

# **ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)**

Convenio de Colaboración  
No. SGIH-GPIH-SGPOPR-UNAM-II-RF-14-01

## **Informe Final**

### **CAPÍTULO 5 Definición de los niveles que requiere el protocolo de alertamiento para condiciones meteorológicas y/o hidrológicas severas**

Dr. Fernando Jorge González Villarreal \*  
Director del proyecto

M. en I. Juan Javier Carrillo Sosa \*\*  
Coordinador del proyecto

M. en I. Gabriela Gutiérrez Aviña \*\*\*\*  
Pasante. Mario Navarrete Ayala \*\*\*  
Participantes

Elaborado para:  
**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA<sup>+</sup>**

**NOVIEMBRE, 2014**

- \* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM
- \*\* Técnico académico, Instituto de Ingeniería, UNAM
- \*\*\* Becario, Instituto de Ingeniería, UNAM
- \*\*\*\* Consultor externo



## ÍNDICE

5	DEFINICIÓN DE LOS NIVELES QUE REQUIERE EL PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y/O HIDROLÓGICAS SEVERAS.....	1
5.1	Introducción .....	1
5.1.1	Zona de estudio.....	1
5.1.2	Metodología para determinar los niveles en los cauces.....	2
5.2	Recopilación de información .....	3
5.2.1	Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones.....	3
5.2.2	Semáforo del Bajo Grijalva .....	11
5.2.3	Documento "Definición de niveles operativos en los ríos tabasqueños para establecer umbrales de prevención, alerta y emergencia" .....	12
5.2.4	Información topográfica y batimétrica de los sistemas Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva .....	14
5.3	Diagnóstico de la situación actual .....	18
5.3.1	Etapas del protocolo (FUENTE: CONAGUA, 2014).....	18
5.3.2	Descripción general de acciones (FUENTE: CONAGUA, 2014) .....	20
5.3.3	Tareas específicas de Organismos de Cuenca y Direcciones Locales (FUENTE: CONAGUA, 2014).....	27
5.4	Modelación matemática .....	29
5.4.1	Esquema de modelación usado por EPA SWMM 5.0 .....	29
5.4.2	Esquema unifilar de modelación .....	32
5.5	Definición de macro-escenarios de lluvia .....	54
5.5.1	Análisis situacional .....	54
5.6	Criterios para determinar los niveles actualizados.....	63
5.6.1	Macroescenarios de lluvia .....	66
5.7	Conclusiones y recomendaciones.....	70



5.8 Bibliografía ..... 72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Versión, Mayo 2014 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 5  
 Figura 5.2.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 1 al 5 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 6  
 Figura 5.3.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 6 al 10 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 7  
 Figura 5.4.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 11 al 15 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 8  
 Figura 5.5.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 16 al 21 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 9  
 Figura 5.6.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 22 al 24 (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 10  
 Figura 5.7.- Niveles de Aviso, Alerta y Alarma en función de la metodología aplicada..... 13  
 Figura 5.8.- Ubicación de batimetrías de los ríos Mezcalapa, Viejo Mezcalapa, Medellín, Carrizal, Bajo Grijalva, Teapa y La Sierra (FUENTE: CONAGUA, 2014) ..... 14  
 Figura 5.9.- Ubicación de secciones transversales en el sistema de La Sierra-Carrizal (FUENTE: PHIT, 2008) ..... 15  
 Figura 5.10.- Plano guía del levantamiento del río Mezcalapa (IINGEN, 2014) ..... 16  
 Figura 5.11.- Plano guía del levantamiento del río Samaria (IINGEN, 2014) ..... 17  
 Figura 5.12.- Plano guía del levantamiento del río González (IINGEN, 2014) ..... 18  
 Figura 5.13.- Modelo conceptual SWMM v5.0 EPA ..... 30  
 Figura 5.14.- Zona de estudio Sistema Carrizal-La Sierra ..... 33  
 Figura 5.15.- Zona de estudio Sistema Mezcalapa-Samaria ..... 34  
 Figura 5.16.- Esquema unifilar para el módulo de tránsito de avenidas en el SWMM v.5.0.1 (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014) ..... 35  
 Figura 5.17.- Sistema de lluvia Laguna Zapotes (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014) ..... 36  
 Figura 5.18.- Sub-sistemas de lluvia de la zona de estudio (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014) ..... 37  
 Figura 5.19.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la Presa Peñitas ..... 41  
 Figura 5.20.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH San Joaquín ..... 41  
 Figura 5.21.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Teapa ..... 42  
 Figura 5.22.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Puyacatengo ..... 42  
 Figura 5.23.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Tapijulapa ..... 43  
 Figura 5.24.- Hidrograma de entrada calculado en el sitio del Puente La Majahua ..... 43  
 Figura 5.25.- Lluvia media horaria subsistema Comuapa ..... 44  
 Figura 5.26.- Lluvia media horaria subsistema Platanar ..... 44  
 Figura 5.27.- Lluvia media horaria subsistema Mezcalapa ..... 45  
 Figura 5.28.- Lluvia media horaria subsistema Nacajuca ..... 45

Figura 5.29.- Lluvia media horaria subsistema Samaria.....	46
Figura 5.30.- Lluvia media horaria subsistema González.....	46
Figura 5.31.- Lluvia media horaria subsistema Almandro.....	47
Figura 5.32.- Lluvia media horaria subsistema Puyacatengo.....	47
Figura 5.33.- Lluvia media horaria subsistema Teapa.....	48
Figura 5.34.- Lluvia media horaria subsistema Pichucalco.....	48
Figura 5.35.- Lluvia media horaria subsistema La Sierra.....	49
Figura 5.36.- Lluvia media horaria subsistema Jalapa.....	49
Figura 5.37.- Lluvia media horaria subsistema La Sierra Bajo.....	50
Figura 5.38.- Lluvia media horaria subsistema Parrilla.....	50
Figura 5.39.- Lluvia media horaria subsistema Viejo Mezcalapa.....	51
Figura 5.40.- Lluvia media horaria subsistema Carrizal.....	51
Figura 5.41.- Lluvia media horaria subsistema Laguna Zapotes.....	52
Figura 5.42.- Lluvia media horaria subsistema Laguna Don Julián.....	52
Figura 5.43.- Lluvia media horaria subsistema Bajo Grijalva.....	53
Figura 5.44.- Método de análisis situacional (FUENTE: Hanel, 2004).....	54
Figura 5.45.- Cuestionario para elegir el o los procedimientos de análisis.....	56
Figura 5.46.- Secuencia del método de Análisis Situacional (FUENTE: Hanel, 2004).....	56
Figura 5.47.- Esquema de toma de decisiones en estado de riesgo.....	58
Figura 5.48.- Esquema Tipo – ríos de Sierra (respuesta rápida sin obra) (FUENTE: CONAGUA, 2014).....	64
Figura 5.49.- Esquema Tipo – Sección tipo en planicie con obras de protección (FUENTE: CONAGUA, 2014).....	64

VF

## ACCIONES PARA REDUCIR LA VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN

### 5 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES QUE REQUIERE EL PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y/O HIDROLÓGICAS SEVERAS

#### 5.1 Introducción

En el año 2013 se firmó el Convenio de coordinación que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua, y el Estado de Tabasco, con el objeto de llevar a cabo el Proyecto hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar mejor el agua (PROHTAB), donde se menciona en materia de alertamiento temprano y redes de monitoreo, que la CONAGUA se compromete a cumplir con el "*Protocolo de alerta para condiciones meteorológicas y/o hidrológicas severas*" emitido por la Coordinación General de Atención a Emergencias y Consejos de Cuenca, la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional y la Subdirección General Técnica de la CONAGUA. En dicho documento la CONAGUA se compromete a comunicar la alerta meteorológica y/o hidrológica al gobierno del estado de Tabasco mediante comunicación telefónica o correo electrónico y oficio, en consideración con el "Protocolo de alerta para condiciones meteorológicas y/o hidrológicas severas"

Es por ello, que el Instituto de Ingeniería definió como apoyo a dicho protocolo de alerta los niveles de los cauces en los sitios donde se ubican las estaciones hidrométricas por medio de modelación matemática unidimensional de macro-escenarios de lluvia en el sistema Mezcalapa-Samaria y La Sierra.

#### 5.1.1 Zona de estudio

El estado de Tabasco se divide en cuatro grandes sistemas. El (1) sistema Tonalá que colinda con el estado de Veracruz, (2) el sistema Mezcalapa-Samaria, (3) el sistema Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva y finalmente (4) el sistema Zona de los ríos-Usumacinta.

Estos sistemas han sido divididos, considerando los parteaguas naturales e infraestructura hidráulica existente. Aunque la influencia del sistema de presas del Alto Grijalva no se encuentra ubicado geográficamente dentro del estado de Tabasco, dicha infraestructura controla –además de generar energía- los escurrimientos producidos por efecto de la lluvia en la cuenca alta de Chiapas; estos escurrimientos afectan directamente a la planicie tabasqueña, es por ello que este sistema se rige por políticas de operación de presas de manera horaria.

### **5.1.2 Metodología para determinar los niveles en los cauces**

El presente estudio se dividió en dos etapas, según lo establecido en el Anexo técnico del Convenio SGIH-GPIH-SGPOPR-UNAM-II-RF-14-01, la primera etapa (desarrollado en el año 2014) contempla los sistemas La Sierra, Mezcalapa-Samaria-río González, mientras que para una segunda etapa se contemplan los sistemas Tonalá y Chilapa-Usumacinta.

El presente trabajo se dividió en cuatro partes, que a continuación se describen. En una primera parte se recopiló la información necesaria y existente para conocer el contenido del “Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones”, así como las metodologías que la CONAGUA empleó para determinar los umbrales NAMIN, NAMO y NAME reportados en sus boletines hidrométricos.

Se revisó el documento *“Definición de niveles operativos en los ríos tabasqueños para establecer umbrales de prevención, alerta y emergencia”* el cual forma parte del estudio Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en el año 2012 para la Comisión Nacional del Agua.

Se recopiló información topográfica y batimétrica de los sistemas Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva, la cual incluirá elevación de bordos, infraestructura de protección contra inundaciones prioritaria, ubicación georeferenciada de las estaciones hidrométricas y curvas capacidad-elevación del sistema lagunar.



Esta información ayudará a la actualización de los esquemas unifilares para la simulación matemática unidimensional de flujo en cauce; para ello se usará el software libre Storm Water Management Model (SWMM v.5.0.1) desarrollado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos de América.

En la segunda parte de este trabajo se establecen los escenarios hipotéticos (macroescenarios de lluvia) por medio del método de análisis situacional. Los escenarios derivados de esta metodología son las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, determinando así las condiciones iniciales de los sistemas fluviales en las simulaciones.

En la tercera parte se calibró el modelo matemático con condiciones actuales de gastos y lluvia esto para representar de una manera más cercana a la realidad lo que ocurre en el sistema. Una vez calibrado el modelo, se simularon los escenarios hipotéticos propuestos anteriormente para determinar cuáles son los niveles en los cauces en los sitios donde se ubican las estaciones hidrométricas.

Finalmente se determinaron los niveles que se requieren en cada estación hidrométrica que se encuentra dentro del sistema Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra.

## **5.2 Recopilación de información**

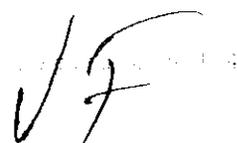
### **5.2.1 Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones**

La CONAGUA proporcionó al Instituto de Ingeniería el "Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones" (**Anexo A.5.1 Recopilación de Información**). El objetivo conforme lo establecen los artículos 83 y 84 de la Ley de Aguas Nacionales, la CONAGUA es el organismo responsable de la construcción y operación de obras para el control de avenidas, protección de centros de población y zonas productivas y, en general de coadyuvar en la protección de las personas y sus bienes en caso de fenómenos extremos.



Por ello, el objeto de este protocolo es definir las actividades necesarias tanto para realizar o promover actividades preventivas y de mitigación, como las acciones a realizar antes, durante y después de las contingencias, tomando como base los pronósticos meteorológicos y la información de la red de estaciones hidrométricas y climatológicas para monitorear la intensidad de las precipitaciones y los niveles de ríos, lagunas y presas.

El "Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones", responde de manera eficaz ante las contingencias que se puedan generar por inundaciones, la CONAGUA define este protocolo de actuación que considera tres momentos de la atención de emergencias: antes, durante y después.



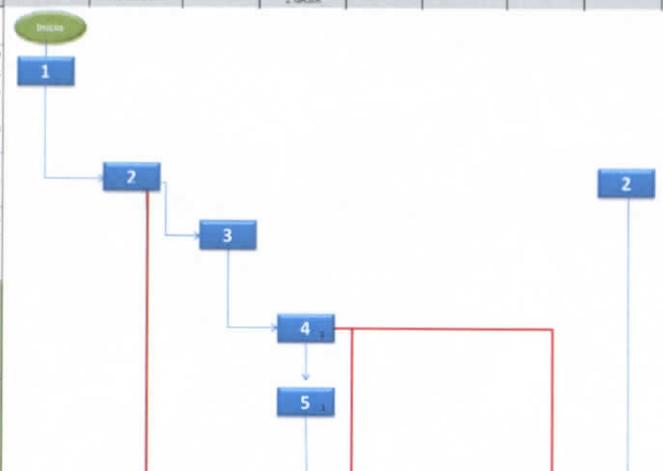


ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB).



DIRECCION LOCAL TABASCO  
 PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y/O HIDROLÓGICAS SEVERAS

No.	Actividad	Subdirector General Técnico/Coordinador General del SMN	Gerente MyC, Gerente ASIR, Subgerente de Pronóstico Met., Subgerente de Hidrología Operativa	Jefaturas de proyectos del Centro Nacional de Previsión del Tiempo	Jefe de turno (Meteorólogos e Hidrólogos Operativos) 1 SMN 2 GASIR	Presidencia/ Director General de la CONAGUA	Subgerencia de Comunicación y Desarrollo Inst.	OCFS Y DLTAB	GPIAE	Municipios	Productos	Observaciones
0												
1	Instruye al Gerente de Meteorología y Climatología y al Gerente de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos a efecto de revisar y preparar las actividades requeridas para la temporada de lluvias en México del año en curso											
2	Revisan y autorizan el procedimiento de las actividades del pronóstico Meteorológico e Hidrológico										Validación y/o actualización del Protocolo de Tiempo de Severo	Coordinar las Actividades con las Jefaturas de Proyecto, el GPIAE tiene ya probados y en operación todos sus equipos distribuidos en la CRAE
3	Coordina las actividades requeridas para implantar y supervisar el protocolo establecido por el Gerente y Subgerente, informado a los meteorólogos										Minuta de Reunión de Trabajo con personal del CHMR y personal involucrado en el Protocolo	1. Implantar en todos los turnos del CHMR 2. Capacitación
4	Analizan los modelos matemáticos MM5, WRF, GFS, NAM										1.- Datos Sinópticos 2.- Imágenes Radar Ecos 3.- Precipitaciones aguas superficiales 4.- Resultados de sondeo	Cada 3 h Cada 10 minutos (Gasir) 06:00, 10:00 y 20:00 h
5	Realizan el análisis (Diagnóstico)										Material presentado en la discusión Meteorológica	Diagnóstico de la atmósfera en ese instante, aquí participan los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales, se pueden establecer horas de revisión posteriores. Ocurre de 12:00 a 13:00 hrs.



Actividades a realizarse previa a la temporada de lluvias tropicales e inicio a temporada de lluvias (SMN)

Figura 5.2.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 1 al 5  
 (FUENTE: CONAGUA, 2014)

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLOGICO PARA PROTEGER A LA POBLACION DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)



DIRECCION LOCAL TABASCO  
 PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLOGICAS Y/O HIDROLOGICAS SEVERAS

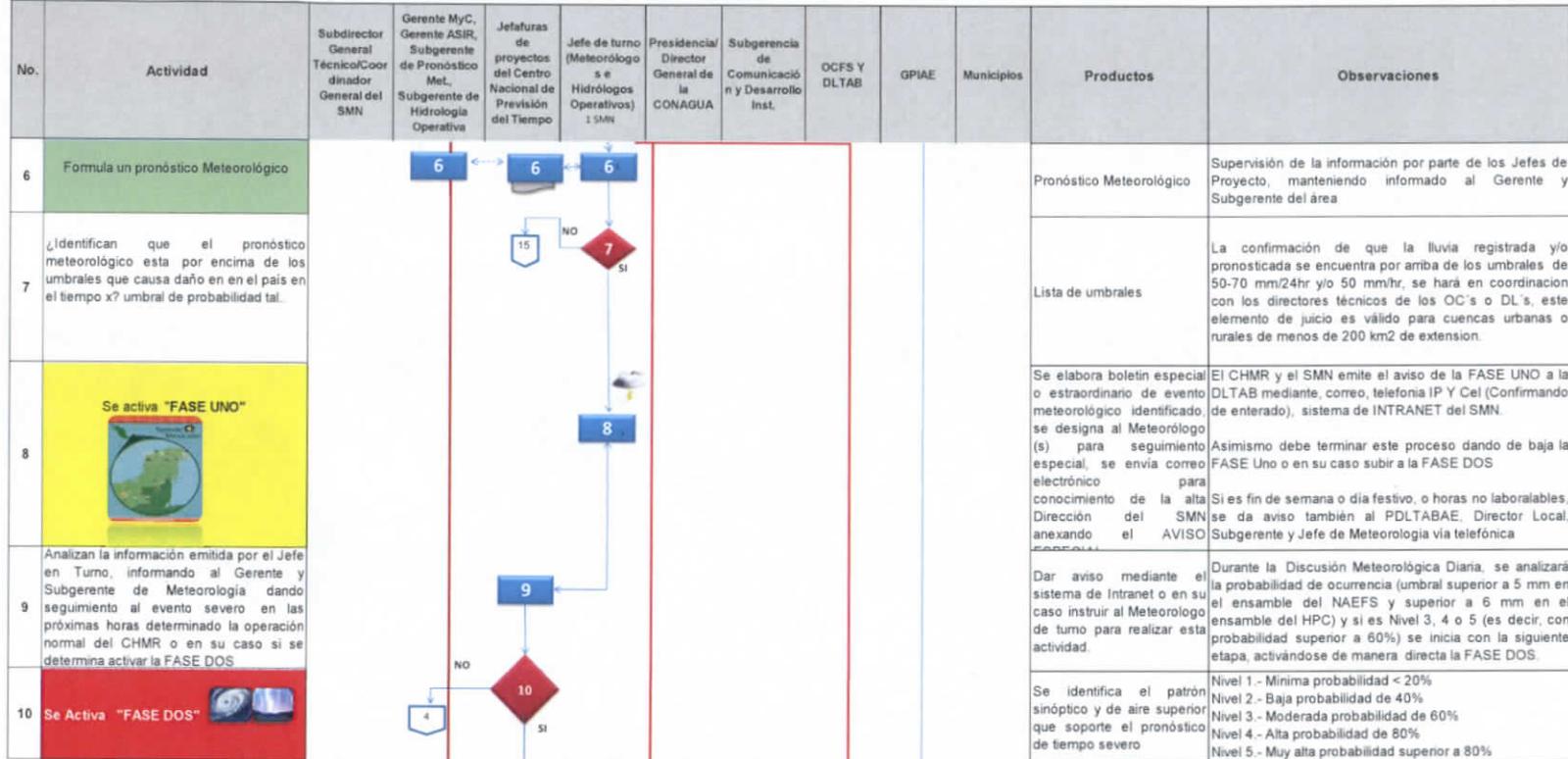
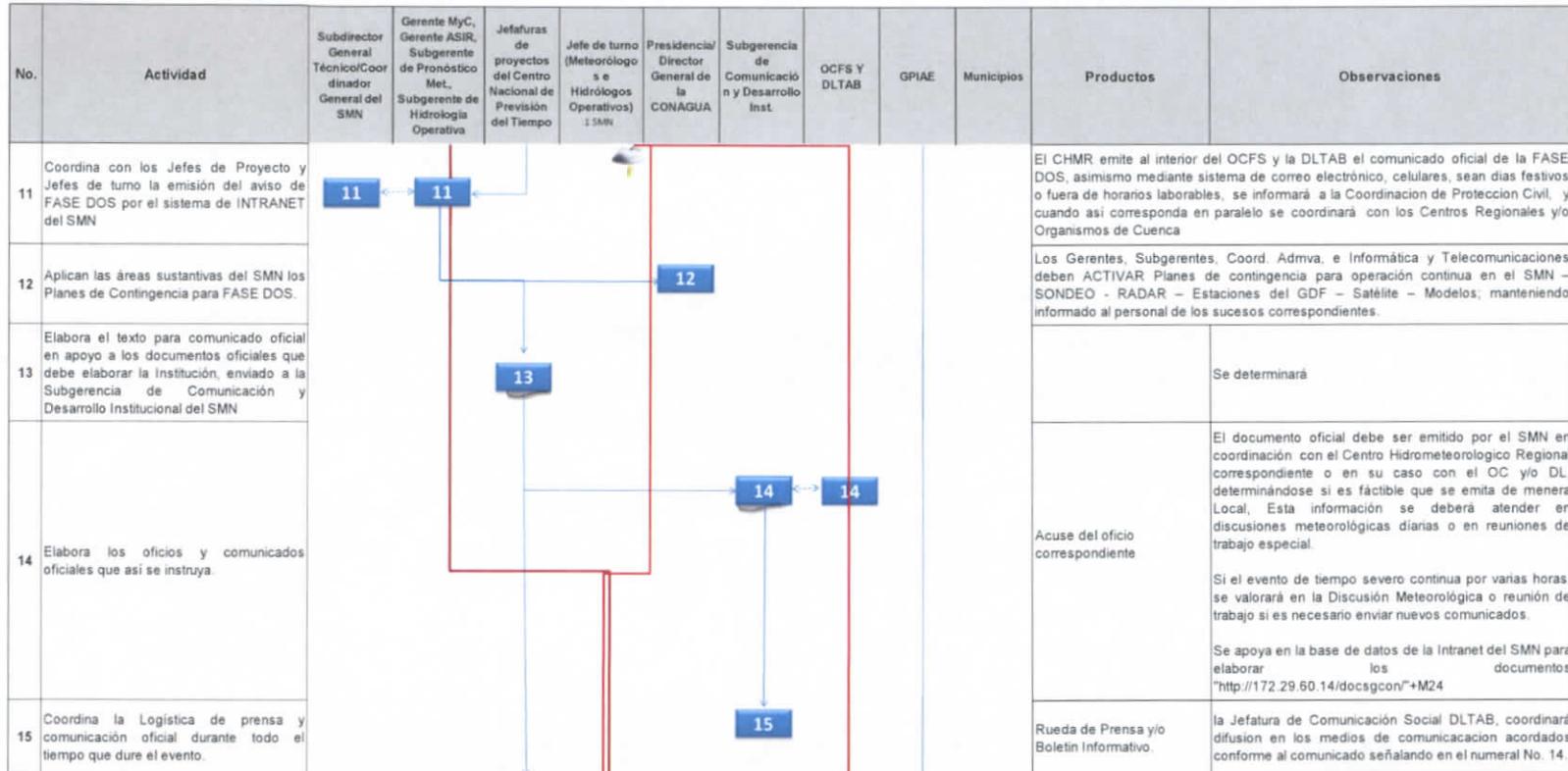


