



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS



Proyecto

***REDUCIENDO LOS RIESGOS CLIMATICOS EN LAS CUENCAS COSTERAS
VULNERABLES DE CHIAPAS: ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA SOCIOECONÓMICA
DE BASE COMUNITARIA***

**CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA,
VARIABILIDAD CLIMÁTICA
Y EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS**

Dr. José Luis Arellano Monterrosas
Dra. Laura Elena Ruiz Meza

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, junio de 2016

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS TILTEPEC, ZANATENCO Y RIÍTO

1.1 Localización geográfica

1.2 Las condiciones fisiográficas

1.3 Los suelos de las cuencas de estudio

1.4 Las condiciones hidrológicas

1.5 Caracterización hidrográfica

1.5.1 La cuenca del río Tiltepec

1.5.2 La cuenca del río Zanatenco

1.5.3 La cuenca del río Riíto

1.6 La red climatológica e hidrométrica en las cuencas de estudio

1.6.1 Estaciones climatológicas en las cuencas de estudio

1.6.2 Estaciones hidrométricas en las cuencas de estudio

1.7 Climatología de las cuencas de estudio

1.7.1 Tipos de clima

1.7.2 Balance hídrico

1.8 Conclusiones

2. LA VARIABILIDAD CLIMATICA

2.1 Precipitación anual

2.2 Temperatura

2.2.1 Temperatura promedio anual

2.2.2 Temperatura máxima promedio anual

2.2.3 Temperatura mínima promedio anual

2.2.4 Oscilación térmica

2.3 Evaporación

2.4 Balance de humedad

2.5 Coeficiente de escurrimiento

2.6 Conclusiones

3. EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS: INUNDACIONES Y SEQUÍAS

3.1 Eventos extremos: Inundaciones

3.1.1 Precipitación máxima en 24 horas

3.1.2 Gastos máximos de escurrimiento en los ríos Zanatenco y Tiltepec

3.1.2.1 Gastos máximos de escurrimiento en el río Zanatenco

3.1.2.2 Gastos máximos de escurrimiento en el río Tiltepec

3.1.3 Inundaciones

3.1.3.1 Vulnerabilidad a inundaciones

3.1.3.2 Los riesgos climáticos

3.1.3.3 Medidas de atención ante los riesgos climáticos

3.2 Eventos extremos: Sequías

3.2.1 Temperaturas diarias extremas máximas

3.2.2 Evaporación máxima diaria

3.2.3 Sequías

3.2.3.1. Respuesta gubernamental ante la emergencia de sequía

3.3 Conclusiones

INTRODUCCIÓN

El Proyecto de investigación —“Reduciendo los riesgos climáticos en las cuencas costeras vulnerables de Chiapas: adaptación y resiliencia socioecológica de base comunitaria”, tiene como objetivo analizar el papel de los servicios ecosistémicos más relevantes para garantizar el bienestar humano en la capacidad de adaptación y resiliencia socioambiental frente a los efectos de la variabilidad climática en las cuencas de los ríos Zanatenco, Tiltepec y Rífto a fin de generar propuestas y recomendaciones para incidir en políticas y estrategias que articulen la gestión integrada de cuencas con las gestión de riesgos, ambas estrechamente relacionadas.

En este marco, en una primera etapa de proyecto se realizaron dos estudios necesarios para el análisis de la problemática en la zona de estudio: el estudio sobre caracterización climatológica, variabilidad climática y eventos hidrometeorológicos extremos; y el estudio de los servicios ecosistémicos hidrológicos. Para ambos, se consideró como zona de estudio la integrada por las cuencas de los ríos Zanatenco, Tiltepec y Rífto, ubicadas en la Región Istmo-Costa de Chiapas, en la denominada Región Hidrológica 23 Costa de Chiapas, región particularmente vulnerable al impacto de eventos hidrometeorológicos extremos como inundaciones, sequías e incendios.

El presente estudio climatológico se integra por tres capítulos: caracterización fisiográfica e hidrográfica, la variabilidad climática y los eventos hidrometeorológicos extremos: inundaciones y sequías. Se hace un análisis de las condiciones climáticas que caracteriza las cuencas de la subregión, así como el estudio estadístico de tendencias de la variabilidad climática de la precipitación anual; la temperatura promedio anual, mínima, máxima y oscilación térmica; la evaporación anual y, el balance de humedad, para el periodo con información climatológica disponible de 1961-2013.

Asimismo, se realiza el análisis probabilístico y el estudio estadístico de tendencias de la precipitación máxima en 24 horas, el escurrimiento máximo en los ríos Zanatenco y Tiltepec y el coeficiente de escurrimiento (relación lluvia-escurrimiento). De igual forma se tomó en cuenta la temperatura máxima diaria y, la evaporación máxima diaria; todos eventos hidrometeorológicos extremos que definen la magnitud de los riesgos de inundaciones y sequías en las cuencas de estudio. Las tendencias de la variabilidad climática, se relacionan con la prospectiva de los modelos y de los escenarios de cambio climático para la región.

1. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS TILTEPEC, ZANATENCO Y RIÍTO

1.1 Localización geográfica

El área de influencia del presente proyecto comprende las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, ubicadas en el extremo noroeste de la Región Hidrológica 023 Costa de Chiapas (SRH, 1969). Desde su parteaguas en la Sierra Madre de Chiapas hasta su desembocadura en el Mar Muerto y el Océano Pacífico, las tres cuencas tienen una superficie total de 650.620 km². La cuenca del río Tiltepec tiene una superficie de 243.2255 km², la del río Zanatenco de 231.0552 km², y la del Riíto de 176.339 km² (Fig. 1).

Figura 1. Ubicación de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto en la Región Hidrológica 023 Costa de Chiapas



Fuente: Elaboración propia.

Geográficamente, la cuenca del río Tiltepec se ubica entre las coordenadas 16°04'26'' y 16°14'42'' de latitud Norte y, 93°52'35'' y 93°41'08'' de longitud Oeste. La cuenca del río Zanatenco, se ubica entre las coordenadas 15°59'19'' y 16°09'34'' de latitud Norte y, 93°46'52'' y 93°35'24'' de longitud Oeste. Finalmente, la cuenca del río Riíto, se ubica entre las coordenadas 15°59'19'' y 16°04'26'' de latitud Norte y, 93°52'35'' y 93°41'08'' de longitud Oeste.

Las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, limitan al noreste con su parteaguas en la Sierra Madre de Chiapas y al sur con el Mar Muerto. La cuenca del río Tiltepec limita al sureste con la cuenca del río Zanatenco y ésta con la cuenca del río Amates. