



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO PAPALOAPAN  
E IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CON PELIGRO  
A INUNDACIÓN.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**  
P R E S E N T A :  
**ALBERTO LÓPEZ GONZÁLEZ**



DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

MÉXICO D. F.

2008.

*Dedico este trabajo:*

*Con cariño, respeto y admiración para mis padres:*

*Lorenza González Calderón y José Luis López Zavala,*

*por el apoyo recibido a lo largo de mi formación académica,  
gracias por haberme inculcado el valor de la responsabilidad.*

*A mis hermanos:*

*Enrique, Daniel y Carolina,*

*Gracias, por el apoyo que me han brindado y  
por todos los momentos que hemos pasado.*

## Agradecimientos:

Al Dr. Jorge López Blanco por la asesoría recibida para la realización de este trabajo y por sus comentarios para el enriquecimiento del mismo.

A los sinodales Mtra: Oralia Oropeza Orozco, Ing. Geol. Alberto Pérez Rojas, Mtro en C. Sergio Yussim Guarneros y el Dr. José Ramón Hernández Santana, por sus comentarios y sugerencias para el enriquecimiento de este trabajo.

Al Lic. Rafael Aragón González, gracias por tu ayuda en el manejo de los SIG y por los comentarios durante la elaboración de este trabajo. Quiero agradecer tu amistad y apoyo a lo largo de este tiempo.

Al Lic. Germán Gómez Rocha por haber compartido su tiempo y sus conocimientos durante nuestra estancia en el cubículo.

A la Lic. Liz Haide Huitzil Aviles por los momentos compartidos y por el apoyo brindado durante la Facultad. Gracias por la ayuda y los comentarios para el mejoramiento de este trabajo.

Al Lic. Alejandro Pérez García por tu amistad y compañerismo a lo largo de este tiempo.

A mis compañeros de generación Lic. Giovanni Vidal Ortega, Lic. Osvaldo Franco Ramos, Lic. Luis R. Chávez A., Ana Luisa Medrano y a Ricardo Olmos, por la convivencia, tanto en la Facultad como en las prácticas.

A mis compañeros del Instituto de Geografía, Mario Salazar, Miguel Santos y el Lic. Pedro Montes, les agradezco su compañía y comentarios durante la última etapa de este trabajo.

A la Psic. Beatriz González Calderón por todo el apoyo y el tiempo que me has brindado, tanto en los buenos momentos, así como en las circunstancias difíciles.

A la Lic. Beatriz Pichardo González, gracias por tu amistad y por ayudar a sobrellevar la carga de trabajo.

Para mis amigos del Chamizal, a Eduardo, Luis y Fabián Ríos López, a Enrique Valdez Osorio, a Omar Iván, Iván y Miguel Ángel Moreno, Rigoberto e Isauro López Pérez, Gerardo Rosas Moreno, Alberto Rodrigo Rosas Santana y a Adrián Morales López, por su amistad a lo largo de estos años y por siempre tener una razón por que celebrar, gracias.

A Judith Hernández Carmona, porque a pesar de la distancia hemos conservado esta amistad.

Gracias a todos ustedes y de antemano pido disculpas por los que me faltaron.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
HIPOTESIS Y OBJETIVOS	3
1. CAPÍTULO 1. MARCO GEOGRÁFICO	
1.1. Localización geográfica	4
1.2. Clima	5
1.3. Edafología	6
1.4. Hidrología	9
1.5. Geología	12
1.5.1. Paleoceno	13
1.5.2. Eoceno	14
1.5.3. Oligoceno	14
1.5.4. Mioceno	15
1.5.1.1. Geología Histórica	16
1.5.1.2. Geología Local	17
1.5.5. Tectónica	20
1.6. Vegetación y uso de suelo	22
1.7. Características socioeconómicas generales	24
2. CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	
2.1. Introducción	28
2.2. Recopilación bibliográfica y cartográfica	29
2.3. Delimitación del área de estudio	29
2.4. Procesamiento de la cartografía	31
2.5. Meteorología	35
2.6. Hidrología	35
2.7. Geomorfología	39
2.8. Identificación de áreas con peligro a inundación	45
3. CAPÍTULO 3. HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA	
3.1. Introducción	47

3.2. Hidrología	47
3.3. Meteorología	48
3.4. Registro histórico de las principales inundaciones	49
3.5. Distribución de la precipitación sobre el área de estudio cuando se han presentado inundaciones en los años 1955, 1969, 1975 y 1981	54
3.6. Análisis estadístico de las estaciones hidrométricas	60
4. CAPÍTULO 4. GEOMORFOLOGÍA	
4.1. Introducción	71
4.2. Descripción y localización de las llanuras fluviales	71
4.3. Unidades geomorfológicas	72
4.4. Índice de sinuosidad del río Papaloapan	92
4.5. Identificación de áreas con diferentes niveles de peligro a inundación	96
CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	101

## Índice de figuras, tablas y cuadros.

### Figuras

Fig. 1.1. Localización del área de estudio.	4
Fig. 1.2. Climas identificados en el área de estudio.	5
Fig. 1.3. Clases de suelo del área de estudio.	8
Fig. 1.4. Principales afluentes del río Papaloapan y las principales lagunas identificadas en el área de estudio.	11
Fig. 1.5. Geología del área de estudio.	19
Fig. 1.6. Uso de suelo y vegetación del área de estudio	23
Fig. 1.7. Área de estudio y municipios	25
Fig. 2.1. Diagrama metodológico para la delimitación e identificación de áreas con peligro a inundación.	30
Fig. 2.2. Componentes de un hietograma e hidrograma.	38
Fig. 2.3. Elementos morfológicos de un río meandriforme.	43
Fig. 2.4. Modelo de flujo helicoidal de meandros.	43
Fig. 2.5. Esquema de un canal subsidiario ó <i>chute</i> .	44
Fig. 2.6. Acortamiento y estrangulamiento de un meandro.	44
Fig. 3.1. Estaciones hidrométricas y meteorológicas del área de estudio.	50
Fig. 3.2. Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de septiembre de 1955.	56
Fig. 3.3. Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de septiembre de 1969.	58
Fig. 3.4. Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de septiembre de 1975.	59
Fig. 3.5. Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de agosto de 1981.	61
Fig. 3.6. Gastos máximos anuales de la estación Tuxtepec del río Papaloapan	62
Fig. 3.7. Gastos máximos anuales de la estación Papaloapan del río Papaloapan	63
Fig. 3.8. Gastos máximos anuales de la estación Chacaltianguis del río Papaloapan	63
Fig. 3.9. Gastos calculados en la estación Tuxtepec, para un período de retorno de veinte años.	66
Fig. 3.10. Gastos calculados en la estación Papaloapan, para un período de retorno de cincuenta años.	67
Fig. 3.11. Gastos calculados en la estación Chacaltianguis para un período	69

de retorno de cincuenta años.	
Fig. 4.1. Identificación de la llanura fluvial erosiva y la llanura fluvial acumulativa en el área de estudio.	72
Fig. 4.2. Mapa donde se indican las figuras consideradas en este capítulo	73
Fig. 4.3. Lomeríos bajos, medios y altos de conglomerados del Mioceno y las superficies cumbrales.	74
Fig. 4.4. Lomeríos eólicos acumulativos.	76
Fig. 4.5. Lecho menor de inundación y lecho mayor de inundación	77
Fig. 4.6. Depresión perenne e intrusión salina.	78
Fig. 4.7. Depresión intermitente	78
Fig. 4.8. <i>Leveé</i> principal y <i>leveé</i> abandonado.	79
Fig. 4.9. Terraza fluvial.	80
Fig. 4.10. Banco fluvial arenoso sin vegetación.	80
Fig. 4.11a. Banco fluvial arenoso con vegetación.	81
4.11b. Banco fluvial arenoso con vegetación de mayor extensión.	81
Fig. 4.12. Barras marginales.	82
Fig. 4.13a. Canal subsidiario ó <i>chute</i>	82
4. 13b. Chute localizado al noroeste de la localidad de Ambrosio Alcalde	83
Fig. 4.14a. Meandro abandonado activo en crecidas al sur de la localidad de Otatitlán.	84
4.14b. Meandro abandonado activo en crecidas.	84
4.14c. Meandros abandonados activos en crecidas al sureste de la localidad de Cosamaloapan.	85
Fig. 4.15a. Meandro abandonado por acortamiento.	86
4.15b. Meandro abandonado por acortamiento localizado al este de la localidad de Nuevo Calatepec.	86
4.15c. Meandros abandonados localizado al este de la localidad de Otatitlán	87
Fig. 4.16a. Se indican tres meandros en forma de lagos de herradura.	87
4. 16b. Meandro abandonado en forma de lago de herradura en la margen izquierda del río Pájaro.	88
Fig. 4.17a. Se identifican los ríos tributarios Santo Domingo y Valle Nacional.	88
4.17b. Identificación del río Tonto como río tributario.	89
4.17c. Ríos tributarios Tesechoacan y San Juan.	89
Fig. 4.18. Corriente tipo Yazoo.	90

Fig. 4.19. Brazo de crecida.	90
Fig. 4.20. Lomeríos eólicos acumulativos.	91
Fig. 4.21. Índice de sinuosidad del río Papaloapan	92
Fig. 4.22. Primera sección del río Papaloapan.	93
Fig. 4.23. Segunda sección del río Papaloapan.	93
Fig. 4.24. Tercera sección del río Papaloapan.	94
Fig. 4.25. Cuarta sección del río Papaloapan.	94
Fig. 4.26. Quinta sección del río Papaloapan.	95
Fig. 4.27. Áreas identificadas con peligro a inundación en el área de estudio.	97

## Tablas

1.1. Localidades con mayor concentración de población dentro del área de estudio.	26
1.2. Localidades con menor concentración de población dentro del área de estudio.	26
2.1. Cartas topográficas a escala 1:50, 000 utilizadas en este trabajo.	31
2.2. Cartas temáticas escala 1: 250, 000 utilizadas en este trabajo.	31
3.1. Estaciones hidrométricas del área de estudio.	48
3.2. Estaciones meteorológicas del área de estudio.	49
3.3. Gastos calculados en $m^3/s$ en la estación hidrométrica Tuxtepec.	64
3.4. Gastos calculados en $m^3/s$ en la estación hidrométrica Papaloapan.	66
3.5. Gastos calculados en $m^3/s$ en la estación hidrométrica Chacaltianguis.	68

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen, históricamente, una de las causas más importantes que ocasionan la pérdida de vidas humanas y de recursos materiales. Lejos de disminuir, las catástrofes asociadas con inundaciones aumentan cada día, al incrementarse la población y, consecuentemente, las presiones urbanas sobre los ríos, las planicies de inundación y otras áreas que actualmente son inundables y anteriormente no lo eran, como algunas zonas de ciudades donde los drenajes naturales han sido disminuidos o eliminados (Aparicio, 1988).

Las inundaciones siempre han existido en tanto los ríos se salen de su cauce formativo y derraman sobre las planicies; pero se convierten en catástrofes solamente cuando afectan algún aprovechamiento de las zonas inundables, ya sea por usos urbanos o rurales, en estos últimos los más afectados son los cultivos.

En México, el estado que registra la mayor frecuencia de inundaciones es el de Veracruz (Tejeda, 2005), cuyo promedio alcanza 3.5 inundaciones por año. También es el estado que concentra el mayor volumen de agua superficial, ya que sus ríos descargan al mar más del 30% del caudal de todos los ríos del país, destacando entre ellos el Río Papaloapan (CNA, 1993).

En la cuenca del Papaloapan se distinguen dos grandes regiones: el Alto Papaloapan y el Bajo Papaloapan, o Cuencas Alta y Baja, respectivamente. Este estudio está realizado en el Bajo Papaloapan, donde localidades como Tuxtepec, Cosamaloapan y Tlacotalpan, por citar las más importantes, se ven afectadas por inundaciones, como consecuencia de las intensas precipitaciones registradas en el área de estudio.

Como se ha mencionado, uno de los principales problemas que afectan a la llanura fluvial del Río Papaloapan, lo constituyen las inundaciones producidas por el desbordamiento del mismo; las altas precipitaciones son originadas por vientos ciclónicos o por grandes masas de aire húmedo procedentes del Golfo de México y del Mar Caribe. Las inundaciones son frecuentes y revisten características severas cuando el Río Papaloapan posee gastos superiores a los 6,000 m<sup>3</sup>/s.

El Río Papaloapan a lo largo de toda su historia ha presentado el problema de las inundaciones producidas por su desbordamiento. CENAPRED (2001) considera a los años 1944, 1950, 1952, 1954, 1955, 1958, 1969, 1973, 1974 y 1975 como en los que se han presentado inundaciones notables, además de los años 1978, 1981, 1991, 1992, 1993, 1994 y 2005.

Este trabajo tiene como perspectiva principal la geomorfología fluvial, que en sus enfoques primarios, analiza el impacto de las inundaciones sobre la morfología de los canales y

el transporte de sedimentos (Wohl, 2000), además de analizar la capacidad que presenta toda corriente fluvial para transformar el relieve (Pedraza, 1996).

Las inundaciones se han presentado sobre la llanura fluvial del Río Papaloapan, afectando a las principales localidades sobre ambos márgenes fluviales, modificando la morfología del río y de sus llanuras fluviales. Es importante indicar la presencia de rasgos fluviales identificados dentro del área de estudio, los cuales pueden clasificarse con base en su origen y forma.

Este trabajo está dividido en cuatro capítulos; en el primero se hace mención a las características biofísicas identificadas en el área de estudio, siendo elementos fundamentales que pueden relacionarse con la presencia de las inundaciones. De manera general, se indican las principales características socioeconómicas de las principales localidades identificadas.

En el capítulo dos se lleva a cabo una descripción con relación a la parte metodológica en que se basó este trabajo, además de describir las técnicas que se utilizaron. Se efectúa una interpretación del marco conceptual, cuya finalidad es explicar los procesos fluviales, geomorfológicos e hidrológicos analizados dentro del área de estudio.

En el capítulo tres se relatan las principales inundaciones que han afectado al área de estudio y se considera si éstas han sido influenciadas por ciclones. Se realiza un análisis del comportamiento de la precipitación que se registró en los años 1955, 1969, 1975 y 1981, en los cuales la precipitación mantuvo un comportamiento relacionado con los huracanes, presentes en el área.

Para el capítulo cuatro se realiza una descripción de las unidades geomorfológicas fluviales identificadas en el área de estudio del Río Papaloapan, representadas en el mapa geomorfológico fluvial, y se hace énfasis en algunos procesos fluviales activos dentro de las mismas. Por último, se lleva a cabo la delimitación de áreas con diferente peligro ante la presencia de inundaciones, elaborándose un mapa de las mismas.

## HIPÓTESIS

Las mayores áreas propensas a inundaciones se localizan en el área de la desembocadura del Río Papaloapan donde influyen las características físicas del terreno.

En el área de estudio la actividad ciclónica es la principal causa que origina las precipitaciones pluviales intensas que generan inundaciones en la planicie del Río Papaloapan.

La delimitación de unidades geomorfológicas fluviales permitirá definir áreas con diferente nivel de peligro de inundación en la planicie del Río Papaloapan.

## OBJETIVOS

Objetivo general:

Identificar las áreas con diferente peligro ante la presencia de inundaciones con base en la evaluación geomorfológica fluvial del área de estudio.

Objetivos específicos:

Elaborar un mapa de unidades geomorfológicas fluviales del Río Papaloapan con base en el levantamiento morfogenético.

Realizar un análisis hidrológico y climatológico, con base en los gastos obtenidos y así establecer los períodos de retorno de las estaciones hidrométricas y meteorológicas del área de estudio.

## CAPÍTULO 1. MARCO GEOGRÁFICO.

### 1.1 Localización Geográfica

El área de estudio se localiza dentro de la cuenca del Río Papaloapan, que pertenece a la región hidrológica número 28, la cual cuenta con un área de 46,517 km<sup>2</sup>, que equivale al 2.4% del territorio nacional. Ocupa porciones de los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz, correspondiéndoles 23,723 km<sup>2</sup> (51%), 17,211 km<sup>2</sup> (37%) y 5,583 km<sup>2</sup> (12%) respectivamente de la superficie de la cuenca, lo que la hace la segunda cuenca hidrográfica del país (CENAPRED, 1994). El área de estudio se localiza dentro de esta región, entre las coordenadas extremas 18°00'01"- 18°47'55" de Latitud Norte y 96°32'35"- 96°13'52" de Longitud Oeste (Fig. 1.1). Abarca la llanura fluvial del Río Papaloapan, desde la confluencia del Río Santo Domingo y el Río Valle Nacional, dando origen al Río Papaloapan, hasta su desembocadura en el Golfo de México.

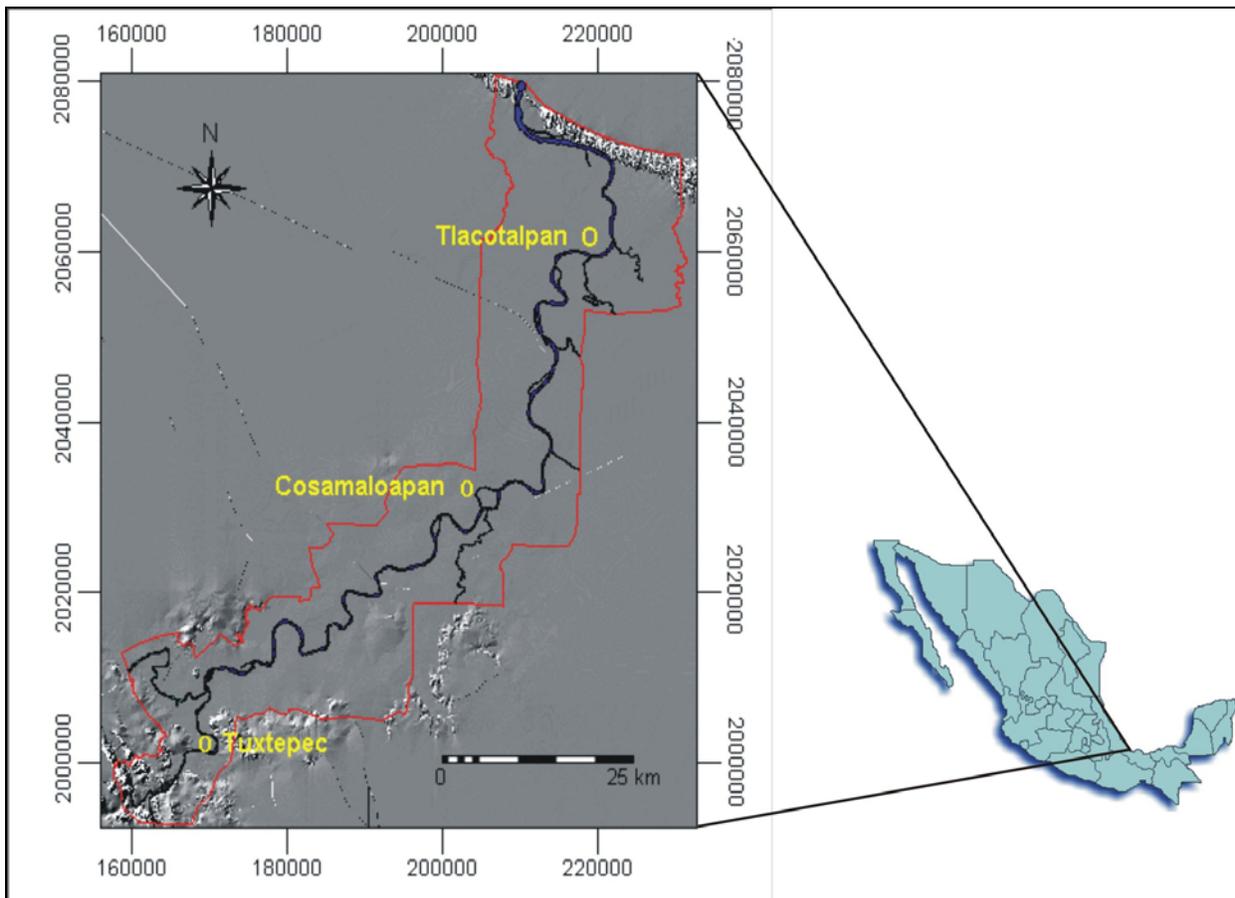


Fig. 1.1 Localización del área de estudio.

En esta cuenca se distinguen dos grandes regiones: el Alto Papaloapan y el Bajo Papaloapan, o Cuencas Alta y Baja, respectivamente. Se considera Bajo Papaloapan, o Cuenca Baja, a las tierras localizadas por debajo de los 100 msnm, conformando localmente lo que se conoce como región del sotavento. Esta es una zona predominantemente plana, con algunos terrenos ondulados y de pendiente suave (Vázquez, 1988).

## 1.2 Clima

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004) en el área de estudio se presentan los siguientes tipos de climas: Am y Aw<sub>2</sub> (Figura 1.2).

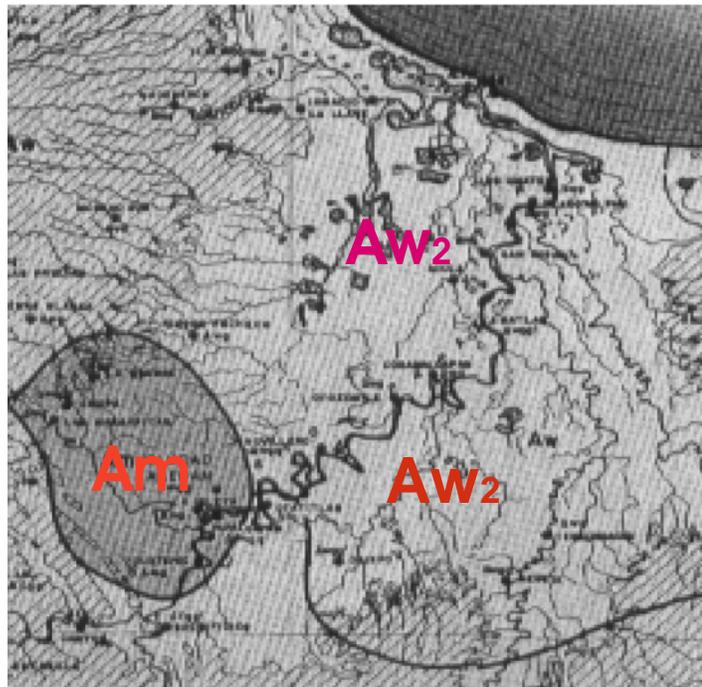


Fig. 1.2. Climas identificados en el área de estudio.

El tipo de clima Am presenta la categoría de clima cálido, es húmedo con lluvias en verano y la temporada de mayor precipitación se encuentra en el verano y parte del otoño, que son las épocas en que los ciclones tropicales que afectan a México son más frecuentes, y hacen aumentar considerablemente la lluvia en esta zona. La temperatura media anual es de 25°C con una precipitación media anual de 2,395 mm (García, 2004). En el área de estudio este tipo de clima se localiza desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional,

continuando hacia el norte, y abarca también la confluencia del Río Tonto con el Río Papaloapan.

La cuenca Baja del área de estudio presenta la categoría de clima cálido, el más húmedo de los que presentan lluvias en verano ( $Aw_2$ ) (García, 2004). La temperatura media anual mayor en la planicie costera es de 24°C, con temperaturas medias anuales de 18°C en los macizos montañosos de la Sierra Madre Oriental y de la Sierra de la Mixteca.

Debido a la cercanía del mar, el área está expuesta a diferentes meteoros, cuyas intensidades disminuyen a medida que penetran en el continente. Estos son vientos Alisios y tormentas estacionales (en verano – otoño o en otoño – invierno), características de las costas del Golfo de México, como inundaciones, mareas altas, ciclones, tormentas y los llamados “Nortes”. La cercanía del mar confiere otras características: aspersion salina provocada por la brisa marina e intensa radiación solar. La alta humedad ambiental propicia, además, poca variación térmica entre el día y la noche (Vázquez, 1998).

Las tormentas tropicales y los huracanes son causantes de las mayores precipitaciones en el año y definen la temporada lluviosa (en el verano y parte del otoño). Los “Nortes” son los causantes de una considerable precipitación y del descenso de la temperatura en la temporada invernal y parte de la primavera, de diciembre a marzo (op. cit).

### 1.3 Edafología

Dentro de la clasificación de la FAO/UNESCO, modificada por INEGI (1981), en el área de estudio se presentan las clases de suelo: Acrisol, Litosol, Gleysol, Regosol, Feozem, Vertisol, Luvisol y Arenosol (Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994). Estos suelos presentan una distribución muy marcada, siendo el de mayor extensión el tipo Gleysol.

Los suelos Regosol (Punto 1, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son profundos, bien drenados que se forman a partir de materiales no consolidados (Buol, *et. al.* 1988). Estos suelos se caracterizan por no presentar capas distintas, en general son claros y se parecen bastante a la rocas que los subyacen (INEGI, 1981). Se identifican al norte del área de estudio, en áreas donde se encuentran materiales no consolidados, como en los lomeríos eólicos y en la planicie costera, que corresponde al área de la desembocadura del Río Papaloapan.

Los Feozem (Punto 2, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son suelos que presentan una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes además de ser suelos fértiles (INEGI, 1981). En el área de estudio estos suelos presentan subunidades de suelo Vertisol. Los suelos Feozem se encuentran sobre la margen izquierda del Río Papaloapan desde la localidad de

Carlos A. Carrillo, de forma paralela al Río Papaloapan y, posteriormente, se identifican hacia la localidad de Acula; en la margen izquierda del Río Tonto se encuentra este tipo de suelo, aunque con una extensión muy reducida dentro del área de estudio (Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994).

Los Vertisoles (Punto 3, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son suelos que se desarrollan en climas tropicales y subtropicales con una marcada diferencia entre las estaciones seca y húmeda. Estas condiciones ambientales favorecen la formación de arcillas que tienen la propiedad de hincharse cuando están húmedas y encogerse al secarse (Buol, *et. al*, 1988). En estos tipos de suelos se encuentran las llanuras bajas de inundación, debido a que en los Vertisoles se presenta un mal drenaje en épocas de lluvias. En estas áreas se encuentran cultivos de caña y arroz, que son propicios para este tipo de ambientes en los cuales el agua permanece estancada y, por consiguiente, pueden presentarse problemas de inundación. Se encuentran en la margen izquierda de la localidad de Paraíso Novillero hacia la localidad de Cosamaloapan y áreas aledañas a ésta. Se encuentra asociado con el suelo Feozem (Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994).

Los suelos Gleysol (Punto 4, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son propios de lugares que permanecen inundados por periodos prolongados a lo largo del año (Buol, *et. al*, 1988). En la parte donde se saturan de agua presentan colores azulosos o verdosos (INEGI, 1981). En el área de estudio estos suelos presentan subunidades de suelos Vertisoles, en la confluencia del Río Tesechoacan y el Río Papaloapan. Se encuentran sobre ambos márgenes del Río Papaloapan; para la margen izquierda se encuentran a partir de la localidad de Cosamaloapan hasta la desembocadura del río y en la margen derecha se encuentran al sur de la localidad de Ambrosio Alcalde, con excepción de algunas áreas identificadas de suelos Luvisoles en los alrededores de la localidad de Tuxtilla, y desde esta localidad hacia el norte hasta encontrar las elevaciones de las dunas costeras; es importante hacer mención que de la localidad de Tuxtilla hasta la desembocadura del río, únicamente se identificó suelo tipo Gleysol, en lo referente a la margen derecha del Río Papaloapan (Fig. 1.3, INEGI 1994 y 1987c). Este tipo de suelos son los que representan la mayor extensión en el área de estudio y corresponden, en mayor proporción, a las llanuras bajas de inundación.

Los suelos Arenosol (Punto 5, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) se encuentran en zonas tropicales o templadas, en condiciones naturales tienen vegetación de selva, bosque o matorral; Por lo general en México son muy escasos (INEGI, 1981). Se presentan en áreas muy reducidas al sur de la localidad de Guadalupe Victoria y, al sur, como al este de la localidad de

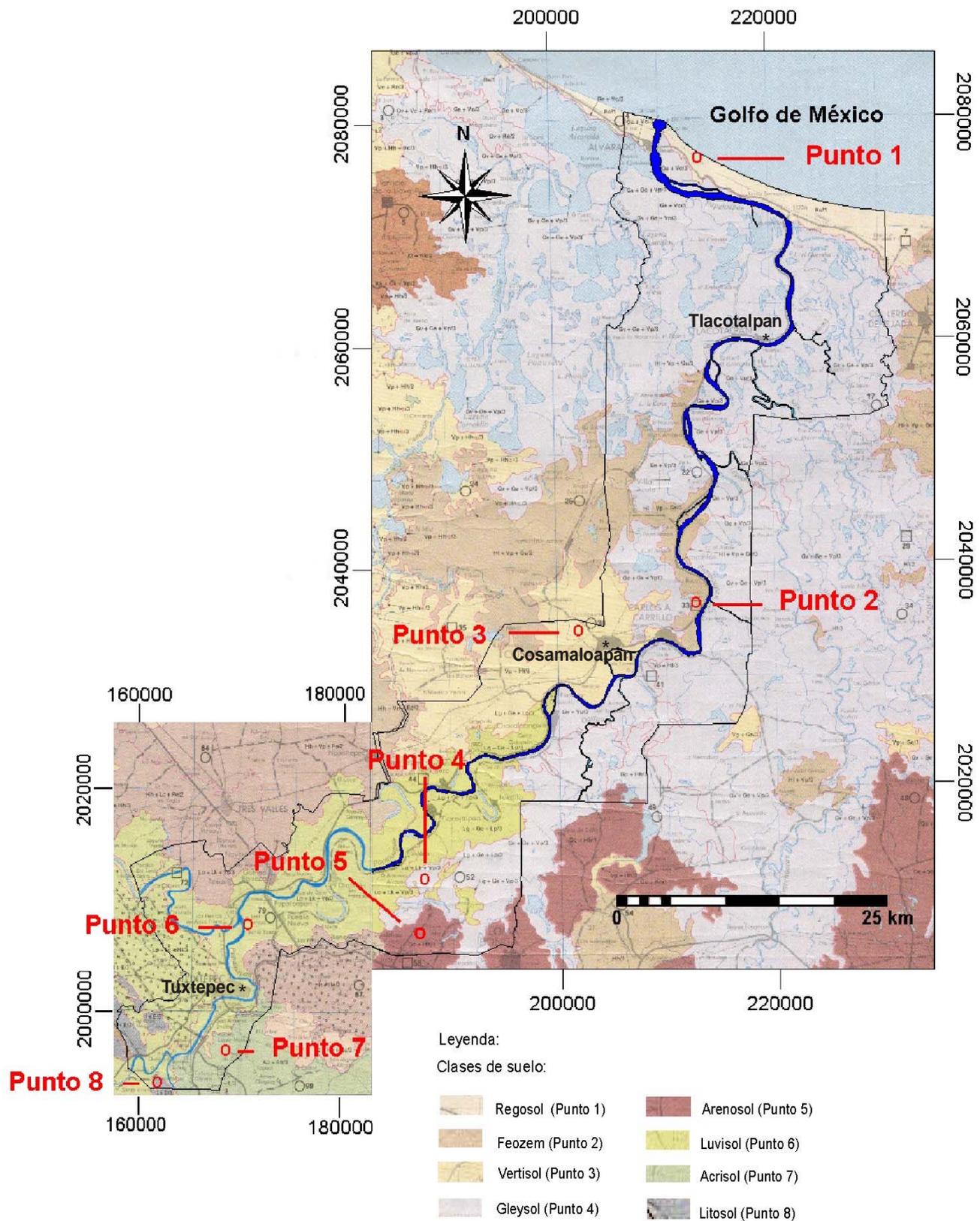


Fig.1.3. Clases de suelo del área de estudio, según INEGI (1987c y 1994).

Mata de Caña, ambas localidades identificadas al sur del área de estudio. Este tipo de suelos son los que representan la menor extensión y se localizan en los lomeríos; se encuentra con subunidades de suelo Feozem.

Los Luvisoles (Punto 6, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son suelos propios de climas húmedos, pero que presentan una estación de secas (Buol, *et. al*, 1988); se caracterizan por mantener un horizonte de acumulación de arcilla y por tener procesos de lixiviación (INEGI, 1981). Estos suelos se distribuyen sobre ambas márgenes del Río Papaloapan, desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional; en la margen izquierda se identifican desde esta unión hasta la localidad de San Francisco Oyozontle y en la margen derecha, desde la unión de los ríos hasta la localidad de Torno Largo (Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994). En el área de estudio los Luvisoles se encuentran con subunidades de suelo Vertisol. La distribución de este tipo de suelos corresponde, en gran parte, a las llanuras altas de inundación, en donde los procesos de inundación son escasos.

Los Acrisoles (Punto 7, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo y por exhibir colores rojos, amarillos, o amarillos claros con manchas rojas (INEGI, 1981). Se hallan en el área en donde se unen los ríos Santo Domingo y Valle Nacional y de ahí se extienden hacia el este (Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994). Se distribuyen sobre la llanura alta de inundación y los lomeríos, en donde no se presentan inundaciones.

Los Litosoles (Punto 8, Fig. 1.3, INEGI 1987c y 1994) son suelos que se encuentran en todos los climas y con diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por tener una profundidad menor de 10 cm hasta la roca (INEGI, 1981). Este tipo de suelos se localizan al sur de la localidad de San Rafael, al oeste de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional y al norte de la localidad de Piedra Quemada, sobre la margen izquierda del Río Papaloapan (Fig. 1.3); en ambos casos se ubican sobre los lomeríos al sur del área de estudio. Se encuentra asociado con Rendzina.

#### 1.4 Hidrología

Muchos de los afluentes que actualmente fluyen al Río Papaloapan, antiguamente conducían a la cuenca del Río Balsas, hacia la vertiente del Océano Pacífico. Fueron reencauzados por la formación del Sistema Volcánico Transversal, el cual cerró el parteaguas

que finalmente formó la cuenca del Papaloapan en la vertiente del Golfo de México (Lozano, 1955).

El sistema fluvial del río Papaloapan es el de mayor importancia en el país, después del sistema Grijalva – Usumacinta. Su escurrimiento anual es aproximadamente de 47,000 millones de m<sup>3</sup> (CENAPRED, 1994). La principal corriente que drena el área de estudio es el Río Papaloapan, tiene su origen en la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, desde este punto presenta una dirección del flujo que va del suroeste al noreste hasta llegar a su desembocadura al Golfo de México. Según estudios de la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos (1977), el Río Santo Domingo es el más joven de todos y desde hace siglos ha acarreado grandes cantidades de sedimentos que han azolvado al bajo Papaloapan, al extremo que hoy en día ya no navegan los barcos de metro y medio de calado, como solían hacerlo a principios de este siglo. En la actualidad ha quedado ya bien definido que el curso del Río Papaloapan tiene una longitud aproximada de 240 km, desde la confluencia hasta su desembocadura en el Golfo de México. Dentro de la clasificación de corrientes, el Río Papaloapan es un río de tipo meandriforme debido a su configuración sobre la planicie fluvial. Sus principales afluentes son los ríos Tonto, Obispo, Zacapexco, Tesechoacán y el Río San Juan Evangelista (Figura 1.4).

El Río Tonto nace en la Sierra Mazateca y es un afluente que se une por la margen izquierda del Río Papaloapan. Debido a que su cuenca queda situada en una zona de alta precipitación, a pesar de su pequeña extensión, produce aproximadamente el 20% de volumen medio anual que descarga el Río Papaloapan. Sus aguas llevan el porcentaje de azolve más bajo del sistema fluvial, porque la mayor parte de la subcuenca está cubierta con vegetación (CENAPRED, 1994). El Río Tonto sirve como límite entre los estados de Veracruz y Oaxaca.

El Río Obispo se une al Río Papaloapan al suroeste de la localidad de Cosamaloapan; al noroeste de la localidad de Carlos A. Carrillo se incorpora el Río Zacapexco, éste último presenta menor amplitud de su lecho y menor extensión, en comparación con el Río Obispo. Ambos ríos se unen por la margen derecha (Fig. 1.4).

Cerca de su desembocadura en el Golfo de México, el Río Papaloapan recibe por su margen derecha a los dos afluentes meridionales más importantes, el Río Tesechoacán y el San Juan Evangelista, que bajan de las estribaciones del nudo de Zempoaltepetl (CENAPRED, 1994). El Río Tesechoacán es una corriente meándrica, lo cual puede identificarse en su trayecto y cerca de la confluencia con el Río Papaloapan. El Río San Juan se une al Río Papaloapan frente a la localidad de Tlacotalpan, localizada en la margen izquierda del Río Papaloapan (Fig. 1.4).

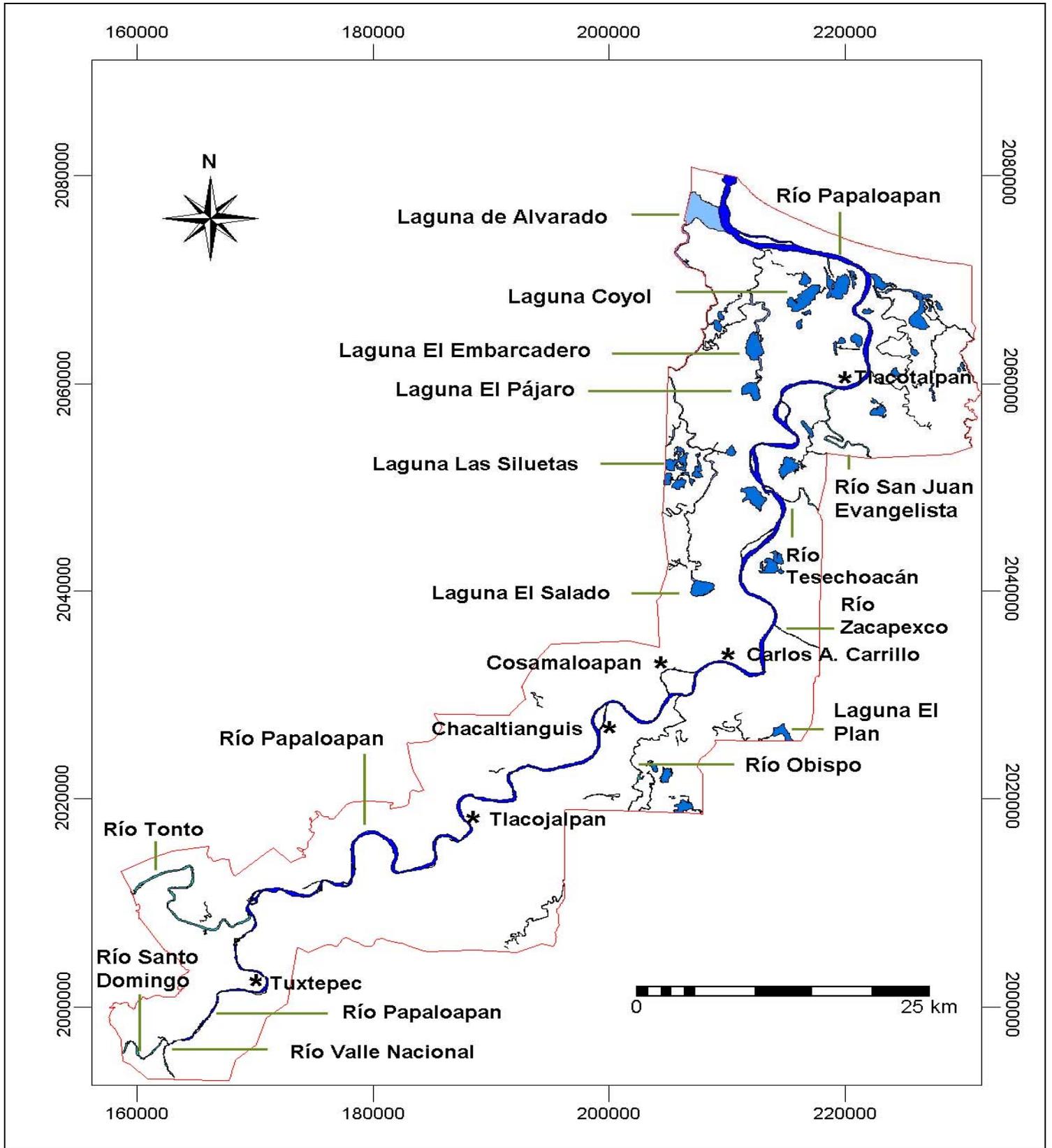


Fig. 1.4. Principales afluentes del Río Papaloapan y las principales lagunas identificadas en el área de estudio.

