias para el mes de junio.

Dos Patrias Julio

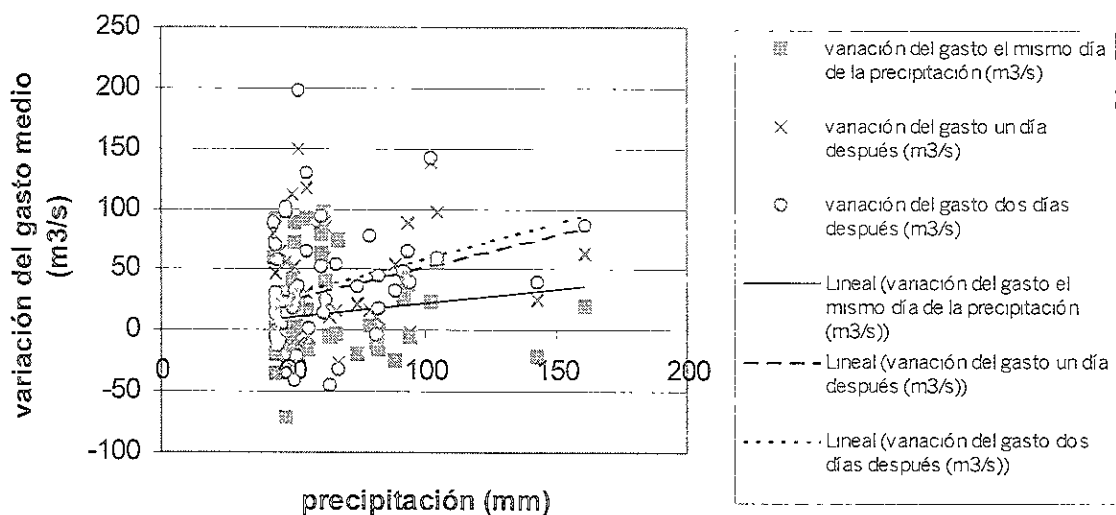


Fig. 3.2. Como en la Fig. 3.1, pero para el mes de julio.

Dos Patrias Agosto

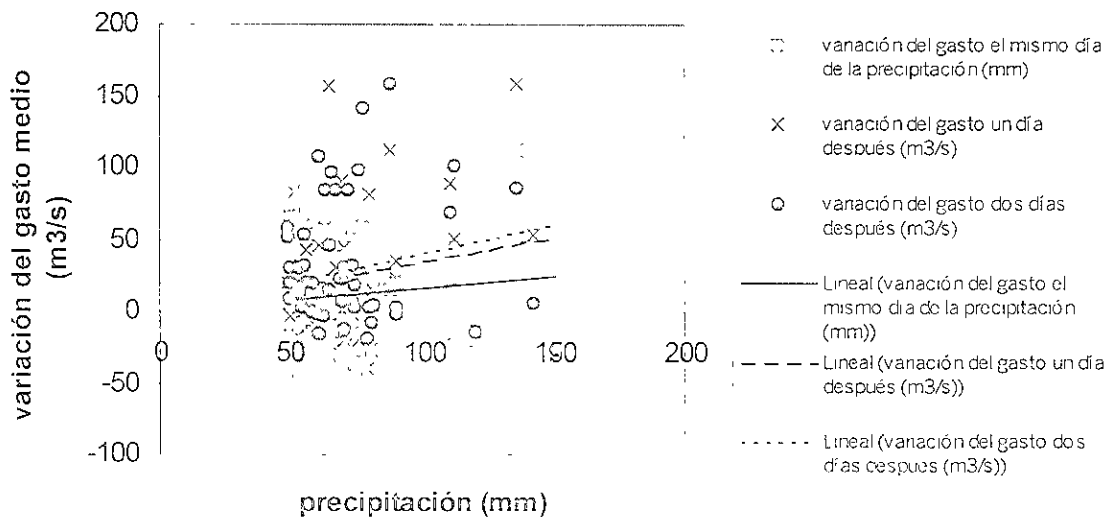


Fig. 3.3. Como en la Fig. 3.1, pero para el mes de agosto.

Dos Patrias Septiembre

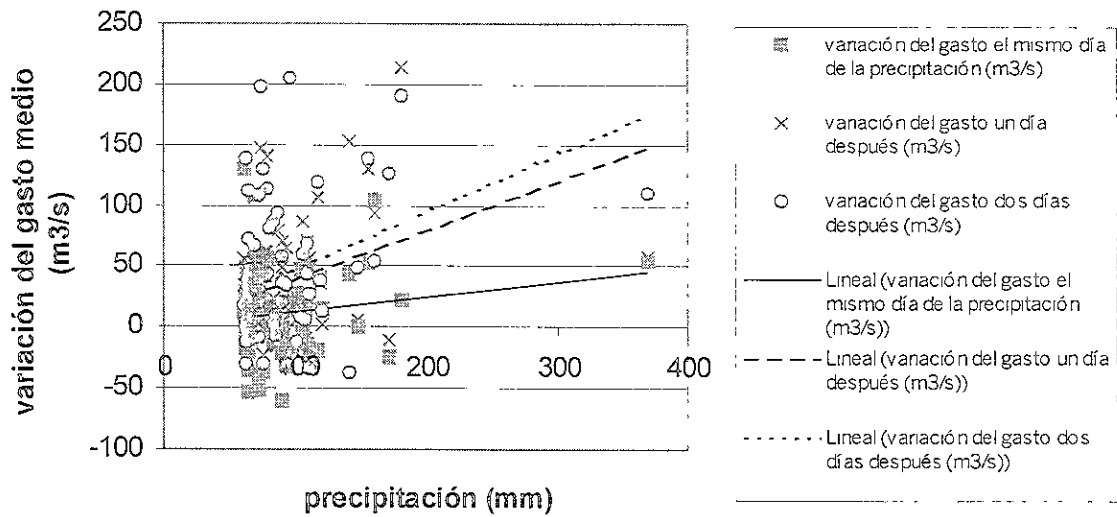


Fig 3.4. Como en la Fig. 3.1, pero para el mes de septiembre.