Figura 5.3.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 6 al 10  
 (FUENTE: CONAGUA, 2014)

**DIRECCION LOCAL TABASCO**  
**PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLOGICAS Y/O HIDROLOGICAS SEVERAS**



**Figura 5.4.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 11 al 15**  
 (FUENTE: CONAGUA, 2014)

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)



DIRECCION LOCAL TABASCO  
 PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLOGICAS Y/O HIDROLOGICAS SEVERAS

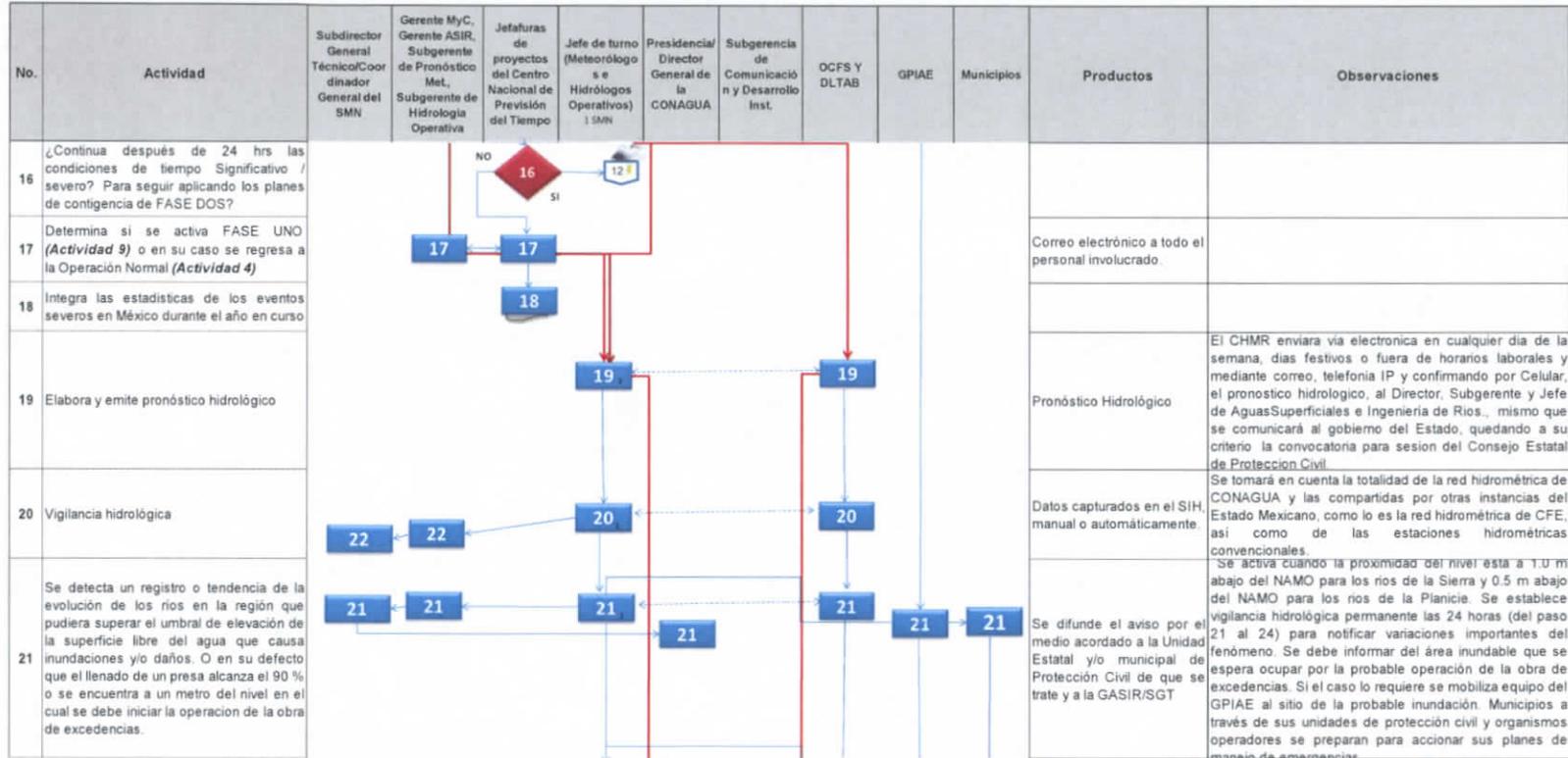


Figura 5.5.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 16 al 21 (FUENTE: CONAGUA, 2014)

*[Handwritten signature]*

**DIRECCION LOCAL TABASCO**  
**PROTOCOLO DE ALERTAMIENTO PARA CONDICIONES METEOROLOGICAS Y/O HIDROLOGICAS SEVERAS**

No.	Actividad	Subdirector General Técnico/Coordinador General del SMN	Gerente MyC, Gerente ASIR, Subgerente de Pronóstico Met., Subgerente de Hidrología Operativa	Jefaturas de proyectos del Centro Nacional de Previsión del Tiempo	Jefe de turno (Meteorólogos e Hidrólogos Operativos) 1 SMN	Presidencia/ Director General de la CONAGUA	Subgerencia de Comunicación y Desarrollo Inst.	OCFS Y DLTAB	GPIAE	Municipios	Productos	Observaciones
22	Se supera el UMBRAL de desbordamiento o se inicia la operación de la obra de excedencias conforme a política autorizada o a las decisiones que se resuelvan en el seno del CTOOH.	22	22	22	22	22	22	22	22	22	Se difunde el aviso por el medio acordado a la Unidad Estatal y/o municipal de Protección Civil de que se trate y a la GASIR/SGT.	Se establece la operación del equipo PIAE, y los informes de la atención a la inundación. Municipios a través de sus unidades de protección civil y organismos operadores inician operaciones conforme a sus planes de manejo de emergencias.
23	Se realiza pronóstico hidrológico para el caso, estimando la duración de la inundación y los niveles que se podrán alcanzar en el río, embalse o zona inundable de que se trate, informando a los tomadores de decisiones y al sistema Nacional de Protección Civil.	23	23	23	23	23	23	23	23	23	Documento escrito donde se describe la evolución del fenómeno hidrológico y sus perspectivas de desarrollo.	Este paso se elabora con el apoyo del paso 4, 5 y 6 para la ingesta de la lluvia pronosticada en los modelos hidrológicos de ríos.
24	El nivel de la superficie libre del río evoluciona por abajo del umbral de desbordamiento o el almacenamiento de la presa se ubica en las inmediaciones del NAMO.	24	24	24	24	24	24	24	24	24	Informe del comportamiento de la inundación y/o operación de la presa y registro de afectaciones.	Se levantan en campo marcas de inundación, que servirá para calibrar los modelos en el futuro. Se retira equipo PIAE una vez restablecida las condiciones normales. Municipios a través de sus unidades de protección civil y organismos operadores concluyen operaciones conforme a sus planes de manejo de emergencias y se informa acerca de las acciones realizadas y temas pendientes a fin de aumentar la resiliencia del municipio a situaciones de emergencia.

Elaboró:

Lic. Jorge Bustamante  
 Ing. Alberto Hernández Unzón  
 Ing. Horacio Rubio Gutiérrez  
 Adecuación: DLTAB Área Técnica

MAYO.2013

**Glosario de las Dependencias**

**PDLTABAE.**-Plan de la Dirección Local de Tabasco de Atención de  
**GPIAE.**-Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencia  
**GASIR.**-Gerencia de Aguas Superficiales de Ingeniería de Ríos  
**CTOOH.**- Comité Técnica de Operación de Obras Hidráulicas  
**CRAE.**-Centro Regional de Atención de Emergencia  
**OCFS.**- Organismo de Cuenca de Frontera Sur  
**CHMR.**-Centro Hidrometeorológico Regional  
**CFE.**- Comisión Federal de Electricidad  
**SMN.**-Servicio Meteorológico Nacional  
**SGT.**-Subdirección General Técnica  
**DLTAB.**-Dirección Local Tabasco

**Figura 5.6.- Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas Puntos 22 al 24**  
**(FUENTE: CONAGUA, 2014)**

### 5.2.2 Semáforo del Bajo Grijalva

La Comisión Nacional del Agua, por medio del Organismo de Cuenca Frontera Sur publica diariamente un boletín hidrometeorológico (ver **Anexo A.5.1 Recopilación de Información**) con datos medidos de la cuenca Grijalva-Usumacinta, dividido en:

- a) lluvia 24 horas precedentes
- b) resumen de condiciones de embalses: sistema hidroeléctrico Grijalva
- c) seguimiento de niveles de ríos
- d) semáforo del Bajo Grijalva

Para fines de este trabajo, nos enfocamos en la sección de semáforo del Bajo Grijalva, ya que ahí se presentan los niveles: NAMIN, NAMO, NAME que actualmente se toma en cuenta para alertamiento en las estaciones hidrométricas del bajo Grijalva, como se muestra en la Tabla 5.1

**Tabla 5.1.- Semáforo bajo Grijalva (FUENTE: Boletín CONAGUA-OCFS)**

CLAVE	ESTACIÓN	NAMO	NAME	NAMIN
1L	Platanar	32.28	34.65	29.07
3L	Samaria	14.90	18.50	10.40
4L	González	8.77	10.20	2.87
7D	Oxolotán	39.53	47.37	31.20
1D	Tapijulapa	24.63	28.15	15.92
2B	Teapa	37.71	39.56	33.80
3B	Puyacatengo	29.65	31.35	24.21
4B	San Joaquín	23.12	26.66	17.75
5B	Pueblo Nuevo	7.49	8.40	1.16
1V	Gaviotas	5.42	7.85	0.82
2V	El Muelle	5.24	7.23	0.73
3V	Porvenir	4.74	6.67	0.51
2E	Macuspana	9.85	12.78	0.69
1E	Salto del Agua	10.99	14.57	0.84
3U	San Pedro	9.01	9.77	7.58
2U	Boca del Cerro	19.21	21.57	10.63

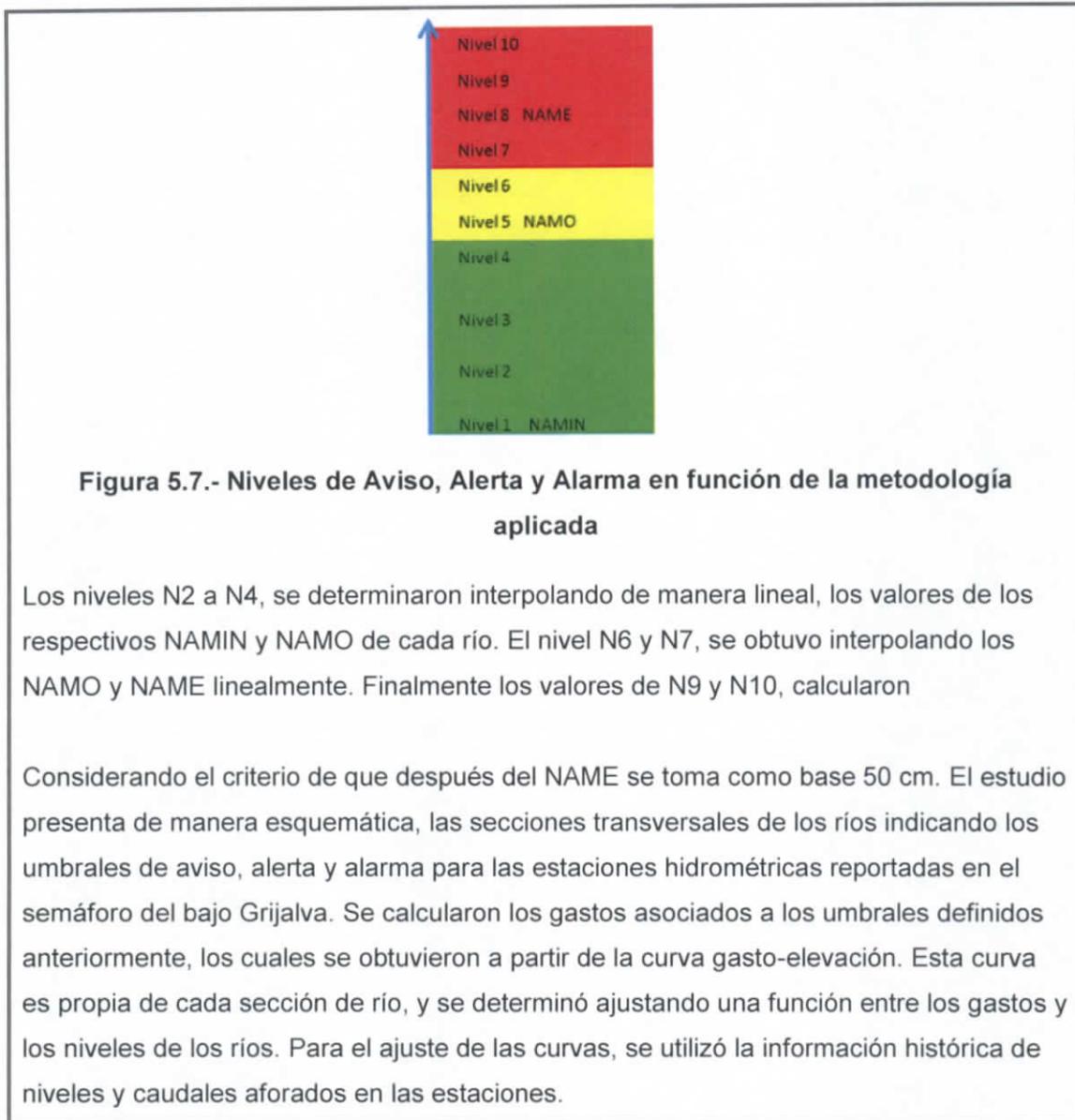
### 5.2.3 Documento “Definición de niveles operativos en los ríos tabasqueños para establecer umbrales de prevención, alerta y emergencia”

En el año 2012, como parte de los trabajos del estudio “Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco” que desarrolló el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para la Comisión Nacional del Agua, se elaboró el tema “Definición de niveles operativos en los ríos tabasqueños para establecer umbrales de prevención, alerta y emergencia” por medio de los registros de gastos aforados y niveles en los ríos de las estaciones ubicadas en la planicie tabasqueña para estudiar el comportamiento y ocurrencia de las inundaciones. (Ver **Anexo A.5.1 Recopilación de Información**)

#### RESUMEN

La metodología empleada para definir los umbrales (niveles) de referencia, se basó en la definición de 10 niveles, donde los **niveles 1 al 5** corresponden a una **situación de aviso**; los **niveles 5 al 7**, a una **situación de alerta** y por arriba del **nivel 7** se emite una **situación de alarma**. Lo anterior se determina de la siguiente forma:

- 1) Se fija un umbral con base en la experiencia o en la medición (marcas de campo, o el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, NAME) y se relaciona con un **nivel 8 (N8)**. Es decir, se considera que la situación de alarma comienza un instante antes en el **nivel 7**.
- 2) El umbral correspondiente a un nivel ordinario del perfil del río se fija con base en el conocimiento del comportamiento del río (Nivel de aguas máximas ordinarias, NAMO), se relaciona con un **nivel 5 (N5)**.
- 3) El nivel N1 corresponde al nivel mínimo del perfil del río (Nivel de Aguas Mínimas, NAMIN).
- 4) Los niveles N2, N3, N4, N6, N7, N9 y N10, se determinan de acuerdo al tamaño de la cuenca, la longitud del cauce principal y la topografía. Una manera de establecer dichos niveles, es ponderando los valores respectivos, con los niveles ya definidos N1, N5 y N8, como se muestra en la Figura 5.7.



Cabe mencionar que una vez revisado el estudio del año 2012, se concluye que la definición de umbrales se realizó a partir de análisis estadísticos de la información histórica de las estaciones hidrométricas, mientras que en el estudio denominado "Definición de los niveles que requiere el protocolo de alertamiento para condiciones meteorológicas y/o hidrológicas severas" determinó por medio de modelación matemática de macro-escenarios de lluvia los niveles de los cauces, en los sitios donde se ubican las estaciones hidrométricas de los ríos Samaria, de la Sierra y el río Mezcalapa.

Esto último incluyó un análisis situacional de la combinación de variables tales como: precipitación, nivel en los cauces, nivel en las lagunas, y saturación del suelo para cada uno de los sistemas fluviales (Mezcalapa-Samaria, Carrizal-La Sierra y sistema lagunar) y la interacción entre ellos.

#### 5.2.4 Información topográfica y batimétrica de los sistemas Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva

Para la actualización del esquema unifilar de los sistemas Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra, se contó con la siguiente información topográfica y batimétrica. La información descrita a continuación se puede consultar en el **Anexo A.5.1 Recopilación de Información**.

##### 5.2.4.1 Información proporcionada por la CONAGUA

Se contó con archivos en formato AutoCAD, los cuales contienen la batimetría actualizada de los ríos Mezcalapa, Viejo Mezcalapa, Medellín, Carrizal, Bajo Grijalva, Teapa y La Sierra, como se muestra en la Figura 5.8



**Figura 5.8.- Ubicación de batimetrías de los ríos Mezcalapa, Viejo Mezcalapa, Medellín, Carrizal, Bajo Grijalva, Teapa y La Sierra (FUENTE: CONAGUA, 2014)**



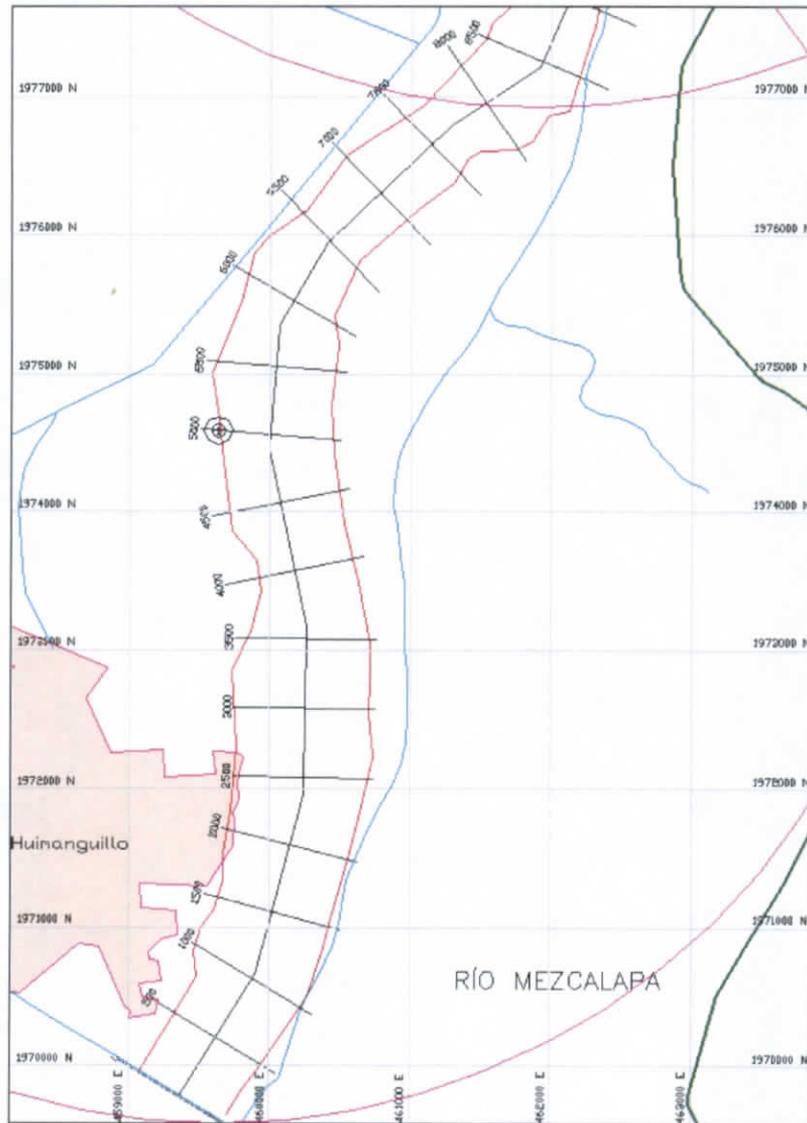


Figura 5.10.- Plano guía del levantamiento del río Mezcalapa (IINGEN, 2014)



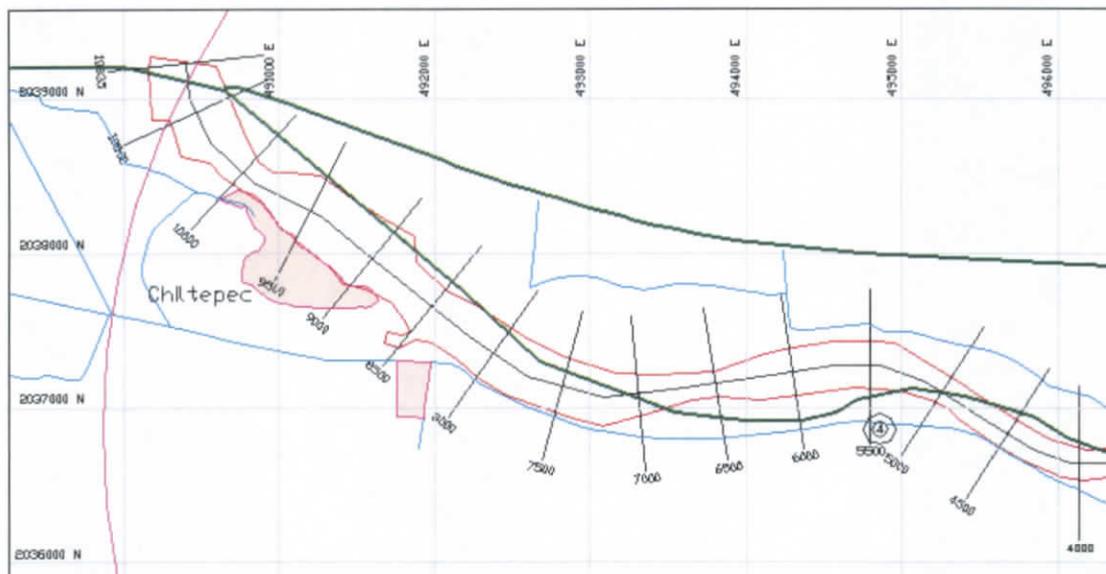


Figura 5.12.- Plano guía del levantamiento del río González (IINGEN, 2014)

La información mencionada anteriormente se utilizó para obtener las secciones transversales para integrar el esquema unifilar de los sistemas Mezcalapa-Samaria y La Sierra-Carrizal. En el **Anexo A.5.1 Recopilación de Información** se pueden consultar todas las secciones transversales utilizadas en formato Excel.

### 5.3 Diagnóstico de la situación actual

Actualmente se emiten avisos con base en el Protocolo para la atención de emergencias por Inundaciones elaborado por la CONAGUA, el cual involucra a diferentes instituciones y etapas del protocolo, tal y como se describe de manera general a continuación:

#### 5.3.1 Etapas del protocolo (FUENTE: CONAGUA, 2014)

Para definir los medios necesarios en la atención de emergencias por inundaciones, el protocolo está organizado en tres bloques generales, a partir de la estimación de gravedad del riesgo:

### **5.3.1.1 ANTES DE LA EMERGENCIA.**

Abarca el periodo de estiaje, previo a la temporada de ciclones tropicales, que conforme a la información meteorológica ocurre durante los meses de diciembre a mayo, y considera dos fases diferenciadas: la preparación y vigilancia y propiamente la fase de alerta.

#### *5.3.1.1.1 Fase de vigilancia y preparación*

La fase de vigilancia y preparación incorpora el conjunto de actividades que permiten planificar, preparar y definir estrategias y mecanismos de actuación, acopio de material y equipo, fortalecer la organización y coordinación en la institución, sumar esfuerzos con las distintas autoridades federales, estatales y municipales, uso adecuado de recursos y tiempos óptimos de respuesta cuando ocurra una emergencia de este tipo.

#### *5.3.1.1.2 Fase de alerta*

La fase de alerta considera las actividades de aviso, cuando se presentan condiciones meteorológicas o hidrológicas que puedan dar lugar a una situación de emergencia. Es en esta etapa cuando debe alertarse a las autoridades implicadas, particularmente a protección civil, así como informar a la población que puede resultar potencialmente afectada.

### **5.3.1.2 DURANTE LA EMERGENCIA**

Este momento de la atención se inicia al momento del impacto del fenómeno; se mantiene durante todo el desarrollo de las inundaciones; es decir, mientras persistan las condiciones que generan la emergencia.

Es en esta etapa en la que se realizan las actividades de suministro de agua potable a la comunidad, desfogue de las zonas inundadas, protección de cauces y de la infraestructura hidráulica, entre otras acciones.

### **5.3.1.3 DESPUÉS DE LA EMERGENCIA**

Es el momento consecutivo a la emergencia, que se prolonga hasta el restablecimiento de las condiciones para un retorno a la normalidad en las zonas afectadas por la emergencia. En esta etapa se realizan las tareas de inspección del estado de infraestructura, las tareas de rehabilitación y limpieza, así como la reparación de los daños más relevantes, la

provisión y en su caso restablecimiento de los servicios básicos de agua potable, saneamiento y riego.

### **5.3.2 Descripción general de acciones (FUENTE: CONAGUA, 2014)**

La descripción de acciones, se basa en las acciones que cada institución, ya sea, federal, estatal o municipal debe hacer durante las etapas del protocolo.

#### **5.3.2.1 Acciones antes de la emergencia. Fase de preparación**

##### *5.3.2.1.1 Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional*

- 1) Monitorear las condiciones meteorológicas actuales
- 2) Proporcionar la perspectiva climática antes del inicio de la temporada de lluvias
- 3) Formular diagnósticos meteorológicos
- 4) Formular y emitir análisis y pronósticos meteorológicos

##### *5.3.2.1.2 Subdirección General Técnica -CONAGUA*

- 1) Coordinar el monitoreo de las condiciones hidrológicas e hidráulicas actuales
- 2) Coordinar a los organismos de cuenca y direcciones locales para la formulación de diagnósticos de las condiciones hidrológicas. Solicitar que se formulen diagnósticos de las condiciones hidrológicas y niveles de seguridad en presas
- 3) Coordinar a organismos de cuenca y direcciones locales para la formulación de los análisis y pronósticos hidrológicos
- 4) Coordinar la medición, acopio, almacenamiento y difusión de los reportes de almacenamientos de presas y ríos
- 5) Coordinar la realización de estudios hidrológicos para la determinación de avenidas y ubicación de puntos susceptibles de desbordamiento
- 6) Desarrollar modelos en cuencas de alta prioridad, que relacionen las condiciones meteorológicas e hidrológicas, así como de escurrimiento de las cuencas
- 7) Coordinar la actualización del Atlas Nacional de Riesgos por Inundación
- 8) Coordinar a organismos de cuenca y direcciones locales para que delimiten las zonas federales en las riberas de las corrientes y alrededor de cuerpos de agua
- 9) Coordinar a organismos de cuenca y direcciones locales para que estimen zonas de peligro y de alto riesgo por inundación



- 10) Establecer las políticas para la operación de las presas en el seno del Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas (CTOOH)
- 11) Programar inversiones de mantenimiento y construcción de estaciones hidrométricas

#### 5.3.2.1.3 *Coordinación General de Atención de Emergencia y Consejo de Cuenca*

- 1) Inspeccionar y hacer recorridos a cauces de arroyos y ríos, caminos de acceso y de evacuación, infraestructura hidráulica (presas y bordos) y obras de protección de centros de población y áreas productivas
- 2) Apoyar a las Subdirecciones de Agua Potable e Hidroagrícola en la inspección del estado físico y de operación de las fuentes de abastecimiento formales y alternas
- 3) Revisar los planes de emergencia de inundación de poblaciones vulnerables y corrientes problemáticas, para preparar las estrategias de atención de emergencias
- 4) Participar en reuniones de Coordinación con gobiernos estatales, municipales, Protección Civil, Ejército y Marina para establecer las acciones a realizar en las zonas de riesgo
- 5) Verificación de las condiciones de los Centros Regionales de Atención de Emergencias y mantenimiento en su caso, así como revisión y análisis de las disponibilidad e inventario de equipo
- 6) Ejecución de pruebas de operación y mantenimiento del equipo especializado. En su caso, revisar y reparar el equipo de bombeo y plantas potabilizadoras
- 7) Emitir recomendaciones por escrito a las presidencias municipales acerca del mantenimiento de cauces y estar atentos a la información meteorológica en la temporada
- 8) Verificar que funcionen los sistemas de alertamiento existentes en los municipios
- 9) Formular oficios a las autoridades de los gobiernos de los estados y municipales, alertando de los asentamientos humanos en zonas de alto riesgo
- 10) Realizar reuniones con los gobernadores para entregar el diagnóstico de vulnerabilidad por entidad federativa
- 11) Reuniones de coordinación con los gobiernos estatales, municipales, protección civil, Ejército y Marina para establecer las acciones a realizar en las zonas de riesgo



- 12) Integrar un programa de inversión anual de acciones para prevenir o mitigar efectos de fenómenos hidrometeorológicos
- 13) Programar inversiones para mantenimiento y adquisición de equipo, así como para la construcción de nuevos Centros Regionales de Atención de Emergencias (CRAE)

*5.3.2.1.4 Subdirecciones Generales de Agua Potable, drenaje y Saneamiento, y de Infraestructura Hidroagrícola*

- 1) Realizar diagnósticos de infraestructura hidráulica e hidroagrícola
- 2) Realizar inspecciones a fuentes de abastecimiento, presas, bordos y obras de protección a centros de población y áreas productivas
- 3) Realizar actividades de conservación y mejoramiento de infraestructura de protección
- 4) Programar inversiones para desarrollar infraestructura necesaria para prevenir o mitigar efectos de fenómenos hidrometeorológicos

*5.3.2.1.5 Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua*

- 1) Realizar campañas informativas sobre el riesgo de inundaciones y reuniones de sensibilización con medios masivos
- 2) Difusión a organismos operadores y colegios de profesionales en preparación a la temporada de lluvias
- 3) Coordinar logística de prensa y comunicación oficial durante todo el tiempo que duren los eventos de riesgo

**5.3.2.2 Acciones antes de la emergencia. Fase de alerta**

*5.3.2.2.1 Coordinación General del servicio Meteorológico Nacional*

- 1) Participación en las reuniones del Grupo de Ciclones Tropicales y en el Comité Nacional de Emergencias de la Coordinación Nacional de Protección Civil
- 2) Conforme los pronósticos meteorológicos e hidrométricos, dar aviso de pronóstico de condiciones arriba de los umbrales
- 3) Elaborar boletines horarios o extraordinarios del evento meteorológico identificado
- 4) Generar discusión meteorológica extraordinaria para analizar la situación



- 5) Si se mantienen los pronósticos de tiempo severo, emitir boletines de información sobre presencia de condiciones meteorológicas severas
- 6) Realizar vigilancia meteorológica permanente
- 7) Alertar a las autoridades de Protección Civil, Ejército, Marina e instancias municipales y estatales

#### *5.3.2.2 Coordinación general de atención de Emergencias y Consejos de Cuenca*

- 1) Al inicio de la temporada de lluvias participar en las reuniones anuales de Protección Civil, Ejército Nacional y Sector Naval
- 2) Reuniones de coordinación con la coordinación del servicio Meteorológico Nacional y con la Coordinación Nacional de Protección Civil estableciendo las acciones a realizar en las emergencias
- 3) Establecer el rol de guardias internas con el personal de mando y con capacidad de decisión
- 4) Previsión de recursos materiales y financieros: personal, vehículos, relación de maquinaria, viáticos, gasolina y otros insumos para la atención de emergencias
- 5) Movilización preventiva de equipo especializado y personal de los centros regionales de atención a emergencias a las ciudades y/o localidades de acuerdo a la trayectoria de los ciclones tropicales o de los umbrales de alertamiento en los ríos para atender la contingencia de las zonas que se detecten en riesgo
- 6) Establecimiento de los protocolos y acuerdos necesarios con las autoridades locales, tanto para clarificar acciones como para la asignación de medios y/o asistencia técnica
- 7) Participar en reuniones con gobiernos estatales, municipales, protección civil, Ejército y Marina conforme a resultados de los recorridos y diagnósticos, estableciendo las acciones a realizar en las zonas de riesgo

#### *5.3.2.2.3 Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua*

- 1) Coordinar la logística de prensa y comunicaciones oficiales
- 2) Realiza la difusión de la situación y de las acciones de atención de emergencias



### **5.3.2.3 Acciones durante la emergencia**

#### *5.3.2.3.1 Subdirección General Técnica*

- 1) Difusión de boletines de hidrométrica en almacenamientos de presas y ríos
- 2) Difusión de datos a tiempo real de precipitaciones
- 3) Seguimiento de las precipitaciones y niveles de caudal en cauces
- 4) Maniobrar las obras hidráulicas disponibles a fin de anticipar las crecientes y generar espacio en los embalses y ríos para regularlas
- 5) Formular y difundir pronósticos hidrométricos y de presas

#### *5.3.2.3.2 Coordinación general del Servicio Meteorológico Nacional*

- 1) Informar a los tomadores de decisiones y sistema Nacional de Protección Civil al superarse los umbrales de previsión hidrológica y/o meteorológica
- 2) Vigilar la evolución de los fenómenos meteorológicos que provocaron la emergencia, así como de nuevos fenómenos que se pudieran presentar
- 3) Analizar las condiciones meteorológicas prevalecientes
- 4) Formular y difundir el pronóstico meteorológico y boletines especiales
- 5) Elaborar oficios a gobernadores e instituciones que corresponda
- 6) Alertar a las autoridades de Protección Civil, ejército, Marina e instancias municipales y estatales

#### *5.3.2.3.3 Coordinación general de atención de Emergencias y Consejos de Cuenca*

- 1) Instalar equipos de bombeo para desalojar de las zonas inundadas
- 2) Apoyar a los municipios en el desazolve y limpieza de la red de drenaje municipal
- 3) Movilización de equipo especializado y personal de los Centros Regionales de Atención de Emergencias (CRAE) a las ciudades y/o localidades de acuerdo a la trayectoria de los ciclones tropicales o de los umbrales de alertamiento en los ríos para atender la contingencia
- 4) Instalar plantas generadoras de energía eléctrica para operar los sistemas de agua potable que no estén operando por falta de energía
- 5) En caso de avenida extraordinarias o rompimiento de bordos en los ríos, coadyuvar con el personal y maquinaria para levantar bordos que protejan a la población contra inundaciones

VF

- 6) Detectar requerimientos de agua potable y asegurar la entrega de agua desinfectada a los hospitales, centros de salud, albergues y población general, a través de plantas potabilizadoras portátiles y con camiones cisterna
- 7) Apoyar en el suministro de dosis de plata coloidal e hipoclorito de calcio a la población en general para evitar brotes de enfermedades en coordinación con la Secretaría de Salud
- 8) Asistir a reuniones de coordinación con autoridades estatales, municipales, de protección civil, del ejército, de marina, del sector salud, etc
- 9) Coordinación de acciones con el Sistema nacional de Protección Civil para el establecimiento de medidas para mitigar efectos causados a la población y su patrimonio

*5.3.2.3.4 Subdirecciones generales de agua Potable, Drenaje y Saneamiento, y de Infraestructura Hidroagrícola*

- 1) Suministro de dosis de plata coloidal e hipoclorito de calcio a la población en general para evitar brotes de enfermedades en coordinación con la Secretaria de Salud
- 2) En caso de avenidas extraordinarias o rompimiento de bordos en los ríos, coadyuvar con personal y maquinaria para levantar bordos que protejan a la población contra inundaciones
- 3) Elaborar los primeros diagnósticos de daños de los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, así como de infraestructura hidroagrícola y de protección

*5.3.2.3.5 Coordinación general de Comunicación y Cultura del agua*

- 1) Integrar la información que se obtiene de los avances en la atención de las emergencias
- 2) Difusión de la situación de la emergencia y de las acciones implementadas ante medios de comunicación
- 3) Coordinar logística de prensa y comunicación oficial durante todo el tiempo que dure el evento

V F

#### **5.3.2.4 Acciones después de la emergencia**

##### *5.3.2.4.1 Subdirección General Técnica*

- 1) Levantar en campo marcas de inundación, que servirán para calibrar los modelos en el futuro
- 2) Participación en el Comité de Evaluación de Daños del FONDEN en su caso

##### *5.3.2.4.2 Coordinación General del servicio meteorológico nacional*

- 1) Evalúa las condiciones meteorológicas

##### *5.3.2.4.3 Coordinación General de Atención de Emergencias y Consejo de Cuenca*

- 1) Al concluir cada emergencia, revisar el desempeño de las diferentes acciones e identificar aspectos de mejora
- 2) Al concluir cada temporada de lluvias, integrar una memoria general de las emergencias que sirva de base para actualizaciones y mejoras del protocolo
- 3) Retirar equipo de la Gerencia de Protección a la Infraestructura una vez restablecida las condiciones normales

##### *5.3.2.4.4 Subdirecciones Generales de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, y de Infraestructura Hidroagrícola*

- 1) Evaluar daños a las fuentes de abastecimiento de agua potable, a la infraestructura de los sistemas de agua potable y drenaje, así como áreas productivas
- 2) Organizar la rehabilitación de la infraestructura dañada, en coordinación con los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales
- 3) Integrar la información de estados y municipios sobre el estado de la infraestructura y sobre las afectaciones sufridas
- 4) Participar en el comité de evaluación de daños del FONDEN
- 5) Identificar y valorar proyectos necesarios para mitigar efectos de futuras inundaciones
- 6) Gestionar recursos para estudios, proyectos y obras
- 7) Aplicar y dar seguimiento a las acciones de desarrollo de infraestructura

#### 5.3.2.4.5 *Coordinación general de Comunicación y Cultura del Agua*

- 1) Comunicación de la finalización de la emergencia a los responsables de los grupos y autoridades locales, así como a la población
- 2) Coordinar logística de prensa y comunicación oficial durante todo el tiempo que dure el evento

### 5.3.3 **Tareas específicas de Organismos de Cuenca y Direcciones Locales (FUENTE: CONAGUA, 2014)**

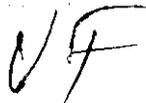
#### 5.3.3.1.1 *Antes de la emergencia. Fase de Prevención y Vigilancia*

- 1) Integrar y procesar la información de las estaciones hidrométricas y climatológicas para mantener informada a la Subdirección general Técnica y Servicio Meteorológico Nacional
- 2) Colaborar con oficinas centrales en la realización de los estudios de delimitación de zonas federales y zonas de riesgo
- 3) Dar seguimiento a los boletines meteorológicos e hidrométricos
- 4) Apoyar a la Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias en la revisión e inspección de infraestructura de protección
- 5) Informar a la Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias en la revisión e inspección de infraestructura de protección
- 6) Dar mantenimiento a los equipos de atención de emergencias
- 7) Formular una propuesta de inversiones prioritarias para mitigar las contingencias
- 8) Difundir la información sobre el riesgo de inundaciones y demás campañas que organice la CGCCA
- 9) Promover reuniones de coordinación con gobiernos estatales y municipales, tanto para precisar las estrategias de atención de posibles emergencias como para comunicar información sobre zonas de riesgo, asentamientos irregulares, necesidades de mantenimiento a redes de drenaje, etc

#### 5.3.3.1.2 *Antes de la emergencia. Fase de alerta*

- 1) Seguimiento permanente a los boletines meteorológicos e hidrométricos
- 2) Transmitir a autoridades estatales, municipales y de protección civil, los diferentes avisos y boletines que emita el Servicio Meteorológico Nacional

10/10/2014



- 3) Comunicar a los gobiernos de los estados, de manera oficial, el aviso de alerta por la proximidad de fenómenos que provocarán condiciones severas
- 4) Organizar las guardias permanentes del personal de organismos y direcciones
- 5) Coordinar con la Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias la posible movilización de personal y equipo
- 6) Coordinar con la CGAECC los canales de comunicación que se establecerán durante las emergencias
- 7) Apoyar a la Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias en la instalación de infraestructura de protección temporal

#### 5.3.3.1.3 Durante la emergencia

- 1) Seguimiento permanente a los boletines meteorológicos e hidrométricos
- 2) Vigilar la evolución de los fenómenos meteorológicos
- 3) Participar en las sesiones del CTOOH a fin de acordar las maniobras de obras hidráulicas
- 4) Apoyar a la Gerencia de Protección a la Infraestructura y atención de Emergencias en la instalación y operación de equipo de bombeo, y en la distribución de agua potable desinfectada
- 5) Establecer recorridos en las zonas siniestradas para determinar las afectaciones y posibles daños a la infraestructura
- 6) Informar diariamente a la CGAECC la situación de la emergencia, niveles de precipitaciones, situación de corrientes y embalses, afectaciones presentadas y acciones realizadas por CONAGUA
- 7) Establecer comunicación y coordinación permanente con autoridades estatales, municipales y de protección civil para implementar las acciones de atención de la emergencia, y transmitir toda la información relevante

#### 5.3.3.1.4 Después de la emergencia

- 1) Integrar la información definitiva de afectaciones y acciones de CONAGUA
- 2) Colaborar con las autoridades estatales y municipales para integrar la información necesaria para FONDEN y aseguradoras
- 3) Identificar y valorar los proyectos necesarios, tanto para la rehabilitación, reconstrucción y desarrollo de infraestructura

V F

- 4) Realizar una evaluación general del desempeño durante la atención de la emergencia, a fin de generar recomendaciones de mejora

## 5.4 Modelación matemática

Para llevar a cabo la modelación matemática, fue necesario utilizar un software de simulación matemática de flujo en cauces de tipo unidimensional. Dicho software se utilizó por ser de acceso libre y por contar con los módulos de lluvia-escurrimiento y tránsito de avenidas en conjunto. A continuación se describe el software SWMM.

### 5.4.1 Esquema de modelación usado por EPA SWMM 5.0

El programa EPA SWMM 5.0.1 es un modelo numérico desarrollado inicialmente para el estudio, diseño y análisis de sistemas de drenaje urbanos. Este programa simula la formación de escurrimiento y cargas contaminantes sobre subcuencas. Luego, estos flujos son transitados a través de la red de canales abiertos y/o cerrados del medio en estudio.

Es por ello que para lograr un manejo eficiente de SWMM 5.0.1 es necesario comprender como considera un sistema de drenaje, los elementos que participan de este sistema, y las relaciones entre los diferentes elementos del sistema de drenaje.

#### 5.4.1.1 Modelo conceptual del sistema de drenaje

El SWMM 5.0.1 considera el sistema de canales abiertos y/o cerrados como una colección de elementos y flujos diversos (Objetos) dentro de módulos o capas. Cada una de estas capas representa en forma general diversos procesos hidrológicos o hidráulicos tal como la precipitación o el flujo de aguas pluviales a través de nudos (e.j. alcantarillas).