Dentro del área de estudio se localizan varias lagunas, las más grandes sobre la margen izquierda son la de El Salado, al oeste de la localidad de Amatitlán; las lagunas Las Siluetas, Punta Lagarto, Mata de Palma y Rincón del Venado al noroeste de la localidad de Acula; la laguna El Carrizo al sur de la localidad de Boca del Río; la laguna El Pájaro y El Embarcadero al oeste de la localidad de Tlacotalpan; la laguna Maria Elvira, Coyol, Macuile, Los Amates, La Virgen, Los Manglares y Mate Mangle al norte de la localidad de Tlacotalpan y por último la Laguna de Alvarado, siendo ésta la de mayor tamaño localizada al sureste de la localidad de Alvarado. Por la margen derecha, se encuentran la laguna El Plan, al oeste de la localidad de Chacaltianguis y, al sureste de esta misma localidad, se encuentran la laguna Socorro, San Pablo y El Burro; la laguna el Jolote, al oeste de la localidad de San José Papaloapan; la laguna Martinela, al oeste de la localidad de San Miguel Xochitl; la laguna Lagartera, al sureste de la localidad de Tlacotalpan; la laguna Fresada, El Reloj y El Zapote, al noreste de la localidad de Tlacotalpan y las lagunas Guayabo, las Cañas y Tiquiapan, al noreste de la localidad de Tlacotalpan y la laguna El Zapote, la cual se localiza cerca del límite del área de estudio (al este), las lagunas de mayor extensión se encuentran indicadas en la Figura 1.4.

## 1.5 Geología

La cuenca del Papaloapan debe su origen a la Orogenia Laramide, la cual consistió en que el extenso mar, que se formó a principios del Jurásico se extendió desde el Océano Pacífico, a través de lo que sería México, hacia el Golfo de México y comenzó a ser limitado durante el Cretácico Superior por la contracción y el levantamiento del altiplano a lo largo de la margen del Pacífico hacia el Golfo. Las progresivas elevaciones hacia el este culminaron durante el Paleoceno y el Eoceno Inferior, originadas por el episodio orogénico que plegó y elevó la columna geológica mesozoica y cenozoica, desarrollando un complejo cinturón de grandes pliegues y fallas, que constituyen la Sierra Madre Oriental. La Orogenia Laramide modificó la paleografía del lado oeste de la actual Cuenca del Golfo de México, bloqueando la comunicación entre el Océano Pacífico y el Golfo de México y causando un progresivo desplazamiento de la costa oeste del Golfo durante el Cretácico Superior y en el Cenozoico Temprano. La Orogenia Laramide, con la formación de la Sierra Madre Oriental, fue acompañada por el resultado de una serie de depresiones paralelas al cinturón orogénico, siendo una de ellas la Cuenca Terciaria del Este de México: la Cuenca de Veracruz (Salvador, 1991).

En términos generales puede decirse que el Cenozoico en la Cuenca de Veracruz se caracterizó por movimientos epirogénicos que dieron lugar al depósito de sedimentos en ambientes desde litoral hasta nerítico externo y batial inferior; estos están formados en su mayor parte de arcillas, más o menos arenosas, arena, o bien ocasionalmente de conglomerados, cuya presencia en el área se debe a una trasgresión durante el Mioceno y a grandes deltas. Estos depósitos se originaron al empezar las deformaciones orogénicas de la Sierra Madre Oriental, a partir del Cretácico Superior (Padilla y Sánchez, 2007).

En el área afloran principalmente depósitos cenozoicos y recientes; sin embargo, las formaciones más antiguas están cubiertas por piroclásticos y por depósitos recientes, probablemente de origen fluvial (López, 1979).

La columna estratigráfica del Cenozoico incluye los pisos del Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Reciente, aunque cabe señalar que también se han localizado formaciones que corresponden al Cretácico Superior, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Durante el Cenozoico, en el marco de una regresión marina hacia el este, se depositaron en la llanura Costera del Golfo los sedimentos terrígenos de las formaciones Chicontepec-Velasco (Paleoceno); Aragón, Guayabal y Chapopote (Eoceno); Horcones y La Laja (Oligoceno); Depósito, Encanto, Concepción, Filisola y Paraje (Mioceno). Estos depósitos se originaron al empezar las deformaciones orogénicas de la Sierra Madre Oriental durante el inicio del Cenozoico (Morán, 1985).

Las rocas marinas de la Cuenca de Veracruz tienen mucha semejanza con las de la Cuenca Tampico-Misantla, desde la Formación Velasco-Chicontepec hasta la Horcones, en cambio después de la discordancia del Oligoceno Superior, los antiguos mares del Istmo transgreden la Cuenca de Veracruz conteniendo las mismas formaciones (de la Laja hasta la Filisola) (López, 1979).

#### 1.5.1. Paloeoceno.

##### Formación Chicontepec-Velasco

En el Paleoceno se identifica a las formaciones Chicontepec y Velasco. Cerca al área de estudio, López (1979) indica su presencia en los alrededores de la Presa Miguel Alemán, sobreyaciendo a rocas del Cretácico Superior donde afloran los sedimentos *flysch* de la Formación Chicontepec Inferior, representando a un sinclinal al oeste de Tuxtepec y Temascal. La Formación Velasco, del Paleoceno y característica de aguas profundas, se ha encontrado en algunos pozos perforados de la Cuenca de Veracruz y está constituido, en su parte superior,

por lutitas ligeramente arenosas con intercalaciones muy delgadas de caliza y arenisca calcárea, para la parte inferior la constituyen lutitas muy calcáreas.

Las formaciones Chicontepec-Velasco están caracterizadas por la presencia de lutitas gris verdoso, con intemperismo amarillo ocre, de estratificación delgada y, en ocasiones, intercalaciones de areniscas gris claro, generalmente de composición calcárea y grano fino. Los espesores encontrados en la superficie y en los pozos de la Cuenca de Veracruz presentan secuencias de más de 1,700 m (López, 1979).

### 1.5.2. Eoceno

Formación Aragón, Guayabal y Chapopote.

Formaciones que corresponden al Eoceno que, siguiendo los conceptos cronoestratigráficos, se encuentra dividido en Inferior, Medio y Superior. La Formación Aragón, en el Eoceno Inferior, esta formada por una serie de lutitas gris azul, estratificadas en espesores de 5 a 10 cm y se intemperizan a un color crema o café claro. Solo se ha encontrado en el Oeste de la Cuenca y su espesor máximo llega hasta 600 m (op. cit.).

La Formación Guayabal, Eoceno Medio, esta formada por lutitas oscuras, gris acero y gris azul en ocasiones rojizas y arenosas, con concreciones calcáreas y en ocasiones ferruginosas (López-Ramos, 1979). Salvador (1991), menciona que las formaciones Aragón y Guayabal, fueron depositadas en un ambiente profundo y de aguas tranquilas, indicando que el diatrofismo de la Sierra Madre Oriental había disminuido hacia el oeste.

La Formación Chapopote, Eoceno Superior, esta formada de lutitas y arcillas azules arenosas, en ocasiones puede verse estratos de areniscas lenticulares y concreciones calcáreas. Tienen un espesor reducido, desapareciendo lateralmente por procesos de erosión (López, 1979). Salvador (1991), indica que la superficie erosionada fue cubierta por una secuencia *molasse* de la formación Tantoyuca.

### 1.5.3. Oligoceno

Formación Horcones

Formación que se presenta en el Oligoceno Inferior, aunque la Formación Horcones pertenece a la Cuenca de Tampico-Misantla, aparece también en la columna geológica de la Cuenca de Veracruz, aunque en la porción occidental no se encontró por estar erosionado, a diferencia de la porción oriental en donde se encuentra bien representado (López, 1979).

## Formación La Laja

La Formación La Laja se encuentra dividida en Laja Superior y Laja Inferior, correspondiendo, en términos generales, la primera al Oligoceno Medio y la segunda al Oligoceno Inferior. Esta formación es de aguas más profundas que las formaciones que tiene sobrepuestas y las que le subyacen. La Laja Inferior consta esencialmente de lutitas grises azulosas, verdes y aún negras, generalmente duras, quebradizas y muy bien estratificadas, alternadas con capas de arenas, areniscas no consolidadas y areniscas duras calcáreas. La Laja Superior está formada principalmente de areniscas y tobas donde predominan las lutitas tobáceas (López, 1983).

## Formación Depósito

La Formación Depósito es una secuencia de lutitas gris a gris azuloso, ligeramente arenosas, bien estratificadas con intercalaciones de tobas y cenizas volcánicas. Aparentemente es concordante con la Formación La Laja, que la subyace. Su edad se considera como del Oligoceno Superior.

### 1.5.4 Mioceno

#### Formación Encanto

La Formación Encanto se ha identificado dentro del Mioceno Inferior. Se trata de una formación de carácter esencialmente marino. Consiste principalmente de series alternadas de arenas, areniscas de grano fino y lutitas arenosas. Su color es variable, pero generalmente es gris azuloso o gris amarillento. En otras se presenta al Encanto como una serie de estratos formados por arena de grano grueso a fino parcialmente cementada, ligeramente arcillosa, de color gris azulado o gris claro que con frecuencia contiene granos y cristales de ortoclasa además de los de cuarzo (op. cit.).

#### Formación Concepción Inferior

Esta formación se le considera perteneciente al Mioceno Inferior. Esta formada principalmente por lutitas bien consolidadas, mal estratificada, de color gris, azul claro y azul, oscuro. La parte superior es arenosa y semejante a la Formación Concepción Superior basal;

pero su contenido de arena va disminuyendo desde este contacto hacia la base, donde las lutitas son casi puras (López, 1983).

#### Formación Concepción Superior

Los sedimentos de la Formación Concepción Superior, en el Mioceno Inferior, se consideran como de mares poco profundos, litológicamente tienen cierta semejanza con los de la subyacente Concepción Inferior, y consta principalmente de lutitas arenosas de color azul grisáceo y compacto. En ocasiones se presentan concreciones de areniscas de colores café y amarillento, cementadas con material calcáreo. Tales concreciones aparecen no solo en la Formación Concepción Superior sino también en la base de la Formación Filisola que la cubre, lo cual dificulta fijar el contacto superior (López, 1983).

#### Formación Paraje Solo

Formación que se ha encontrado en el subsuelo de la Cuenca de Veracruz, Mioceno Medio, representando la parte superior de estos sedimentos. Esta constituida por un conglomerado formado de gravas, gravillas y arenas de grano grueso, derivadas de material volcánico, en colores del gris al gris amarillento y algunas intercalaciones de areniscas y arcilla tobácea de coloración del gris a un amarillo ocre. La parte media esta formada por areniscas muy calcáreas de grano fino, en coloración del gris azul al gris claro. La parte inferior constituida por una serie de capas de 10 cm a 1 m de espesor de areniscas compactas, grano fino y de color gris azul a gris crema, alternan con bancos delgados y gruesos de arena arcillosa consolidada (López, 1979).

#### 1.5.1.1 Geología Histórica.

Según Viniegra (1992), el área de estudio es una provincia de edad Cenozoica. Salvador (1991), menciona que del Cretácico al Eoceno Medio las rocas fueron erosionadas, conllevando al desarrollo de un sistema de drenaje dendrítico sobre esta superficie.

El Paleoceno, en sus depósitos de Chicontepec y Velasco, representa una inundación regional de gran parte del extremo occidental del Golfo de México.

En el transcurso y final del Eoceno, los mares que hicieron su retirada rumbo al oriente, hacia el Golfo, dejaron la misma sedimentación clástica y faunística que en el norte de la

República, de manera que los ambientes que dieron lugar a las formaciones Aragón, Guayabal y Chapopote en esta cuenca se repiten, extendiéndose regionalmente en la amplitud de la inundación de las aguas del Golfo de México (Viniestra, 1992).

La intensa erosión desarrollada durante el Eoceno dio por resultado la desaparición de espesores considerables de sedimentos que abarcan las formaciones Velasco y Méndez (Lozano, 1955).

Hacia el Oligoceno Superior, sobrevino una retirada del mar debido a la emersión del continente en la porción noroccidental, quedando de este modo expuestos a los agentes erosivos que las denudaron y constituyeron una topografía irregular, cubiertas posteriormente por el mar que se desarrolló durante el Mioceno (Lozano, 1955).

Durante el Mioceno se manifestó una gran transgresión. Los sedimentos que afloran del Mioceno en la Cuenca de Veracruz, están restringidos a unas pequeñas áreas cercanas al borde oriental de la Sierra Madre, principalmente en el área de Temascal, Tuxtepec y Playa Vicente. Hacia la subprovincia de los Tuxtlas, se presenta la mayor distribución superficial de sedimentos del Mioceno (López, 1979).

Con los hundimientos de la Cuenca y del Golfo de México, que acontecían periódicamente, el material sedimentario continental y marino la azolvaban, para seguirle otro tipo de hundimiento; esto sucedió en toda la periferia del Golfo de México durante el Cenozoico: Eoceno, Oligoceno y Mioceno (Viniestra, 1992). En lo referente al período Cuaternario, en el área se presentan en mayor cantidad los depósitos aluviales que corresponden a lechos fluviales del Río Papaloapan y sus afluentes.

#### 1.5.1.2. Geología Local.

Las rocas del área de estudio abarcan desde el Cretácico Superior al Cuaternario, siendo ambas de origen sedimentario.

#### Depósitos Sedimentarios.

Las calizas del Cretácico Superior (punto 7, Fig. 1.5), en el área de la presa Miguel Alemán, presentan estratos de más de un metro, depositados en un ambiente de cuenca. Los estratos de 30 a 15 cm de espesor presentan bandas y nódulos de pedernal negro con escasas lutitas calcáreas intercaladas (INEGI, 1984d).

Los conglomerados del Mioceno son rocas sedimentarias que se presentan en la porción Suroeste, en las inmediaciones de la localidad de Tuxtepec, con una expresión de lomeríos de baja pendiente (INEGI, 1984d) (punto 6, Fig. 1.5).

#### Depósitos Cuaternarios.

Los depósitos aluviales incluyen a todos los sedimentos recientes de origen aluvial que se derivan de la denudación y erosión de las rocas existentes en el área. Están constituidos por fragmentos líticos y minerales; entre los primeros destacan los de rocas volcánicas y en los minerales fragmentos de plagioclasa, cuarzo y micas (punto 5, Fig.1.5). La granulometría de estos depósitos es variable y presentan diferentes grados de redondez (INEGI, 1983). Estos depósitos se encuentran sobre ambas márgenes del Río Papaloapan, desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, hasta la desembocadura del río en el Golfo de México, también son depósitos del Cuaternario.

Los depósitos palustres (punto 4, Fig. 1. 5) son suelos formados por una alternancia de arcillas, limos y arenas, en estratos delgados sin consolidar. Esta unidad se caracteriza por su gran contenido de materia orgánica que le imprime un color oscuro y fétido (INEGI, 1983). Estos depósitos se encuentran en áreas donde el agua permanece estancada en gran parte del año, y también son de edad del Cuaternario (Figura 1.5).

Los sedimentos lacustres (punto 3, Fig.1.5) son unidades formadas por intercalaciones de arenas finas, limos y algunas arcillas que se acumulan en cuencas acuosas de las llanuras de inundación del Río Papaloapan (INEGI, 1983). En el área de estudio se distribuyen sobre ambas márgenes del río, donde son más evidentes las inundaciones. Estos depósitos también forman parte del Cuaternario (Figura 1.5).

Los depósitos eólicos están constituidos principalmente por arenas de grano fino y medio y algunos fragmentos de conchas transportados por el viento y de edad reciente (punto 2, Fig. 1.5). Los clásticos de esta unidad presentan estructuras superficiales melladas y, en algunos lugares se observa estratificación cruzada. La unidad está expuesta a lo largo de la costa del Golfo de México (INEGI, 1983). Al norte del área de estudio se localizan estos depósitos en forma de dunas costeras y de edad del Cuaternario (Fig. 1.5).

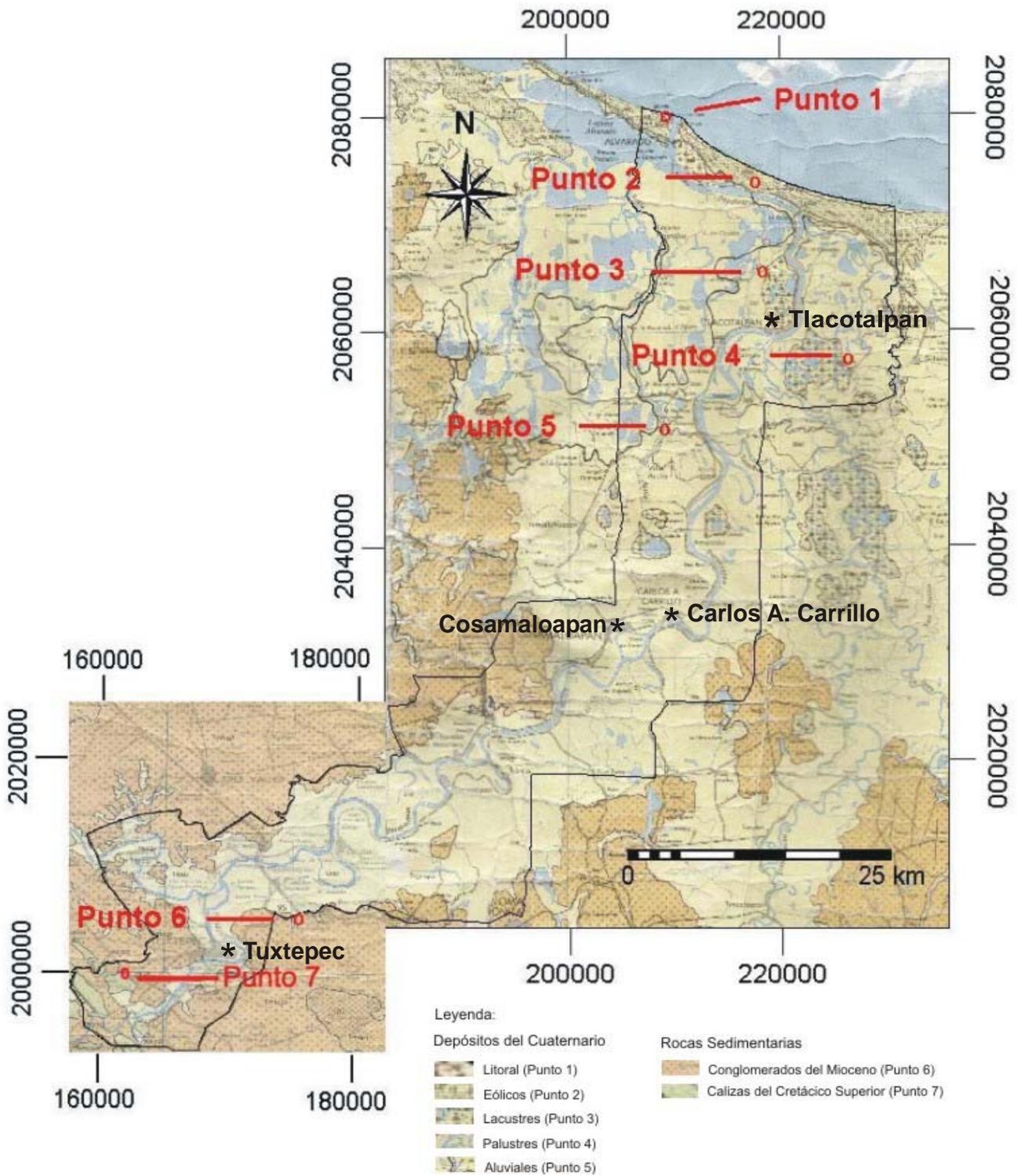


Fig. 1.5. Geología del área de estudio, según INEGI (1983 y 1984d).

Los depósitos de litoral son sedimentos de playa constituidos por arenas de grano fino a medio de fragmentos líticos y conchas (punto 1, Fig. 1.5). Por lo general las arenas son subredondeadas con algunas conchas de organismos recientes (INEGI, 1983).

#### 1.5.5. Tectónica

Desde el punto de vista geológico el sureste mexicano es una de las áreas más complejas de Norteamérica. Esta complejidad se debe a que los movimientos de las placas tectónicas Norteamericanas, del Caribe y de Cocos, convergen en esta región desde el Oligoceno Tardío (Morán-Zenteno et al., 2000); la Placa Norteamericana tiene un movimiento relativo hacia el oeste respecto a la del Caribe, mientras que la de Cocos se mueve hacia el noroeste en dirección hacia las dos primeras. Las estructuras resultantes de esta actividad tectónica durante el Mesozoico y Cenozoico presentan tendencias estructurales diversas, así como también edades de deformación diferentes (Padilla y Sánchez, 2007).

El proceso tectónico de *rifting* que dio paso a la apertura del Golfo de México terminó al fin del Calloviano, después de lo cual, durante el Oxfordiano, se desarrollaron amplias plataformas de aguas someras a todo lo largo de los bordes del proto Golfo de México, en las que se depositaron grandes volúmenes de carbonatos, con extensas barras oolíticas en los bordes de plataforma (Salvador, 1991).

Para el Cretácico Inferior, Neocomiano Superior, aumentó la velocidad de subsidencia de las plataformas que bordeaban el Golfo de México, favoreciendo así el depósito de gruesos paquetes de carbonatos con menores cantidades de lutitas intercaladas y con espesores superiores a los 1,500 m en promedio (Padilla y Sánchez, 2007).

Al inicio del Cretácico Superior continuó la subsidencia general del Golfo de México, a una velocidad aproximadamente constante en toda la cuenca. Durante el Cretácico Superior medio, se incrementó la actividad volcánica en el occidente de México, lo cual se reflejó en la sedimentación marina del Golfo de México, en donde continuó el depósito de capas delgadas de cálizas y lutitas, mientras que en la cuenca continuaba el depósito de carbonatos con bandas y nódulos de pedernal con delgadas intercalaciones de bentonita (Salvador 1991). Para el fin del período Cretácico, aumentó el aporte de sedimentos clásticos provenientes del oeste de México, mientras que en el occidente del Golfo de México la subsidencia aumentó y se depositaron gruesos espesores de margas y lutitas de la Formación Méndez (Padilla y Sánchez, 2007).

Otro cambio importante en la evolución tectónica del Golfo de México ocurre en el límite entre el Período Cretácico y el Paleógeno, cuando se ha postulado que en el área de Chicxulub, en la costa norte de Yucatán, ocurrió el impacto de un cuerpo extraterrestre al que se considera responsable de la extinción de numerosas especies animales y vegetales, entre las que destacan los dinosaurios y las amonitas. Coincidente con esta edad, existe una brecha en carbonatos que tiene una gran extensión en el sur del Golfo de México y tiene también una gran importancia económica para el país, por ser la roca almacén de los grandes campos petroleros del área marina del sureste de México (Padilla y Sánchez, 2007). A fines del Cretácico el aporte de sedimentos clásticos del noroeste y del occidente del Golfo de México se incrementó notablemente durante las primeras pulsaciones de Orogenia Laramide, también conocida como Orogenia Hidalgoana (de Cserna, 1989). La Era Cenozoica se inicia prácticamente con el evento tectónico que dio origen a las cadenas plegadas y cabalgadas del occidente del Golfo de México, específicamente las Sierras y Cuencas de Coahuila, Sierra Madre Oriental y la Sierra de Zongolica, desde el Paleoceno tardío hasta el Eoceno temprano (Padilla y Sánchez, 2007). La orogenia fue el resultado de la convergencia de la Placa Farallón por debajo de la Placa Norteamericana, en la que el fragmento de corteza oceánica estaba en subducción tuvo un ángulo muy bajo, causando así una deformación a mayor distancia de la zona de la trinchera y elevando una porción considerable de la parte meridional de la Placa de Norteamérica. Esta condición tectónica favoreció el incremento del aporte de grandes volúmenes de sedimentos clásticos después del fin de la orogenia, que empezaron a depositarse en las cuencas formadas en el antepaís de las cadenas plegadas, que de norte a sur se conocen como las Cuencas de Parras-San Carlos (CPSC), de Tampico-Misantla (CTM) y de Veracruz (CV) (de Cserna, 1989; Padilla y Sánchez, *ibid*).

Así como durante el Cretácico la forma y el tamaño de Cuenca del Golfo de México estuvieron determinados las plataformas carbonatadas, a partir del Eoceno Tardío la nueva forma de la cuenca dependió totalmente gran flujo de la sedimentación clástica. Se empezaron a desarrollar grandes fallas lítricas normales asociadas a depocentros en las cuencas de antepaís. Durante este tiempo se depositaron gruesos espesores de arenas finas en los taludes del occidente del Golfo de México, Planicie Costera del Golfo, al tiempo que los sedimentos más finos iban rellenando las partes más profundas (Padilla y Sánchez, 2007).

Para el Eoceno tardío se formaron los depocentros de la Cuenca de Veracruz y se inició su relleno con sedimentos clásticos derivados del oeste. Se considera que el depósito de 5 a 7 kilómetros de espesor de sedimentos acumulados durante el Eoceno y el Mioceno fue favorecido por una fuerte subsidencia por flexión de la corteza en el antepaís de la Sierra de

Zongolica, sin que hasta el momento se hayan identificado fallas regionales que limiten la cuenca. La máxima actividad volcánica en la Cuenca de Veracruz ocurrió durante el Plioceno y el Cuaternario. Estos episodios volcánicos del Plioceno fueron los causantes del levantamiento de la porción oriental de la Cuenca de Veracruz (Salvador, 1991).

Durante el Mioceno Medio la dirección del movimiento de la Placa de Cocos cambió hacia el noreste, generando la compresión que deformó a la Cuenca de Veracruz. En las partes más profundas de la Cuenca de Veracruz se depositaron después del Mioceno Medio del orden de 4 a 5 km de sedimentos. En el talud continental, al oriente de la Cuenca de Veracruz, se desarrolló un deslizamiento gravitacional, de los sedimentos del talud, hacia la cuenca del Golfo de México, limitado echado arriba por una serie de fallas de crecimiento y, echado abajo, por una falla inversa de bajo ángulo que corta toda la sección Paleógena y Neógena, en el Cenozoico (Padilla y Sánchez, 2007).

Durante el Plioceno y el Cuaternario, la región costera experimentó ascensos y descenso débiles (Lugo, 1990), permitiendo el desarrollo de amplias llanuras y terrazas fluviales, lacustres y palustres y de extensos campos de dunas. Finalmente, la actividad volcánica sobresale entre el final del Cenozoico y durante el Cuaternario (Hernández, 2007).

## 1.6 Vegetación y uso de suelo.

En el área de estudio existen diez clases de vegetación y uso de suelo. En las dunas costeras se identificaron el pastizal inducido (punto 1, Fig. 1.6) y la vegetación de dunas costeras (punto 2, Fig. 1.6), estas últimas áreas son utilizadas para el uso pecuario y en partes se desmonta el matorral para inducir el pasto. Alrededor de la Laguna de Alvarado se encuentra la vegetación de manglar (punto 3, Fig. 1.6); este tipo de vegetación es muy notable sobre la margen izquierda del Río Papaloapan y se caracteriza por crecer en un alto intervalo de salinidad, pero las mejores condiciones son las salobres (de la Lanza Espino, et al., 1996). Además la densa vegetación de manglar reduce aún más la velocidad de escorrentía (Ortiz, 1979) lo que conlleva a que sean áreas donde se estanca el agua; también en esta área se encuentra la vegetación de tular, sobre ambos márgenes del río, cerca de la desembocadura (INEGI, 1984b). Sobre estas áreas se identifican especies herbáceas como platanillo y lirio acuático, que tienen poco significado como plantas aprovechables (SARH, 1977). La vegetación de tular se localiza hacia las partes bajas inundadas (punto 4, Fig. 1.6). La Selva Alta Perennifolia se halla de manera muy reducida sobre ambos márgenes del Río Papaloapan, caracterizándose por sobrepasar los 30 m de altura. Se considera que un 90% de los árboles de esta selva han sido derribados o quemados para dar paso a la im--

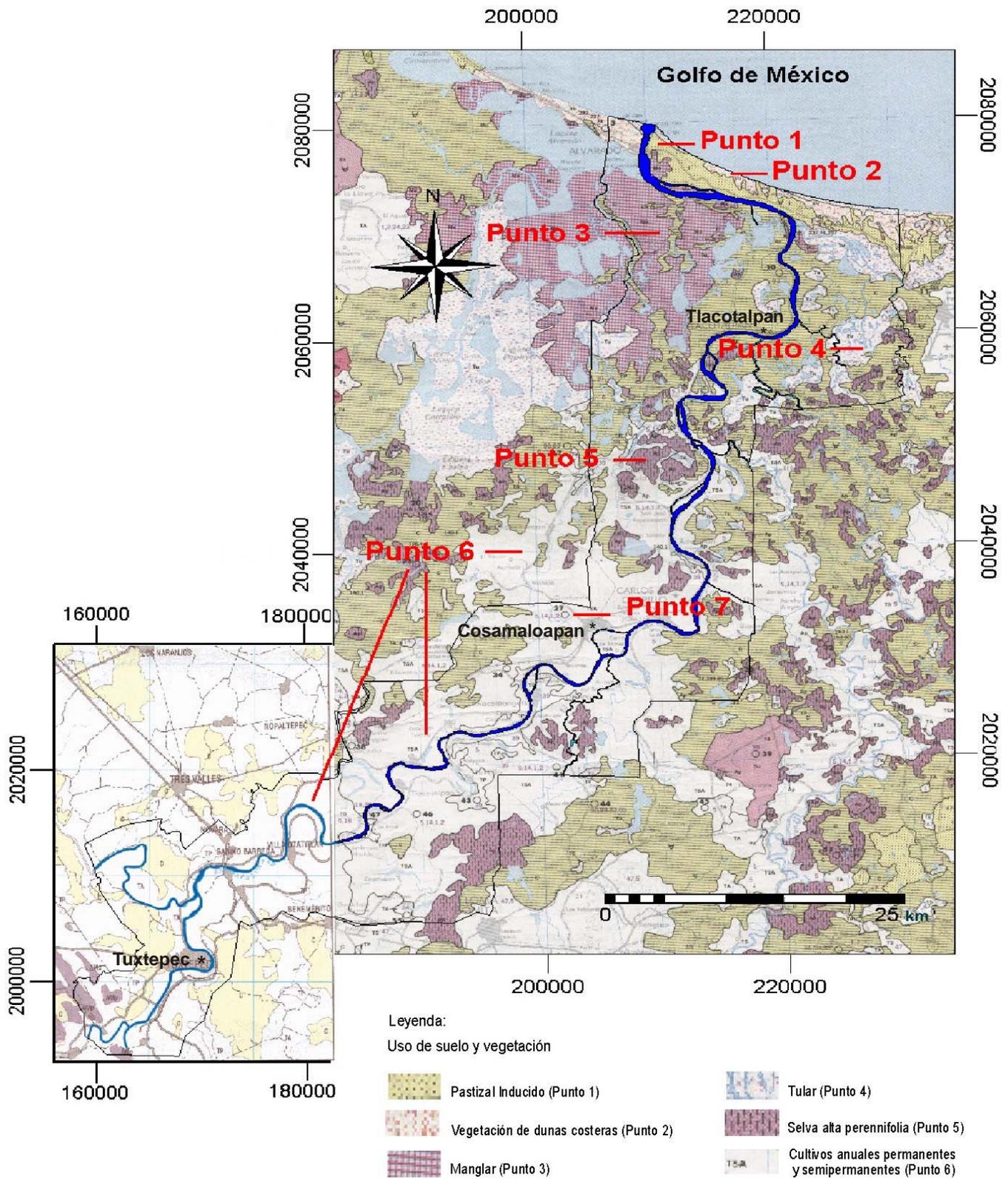


Fig. 1.6. Uso de Suelo y Vegetación del área de estudio (INEGI, 1984b y 2000).

plantación de pastizales (punto 5, Fig. 1.6). Los pastizales cultivados junto con la agricultura de temporal con cultivos anuales, permanentes y semipermanentes, se localizan en ambos márgenes de la llanura fluvial del Río Papaloapan, desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional hasta la localidad de Carlos A. Carrillo (INEGI, 1984b y 2000a) (punto 6, Fig. 1.6).

En los pastizales cultivados junto con la agricultura de temporal con cultivos anuales, permanentes y semipermanentes, se encuentran los cultivos de caña de azúcar, arroz, maíz y frijol, además de cultivos de plátano, mango y piña, siendo estos tres últimos cultivos con la mayor presencia aguas arriba del Río Papaloapan. Los primeros tipos de cultivos se presentan en amplias áreas de la llanura fluvial. Puede indicarse que el cultivo más importante del área de estudio es la caña de azúcar (punto 7, Fig. 1.6), por consiguiente uno de los ingenios más importantes del estado de Veracruz se localiza en la localidad de Carlos A. Carrillo, denominado Ingenio San Cristóbal. Es importante mencionar que no hay en México una zona cañera de la importancia como la identificada en el área del Río Papaloapan.

#### 1.7 Características socioeconómicas generales.

El área de estudio se localiza dentro de once municipios, de los cuales Tuxtepec pertenece al Estado de Oaxaca y los municipios de Acula, Alvarado, Amatitlán, Carlos A. Carrillo, Cosamaloapan, Chacaltianguis, Otatitlán, Tlacojalpan, Tlacotalpan y Tuxtilla pertenecen al Estado de Veracruz (Figura 1.7).

El criterio empleado para la división de las localidades está basado en la concentración de población. Localidades con más de 15,000 hab, están consideradas como localidades urbanas; con menos de 15,000 hab, se consideran localidades urbano-rurales.

Las localidades urbanas más grandes son Tuxtepec con 113,913 hab (INEGI, 2000b), Cosamaloapan con 54,539 hab, Alvarado con 49,499 hab y la localidad de Carlos A. Carrillo con 22,858 hab (Tabla 1.1). Existen otras localidades, denominadas urbano-rurales, con menor número de habitantes, como son Tlacotalpan, con 14,946 hab; Chacaltianguis, con 11,731 hab; Otatitlán, con 5,236 hab; Tlacojalpan, con 4,692 hab; Amatitlán, con 7,228 hab; Acula, con 5,011 hab; y Tuxtilla, con 1,834 hab (Tabla 1.2).

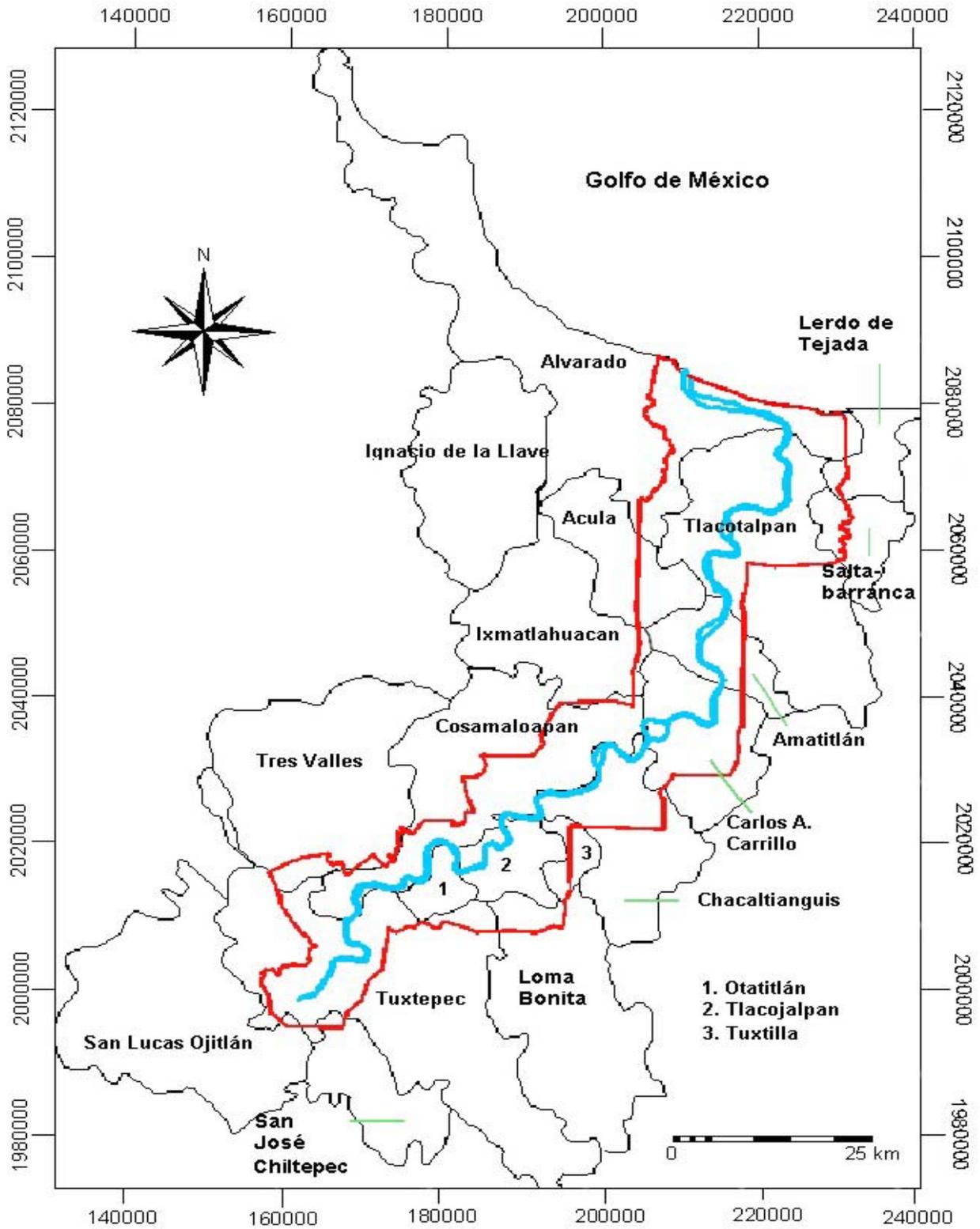


Fig. 1.7. Área de estudio y los municipios que la comprenden.