Dos Patrias Octubre

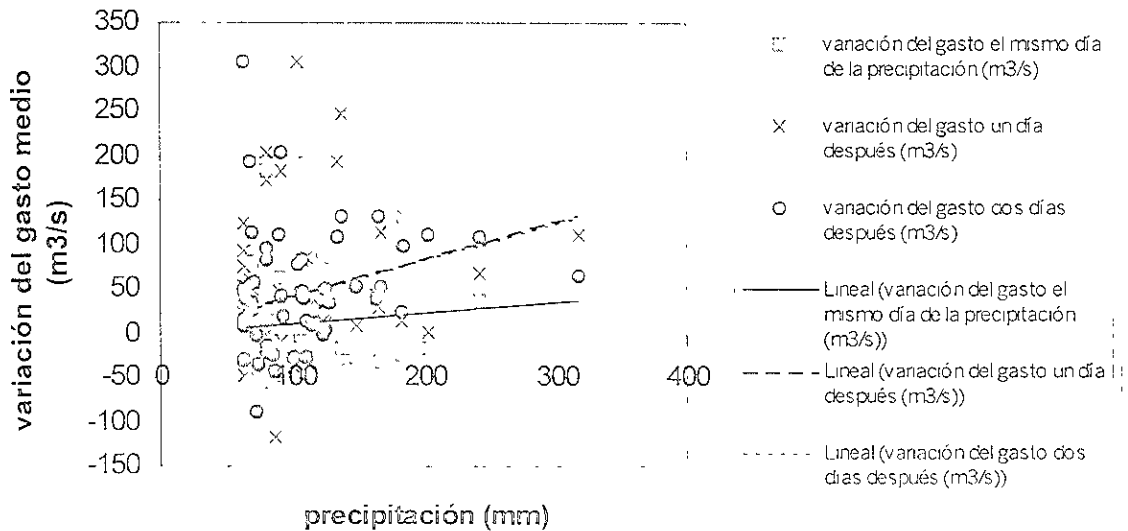


Fig 3.5 Como en la Fig. 3.1, pero para el mes de octubre

En las Figs. 3.1-3.4 podemos observar que cuando se presentan eventos extremos de precipitación en los meses de junio a septiembre en la estación Dos Patrias, los aumentos mayores de gasto en la estación hidrométrica Gaviotas II se presentan dos días después del evento de precipitación. Para el mes de octubre, Fig. 3.5, los aumentos mayores de gasto se presentan uno o dos días después del evento extremo de precipitación. Lo anterior se puede apreciar claramente con las líneas de tendencia lineal incluidas en las gráficas.

En las Figs. 3.1-3.4 podemos observar que en los meses de junio a septiembre los aumentos de gasto alcanzan valores hasta de 200 m³/s y en la Fig. 3.5 se observa que los aumentos de gasto en octubre son mayores que en los meses anteriores, alcanzando valores mayores a los 300 m³/s.

Cuando los eventos extremos de precipitación se presentan en la estación climatológica Macuspana (Figs. 3.6-3.10):

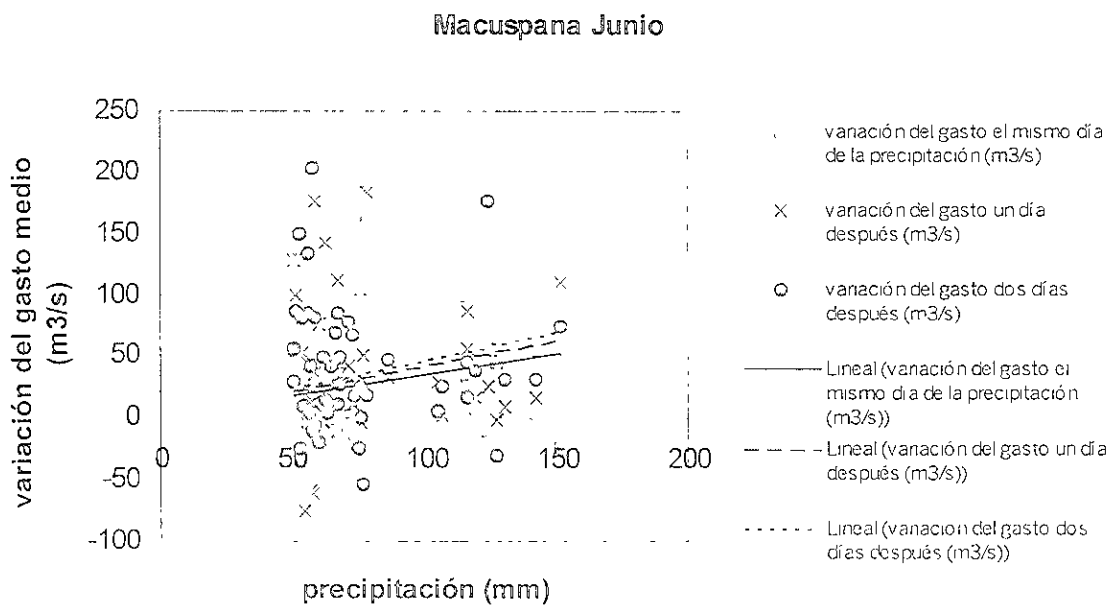


Fig. 3.6 Variaciones del gasto el mismo día que se presenta el evento extremo de precipitación, un día después y dos después en la estación Macuspana para el mes de junio

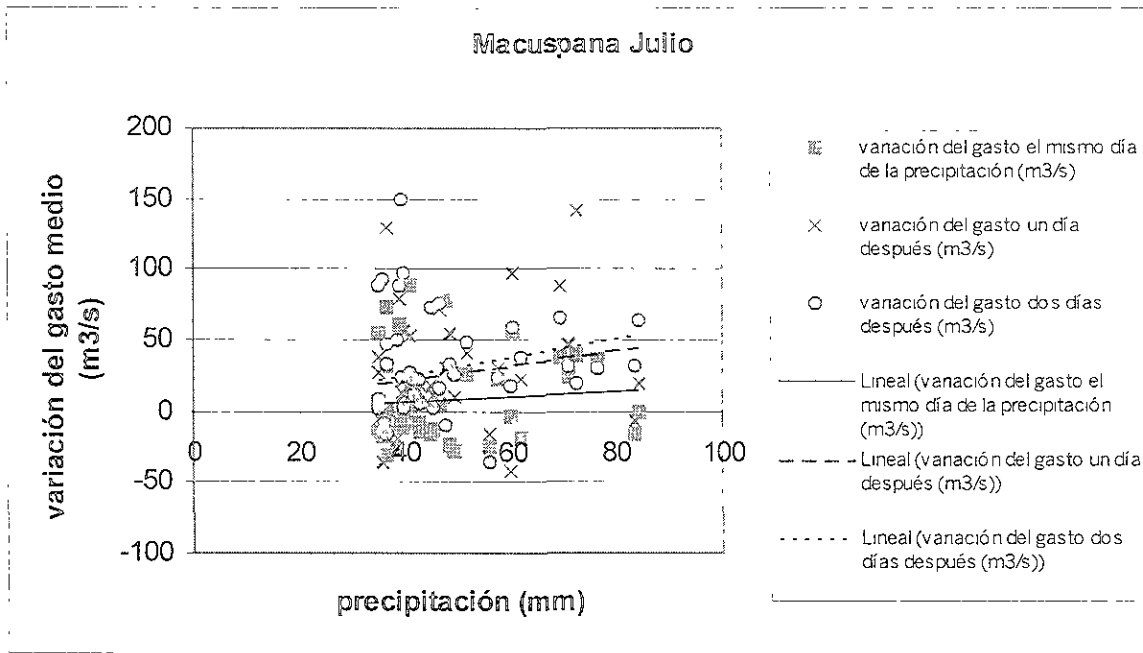


Fig. 3.7. Como en la Fig. 3.6, pero para el mes de julio.

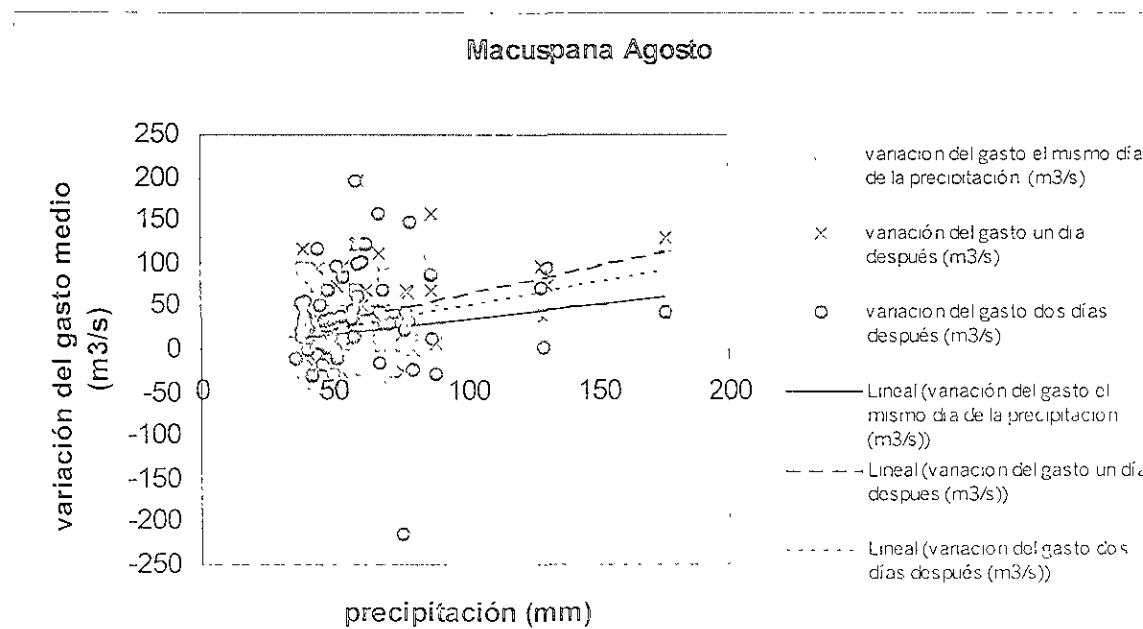


Fig. 3.8. Como en la Fig. 3.6, pero para el mes de agosto.

Macuspana Septiembre

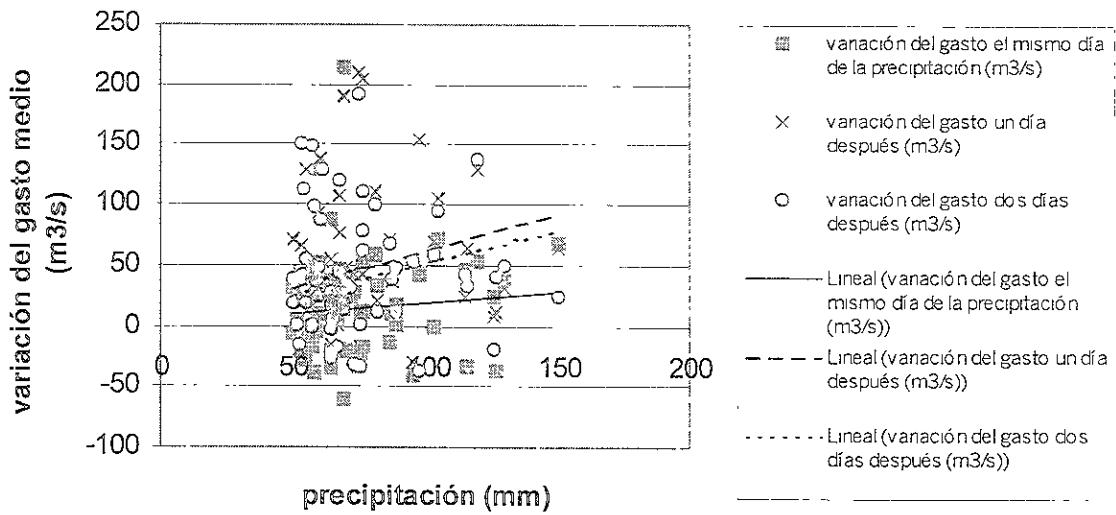


Fig. 3.9. Como en la Fig. 3.6, pero para el mes de septiembre.

Macuspana Octubre

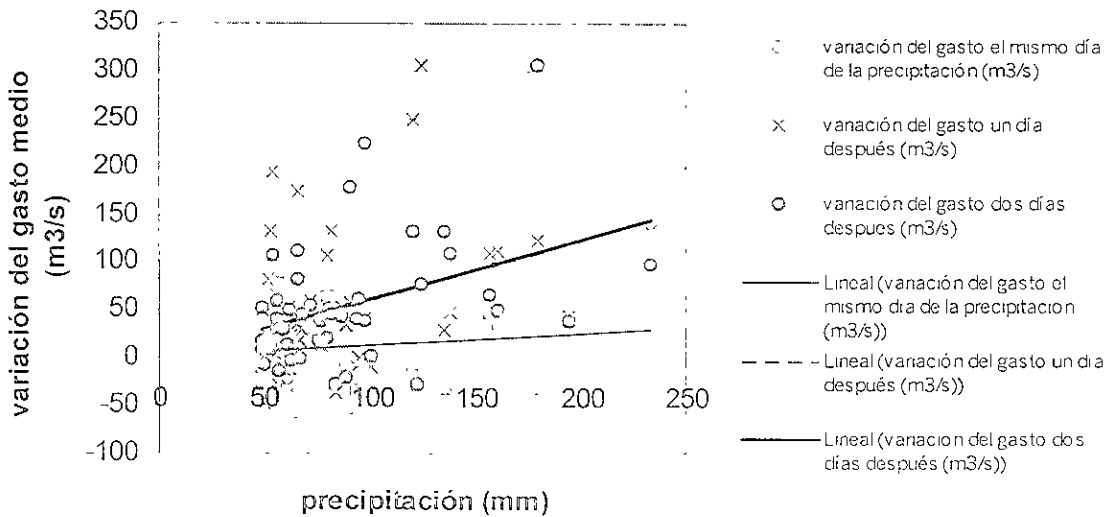


Fig. 3.10. Como en la Fig. 3.6, pero para el mes de octubre.

En la Figs. 3.6 y 3.7 se observa que los eventos de precipitación extrema en la estación Samaria que se presentan en los meses de junio y julio producen incrementos mayores en el gasto dos días después del evento extremo de precipitación; en los meses de agosto y septiembre, Figs. 3.8 y 3.9, los incrementos mayores se presentan un día después y en el mes de octubre, Fig. 3.10, los incrementos mayores se presentan uno o dos días después. Los incrementos del gasto en los meses de junio a septiembre alcanzan valores hasta de 200 m³/s y en el mes de octubre los incrementos son mayores, alcanzando valores hasta de 300 m³/s.