En el esquema de la Figura 5.13, la capa inicial es la *Atmosférica*, en la cual se genera la precipitación que cae sobre la capa de *Terreno*. Este proceso de precipitación es representado en SWMM 5.0 mediante objetos tipo *Rain Gage* (pluviómetro).

VERIFICADO

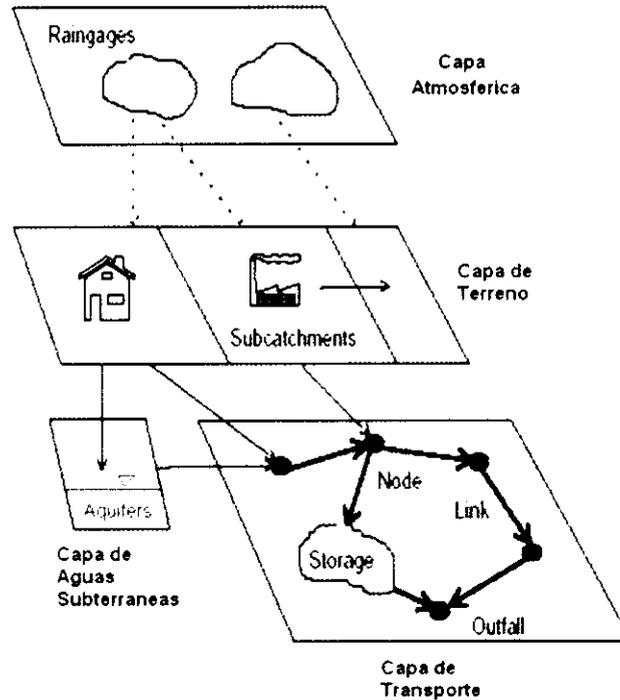


Figura 5.13.- Modelo conceptual SWMM v5.0 EPA

Siguiendo el proceso hidrológico, la capa de *Terreno* recibe la precipitación proveniente de la capa *Atmosférica* en forma de lluvia o nieve. En este módulo de *Terreno* se producen dos procesos hidrológicos: las pérdidas de precipitación, y la escorrentía superficial.

Dentro del primer proceso, que considera los fenómenos de infiltración, almacenamiento en depresiones, interceptación, y humedad superficial, una parte del volumen precipitado se mantiene dentro del módulo de *Terreno*, y otra fracción se envía como flujo hacia el módulo de Aguas Subterráneas. En el segundo proceso (escurrimiento superficial), se envía flujo y cargas contaminantes hacia la capa de *Transporte*. Ambos procesos son representados en la capa de *Terreno* mediante objetos tipo *Subcatchment* (área captadora o subcuenca).

El módulo de *Aguas Subterráneas* recibe la infiltración proveniente del módulo *Terreno* y transfiere una parte hacia la capa de *Transporte*. Esta capa de *Aguas Subterráneas* es modelada mediante objetos tipo *Aquifer* (Acuífero).

Por otro lado, la capa de *Transporte* es la que representa a la red de canales abiertos y/o cerrados en sí misma, la cual puede estar compuesta de secciones de cauce natural, conductos, bombas, reguladores de flujo, así como por elementos de almacenamiento (depósitos de retención), siendo todos ellos los que transfieren el flujo y la carga contaminante hacia los puntos de salida de la red o hacia plantas depuradoras. Los flujos de entrada para este módulo pueden venir de la escorrentía superficial (módulo de *Terreno*), del flujo interno del módulo de Aguas Subterráneas, de flujos de aguas residuales, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario.

Los elementos de la capa de *Transporte* son representados por EPA SWMM 5.0.1 como objetos tipo *Node* (nodo) y *Link* (conector). Es importante destacar el hecho de que no necesariamente todas las capas podrían estar en un modelo particular construido con SWMM 5.0.

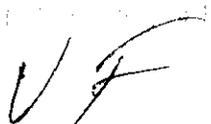
#### **5.4.1.2 Métodos de Calculo**

El SWMM 5.0.1 es un programa hidrológico- hidráulico cuyas rutinas de cálculo se desarrollan sobre los principios de Conservación de la Masa y Conservación de la Cantidad de Movimiento para calcular caudales, profundidades, velocidades, concentraciones, y otras variables de interés, sobre intervalos de tiempo discretos. Procesos tales como el escurrimiento superficial, infiltración, propagación del flujo en la red, y el transporte de contaminantes, son simulados usando estos principios.

El escurrimiento superficial que se produce en cada *Subcatchment* se calcula por el SWMM 5.0 asumiendo que cada subcuenca se comporta como un depósito no lineal. El modelo de depósito no lineal es un modelo agregado que aplica la ecuación de Conservación de la Masa y una ecuación tipo Onda Cinemática para calcular el caudal de escurrimiento superficial a la salida de cada subcuenca.

En este modelo de depósito se requieren parámetros tales como el área en planta y el ancho característico de la subcuenca, así como la rugosidad superficial de ella, entre otros parámetros. Además, la infiltración que podrá producirse en cada *Subcatchment*

14



puede ser calculada usando alguno de los tres diferentes métodos que SWMM 5.0 incorpora:

- método de **Horton**
- método de **Green-Ampt**
- método del **Número de Curva del NRCS**

EPA SWMM 5.0.1 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje.

1. **Steady Flow Routing**, consiste en asumir que en cada intervalo de tiempo de cálculo las condiciones del flujo no cambian; es decir, se tiene flujo permanente.
2. **Kinematic Wave** (onda cinemática), y en esta se considera la variabilidad temporal del flujo. Este método resuelve la ecuación de Conservación de la Masa y una aproximación de la ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento.
3. El tercero de estos métodos consiste en la resolución de las ecuaciones completas de *Saint Venant* (Conservación de la Masa y Cantidad de Movimiento), denominado como método de la **Dynamic Wave** (Onda Dinámica). Este método es el físicamente más correcto, aunque demanda un mayor tiempo de proceso computacional.

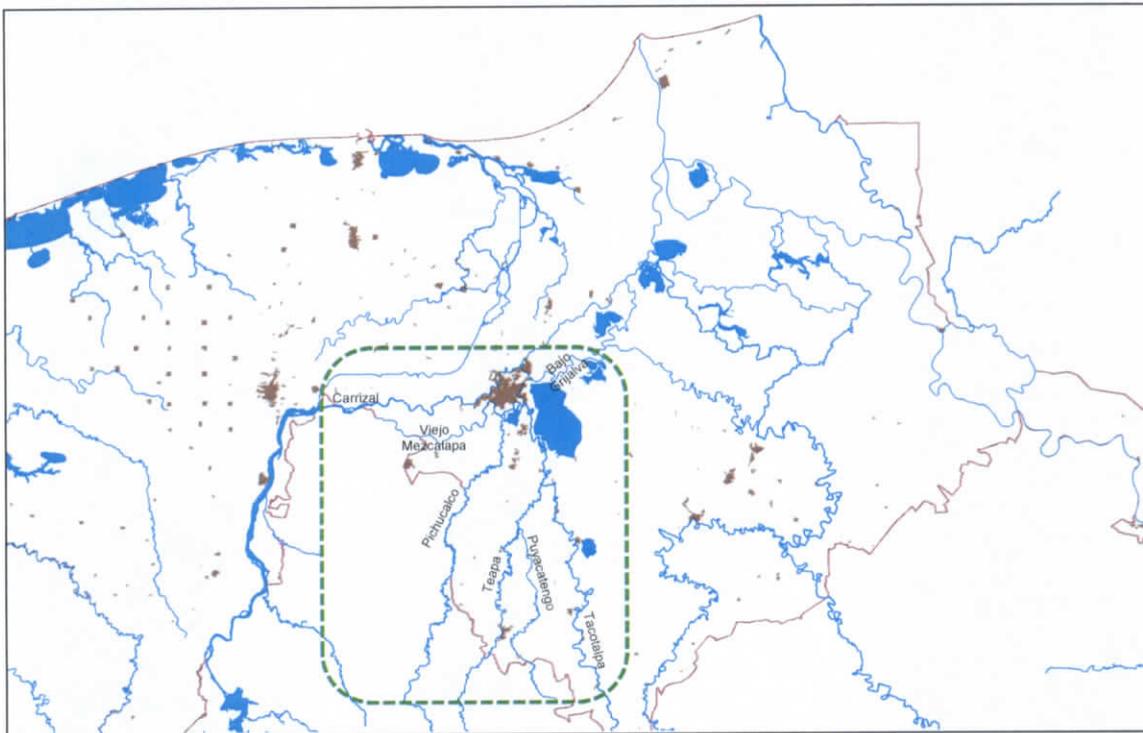
Una vez descrito de manera general el funcionamiento del SWMM, se describe el desarrollo e integración de los esquemas unifilares de los sistemas Mezcalapa-Samaria y La Sierra-Carrizal para la modelación matemática de macro-escenarios de lluvia.

#### 5.4.2 Esquema unifilar de modelación

Se generó el esquema unifilar de los sistemas comprometidos en esta primera etapa del estudio, que son: La Sierra-Carrizal y Mezcalapa-Samaria-río González. A continuación se describe los ríos que incluye cada sistema.

#### 5.4.2.1 Sistema Carrizal-La Sierra

El sistema Carrizal-La Sierra está conformado por los ríos: Carrizal aguas abajo de la estructura de control “El Macayo” y hasta la estación hidrométrica “Porvenir”. El río de la Sierra está conformado por los escurrimientos generados por los ríos Tacotalpa, Puyacatengo, y Teapa. En el río la Sierra aguas abajo de la estación hidrométrica “Pueblo Nuevo” llegan los ríos Pichucalco y Viejo Mezcalapa, aguas arriba de la estación hidrométrica “Gaviotas”. Esto se muestra en la siguiente Figura 5.14



**Figura 5.14.- Zona de estudio Sistema Carrizal-La Sierra**

Así mismo se consideran los cuerpos de agua como con: laguna Zapotes, Don Julián, Jalapa, Parrilla y Maluco. La infraestructura de protección considerada para la modelación es: escotaduras de la Sierra (Censo y Sabanilla), escotaduras del bajo Grijalva (Tintillo I, Tintillo II, Acachapan 3<sup>a</sup>, Acachapan 4<sup>a</sup> y Buenavista) y Zapotes III. Los sitios de control, para fines de determinar los umbrales son: EH Tapijulapa, EH Puyacatengo, EH Teapa, EH San Joaquín, EH Pueblo Nuevo, EH Muelle, EH Gaviotas, EH Porvenir, EH González.

#### 5.4.2.2 Sistema Mezcalapa-Samaria-río González

El sistema Mezcalapa-Samaria-río González está conformado por los ríos: Mezcalapa aguas debajo de la presa "Peñitas" hasta la zona de la Bifurcación (aguas arriba de la estructura de control Macayo). El río Samaria, el Dren Victoria y el río González hasta la barra de Chiltepec. Esto se muestra en la siguiente Figura 5.14

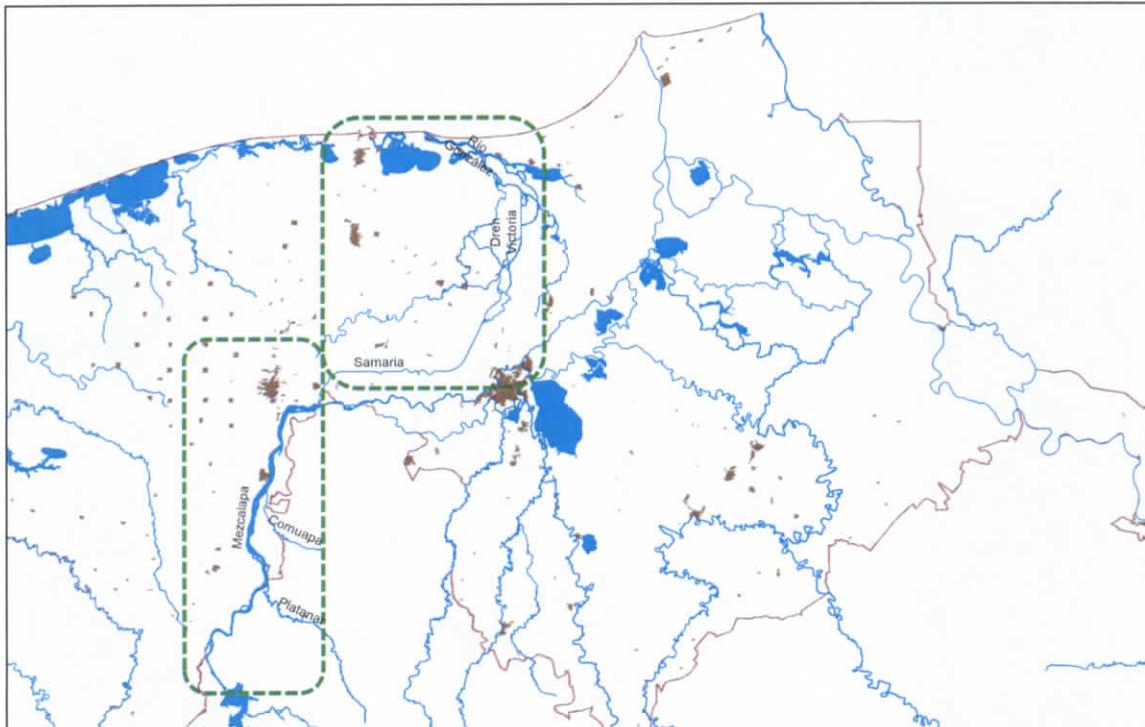


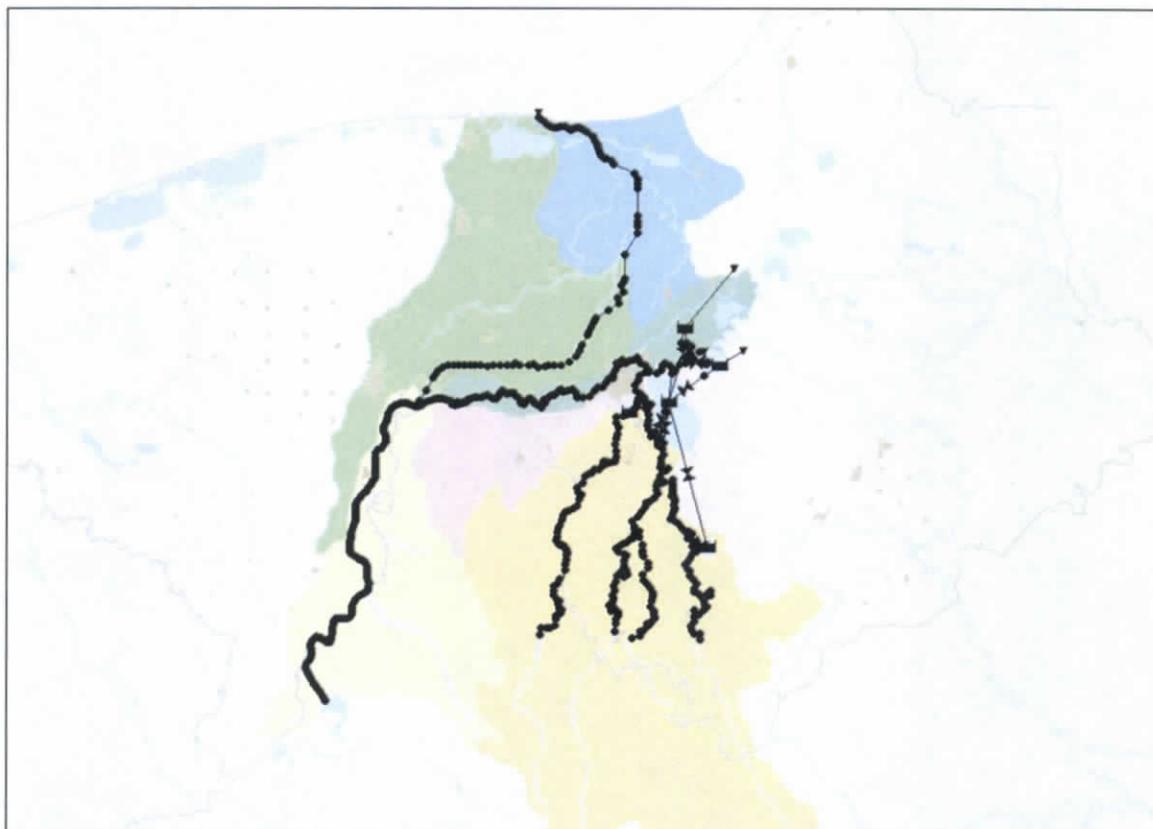
Figura 5.15.- Zona de estudio Sistema Mezcalapa-Samaria

La infraestructura de protección considerada para la modelación es: bordos del río Samaria con extensión de 4 km y estructura de control "El Macayo". Cabe mencionar que se consideró un gasto de aportación al río Mezcalapa por parte de los ríos Platanar y Comuapa, sin embargo este es teórico, ya que no se cuenta con registros de medición actuales. El sitio de control, para fines de determinar los umbrales es la EH Samaria.

#### 5.4.2.3 Integración del esquema unifilar

En una primera parte se integró el esquema unifilar para el análisis de tránsito de avenidas (ver Figura 5.16). Se empleó información topográfica y batimétrica para integrar

el esquema, esta información se tomó del punto 5.2; la información puede consultarse en el **Anexo A.5.1 Recopilación de Información**



**Figura 5.16.- Esquema unifilar para el módulo de tránsito de avenidas en el SWMM v.5.0.1 (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014)**

Una vez integrado el módulo de tránsito de avenidas, se delimitaron los sub-sistemas de lluvia los cuales aportarán los escurrimientos en la planicie.

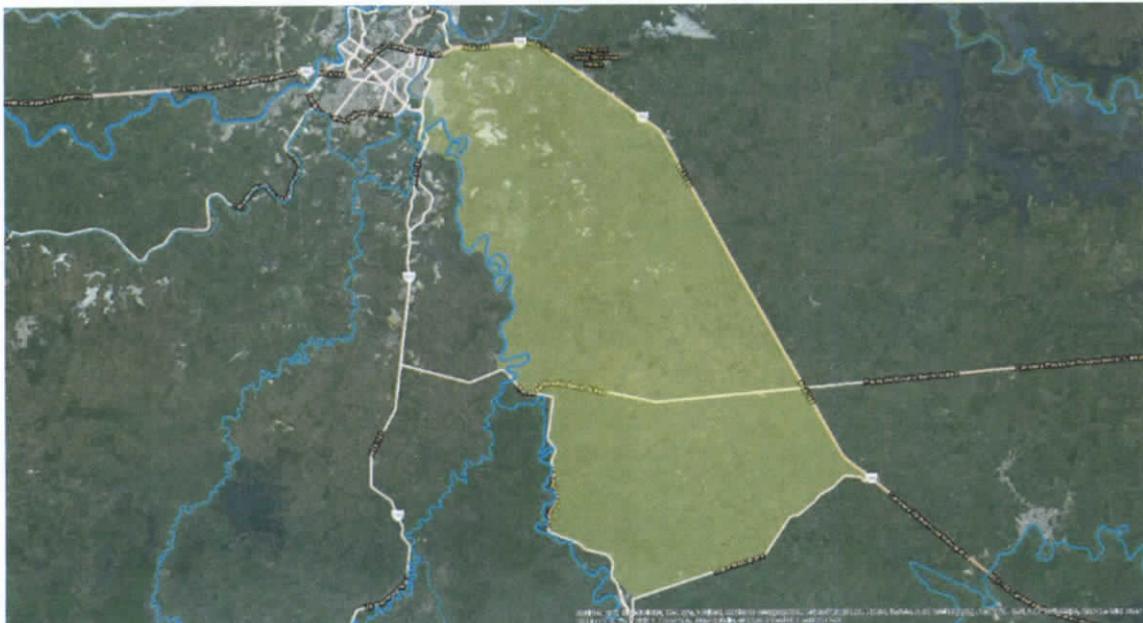
#### **5.4.2.4 Caracterización de sub-sistemas de lluvia**

Una cuenca superficial es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (Aparicio, 2012)

Tomando en cuenta la definición anterior, para el presente trabajo se delimitaron y caracterizaron lo que definimos y describimos como sub-sistemas de lluvia. Un sub-sistema de lluvia es aquella superficie delimitada a partir de los parteaguas naturales

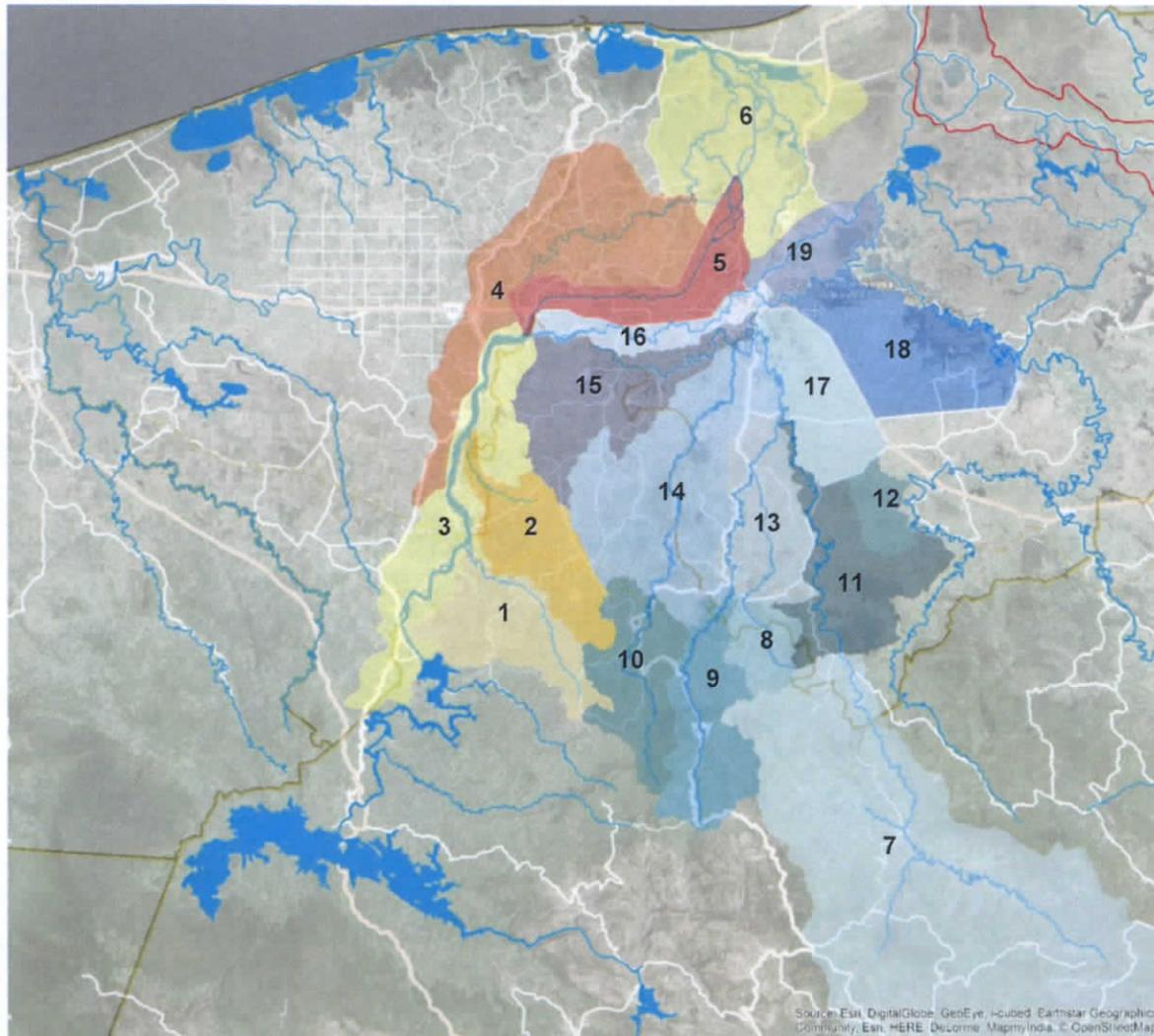
(orografía) y artificiales (e. j: bordos), la cual contiene una corriente principal con salida en el mismo sistema, tomando en cuenta las estaciones de medición de lluvia, gastos y nivel. El objetivo principal de esta delimitación es representar los escurrimientos que se generan dentro de estos sub-sistemas de lluvia y que aportan un gasto importante a los ríos de Tabasco. Cabe recalcar que la delimitación de los sub-sistemas de lluvia no siguen en su totalidad la delimitación subcuencas publicado por INEGI a través del portal de SIATL, sin embargo esta información se tomó como base para generar los sub-sistemas de lluvia.