Tabla 1.1 Fuente: INEGI (2000b).

Localidades urbanas con mayor concentración de población dentro del área de estudio	
Municipio	Población
Tuxtepec	113,913 hab
Cosamaloapan	54,539 hab
Alvarado	49,499 hab
Carlos A. Carrillo	22,858 hab

En la Tabla 1.2 se indican las localidades urbano-rurales con menor concentración de población, pero no por esto carecen de importancia, como Tlacotalpan, Chacaltianguis y Otatitlán. Sobre estas últimas existen estaciones meteorológicas e hidrométricas.

Tabla 1.2 Fuente: INEGI (2000b).

Localidades con menor concentración de población dentro del área de estudio	
Municipio	Población
Tlacotalpan	14,496 hab
Chacaltianguis	11,731 hab
Amatitlán	7,228 hab
Otatitlán	5,236 hab
Acula	5,011 hab
Tlacojalpan	4,692 hab
Tuxtilla	1,834 hab

En lo referente a la población económicamente activa, en el municipio de Tuxtepec, Oaxaca, la población se concentra en un 50% en el sector primario (agricultura, ganadería, caza y pesca) En el municipio de Cosamaloapan, Veracruz, la población se concentra con un porcentaje del 38% en el sector terciario (comercio, turismo y servicios); para los municipios veracruzanos restantes la población se concentra en el sector primario (INEGI, 2000b).

Los municipios que presentan las mayores superficies incorporadas a la agricultura corresponden a Alvarado, Cosamaloapan, Tuxtepec y Tlacotalpan. Dentro del área de estudio del Río Papaloapan, se cultivan diversos productos que están en relación al tipo de clima que prevalece sobre la región. Los principales cultivos que prevalecen son: la caña de azúcar, arroz, mango, piña y plátano. En el municipio de Cosamaloapan el cultivo de caña es el más importante; el mango es el frutal más sobresaliente en los municipios de Chacaltianguis y Cosamaloapan, aunque se produce con menor cantidad en Tuxtepec.

Dentro de las vías de comunicación se encuentra la carretera Federal número 145 que parte de Tinajas (Km 398 de México a Veracruz), adelante de la localidad de Córdoba, con dirección a Ciudad Alemán. Esta carretera presenta un entronque cuatro kilómetros adelante de

la localidad Gabino Barrera, sobre la margen izquierda del Río Papaloapan, a partir de este sitio se encuentra el gran eje transversal con la red carretera federal número 175 que une, hacia al sur a la localidad de Tuxtepec y hacia al noreste a localidades como Cosamaloapan, Carlos A. Carrillo, Tlacotalpan y Alvarado. A esta última se une la carretera federal número 180, proveniente de la localidad Lerdo de Tejada, atravesando Alvarado, con dirección al puerto de Veracruz.

Como medida de protección se proyectó un camino que habría de proteger la margen izquierda del Río Papaloapan, por ser el área donde se ubican las localidades ribereñas más importantes. El bordo, ya terminado, tiene una longitud de 90 kilómetros, hasta llegar a la localidad de Tlacotalpan; el ancho de su corona es de 11 metros y su altura media, de dos metros sobre el nivel del suelo. Este bordo no solo sirve como defensa, es también empleado como una carretera que enlaza localidades como Cosamaloapan y Tlacotalpan.

## Capítulo 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Introducción

En este capítulo se realiza la descripción de la metodología en que se basó esta tesis, además se describen las técnicas que se utilizaron (Fig. 2.1). Asimismo, se lleva a cabo una interpretación del marco conceptual con el objetivo de explicar los procesos fluviales, geomorfológicos e hidrológicos identificados dentro del área de estudio.

El método empleado para la elaboración del presente trabajo está basado en el levantamiento geomorfológico propuesto por el *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC, 2000), el cual consiste en proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos naturales conexos; dicha información puede ser presentada, tanto en mapas como en bases de datos, utilizando un sistema de información geográfica (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

Dentro del sistema desarrollado por el ITC, existen tres tipos de levantamientos geomorfológicos, cada uno de ellos dan origen a diferentes clases de mapas con un objetivo diferente, estos son: el levantamiento analítico, el levantamiento sintético y el levantamiento pragmático.

El levantamiento analítico proporciona información con relación a las formas del relieve y a los procesos que existen en un área determinada; dentro de este tipo, el mapeo morfogenético es fundamental, además de considerarse muy importante el aporte de información de litología, cronología y morfoestructuras. Este tipo de mapeo geomorfológico presenta información detallada del terreno. Dentro del contenido que se puede incluir en el mapeo morfogenético se encuentra la morfogénesis, donde las unidades del relieve se delimitan por su origen y tipo de relieve; la información litológica, morfométrica y morfocronológica, también son representadas dentro de este mapeo.

Por su parte, el levantamiento sintético contribuye en el contexto ambiental biofísico y de las relaciones ecológicas con el paisaje. Este tipo de análisis es utilizado para levantamientos multidisciplinarios, donde además de evaluar los procesos geomorfológicos, también se analizan las diversas características del terreno, como suelos, hidrología, vegetación y topografía. Para el método sintético se han diferenciado niveles de evaluación de unidades del terreno, dependiendo del mapeo que se quiera representar, que puede establecer jerarquías de unidades de mapeo muy detalladas hasta unidades de menor detalle, esto en función del objetivo del estudio que se lleve a cabo. Por último, el levantamiento pragmático es resultado de investigaciones de geomorfología aplicada que tienen un objetivo definido; este tipo de mapeo

se utiliza en los estudios de evaluación de riesgos naturales, de mitigación de desastres, de ordenamiento territorial y otros. Dentro del trabajo realizado en el área de estudio del Río Papaloapan se aplicaron el método analítico y el método pragmático, obteniendo con el primero la delimitación de las unidades morfogénicas, con lo que se obtuvo el mapa geomorfológico fluvial y, con el segundo, la identificación de las diferentes áreas con peligro a inundación, donde se presenta un riesgo de la población y el entorno ambiental.

## 2.2 Recopilación bibliográfica y cartográfica.

Para la recopilación bibliográfica se consultaron diversas fuentes como artículos, libros, boletines, fuentes hemerográficas sobre el área de estudio. La consulta bibliográfica se realizó, en primera instancia, para ayudar a establecer el área de estudio, posteriormente en la fase de la delimitación de la misma, se utilizó para considerar la bibliografía existente y finalmente para el desarrollo del trabajo. Para la cartografía, se consultó la información disponible, la cual fue obtenida del INEGI; además se complementó esta cartografía con el empleo del Sistema de Información Geográfica ILWIS versión 3.0, el cual fue desarrollado en el ITC (2000) y es una herramienta que permite introducir, manejar, analizar y presentar datos geográficos. Con los datos se puede generar información sobre patrones espaciales y temporales, además de procesos que se presentan sobre la superficie de la Tierra (ITC, 2000).

## 2.3 Delimitación del área de estudio.

Para la delimitación del área de estudio se utilizaron fotografías aéreas con escala 1:75,000 del año 2003 y cartas topográficas con escala 1:50,000 de los años 1984, 1987 y 1990, ambos materiales editados por el INEGI. De gran importancia fue la utilización de imágenes de satélite que permiten realizar una serie de compuestos de color, obteniéndose resultados apropiados para la identificación de rasgos específicos del relieve, dependiendo del objetivo del estudio. Se utilizaron imágenes Landsat ETM+ de las zonas UTM 14 y 15, con el compuesto en falso color 541, el cual fue de gran utilidad para realizar la delimitación, complementando este proceso con la ayuda de las fotografías aéreas. La finalidad de la utilización de las imágenes fue identificar las áreas susceptibles a inundaciones; al presentar un mayor cubrimiento que las fotografías aéreas, las imágenes permitieron delimitar el área de estudio procurando cubrir zonas donde se identificaron procesos fluviales importantes, con la justificación de que en las imágenes pueden describirse con mejor detalle estas áreas, además

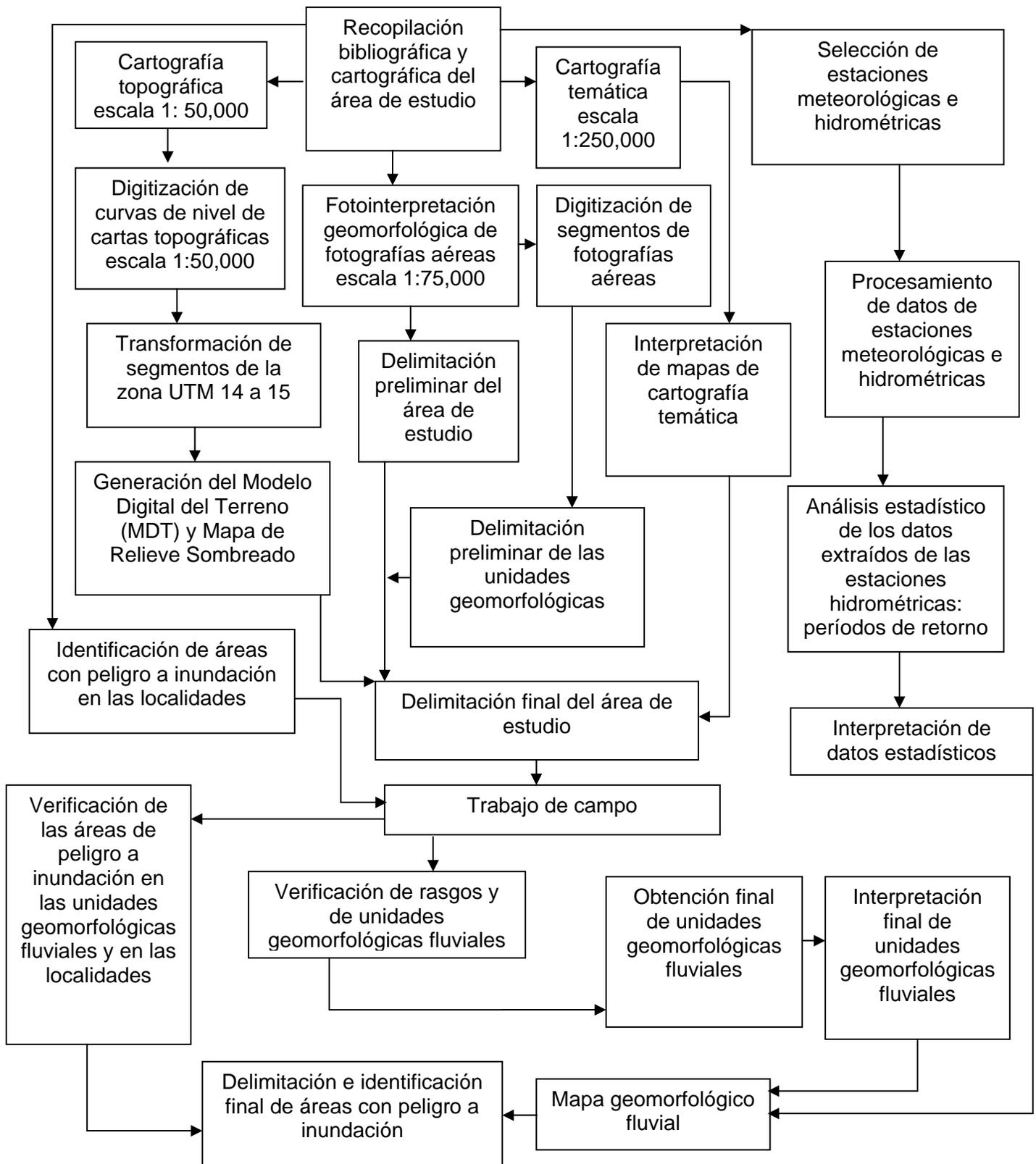


Figura. 2.1 Diagrama metodológico para la delimitación e identificación de áreas con peligro a inundación.

de contar con una mejor resolución. Debido a que el área de estudio queda comprendida, en su mayor parte, dentro de una planicie, se utilizaron algunos elementos del relieve, localizados en las fotografías aéreas, que ayudaron a realizar esta delimitación.

En lo referente a las fotografías aéreas utilizadas para la elaboración de este trabajo, la fotointerpretación se desarrolló sobre la planicie fluvial del río Papaloapan, con base en el cubrimiento fotográfico con escala 1:75,000 (INEGI, 2003), en las cuales se reconocieron las formas fluviales predominantes y en algunas áreas se establecieron las elevaciones existentes, con base en esto y en los procesos antes mencionados, finalmente se delimitó el área de estudio sobre ambas márgenes del Río Papaloapan.

#### 2.4 Procesamiento de la cartografía.

La cartografía utilizada fue la topográfica y la temática, editadas por el INEGI, en diferentes años, las cuales están indicadas en las siguientes tablas:

Tabla 2.1 Cartas topográficas a escala 1:50,000.

Nombre	Clave	Escala	Dependencia	Año
Tuxtepec	E14B89	1:50000	INEGI	1987
Loma Bonita	E15A81	1:50000	INEGI	1987
Cosamaloapan	E15A71	1:50000	INEGI	1987
Mixtequilla	E15A61	1:50000	INEGI	1990
Lerdo de Tejada	E15A62	1:50000	INEGI	1984
Alvarado	E15A51	1:50000	INEGI	1984

Tabla 2.2 Cartas temáticas a escala 1:250,000.

Nombre	Tema	Clave	Escala	Dependencia	Año
Coatzacoalcos	Geología	E15-1-4	1:250,000	INEGI	1983
Orizaba	Geología	E14-9	1:250,000	INEGI	1994
Coatzacoalcos	Edafología	E15-1-4	1:250,000	INEGI	1994
Orizaba	Edafología	E14-9	1:250,000	INEGI	1999
Coatzacoalcos	Uso de suelo y Vegetación	E15-1-4	1:250,000	INEGI	1984
Orizaba	Uso de suelo y Vegetación	E14-9	1:250,000	INEGI	2000

Las cartas topográficas se emplearon, en primera instancia, para ayudar a realizar la delimitación del área de estudio, las curvas de nivel se digitizaron con equidistancia de 10 y 20 m, dependiendo de la información de las cartas topográficas, para realizar el Modelo Digital del Terreno (MDT), proceso que se explica más adelante.

Las cartas temáticas con escala 1:250,000, fueron empleadas para describir los diferentes temas con relación a la geología, edafología y uso de suelo y vegetación del área de estudio, además de consultar la bibliografía considerada, estableciendo una relación de los mapas temáticos con las unidades geomorfológicas fluviales obtenidas.

La elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual es una representación digital de la superficie terrestre, se realizó con base en la digitalización de las curvas de nivel de cinco cartas topográficas, cuatro de ellas pertenecientes a la zona UTM 15, con equidistancia de 20 metros entre las curvas de nivel y la carta de la zona UTM 14 con equidistancia de 10 metros de las curvas de nivel, todas ellas a escala 1:50,000. A estas curvas de nivel en formato de segmentos se les realizó una conversión a formato “*raster*” donde se aplica un algoritmo de interpolación, el cual calcula las dos distancias más cortas para cada píxel, con relación a las dos curvas de nivel más cercanas; posteriormente se calcula el valor altitudinal del píxel mediante una relación lineal y se obtiene el MDT (Palacio *et al.*, 1991). El MDT tuvo una resolución de 20 m.

Como se ha mencionado, el área de estudio está localizada sobre dos zonas UTM, la zona 14 y la zona 15, para ello se sugirió transformar los segmentos que se digitizaron de la zona 14 a la zona 15, conllevando a que estos segmentos cambiarán de sistema de coordenadas a la UTM 15, debido a que ésta presenta mayor cubrimiento del área de estudio. La zona UTM 14 está incluida en una franja geográfica de longitud de 102°W a 096°W (Franco, 1999), y es sobre este último valor, donde limita la zona UTM 14 con la zona UTM 15. La confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional se presenta en los 096°11' W, de este punto el río Papaloapan fluye en dirección SW-NE hasta llegar al final de la UTM 14, al oeste de la población de Otatitlán. De este punto hacia la desembocadura del Río Papaloapan, el río fluye en la zona UTM 15, que abarca de los 096°W a los 090°W (Franco, 1999).

Posteriormente, se realizó un mapa de relieve sombreado a partir de la aplicación de dos filtros de convolución lineal al MDT, para simular iluminaciones desde diferentes orientaciones. Este es un proceso en el cual cada valor de píxel en un mapa de formato de celdas “*raster*” es sustituido por un valor nuevo obtenido a partir de cierta función sobre los píxeles y donde se observa una distribución de tonos de grises que ayudan a tener una mejor percepción del terreno (Palacio *et al.*, 1991). Las áreas donde se localizan algunas elevaciones se sitúan en los alrededores de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional. Para el área de la desembocadura del Río Papaloapan se identificaron una serie de dunas paralelas a la costa, así el río fluye de forma perpendicular a estas dunas, hasta desembocar en el Golfo de México.

La fotointerpretación geomorfológica se realizó con base en las fotografías aéreas con escala 1:75,000 (INEGI, 2003). Ellas frecuentemente describen detalles o brindan una visión general que no puede ser contemplada a nivel del terreno, y suelen mostrar las relaciones espaciales que son observadas en campo (Van Zuidam, 1985). Uno de los principales objetivos del presente trabajo es realizar un mapa geomorfológico fluvial, por consiguiente, se identificaron principalmente los rasgos fluviales dentro de las fotografías aéreas. Dentro de los elementos considerados para la delimitación de las unidades geomorfológicas se encuentran el uso de suelo, ya que se pueden identificar en primer plano las áreas de cultivo y las áreas urbanas, además de considerar la altura relativa.

Dentro de los criterios considerados para la delimitación de las unidades geomorfológicas fluviales, en las fotografías aéreas, se encuentra la tonalidad, que sirvió para delimitar a las unidades geomorfológicas fluviales denominadas llanura alta de inundación y llanura baja de inundación. Dentro de las fotografías aéreas, las llanuras altas de inundación presentan tonalidades claras, que representan áreas de cultivos; la llanura baja de inundación presenta tonalidades oscuras, indicando la presencia de humedad en esas áreas, lo que conlleva a deducir que son las áreas afectadas por inundaciones. Dentro de la llanura baja de inundación se identificó la unidad denominada depresión intermitente, que presenta tonalidades oscuras, indicando la presencia de humedad dentro de las mismas. Los ríos intermitentes son los que llevan corrientes de agua posteriores a una precipitación, pero cuando carecen de flujo de agua se identifican por su tonalidad oscura.

La pendiente es un criterio importante para la delimitación de las unidades geomorfológicas fluviales como el *leveé*, el cual presenta una pendiente moderada conforme se va alejando del lecho menor hacia la llanura fluvial, aunque es notable indicar que la tonalidad también es importante debido a la identificación de cultivos sobre estas unidades geomorfológicas fluviales. Los lomeríos bajos aislados son unidades geomorfológicas también identificadas con base en el criterio de pendiente, debido a que son ligeras ondulaciones reconocidas en el área de estudio.

La forma de las unidades geomorfológicas fue también un criterio utilizado para delimitarlas. La terraza fluvial está caracterizada por presentar una forma plana, estrecha y alargada, situada sobre ambos márgenes del Río Papaloapan; el banco arenoso sin vegetación tiende a presentar una forma larga y lineal y están identificados al interior del lecho menor; los bancos arenosos con vegetación se caracterizan por presentar una forma similar a los anteriores, con la diferencia que en los que presentan vegetación, el tono para la delimitación es importante, pues indica la presencia de humedad para el desarrollo de la vegetación; las barras

marginales presentan una forma irregular debido a que están formadas de materiales no consolidados y, el *Chute* ó canal subsidiario, presenta una forma de canal con una amplitud muy reducida.

Los rasgos lineales también fueron criterios para delimitar a las unidades geomorfológicas fluviales como en los meandros, debido a que en la fotointerpretación es muy importante poder establecer los límites de estos, con la finalidad de identificar los procesos que se han manifestado sobre los mismos; los lechos menores de inundación se encuentran delimitados por rasgos lineales de forma paralela al lecho menor, donde se puede distinguir el área de inundación. El brazo de crecida se delimitó con base en los rasgos lineales, además de la tonalidad que es más oscura, indicando la presencia de humedad.

El criterio de altura se aplicó para las unidades geomorfológicas como los lomeríos, los cuales son identificados con mayor claridad al encontrarse dentro de una llanura fluvial. El *Ieveé* puede demarcarse con base en este criterio, aunque la altura es menor.

Una vez delimitadas estas unidades geomorfológicas en las fotografías aéreas se procedió a capturarlas en el Sistema de Información Geográfica (SIG), para lo cual se escanearon con una resolución de 600 dpi. A cada fotografía aérea se le creó una georeferencia, la cual es utilizada para asignar coordenadas tomándose como base el modelo digital del terreno (MDT), la distancia focal de la fotografía y la distancia promedio existente entre las cuatro marcas fiduciales de las fotografías aéreas. Posteriormente se procedió a digitalizar las unidades delimitadas sobre las fotografías aéreas con el objetivo de crear un mapa de segmentos con la unión de todos los trazos realizados en las fotografías aéreas del área de estudio. A este mapa de segmentos se le realizaron una serie de correcciones con la finalidad de que ellos no presentaran errores, existiera una coincidencia en su unión, que estuvieran trazados completamente y que se presentara una intersección adecuada entre ellos.

Posteriormente, este mapa de segmentos, previamente corregido, se transformó en un mapa de polígonos donde a cada uno de estos se le asignó un nombre con relación a la unidad que representa con base en la fotointerpretación geomorfológica a escala 1: 75,000; es en esta etapa donde se elabora el mapa geomorfológico fluvial. A este mapa se le agregaron las capas de ríos y rasgos lineales a fin de complementar la información recabada en las fotografías aéreas y así realizar una edición final para su presentación; es fundamental mencionar que se identificaron en este mapa, 36 unidades geomorfológicas fluviales, comprendiendo un total de 1769 polígonos.

## 2.5 Meteorología

Las cantidades de precipitación máxima en un día constituyen un valioso conjunto de datos para la estimación de la intensidad pluviométrica en cortos períodos de tiempo. En general, todas las estaciones pluviométricas, es decir, aquellas que cuentan con un simple pluviómetro, y las más completas, anotan por meses, la cantidad de precipitación más elevada en un día (Chow, 1994). De las doce cantidades más elevadas de los meses se puede distinguir la más cuantiosa del correspondiente año, proceso realizado en las estaciones del área de estudio, y que se menciona más adelante.

Es importante hacer hincapié en que la precipitación es el elemento climático más importante para los estudios de hidrología, porque su variación en el terreno y en el tiempo se hacen notorios en los escurrimientos de los ríos (Monsalve, 1999). De esta manera, las inundaciones se caracterizan por la ocurrencia de caudales grandes que se salen del canal de la corriente y son producidas por el exceso de precipitación que se registra sobre un área determinada, es importante conocer si las precipitaciones son producidas por algún huracán.

Durante la realización de este trabajo se consideraron catorce estaciones climatológicas, las cuales aportaron datos sobre la precipitación que se ha registrado en el área. Estas estaciones están distribuidas dentro y fuera del área de estudio, en la mayoría de ellas se tienen datos desde el año de 1955. Los meses más lluviosos, abarcan de junio a octubre, con una escasez de precipitación en los meses de noviembre a mayo. Los datos de las estaciones se organizaron y se procesaron en hojas de cálculo del programa Excel (Microsoft, 2003), con la finalidad de obtener la media de la precipitación anual. Para la obtención de los datos de precipitación se consultó el programa ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica, IMTA, 2002), el cual aporta información con relación a las estaciones climatológicas del territorio nacional, además estos datos se complementaron con el Boletín Hidrológico de la región hidrológica 28, de la SARH (1976), donde se encuentra el Río Papaloapan.

## 2.6 Hidrología.

Se puede definir que la hidrología versa sobre el agua de la Tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su influencia sobre el ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. El dominio de la hidrología abarca la historia completa del agua sobre la Tierra (Monsalve, 1999). Dentro de las principales aplicaciones de la hidrología se encuentran el estudio y construcción de obras hidráulicas, drenaje e irrigación,

aprovechamientos hidroeléctricos, abastecimiento de agua, la navegación y la regulación de los cursos de agua y control de inundaciones (Martín, 2003).

Uno de los objetivos del presente trabajo, es realizar un análisis estadístico de los datos medidos en las estaciones hidrométricas, y así establecer una dimensión de los períodos de retorno de las inundaciones con la ayuda de un programa de automatización de los métodos estadísticos en hidrología (Ruiz, 2002). El período de retorno es el tiempo promedio en años, en que el valor del caudal pico de una inundación determinada, es igualado o superado por lo menos una vez (Monsalve, 1999). Se consultó la información de las estaciones hidrométricas localizadas dentro del área de estudio, las cuales son Tuxtepec, Papalopan y Chacaltianguis (SARH, 1976).

Las mediciones hidrológicas se realizan con el fin de obtener información de sus causas, esta información se utiliza para entender mejor su comportamiento. Los procesos hidrológicos varían en el espacio y en el tiempo, además de presentar un carácter aleatorio o probabilístico. La precipitación es la fuerza motriz de la fase terrestre del ciclo hidrológico, y la naturaleza aleatoria de la precipitación, hace que la predicción de los procesos hidrológicos resultantes para un tiempo futuro siempre esté sujeta a un grado de incertidumbre y éstas, generan el requerimiento de que las mediciones hidrológicas sean observaciones hechas en el lugar de interés o cerca de éste. A pesar de que los procesos hidrológicos varían continuamente en el tiempo y en espacio, son medidos como muestras puntuales, es decir, mediciones hechas a través del tiempo en lugares fijos del espacio (Chow, 1994). Cabe hacer mención que las mediciones hidrológicas son de gran importancia dentro de los estudios de inundaciones debido a que aportan la información de las estaciones hidrométricas, como el escurrimiento, para poder realizar un análisis estadístico de los períodos de retorno y así se puedan identificar áreas con peligro a inundaciones dentro de la geomorfología fluvial.

El escurrimiento es uno de los elementos más importantes dentro de la hidrología. Comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, y la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas, además, es un elemento de gran importancia que se registra en las estaciones hidrométricas, las cuales llevan un control con base en diferentes métodos del nivel de éste sobre un río en un tiempo determinado (Monsalve, 1999). El gasto, es definido como el volumen de flujo superficial por unidad de tiempo y es la principal variable que caracteriza al flujo superficial, expresado en  $m^3/s$ . Una estación hidrométrica sirve para el establecimiento de reglas limnimétricas o de un limnógrafo en una sección del río, teniéndose que considerar los siguientes cuidados para el

establecimiento de éstas: establecerlas en un trecho rectilíneo de la corriente de agua, el más estable posible y de fácil acceso; velocidades en la sección regularmente distribuidas y no muy reducidas; localización de obras existentes fuera de la zona de ubicación de la estación hidrométrica, además de responsabilizar de los cuidados de la lectura de las reglas limnimétricas o el cambio del papel del limnógrafo a personal de confianza y por último controlar la exactitud de la curva de calibración y los trabajos del operador (Monsalve op.cit.). Los limnímetros están destinados a la observación directa del nivel de agua de los ríos. Se colocan normalmente a las orillas de estos de tal manera que el cero de la escala coincida con el fondo del cauce; otro aparato utilizado es el limnógrafo, que es un aparato que registra continuamente las variaciones del nivel del agua (Maderey, 2005). Aún no habiendo un aumento importante de escurrimiento superficial, podrá suceder una inundación en el caso de que haya alguna obstrucción en el canal natural del río, como el azolvamiento ó la ruptura de un *leveé*.

Para la representación gráfica de los gastos se utiliza el hidrograma, que es un modelo matemático que representa la respuesta de la cuenca a la acción de una lluvia de exceso; la forma del hidrograma de avenida es también importante en el estudio de un río. La duración de caudales elevados cercanos al máximo o a la pendiente de las curvas de ascenso o descenso (ésta última generalmente más suave) influyen en la acción del agua sobre el cauce. El volumen de inundación y la duración son variables importantes en el daño ocasionado por las aguas desbordadas de un río (Martín, 2003).

Un hidrograma está constituido de diferentes partes, donde se puede identificar en la Figura 2.2 b; en A, lo que se denomina como punto de levantamiento, una vez iniciada la precipitación parte de esta es interceptada por la vegetación y algunos obstáculos y es retenida en las depresiones hasta llenarlas completamente. Otra parte se infiltra en el terreno, y una vez excedida la capacidad de infiltración se inicia el escurrimiento superficial (Monsalve, 1999). En el punto B, el gasto continúa aumentando hasta alcanzar un máximo. El punto C, punto de inflexión, se presenta cuando se ha terminado el flujo sobre el terreno, es decir, el escurrimiento superficial generado por la tormenta y, en D, denominado como final del escurrimiento directo, únicamente se presenta el flujo base, lo cual indica que el escurrimiento superficial generado por la tormenta ha terminado (Aparicio, 2003). En este trabajo, los gastos máximos fueron utilizados para la creación de hidrogramas, de las tres estaciones hidrométricas del área de estudio, y así poder realizar el análisis estadístico de los períodos de retorno.

Los registros de precipitación dan como resultado una curva de masas de precipitación o la cantidad de agua que ha caído desde que se inició la tormenta. La curva de masas de las intensidades son las ordenadas de una curva denominada hietograma, mientras que en las

abscisas se representa el tiempo; en este sentido se indica que el hietograma es una gráfica que muestra la intensidad de la precipitación (Figura 2.2 a). En este trabajo se realizan mapas de la distribución espacial de la precipitación de los años en los que han ocurrido inundaciones, cuya finalidad es identificar a las estaciones meteorológicas que han registrado mayores valores y relacionarlos con las características físicas del área de estudio, además de indicar si han sido influenciados por alguna perturbación atmosférica.

Además del régimen anual, los ríos experimentan fenómenos de crecida o avenida de carácter extraordinario. En las avenidas se fija en primer lugar el caudal máximo instantáneo  $Q$ , y con los valores instantáneos se forma una secuencia que se estudia estadísticamente para caracterizar la probabilidad de ocurrencia. Un caudal  $Q$  tiene período de retorno  $T$  si la probabilidad de ser superado en un año es  $1/T$  (Martín, 2003).

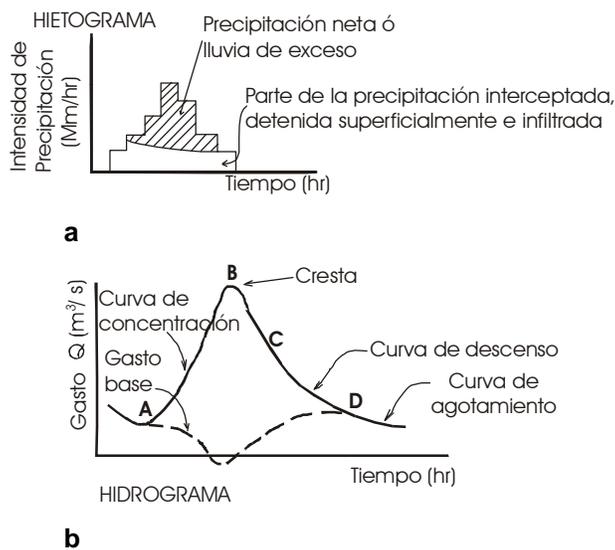


Figura. 2.2. En la figura a se muestra el hietograma y sus componentes, en la figura b se indica el hidrograma con sus principales características. En la figura b, cuando se presenta una lluvia de exceso, se manifiesta posteriormente en el hidrograma como la respuesta de la cuenca, a la acción de esa lluvia de exceso (Martín, 2003).

Los gastos hidrométricos se obtuvieron de las estaciones Tuxtepec, Papaloapan y Chacaltianguis (SARH, 1976), las dos primeras pertenecen al Estado de Oaxaca y la última al Estado de Veracruz; estas estaciones están localizadas en las localidades del mismo nombre; cabe señalar que las estaciones hidrométricas se localizan en las márgenes del Río Papaloapan, las cuales fueron consultadas en el programa BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales, CNA, 1999), el cual es una base de datos creada para la consulta de información sobre los ríos y las presas del país, estos datos son proporcionados por estaciones hidrométricas y climatológicas manejados por la CNA (Comisión Nacional del Agua) y el IMTA

(Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Dentro de este programa se consideraron los gastos máximos anuales de los años de registro de cada estación. De las tres estaciones hidrométricas, los datos obtenidos para la representación de los gastos presentaron una marcada estacionalidad entre los meses de junio a octubre, obteniéndose de estos meses, la cantidad más elevada para cada año. Posteriormente se llevó a cabo un análisis de eventos máximos con diferentes períodos de retorno tomando en cuenta los datos de las estaciones hidrométricas con las diferentes distribuciones de probabilidad que se manejan en el programa de automatización de métodos estadísticos en hidrología. El procedimiento de cálculo está basado en la correlación que se hace de la muestra de un registro hidrométrico con las diferentes distribuciones de probabilidad más usadas en hidrología y obtener una estimación de gastos máximos a futuro (Ruiz, 2002). Para el presente trabajo, se seleccionó la distribución de Gumbel, la cual es una función de valores extremos que utilizan tradicionalmente los hidrólogos para el estudio de los gastos máximos anuales en un río, y por lo tanto, para la determinación de las avenidas de diseño (Chow, 1994). El período de retorno es una medida de la probabilidad de que un evento de una determinada magnitud sea igualado o excedido por lo menos una vez en un año cualquiera. Anteriormente se ha hecho mención de que los procesos hidrológicos presentan un carácter aleatorio o probabilístico, así el empleo de este programa de automatización en el cual se puede realizar un análisis de los datos hidrométricos del área de estudio. Para algunos autores es conveniente manejar estaciones que cuenten con registros de más de 25 años para que el análisis sea confiable, con relación a los períodos de retorno (Monsalve, 1999).

Un fenómeno que incrementa el volumen de las lluvias y, en consecuencia los gastos, son los ciclones, si bien no influyen directamente en la cuenca, cuando pasan frente a ella originan las perturbaciones más importantes. Según CENAPRED (2001), existen cuatro diferentes perturbaciones ciclónicas que influyen en el área de estudio: las que tienen origen en las Antillas Menores; con origen en el Mar Caribe; con origen frente a las costas de Campeche y Tabasco y las que tienen origen en el Golfo de México.

## 2.7 Geomorfología

La geomorfología fluvial tiene como enfoques principales analizar el impacto de las inundaciones sobre la morfología de los canales y el transporte de sedimentos (Wohl, 2000). Las inundaciones son el proceso que en un corto período de tiempo (horas ó días) generan un volumen de pérdidas económicas y un mayor número de víctimas (Martín, 2003). Se puede

considerar que una inundación puede causar cambios muy evidentes a lo largo de los canales de los ríos. Este trabajo tiene como enfoque principal analizar la dinámica fluvial que se manifiesta en el río, estimando el impacto de las inundaciones dentro del área de estudio, con base en los procesos fluviales que se han identificado y en los procesos hidrológicos. Los procesos geomorfológicos fluviales son fundamentales para realizar las evaluaciones dentro de las unidades geomorfológicas fluviales identificadas en la llanura de inundación, cuando se presentan inundaciones dentro del área de estudio.

Dentro de los objetivos principales de este estudio se encuentra la elaboración de un mapa geomorfológico fluvial del Río Papaloapan. Este mapa geomorfológico se ha desarrollado con base en varias etapas, para las cuales se consultaron diversos materiales bibliográficos y cartográficos.

Un análisis de la hidrología brinda un mejor conocimiento de la geomorfología del área, debido a que la hidrología está relacionada con el movimiento y la distribución del agua en varias fases del ciclo hidrológico y coincide con algunas etapas de evolución geomorfológica (Van Zuidam, 1985). Así se establece una interrelación entre ambas ciencias.

Para la elaboración de la cartografía geomorfológica, una de las primeras etapas fue la fotointerpretación; dentro de las fotografías aéreas se identificaron y delimitaron las unidades geomorfológicas fluviales tomando en cuenta diversos aspectos como el uso de suelo, la altura relativa y los rasgos fluviales.

En lo referente a la delimitación de las unidades geomorfológicas es importante mencionar que se consideraron algunas referencias que fueron fundamentales para realizar dicha demarcación, como los trabajos de Ortiz (1979), Zavala (1985) y Aragón (2005). Meijerink (1988) realizó un estudio donde establece las Unidades de Mapeo del Terreno, las cuales describen divisiones naturales del terreno que pueden ser distinguidas sobre fotografías aéreas y se pueden verificar en campo; para estas unidades se toman parámetros, como origen específico y general del relieve, edad y tipo de relieve.

El área de estudio está localizada, en gran medida, sobre una llanura de inundación, la cual es una porción adyacente del río que es, por lo general, plana y consiste principalmente de sedimentos sin consolidar, depositados durante el actual régimen del río y es periódicamente inundada cuando el río presenta grandes flujos que conllevan a su desborde (Van Zuidam, 1985). Las inundaciones fluviales son eventos que se presentan en zonas aledañas al lecho menor por causa del desbordamiento del mismo, pero es en las partes bajas de la cuenca, cerca de la desembocadura, donde predominan los procesos de inundación. Puede

considerarse al lecho menor como el cauce por el que un río corre en épocas de estiaje, incluyendo el canal, sus márgenes están bien definidas, por lo que está delimitado claramente.

En el área de estudio, el cauce fluvial está clasificado como un río de tipo meandriforme. Leopold y Wolman (1963) clasificaron los cursos fluviales en tres grandes tipos morfológicos: rectilíneos, trezados y meandriformes. Las corrientes meandriformes se encuentran aguas abajo de las corrientes tipo trezadas y aguas arriba de los deltas dentro del sistema fluvial, siendo más comunes en regiones con planicie costera. Las corrientes de tipo meandriforme se definen exclusivamente en función de un índice de sinuosidad, mayor a 1.5. Este índice se obtiene midiendo la longitud de un tramo de curso meándrico, dividido por la línea media que se obtiene entre los puntos extremos que contienen al mismo trecho del curso en cuestión (Ortiz *et al.* 1994). A medida que el índice de sinuosidad es más grande, mayor será la dinámica fluvial del curso. La morfología meandriforme se ve favorecida por la existencia de pendientes suaves y por la presencia de unas márgenes de canal relativamente estables.

La sedimentación dentro de las corrientes tipo meandriformes se lleva a cabo casi sobre la planicie de inundación y dependen del clima y la distancia al canal activo. Cuando el canal del río migra por su acción erosiva, los diferentes ambientes del sistema migran también lateralmente y los sedimentos depositados en ambientes continuos llegan a sobreponerse (Davis, 1992). Dentro del cauce, en el área donde el agua presenta un movimiento lento se depositan los sedimentos. Una línea a través de las secciones profundas del canal está referida como el *talweg*, este no permanece en el centro del canal, en lugar de ello éste migra de lado a lado dando ascenso a una componente lateral del canal de la corriente. El cambio del *talweg* y la subsecuente diferencia entre erosión y depositación tiende a la formación de meandros. La formación de meandros está relacionada con la energía dinámica del flujo de agua y la carga de sedimentos. En general la tasa de sedimentación es muy baja, de forma que incluso en las inundaciones de gran magnitud sólo se llegan a depositar algunos centímetros de arcillas, limos y en ocasiones arenas (Marzo, 1992); la granulometría de los sedimentos varía en tamaño, ya que los materiales van de gruesos a finos a medida que se alejan del cauce principal.

Los principales ambientes y facies deposicionales de sedimentos de un río se distinguen en dos tipos principales de depósitos o asociaciones de facies: de canal y de desbordamiento (*channel* y *overbank deposits*). Los primeros que incluyen depósitos de fondo de canal (*channel lag*) y de barra de meandro, se originan esencialmente por acreción lateral y yacen bajo los segundos, que se originan por acreción vertical e incluyen: depósitos de diques naturales (*levees*), de llanura de inundación (*floodplain*) y de lóbulos de derrame (*crevasse-splay*). Otro

tipo de depósito, con características intermedias entre los dos citados, son los de relleno de canal abandonado (*channel-fill deposits*) (Marzo, 1992).

Los depósitos de crecimiento sedimentario lateral son el resultado de la sedimentación que incluye depósitos de fondo de canal y de barra de meandro; este tipo de depósito se presenta debido a que sobre la margen externa del arco ocurre la erosión, este material es transportado y depositado en la margen interna del arco siguiente, así los depósitos de canal se presentan constituyendo un cuerpo arenoso tabular denominado barra de meandro. Para algunos autores las líneas de acreción se encuentran relacionadas con el proceso denominado migración lateral del meandro, en el cual debido a este desplazamiento se pueden desarrollar las barras de meandro.

Con relación a los depósitos de crecimiento sedimentario vertical estos están esencialmente formados por materiales de granulometría fina, limos y arcillas, con pequeñas proporciones de arena que se hacen más abundantes hacia las cercanías del canal. Dentro de estas formas se encuentran los diques naturales o *leveés*, los cuales se originan a partir de los sedimentos de mayor granulometría y, por lo general, resultan en una alternancia de arenas, limos y arcillas. Estos depósitos de dique natural tienen poco potencial de preservación, ya que se disponen sobre la margen cóncava, por lo que tienden a ser erosionados, salvo en el momento en el que el canal se abandona (Marzo, 1992).

El Río Papaloapan, al ser una corriente de tipo meandriforme (en el capítulo de Geomorfología se indica en qué sectores se identifica) presenta características morfológicas propias de estas corrientes, acompañados de procesos que ocurren tanto en el lecho menor como en la llanura de inundación del área de estudio (Ritter *et al.*, 1995).

Los meandros son corrientes que migran libremente en una llanura aluvial ocupando una parte muy pequeña de esta planicie, a este proceso se le denomina cinturón de meandros. Este cinturón comprende únicamente la llanura aluvial limitada por las tangentes a las partes más externas de los meandros activos, además de incluir al canal activo como a los meandros abandonados (Marzo, 1992).

Para la descripción de la geometría de un meandro se consideran los siguientes parámetros: (L) longitud de onda del meandro, (Rm) radio del meandro y (W) anchura del cauce (Figura 2. 3) (Marzo, 1992).

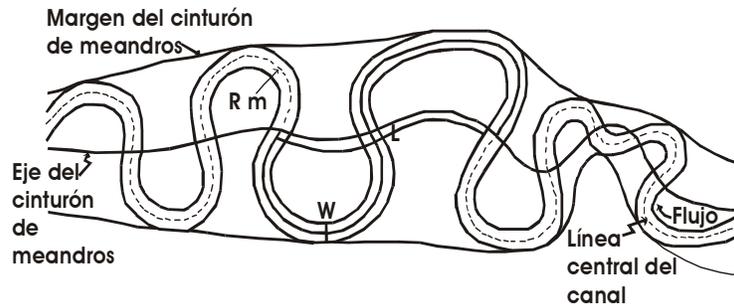


Figura. 2.3 Elementos morfológicos de un río meandriforme, en donde  $L$  es la longitud de onda del meandro,  $R_m$  indica el radio del meandro y  $W$  la anchura del cauce (Marzo, 1992)

Los meandros manifiestan una perturbación del flujo: la fuerza centrífuga tiende a acumular el agua y a desplazar la línea de máxima velocidad de la corriente hacia la margen cóncava. Dentro de ésta se genera un exceso de presión, mientras que en el convexo existe un déficit. Las máximas velocidades y potencia de la corriente se alcanzan en las cercanías de la margen cóncava, decreciendo hacia la margen convexa. A este proceso se le denomina flujo helicoidal y es característico de las corrientes tipo meandriformes; este esquema de flujo origina que los márgenes externos sean erosivos, denominados *pools* y que en los internos domine la sedimentación en forma de barras de meandros o *scroll* (Figura 2.4) (Marzo, 1992). Dentro de las márgenes internas, en algunas áreas donde se forman barras marginales, se encuentran algunos canales subsidiarios o "*chutes*" (Figura 2.5), que son ocupados únicamente durante épocas de inundaciones, los cuales transportan gran cantidad de sedimentos y a medida de que el nivel de agua va descendiendo estos quedan ocupando el canal subsidiario de manera que forman una barrera entre al lecho menor y estos. Este tipo de canales se identificó sobre algunas áreas de la llanura de inundación del Río Papaloapan, aunque son áreas muy limitadas.

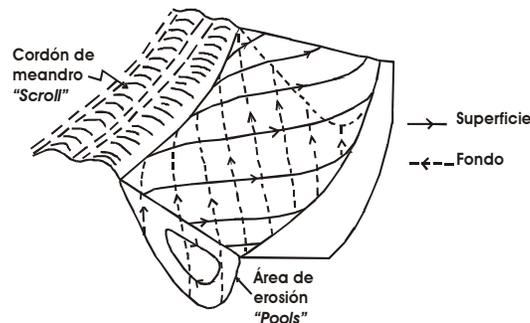


Figura 2.4. Modelo de flujo helicoidal de meandros (Marzo, 1992).

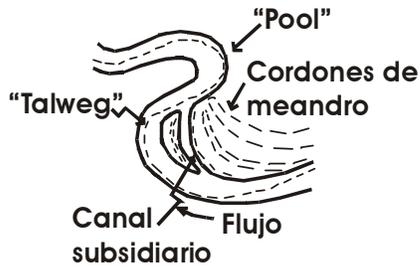


Figura 2.5. Esquema de un canal subsidiario o "chute".

Debido a la dinámica de migración que presentan las corrientes meandriformes, se presentan procesos en los cuales los meandros se abandonan periódicamente, este proceso se manifiesta a partir de dos mecanismos denominados estrangulamiento (*neck cut-off*) o porque el curso acorta su trayectoria y el acortamiento (*chute cut-off*) donde se profundizan las depresiones existentes entre los cordones de meandro (Figura 2.6).

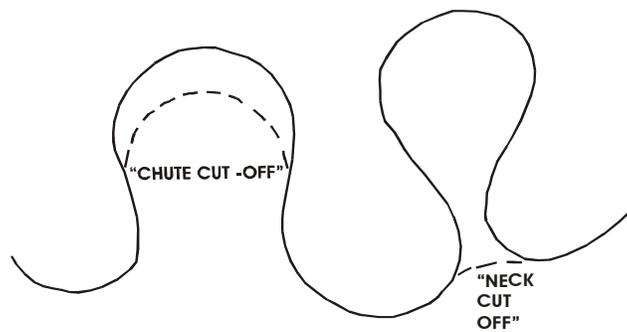


Figura 2.6. Acortamiento y estrangulamiento de un meandro.

En el primer caso, el abandono se produce de manera brusca y el canal abandonado se cierra rápidamente en sus extremos, creándose un lago de meandro (lagos *Oxbow*). Este lago recibe sólo sedimento fino, transportado en suspensión durante las crecidas. Este tipo de lagos se presentan sobre ambas márgenes del Río Papaloapan.

En el segundo caso, el nuevo curso canaliza más y más caudal, de manera que la actividad en el caudal antiguo se reduce progresivamente. Ello se traduce en su relleno gradual: primero por carga de fondo y más adelante, al obstruirse la comunicación, por las arcillas y limos introducidos en suspensión (Marzo, 1992). Este tipo de formas se encuentran distribuidos a lo largo de la llanura fluvial, variando en forma y tamaño.

Cuando en el río principal se presenta un desbordamiento, provoca flujos divergentes hacia áreas deprimidas laterales. El exceso de agua es difícil de drenar en estos casos, porque los flujos desbordados no pueden volver al canal principal y, a menudo, son evacuados mediante corrientes paralelas ó *yazoo* (Ayala *et al.*, 2002), que es una corriente tributaria que corre paralela al río principal por una cierta distancia (Goudie *et al.*,1994). Es importante indicar que el Río Acula se localiza en la margen izquierda del Río Papaloapan, el cual se identificó como una corriente tipo *yazoo*, que desemboca en la Laguna de Alvarado. La ubicación de este río permitió delimitar el área de estudio en esta área.

Los procesos fluviales mencionados son característicos de las corrientes meandriiformes y se encuentran presentes sobre el área de estudio; estos procesos fluviales se identificaron dentro de las unidades geomorfológicas que están representadas sobre el mapa geomorfológico fluvial. Es importante recalcar que el entendimiento de estos procesos es de gran importancia ya que se puede interpretar la dinámica fluvial que se está presentando en el área de estudio.

## 2.8 Identificación de áreas con peligro a inundación.

En la delimitación de las unidades geomorfológicas con base en las fotografías aéreas, se obtuvieron las principales unidades denominadas: llanura alta de inundación y llanura baja de inundación. La llanura alta de inundación se localiza junto al lecho menor, cuando la intensa sedimentación ha desarrollado diques naturales paralelos al río, situándolos en un plano más elevado respecto al resto de la llanura (Strahler y Strahler 1989). La llanura baja de inundación corresponde a zonas topográficamente deprimidas con drenaje deficiente, relativamente alejadas del lecho menor (Zavala, 1985).

La llanura alta de inundación corresponde a áreas que con poca frecuencia tienden a ser inundadas. Dentro de los elementos considerados para delimitar la llanura alta de inundación, en las fotografías aéreas, se toman en cuenta los elementos como la vegetación, la altura relativa y el uso de suelo, este último sobre el área de estudio es en gran parte agrícola; además los cultivos con relación a la altitud del área de estudio indican que estos se encuentran en áreas un poco más elevadas con relación a la llanura baja. Sobre la llanura alta de inundación también se incluyeron otras unidades geomorfológicas como los lomeríos, tanto estructurales como eólicos y fueron clasificados en lomeríos altos, medios y bajos, con base a su altura relativa y a las características que presentan sobre el terreno. Otra unidad clasificada dentro de la llanura alta de inundación son los *leveés*, los cuales se presentan sobre las

márgenes del lecho menor. Los cuerpos de agua perennes son unidades que permanecen con agua todo el año y en algunos eventos extraordinarios pueden variar de tamaño; esta característica se identifica también en los ríos perennes, los cuales aumentan el tamaño de su cauce. Las terrazas fluviales también se identificaron sobre esta llanura alta de inundación. Por último, el lecho menor corresponde al cauce principal del área de estudio, en este caso del Río Papaloapan, no se ve afectado por las inundaciones, únicamente se ve modificado en su curso por ellas.

Para la llanura baja de inundación se consideraron los mismos elementos utilizados en la llanura alta de inundación, como vegetación, uso de suelo y altura relativa. Esta llanura se caracteriza por presentar áreas deprimidas, y por consiguiente, es un área muy propensa a inundaciones que, al presentarse, el agua queda estancada en las depresiones debido a que no alcanza a retornar al lecho menor al bajar los niveles, lo que propicia que se manifiesten estos procesos de inundación, donde la vegetación es un elemento importante. Dentro de la fotointerpretación geomorfológica estas áreas presentan humedad lo que conlleva al desarrollo de una vegetación de manglar, caracterizándose por crecer en un alto intervalo de salinidad, pero las mejores condiciones son las salobres (de la Lanza Espino *et al.*, 1996); asimismo la densa vegetación de manglar reduce aún más la velocidad de escorrentía (Ortiz, 1979), siendo éstas donde se estanca el agua; el área más predominante donde se localiza este tipo de vegetación se encuentra en las cercanías de la desembocadura del Río Papaloapan, en los alrededores de la Laguna de Alvarado. Otras unidades que se identificaron en la llanura baja de inundación son los meandros abandonados, lecho mayor de inundación, cuerpos de agua intermitente, terrazas y algunas áreas donde se encuentran las playas de depresión perenne.

## CAPÍTULO 3. HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA.

### 3.1 Introducción

Para el estudio de la geomorfología fluvial se consideraron los elementos hidrológicos y meteorológicos, con los cuales se complementa la información y puede indicarse cuáles son las áreas que pueden presentar peligro a inundación. En este contexto se describen las principales inundaciones que han afectado al área de estudio y se considera si han sido influenciadas por ciclones. La justificación principal para considerar a estas inundaciones radica en el peligro que han presentado dentro de las principales localidades dentro del área de estudio, además del gasto registrado en las estaciones hidrométricas cuando han ocurrido los desbordamientos del Río Papaloapan.

Son considerados los resultados del análisis estadístico de las estaciones hidrométricas Tuxtepec, Papaloapan y Chacaltianguis, con el objetivo de obtener el gasto máximo para establecer el período de retorno en cada una de ellas.

En el área de estudio se identificaron diez estaciones meteorológicas, considerándose cuatro más fuera del área (Fig. 3.1) con el objetivo de obtener una mayor cobertura espacial de la precipitación y analizar los efectos que causa sobre el Río Papaloapan.

### 3.2 Hidrología

Esta se ha utilizado para conocer la dinámica fluvial del río Papaloapan, con base en los gastos obtenidos de las estaciones hidrométricas y posteriormente realizar un análisis estadístico con la finalidad de establecer una medida de los períodos de retorno de las inundaciones.

Para las tres estaciones hidrométricas, se indican los años de registro en la Tabla 3.1. Es importante indicar que las estaciones Tuxtepec y Papaloapan pertenecen al Estado de Oaxaca y la estación Chacaltianguis corresponde al Estado de Veracruz.

Las estaciones hidrométricas Tuxtepec y Papaloapan están establecidas en la parte inicial del Río Papaloapan y la estación Chacaltianguis en la parte media del río. En lo referente a la estación hidrométrica Tuxtepec, contiene información de gastos hidrométricos, ocasionados por las precipitaciones generadas en las partes altas de la cuenca, recordando que aquí se registran los gastos de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, principales formadores del Río Papaloapan. Para las principales inundaciones registradas en el área de estudio se toman como

referencia los gastos hidrométricos de las estaciones Papaloapan y Chacaltianguis. En la desembocadura no se identificaron estaciones hidrométricas que pudieran utilizarse para la realización de este trabajo.

Tabla 3.1. Estaciones hidrométricas y años de registro (CNA, 1999).

Estación Hidrométrica	Años de registro
Tuxtepec	1960-1976
Papaloapan	1947-1976,1980,1982-1994
Chacaltianguis	1973-1976, 1982-1985, 1987-1993

### 3.3 Meteorología

La precipitación es el elemento más importante para los estudios de hidrología, porque su variación en el terreno y en el tiempo se hacen notorios en los escurrimientos de los ríos (Monsalve, 1999). Cuando los escurrimientos son altos, frecuentemente tienden a exceder la capacidad del canal principal del río, causando un desbordamiento del agua, lo que provoca una inundación (Maza, 1987). Los datos de precipitaciones son registradas en las estaciones meteorológicas. Los meses en los cuales se registraron las precipitaciones que han ocasionado las principales inundaciones, afectando al área de estudio, abarcan de los meses de junio a octubre, aunque los registros comprenden diferentes períodos para cada una de estas estaciones meteorológicas.

En la Tabla 3.2 se indican las estaciones meteorológicas consideradas en este trabajo, mostrando la clave de la estación con base en el Extractor Rápido de Información Climatológica (IMTA, 2002), considerando los años de registro para cada una de ellas. En algunas estaciones se cuentan con períodos que abarcan una cantidad considerable de años y en otras se cuentan con varios períodos de registro.

Tabla 3.2. Estaciones meteorológicas y años de registro (IMTA, 2002).

Clave	Estación	Años de registro	Clave	Estación	Años de registro
30009	Alvarado	1955-1979	30117	Paraíso Novillero	1955-1984, 1991-1997
30069	Ignacio la Llave	1955-1979	30025	Ciudad Alemán	1955-1997
30183	Tlacotalpan	1955-1976	30121	Otatitlán	1955-1990
30216	Naranjal	1956-1959, 1961-1971, 1973-1976	20084	Papaloapan SJB	1949-1950, 1952-1979, 1992-1993, 1995
30088	Las Charcas	1956-1979, 1981-1984	30044	Dobladero	1956-1980
30096	Los Naranjos	1968-1979, 1982	20172	Tuxtepec	1951-1984, 1991, 1992, 1995, 1997
30031	Cosamaloapan	1955-1983	20262	Papelera Tuxtepec	1975, 1977-1979

### 3.4 Registro histórico de las principales inundaciones.

La cuenca del Río Papaloapan, por su configuración topográfica y los múltiples ríos tributarios, históricamente ha sido propensa a las inundaciones como consecuencia de la creciente del río (Tejeda, 2005). La variación de los flujos del río depende de la distribución de la precipitación en el tiempo y el espacio (Maza, 1987). Del análisis de los gastos máximos dentro del área del Río Papaloapan se determinaron diecisiete casos, en los cuales se presentaron inundaciones, además se indicaron si han sido influenciados por algún evento meteorológico. Desde luego, el paso cercano de tormentas o ciclones tropicales pueden ser la causa de las inundaciones en el Estado de Veracruz. Los años de registro abarcan de 1944 al año de 1994. Es fundamental mencionar que en el año de 1944 se produjo una inundación, pero no se cuentan con registros del gasto en la estación Papaloapan, además de carecer de información de precipitación de las estaciones meteorológicas para este año.

Los años de 1944, 1950, 1952, 1954, 1955, 1958, 1969, 1973, 1974 y 1975 son considerados por CENAPRED (2001), como años en los que se presentaron inundaciones. Los años 1978, 1981, 1991, 1992, 1993 y 1994 son años que se obtuvieron dentro del programa BANDAS (CNA, 1999) en los cuales también se han presentado inundaciones. Para el año 2005 sólo se realiza una estimación debido a que se carece de información meteorológica e hidrométrica de la inundación causada por el huracán Stan (Tejeda, 2005).

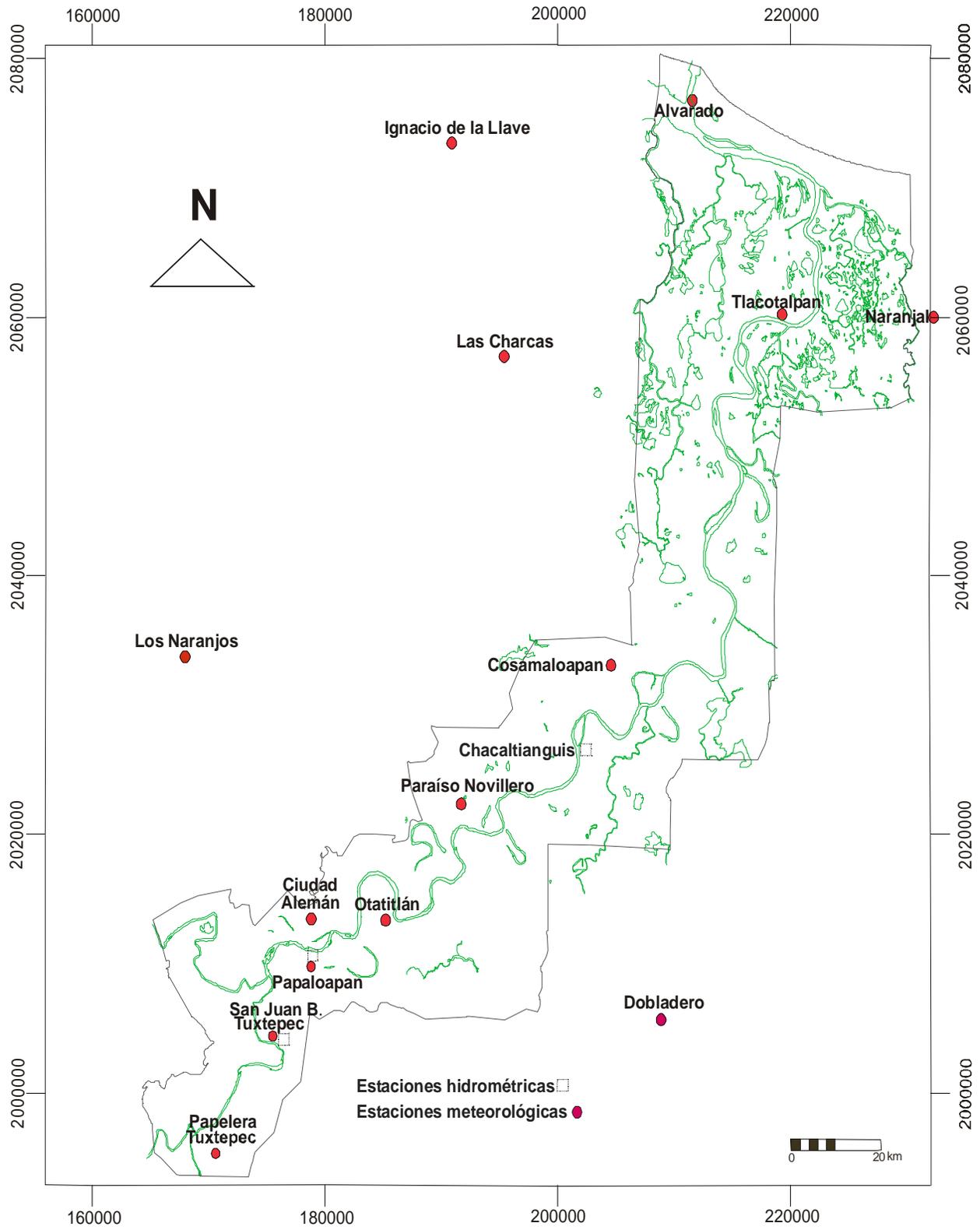


Fig. 3.1. Estaciones hidrométricas y meteorológicas del área de estudio

Para el año de 1944, del 20 al 27 de septiembre, se presentó una inundación muy severa sobre el Río Papaloapan, producto de un ciclón que se registró con origen en las Antillas Menores, afectando principalmente a la localidad de Tuxtepec. No existe información meteorológica en las estaciones localizadas en el área de estudio en la cual se puedan obtener los valores de precipitación registrados en esta fecha. Para los datos hidrométricos solo se dispone de algunas estimaciones de los gastos máximos ocurridos en esas fechas, siendo de 10,000 m<sup>3</sup>/s en la estación Tuxtepec; para el día 26 de septiembre a las 6:00 de la tarde, el nivel del río solo había bajado 3 cm (CENAPRED, 2001). Según Tejeda (2005), en las partes más bajas de la localidad de Tuxtepec, el agua llegó hasta los 9 y 10 metros de altura, sepultando plantas, casas, personas y animales. Todas las poblaciones ribereñas, desde Tuxtepec hasta Alvarado, quedaron sumergidas. En la cuenca del Papaloapan se recuerda como la mayor inundación del siglo XX (Tejeda, 2005).

En el año de 1950, en el mes de octubre, se presentó un huracán; de los días 10 al 13 de ese mes se registró la precipitación más intensa en la estación meteorológica Papaloapan, obteniéndose el valor mayor anual con 590 mm. La estación hidrométrica Papaloapan registró un gasto máximo de 6,228 m<sup>3</sup>/s el día 13 de octubre. Esto se relaciona a que del día 8 al 10 de octubre de 1950 se presentó el huracán Item, que tuvo sus orígenes en las costas de Tabasco y Campeche y finalmente tocó tierra en el puerto de Veracruz. Este huracán fue la causa para que se registraran intensas precipitaciones, lo que provocó a que se presentaran elevados gastos que se manifestaron en el Río Papaloapan. Según la CNA (1992), las principales localidades afectadas en esta inundación fueron Alvarado, Tlacotalpan, Cosamaloapan, Tuxtepec, Papaloapan, Otatitlán, Paraíso Novillero y Chacaltianguis.

Otro evento de inundación se registró en el año de 1952, para el cual se cuenta con los registros máximos de precipitación que ocurrieron los días 11 al 23 de junio, con base en la información del programa ERIC (IMTA, 2002) y de los archivos de la Comisión del Papaloapan (SRH, 1977). La máxima precipitación anual se registró en la estación Papaloapan con 745 mm en el mes de junio, lo cual tiene relación con lo antes mencionado. El gasto máximo registrado en la estación Papaloapan fue de 5,358 m<sup>3</sup>/s, aunque no se conoce la fecha exacta. Para este año no se cuenta con algún registro de alguna perturbación atmosférica que tuviera influencia para que se presentara esta inundación. Las localidades afectadas por esta inundación fueron Papaloapan y Otatitlán (CNA, 1992).

Para la inundación que se presentó en el año de 1954, la estación Papaloapan registró 696 mm de precipitación máxima anual en el mes de junio, entre los días 27 de junio al 3 de julio, y aunque abarca pocos días del mes de julio, se considera a junio como el mes con el

registro máximo anual. El gasto máximo anual de 4,628 m<sup>3</sup>/s se registró el día 3 de julio en la estación Papaloapan. Las intensas precipitaciones fueron ocasionadas por el huracán No. 3, el cual tuvo sus orígenes en el Pacífico, cerca de la costa chiapaneca, dando lugar a que se presentarán las inundaciones de julio de 1954. Este huracán tuvo una trayectoria paralela a la costa y aunque se manifestó sobre el Pacífico, tuvo influencia sobre el área de estudio.

En el año de 1955 se presentan dos períodos de inundación, en el mes de julio y posteriormente en el mes de septiembre. Para el mes de julio, la estación meteorológica Tuxtepec registró el máximo de precipitación mensual con 969 mm (CNA, 1999), entre los días 6 al 13 de julio. La estación hidrométrica Papaloapan registró un gasto máximo de 4,029 m<sup>3</sup>/s (CENAPRED, 2001). Para el mes de septiembre, del día 1 al 8 de ese mismo año, la estación meteorológica Tlacotalpan registró el máximo de precipitación mensual con 913 mm, para los gastos máximos la estación Papaloapan registró 4,265 m<sup>3</sup>/s el día 5 de septiembre. En este año se presentó el Huracán Gladis del 4 al 6 de septiembre, el cual se formó en el Golfo de México; el mes de septiembre, de este año, fue considerado como año de inundación por CENAPRED (2001).

Para la inundación acontecida en octubre de 1958, el gasto máximo se registró en la estación hidrométrica Papaloapan con 6,825 m<sup>3</sup>/s y con 962 mm en la estación meteorológica Tuxtepec. Las intensas precipitaciones fueron generadas por el huracán, No.1, que tuvo sus orígenes en las costas de Guerrero. Las principales localidades afectadas fueron Chacaltinaguis y Papaloapan (CNA, 1992).

En el año de 1969 la estación Papaloapan registró 1,045 mm de precipitación, debido a las precipitaciones del día 26 de agosto y hasta el día 3 de septiembre. El gasto máximo registrado corresponde a la estación hidrométrica Papaloapan con 6,850 m<sup>3</sup>/s, el día 2 de septiembre. El huracán Francelia se presentó desde el 24 de agosto al 4 de septiembre, el cual tuvo su origen en las Antillas Menores, terminando su recorrido en las costas de Belice, generando intensas precipitaciones que ocasionaron una inundación, la cual afectó a las localidades de Tlacotalpan, Cosamaloapan, Otatitlán, Papaloapan, Tuxtepec y Otatitlán (CNA, 1992).

En la inundación del año 1973, se registraron en la estación Tuxtepec los valores máximos de precipitación y de gastos máximos, siendo de 566 mm para la precipitación, registrada en el mes de junio durante los días 28 al 30 de junio y en la estación hidrométrica Papaloapan se registraron 3,700 m<sup>3</sup>/s en los primeros días del mes de julio, lo que conduce a la explicación del período de respuesta hidrológica de una cuenca posterior a la precipitación, debido a que la precipitación se presenta en la estación meteorológica de Tuxtepec y, por

consiguiente, se manifiesta esta cantidad de precipitación, aguas abajo, en la estación hidrométrica Papaloapan.

En 1974 se manifestó una depresión tropical ocasionando una inundación en el área de estudio. Del 16 al 21 de septiembre se presentaron intensas precipitaciones, registrándose 372 mm el día 20, en la estación Papaloapan; con relación al gasto máximo se registraron 3,846 m<sup>3</sup>/s, en la estación hidrométrica Papaloapan. La estación hidrométrica Tuxtepec registró 4,830 m<sup>3</sup>/s, aunque puede inferirse que esta estación contiene los registros de los gastos que provienen de las precipitaciones de las partes altas de la cuenca. El Huracán Fifi se presentó del 14 al 22 de septiembre, iniciando en el Mar Caribe, atravesando el sur del país, hasta llegar a las costas del Pacífico. Es notable indicar que este huracán tuvo una repercusión en la parte alta de la cuenca del Río Papaloapan, influyendo en los registros de la estación hidrométrica Tuxtepec. De las localidades, únicamente Papaloapan fue afectada por esta inundación, con base en información de CNA (1992).

Un huracán se hizo presente en el mes de septiembre del año de 1975, generando una inundación. La estación meteorológica de Tuxtepec registró 395 mm de precipitación, del 13 al 16 de septiembre, repercutiendo aguas abajo del río, debido a que en la estación hidrométrica Papaloapan se registraron 4,630 m<sup>3</sup>/s de gasto máximo el día 16 de septiembre, siendo ambos valores los máximos en ese año. Aunque en la estación Tuxtepec se registraron 5,120 m<sup>3</sup>/s, correspondiendo a las intensas precipitaciones ocurridas en las partes altas de la cuenca, no puede indicarse que contenga el registro máximo del gasto, debido a la respuesta hidrológica de una cuenca posterior a la precipitación. El Huracán Eloise tuvo presencia del 13 al 24 de septiembre, teniendo su origen en el Caribe, tocando la Península de Yucatán, prosiguiendo hacia el norte e influyó en el área de estudio para que se presentaran estos registros y posteriormente la inundación del año 1975.

En el año de 1978 en la estación hidrométrica Papaloapan se registró un gasto máximo de 2,338 m<sup>3</sup>/s y 695 mm de precipitación en la misma estación. El Huracán Greta se presentó del 13 al 20 de septiembre, iniciando en el Mar Caribe y terminando su recorrido en el territorio nacional. Con los datos anteriormente indicados, se presentó una inundación en el área de estudio.

Para la inundación de 1981 se registraron 566 mm de precipitación en la estación meteorológica Tuxtepec y 5,275 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Papaloapan el día 28 de agosto, la respuesta hidrológica es muy evidente en esta inundación. La Tormenta Tropical Irwin se presentó de los días 27 al 31 de agosto, la cual se identificó en las costas de

Michoacán para terminar su recorrido en la Península de Baja California, afectando a las localidades de Chacaltianguis, Otatitlán, Tlacotalpan, Cosamaloapan y Tuxtepec (CNA, 1992).

En el año de 1991 se registraron 2,690 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Papaloapan el día 9 de octubre, siendo un gasto suficiente para el desborde del Río Papaloapan, con una lectura de la escala de 12.74 m; para la precipitación se registraron 621 mm en la estación Tuxtepec. Esta inundación se vio influenciada por el Huracán Marty que se presentó en el Pacífico del día 7 al 18 de octubre, iniciando en las costas de Chiapas y terminando su recorrido en el interior del Océano Pacífico, afectando a la localidad de Tlacotalpan (CNA, 1992).

Para 1992 se registraron 406 mm de precipitación en la estación Papaloapan, del día 10 al 12 de septiembre y 2,680 m<sup>3</sup>/s de gasto máximo en la estación hidrométrica Papaloapan el día 13 de septiembre. Esta inundación se derivó debido a una depresión tropical afectando a las localidades de Tlacotalpan y rancherías aledañas a esta población (CNA, 1992).

En el año de 1993 se registraron 762 mm de precipitación en la estación Ciudad Alemán, de los días 15 al 22 de junio. En la estación hidrométrica Papaloapan se registraron 2,660 m<sup>3</sup>/s, el día 18, suficiente para generar una inundación. En este año no se cuenta con registro de alguna perturbación atmosférica que se presentara en el área de estudio.

En el año de 1995 se registraron 561 mm de precipitación en la estación Papaloapan en el mes de Julio de los días 5 al 9, con un gasto de 2,860 m<sup>3</sup>/s y fue considerado como año de inundación, aunque las principales localidades del área de estudio no fueron afectadas durante la misma.

En el año 2005, durante los primeros días de octubre, las intensas precipitaciones provocadas por el Huracán Stan, conllevaron al desbordamiento del Río Papaloapan. La llegada del Huracán Stan estaba prevista para ocurrir en Antón Lizardo; unas horas antes empezó a cambiar su trayectoria y entró a tierra 100 km al sur (Tejeda, 2005). Se carece de datos precisos de precipitación y de gastos hidrométricos de las estaciones para referirse a la inundación de este año.

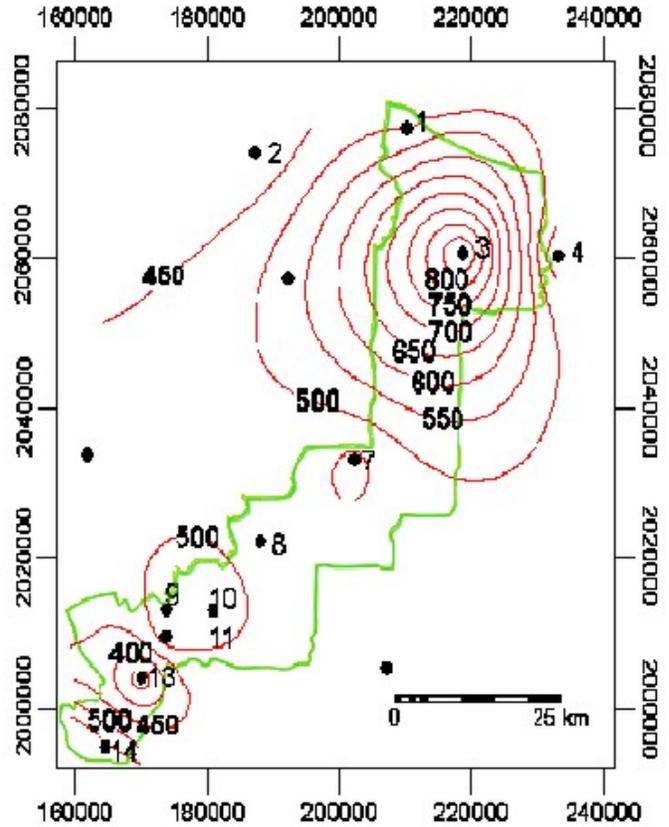
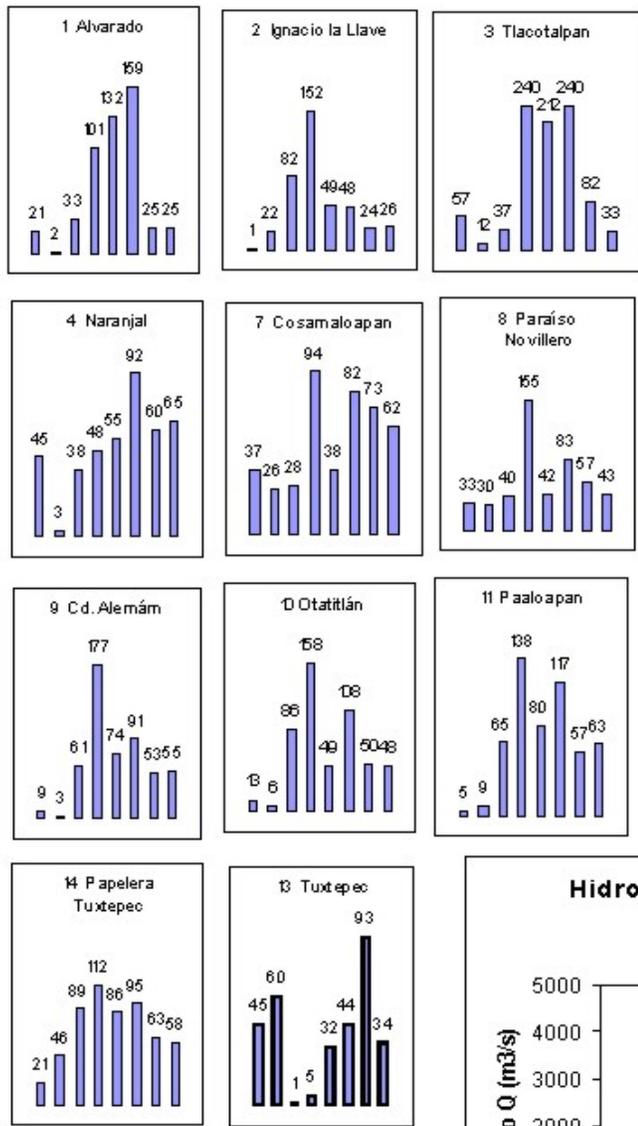
3.5 Distribución de la precipitación cuando se han presentado inundaciones en los años 1955, 1969, 1975 y 1981.

En este apartado se realiza una descripción del comportamiento que presentaron las precipitaciones que generaron inundaciones en el área de estudio. Maza (1987), indica que las variaciones en el flujo del río dependen de la distribución de la precipitación en la cuenca en el tiempo y en el espacio. Con base en lo anterior, se lleva a cabo una descripción de la

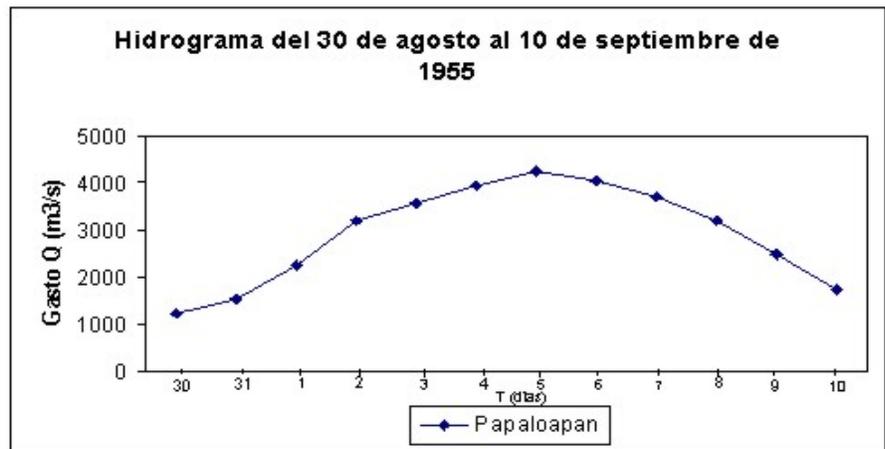
distribución de la precipitación, asimismo, se indica el gasto máximo registrado. Son considerados los años de 1955, 1969, 1975 y 1981, en los cuales la precipitación mantuvo un comportamiento relacionado con los huracanes, que fueron un factor determinante para que se presentara el desbordamiento del Río Papaloapan. La causa principal para la consideración de estos años se debe al mayor registro de datos de las estaciones meteorológicas a diferencia de los otros años registrados con inundaciones, en las cuales se carecía de suficiente información en dichas estaciones.