Cuando los eventos extremos de precipitación se presentan en la estación climatológica Samaria (Figs.3.11-3.15):

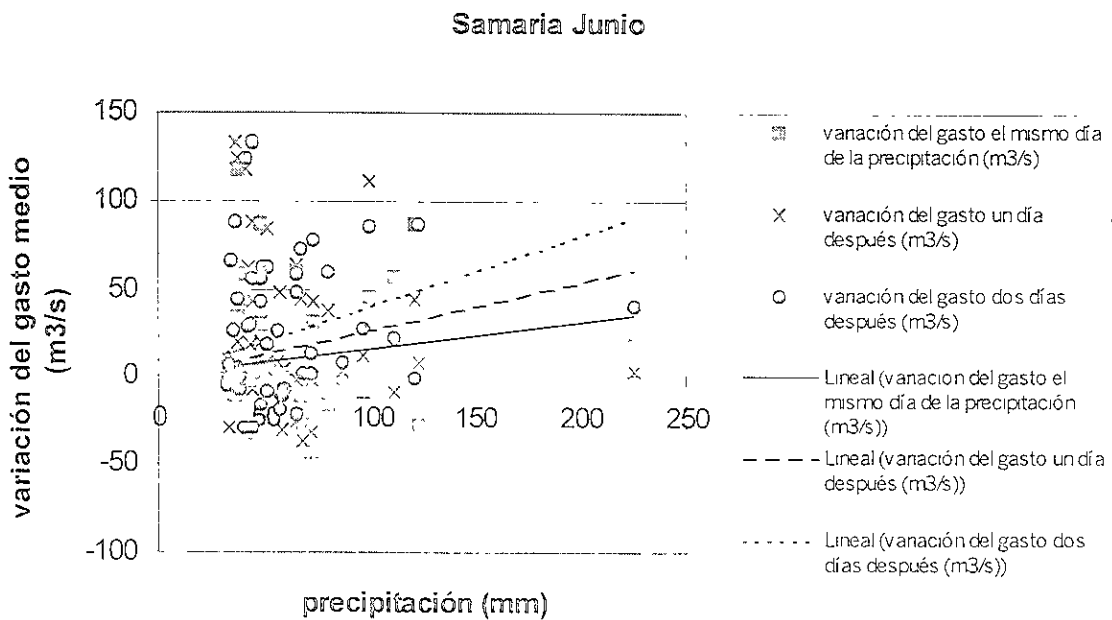


Fig. 3.11 Variaciones del gasto el mismo día que se presenta el evento extremo de precipitación, un día después y dos después en la estación Samaria para el mes de junio