Como ejemplo se tiene la laguna Zapotes, la cual se considera –para fines del presente trabajo- como un sistema de lluvia, se delimitó por la autopista Mex-195 Villahermosa-Teapa, la autopista Mex-186 Chetumal-Villahermosa y por la margen derecha del río de la Sierra (ver Figura 5.17)



**Figura 5.17.- Sistema de lluvia Laguna Zapotes (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014)**

En la Figura 5.18 se muestra los 19 sub-sistemas de lluvia con las que se trabajará el módulo lluvia-escurrimiento.



1. Sub sistema Comuapa
2. Sub sistema Platanar
3. Sub sistema Mezcalapa
4. Sub sistema Nacajuca
5. Sub sistema Samaria
6. Sub sistema González
7. Sub sistema Almandro
8. Sub sistema Puyacatengo
9. Sub sistema Teapa
10. Sub sistema Pichucalco
11. Sub sistema La Sierra
12. Sub sistema Jalapa
13. Sub sistema La Sierra Bajo
14. Sub sistema Parrilla
15. Sub sistema Viejo Mezcalapa
16. Sub sistema Carrizal
17. Sub sistema Zapotes
18. Sub sistema Don Julián
19. Sub sistema Bajo Grijalva

Figura 5.18.- Sub-sistemas de lluvia de la zona de estudio (FUENTE: IINGEN-UNAM, 2014)

A continuación se enlistan los sub sistemas de lluvia con sus áreas según la Figura 5.18 .

<b>ID</b>	<b>SISTEMA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CAUCE PRINCIPAL</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
1	Mezcalapa-Samaria	<b>Comuapa</b>	Comuapa	415.82
2	Mezcalapa-Samaria	<b>Platanar</b>	Platanar	401.95
3	Mezcalapa-Samaria	<b>Mezcalapa</b>	Mezcalapa	664.91
4	Mezcalapa-Samaria	<b>Nacajuca</b>	Nacajuca	896.16
5	Mezcalapa-Samaria	<b>Samaria</b>	Samaria	367.30
6	Mezcalapa-Samaria	<b>González</b>	Dren Victoria- río González	847.27
7	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Aljandro</b>	Oxolotán	3,142.35
8	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Puyacatengo</b>	Puyacatengo	159.17
9	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Teapa</b>	Teapa	440.15
10	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Pichucalco</b>	Pichucalco	400.75
11	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>La Sierra</b>	Tacotalpa	505.75

VF

<b>ID</b>	<b>SISTEMA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CAUCE PRINCIPAL</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
<b>12</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Jalapa</b>	Tacotalpa (Laguna Jalapa)	124.60
<b>13</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>La Sierra Bajo</b>	Teapa	399.69
<b>14</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Parrilla</b>	Pichucalco (Laguna Parrilla)	942.54
<b>15</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Viejo Mezcalapa</b>	Viejo Mezcalapa	550.00
<b>16</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Carrizal</b>	Carrizal	191.34
<b>17</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Laguna Zapotes</b>	La Sierra (Lagunas Zapotes)	391.83
<b>18</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Laguna Don Julián</b>	Don Julián	583.88
<b>19</b>	Carrizal-La Sierra-Bajo Grijalva	<b>Bajo Grijalva</b>	Bajo Grijalva	249.03

5A

#### **5.4.2.5 Calibración del modelo de simulación**

En el año 2012, en el estudio “Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco”, en el capítulo 6 “Definición de niveles operativos en los ríos tabasqueños para establecer umbrales de prevención, alerta y emergencia” se elaboró un modelo unifilar para simular diferentes Tr’s en 6 subcuencas (Almandro, Puyacatengo, Teapa, Pichucalco, Bifurcación y Samaria).

A diferencia del estudio anterior, el modelo de simulación utilizado para este trabajo, se actualizó con batimetrías recientes proporcionadas por la DL Tabasco de los cauces: Mezcalapa, Samaria, Carrizal, La Sierra. Se integró la estructura de control “El Macayo” al modelo como unión de los sistemas Mezcalapa-Samaria y Carrizal-La Sierra. Además se elaboraron 19 sub sistemas de lluvia para representar los escurrimientos provocados por las precipitaciones, cabe señalar que estos sub sistemas no representan en área y límites las subcuencas, ya que los sub sistemas de lluvia se delimitaron a partir de la información de subcuencas publicadas por la CONAGUA en el SIATL y la infraestructura carretera.

Para la calibración de los módulos lluvia-escurrimiento y tránsito de avenidas del esquema unifilar del modelo 2014 en el SWMM se utilizaron datos medidos y reportados de lluvia y gasto en los boletines de 24 horas emitidos por la CONAGUA –OCFS y DL Tabasco, los cuales se muestran en las siguientes gráficas.

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACION DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

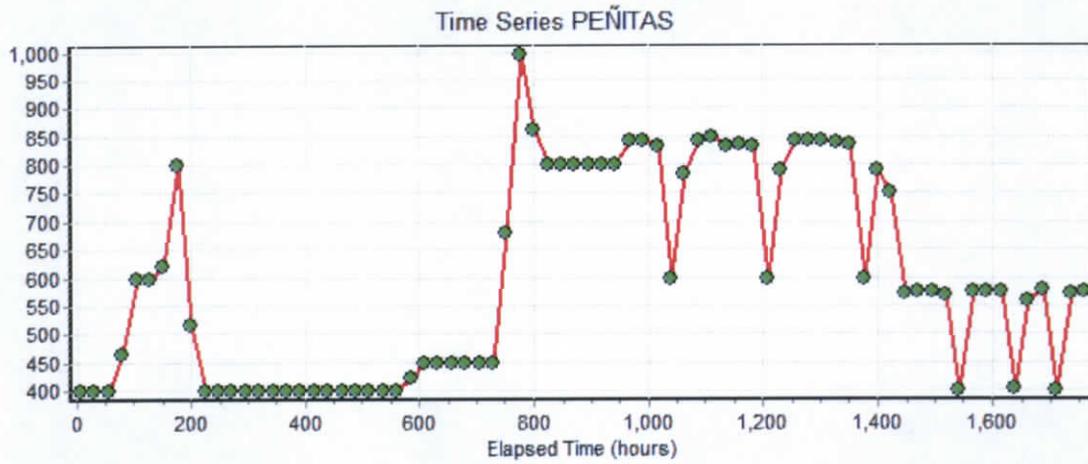


Figura 5.19.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la Presa Peñitas

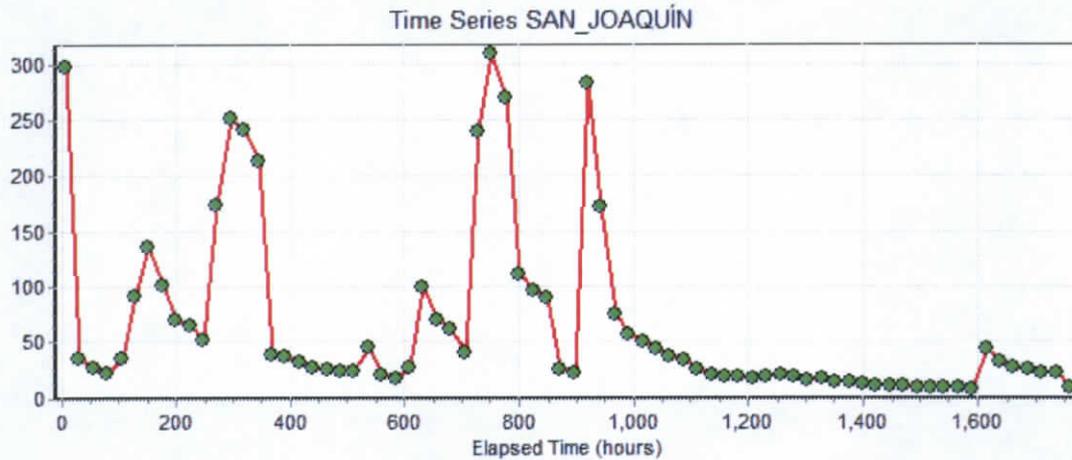


Figura 5.20.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH San Joaquín

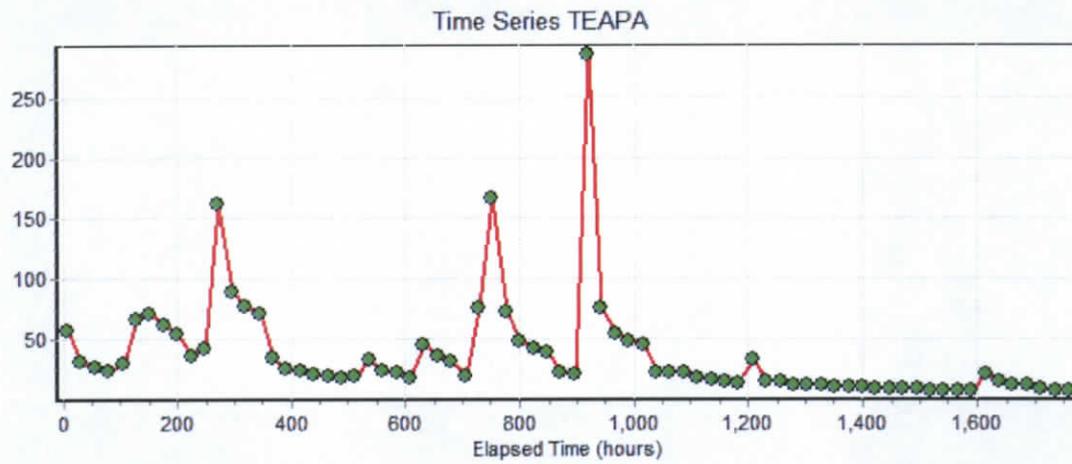


Figura 5.21.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Teapa

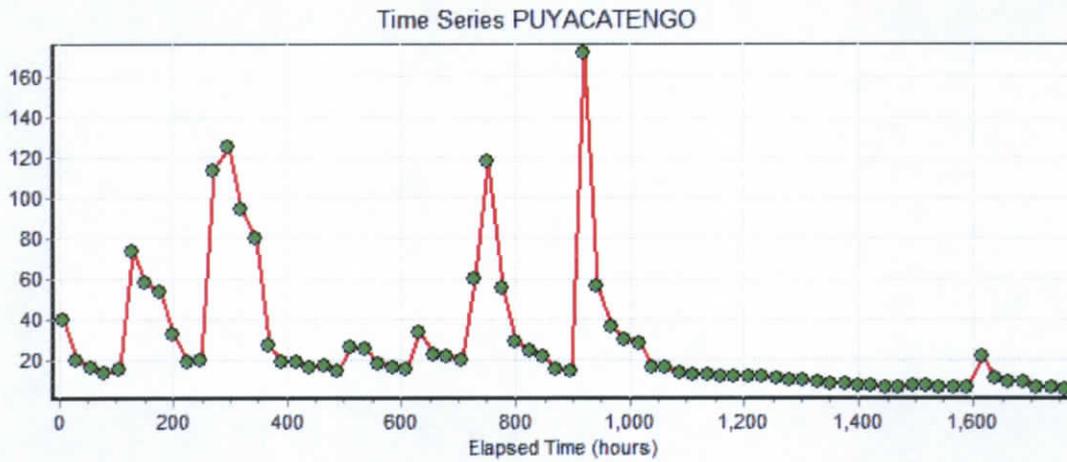


Figura 5.22.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Puyacatengo

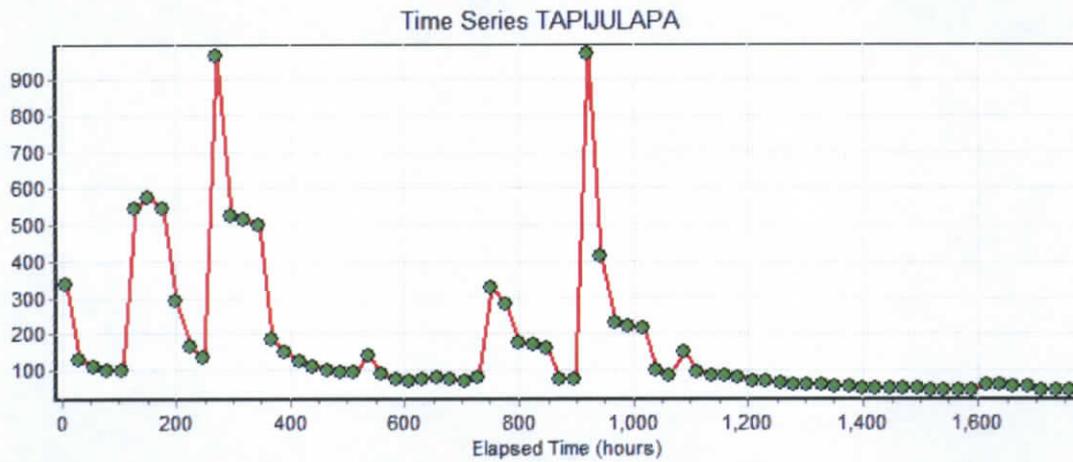


Figura 5.23.- Hidrograma de entrada medido en el sitio de la EH Tapijulapa

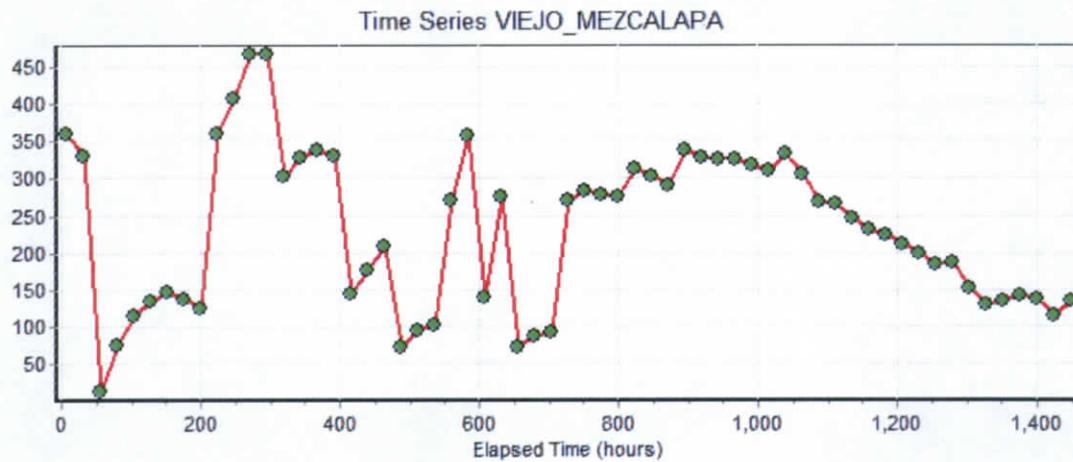


Figura 5.24.- Hidrograma de entrada calculado en el sitio del Puente La Majahua

Para el caso de la variable de lluvia se tienen los siguientes hietogramas para cada uno de los sub sistemas de lluvia:

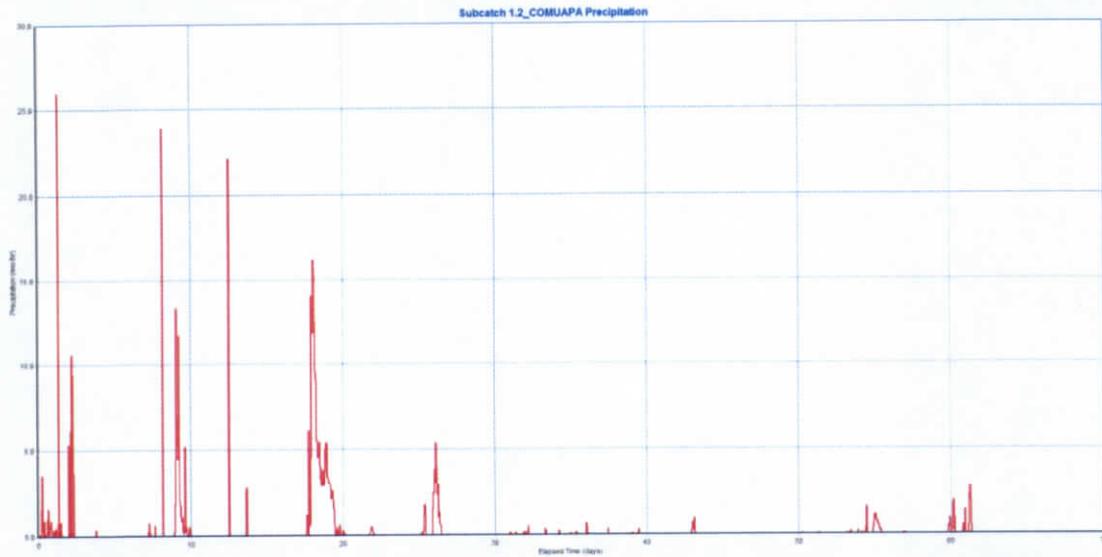


Figura 5.25.- Lluvia media horaria subsistema Comuapa

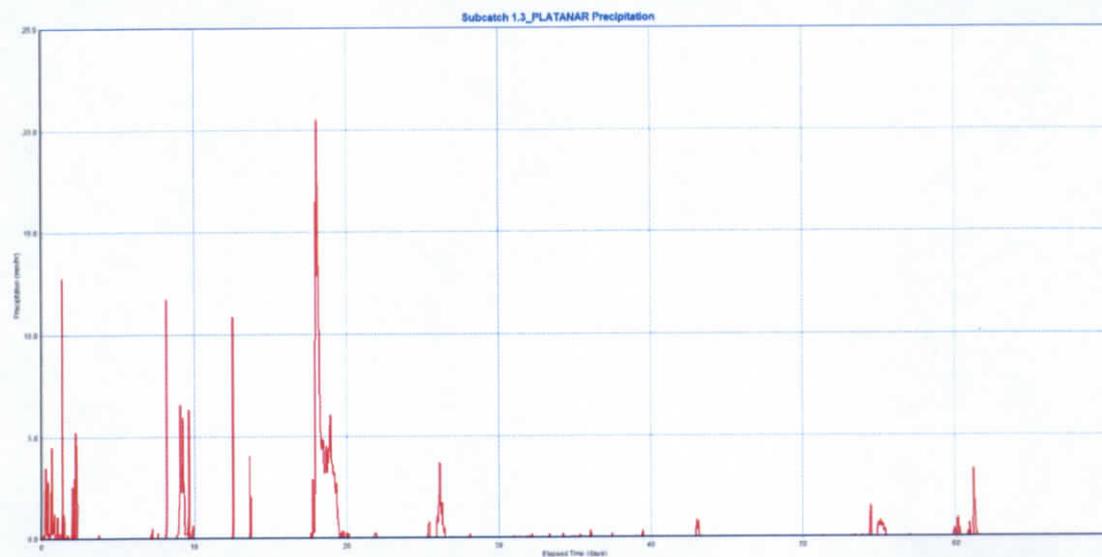


Figura 5.26.- Lluvia media horaria subsistema Platanar

*NF*

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

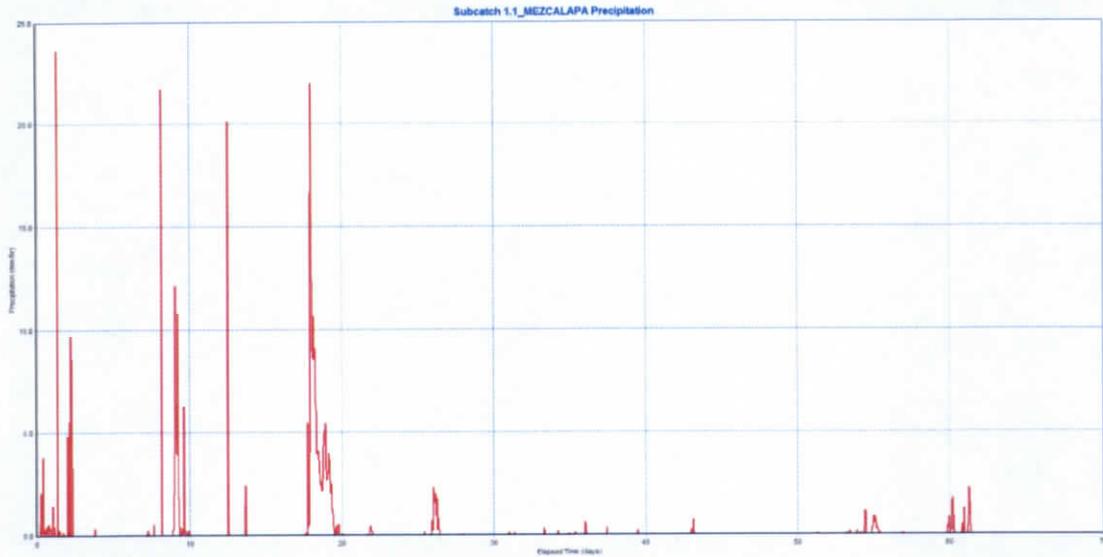


Figura 5.27.- Lluvia media horaria subsistema Mezcalapa

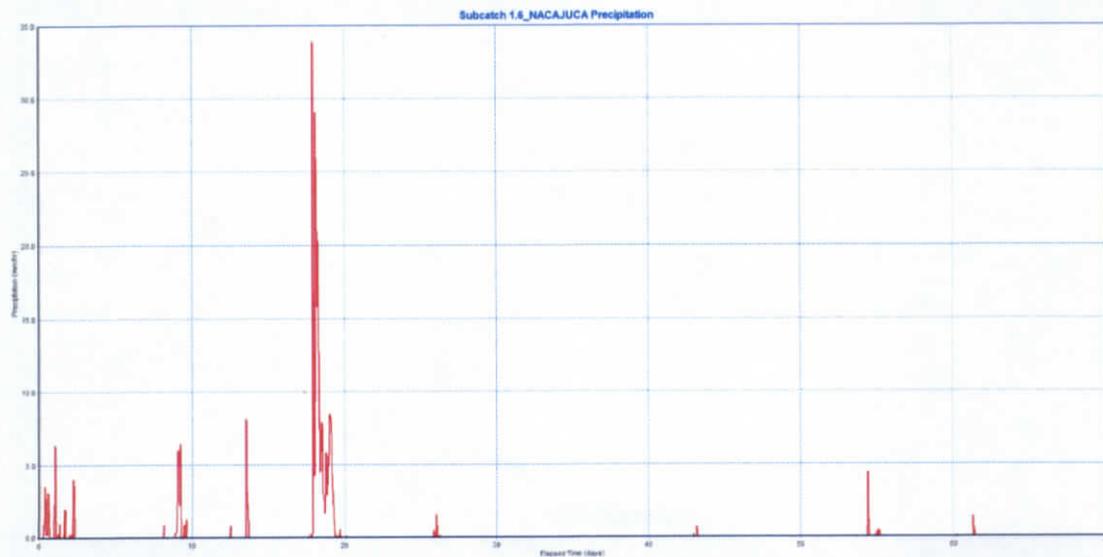


Figura 5.28.- Lluvia media horaria subsistema Nacajuca

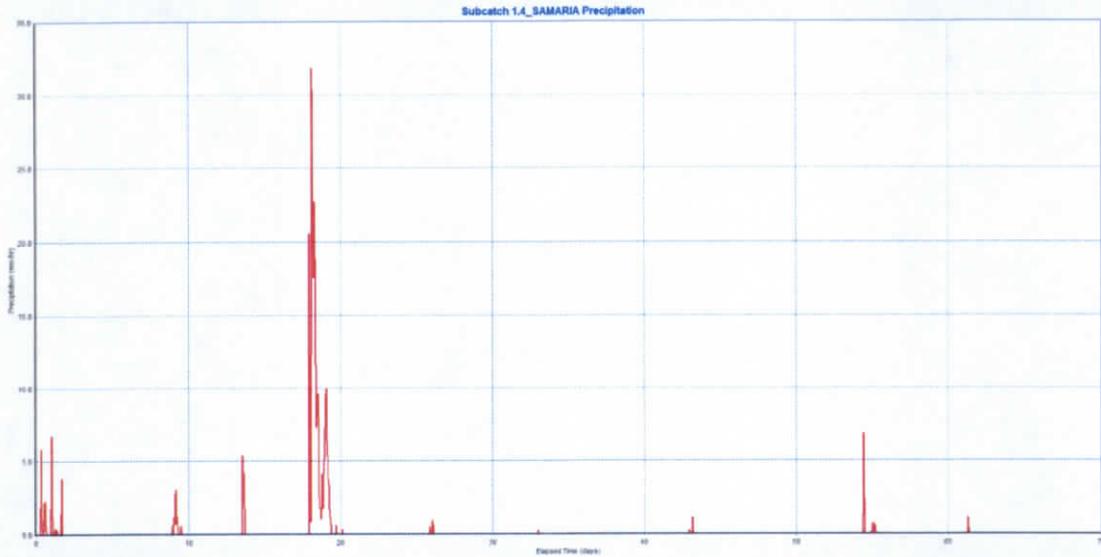


Figura 5.29.- Lluvia media horaria subsistema Samaria

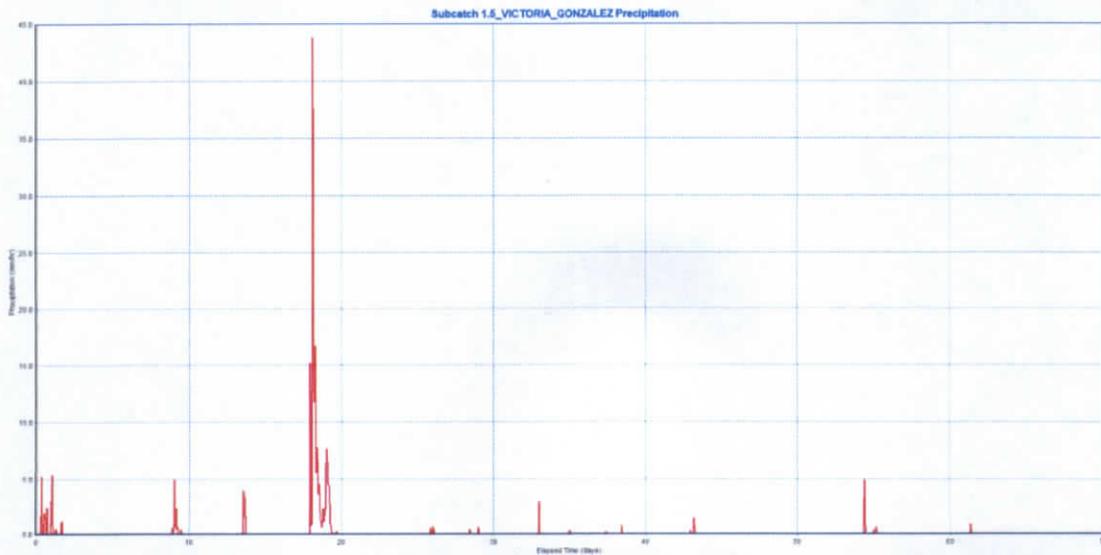


Figura 5.30.- Lluvia media horaria subsistema González

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA  
POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA  
(PROHTAB)