Para el año de 1955 se cuenta con el registro de once estaciones meteorológicas, del 1 al 8 de septiembre. La presencia del Huracán Gladis, influyó notablemente para que se presentaran elevados niveles de precipitación (Fig. 3.2). En las estaciones Tuxtepec, Papelera Tuxtepec, Ciudad Alemán, Otatitlán y Papaloapan se registraron intensas precipitaciones, aunque es importante señalar que estas provienen de las elevaciones localizadas al oeste de Tuxtepec, donde influye un tipo de clima y vegetación diferente en comparación con el área de estudio. Las estaciones Papelera Tuxtepec y Tuxtepec presentaron un registro total de 570 mm del día 1 al 8 de septiembre (Fig. 3.2). Como resultado de estas precipitaciones que se presentaron en el área donde se ubican estas cinco estaciones, anteriormente mencionadas, la estación hidrométrica Papaloapan registró un gasto de  $4,029 \text{ m}^3/\text{s}$  el día 5 de septiembre (Fig.3.2). Las seis estaciones meteorológicas restantes consideradas para este año, se encuentran ubicadas aguas abajo y en las cercanías de la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México. La estación meteorológica Tlacotalpan fue la que registró el mayor valor de precipitación del 1 al 8 de septiembre con 913 mm (Fig. 3.2) Las estaciones meteorológicas Alvarado, Ignacio la Llave y Naranjal registraron 498, 404 y 406 mm de precipitación. El Río Papaloapan al dirigirse hacia su desembocadura, mantenía un gasto de  $4,029 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrado en la estación Papaloapan y aunado a esto, recibió por ambas márgenes el flujo de sus tributarios y la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas del área de la desembocadura, ocasionando un desbordamiento del río. Con relación al mapa de isoyetas, el rango de precipitación de las estaciones meteorológicas, va de los 400 a los 800 mm; en el área donde se ubican las estaciones aguas arriba, los valores van de los 400 a 550 mm y en el área de la desembocadura del río se encuentran valores que van de los 500 a los 800 mm (Fig. 3.2), estos últimos más elevados debido a la influencia del Huracán Gladis. Para el hidrograma, el tiempo de crecida fue de siete días y el tiempo base fue de nueve días.

Gráficas de precipitación (en mm), del 1 al 8 de septiembre de 1955. Los números de cada estación corresponden a su localización en el mapa.



Precipitación acumulada (en mm) del 1 al 8 de septiembre de 1955.



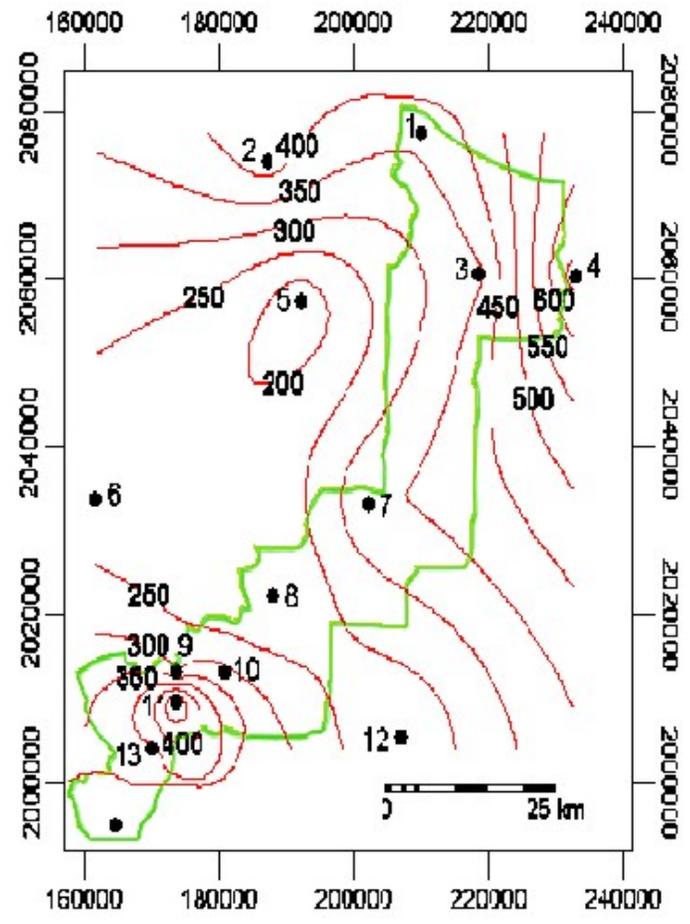
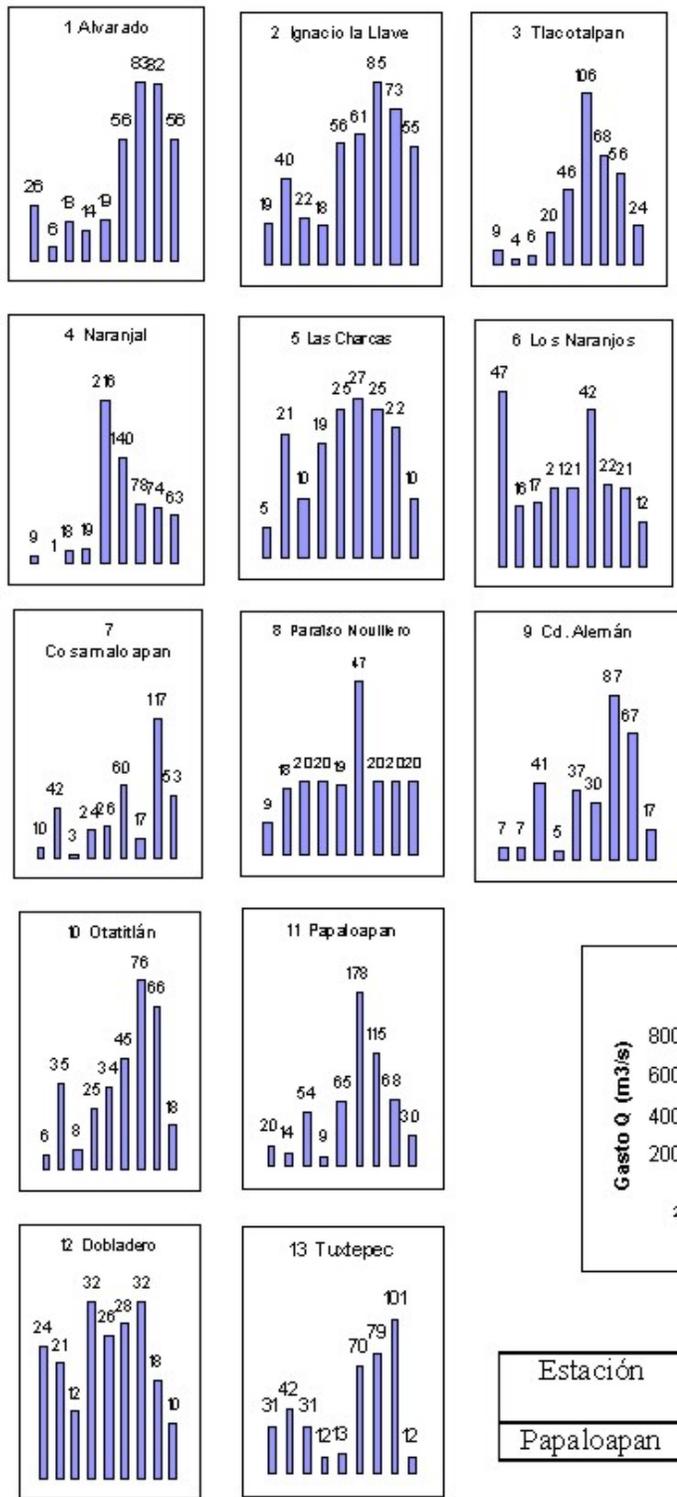
Estación	Mes	Día	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)
Papaloapan	Septiembre	5	4,265

Fig. 3.2 Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de Septiembre de 1955.

Para el año de 1969, en trece estaciones meteorológicas se registraron precipitaciones. El Huracán Francelia se presentó del día 24 de agosto al 4 de septiembre, formándose en las Antillas Menores y terminando su recorrido en las costas de Belice, influyendo para que se registraran intensas precipitaciones. Las estaciones meteorológicas presentan registros de precipitación del día 26 de agosto al 3 de septiembre; la estación meteorológica Papaloapan tuvo el mayor valor con 553 mm de precipitación (Fig. 3.3). Es conveniente indicar que la estación meteorológica Naranjal registró 618 mm de precipitación, superando al de la estación Papaloapan, pero la estación Naranjal se ubica en la cercanía de la desembocadura del Río Papaloapan, no propiamente dentro del área de estudio (Fig. 3.3). Con las intensas precipitaciones registradas en las estaciones aguas arriba del Río Papaloapan, en la estación hidrométrica Papaloapan se obtuvo un gasto de 6,850 m<sup>3</sup>/s el día 2 de septiembre. Con este valor, sumando las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas a lo largo del trayecto del río hacia su desembocadura, como los 352 mm de la estación Cosamaloapan y 339 mm de la estación Tlacotalpan (Fig. 3.3), fueron factores para que el Río Papaloapan desbordara su cauce, provocando una inundación. El mapa de precipitación presenta intervalos que van de los 250 a los 400 mm en las estaciones localizadas aguas arriba y de los 250 a los 600 mm en las estaciones meteorológicas que se encuentran en el transcurso del Río Papaloapan hasta llegar a su desembocadura (Fig. 3.3). Para el hidrograma puede indicarse que el tiempo de crecida fue de diez días y el tiempo base fue de catorce días.

Para el año de 1975 las catorce estaciones hidrométricas cuentan con registros de precipitación de los días 13 al 16 de septiembre. El Huracán Eloise se presentó de 13 al 24 de septiembre, con un origen en el Caribe, tocando la Península de Yucatán, avanzando hacia el norte. La estación meteorológica Tuxtepec tuvo el registro más elevado de precipitación con 395 mm (Fig. 3.4), influyendo notablemente aguas abajo del Río Papaloapan con un gasto máximo de 4,630 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Papaloapan. La estación Papelera Tuxtepec registró 379 mm de precipitación. Como conclusión de la inundación del año 1975, las precipitaciones que originaron el gasto máximo de la estación hidrométrica Papaloapan, provienen de las zonas altas de la cuenca, como ejemplo se encuentran los valores de las estaciones meteorológicas Tuxtepec y Papelera Tuxtepec (Fig. 3.4). El mapa de precipitación comprende intervalos que van de los 100 a los 350 mm de precipitación en toda el área de estudio y en comparación con los dos años analizados anteriormente presenta niveles de menor valor; la distribución espacial es muy uniforme, aunque en el área de las estaciones meteorológicas ubicadas aguas arriba se encuentran los mayores valores con 350 mm ó más

Gráficas de precipitación (en mm), del 26 de agosto al 3 de septiembre de 1969. Los números de cada estación corresponden a su localización en el mapa.



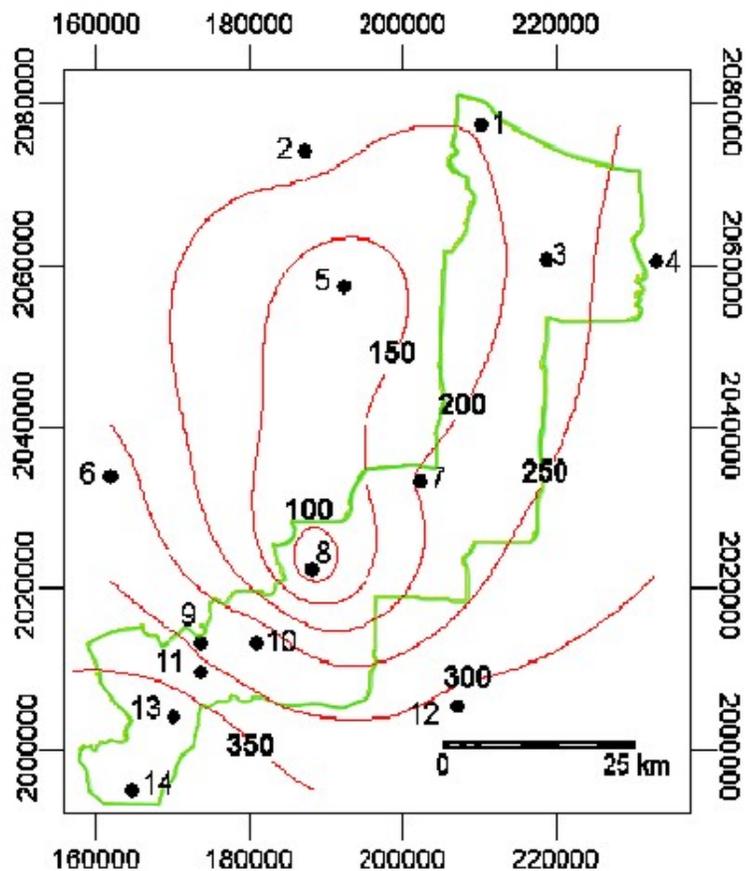
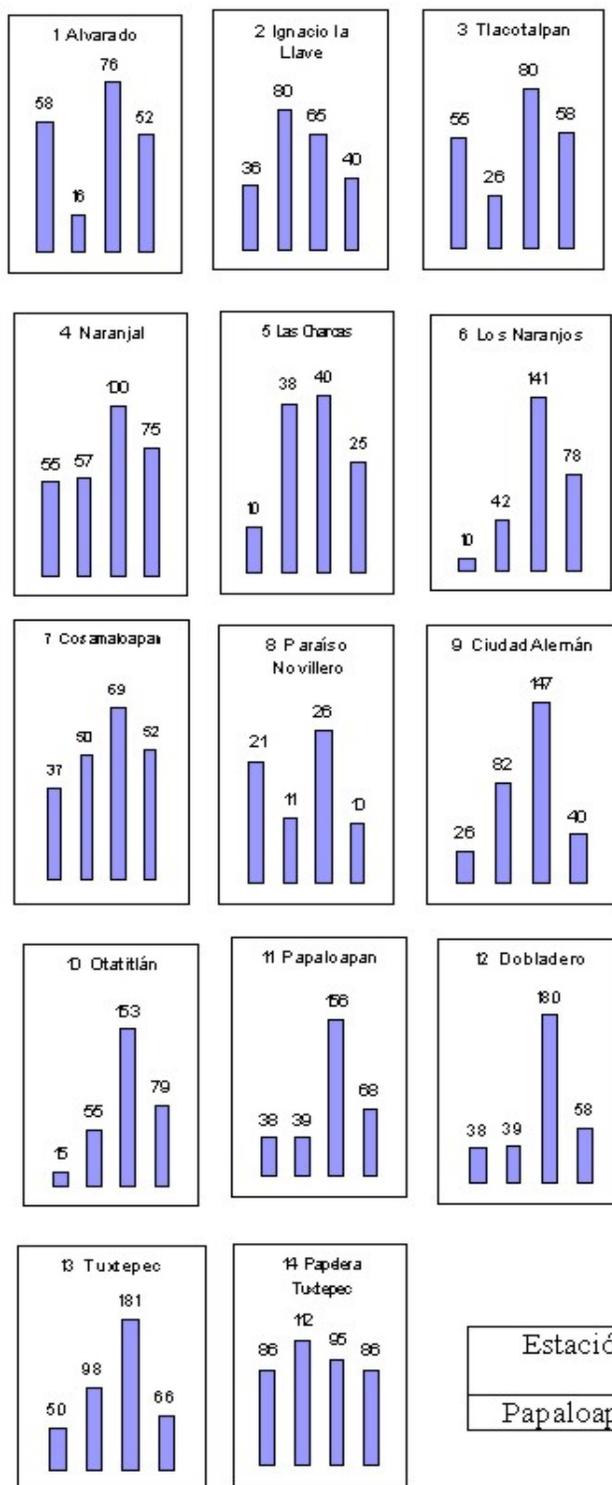
Precipitación acumulada (en mm) del 26 de agosto al 3 de septiembre de 1969.



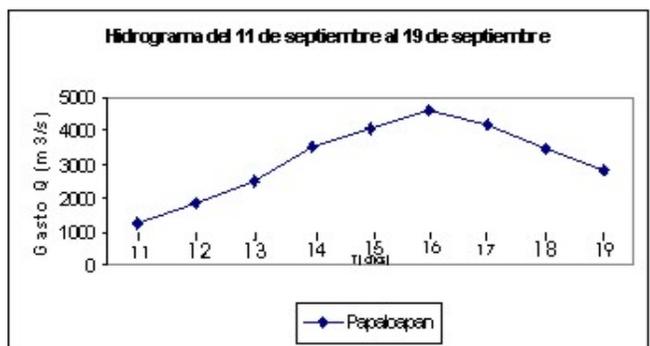
Estación	Mes	Día	Gasto máximo (m³/s)
Papaloapan	Septiembre	2	6,850

Fig.3.3 Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de Septiembre de 1969

Gráficas de precipitación (en mm), del 13 al 16 de septiembre de 1975. Los números de cada estación corresponden a su localización en el mapa.



Precipitación acumulada (en mm) del 13 al 16 de septiembre de 1975.



Estación	Mes	Día	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)
Papaloapan	Septiembre	16	4,630

Fig. 3.4 Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de Septiembre de 1975.

(Fig. 3.4). El Río Papaloapan se desbordó en la llanura fluvial aunado, en menor medida, al registro de las precipitaciones en toda el área de estudio. Con relación al hidrograma, el tiempo de crecida fue de seis días y el tiempo base de nueve días.

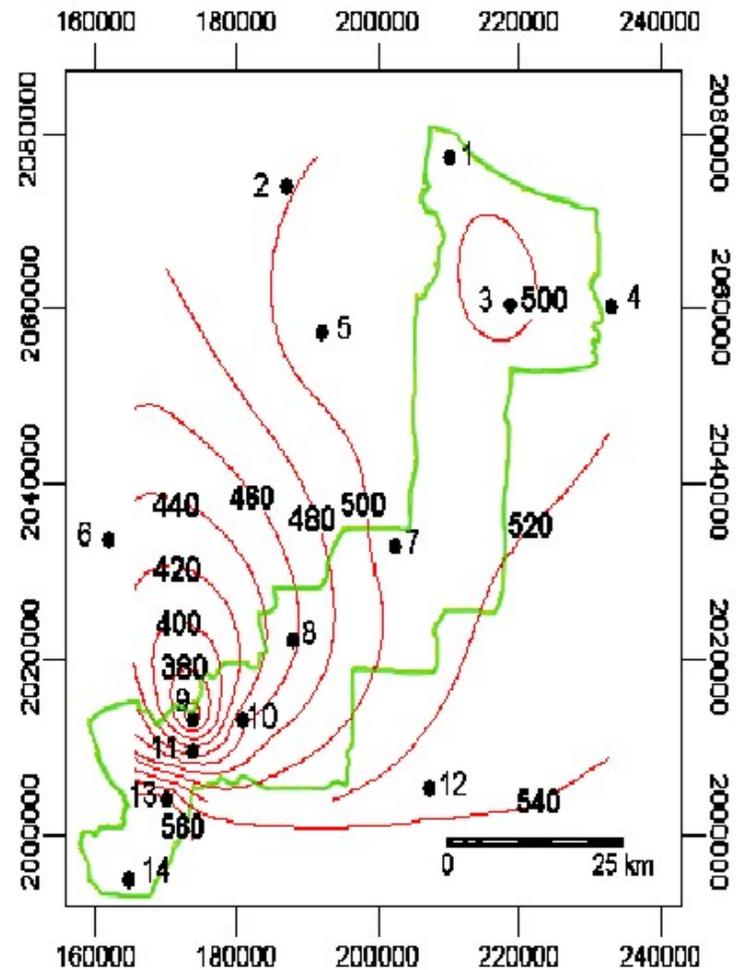
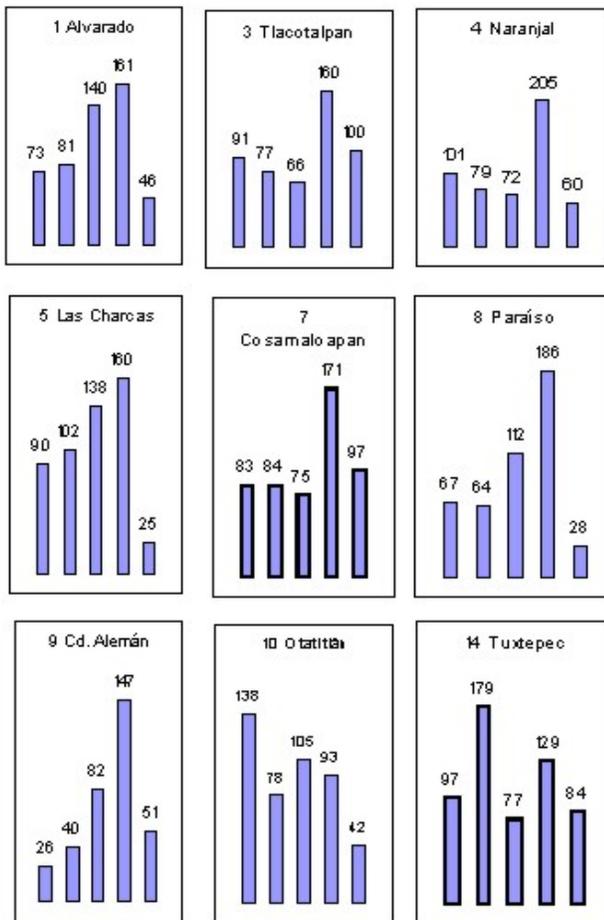
En el año de 1981 nueve estaciones meteorológicas registraron la precipitación del día 27 al 31 de agosto, mismos días en los que se presentó la Tormenta Tropical Irwin y aunque ésta se manifestó en las costas de Michoacán, influyó de forma considerable en el área de estudio. En la estación meteorológica Tuxtepec se obtuvieron 566 mm de precipitación, siendo el mayor valor de todas las estaciones que contienen datos (Fig. 3.5). La estación hidrométrica Papaloapan tuvo un registro de 5,275 m<sup>3</sup>/s el día 28 de agosto, suficientes para que el Río Papaloapan presentará una inundación, además de las altas precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la desembocadura, como en la estación Tlacotalpan en donde se registraron 494 mm (Fig. 3.5). En el mapa de precipitación se identificaron intervalos que van de los 380 a los 560 mm de precipitación, que se concentraron sobre las estaciones ubicadas aguas arriba del Río Papaloapan (Fig. 3.5). Dentro del hidrograma, el tiempo de crecida fue de cinco días y el tiempo base de diez días.

Como conclusión puede indicarse que las precipitaciones que generaron las inundaciones de los años 1955, 1969, 1975 y 1981, se concentran entre los meses de agosto y septiembre. Los valores de precipitación más elevados correspondieron a las estaciones localizadas aguas arriba del Río Papaloapan (años 1969, 1975 y 1981 en las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente) debido a la influencia de la zona de lluvias orográficas, es decir, aquellas que son producto de la elevación de masas de aire ante un obstáculo montañoso (barlovento), en este caso la Sierra Madre Oriental, aunque los huracanes fueron también una influencia. Estos altos valores de precipitación producen el gasto máximo registrado en la estación hidrométrica Papaloapan, necesario para que se produzca una inundación. Con excepción del año 1955, en el cual influyó el Huracán Gladis en el Golfo de México, se registraron valores más elevados en las estaciones meteorológicas cercanas a la desembocadura del Golfo de México.

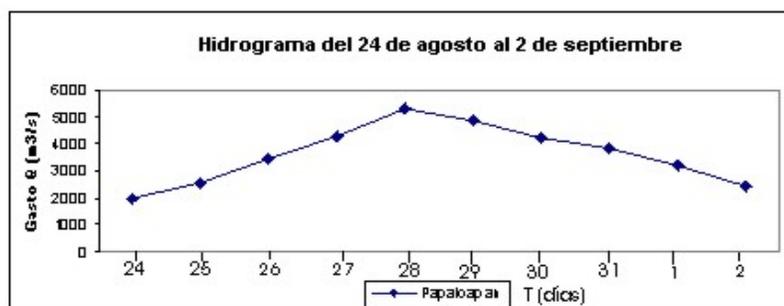
### 3.6 Análisis estadístico de las estaciones hidrométricas.

Chow (1994), indica que los procesos hidrológicos varían continuamente en el tiempo y espacio y son medidos como muestras puntuales, es decir, mediciones hechas a través del tiempo en lugares fijos del espacio. Con el registro del gasto máximo de las estaciones hidrométricas y con el análisis estadístico se puede establecer un promedio de los períodos de retorno, el cual es una medida de probabilidad de que un evento de una determinada magnitud

Gráficas de precipitación (en mm), del 27 al 31 de agosto de 1981. Los números de cada estación corresponden a su localización en el mapa.



Precipitación acumulada (en mm) del 27 al 31 de agosto de 1981.



Estación	Mes	Día	Gasto máximo (m³/s)
Papaloapan	Agosto	28	5,275

Fig. 3.5 Registros climatológicos e hidrométricos de la inundación de Agosto de 1981.

sea igualado o excedido por lo menos una vez en un año cualquiera. Dentro del análisis estadístico de las estaciones hidrométricas se logró obtener una estimación de los gastos máximos para siete periodos de retorno de cada estación hidrométrica.

En la estación hidrométrica Tuxtepec, los años de registro comprenden de 1960 a 1976 (Fig. 3.6), presentándose para este período un gasto medio anual de 3,403 m<sup>3</sup>/s. Existen pocos datos para el análisis estadístico de los periodos de retorno en esta estación. Esta estación registra los gastos provenientes de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, principales formadores del Río Papaloapan, lo cual indica la cantidad de precipitación que suele ocurrir en las partes altas de la cuenca del Papaloapan y es, en esta estación, en donde se registran los gastos provenientes de esa área.

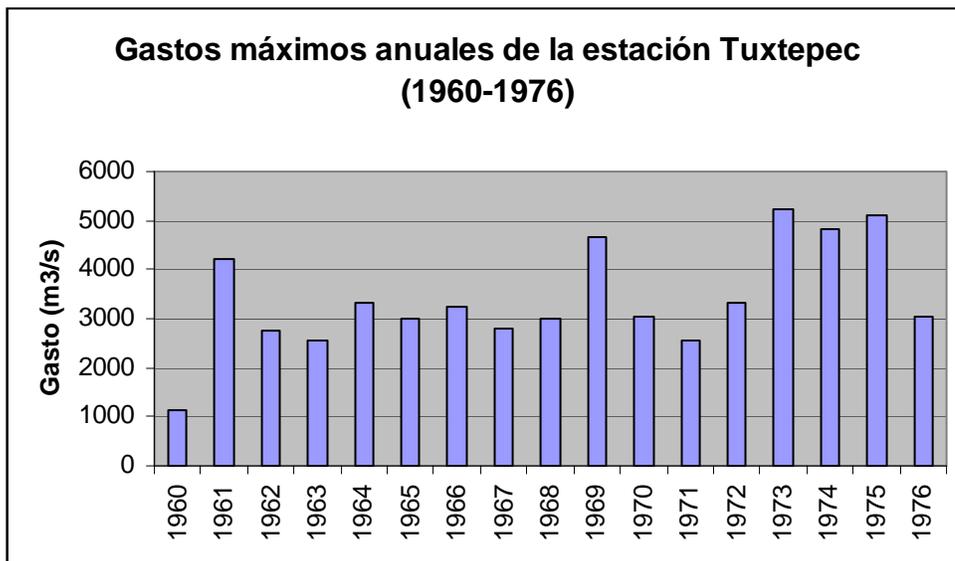


Fig. 3.6 Gastos máximos anuales de la estación Tuxtepec, del Río Papaloapan (CNA, 1999).

Para la estación hidrométrica Papaloapan se cuenta con años de registro de 1947 a 1976, 1980 y de 1982 a 1994 (Fig. 3.7). Para este período se registra un gasto medio anual de 3,584 m<sup>3</sup>/s. De las estaciones consideradas para este trabajo, es la que presenta el mayor número de registros hidrométricos y, por consiguiente, es la más utilizada.

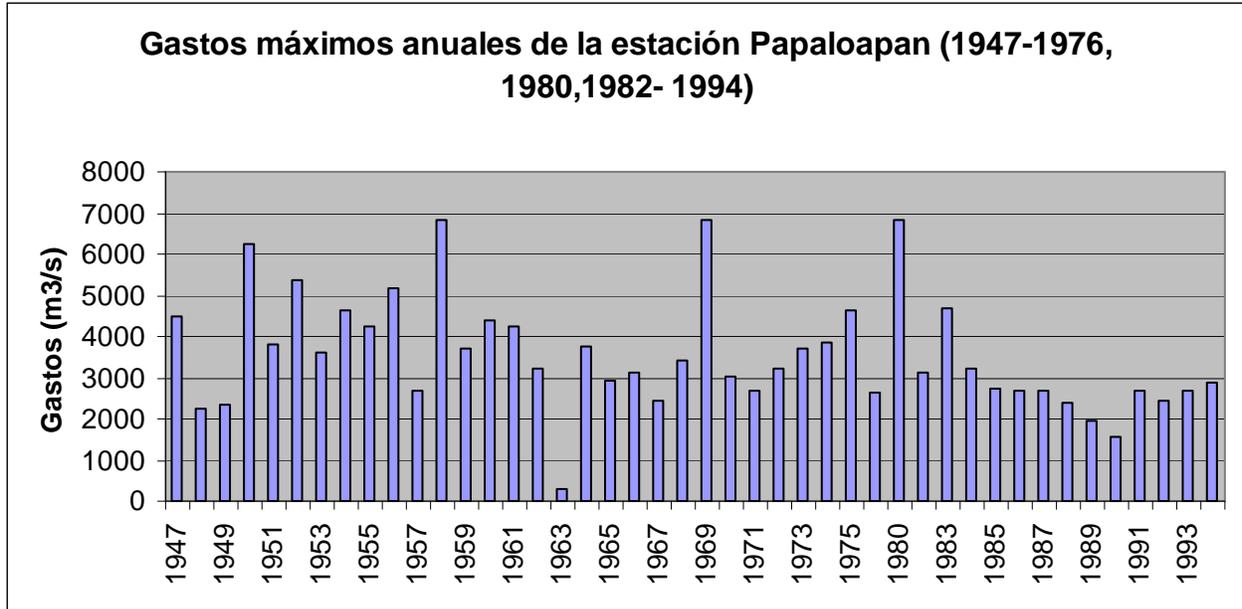


Fig. 3.7 Gastos máximos anuales de la estación Papaloapan (CNA, 1999).

En la estación hidrométrica Chacaltianguis existen registros de los gastos máximos de los años de 1973–1976, 1982–1985 y de 1987–1993 (Fig. 3.8). Se presenta un gasto medio anual de 2,463 m<sup>3</sup>/s. De las tres estaciones hidrométricas, es la que se identifica en la parte media del curso del Río Papaloapan.

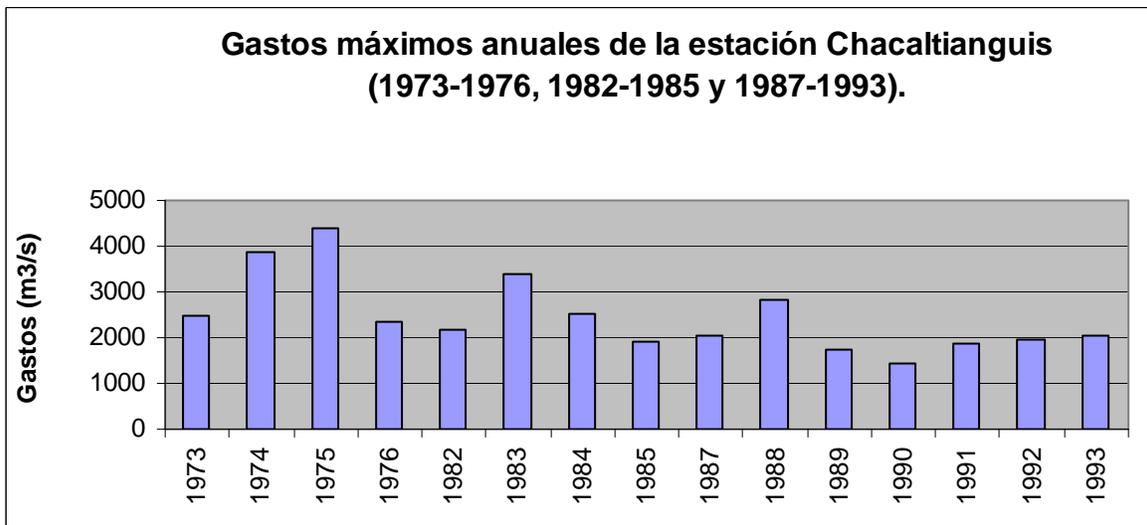


Fig. 3.8 Gastos máximos anuales de la estación Chacaltianguis (CNA, 1999).

Dentro del análisis estadístico para la obtención del período de retorno en las estaciones hidrométricas se obtuvieron diferentes valores. El procedimiento de cálculo está basado en la correlación que se hace de la muestra de un registro hidrométrico con las diferentes distribuciones de probabilidad más usadas en hidrología y así obtener una estimación de gastos máximos a futuro (Ruiz, 2002), de las cuales, para la realización del presente trabajo, sólo se tomaron en cuenta la distribución Gumbel y Gumbel de dos poblaciones. En lo referente a la distribución Gumbel, es una función de probabilidades usualmente utilizada para valores máximos aleatorios obtenidos de poblaciones suficientemente grandes (Monsalve, 1999) y es una función que utilizan tradicionalmente los hidrólogos para el estudio de los gastos máximos anuales en un río y, por lo tanto, para la determinación de las avenidas de diseño (Chow, 1994).

La distribución Gumbel de dos poblaciones es utilizada cuando los gastos máximos anuales son originados por dos poblaciones o eventos diferentes, en donde la primera es producida por precipitaciones relacionadas con fenómenos meteorológicos y la segunda por precipitaciones ciclónicas (Martín, 2003).

Para las tres estaciones hidrométricas se obtuvieron siete periodos de retorno con las distribuciones de probabilidad anteriormente mencionadas. Los gastos máximos obtenidos para los siete períodos de retorno en la estación hidrométrica Tuxtepec están indicados en la Tabla 3.3. En esta estación se registraron 10,000 m<sup>3</sup>/s en el año de 1944, pero solo es una estimación, debido a que no se tiene un registro oficial, por lo tanto, no se consideró dentro de los períodos de retorno.

Tabla 3.3 Gastos calculados en m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Tuxtepec.

Períodos de retorno (años)	Distribución Gumbel (m <sup>3</sup> /s)	Distribución Gumbel 2P (m <sup>3</sup> /s)
2	3,226	3,386
5	4,179	4,889
10	4,810	5,120
20	5,416	5,300
50	6,199	5,535
100	6,786	5,751
500	8,143	6,341

Para la estación Tuxtepec, con la distribución Gumbel, en el período de retorno de diez años, se calculó un gasto de 4,810 m<sup>3</sup>/s, siendo superior a los registrados en los años 1954 y

1975 cuando se han presentado inundaciones; este gasto puede generarse una vez cada diez años afectando la llanura fluvial del Río Papaloapan. En el período de retorno de veinte años se estimó un gasto de  $5,416 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual es superior a los registrados en los años 1952, 1973 y 1981, por lo tanto con este gasto se puede presentar una inundación cada veinte años. Para períodos de retorno de cien años se calculó un gasto de  $6,786 \text{ m}^3/\text{s}$ , superando al gasto registrado en la inundación de 1950 con un registro de  $6,228 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que indica que por lo menos una vez cada cien años puede originarse un gasto que provoque una inundación dentro de la llanura fluvial del Río Papaloapan. Por último, para períodos de retorno de quinientos años se calculó un registro de  $8,143 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual supera al gasto registrado en la inundación de 1969 con  $6,850 \text{ m}^3/\text{s}$ , indicando que una vez cada quinientos años puede presentarse una inundación con este gasto. Es importante indicar que los gastos analizados con anterioridad presentan un valor significativo, debido a que son superiores a los  $4,800 \text{ m}^3/\text{s}$ , en los cuales se estimó el período de retorno; el registro para quinientos años es un gasto considerable y que, en el Río Papaloapan, puede presentarse, aunque en un intervalo de años muy amplio.

El gasto estimado para el período de retorno de cinco años en la distribución Gumbel de dos poblaciones es de  $4,889 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual es superior en cuatro años en los registros que se han presentado inundaciones, los cuales son 1954, 1955, 1974 y 1975, indicando que con este gasto se puede presentar una inundación cada cinco años. Para el período de retorno de veinte años se estimó un gasto de  $5,300 \text{ m}^3/\text{s}$  y solamente en el año de 1973 se registraron  $5,220 \text{ m}^3/\text{s}$ , con lo cual, con este gasto una vez cada veinte años se puede presentar una inundación. El gasto calculado para el período de retorno de cincuenta años es de  $5,535 \text{ m}^3/\text{s}$ , superior a los registros de los años 1952 y 1981, con este gasto se puede presentar una inundación cada cincuenta años en la llanura fluvial del río. Por último, el gasto estimado para el período de retorno de quinientos años es de  $6,341 \text{ m}^3/\text{s}$  y solamente es superior al gasto registrado en el año de 1950 con  $6,228 \text{ m}^3/\text{s}$ , indicando que una vez cada quinientos años puede presentarse una inundación en la llanura fluvial del Río Papaloapan cuando se registra este gasto. Esta distribución indica que de los 17 años de registro, cinco han presentado un origen ciclónico.

En la Figura 3.9 se representan los gastos estimados de la estación Tuxtepec para un período de retorno de veinte años. En la distribución Gumbel de dos poblaciones se puede observar que existe un crecimiento acelerado entre los periodos de retorno de dos y cinco años, con relación a los gastos estimados para esos períodos debido a la influencia ciclónica para esta distribución. En la distribución Gumbel, el crecimiento del gasto se comporta más estable, dentro del período de retorno de dos a diez años.