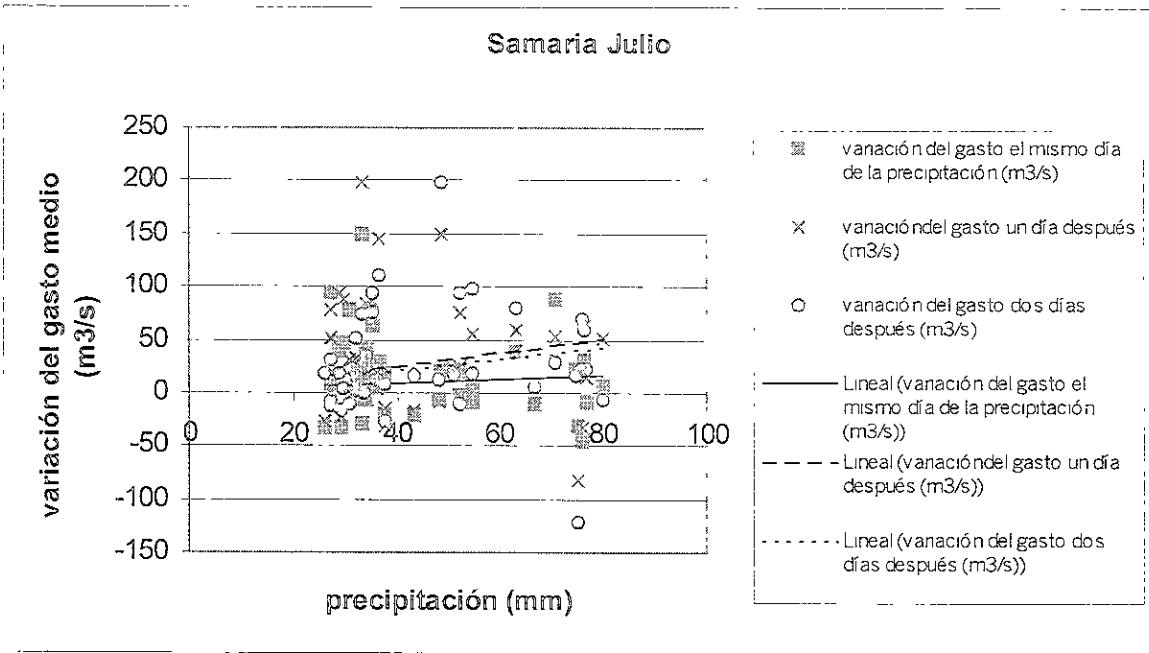


Fig. 3.12. Como en la Fig. 3.11, pero para el mes de julio

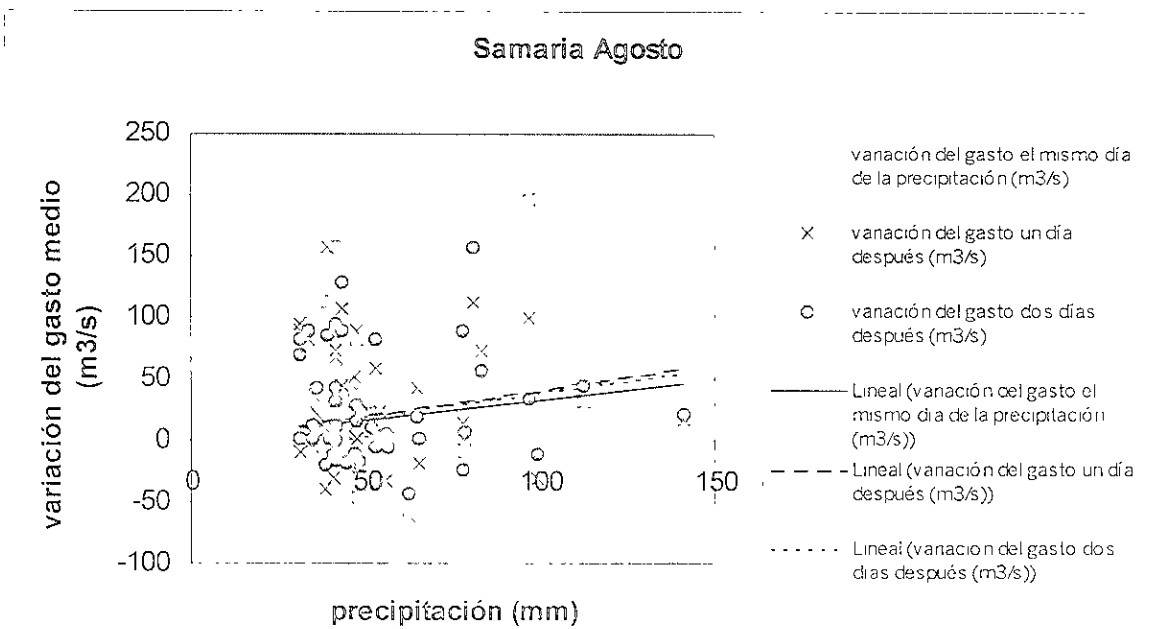


Fig. 3.13. Como en la Fig. 3.11, pero para el mes de agosto

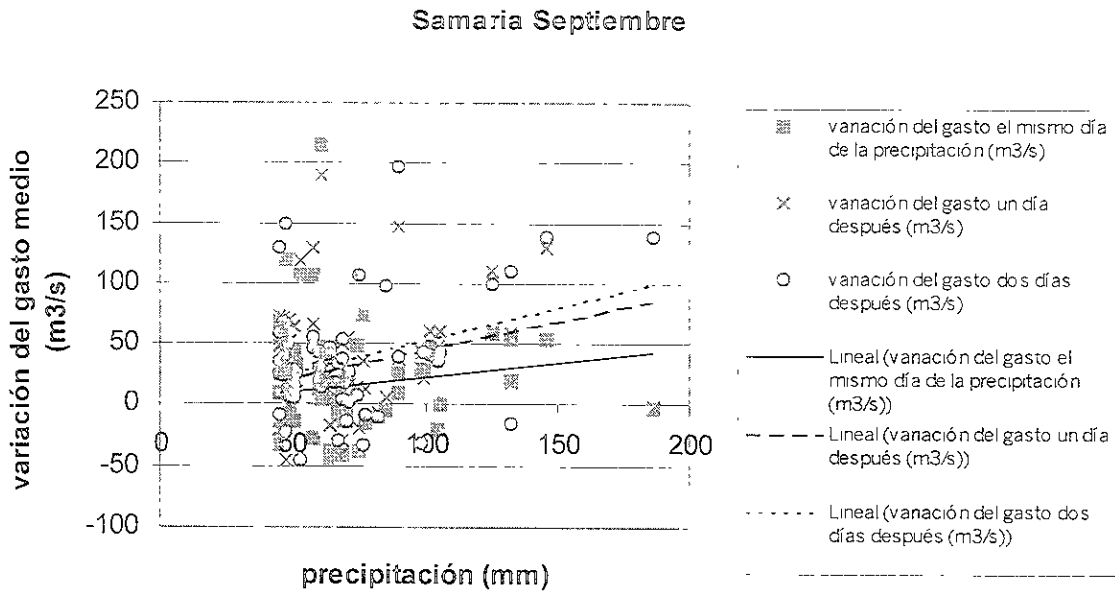


Fig. 3.14. Como en la Fig. 3.11, pero para el mes de septiembre.

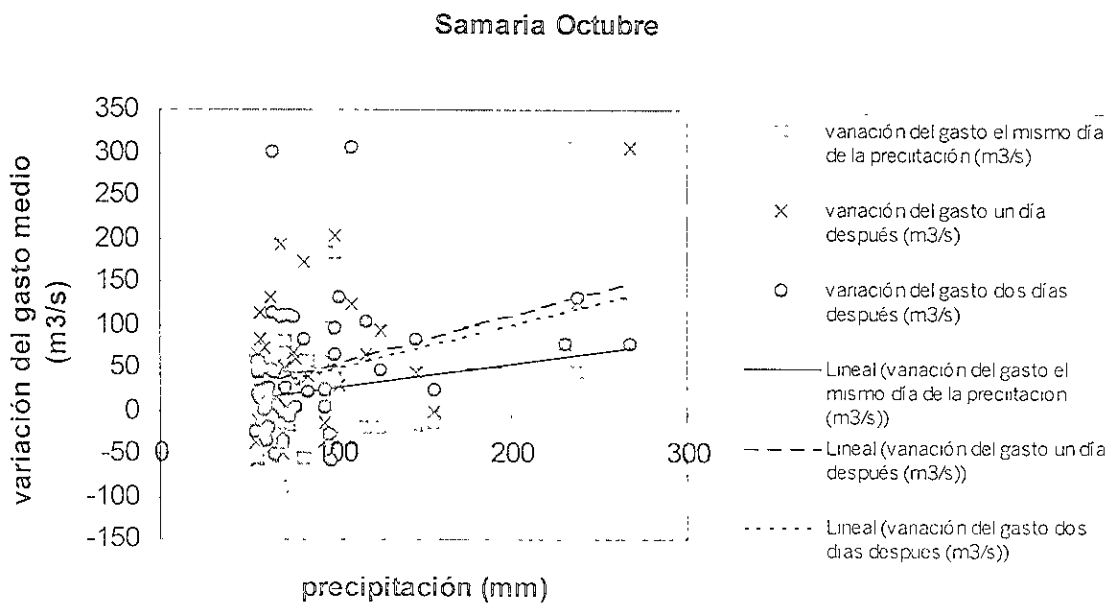


Fig. 3.15. Como en la Fig. 3.11, pero para el mes de octubre.

En las Figs. 3.11 y 3.14 se observa que los aumentos mayores en el gasto producidos por eventos extremos de precipitación en la estación Samaria en los meses de junio y septiembre se presentan dos días después del evento de precipitación; en los meses de julio y octubre, Figs. 3.12 y 3.15, los incrementos mayores se presentan un día después y en el mes de agosto, Fig. 3.13, los incrementos mayores se pueden presentar uno o dos días después.

El incremento del gasto para los meses de junio a septiembre alcanza valores hasta de 200 m³/s, Figs. 3.11-3.14; pero en el mes de octubre, Fig. 3.15, los aumentos son mayores, alcanzando valores de 300 m³/s.

Cuando los eventos extremos de precipitación se presentan en la estación climatológica Villahermosa (Figs. 3.16-3.20):

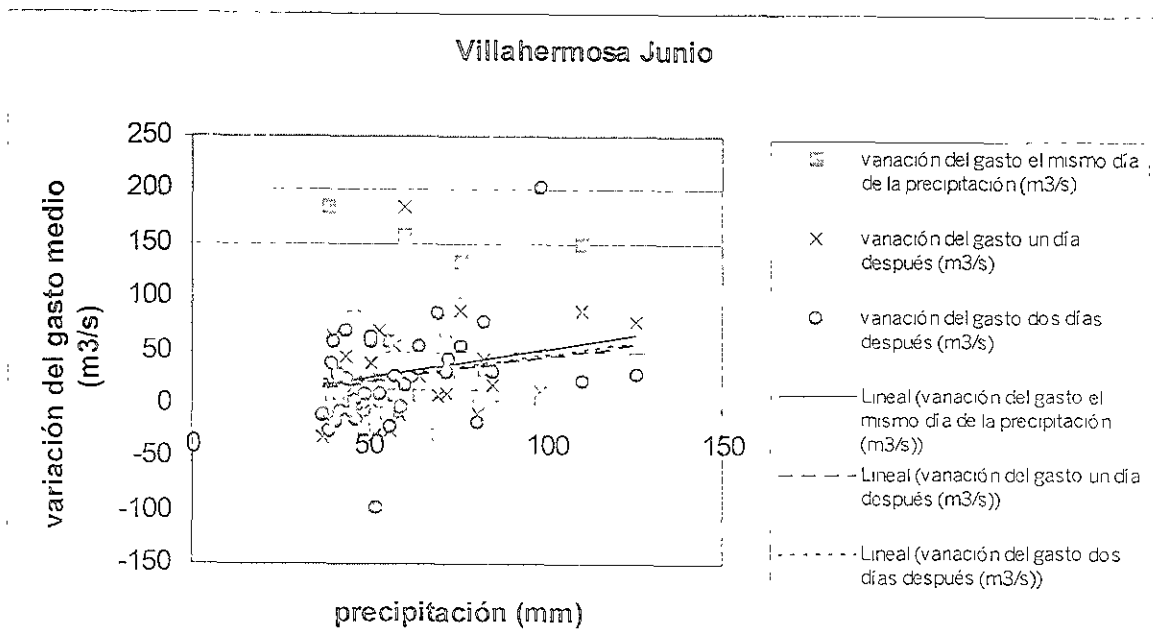


Fig. 3.16 Variaciones del gasto el mismo día que se presenta el evento extremo de precipitación, un día después y dos días después en la estación Villahermosa para el mes de junio.

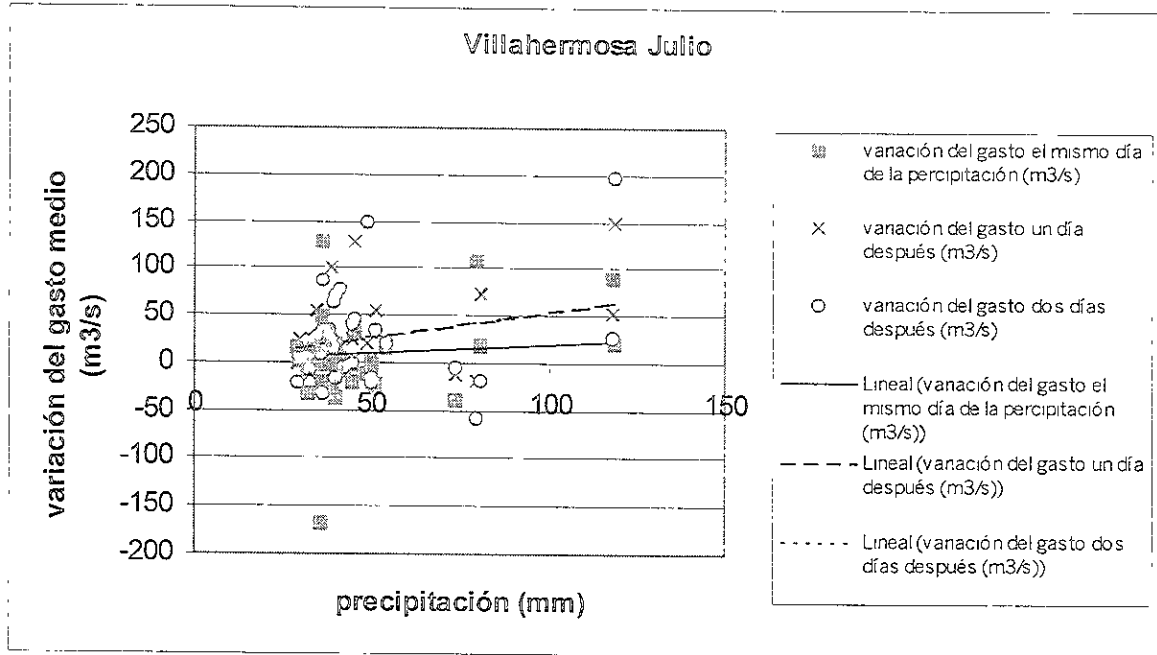


Fig. 3.17. Como en la Fig. 3.16, pero para el mes de julio.

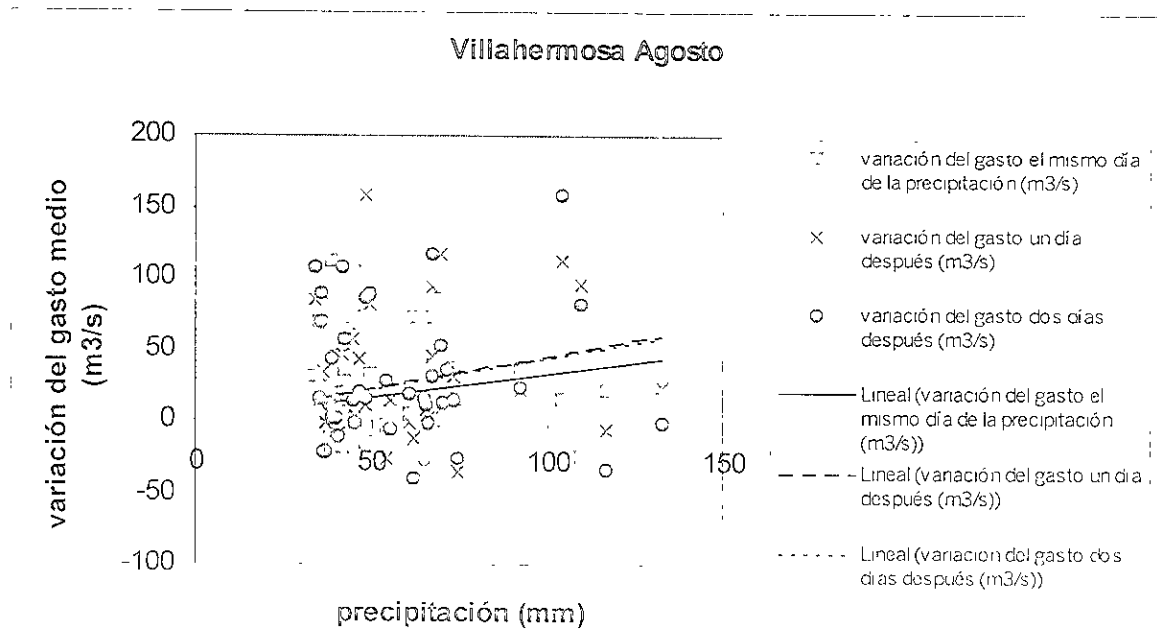


Fig. 3.18. Como en la Fig. 3.16, pero para el mes de agosto

Villahermosa Septiembre

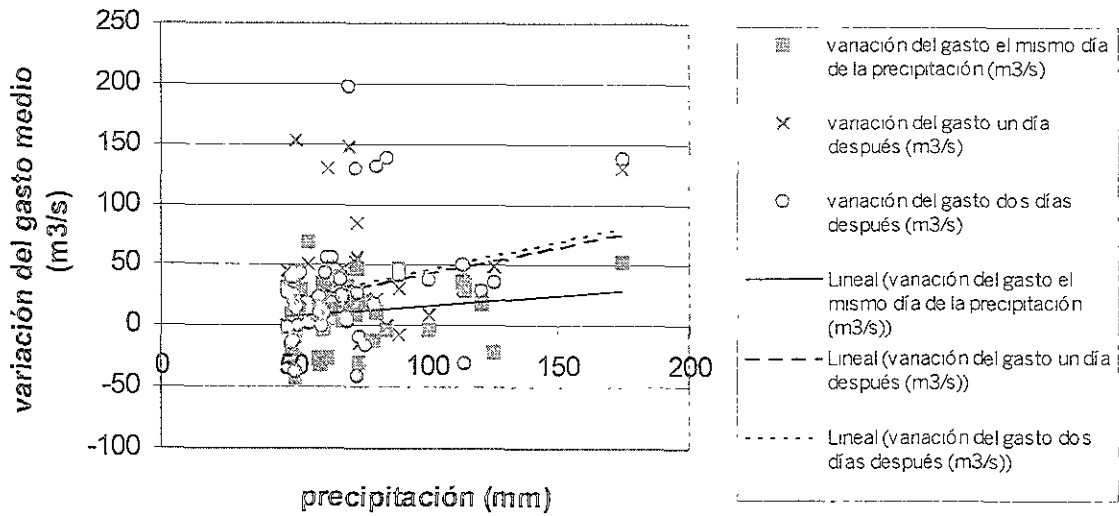


Fig. 3.19. Como en la Fig. 3.16, pero para el mes de septiembre.

Villahermosa Octubre

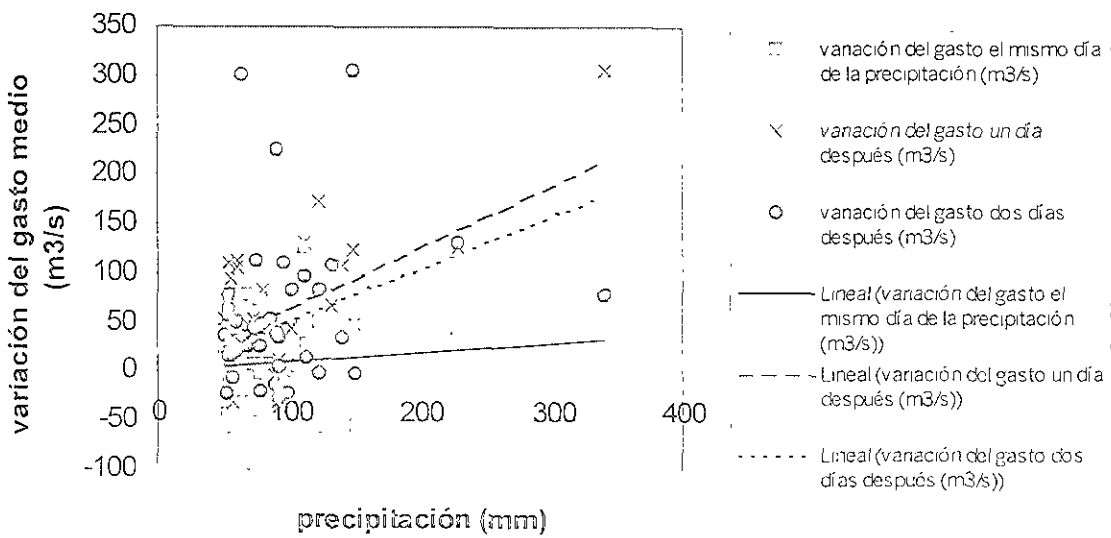


Fig. 3.20. Como en la Fig. 3.16, pero para el mes de octubre.

En la Fig. 3.19 se observa que los eventos de precipitación extrema en Villahermosa en los meses de junio y octubre, Figs. 3.16 y 3.20, provocan los mayores incrementos de gasto un día después del evento extremo de precipitación; en los meses de julio y agosto, Figs. 3.17 y 3.18, los mayores incrementos se presentan uno o dos días después y en el mes de septiembre, Figs. 3.19, se presentan dos días después.

Al igual que en las estaciones anteriores, los incrementos en el gasto provocados por las precipitaciones extremas en los meses de junio a septiembre alcanzan valores de hasta 200 m³/s y en el mes de octubre se presentan los incrementos mayores, alcanzando valores de hasta 300 m³/s.

En las cuatro estaciones climatológicas estudiadas se presentan algunos eventos extremos de precipitación que provocan incrementos del gasto el mismo día que se presenta la precipitación, esto depende de los valores de precipitación presentados en los días anteriores al evento extremo. Si la precipitación anterior al evento extremo es mínima o casi nula, al presentarse el evento extremo el gasto tarda más tiempo en responder con un aumento o incluso no aumenta; sin embargo cuando las precipitaciones anteriores al evento extremo son valores grandes o incluso valores extremos, el gasto responde casi inmediatamente. Lo anterior es consecuencia de la saturación de agua que tiene el terreno en el momento en que se presenta un evento extremo de precipitación.

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

De los resultados encontrados en el presente estudio se concluye que:

1.- Al presentarse eventos de precipitación en las estaciones climatológicas estudiadas, el caudal responde con aumentos en sus valores de gasto. El tiempo que tarda el gasto en responder a un evento de precipitación varía generalmente de uno a dos días. Los cambios en este resultado varían dependiendo del mes en el cual se presenta dicho evento de precipitación, siendo mayor el desfase de la respuesta al principio del verano, es decir, en los meses de junio, julio y agosto; y menor en los últimos meses del verano, septiembre y octubre. Lo anterior es una consecuencia de la saturación de agua que tiene el terreno en el momento que se presenta la precipitación. La variabilidad en el tiempo de respuesta no sólo depende de la cantidad de precipitación, sino también de otras variables que no fueron tomadas en cuenta para el presente estudio, como son la infiltración, la velocidad de escurrimiento y la evaporación. Por lo tanto no podemos considerar a la relación entre la precipitación diaria y el gasto medio diario como una relación lineal.

2 - En las estaciones climatológicas analizadas, Dos Patrias, Macuspana, Samaria y Villahermosa, las relaciones entre los valores de precipitación diaria y las variaciones del gasto medio diario tienden a presentar un comportamiento lineal sólo para los eventos extremos de precipitación, provocando incrementos del caudal medido en la estación hidrométrica Gaviotas II, situada en Villahermosa, uno o dos días después del evento extremo de precipitación, dependiendo del mes en el cual se presenta el evento extremo de precipitación.

Cuando se presenta un evento extremo de precipitación en el mes de junio, medido en cualquiera de las tres estaciones climatológicas aledañas a Villahermosa; Dos Patrias, Macuspana y Samaria, éste provoca los incrementos mayores de gasto dos días después del evento extremo de precipitación. Sin embargo, cuando se presenta un valor extremo de precipitación en el mes de junio en la estación Villahermosa, éste provoca los incrementos mayores de gasto un día después.

Cuando se presenta un evento extremo de precipitación en el mes de octubre en cualquiera de las dos estaciones climatológicas ubicadas sobre el Río Grijalva, Samaria y Villahermosa, éste provoca los incrementos mayores de gasto un día después del evento extremo de precipitación. Para las estaciones Dos patrias y Macuspana, un evento extremo de precipitación en el mes de octubre puede provocar los mayores incrementos uno o dos días después.

Cuando se presentan eventos extremos de precipitación en los meses intermedios del verano, las estaciones climatológicas Samaria y Villahermosa presentan el mismo comportamiento. En los meses de julio y agosto, los mayores incrementos de gasto se presentan uno o dos días después del evento extremo de precipitación que los ocasiona; y en el mes de septiembre se presentan los mayores incrementos de gasto dos días después.

Cuando se presentan eventos extremos de precipitación en la estación Dos Patrias en los meses de julio, agosto y septiembre, éstos provocan los mayores incrementos de gasto dos días después de dichos eventos extremos.

Y cuando se presentan eventos extremos de precipitación en la estación Macuspana en el mes de julio, éstos provocan los mayores incrementos de gasto dos días después de dichos eventos extremos. Pero si los eventos extremos de precipitación se presentan en los meses de agosto y septiembre, provocan los incrementos mayores de gasto un día después.

Dicha variabilidad del tiempo que tarda en responder el caudal, medido en la estación hidrométrica Gaviotas II, con un incremento ante un evento extremo de precipitación presentado en las estaciones climatológicas aledañas también depende de la distancia a la cual se encuentran éstas de la estación hidrométrica.

Los incrementos en el gasto provocados por las precipitaciones extremas, medidas en las cuatro estaciones climatológicas estudiadas, en los meses de junio a septiembre alcanzan valores de hasta $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y en el mes de octubre se presentan los mayores incrementos, alcanzando valores de hasta $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los incrementos del gasto en la estación hidrométrica Gaviotas II producidos por los eventos extremos de precipitación en las estaciones climatológicas aledañas pueden traducirse en situaciones de riesgo de inundación. La importancia de los resultados de este

estudio radica en el conocimiento del tiempo con el que se cuenta para tomar acciones preventivas, desde el momento en que se presenta un evento extremo de precipitación hasta el momento en que se incrementa el gasto del río.