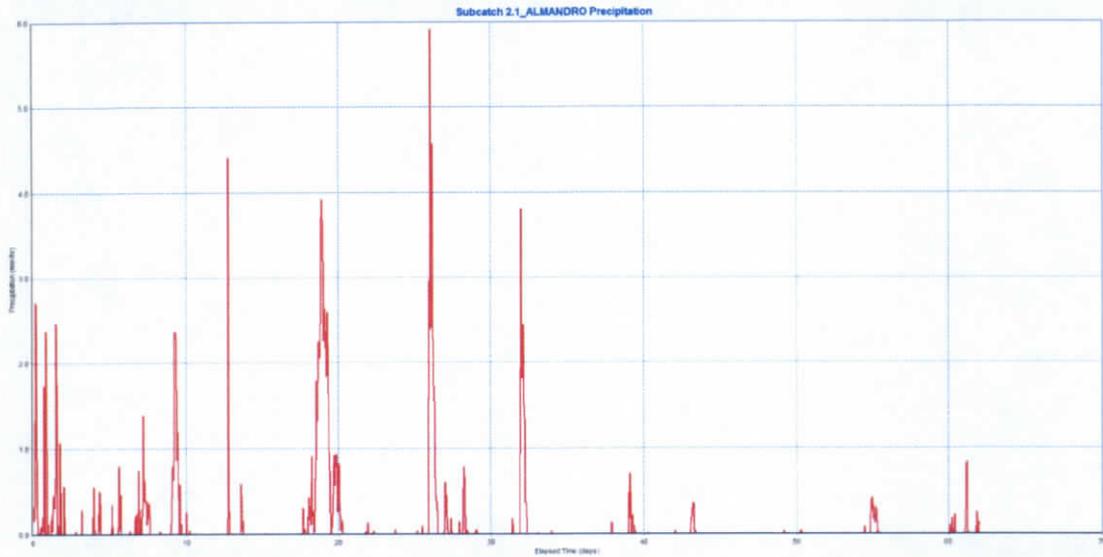


Figura 5.31.- Lluvia media horaria subsistema Almandro

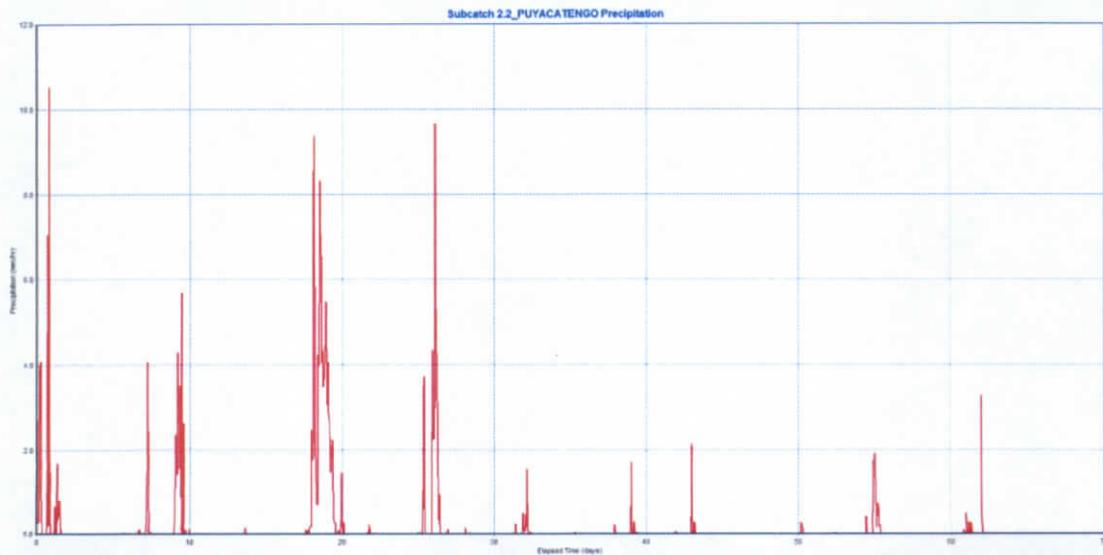


Figura 5.32.- Lluvia media horaria subsistema Puyacatengo

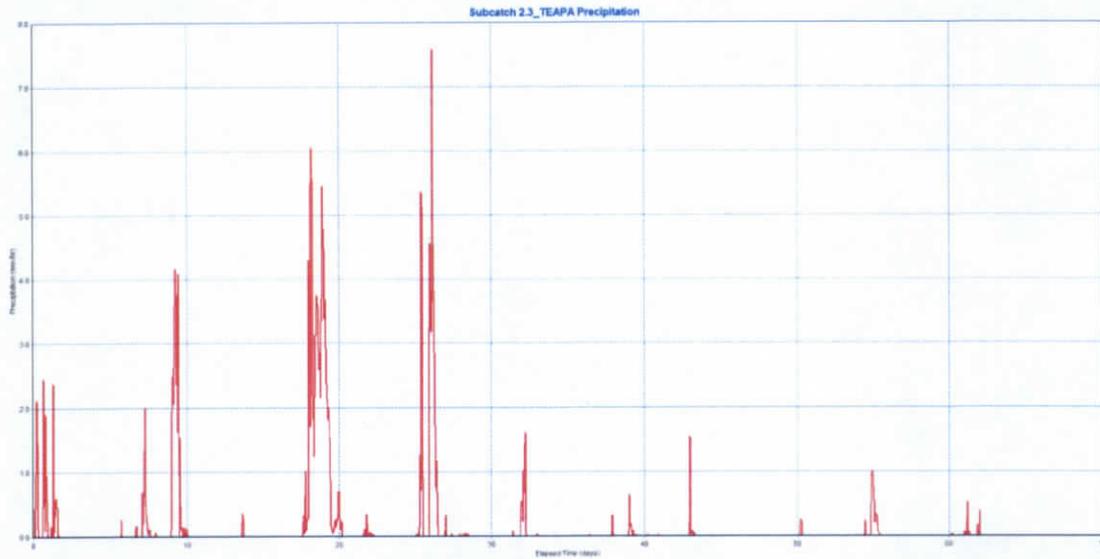


Figura 5.33.- Lluvia media horaria subsistema Teapa

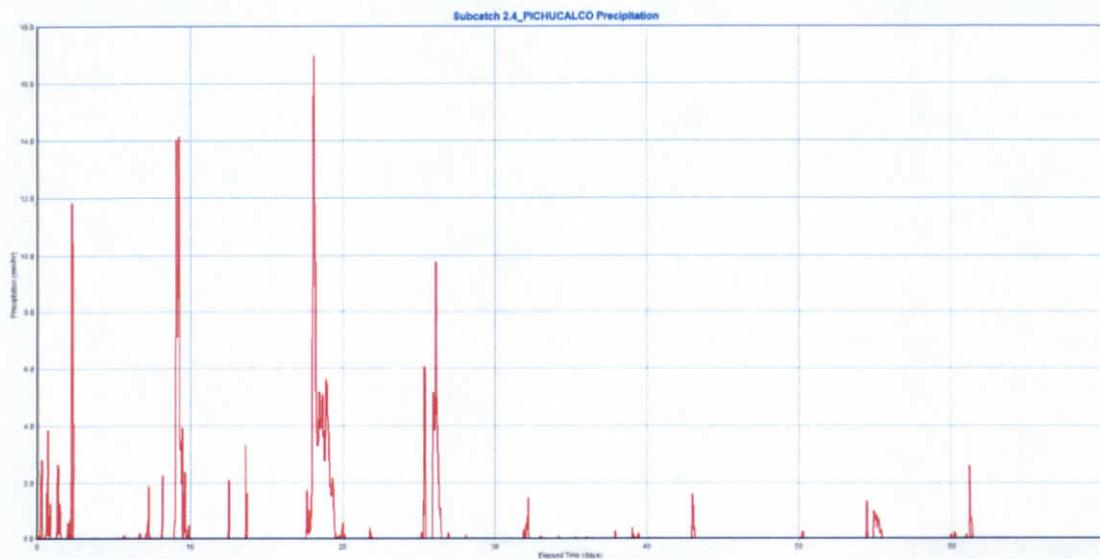


Figura 5.34.- Lluvia media horaria subsistema Pichucalco

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

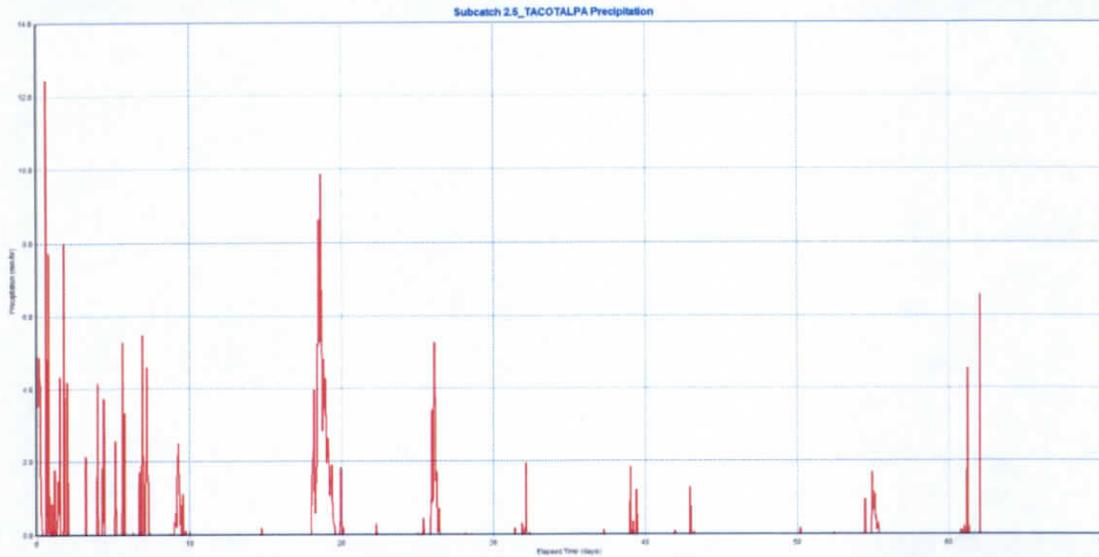


Figura 5.35.- Lluvia media horaria subsistema La Sierra

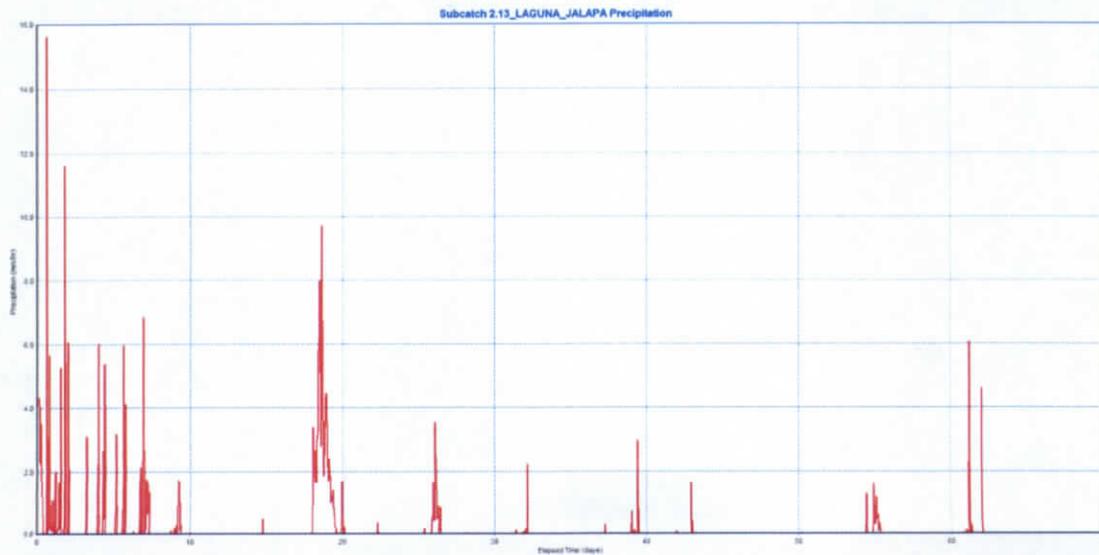


Figura 5.36.- Lluvia media horaria subsistema Jalapa

*VF*

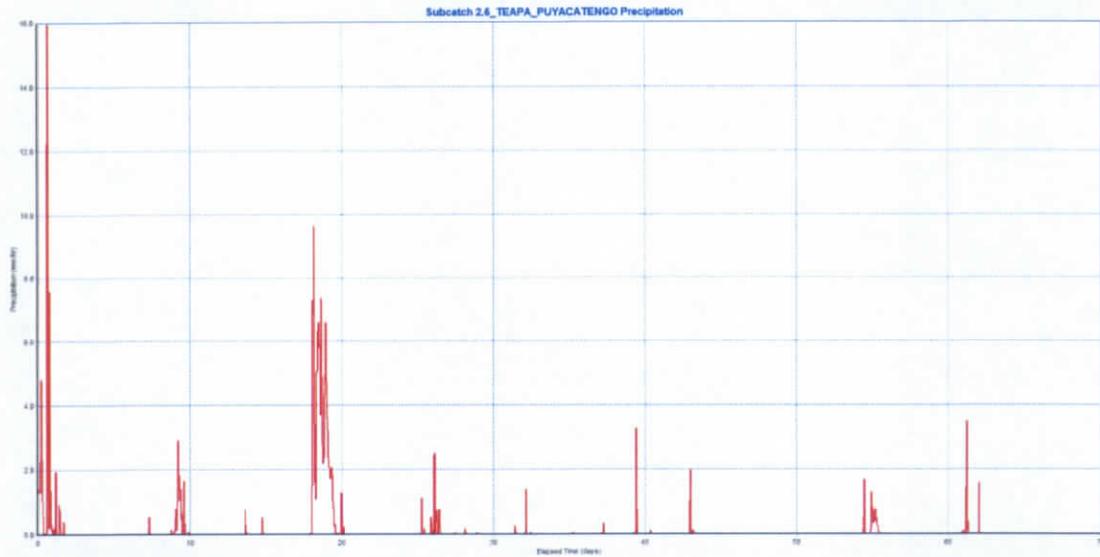


Figura 5.37.- Lluvia media horaria subsistema La Sierra Bajo

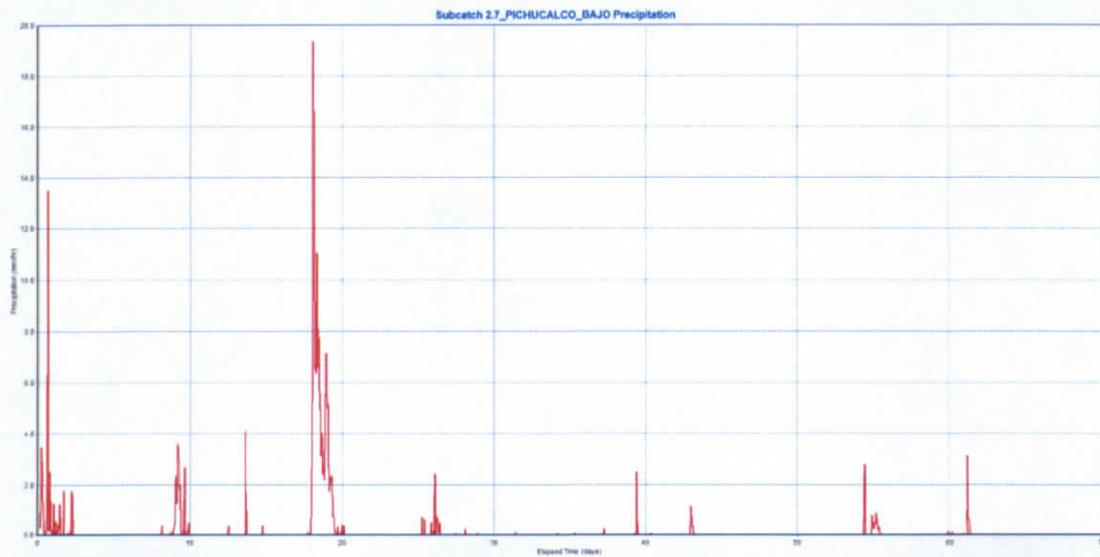


Figura 5.38.- Lluvia media horaria subsistema Parrilla

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

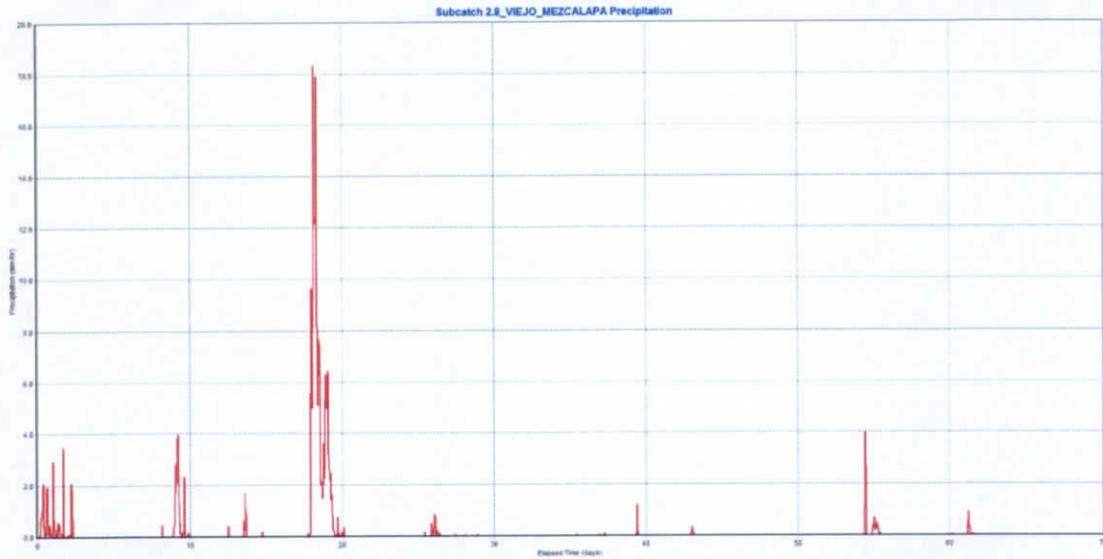


Figura 5.39.- Lluvia media horaria subsistema Viejo Mezcalapa

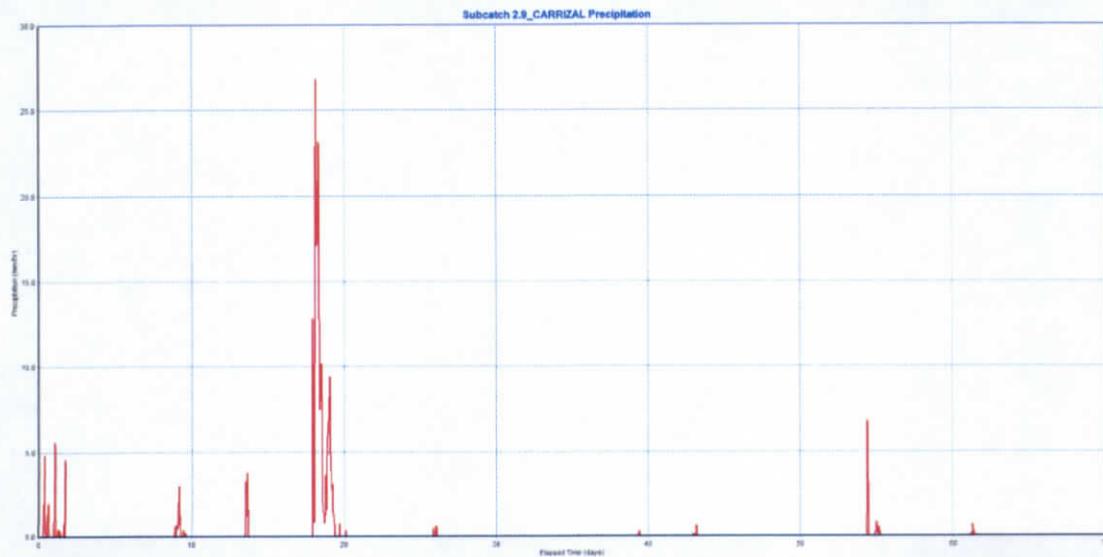


Figura 5.40.- Lluvia media horaria subsistema Carrizal

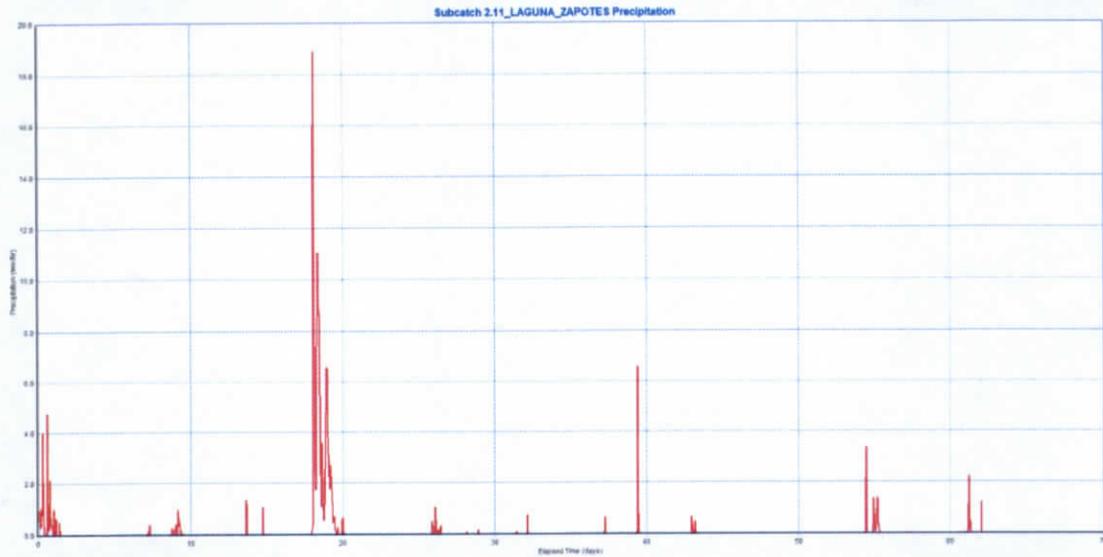


Figura 5.41.- Lluvia media horaria subsistema Laguna Zapotes

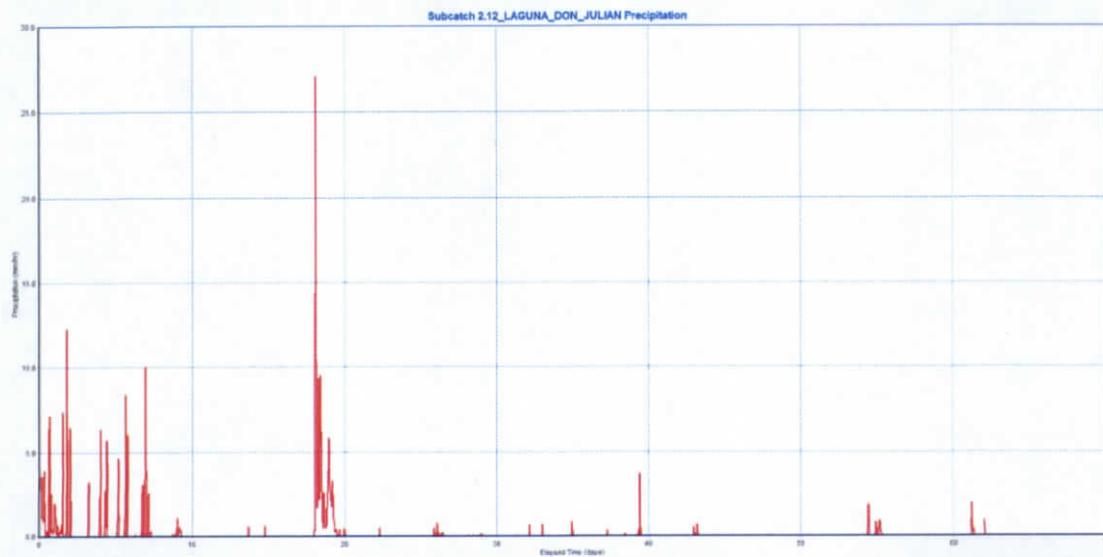
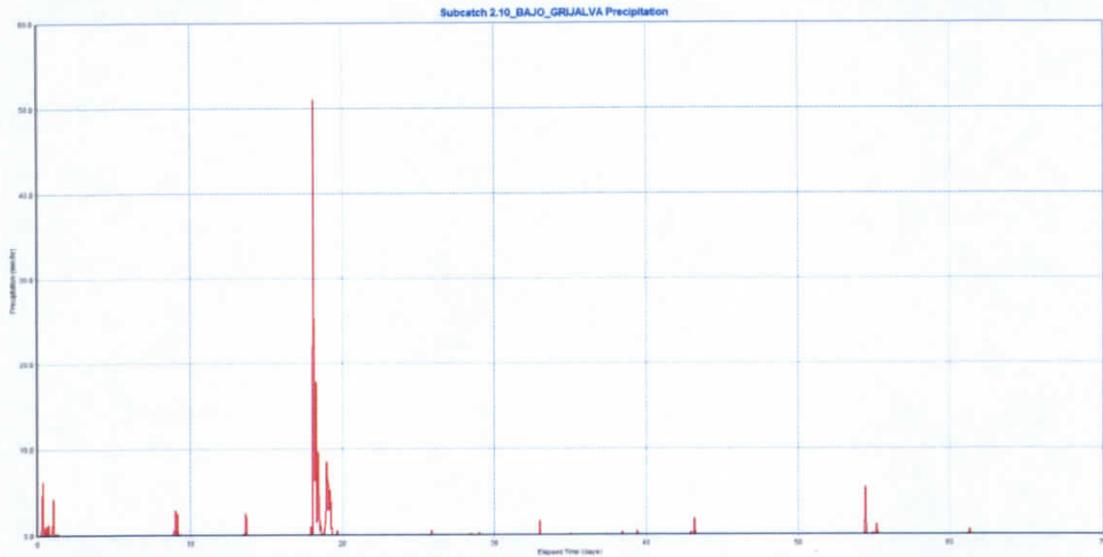


Figura 5.42.- Lluvia media horaria subsistema Laguna Don Julián



**Figura 5.43.- Lluvia media horaria subsistema Bajo Grijalva**

Una vez calibrado el modelo matemático se ingresan las consideraciones de macroescenarios para obtener los tiempos de cambio entre los niveles de alertamiento de los sitios.

## 5.5 Definición de macro-escenarios de lluvia

Las inundaciones se producen cuando lluvias intensas o continuas, saturan el suelo y superan la capacidad máxima de transporte del río, provocando desbordamientos e inundaciones de los terrenos cercanos a los propios cursos de agua. Las inundaciones son un evento natural y recurrente para un río y son producto de la duración de las lluvias y el mecanismo que las genera, el cual puede ser pluvial o fluvial.

La definición de macro-escenarios de lluvia, no es un asunto trivial y requiere de un análisis claro y óptimo, es por ello que aplicaremos el método de análisis situacional (análisis de decisiones), del mecanismo que genera las inundaciones en el estado de Tabasco, en particular en los sistemas Carrizal-La Sierra y Mezcalapa-Samaria-río González.

### 5.5.1 Análisis situacional

El método de análisis situacional (Ver Figura 5.44) es un método que lleva a la aplicación del procedimiento más adecuado para analizar lo que está ocurriendo cuando nos enfrentamos con diferentes asuntos (*asunto o cuestión: dificultad, falla, oportunidad, amenaza o riesgo que nos obliga a actuar*). Este método ayuda a saber por dónde comenzar los asuntos traslapados y confusos, a establecer prioridades y la secuencia de las actividades que darán respuesta a los problemas de toma de decisión.

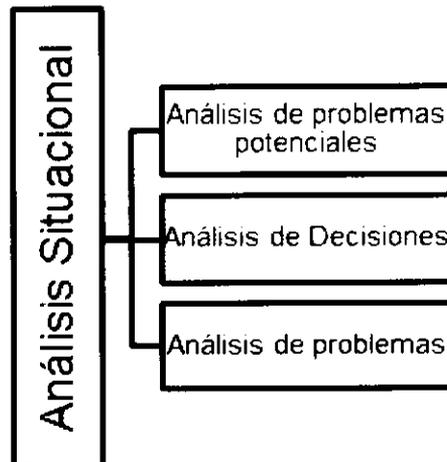


Figura 5.44.- Método de análisis situacional (FUENTE: Hanel, 2004)

Para llevar a cabo el análisis de situaciones primero es importante reconocer todos los asuntos que se tengan actuales o futuros, enumerando las desviaciones, las oportunidades o las amenazas y anticipar los problemas que puedan surgir. A continuación hay que aclarar los asuntos ambiguos y desglosar los complejos para lograr asuntos independientes y del mismo nivel de generalidad. Una vez definido, se decide la prioridad de cada asunto con base en la urgencia, la gravedad y la probabilidad de su crecimiento. Con base en una o en todas estas características, se puede juzgar que un asunto es relativamente menos importante y debe ser considerado después.

Por último, se selecciona el proceso apropiado para resolver cada asunto, planeando como pueden resolverse, quién se hará cargo de ellos y qué clase de respuestas se necesitan. Para tal efecto, se reconocen tres tipos de asuntos más comunes: (1) *las desviaciones*, (2) *las oportunidades* y las (3) *las amenazas*.

Para cada uno de ellos corresponde un procedimiento específico para resolverlo.

- 1) *Las desviaciones*: requieren de la aplicación del Análisis de Problemas
- 2) *Las oportunidades*: requieren de la aplicación del Análisis de Decisiones
- 3) *Las amenazas*: requieren de la aplicación del Análisis de Problemas Potenciales

Para estar seguros de elegir el procedimiento o procedimientos que convienen, debemos contestar algunas preguntas (Ver Figura 5.45) acerca del tipo de respuesta que cada una de estas requiere:

<p>Análisis de Problemas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Es necesario explicar el asunto?</li> <li>• ¿Existe una desviación entre el desempeño esperado y el real?</li> <li>• ¿La desviación se debe a una causa desconocida?</li> <li>• ¿Saber la causa verdadera nos ayudará a ejercer una acción más efectiva?</li> </ul>
<p>Análisis de Decisiones</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Debe hacerse una elección?</li> <li>• ¿Necesitan ponerse en orden los objetivos para emprender alguna actividad?</li> </ul>
<p>Análisis de Problemas Potenciales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Se ha tomado una decisión que aún no se ha implantado y es necesario actuar ahora para evitar posibles problemas en el futuro?</li> <li>• ¿Es necesario elaborar un plan para salvaguardar alguna decisión o actividad futura?</li> </ul>

Figura 5.45.- Cuestionario para elegir el o los procedimientos de análisis



Figura 5.46.- Secuencia del método de Análisis Situacional (FUENTE: Hanel, 2004)

En resumen, el análisis situacional es un proceso o secuencia de pasos lógicos que permiten definir, aclarar, priorizar y planear la resolución de las situaciones, tanto en el ámbito laboral como en el personal. Este tipo de análisis es una herramienta de apoyo en el desarrollo de programas o protocolos que atiendan la situación o evento de interés.

Ahora bien, dando respuesta a las preguntas de la Figura 5.46;

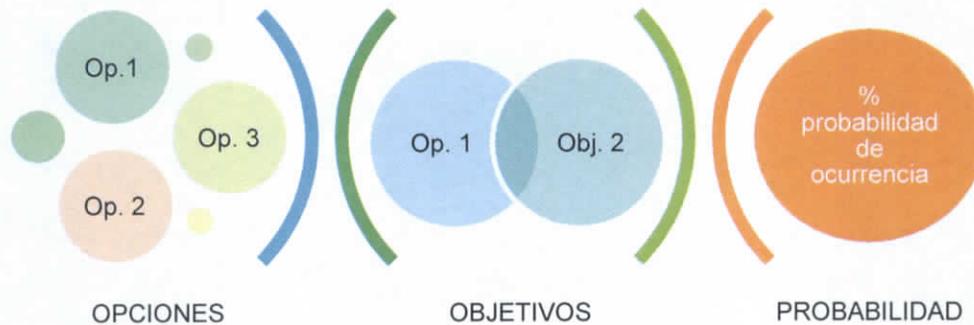
- 1) *¿Debe hacerse una elección?* La respuesta es SI, ya que debemos elegir entre un número infinito de soluciones para generar los macro-escenarios de lluvia a modelar matemáticamente
- 2) *¿Necesitan ponerse en orden los objetivos para emprender alguna actividad?* La respuesta es SI, ya que dependiendo del macro-escenario de lluvia que se presente y la respuesta de los sistemas Mezcalapa-Samaria-río González y La Sierra-Carrizal serán las acciones que deberán implementarse conforme al Protocolo para la atención de emergencias por condiciones Hidrometeorológicas severas

#### **5.5.1.1 Procedimiento “Análisis de Decisiones”**

En el análisis de decisiones, por lo general, existe una infinidad de soluciones a un problema, y es claro que no todas las soluciones que se plantean ofrecerán el mismo grado de satisfacción en los resultados que éstas obtengan; es por ello que se necesita un proceso de selección y decisión.

En términos generales y para los fines del presente estudio, el procedimiento busca aquellos macro-escenarios de lluvia que nos generen una situación de emergencia por inundación fluvial en los sistemas Mezcalapa-Samaria-río González y La Sierra-Carrizal, equilibrando las restricciones reales del evento, tales como: nivel de la superficie libre del agua (SLA) en las lagunas, porcentaje de saturación del suelo, intensidad de lluvia y nivel de la superficie libre del agua (SLA) en los ríos.

La toma de decisiones que se hizo, fue conforma a un estado de riesgo; ya que en este estado se conocen los resultados con una probabilidad de ocurrencia. (Ver Figura 5.47)



**Figura 5.47.- Esquema de toma de decisiones en estado de riesgo**

Las etapas del procedimiento de análisis de decisiones que se llevó a cabo es la siguiente:

#### 5.5.1.1.1 Enunciado de la decisión

Esta fase establece el objetivo básico del procedimiento y es de alguna manera la meta final. El enunciado de la decisión provee un enfoque para el análisis y establece los límites de la elección.