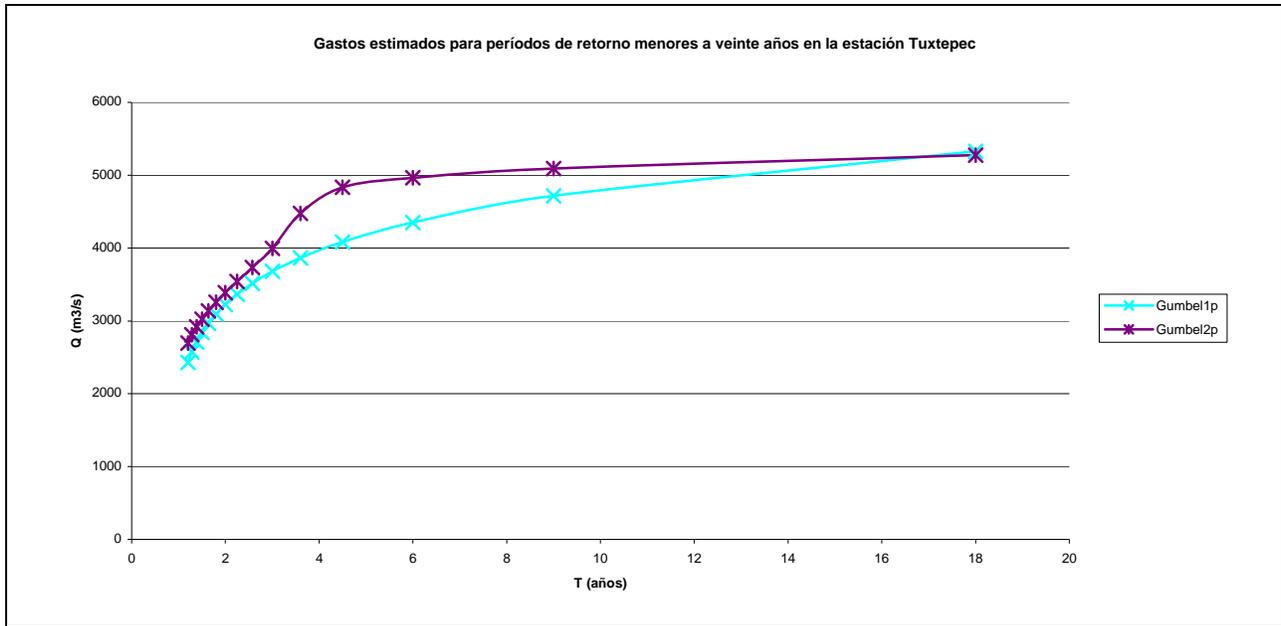


Figura 3.9. Gastos calculados en la estación Tuxtepec, para un período de retorno de veinte años.

Los períodos de retorno para la estación hidrométrica Papaloapan se indican en la Tabla 3.4. En ella se han registrado los mayores gastos que han generado inundaciones, debido a los escurrimientos producidos por las intensas precipitaciones aguas arriba del Río Papaloapan, lo que genera el proceso denominado respuesta hidrológica de una cuenca.

Tabla 3.4. Gastos calculados en m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Papaloapan.

Períodos de retorno (años)	Distribución Gumbel (m <sup>3</sup> /s)	Distribución Gumbel 2P (m <sup>3</sup> /s)
2	3,364	3,491
5	4,549	5,148
10	5,333	6,064
20	6,085	6,708
50	7,059	7,511
100	7,788	7,995
500	9,474	9,623

En la distribución Gumbel, para el período de retorno de cinco años se estimó un gasto de 4,549 m<sup>3</sup>/s, el cual superó los registros de los años de 1955 y 1974, indicando que con este gasto se puede presentar una inundación cada cinco años. El periodo de retorno de diez años estimó un gasto de 5,333 m<sup>3</sup>/s, el cual supera a los gastos registrados de los años de 1954, 1973, 1975 y 1981 y con este gasto se puede presentar una inundación cada diez años en la llanura fluvial del Río Papaloapan. Para el período de retorno de cincuenta años se calculó un

gasto de 7,059 m<sup>3</sup>/s, registro que supera los gastos de los años de 1950, 1952 y 1969, cuando se presentaron inundaciones, lo que conlleva a indicar que con este gasto se puede presentar una inundación cada cincuenta años.

En la distribución Gumbel de dos poblaciones, en el período de retorno de cinco años se estimó un gasto de 5,148 m<sup>3</sup>/s, el cual supera a los años 1954, 1955, 1974 y 1975, indicando que con este gasto se puede presentar una inundación cada cinco años. Para el período de retorno de diez años se estimó un gasto de 6,064 m<sup>3</sup>/s, que es superior a los registrados en los años 1982 y 1981, con lo cual puede presentarse un gasto similar una vez cada diez años que provocaría una inundación en el área de estudio. Para el período de retorno de veinte años se calculó un gasto de 6,708 m<sup>3</sup>/s, siendo superior al gasto que se registró en el año de 1950 con 6,228 m<sup>3</sup>/s, lo que indica que este gasto se puede presentar una vez cada veinte años. De los 44 años de registro en la estación Papaloapan, nueve han tenido una influencia ciclónica.

En la Figura 3.10 se representan los gastos estimados para la estación hidrométrica Papaloapan. En la distribución Gumbel de dos poblaciones puede indicarse que existe un crecimiento más acelerado del gasto estimado entre los dos y los diez años de periodo de retorno, resaltando la influencia ciclónica. Para la distribución Gumbel el crecimiento del gasto entre los periodos de retorno es más estable dentro del período de retorno de dos a cincuenta años.

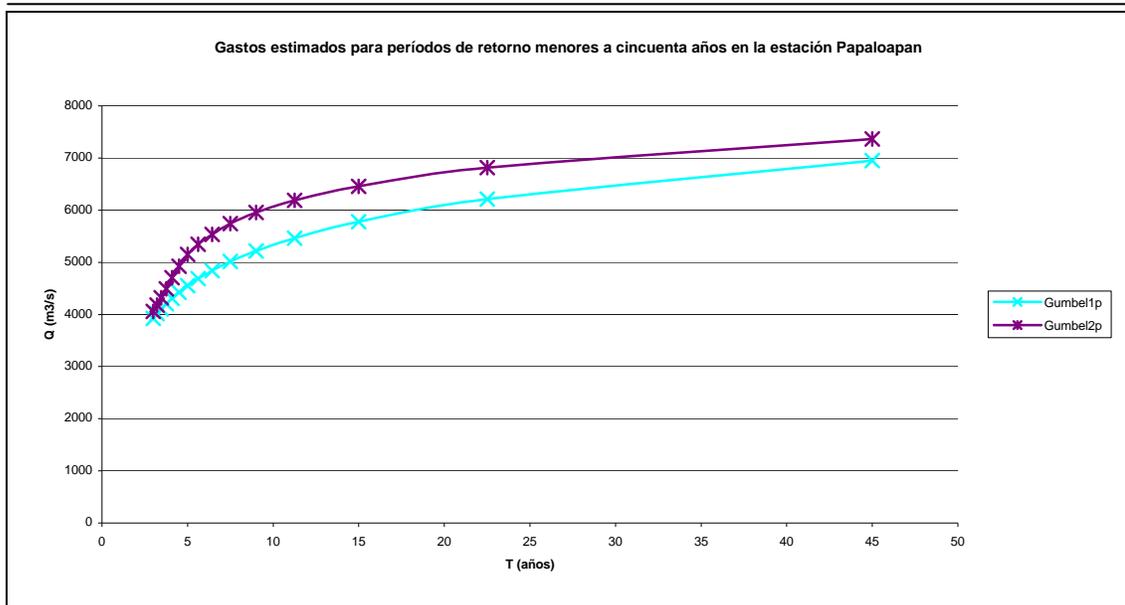


Figura 3.10. Gastos calculados en la estación Papaloapan, para un período de retorno de cincuenta años.

Para la estación hidrométrica Chacaltianguis los gastos máximos obtenidos para los siete períodos de retorno en la distribución Gumbel y Gumbel de dos poblaciones, están indicados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Gastos calculados en m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica Chacaltianguis.

Períodos de retorno (años)	Distribución Gumbel (m <sup>3</sup> /s)	Distribución Gumbel 2P (m <sup>3</sup> /s)
2	2,326	2,338
5	3,063	3,450
10	3,551	4,036
20	4,019	4,378
50	4,625	4,761
100	5,079	5,046
500	6,128	5,688

Dentro de la distribución Gumbel, en el período de retorno de veinte años se calculó un gasto de 4,019 m<sup>3</sup>/s, el cual es superior en comparación con el año de 1974 con 3,846 m<sup>3</sup>/s, con este gasto se puede presentar una inundación cada veinte años que afecte a la llanura fluvial del Río Papaloapan. Dentro del período de retorno de cincuenta años se estimó un gasto de 4,625 m<sup>3</sup>/s, el cual supera al gasto que se registró en el año de 1955, con lo cual una vez cada cincuenta años puede presentarse una inundación. En el período de retorno de cien años se calculó un gasto de 5,079 m<sup>3</sup>/s, este gasto es superior a los años 1954 y 1975, lo que indica que con este gasto se puede presentar una inundación una vez cada cien años. Por último, para el período de retorno de quinientos años se calculó un gasto de 6,128 m<sup>3</sup>/s, el cual supera los registros de los años 1952, 1973 y 1981, dando como resultado que con este gasto se presente una inundación una vez cada quinientos años.

Para la distribución Gumbel de dos poblaciones, en el período de retorno de diez años se estimaron 4,036 m<sup>3</sup>/s, gasto que supera a los registrados en los años 1955 y 1974, en los cuales se obtuvieron 4,029 y 3,846 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, dando como resultado que con este gasto se presente una inundación cada diez años. Para el período de retorno de cincuenta años se calculó un gasto de 4,761 m<sup>3</sup>/s, superior al registrado en 1954 y 1975, con este gasto se puede presentar una inundación cada cincuenta años. En el período de retorno de quinientos años se estimaron 5,688 m<sup>3</sup>/s, superando a los registros de los años 1952, 1973 y 1981, lo que significa que con este gasto se puede presentar una inundación cada quinientos años en la llanura fluvial del Río Papaloapan. De los 15 años de registro en la estación Chacaltianguis,

cuatro han tenido una influencia ciclónica que han repercutido para que se presenten inundaciones.

En la Figura 3.11 se representan los gastos estimados para la estación hidrométrica Chacaltianguis. Se puede observar que en la distribución Gumbel se presenta un crecimiento acelerado entre los períodos de retorno de dos a diez años, aunque va en incremento moderado hacia el período de retorno de veinte años. Para la distribución Gumbel de dos poblaciones del período de retorno de dos a cinco años se muestra un crecimiento, pero del periodo de retorno de cinco a diez años este crecimiento se muestra más acelerado, el cual va disminuyendo al acercarse al período de retorno de veinte años. Este crecimiento en esta distribución puede indicarse debido a la influencia de las perturbaciones atmosféricas que se registran en el área de estudio influyendo en la representación de los datos en la gráfica.

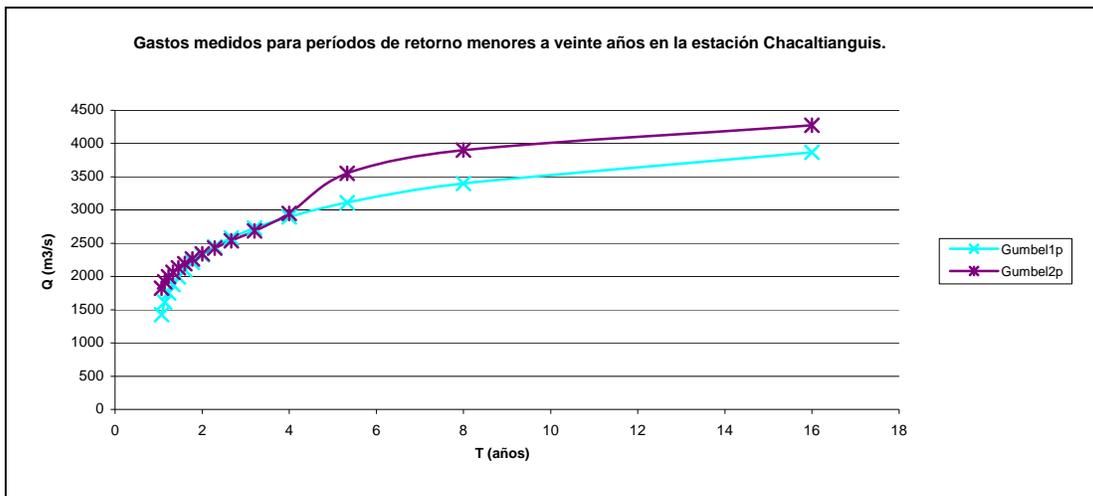


Figura 3.11. Gastos calculados en la estación Chacaltianguis, para un período de retorno de veinte años.

## CAPITULO 4. GEOMORFOLOGÍA

### 4.1 Introducción

En este capítulo se describen las unidades geomorfológicas identificadas a través de la fotointerpretación del área de estudio, con lo cual se pueden reconocer algunos procesos fluviales activos dentro de las mismas. A partir de esta caracterización se delimitaron la llanura alta y la llanura baja de inundación, como las unidades de mayor extensión.

Para la obtención del índice de sinuosidad se seleccionaron cinco secciones del Río Papaloapan. Al realizar la descripción de cada sector se indican las unidades geomorfológicas fluviales presentes.

La identificación de las áreas con peligro a inundación se desarrolla dentro de este capítulo, fueron clasificadas en: áreas muy expuestas al peligro de inundación, áreas expuestas al peligro de inundación, áreas poco expuestas al peligro de inundación y áreas sin peligro de inundación. Esta clasificación se llevó a cabo con base en el mapa geomorfológico fluvial del área de estudio y en los niveles altitudinales.

### 4.2 Descripción y localización de las llanuras fluviales.

El área de estudio comprende un tipo de relieve predominante que es la llanura fluvial y, en menor proporción, por los lomeríos de conglomerados del Mioceno. La llanura fluvial se encuentra distribuida sobre ambos márgenes del Río Papaloapan, ocupa la mayor extensión y está considerada como un tipo de relieve con origen general exógeno. Con relación al origen específico es importante mencionar que se identificaron dos tipos de llanuras fluviales: la llanura fluvial erosiva y la llanura fluvial acumulativa. Con respecto a la edad de las formas estas son del Cuaternario.

La llanura fluvial erosiva (Fig. 4.1) comprende la porción de la llanura que presenta un control estructural sobre los lomeríos de conglomerados del Mioceno, debido a la presencia de un alineamiento, en los cuales se manifiesta una falla normal, siendo muy evidente en el río Santo Domingo que se ve influenciado por un cambio drástico de dirección del río, antes de la confluencia con el río Valle Nacional. Una de las características de esta llanura es que el *talweg* se ubica en la mayor depresión topográfica del plano fluvial, indicando que predominan los procesos erosivos sobre los acumulativos. Esta llanura se delimitó desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional continuando por ambos márgenes del lecho menor del Río

Papaloapan hacia la localidad de Tuxtepec, presentándose de forma paralela al Río Tonto sobre su margen derecha hasta la confluencia con el Río Papaloapan. Sobre la llanura de inundación, a medida que este río va avanzando aguas abajo, los lomeríos de conglomerados del Mioceno se encuentran más distantes del lecho menor del río, lo cual da como resultado una dinámica fluvial distainta, indicando la presencia de la llanura fluvial acumulativa. Por último, la incisión vertical identificada sobre la margen derecha del lecho menor marca la presencia de los procesos erosivos, en dirección a la ciudad de Tuxtepec y se identificó en las cercanías de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional.

La llanura fluvial acumulativa (Fig. 4.1) se caracteriza porque el lecho menor se eleva progresivamente por encima de su llanura fluvial, que está identificada como llanura de inundación. Abarca la mayor extensión dentro del área de estudio, identificándose los procesos fluviales más significativos. Se presenta a partir de la confluencia del Río Papaloapan y del Río Tonto y de este punto hasta la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México. Las dunas costeras localizadas de forma paralela a la desembocadura del río, se identificaron como lomeríos eólicos acumulativos. La presencia de elevaciones sobre la llanura fluvial acumulativa son escasas, lo cual propicia que dentro de esta unidad los procesos acumulativos dominen sobre los erosivos, encontrándose una amplitud máxima aproximada de 25 km, abarcando desde el límite del área de estudio en la parte poniente, tomando como referencia la corriente tipo yazoo, hasta el límite en la parte oriental del área de estudio.

#### 4.3 Unidades geomorfológicas

En este apartado se describen las unidades geomorfológicas identificadas y están representadas en el mapa geomorfológico fluvial. En la figura 4.2 están delimitadas las figuras que representan las unidades geomorfológicas fluviales. Tanto la llanura alta de inundación como la llanura baja de inundación, identificadas en la planicie fluvial, son las unidades con mayor extensión, así como los lomeríos de conglomerados del Mioceno y los lomeríos eólicos acumulativos; puede indicarse que los tipos de relieve predominantes son las planicies fluviales y los lomeríos.

Como se ha mencionado, la llanura fluvial erosiva se encuentra desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, dando origen al Río Papaloapan, culminando en la confluencia de los ríos Tonto y Papaloapan.

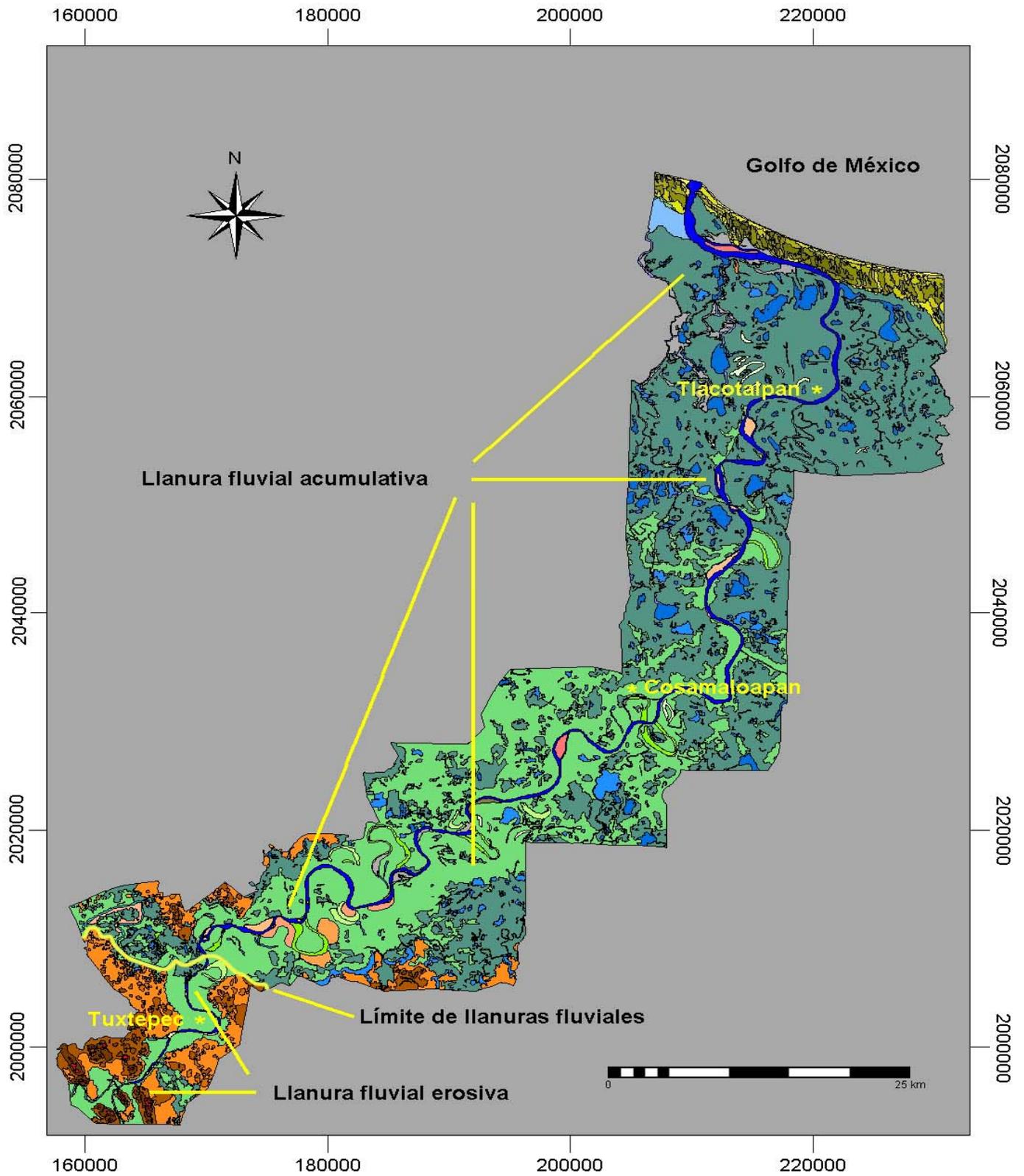


Fig. 4.1. Identificación de la llanura fluvial erosiva y acumulativa, indicándose el límite entre ambas.

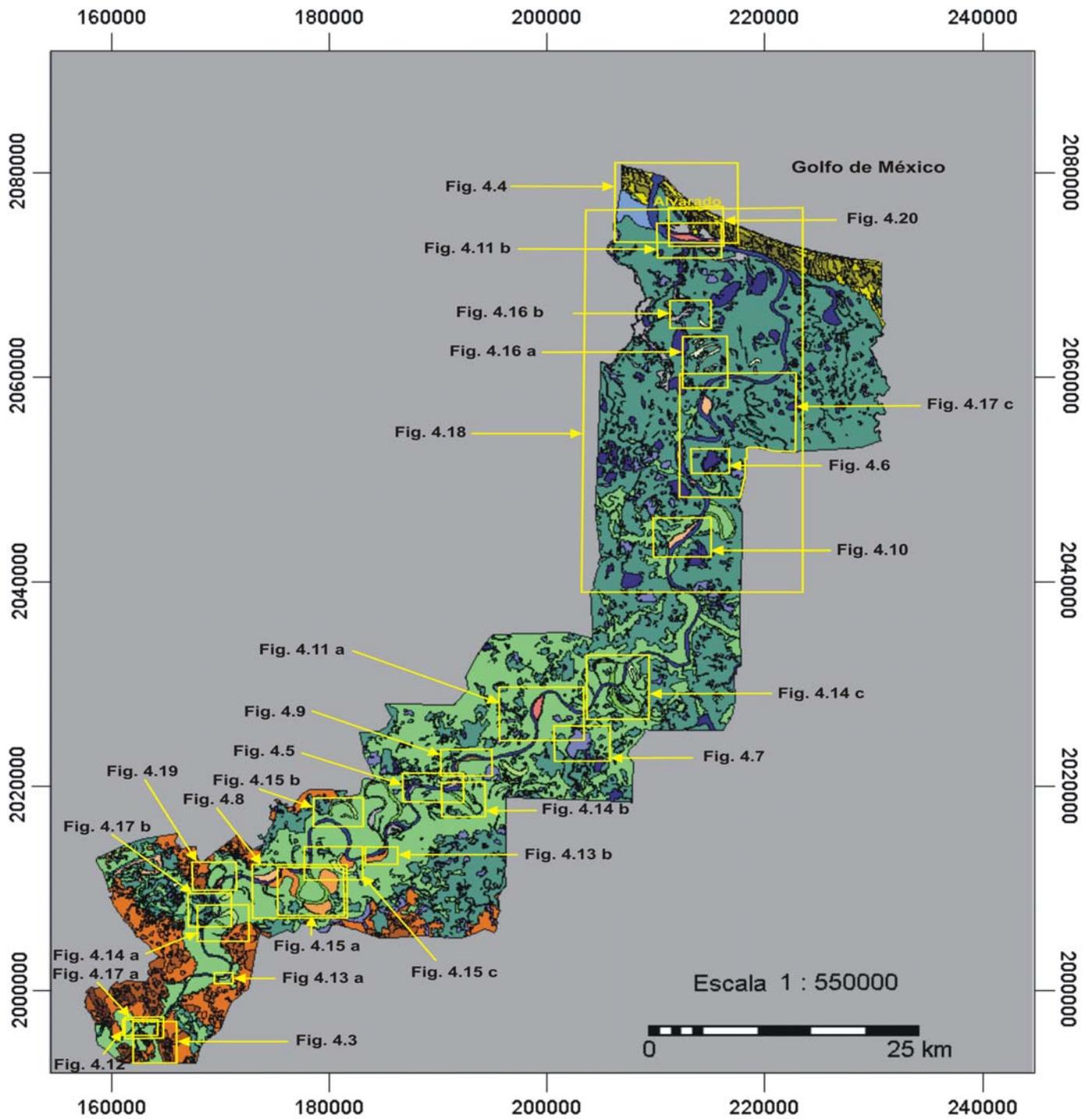


Fig. 4.2. Mapa donde se indican las figuras consideradas en este capítulo

En llanura fluvial erosiva se encuentran algunas unidades, como los lomeríos de conglomerados del Mioceno, los cuales se clasificaron tomando los siguientes criterios: su altura relativa, el origen principal, el origen específico y por último su cronología. Dentro del criterio de la altura relativa se dividieron en bajos, medios y altos; por su origen principal corresponden a un relieve endógeno; en tanto que su origen específico es estructural y, por último, la cronología comprende la edad de estos lomeríos. En lo referente a la altura relativa, los lomeríos bajos presentan una altura hasta los 20 m; los lomeríos medios tienen una altura relativa entre 20 y 50 m; los lomeríos altos cuentan con una altura relativa mayor de 50 m, estas últimas se presentan con una subunidad denominada superficie cumbral, la cual representa las partes planas y elevadas de los lomeríos (Fig. 4.3). Dentro de los lomeríos se identificó una unidad “intermedia” denominada lomerío bajo aislado, la cual presenta una elevación más elevada que el lomerío bajo, pero que en altitud relativa es similar, lo anterior también se aplica al lomerío medio aislado con relación al lomerío medio. Para el origen específico, los lomeríos de conglomerados del Mioceno localizados sobre esta llanura fluvial erosiva son del tipo estructural, y dentro de la cronología se han identificado dentro de diferentes edades como del Cretácico Superior, Terciario y Cuaternario. Dentro de esas unidades geomorfológicas se clasificaron como lomeríos bajos, medios y altos de conglomerados del Mioceno. En lo referente a las superficies cumbrales, se realizó una diferenciación debido a que se clasificaron en superficie cumbral de lomeríos de calizas del Cretácico Superior y superficie cumbral de lomeríos de conglomerados del Mioceno. La unidad “intermedia” fue clasificada como lomerío bajo aislado de conglomerados del Mioceno. Esta clasificación puede observarse en la Figura 4.3 y fue obtenida del mapa geomorfológico fluvial.

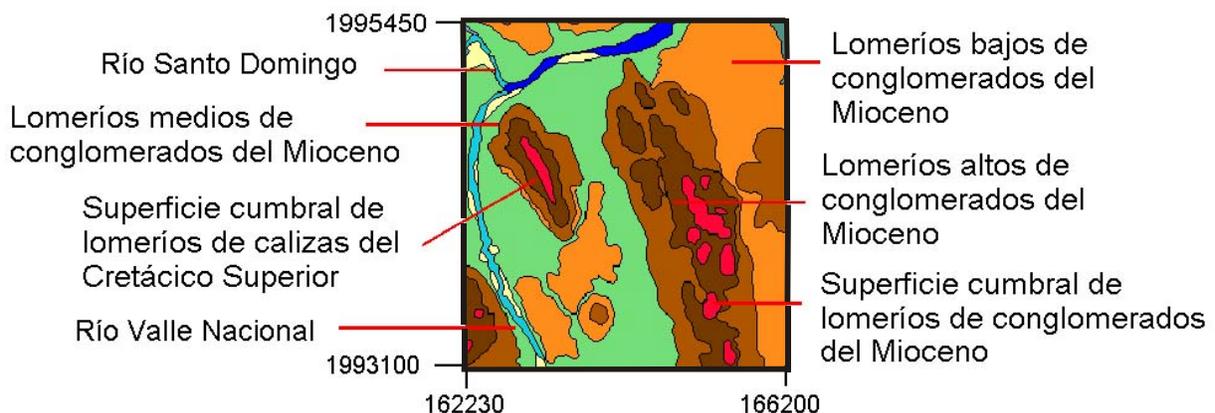


Fig.4.3. Se indican los lomeríos bajos, medios y altos de conglomerados del Mioceno. Las superficies cumbrales están representadas por las calizas del Cretácico Superior y los conglomerados del Mioceno.

La llanura alta de inundación es una unidad geomorfológica dentro de la llanura fluvial erosiva que ocupa los sitios más elevados y solo se ve afectada con los volúmenes de inundaciones extraordinarias. Se ubica sobre ambos márgenes del Río Santo Domingo y Valle Nacional y sobre ambas llanuras fluviales del Río Papaloapan, hasta la culminación de la llanura fluvial erosiva, en la confluencia de los ríos Tonto y Papaloapan, debido a que la llanura de inundación manifiesta un cambio en su topografía, que se vuelve más plana hacia ambos márgenes del Río Papaloapan. Sobre esta llanura alta de inundación, en la margen derecha del Río Tonto se han identificado los lomeríos bajos aislados de conglomerados del Mioceno. En algunas áreas, se identificaron pequeñas ondulaciones, siendo nulas, aguas abajo, en la llanura fluvial acumulativa. Estas ondulaciones no presentan una altura relativa considerable y por lo tanto no se delimitaron dentro de la llanura alta de inundación.

Dentro del mapa geomorfológico fluvial, en el anexo cartográfico de este trabajo, la llanura baja de inundación también está presente dentro de la llanura fluvial erosiva, aunque su mayor extensión se ubica en la culminación de esta, sobre ambos márgenes del Río Tonto; las depresiones en esta área son indicadoras de la llanura baja de inundación y se localizan con alternancia entre ésta y la llanura alta de inundación. Se caracteriza por ser la unidad en donde se identifican frecuentemente los procesos de inundación, resultando la primera unidad afectada cuando se presentan las mismas.

Sobre la llanura fluvial erosiva, los lomeríos de conglomerados del Mioceno son una unidad importante, porque son los que determinan el cambio de las llanuras fluviales dentro del área de estudio. Las siguientes unidades geomorfológicas fluviales corresponden a la llanura fluvial acumulativa del área de estudio, que comprende la mayor extensión y en ella se han identificado los procesos fluviales más importantes.

Dentro de la llanura fluvial acumulativa la unidad geomorfológica fluvial denominada llanura alta de inundación se encuentra sobre los sitios más elevados. En esta unidad las inundaciones no representan peligro alguno, solo cuando se llegan alcanzar gastos extraordinarios. Esta unidad se identifica sobre ambos márgenes del Río Papaloapan, disminuyendo de forma gradual conforme el río se aproxima al área de la Laguna de Alvarado y de la misma forma hacia su desembocadura en el Golfo de México. Dentro de la llanura alta de inundación se identifican algunas unidades geomorfológicas, en las cuales se reconocen algunos procesos fluviales. Dentro de la clasificación de las unidades geomorfológicas, las dunas costeras perpendiculares a la costa del Golfo de México, se denominaron como lomeríos eólicos acumulativos y presentan una altura relativa que varía desde los 10 m hasta los 140 m (Fig. 4.4). El origen principal es exógeno; el origen específico es eólico acumulativo y

cronológicamente están identificados dentro del Cuaternario; el Río Papaloapan al llegar a esta área fluye perpendicular a estos lomeríos eólicos acumulativos hasta su desembocadura donde se localiza la localidad de Alvarado.

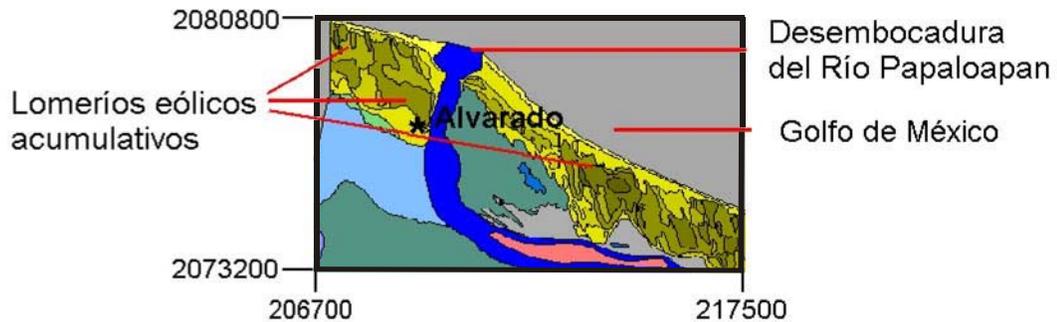


Fig. 4.4. Lomeríos eólicos acumulativos identificados en el área de la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México; se indica la localidad de Alvarado.

La llanura baja de inundación, dentro del mapa geomorfológico fluvial, está localizada en áreas donde predominan las depresiones y por consiguiente es el área que presenta mayor afectación por las inundaciones. Estas depresiones están consideradas como perennes e intermitentes y en la etapa de desbordamiento del río afectan directamente a la llanura baja de inundación, causando que el agua permanezca sobre éstas o llegue a desbordarse. Asimismo, se encuentran algunos rasgos geomorfológicos fluviales, como las playas de depresión perenne y algunos cauces perennes e intermitentes. La mayor extensión de la llanura baja de inundación se localiza en las áreas cercanas a la desembocadura del Río Papaloapan, puede observarse en el mapa geomorfológico fluvial localizado en el anexo cartográfico.

La unidad denominada lecho fluvial se divide en lecho menor de inundación y en lecho mayor de inundación. El lecho fluvial, dentro de la llanura fluvial erosiva, se encuentra en la parte más deprimida de esta llanura; en la llanura fluvial acumulativa, el lecho fluvial se encuentra en la parte más elevada de la misma. El lecho menor de inundación (Fig. 4.5) se caracteriza por presentar agua durante todo el año, queda comprendido desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, hasta la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México. Con relación a su amplitud presenta un promedio aproximado del cauce de 70 m, en las cercanías de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, y hasta 700 m, aproximadamente, cerca de la desembocadura en el Golfo de México. En el mapa geomorfológico fluvial puede apreciarse esta variación de amplitud del lecho menor.

El lecho mayor de inundación está representado en una sección dentro de la Figura 4.5, y se considera como parte del lecho de un río que puede llegar a ser cubierto por las aguas,

cuando el lecho menor no es capaz de conducir el flujo del agua ó durante las avenidas. Los sitios en donde se encuentra esta unidad se ubican sobre diferentes áreas del lecho menor, aunque en dimensiones muy reducidas, siendo más evidentes en la cercanía de las localidades de Ambrosio Alcalde y Tlacojalpan. Cabe señalar que también se localizan sobre ambas márgenes del río cerca de la desembocadura de la laguna de Alvarado en donde es muy evidente su localización de forma perpendicular al lecho menor, lo que indica que es ocupado por los flujos de agua al aumentar los volúmenes del Río Papaloapan. También se han identificado sobre algunos ríos tributarios en la llanura baja de inundación, en esta área. En el mapa geomorfológico fluvial, en el anexo cartográfico de este trabajo, se pueden identificar las diferentes áreas en las cuales se presenta el lecho mayor de inundación.

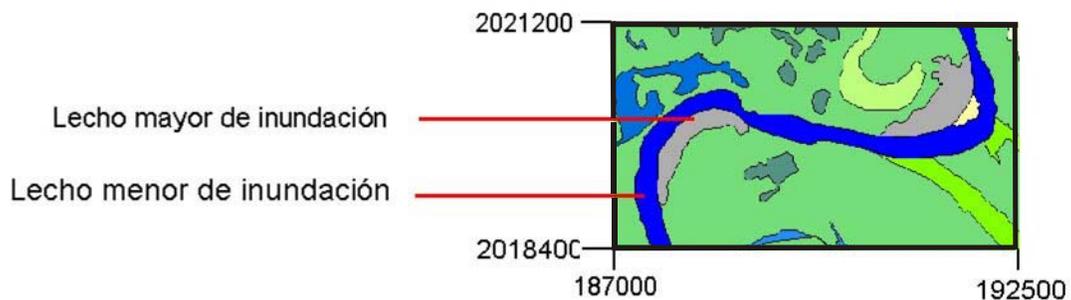


Fig. 4.5. Se indica una sección del lecho menor de inundación y lecho mayor de inundación del Río Papaloapan.

Para las unidades geomorfológicas fluviales denominadas depresiones se realizó una clasificación con base a la permanencia del cuerpo de agua sobre estas. La unidad denominada depresión perenne, indicada en la figura 4.6 del mapa geomorfológico fluvial, se caracteriza por presentar agua durante todo el año, las cuales cambian de extensión debido a la influencia de las inundaciones o las precipitaciones que se presentan en el área de estudio. La gran mayoría de estas depresiones se identificaron dentro de la llanura baja de inundación en la llanura fluvial acumulativa, siendo prácticamente escasas dentro de la llanura fluvial erosiva. Dentro del mapa geomorfológico fluvial, puede observarse la distribución espacial y tamaño de estas depresiones, en áreas cercanas a la desembocadura del río. Debido a la disminución de la extensión de la depresión perenne se identificó un rasgo geomorfológico fluvial denominado playa de depresión perenne (Fig. 4.6), que se refiere a una pequeña cuenca de evaporación con precipitación salina, también puede indicarse que se trata de una depresión con sales aflorantes.

Las depresiones intermitentes son ocupadas temporalmente por agua cuando se presentan inundaciones o durante las precipitaciones, así durante los meses de estiaje estas unidades no están cubiertas de agua.

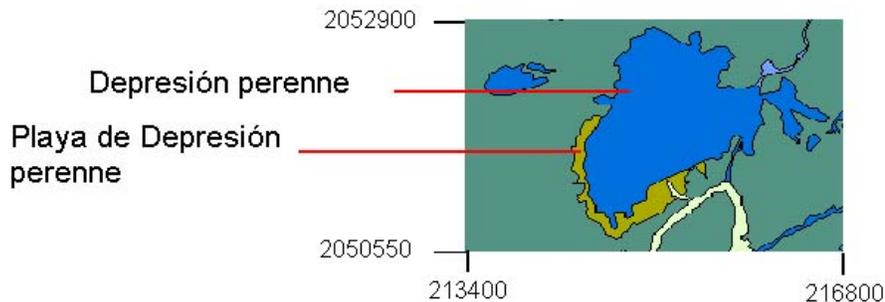


Fig.4.6. Se indica la depresión perenne y el rasgo geomorfológico fluvial denominado playa de depresión perenne.

Las depresiones intermitentes se identificaron sobre ambas llanuras de inundación y pueden variar de tamaño, siendo la de mayor extensión la localizada al sureste de la localidad de Chacaltianguis, indicada en la Figura 4.7. El tamaño de esta unidad puede apreciarse en el mapa geomorfológico fluvial, en el anexo de este trabajo, así como su distribución espacial dentro del área de estudio.

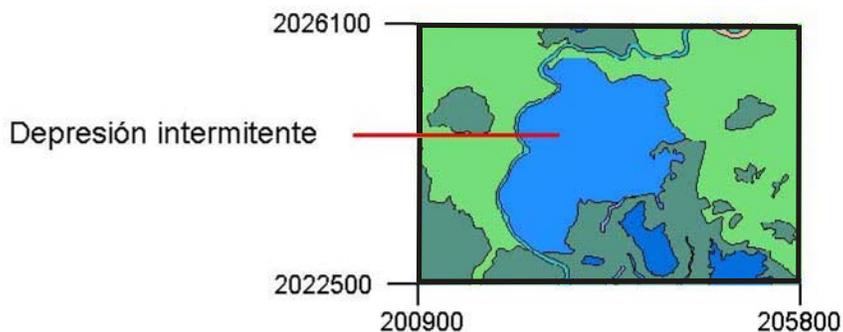


Fig. 4.7. Depresión intermitente localizada al sureste de la localidad de Chacaltianguis.