Una medida del entendimiento de un fenómeno meteorológico se tiene en términos de la calidad del pronóstico del tiempo. El uso de modelos de predicción de tiempo permite planear actividades de prevención de impactos. Los métodos de predicción incluyen el uso de modelos numéricos que permiten pronosticar precipitaciones hasta con tres días de anticipación, lo cual es de gran utilidad en actividades de protección civil.

Una de las limitaciones en el desarrollo de este estudio fue la deficiencia de datos climatológicos e hidrométricos en la región de estudio, es decir que no existen estaciones suficientes en el área con datos actualizados. Por lo tanto se sugiere que se atienda este aspecto con mayor cuidado ya que de la disponibilidad de los datos depende en gran medida la posibilidad de realizar trabajos de investigación que resulten en un mejoramiento de la calidad de vida de las personas afectadas.

Se propone la implementación de una red compleja de estaciones climatológicas e hidrométricas que realicen un monitoreo continuo y que provean información precisa.

En general puede decirse que los objetivos de este trabajo se cumplieron satisfactoriamente, aunque es necesario realizar nuevas investigaciones en materia de riesgo de inundación no sólo en el Estado de Tabasco sino también en otras regiones vulnerables a este tipo de fenómenos. En este sentido, el esquema de pronóstico establecido en este trabajo pretende servir de base para investigaciones futuras.

Fechas de eventos extremos de precipitación de agosto (1961-1994).

<u>Dos Patrias</u>			<u>Macuspana</u>			<u>Samaria</u>			<u>Villahermosa</u>		
Día	Año	mm	Día	Año	mm	Día	Año	mm	Día	Año	mm
4	1963	79.6	17	1963	38	3	1963	52.7	6	1963	71.3
30	1963	75.5	18	1963	44.4	27	1963	62.2	8	1963	42.4
7	1964	49.8	22	1963	79.2	27	1965	33.5	17	1963	48.1
11	1966	69	31	1963	53.6	28	1965	47.1	12	1965	66
12	1969	56.2	27	1964	41.6	14	1966	56.4	27	1965	49.4
27	1969	70.3	30	1964	48.6	12	1967	35.7	18	1966	40.2
2	1970	73.9	18	1966	35.7	24	1967	37.7	12	1967	38.7
8	1970	53.3	22	1966	46.9	5	1969	48.5	4	1969	92
15	1970	74.7	12	1967	67.8	11	1969	41.1	7	1969	40
26	1970	60.8	7	1968	47.6	12	1969	64.5	12	1969	46.7
30	1970	49.8	13	1968	38.2	13	1969	53.5	18	1969	61
2	1971	51.5	4	1969	76.8	19	1969	51.5	27	1969	67.3
19	1971	65.3	11	1969	77.4	4	1970	46.5	26	1970	41.5
30	1971	74.4	27	1969	68.8	15	1970	65	18	1973	64.9
8	1973	72.2	29	1969	57.7	17	1972	41.2	20	1973	104.3
20	1973	88	3	1970	44.7	2	1973	31.3	21	1973	48.2
21	1973	136	19	1971	51.7	3	1973	78	3	1975	38
23	1973	54	20	1971	128.5	5	1973	55.5	15	1976	44.4
30	1973	79	5	1973	40.6	20	1973	80.5	21	1976	62.1
24	1975	64.8	20	1973	66.8	21	1973	39.1	11	1977	38.5
30	1976	64.6	21	1973	86.8	22	1973	41.2	26	1980	45.5
12	1977	69.5	23	1973	69.8	24	1973	112.2	18	1981	36
8	1978	49	24	1973	57.6	30	1973	38.4	19	1981	36
23	1978	77.5	24	1975	49.4	2	1975	48	21	1981	35
17	1979	69.5	28	1975	52.7	14	1976	83.2	24	1981	132.5
19	1979	55.5	5	1978	49.9	10	1978	44.5	25	1981	37
14	1981	73.8	7	1978	39.7	2	1979	48.1	10	1983	109.5
19	1981	111	10	1978	46.1	24	1979	42.9	5	1984	116.4
24	1981	90.5	20	1978	51.7	4	1980	55.5	20	1984	54.2
30	1982	49.5	15	1979	39.7	26	1980	47.2	31	1984	34
31	1982	48.8	22	1980	56.7	18	1981	77.7	4	1989	65.7
31	1983	63.5	27	1980	39.7	19	1981	31	9	1989	45.2
26	1984	53.5	8	1981	59.6	24	1981	54	23	1989	36.4
30	1984	67.5	12	1981	67	29	1981	40.5	6	1990	70.5
6	1987	112.2	19	1981	68.5	20	1982	34.4	28	1990	73
8	1987	142	20	1981	86.8	6	1983	41.1	27	1991	55.6
9	1987	60	24	1981	50.2	10	1983	31	13	1994	67.5
15	1987	150.8	25	1981	80.2	4	1984	52.5	14	1994	69.4
16	1987	80.5	20	1982	129.8	22	1984	77.8	29	1994	74.6
17	1987	58.3	3	1984	37.9	11	1988	96.7			
19	1987	90.3	6	1987	61	2	1989	99.2			
24	1987	70.2	18	1987	49.2	4	1990	41			
25	1987	120.4	8	1988	39.3	6	1990	34.5			
27	1987	58.2	11	1988	62.3	9	1992	141.3			
29	1987	81.2	12	1988	58.3	14	1992	42.8			
30	1987	60.7	13	1988	59.4	29	1992	40.8			
22	1988	55	16	1988	88.9	5	1993	39.2			
8	1989	54.8	22	1988	39	12	1994	41.4			
31	1993	62.8	29	1988	76						
			22	1989	78.1						
			27	1990	70.9						
			9	1992	40.6						
			15	1992	176.6						
			17	1991	131.2						
			13	1991	11.5						
			11	1991	38.6						

Bibliografía.

- CNA, (1990). Programa nacional para el control de avenidas y la prevención de daños por inundaciones. Subdirección General de Administración del Agua. Noviembre, 1990. México.
- Delgadillo, J., (1996). Desastres naturales: Aspectos sociales para su prevención y tratamiento en México, Inst. de Invest. Económicas, UNAM. 11-51.
- Domínguez, M. R., (1995). Inundaciones, CENAPRED, México, 24 p.
- INEGI, (1986). Síntesis geográfica, Nomenclátor y Anexo cartográfico del Estado de Tabasco. México. 80 p.
- Magaña, R. V. y M. Yanai, (1995). Mixed Rossby-gravity Waves Triggered by Lateral Forcing. *J. Atmos. Sci.*, 52: 1473-1486.
- Magaña, et al., (1999a). Los Impactos de El Niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Con apoyo de la Secretaría de Gobernación. México. 23-67.
- Magaña, et al. (1999b). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 12: 1577-1588.
- Quintas, I., (1996). Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC. Manual del usuario. Colección Proyectos IMTA. Serie Programas. Primera edición. Morelos, México.
- Schultz, D. M., et al., (1998). Planetary and Synoptic Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges. *Monthly Weather Review*. 126: 5-27.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1980). Evaluación de daños causados por inundación y perturbaciones atmosféricas en la República Mexicana en 1980. 216-220.
- Simpson, R. H., (1974). The Hurricane Disasters Potential Scale, *Weatherwise*, 27: 169-186.