Para ello contestamos las siguientes preguntas:

a) *¿Con qué propósito?*

Establecer los macro-escenarios de lluvia que pueden generar inundaciones en los sistemas Mezcalapa-Samaria-río González y La Sierra-Carrizal

b) *¿Cuándo y dónde?*

Durante la época de huracanes y frentes fríos en el océano Atlántico y Golfo de México

c) *¿Cómo?*

Generando macro-escenarios de lluvia que tomen en cuenta las variables: nivel de la superficie libre del agua de las lagunas, porcentaje de saturación del suelo, intensidad de lluvia y nivel de la superficie libre del agua en los ríos

**ENUNCIADO DE LA DECISIÓN:**

**“Establecer los macro-escenarios de lluvia que pueden generar inundaciones en los sistemas Mezcalapa-Samaria-río González y La Sierra-Carrizal, durante la época de huracanes y frentes fríos en el océano Atlántico y Golfo de México, tomando en cuenta las variables: nivel de la superficie libre del agua de las lagunas, porcentaje de saturación del suelo, intensidad de lluvia y nivel de la superficie libre del agua en los ríos”**

*5.5.1.1.2 Definición de los objetivos*

a) Objetivos necesarios

Deben cumplirse para garantizar una decisión exitosa, deben ser cuantificables para que funcionen como un filtro para eliminar las opciones propensas al fracaso

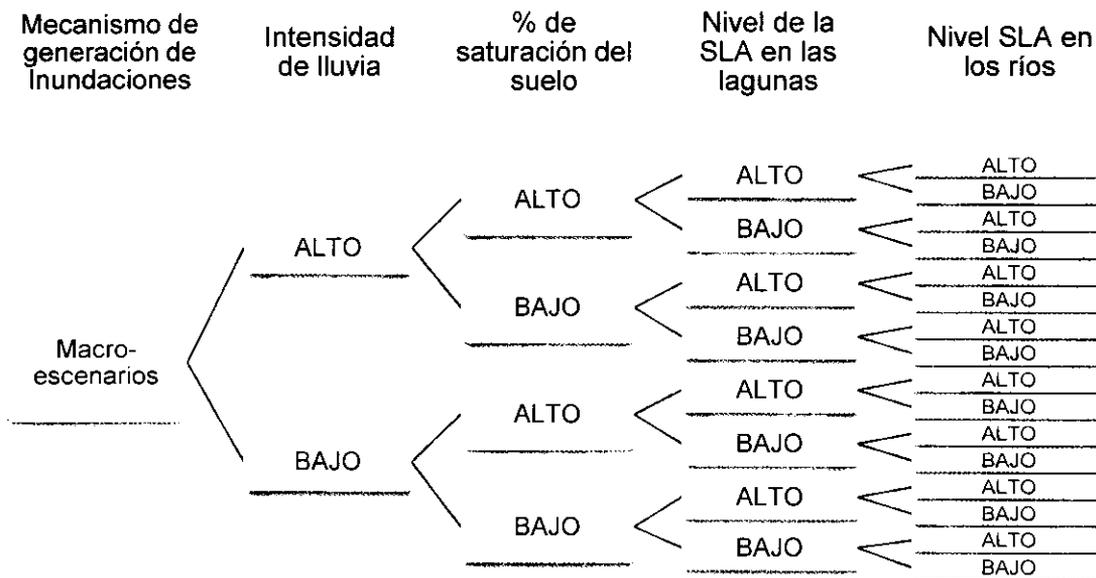
b) Objetivos deseados:

No estable límites absolutos, si no que expresa una conveniencia o ventaja relativa. Estos objetivos se ponderan del 1 al 10; esta escala no es crítica, sin embargo debe contar con suficiente amplitud para permitir discriminar los objetivos

OBJETIVOS	
<b>Necesarios</b>	
Establecer al menos 3 macro-escenarios de lluvia que puedan generar problemas de inundación en los sistemas Mezcalapa-Samaria-río González y La Sierra-Carrizal	
Combinar las variables: nivel de la superficie libre del agua de las lagunas, intensidad de lluvia, porcentaje de saturación del suelo	
Deseados	Peso
Establecer la interacción entre sub sistemas para la generación de inundaciones	10

*5.5.1.1.3 Diseño de opciones*

Para diseñar las opciones se construyó el siguiente árbol de combinaciones tomando en cuenta las variables que pueden generar inundaciones



A partir del árbol de combinaciones anterior, se encontraron 16 macro-escenarios de lluvia matemáticamente posibles, sin embargo se realizó una depuración de estos macro-escenarios ya que algunos no son físicamente posibles. Las condiciones físicas que se tomaron en cuenta para la depuración fueron las siguientes:

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA (PROHTAB)

Intensidad de lluvia	<ul style="list-style-type: none"> <li>•BAJO: De 15 a 30 mm/h (lluvia fuerte)</li> <li>•ALTO: De 60 a 100 mm/h (lluvia intensa)</li> <li>•NOTA: estos rangos se tomaron de los pronósticos a corto plazo emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN)</li> </ul>
% de saturación del suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>•BAJO: 0% de saturación (condición:temporada de secas)</li> <li>•ALTO: 90% de saturación (condición:temporada de lluvias)</li> </ul>
Nivel de la SLA en las lagunas	<ul style="list-style-type: none"> <li>•BAJO: 0.20 m (condición:temporada de secas)</li> <li>•ALTO: 2.00 m (condición:temporada de lluvias)</li> </ul>
Nivel SLA en los ríos	<ul style="list-style-type: none"> <li>•BAJO: 1.0 m por debajo del NAMO (condición:temporada de secas)</li> <li>•ALTO: 1.0 m por arriba del NAMO (condición:temporada de lluvias)</li> </ul>

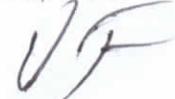
Aplicando las consideraciones anteriores, las combinaciones posibles resultantes se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2.- Depuración de combinaciones de macro-escenarios

No	Intensidad de lluvia	% de saturación del suelo	Nivel de la SLA en las lagunas	Nivel SLA en los ríos	RESULTADO
1	alto	alto	alto	alto	POSIBLE
2	alto	alto	alto	bajo	POSIBLE
3	alto	alto	bajo	alto	POSIBLE
4	alto	alto	bajo	bajo	POSIBLE
5	alto	bajo	alto	alto	X
6	alto	bajo	alto	bajo	X

No	Intensidad de lluvia	% de saturación del suelo	Nivel de la SLA en las lagunas	Nivel SLA en los ríos	RESULTADO
7	alto	bajo	bajo	alto	X
8	alto	bajo	bajo	bajo	<b>POSIBLE</b>
9	bajo	alto	alto	alto	<b>POSIBLE</b>
10	bajo	alto	alto	bajo	<b>POSIBLE</b>
11	bajo	alto	bajo	alto	<b>POSIBLE</b>
12	bajo	alto	bajo	bajo	<b>POSIBLE</b>
13	bajo	bajo	alto	alto	X
14	bajo	bajo	alto	bajo	X
15	bajo	bajo	bajo	alto	X
16	bajo	bajo	bajo	bajo	<b>POSIBLE</b>

Después de esta depuración, tenemos 10 combinaciones física y matemáticamente posibles para generar los macro-escenarios de lluvia que alimentarán el modelo matemático de simulación.



## 5.6 Criterios para determinar los niveles actualizados

Cuando sucede una inundación se presenta una sobre-elevación de los niveles normales de las aguas en los cauces de los ríos, que originan desbordamientos y que las planicies de inundación sean inundadas.

Se entiende por umbral el valor de la magnitud física peligrosa a partir de la cual se justifica la aplicación de una determinada medida de protección. Los umbrales se convierten en "niveles de alerta" cuando se hace una aplicación para inundaciones.

Para fines de alerta temprana ante las inundaciones es posible definir dos tipos de umbrales:

- a) Umbral de lluvia.- indica a partir de qué cantidad de precipitación acumulada es probable que el río se desborde provocando una inundación
- b) Umbral del nivel del río.- indica el nivel del río a partir del cual es probable que se presente una inundación.

Para fines de este trabajo se establecieron **3 niveles de protección**, los cuales se definen a continuación

### 1) NIVEL MÍNIMO REGISTRADO

Nivel de agua mínimo de operación en el cuerpo de agua reportado en el boletín hidrometeorológico publicado por el Organismo de Cuenca Frontera Sur

### 2) NIVEL MÁXIMO REGISTRADO

Nivel de agua máximas ordinarias en el cuerpo de agua reportado en el boletín hidrometeorológico publicado por el Organismo de Cuenca Frontera Sur

### 3) BARROTE DEL RÍO

Nivel de la superficie libre del agua determinado para un  $Tr = 100$  años.



Figura 5.48.- Esquema Tipo – ríos de Sierra (respuesta rápida sin obra) (FUENTE: CONAGUA, 2014)



Figura 5.49.- Esquema Tipo – Sección tipo en planicie con obras de protección (FUENTE: CONAGUA, 2014)

En la Figura 5.48 y Figura 5.49 se muestra esquemáticamente la distribución de los niveles de protección, los cuales varían según las características particulares de los sitios.

Este esquema tiene las siguientes definiciones:

*V.F.*

**NIVEL DE AVISO 1°.-** corresponde al nivel metro y medio antes de que comience el llenado de las zonas de regulación

**NIVEL DE AVISO A PROTECCIÓN CIVIL.-** al comenzar el llenado y tener las lagunas de regulación a un 80% de su capacidad

**NIVEL DE EMERGENCIA.-** corresponde al nivel de alerta y pronóstico meteorológico de lluvias fuertes e intensas

Para definir cada uno de estos niveles, la Subgerencia Técnica de la DL Tabasco-CONAGUA proporcionó al Instituto de Ingeniería los niveles que se muestran en la Tabla 5.3, los cuales representan el nivel en las estaciones de aforo.

**Tabla 5.3.- Niveles en estaciones de aforo (FUENTE: CONAGUA, 2014)**

Estación	NAME	NAMO	Dato Observado Aforador*
Samaria	18.50	14.90	14.90
Cárdenas	N.D	N.D	N.D
Oxolotán	47.37	39.53	39.00
Puyacatengo	31.35	29.62	26.97
Tapijulapa	28.15	24.63	24.50
San Joaquín	26.66	23.12	24.40
Teapa	39.56	37.71	36.00
González	10.20	8.77	8.23
Pueblo Nuevo	8.40	7.49	7.60
Gaviotas	7.85	N.D	5.30
Porvenir	6.67	N.D	N.D

\* Nivel reportado por el aforador el cual genera desbordamientos aguas debajo de la estación de aforo

N.D: No Disponible

República de Tabasco  


### 5.6.1 Macroescenarios de lluvia

Las condiciones de frontera aguas arriba para la simulación de esta etapa se definieron en la Tabla 5.2, a continuación se presentan los datos numéricos que alimentaron las diferentes simulaciones

No	Lluvia Acumulada (24 hrs)	% de saturación del suelo	Nivel de la SLA en las lagunas	Nivel SLA en los ríos
1	150 mm	90%	2.00	>1.0
2	150 mm	90%	2.00	1.0<
3	150mm	90%	0.20	>1.0
4	150 mm	90%	0.20	1.0<
8	150 mm	0.5%	0.20	1.0<
9	30 mm	90%	2.00	>1.0
10	30 mm	90%	2.00	1.0<
11	30 mm	90%	0.20	>1.0
12	30 mm	90%	0.20	1.0<
16	30 mm	0.5%	0.20	1.0<

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las estaciones para cada una de estas combinaciones, en el traslado de las avenidas y tiempo de concentración de la lluvia en los sub sistemas de lluvia.



### **5.6.1.1 Tiempo de antelación para emitir avisos**

Como ya se mencionó, un aspecto importante para fines de alerta, es el tiempo de antelación con que se puede disponer de información hidráulica del sistema una vez que se presenta una tormenta. Este tiempo está directamente relacionado con el tiempo de concentración de la lluvia y el tiempo de traslado de la avenida.

El tiempo de concentración, por definición, es el tiempo que el agua producto de una tormenta tarda en recorrer la distancia entre el punto más alejado de la cuenca y la salida de ésta.

Por su parte, el tiempo de traslado, será el tiempo en que una avenida recorre un cauce entre dos secciones determinadas. Para fines de este trabajo, éstas secciones corresponden a las estaciones hidrométricas ubicadas a la salida de las subcuencas (condición de frontera aguas arriba en el cauce correspondiente) y las estaciones hidrométricas aguas abajo.

En las secciones aguas abajo interesa conocer las condiciones críticas, es decir, los valores máximos de nivel y caudal que se presentan en un momento dado.

Por ello, se calcularon los tiempos de concentración en los sub sistemas de lluvia y el tiempo de traslado de la avenida desde la estación hidrométrica Pueblo Nuevo, ubicada en el río de La Sierra, hasta la estación hidrométrica Porvenir, en el río bajo Grijalva, debido a que la primera estación nos indica en que momento comienzan a trabajar las escotaduras y la segunda es un sitio importante de avisos para la ciudad de Villahermosa.

### **5.6.1.2 Cálculo del tiempo de concentración**

Una de las ecuaciones más comunes para el cálculo del tiempo de concentración es la propuesta por Kirpich (1964), que se escribe como

$$t_c = 0.000325 * \left( \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)$$

donde

L, longitud del cauce principal, en m

S, pendiente media del cauce, adimensional

El tiempo de concentración obtenido está en horas.

Las características de cada sub sistema de lluvia y el cálculo del tiempo de concentración para cada una se condensan en la Tabla 5.4

**Tabla 5.4.- Tiempos de concentración por sub-sistema de lluvia por el método de Kirpich**

ID	SUB SISTEMA DE LLUVIA	CAUCE PRINCIPAL	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L)	PENDIENTE MEDIA (S)	$L^{0.77}$	$S^{0.385}$	$t_c=0.000325 (L^{0.77}/S^{0.385})$	$t_c$ (horas)
1	Comuapa	Comuapa	1,348.00	0.0223	256.95745	0.23121839	0.361178759	0.36
2	Platanar	Platanar	54,674.00	0.0149	4447.247	0.19810754	7.295811713	7.30
3	Mezcalapa	Mezcalapa	168,202.00	0.0042	10565.498	0.12182749	28.18565015	28.19
4	Nacajuca	Nacajuca	55,230.00	0.0090	4482.0302	0.16307349	8.932536061	8.93
5	Samaria	Samaria	57,971.00	0.0310	4652.3493	0.26252717	5.759455389	5.76
6	González	Dren Victoria- río González	40,670.00	0.0150	3541.1238	0.19851583	5.797347576	5.80
7	Almandro	Oxolotán	134,100.00	0.0229	8874.015	0.23379136	12.33601974	12.34
8	Puyacatengo	Puyacatengo	25,250.00	0.0250	2453.2469	0.24166119	3.299268967	3.30
9	Teapa	Teapa	42,500.00	0.0420	3663.1903	0.29508761	4.034519885	4.03
10	Pichucalco	Pichucalco	85,300.00	0.0137	6263.6972	0.19192206	10.60691828	10.61
11	La Sierra	Tacotalpa	46,189.00	0.0112	3905.6623	0.17745905	7.152862739	7.15
12	Jalapa	Tacotalpa (Laguna Jalapa)	500.00	0.0070	119.73108	0.14803443	0.262861825	0.26
13	La Sierra Bajo	Teapa	34,700.00	0.0163	3133.6731	0.20497091	4.96872349	4.97
14	Parrilla	Pichucalco (Laguna Parrilla)	500.00	0.0137	119.73108	0.19192206	0.202752105	0.20
15	Viejo Mezcalapa	Viejo Mezcalapa	99,002.00	0.0530	7024.9923	0.32273511	7.074292403	7.07
16	Carrizal	Carrizal	44,000.00	0.1500	3762.3445	0.48172051	2.538322428	2.54
17	Laguna Zapotes	La Sierra (Lagunas Zapotes)	500.00	0.0070	119.73108	0.14803443	0.262861825	0.26
18	Laguna Don Julián	Don Julián	500.00	0.0070	119.73108	0.14803443	0.262861825	0.26
19	Bajo Grijalva	Bajo Grijalva	27,000.00	0.0070	2583.1528	0.14803443	5.67114451	5.67

Por su parte, los tiempos de traslado se obtuvieron a partir de los resultados del modelo de tránsito de avenidas identificando los tiempos en que se presentaban los máximos en las secciones de control aguas abajo una vez que se iniciaba el proceso de cálculo. En la Tabla 5.5 se muestran los horarios en que se inicia el proceso de cálculo y el tiempo en que se presentan las condiciones hidráulicas máximas.

**Tabla 5.5.- Tiempos de traslado de las avenidas**

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CONVENCIONAL	TIEMPO DE TRASLADO		
	horas	lluvia 16:00 a 19:00 hrs	lluvia 20:00 a 15:00 hrs
Porvenir	11	18:00:00 p.m.	13:00:00 p.m.
Pueblo Nuevo	9	04:00:00 a.m.	12:00:00 p.m.

La Tabla 5.6 muestra el resumen de la suma de tiempos de concentración más el tiempo de traslado de los picos de las avenidas, con lo que se obtiene finalmente el tiempo de antelación con que se puede realizar un aviso en el sistema fluvial.

**Tabla 5.6.- Resumen de tiempos aproximados de traslado de avenidas y cambio en los niveles de los cauces en el sistema La Sierra**

SUBCUENCA	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN, h	TIEMPO DE TRASLADO, h
Almandro	12.34	---
Puyacatengo	3.30	---
Teapa	4.03	---
Pichucalco	10.61	---
Porvenir	---	11
Pueblo Nuevo	---	9

## 5.7 Conclusiones y recomendaciones

Se actualizó el esquema unifilar del modelo matemático de los ríos de Tabasco (PHIT, 2012) con la topografía (secciones transversales en los sitios de las estaciones hidrométricas) proporcionada por la Dirección Local de Tabasco, la cual fue empleada para la delimitación de zonas federales, por lo que se considera información actualizada.

La calibración del modelo se realizó con datos de lluvia y de gastos del periodo de lluvias del año 2014. La validación de estos resultados se hizo con mediciones de nivel. Sin embargo no se contó con información de nivel en las zonas lagunares, por lo que se recomienda tomar en cuenta en un futuro la medición en las lagunas, ya que estas zonas son de suma importancia para el funcionamiento fluvial del sistema de ríos de Tabasco, en particular el sistema La Sierra.

Los niveles de alertamiento presentados, se determinaron en conjunto con el personal de la CONAGUA de oficinas centrales y de la Dirección Local de Tabasco, así como personal del Instituto de Ingeniería, apoyados en el Protocolo de alertamiento elaborado por la GASIR-CONAGUA.

Cabe mencionar que estos niveles pueden verse modificados en un futuro por la construcción de infraestructura, cambios en la sección transversal y/o algún evento extraordinario que supere el periodo de retorno para lo cual fue construido la protección marginal. Por lo que se recomienda actualizar dichos niveles en cuanto exista algún cambio y/o se presente un evento extraordinario mayor a un periodo de retorno de 100 años.

Dentro del estudio se hicieron las siguientes consideraciones:

- *Operación de infraestructura de compuertas:* en este caso para la estructura de control El Macayo sobre el río Carrizal se consideró el escenario de que ambas márgenes (derecha e izquierda) tuvieran las compuertas abiertas al 100%,



- dejando pasar un gasto de 850 m<sup>3</sup>/s, ya que este es el gasto de diseño para un Tr=100 años.
- *Verificación de que las compuertas de charnelas no tienen algún obstáculo puesto por la población:* el esquema unifilar solo integra el sistema fluvial de Tabasco, sin embargo se hizo la consideración de que los sistemas de charnelas no cuentan con obstáculos y trabajan al 100% de su capacidad, desalojando los escurrimientos generados por la precipitación en el sub sistema de lluvia.
  - *Operación de los cárcamos de bombeo en las zonas urbanas para drenaje pluvial, tanto por lluvia como por niveles de descarga:* el esquema unifilar solo integra el sistema fluvial de Tabasco, sin embargo se hizo la consideración de que los sistemas pluviales no cuentan con obstáculos y trabajan al 100% de su capacidad, desalojando los escurrimientos generados por la precipitación en el sub sistema de lluvia.
  - *Migración del ganado en las zonas de agostadero del estado de Tabasco y de Chiapas:* en este caso, serán las instituciones correspondientes quienes decidan y den aviso a la población para migrar su ganado a zonas altas, este escenario no puede integrarse a un modelo matemático de flujo en cauces.
  - *Niveles en los cuales las obras de tomas directas de cauces del estado de Tabasco empiezan a presentar dificultades para bombear agua potable:* se consideró los niveles mínimos que se han presentado en los cauces, reportados por la CONAGUA los cuales se sabe que generan problemas de abastecimiento de agua potable, tal es el caso de las tomas de agua sobre el río Carrizal.

Cabe mencionar que los cálculos realizados, consideran eventos extraordinarios de lluvia y escurrimientos, los cuales puedan generar una situación de alerta por inundación, las condiciones de secas, no se estudiaron a fondo debido a que esto no está considerado dentro del protocolo de alertamiento para inundaciones, siendo este último término el objetivo principal del estudio.

Los resultados (mostrados en las tablas 5.6 y 5.8) de los tiempos de tránsito de la avenida y de concentración de lluvia deben tomarse con reservas ya que se derivan de un modelo matemático que trae consigo incertidumbre; por lo que la presente información debe considerarse como guía para la planeación y prevención.

## 5.8 Bibliografía

CAPELLA, V. A.;(2008) **Modelación de los escurrimientos y niveles provocados por el evento de 2007 y de los correspondientes a las soluciones propuestas en los ríos y lagunas alrededor de Villahermosa.** Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

CENAPRED; (1974), **Riesgos Hidrometeorológicos-Región Hidrológica No. 30** SARH.

CEPREDENAC. (1999). SATs. En J. C. León, **Sistemas de Alerta Temprana para emergencias de inundaciones en centroamérica** (pág. 9). Panamá: CEPREDENAC.

CHANG, H. H. (1988) **Fluvial Processes in River Engineering.** John Wiley & Sons.

CHOW, V. T. (1985). **Hidráulica de canales abiertos.** Edita. Diana. México.

CONAGUA. (2011). Plan de emergencia de inundación. **Manual para el control de inundaciones** (pág. 180). México: SEMARNAT.

DIARIO OFICIAL. (2010). **Acuerdo por el que se emiten las reglas generales del Fondo de Desastres Naturales.** México: SHCP.

DIARIO OFICIAL. (2010). **Acuerdo por el que se establecen las reglas de operación del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales.** México: Poder Ejecutivo.

EMA. (2004). Emergency risk management applications guide - Manual 5. En E. M. Australia, **Australian Emergency Manuals Series** (pág. 56). Australia: Emergency Management Australia.

ESCAJADILLO, C. J; (2010) **Proyecto de hidráulica fluvial, protección de infraestructura vial por emergencia - Aplicación a un caso práctico.** Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de Norteamérica, Distrito de Nueva York.

FUENTES, M. O, DE LUNA, C. F; (2009) **Revisión hidráulica integral, mediante simulación matemática, de las obras principales propuestas en el PHIT** Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

FUENTES, ÓSCAR Y SALAS, MARCO (1996), **Escurrimientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento**. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)

GÓMEZ, M; (2007) **Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0**. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.

GTZ. (2002) **Gestión de riesgo, concepto de trabajo**. Eschborn, Alemania.

GTZ. (2004) **Manual El análisis de riesgo – una base para la gestión de riesgo de desastres naturales**. Eschborn, Alemania.

IMTA. (2008). **Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco. Diagnóstico preliminar**. México: Senado de la República. Comisión de Asuntos Hidráulicos.

LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; (2009) **Environmental hydraulics : theoretical, experimental and computational solutions**. International Workshop on Environmental Hydraulics. Valencia, España.

MANSILLA, E. (1996). **Prevención y atención de desastres en México**. México: IIE-UNAM.

MARENGO, M. H. (2012). Desastres naturales por inundaciones en el sureste mexicano. **V Congreso Nacional de la Academia de Ingeniería** (pág. 6). México: UNAM.

OMM / UNESCO. (1974). **Glosario hidrológico internacional**. Suiza.

100



ROSSMAN, A. L; (2010) ***User's manual-Storm Water Management Model Version. 5.0***  
Water Supply and Water Resources Division. US EPA.

SEGOB, CEPAL, CENAPRED; (2008) ***Tabasco: Características e impacto socioeconómico de las inundaciones provocadas a finales de octubre y a comienzos de noviembre de 2007 por el frente frío número 4.*** México.

SINGH, V.P; (1995) ***Computer models of watershed hydrology.*** Water Resources, Highlands Ranch, Colorado.

UCL, U. C. (1988). ***EM-DAT.*** Recuperado el 14 de Febrero de 2012, de The International Disaster Database: <http://www.emdat.be/>