Los *leveés* son unidades geomorfológicas que se identifican a lo largo de los ríos como elevaciones que frecuentemente se extienden hacia las márgenes del lecho menor por cientos de metros y son usualmente altos en la cercanía del lecho menor con una pendiente gradual hacia el lado del valle. Los *leveés* son discontinuos y se presentan sobre canales activos y abandonados; una de las características de esta unidad es que varían en altura sobre la llanura de inundación, identificándose desde algunos centímetros hasta metros, dependiendo del tamaño del río, granulometría del río, que es la carga de sedimento, tasa de depositación y estación de desarrollo (Bridge, 2003). Dentro del área de estudio los *leveés* se localizan sobre

las márgenes cóncavas del cauce del Río Papaloapan, los cuales se clasificaron con base en los procesos geomorfológicos existentes, denominándose como *leveés* principales, abandonados y secundarios, los cuales pueden apreciarse en el mapa geomorfológico fluvial. Los *leveés* principales se identifican de forma paralela al lecho menor, ya sea sobre la llanura alta de inundación o la llanura baja de inundación. Al sur de la localidad de Otatitlán, en las márgenes derechas del meandro abandonado activo en crecidas, se identificaron dos *leveés* abandonados debido a que ya no se sitúan en las márgenes del lecho menor y su actividad fluvial ya no depende de este, por lo cual puede indicarse que al localizarse esta unidad, el lecho menor del Río Papaloapan presentó una dinámica fluvial en esta sección, conllevando a modificar su curso (Fig. 4.8). La unidad denominada *leveé* secundario se identificó sobre las márgenes de ríos tributarios, indicándose dentro del mapa geomorfológico fluvial sobre la margen derecha del Río Tonto y es la unidad geomorfológica fluvial de mayor extensión, dentro de esta clasificación. La distribución espacial de los *leveés* puede observarse en el mapa geomorfológico fluvial en el anexo cartográfico de este trabajo.

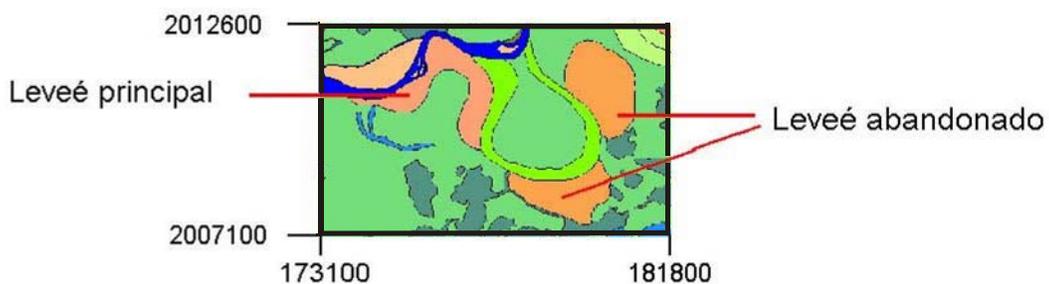


Fig. 4.8. *Leveé* principal sobre la margen derecha del Río Papaloapan y *leveé* abandonado hacia la margen derecha de un meandro abandonado.

La unidad denominada terraza fluvial es una llanura de inundación abandonada que se formó cuando el río presentaba un flujo en un nivel más elevado que el actual por cambios en el régimen hidrológico. Topográficamente consiste de dos partes: un escalón, el cual es una superficie plana, estrecha y alargada que representa el nivel de la llanura de inundación formadora, y el escarpe, que conecta al piso con alguna superficie localizada en el fondo del valle. Se localizan sobre ambas márgenes fluviales del Río Papaloapan y pueden visualizarse, con mayor detalle, dentro del mapa geomorfológico fluvial, en donde se puede apreciar la unidad de mayor extensión en las cercanías de la localidad de Torno Largo, sobre la margen derecha, ilustrada en la Figura 4.9.

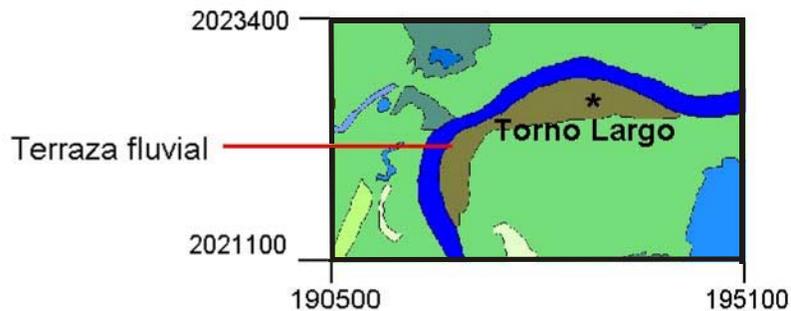


Fig. 4.9. Terraza fluvial identificada en las cercanías de la localidad de Torno Largo, sobre la margen derecha del Río Papaloapan.

La unidad geomorfológica fluvial denominada banco fluvial arenoso sin vegetación, esta formado en el lecho menor del río por el abandono de la arena y de las gravas arrastradas por el curso del río. El banco tiende a ser largo y lineal, es muy usual que se desarrollen en áreas donde se lleva a cabo la acumulación de los depósitos de materiales más recientes dentro del lecho menor del río. En el área de estudio se encuentran distribuidos dentro del lecho menor del río, siendo el de mayor tamaño el localizado a la altura de la localidad de San José Papaloapan que presenta una longitud de aproximadamente 3,800 m, indicado en la Figura 4.10. Debido a la elevación del flujo, las unidades de menores dimensiones quedan cubiertas por el agua cuando se presentan las inundaciones, ocurriendo las modificaciones más drásticas sobre estos. En el anexo de este trabajo, se encuentra el mapa geomorfológico fluvial, en el cual pueden identificarse todos los bancos fluviales arenosos sin vegetación sobre el lecho menor del área de estudio.

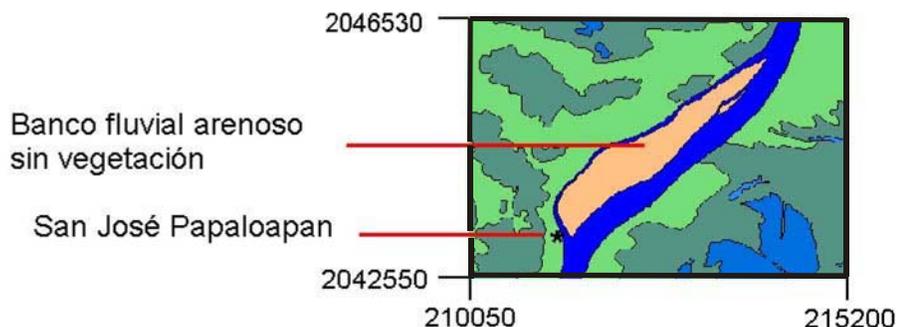


Fig. 4.10. Banco fluvial arenoso sin vegetación identificado en el lecho menor del Río Papaloapan; en la margen izquierda se identifica la localidad de San José Papaloapan.

Otra unidad geomorfológica fluvial identificada es el banco fluvial arenoso con vegetación, localizado dentro del lecho menor del Río Papaloapan. Se identificaron dos de

estas unidades con diferentes extensiones. En la Figura 4.11a puede apreciarse la unidad de menor extensión, al este de la localidad San Francisco Oyozontle, en la cual se identificó agricultura de temporal con cultivos permanentes. En la Figura 4.11b, se ilustra la unidad de mayor extensión con 4,600 m, en las cercanías de la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México y, por consiguiente, la vegetación que presenta es de manglar, principalmente por la influencia del agua salina de mar. Como puede observarse en la figura 4.11b, en esta área predominan los procesos de inundación, debido a que se puede identificar el lecho mayor de inundación en la margen derecha de esta unidad. En el mapa geomorfológico fluvial puede observarse que la primera unidad se encuentra en una llanura alta de inundación, mientras que la segunda, de mayor extensión, sobre la llanura baja de inundación.

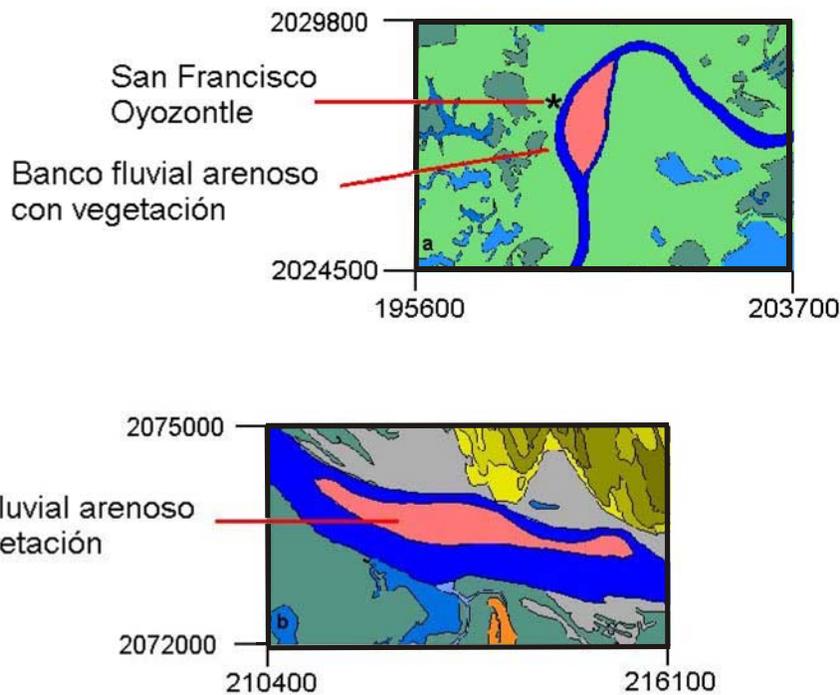


Fig. 4.11. En a, banco fluvial arenoso con vegetación de menor extensión localizado al este de la localidad de San Francisco Oyozontle. En b, banco fluvial arenoso con vegetación de mayor extensión, sobre el lecho menor, cerca de la desembocadura del río en el Golfo de México.

Las barras marginales son unidades geomorfológicas fluviales acumulativas que de forma regular se identifican en el interior de los meandros, en el lecho menor del río. Su composición principalmente es de gravas y arenas. El desarrollo de las mismas tiene estrecha relación con el flujo helicoidal que se presenta sobre las corrientes tipo meandriformes. Se ubican en áreas del lecho menor, en las cuales la profundidad y amplitud son muy reducidas; dentro del mapa geomorfológico fluvial, están indicadas cerca de la confluencia de los ríos

Santo Domingo y Valle Nacional, representadas en la Figura 4.12, donde puede observarse que están situadas en la parte interior del meandro, donde existe menor velocidad del flujo para el desarrollo de procesos de depositación. Estas unidades son cubiertas por el flujo del agua cuando existen volúmenes altos del escurrimiento en el lecho menor y pueden variar considerablemente de longitud, así como en amplitud, dependiendo de la dinámica fluvial que se presente en el río.

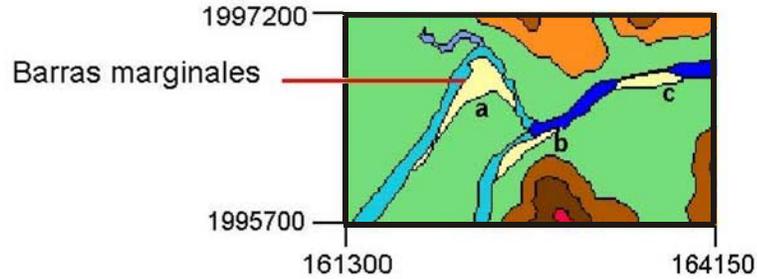
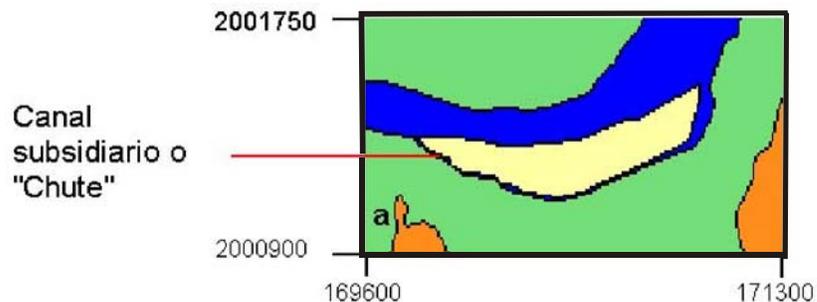


Fig. 4.12. Barras marginales identificadas en la confluencia del río Santo Domingo a, y Valle Nacional b, además de identificarse sobre el lecho menor del Río Papaloapan c.

Al sur de la localidad de Tuxtepec se presenta otra barra marginal en la cual se identificó un canal subsidiario o *chute*, en la Figura 4.13a. Es importante mencionar que sobre otras barras marginales se reconoció la presencia de *chutes*, como el localizado en el lecho menor, al noroeste de la localidad de Ambrosio Alcalde, en el cual se identificó un *leveé* principal en la margen derecha de la llanura de inundación, y el *chute* abarcando solamente una pequeña extensión paralela a este *leveé* principal, representado en la Figura 4.13b, en donde se puede apreciar a la unidad geomorfológica fluvial con mayor detalle y es importante mencionar que la amplitud del *chute*, dentro del mapa geomorfológico fluvial, varía entre 2 a 5 m, por lo cual no puede apreciarse con claridad. Otro *chute*, de características similares, se ubica al sur de la localidad Paso Nuevo, pero a diferencia de que este último, se encuentra de forma paralela a un banco fluvial arenoso sin vegetación y sobre una barra marginal.



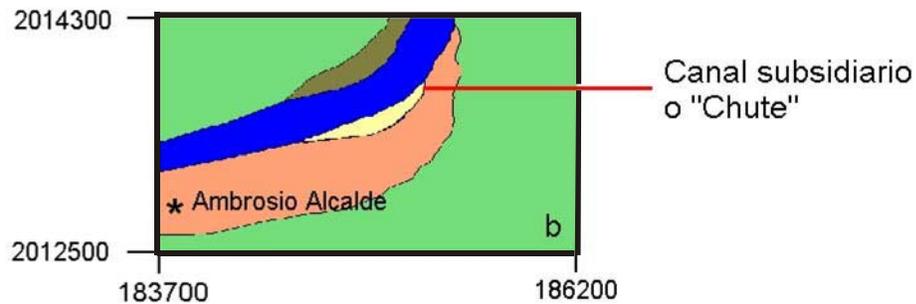
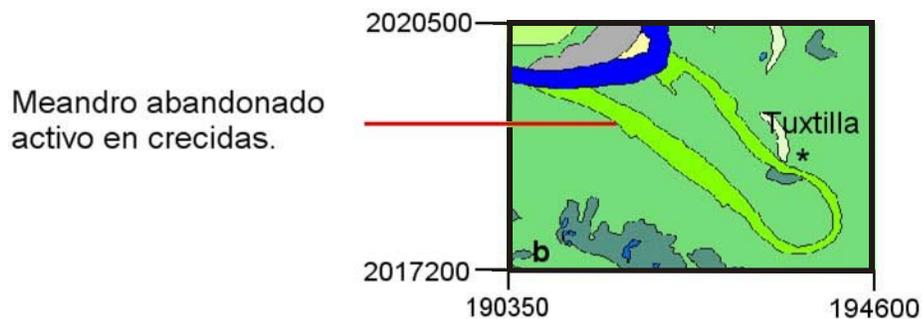
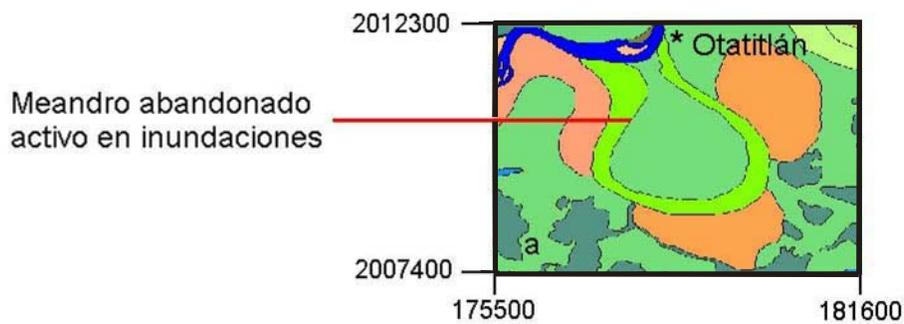


Fig. 4.13. En a, se indica el canal subsidiario o "chute" al sur de la localidad de Tuxtepec. En b, "chute" localizado al noroeste de la localidad de Ambrosio Alcalde.

La unidad denominada meandros abandonados, dentro del mapa geomorfológico fluvial, puede apreciarse su distribución espacial y la representación en varias formas y extensiones sobre ambas márgenes fluviales del Río Papaloapan. Estas unidades se clasificaron en meandro abandonado activo en crecidas, por acortamiento y en forma de lago de herradura, con base en esta clasificación están representados en el mapa geomorfológico fluvial. Dentro de los meandros se presentan procesos fluviales denominados estrangulamiento (*neck cut-off*) y acortamiento (*chute cut-off*). El estrangulamiento se caracteriza porque los cuerpos de agua guardan aún comunicación temporal con el río, por medio del estrecho canal que se sitúa a través del lecho remanente del meandro recién abandonado, esto es, que los sedimentos aún no alcanzan a colmar los extremos del cauce en los meandros recién estrangulados. Los meandros abandonados activos en crecidas están identificados dentro del primer proceso.

Los meandros abandonados activos en crecidas se ven afectados temporalmente durante el período de lluvias o al presentarse inundaciones, debido a que son depresiones dentro de la llanura fluvial del Río Papaloapan y mantienen aún comunicación con el lecho menor de éste, por lo tanto, son las primeras unidades geomorfológicas fluviales afectadas cuando existen desbordamientos. Al sur de la localidad de Otatitlán se localiza un meandro abandonado activo en crecidas, que se halla en contacto con el lecho menor del Río Papaloapan y sólo se inunda cuando el flujo de agua se eleva sobre el lecho menor, originando que se desarrollen los procesos de inundación en el área deprimida del mismo, representado en la Figura 4.14a, donde puede observarse que se encuentran en ambas márgenes externas *leveés* abandonados producto de la actividad fluvial que se presentó sobre este meandro; esta unidad puede observarse en el mapa geomorfológico fluvial en el anexo cartográfico de este trabajo. Al oeste de la localidad de Tuxtilla se identificó una unidad geomorfológica similar, Figura 4.14b, la cual mantiene aún conexión con el lecho menor del río que llega a inundar el área deprimida durante las inundaciones; cuenta con una longitud aproximada de 3,400 m con

una amplitud máxima aproximada de 1,500 m, en su fase inicial. Al sureste de la localidad de Cosamaloapan se encuentran dos unidades similares, que pueden observarse en la figura 4.14c. Es en esta área donde se ha presentado una dinámica fluvial muy importante; en primera instancia el meandro localizado más al sureste indica que al presentarse las inundaciones éste se anega en las áreas más deprimidas porque mantiene conexión con el lecho menor del Río Papaloapan; el segundo meandro abandonado, situado en las cercanías de la localidad de Cosamaloapan, tiene también conexión con el lecho menor, sólo que éste ya no es propenso a inundaciones, porque las depresiones existentes, cercanas al lecho menor, han sido rellenadas por los sedimentos de inundaciones anteriores, caso contrario sucede con las más alejadas donde los cuerpos de agua aumentan de tamaño durante la temporada de lluvias. Por último, el meandro abandonado localizado al sur de la confluencia de los ríos Papaloapan y Tesechoacan exhibe las mismas características que los anteriormente mencionados y tiene una longitud aproximada de 4,000 m, con una amplitud máxima aproximada de 1,500 m. Esta unidad puede observarse en el mapa geomorfológico.



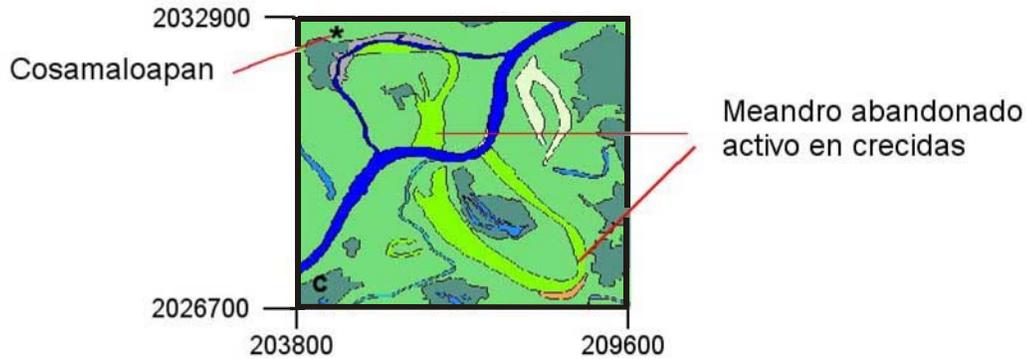


Fig. 4.14. Localización de meandro activo en inundaciones, en la figura a, se indica al sur de la localidad de Otatitlán; en la figura b, al oeste de la localidad de Tuxtilla y en c, los localizados al sureste de la localidad de Cosamaloapan.

La unidad geomorfológica fluvial denominada meandro abandonado por acortamiento se caracteriza porque el nuevo curso canaliza cada vez más caudal, lo que resulta en constantes modificaciones del curso fluvial, de manera que la actividad en el caudal antiguo se reduce progresivamente, impidiendo la comunicación con el lecho menor del río debido a su relleno gradual: primero por carga de fondo y más adelante, al obstruirse la comunicación, por las arcillas y limos introducidos en suspensión. Dentro del mapa geomorfológico fluvial, se identificaron varias unidades geomorfológicas de este tipo y son evidentes en áreas donde se presentan rasgos lineales, productos de la migración del lecho menor. Las Figuras 4.15a, 4.15b y 4.15c, respectivamente, son obtenidas del mapa citado anteriormente y son claros ejemplos de meandros abandonados por acortamiento, identificándose varios procesos fluviales. En la Figura 4.15a se identificaron dos etapas: en la primera, se indica el meandro de menor dimensión en la parte inferior; en la segunda etapa, el meandro representa una mayor dimensión y sobre áreas adyacentes a estos, se identificaron rasgos de crecimiento sedimentario lateral indicando una dinámica fluvial del acortamiento en esta sección del Río Papaloapan. Dentro del mapa geomorfológico fluvial se puede observar otro ejemplo de esta unidad localizada al norte de la localidad de Otatitlán, identificándose líneas de crecimiento sedimentario vertical que indican que el nuevo curso canalizó cada vez más caudal, disminuyendo la actividad del caudal actual, dejando vestigios de una topografía de crecimiento sedimentario. Este meandro ocupa actualmente el lecho menor del Río Papaloapan; en la llanura alta de inundación se identificaron rasgos de crecimiento sedimentario vertical, en donde se observa una migración del mismo.

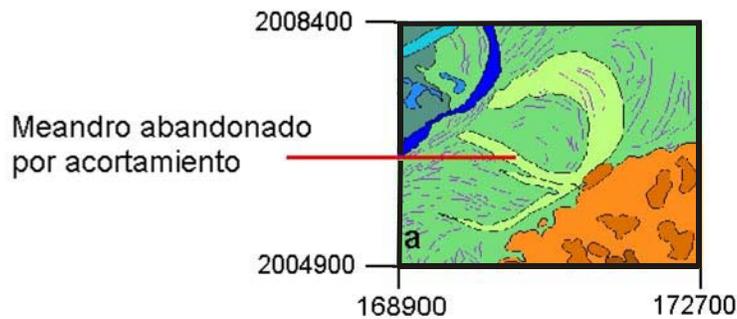
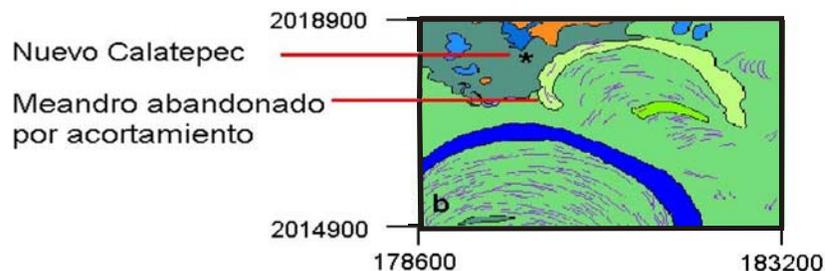


Fig. 4.15. En a, meandro abandonado por acortamiento, identificándose dos etapas.

Otra unidad geomorfológica similar, se localiza al este de la localidad de Nuevo Calatepec, inundándose durante el período de lluvias; presenta una longitud aproximada de 4,300 m y una amplitud máxima promedio de 380 m. Del lecho menor del Río Papaloapan, con dirección hacia este meandro, se identificaron una serie de rasgos lineales indicando la presencia de un proceso de acortamiento, provocando el abandono de esta unidad. Además, los sedimentos rellenaron por completo sus extremos, en primera instancia por carga tractiva y, posteriormente, por suspensión, lo cual se ilustra en la Figura 4.15b. En la figura 4.15c se muestran otras dos unidades geomorfológicas similares, localizadas al este de la localidad de Otatitlán. Esta migración se presentó en diferentes fases, dando como resultado dos meandros abandonados por acortamiento, existiendo una diferenciación entre ellos, aunque se presentan uno contiguo del otro, además entre estos y el lecho menor se identificó un *leveé* principal. Hay que destacar la presencia de rasgos lineales de crecimiento sedimentario lateral y barras de meandro que se pueden identificar en la Figura 14.5c. Las unidades identificadas al oeste de la localidad de Paraíso Novillero y al suroeste de la localidad de Chacaltianguis no fueron representados en figuras, pero pueden identificarse dentro del mapa geomorfológico fluvial del área de estudio, tomando como referencia las localidades y la clasificación de esta unidad geomorfológica fluvial.



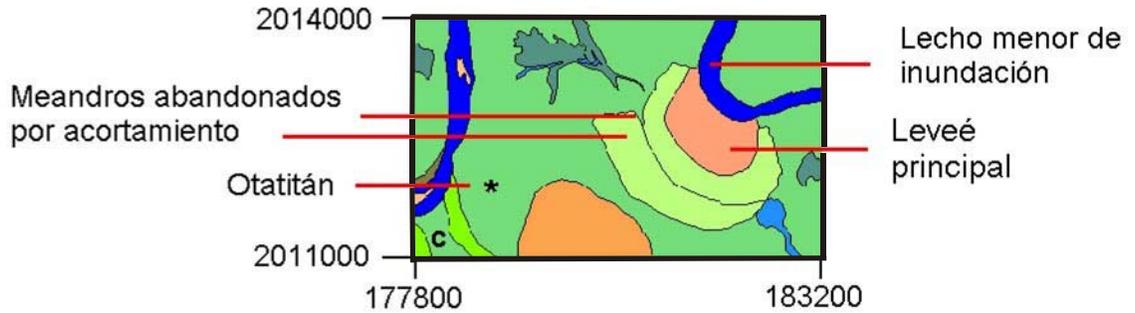
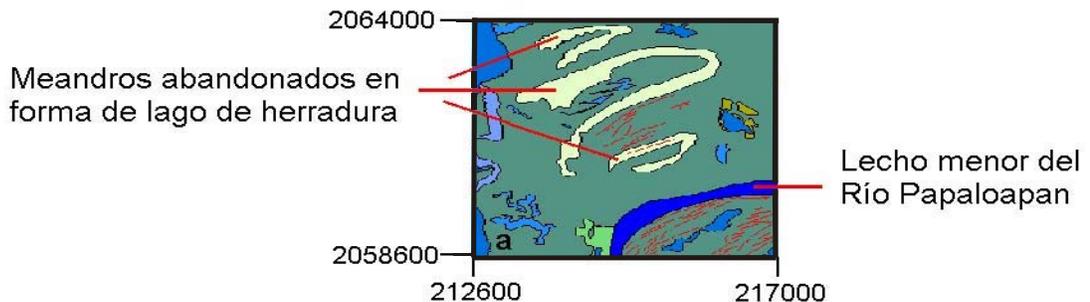


Fig. 4.15. Meandro abandonado por acortamiento, en la figura b, se indica el localizado al este de la localidad de Nuevo Calatepec. En la Figura c, se indican dos meandros al este de la localidad de Otatitlán.

La unidad geomorfológica fluvial denominada meandros abandonados en forma de lagos de herradura, ó media luna, se encuentra en el mapa geomorfológico fluvial sobre la llanura baja de inundación. Una de las características de esta unidad es que ya no tienen contacto con el lecho menor, la diferencia es que pertenecen a algunos ríos tributarios o a los ríos que se han identificado dentro de la misma llanura baja de inundación del área de estudio. En el mapa geomorfológico fluvial están representados, hacia el este de la laguna El Embarcadero, tres meandros abandonados en forma de lago de herradura, los cuales muestran una dirección sureste-noroeste en relación al lecho menor del Río Papaloapan hacia esta laguna. Puede indicarse que han manifestado una migración sobre el lecho menor debido a su orientación y la distribución espacial sobre el área de estudio, los cuales se muestran en la figura 4.16a. Otra unidad geomorfológica similar se identificó sobre la margen izquierda del Río El Pájaro, la cual marca una clara evidencia del abandono del lecho menor de este río debido a que se ubica sobre el lecho mayor de inundación, representado en la figura 4.16b. En el área de estudio se identificaron otras unidades geomorfológicas similares, de dimensiones más reducidas y que pueden apreciarse en el mapa geomorfológico fluvial.



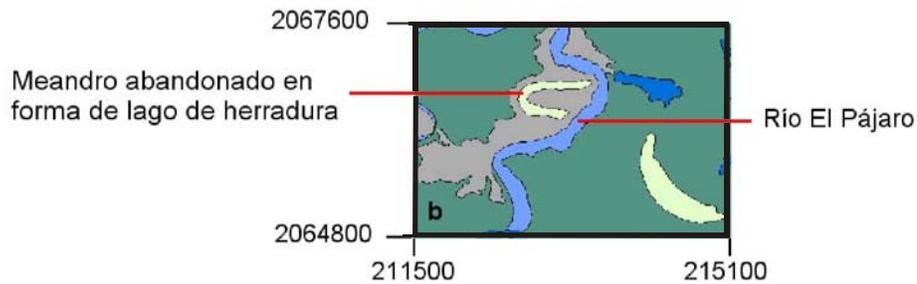
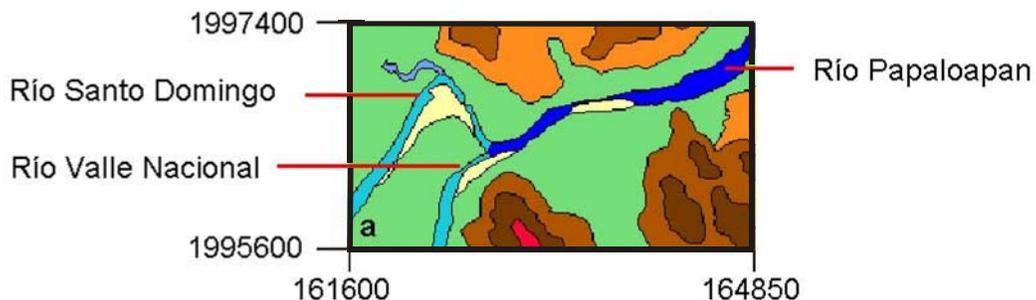


Fig. 4.16. En la figura a, aparecen tres meandros abandonados en forma de lago de herradura, con una orientación sureste-noreste con relación al lecho menor del Río Papaloapan. Para la figura b, se identifica otro meandro sobre la margen izquierda del Río El Pájaro.

El río perenne es una unidad geomorfológica fluvial que en el mapa geomorfológico fluvial se encuentra distribuido espacialmente en la llanura alta y baja de inundación. Este tipo de corrientes se caracteriza por presentar flujo de agua en todo el año y algunos de estos ríos desembocan sobre cuerpos de agua perennes. El río intermitente presenta flujo de agua posterior a una lluvia y durante las inundaciones, debido a que conducen el agua hacia las partes más deprimidas de las llanuras de inundación, y después, a medida de que van descendiendo los niveles de agua, sólo permanece el cauce de estos ríos.

Otra unidad geomorfológica fluvial es el río tributario, representado en el mapa geomorfológico fluvial. Dentro de esta clasificación se encuentran los ríos Santo Domingo y Valle Nacional localizados al suroeste del área de estudio, ambos formadores del Río Papaloapan, representados en la Figura 4.17a. El Río Tonto es el río tributario con la mayor amplitud del lecho menor que se une por la margen izquierda al Río Papaloapan, puede identificarse al norte de la localidad de Tuxtepec y está representado en la figura 4.17b. Los ríos Tesechoacán y San Juan se unen por la margen derecha, en diferentes áreas, siendo este último, identificado frente a la localidad de Tlacotalpan, asimismo es el último tributario que se une al Río Papaloapan por ambas márgenes y pueden identificarse en la Fig. 4.17c.



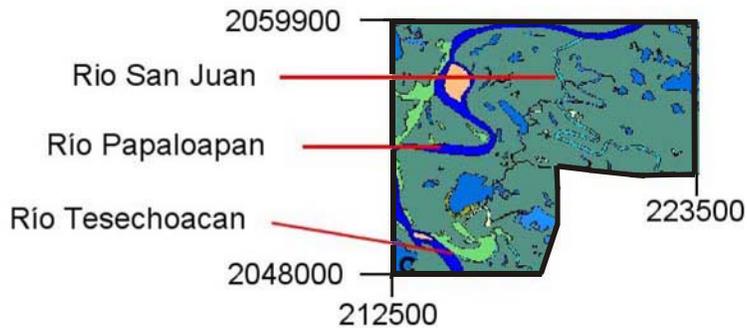
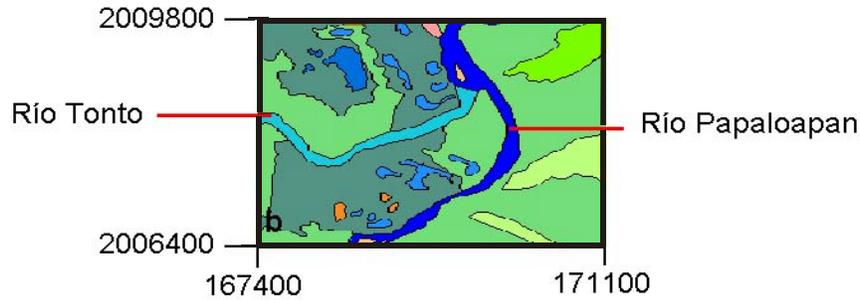


Fig. 4.17. En a, se identifican los ríos tributarios Santo Domingo y Valle Nacional. Para la figura b, el Río Tonto como otro tributario y en la figura c, sobre la margen derecha a los ríos tributarios Tesechoacan y San Juan.

La unidad denominada corriente tipo *yazoo*, Río Acula, es una corriente tributaria y de tipo perenne, que corre paralela al río principal por una cierta distancia (Goudie, *et al.*,1994). Tomando como referencia al mapa geomorfológico fluvial, esta corriente tiene su origen en la Laguna El Salado, al sur de la localidad de Acula, desembocando en la Laguna de Alvarado. Este río presenta una longitud aproximada de 48,650 m y debido a su localización, se utilizó como limite del área de estudio en la parte poniente, desde la mitad de su longitud y hasta su desembocadura en la Laguna de Alvarado, lo cual puede identificarse en la figura 4.18. Por la llanura baja de inundación fluye la mayor parte de este río, con algunas áreas en menor proporción aguas arriba, donde se sitúa sobre la llanura alta de inundación. Durante la temporada de lluvias el Río Acula amplía su cauce, lo cual influye en los lechos mayores de inundación identificados en las cercanías de la desembocadura de la Laguna de Alvarado, área con una vegetación de manglar.

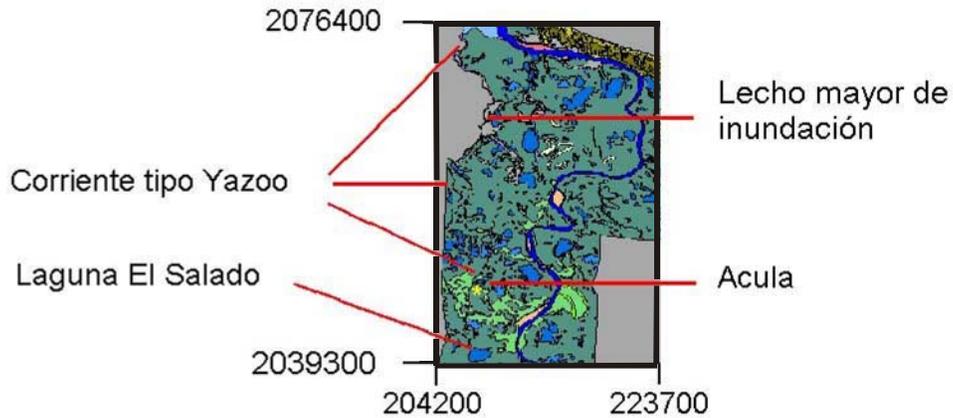


Fig. 4.18. Corriente tipo Yazoo, tiene sus orígenes en la Laguna El salado, al sur de la localidad de Acula. Se puede apreciar la longitud de esta corriente.

La unidad geomorfológica fluvial denominada brazo de crecida se identificó en las cercanías de la confluencia de los ríos Tonto y Papaloapan, sobre la margen izquierda de este último. Esta unidad se caracteriza por ser un área de desbordamiento al presentarse las inundaciones, aunque el flujo desbordado regresa al lecho menor del río. Dentro de esta unidad se muestra la influencia antrópica, por la presencia de una carretera que atraviesa a la misma. Aún existe una conexión en la parte inicial de este brazo de crecida con el lecho menor, pero no en su parte final, lo que origina que al ocurrir inundaciones, contenga flujo de agua que va disminuyendo de forma gradual, ocasionando la presencia de pequeñas depresiones perennes en el interior de esta unidad (Fig. 4.19).

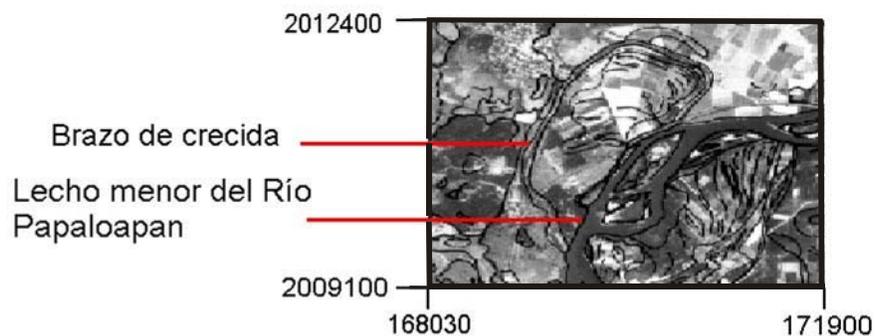


Fig. 4.19. Brazo de crecida identificado en las cercanías de la confluencia de los ríos Tonto y Papaloapan.

La playa es una unidad geomorfológica formada por una franja de costa, ligeramente inclinada hacia el mar, compuesta por arenas, gravas y guijarros, principalmente, que son depositados por el continuo movimiento del oleaje que está presente dentro de esta área (Lugo, 1989). Dentro del área de estudio se localizan al noroeste y al sureste de la desembocadura del

Río Papaloapan, a lo largo de varios kilómetros, además de identificarse de forma paralela a los lomeríos eólicos acumulativos.

En la desembocadura del Río Papaloapan y paralela a la planicie costera se delimitaron los lomeríos eólicos acumulativos, pueden visualizarse en el mapa geomorfológico fluvial en el anexo de este trabajo. En esta unidad se identificaron intercalaciones de altitud entre ellos, por lo cual se realizó una clasificación con base en la altura relativa dividiéndose en lomeríos eólicos acumulativos muy bajo, bajo, medio inferior, medio superior, alto y muy altos. Esta unidad geomorfológica está compuesta por arenas, producto de la actividad del viento que se presenta en esta área y que ha generado la acumulación de las mismas. Los lomeríos eólicos acumulativos se indican en la Figura 4.20, con su clasificación determinada con base en la altura relativa.

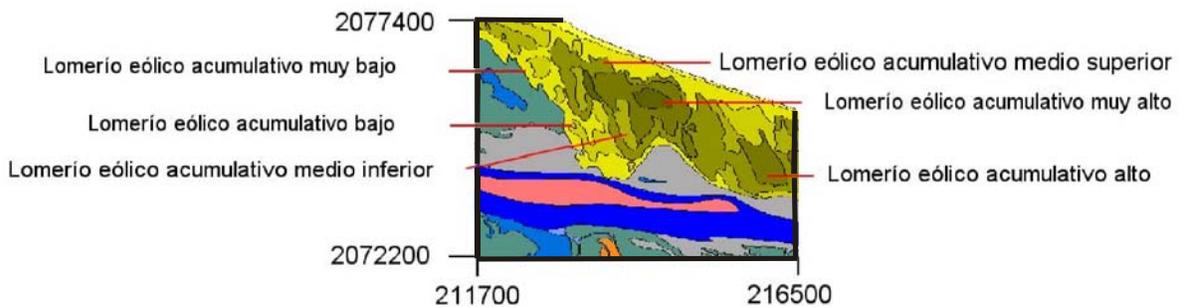


Fig. 4.20. Lomerío eólico acumulativo, indicándose la clasificación que se realizó en el mapa geomorfológico fluvial.

Las planicies lagunares costeras se encuentran en el área de la desembocadura del Río Papaloapan, siendo la de mayor tamaño la Laguna de Alvarado. Sobre esta laguna desemboca una corriente tipo Yazoo, que corre paralelo al lecho menor del Río Papaloapan y cuando se desarrolló la fotointerpretación, se logró dividir al lecho menor del río de la laguna, debido a la diferencia de la tonalidad de los sedimentos entre ambas unidades. La llanura baja de inundación es la unidad que rodea a la laguna debido a la presencia de vegetación de manglar.

#### 4.4 Índice de sinuosidad del Río Papaloapan.

Dentro de la clasificación de los cursos fluviales, el cauce principal del Río Papaloapan es un río de tipo meandriforme. Este tipo de corrientes se definen exclusivamente en función del índice de sinuosidad mayor a 1.5 (Leopold y Wolmam, 1963). Las corrientes meandriformes se encuentran aguas abajo de las corrientes tipo trenzadas y aguas arriba de los deltas dentro del sistema fluvial, siendo más comunes en regiones con planicie costera. El Río Papaloapan

presenta un índice de sinuosidad de 1.51, este valor se ha obtenido desde la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional hasta la desembocadura del río en el Golfo de México. El Río Papaloapan se dividió en cinco secciones con base en la orientación del lecho menor (Fig. 4.21), en las cuales se obtuvo un valor de sinuosidad individual. A medida de que el índice de sinuosidad es mayor indica menor pendiente y menor competencia por dicha baja pendiente. Para la primera sección es de 1.56, el cual corresponde a un patrón meándrico; la segunda sección presenta un índice de 1.78, siendo el valor mayor, lo cual corresponde a un patrón meándrico; la tercera sección presenta un índice de 1.54, correspondiendo un patrón meándrico; la cuarta sección 1.42, se identificó un patrón sinuoso y, por último, la quinta sección con 1.24 que manifiesta un patrón sinuoso.

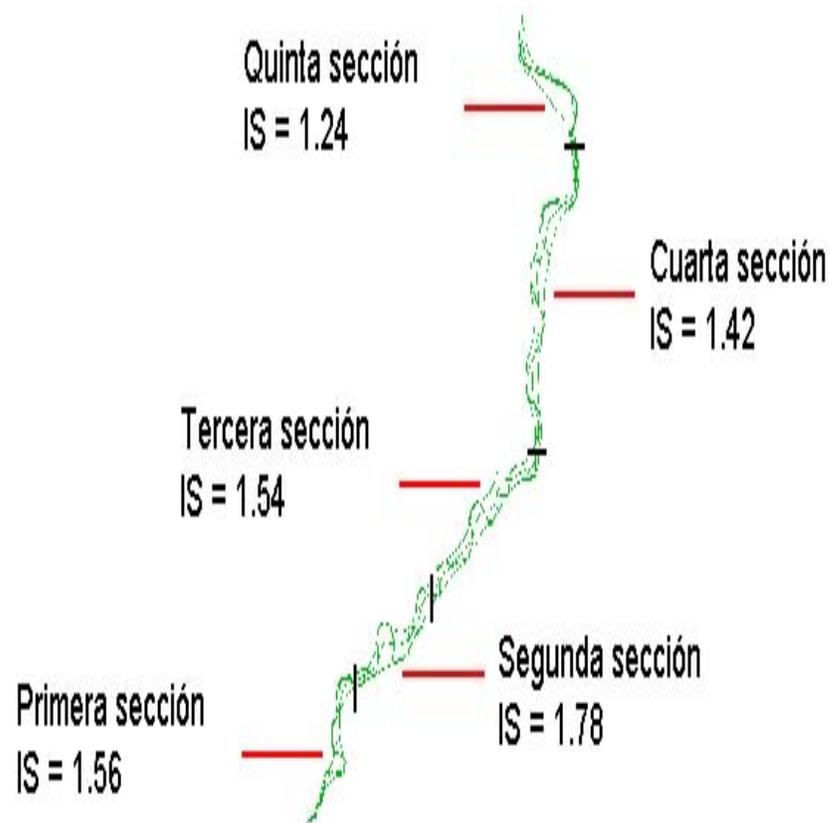


Fig. 4.21. Secciones en las cuales se dividió el Río Papaloapan indicándose el valor para cada una.

La primera sección está sobre la llanura alta de inundación, sobre ambos márgenes del lecho menor, con excepción del área de confluencia de los ríos Tonto y Papaloapan, en donde está la llanura baja de inundación. Otras unidades identificadas dentro de esta sección son las barras marginales y los bancos arenosos (Fig. 4.21). Al norte de la localidad de Tuxtepec, sobre la margen derecha, se identificaron rasgos de crecimiento sedimentario lateral que indican una

dinámica fluvial sobre el lecho menor del Río Papaloapan. El único meandro con gran amplitud es el que rodea a la ciudad de Tuxtepec, además se presentan algunos sectores rectilíneos.

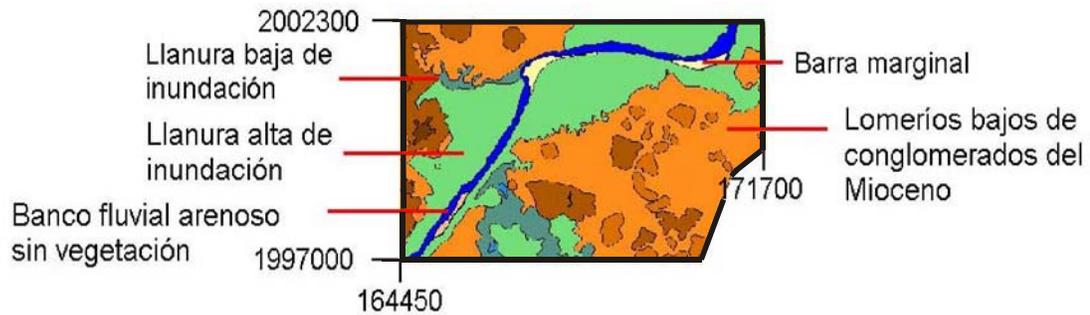


Fig. 4.22. Primera sección del Río Papaloapan, presenta un índice de sinuosidad de 1.56. Se indican las unidades geomorfológicas identificadas en esta sección.

La segunda sección del río se localiza sobre la llanura alta de inundación, con algunas áreas pequeñas de la llanura baja de inundación y de bancos arenosos, dentro del lecho menor; los *leveés* principales se identificaron sobre la margen derecha del Río Papaloapan, donde predominan los procesos de crecimiento sedimentario vertical; los meandros abandonados activos en crecidas, así como el meandro abandonado por acortamiento, se identificaron sobre ambas márgenes. En esta sección existen más meandros abandonados. Las terrazas fluviales fueron identificadas de forma paralela al lecho menor de inundación, siendo vestigios de antiguas llanuras de inundación. Sobre el meandro abandonado por acortamiento, al norte de la localidad de Otatitlán, se identificaron los rasgos de crecimiento sedimentario lateral. Se puede observar esta sección completa en el mapa geomorfológico fluvial, y en la Fig. 4.23 se muestra a mayor detalle.

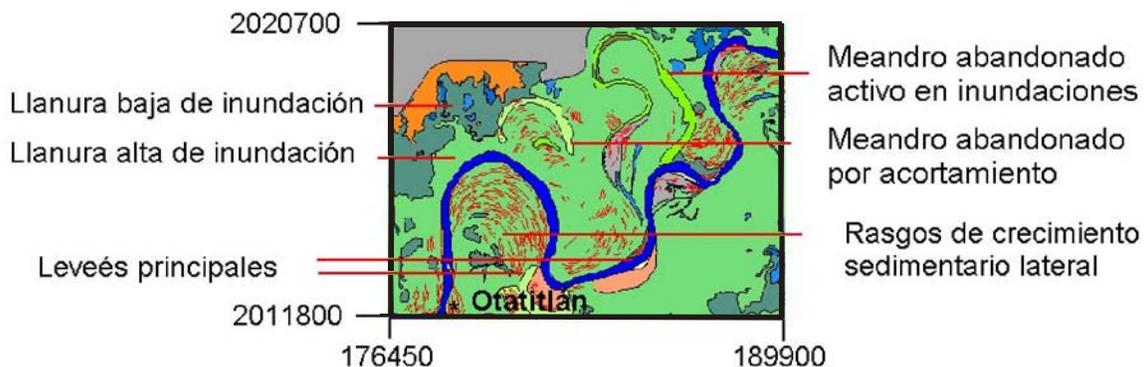


Fig. 4.23. En la segunda sección se presenta un índice de sinuosidad de 1.78, siendo el valor mayor de las cinco secciones. Se indican las unidades geomorfológicas fluviales identificadas.

La tercera sección se localiza en la llanura alta de inundación con algunas áreas amplias de llanura baja de inundación. También se identificaron meandros abandonados activos

en inundaciones, meandros abandonados por acortamiento y la unidad banco arenoso con vegetación. Los rasgos lineales se identificaron en las márgenes internas donde existe un crecimiento sedimentario lateral que es el resultado de la migración que ha presentado el lecho menor del río Papaloapan en esta sección. La figura 4.24 muestra un detalle de esta sección del río.

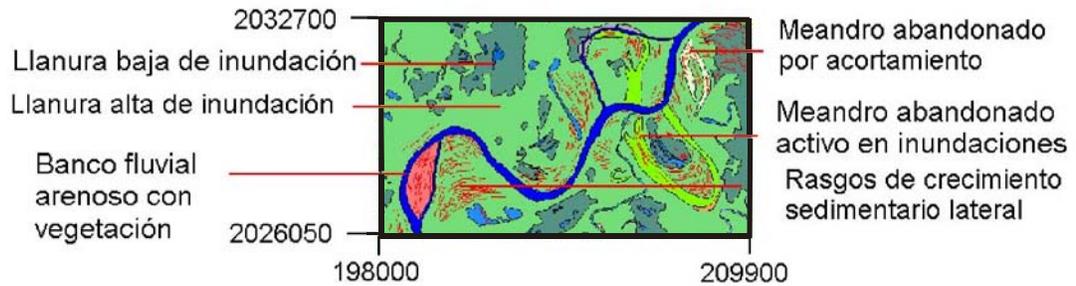


Fig. 4.24. Tercera sección del Río Papaloapan que presenta un índice de sinuosidad de 1.54, además de identificarse las unidades geomorfológicas fluviales.

La cuarta sección está sobre la llanura baja de inundación; sobre la margen derecha se identificó un meandro abandonado activo en crecidas y bancos arenosos sobre el lecho menor. En este meandro se han identificado rasgos lineales que indican un crecimiento sedimentario lateral (Fig. 4.25). En esta sección el lecho menor del Río Papaloapan presenta un cambio de rumbo, hacia el norte, lo cual puede ser resultado de un control estructural entre estas dos secciones, aunque la influencia de los sedimentos que se han acumulado a lo largo de la planicie no permite identificarlo. Dicho cambio de dirección puede observarse en el mapa geomorfológico fluvial en este trabajo.

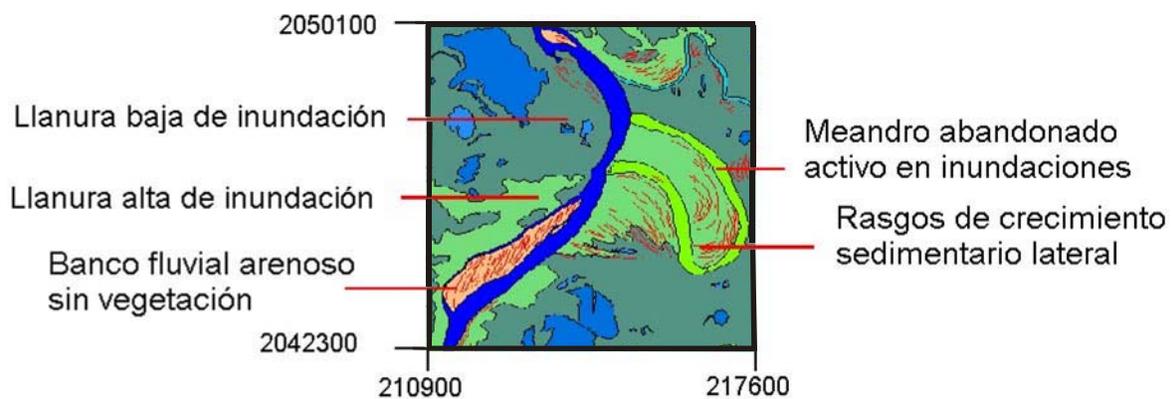


Fig. 4.25. Se indica la cuarta sección con un índice de sinuosidad 1.42.

En la quinta sección, se presenta un patrón rectilíneo, en donde los procesos fluviales cambian ya que sobre esta sección se encuentra la desembocadura del Río Papaloapan en el Golfo de México. Esta sección se identificó sobre la llanura baja de inundación y cerca de la desembocadura, sobre el lecho menor, se presentan bancos arenosos con vegetación. Los rasgos de crecimiento sedimentario lateral son casi nulos sobre esta sección (Fig. 4.26).

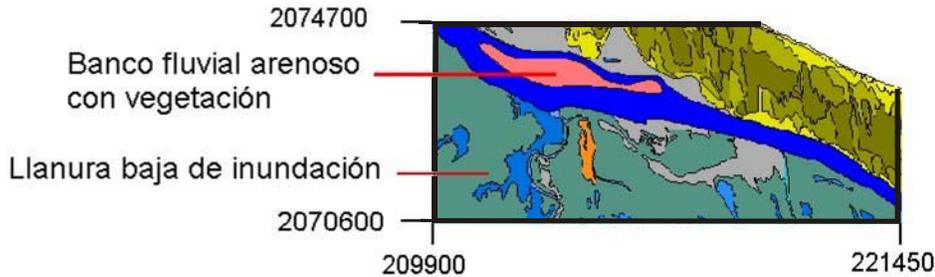


Fig. 4.26. Parte de la quinta sección del Río Papaloapan con un índice de sinuosidad de 1.24, que representa un patrón sinuoso. Esta sección del río se encuentra cerca de la desembocadura del Golfo de México y la Laguna de Alvarado.

#### 4.5 Identificación de áreas con diferentes niveles de peligro a inundación.

Para la identificación de áreas con peligro a inundación en la llanura fluvial del Río Papaloapan se consideró al mapa geomorfológico fluvial como referencia principal, localizado en el anexo de este trabajo.

Las áreas se clasificaron en cuatro niveles que son: áreas muy expuestas o con nivel alto al peligro de inundación, áreas moderadamente expuestas o con nivel medio al peligro de inundación, áreas poco expuestas o con nivel bajo al peligro de inundación y las áreas sin peligro de inundación (Fig. 4.27).

Las elevaciones identificadas en el área de estudio son áreas que se caracterizan por no presentar un peligro a inundación debido a la altura relativa; las unidades geomorfológicas fluviales denominadas cuerpos de agua perennes están clasificadas de forma similar que las elevaciones, a diferencia de que en estas últimas, las inundaciones pueden hacer variar de tamaño a estos cuerpos de agua.

Dentro de las áreas muy expuestas o con nivel alto por amenazas de inundación se identificaron las siguientes unidades: llanura baja de inundación, la cual comprende un área deprimida. Esta área ocupa la mayor extensión dentro de las áreas identificadas con este nivel de peligro; el área con mayor extensión se localiza sobre ambas márgenes del Río Papaloapan, en las cercanías de su desembocadura, donde se identificó vegetación de manglar y varios

cuerpos de agua intermitentes, los cuales son las primeras unidades en ser ocupadas durante las inundaciones.

Los meandros abandonados en forma de lago de herradura, activo en crecidas y por acortamiento son unidades cubiertas por el flujo del agua, cuando se presentan las inundaciones. El meandro abandonado activo en crecidas es una depresión afectada por las inundaciones debido a que presenta una conexión con el lecho menor del río, por esta causa es la unidad primeramente afectada al aumentar los niveles de flujo de agua en el río. Los meandros abandonados y abandonados por acortamiento son menos activos por estar más alejados del lecho menor.

Los brazos de crecida, lecho mayor de inundación, bancos fluviales y barras marginales son unidades que se clasificaron también como áreas muy expuestas al peligro de inundación. Ellas se localizan junto al lecho menor del río y, por consiguiente, son áreas que se ven afectadas inmediatamente al elevarse los niveles de flujo de agua.

Dentro de las áreas moderadamente expuestas o con nivel medio al peligro de inundación se identificaron la llanura alta de inundación y los *leveés* secundarios, ambas unidades se caracterizan por presentar una altura relativa un poco más elevada que las áreas muy expuestas al peligro de inundación. La llanura alta de inundación es una de las unidades más amplias del área de estudio, caracterizada por no ser afectada por las inundaciones frecuentes. Los *leveés* secundarios se identificaron en las márgenes de los ríos tributarios y presentan una altura relativa que no los hace vulnerables al peligro de inundación.

Dentro de las unidades geomorfológicas fluviales poco expuestas o con nivel bajo al peligro de inundación se identificaron al *leveé* principal y el abandonado. El primero está localizado sobre ambas márgenes del lecho menor del río; el *leveé* abandonado se ha identificado sobre áreas donde se presentan meandros abandonados, lo que indica que anteriormente el lecho menor del río mantenía su curso sobre estas unidades, dando como resultado el *leveé* que ahora se encuentra abandonado. Debido a la dinámica fluvial del río, tanto el *leveé* principal y el abandonado, son las unidades geomorfológicas fluviales de mayor altura dentro de las unidades consideradas.

Las áreas sin peligro a inundaciones corresponden a las unidades identificadas como lomeríos de conglomerados del Mioceno, localizados en los alrededores de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional y sobre la margen derecha del Río Tonto. También se identificaron los lomeríos eólicos acumulativos en el área de la desembocadura del Río Papaloapan, los cuales se encuentran de forma paralela al Golfo de México.

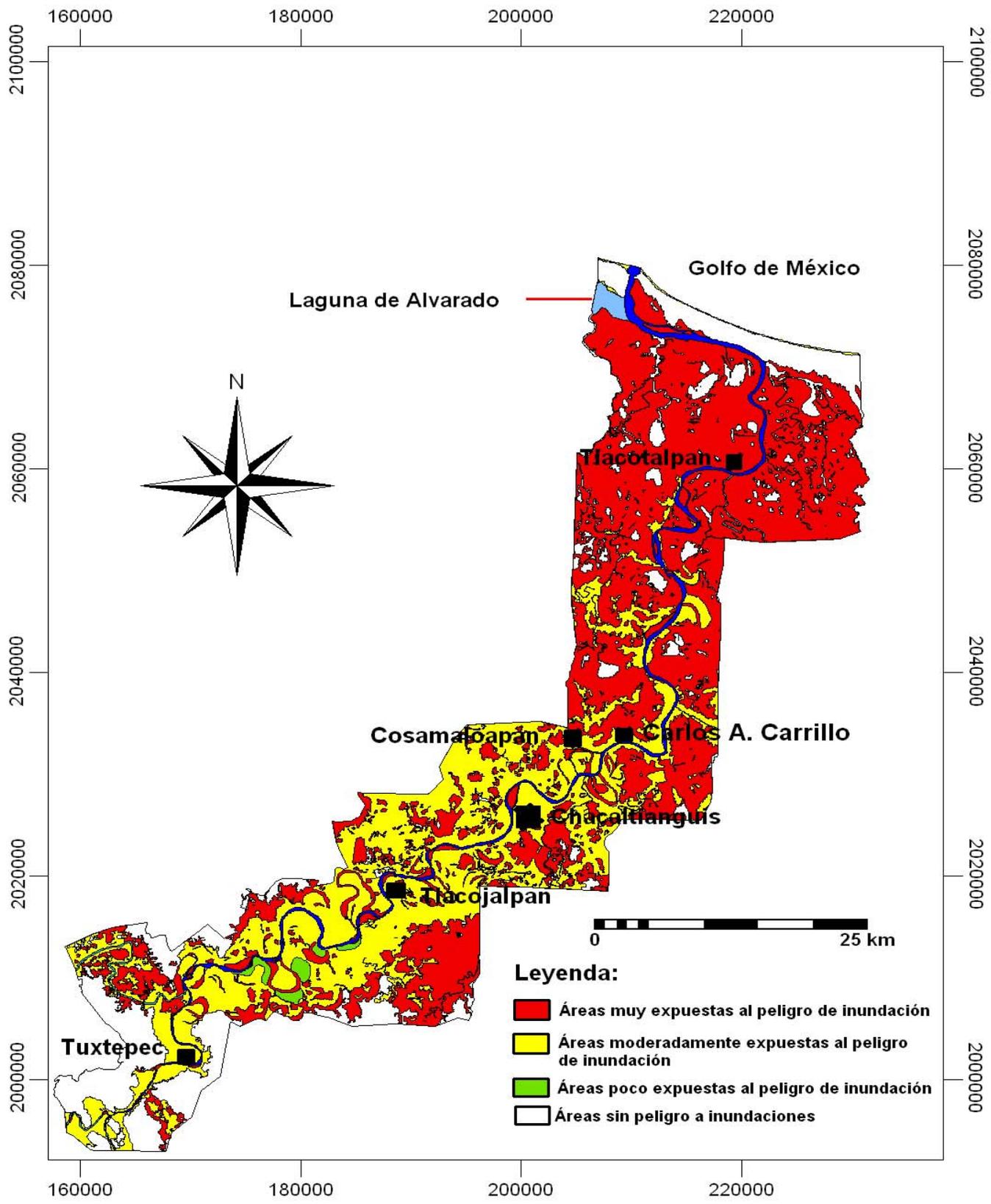


Fig. 4.27. Áreas identificadas con diferentes niveles de peligro a inundación en el área de estudio.

Con base en las áreas identificadas con peligro a inundación, la localidad de Tlacotalpan se encuentra sobre un área muy expuesta o con un alto nivel por amenazas de inundación (Fig. 4.27), debido a que se identificó sobre la llanura baja de inundación. Las localidades de Tuxtepec, Chacaltianguis, Cosamaloapan y Carlos A. Carrillo son áreas moderadamente expuestas ó con nivel medio al peligro de inundación.

## CONCLUSIONES

Las áreas muy expuestas al peligro de inundación se identificaron en el área de la desembocadura del río Papaloapan, en donde la presencia de suelos tipo gleysoles es un elemento determinante para el estancamiento de los flujos de agua y por consiguiente el desarrollo de las inundaciones. Los meandros abandonados en forma de lago de herradura, los activos en crecidas, los abandonados por acortamiento, los brazos de crecida, el lecho mayor de inundación, los bancos fluviales y barras marginales son las unidades geomorfológicas fluviales que están clasificados dentro de esta categoría.

De los diecisiete años en los que se han presentado inundaciones en el área de estudio, trece han tenido la influencia de algún huracán, ya sea que se haya manifestado en el Pacífico, Golfo de México ó en el Mar Caribe. El área de estudio es muy susceptible de ser inundada cuando se presentan huracanes, aunados a las condiciones climáticas presentes que favorecen un clima cálido con registro de altas precipitaciones.

Dentro del análisis espacial de la distribución de la precipitación, en los años 1955, 1969, 1975 y 1981, puede concluirse que los registros de las estaciones localizadas en aguas arriba, Ciudad Alemán, Otatitán, Papaloapan, Papelera Tuxtepec y Tuxtepec son las que presentan los mayores valores. Ahí se registran los valores máximos de precipitación, lo que conlleva a la respuesta hidrológica, para que se presente el gasto máximo en la estación hidrométrica Papaloapan. Para el año 1955, en las estaciones cercanas a la desembocadura del río Papaloapan, se registraron los valores máximos de precipitación, debido a la influencia del huracán Gladys, el cual tuvo una repercusión en el Golfo de México.

La Cuenca del Papaloapan, por sus condiciones topográficas y su hidrografía, tiene tendencia a inundarse y puede indicarse, con base en los resultados de períodos de retorno, que una vez cada dos años la llanura fluvial del Río Papaloapan está expuesta a una inundación que puede afectar a las principales localidades consideradas dentro del área de estudio, siendo más susceptible cuando se presentan huracanes ó alguna otra perturbación atmosférica, por la cantidad de precipitación que estos generan.

En lo referente al índice de sinuosidad, de las cinco secciones, las tres primeras son las que presentan los valores mayores, siendo en la segunda donde se obtuvo el valor mayor debido a la manifestación de una mayor dinámica fluvial, lo cual se refleja con las unidades geomorfológicas fluviales identificadas como meandros abandonados activos en inundaciones, abandonados en forma de lago de herradura, abandonados por acortamiento y la presencia de rasgos lineales. A medida que el Río Papaloapan se acerca a la desembocadura, el índice de

sinuosidad va disminuyendo, predominando las depresiones perennes e intermitentes sobre ambas márgenes, dentro de la llanura baja de inundación.

Una característica fundamental del río Papaloapan al llegar a la desembocadura es el efecto del tapón hidráulico, cuando el río concentra una cantidad de gasto y continúa recibiendo las precipitaciones y al gasto de los tributarios, se produce una inundación; al llegar a la desembocadura, sí se presenta un huracán, el oleaje del mar, sumado a los vientos que se registran junto con la perturbación atmosférica, impiden que el río pueda desembocar en el mar, ocasionando la inundación sobre estas áreas.

Con base en el mapa de niveles de peligro a inundación se identificó a las principales localidades del área de estudio, siendo Tlacotalpan la que se ubica en un área muy expuesta a inundaciones, además de identificarse, en sus alrededores, la llanura baja de inundación.

## BIBLIOGRAFÍA:

- Aragón González, R. (2005). Geomorfología fluvial en el curso bajo del río Panuco: identificación de áreas propensas a inundación. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 189 p.
- Aparicio Mijares, F. J. (1988). "Inundaciones: la otra cara de la moneda". Revista Tlaloc, enero-abril. Revista cuatrimestral de la Asociación Mexicana de Hidráulica. México.
- Aparicio Mijares, F. J. (2003). Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA. México, D. F. 304 p.
- Ayala Carcedo, F. J. y Olcina Cantos, J. (2002). Riesgos Naturales. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona. España. 1512 p.
- Baker, R. V. (1988). Flood Geomorphology. A Wiley-Interscience publication. U.S. A. 503 p.
- Bridge, J. S. (2003). Rivers and Floodplains. Blackwell Publishing. United Kingdom. 491 p.
- Buol, S. W., Hole, F.D. y McCracken, R.J. (1988). Génesis y Clasificación de Suelos. Edit. Trillas. México, D. F. 417 p.
- CENAPRED (1994). Riesgos hidrometeorológicos. Secretaria de Gobernación. México.
- CENAPRED (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos a escala municipal. Secretaria de Gobernación. México.
- Chow, V.T. (1994). Hidrología aplicada. Mac Graw Hill. México.
- CNA (1992). Isoyetas normales de la República Mexicana 1931-1990. México. 1992.
- CNA (1993). "Misión de cooperación tecnológica de Japón: Papaloapan". México.
- CNA (1999). Banco Nacional de Aguas Superficiales. Comisión Nacional del Agua. México.
- Cserna, Z. de (1989). An outline of the geology of México: The Geology of Norther-America – An overview. Vol A, The Geological Society Of America. p. 233-264.
- Davis R. A. (1992). Depositional Systems: An Introduction to Sedimentology and Stratigraphy. Prentice Hall. U.S.A.
- De la Lanza Espino, G., Sánchez Santillán, N., Sorani, V. y Bojórquez Tapia, J. L. (1996). Características geológicas, hidrológicas y del manglar en la planicie costera de Nayarit. Investigaciones Geográficas, número 32. Instituto de Geografía. UNAM. México D. F. pp. 33 – 54.
- Franco Rey, J. (1999). Nociones de Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad de Extremadura. Cáceres, España. 164 p.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema Climático de Köppen. Instituto de Geografía. Serie Libros, número 6. UNAM, México. 90 p.

- Goudie, A., Atkinson, B. W., Gregory, K. J. , Simmons I. G. , Stoddart, D.R. y Sugden, D. (1994). The encyclopedic dictionary of physical geography. Blackwell. Second Edition. Great Britain. 611 p.
- Hernández Santana, J. R. (2007). Caracterización del relieve Plio-Cuaternario del entorno costero del Estado de Veracruz. México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 21, tomo 3 – 4. pp.113-131.
- IMTA (2002). Extractor rápido de Información climatológica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México.
- INEGI (1981). Guías para la interpretación cartográfica: Edafología. Primera reimpresión 1981. México.
- INEGI (1983). Coatzacoalcos E15-1-4. Carta Geológica. Escala 1: 250,000.
- INEGI (1984a). Alvarado E15A51, Carta Topográfica. Escala 1:50,000.
- INEGI (1984b). Coatzacoalcos E15-1-4, Carta Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250, 000.
- INEGI (1984c). Lerdo de Tejada E15A62, Carta Topográfica. Escala 1:50,000.
- INEGI (1984d). Orizaba E14-6. Carta Geológica. Escala 1:250,000.
- INEGI (1987a). Cosamaloapan E15A71, Carta Topográfica. Escala 1:50,000.
- INEGI (1987b). Loma Bonita, E15A81, Carta Topográfica. Escala 1:50,000.
- INEGI (1987c). Orizaba E14-6. Carta Edafológica. Escala 1:250,000.
- INEGI (1987d). Tuxtepec, E14B89, Carta Topográfica. Escala 1:50,000.
- INEGI (1990). Mixtequilla E15A61, Carta Topográfica. Escala: 50,000.
- INEGI (1994). Coatzacoalcos E15-1-4. Carta Edafológica. Escala 1:250,000.
- INEGI (2000a). Orizaba E14-6. Carta Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000.
- INEGI (2000b), XII Censo General de Población y Vivienda 2000.
- Instituto de Geografía. (1991). Atlas Nacional de México. UNAM. México, DF., Carta IV.4.10 Climas.
- ITC (2000). ILWIS 3.0 Academic. User 's Guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enshede, The Netherlands. 530 p.
- Leopold, B. L. y Wolman, M. G. (1963). Fluvial processes in geomorphology. Editorial W. H. Freeman. San Francisco. U. S. A. 535 p.
- López Ramos, E. (1979). Geología de México. Tomos I y II. México.
- López Ramos, E. (1983). Geología de México. Tomo III.
- Lozano Romen, E. (1955). Bosquejo Geológico de la Provincia del Papaloapan, Estado de Veracruz, México. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. México.

- Lugo Hubp, J. (1989). Diccionario geomorfológico. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 337 p.
- Lugo Hubp, J. (1990). El relieve de la República Mexicana. Revista del Instituto de Geología. UNAM. Vol.9. pp. 82-111.
- Maderey Rascón, L. E. (2005). Principios de Hidrogeografía: Estudio del Ciclo Hidrológico. Serie Textos Universitarios. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 102 p.
- Martín Vide, J. P. (2003). Ingeniería de Ríos. Alfaomega Grupo Editor. México, D. F. 331 p.
- Marzo, M. (1992). Capitulo 4, Sistemas fluviales de alta sinuosidad. En: Arche, A. Sedimentología. CSIC. Madrid. España. pp. 107 – 141.
- Maza Álvarez, J. A. (1987). Introduction to river engineering. U. N. A. M. Primera Edición. Facultad de Ingeniería. División de Estudios de Posgrado. 167 p.
- Microsoft. (2003). Office XP Excel.
- Meijerink Allard, M. J. (1988). Data acquisition and data capture trough terrain mapping units. ITC Journal, Num 1, The Netherlands, pp. 23-44.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Alfaomega Grupo Editor. México D. F. 359 p.
- Moran-Zenteno, D. J. (1985). Geología de la República Mexicana. UNAM e INEGI. México. p .55-73.
- Moran-Zenteno, D. J. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur. Bol. de la Sociedad Geológica Mexicana. T. LIII. No.1. pp. 27-58.
- Ortiz Pérez, M. A. (1979). Fotointerpretación geomorfológica del curso bajo del río Grande de Santiago, Nayarit. Investigaciones Geográficas, número 9. Instituto de Geografía. UNAM. México D. F. pp. 65 – 92.
- Ortiz Pérez, M. A. y Romo Aguilar, M. de L. (1994). Modificaciones en la trayectoria meándrica en el curso bajo del río Grande de Santiago, Nayarit, México. Investigaciones Geográficas, número 29. Instituto de Geografía. UNAM. México D. F. pp. 9 – 23.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Bol. de la Sociedad Geológica Mexicana. T. LIX. No. 1. pp.19-42.
- Palacio Prieto, J. L., López Blanco, J. y Ortiz Pérez, M. A. (1991). Evaluación geomorfológica estructura a través de modelos sombreados y pares esteresocópicos generados a partir de Modelos Digitales del Terreno. Investigaciones Geográficas, número 23. Instituto de Geografía. UNAM. México D. F. pp. 89 – 101.

- Pedraza Gilsanz, J. (1996). Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones, Ed. Rueda. Madrid, España. 414 p.
- Ritter, F. D., Kochel, R.C., Miller, J.R. (1995). Process Geomorphology. Wm. C. Brown Publishers. 3a. Edit. U. S. A. 546 p.
- Ruiz Urbano, M. del R. (2002). Programa de automatización de los métodos estadísticos en Hidrología. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
- Salvador, A. (1991). The Gulf of Mexico Basin. Geol. Soc. Amer. Colorado. U. S. A. 568 p.
- SARH (1976). Boletín Hidrológico. Región hidrológica número 28. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. D. F.
- Secretaria de Recursos Hidráulicos (1977). Comisión del Papaloapan. México.
- Strahler, A. y Strahler, A. (1989). Geografía Física. Omega. Tercera Edición. Barcelona, España. 550 p.
- Tejeda Martínez, A (2005). Panorámica de las inundaciones en el Estado de Veracruz. Climatología aplicada, Universidad Veracruzana.
- Van Zuidam, R. A. (1985). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. ITC. The Netherlands. 442 p.
- Vázquez Torres, M. (1988). Biodiversidad y problemática en el humedal de Alvarado. Universidad de Veracruz, México.
- Verstappen, Th. y Van Zuidam, R. (1991). El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. ITC. The Netherlands. 89 p.
- Viniegra Osorio, F. (1992). Geología Histórica de México. Facultad de Ingeniería, División de Ciencias de la Tierra, UNAM, México, 1ª ed. 213 p.
- Wohl Ellen, E. (2000). Inland flood hazards. Cambridge University Press. U.S.A. 498 p.
- Zavala Cruz, J. (1985). Geomorfología fluvial del curso bajo del río Verde, Oaxaca. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México. 170 p.

# Mapa Geomorfológico Fluvial del Río Papaloapan

## Leyenda

### Unidades Geomorfológico Fluviales

#### Endógeno Tectónico Erosivo de:

- Lomerío bajo de conglomerados del Mioceno
- Lomerío bajo aislado de conglomerados del Mioceno
- Lomerío medio de conglomerados del Mioceno
- Lomerío medio aislado de conglomerados del Mioceno
- Lomerío alto de conglomerados del Mioceno
- Superficie cumbral de calizas del Cretácico Superior
- Superficie cumbral de conglomerados del Mioceno

#### Exógeno Eólico Acumulativo de:

- Lomerío muy bajo del Cuaternario ( $h = < 20$  m)
- Lomerío bajo del Cuaternario ( $h = > 20$  y  $< 40$  m)
- Lomerío medio inferior del Cuaternario ( $h = > 40$  y  $< 60$  m)
- Lomerío medio superior del Cuaternario ( $h = > 60$  y  $< 80$  m)
- Lomerío alto del Cuaternario ( $h = > 80$  y  $< 100$  m)
- Lomerío muy alto del Cuaternario ( $h = > 100$  m)

#### Exógeno Fluvial Acumulativo:

- Llanura alta de inundación
- Llanura baja de inundación
- Brazo de crecía
- Corriente tipo yazooc
- Lecho mayor de inundación
- Lecho menor de inundación
- Meandro abandonado activo en inundaciones
- Meandro abandonado en forma de lago de herradura
- Meandro abandonado por acortamiento
- Río intermitente
- Río perenne
- Río tributario
- Depresión intermitente
- Depresión perenne
- Playa de Depresión perenne
- Planicie lagunar costera
- Banco fluvial arenoso sin vegetación
- Banco fluvial arenoso con vegetación
- Barra marginal
- Leveé abandonado
- Leveé principal
- Leveé secundario
- Terraza fluvial
- Playa
- Ríos
- Cordones de meandro
- ★ Principales localidades

Laguna de Alvarado

Golfo de México

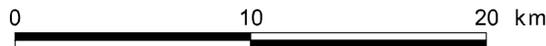
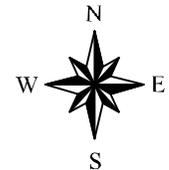
Tlacotalpan

Cosamaloapan

Río Papaloapan

Río Papaloapan

Tuxtepec



Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM  
 Instituto de Geografía  
 Proyección: UTM Zona 15.  
 Datum: Norteamérica 1927 (NAD 27).  
 Elaboró: Alberto López González.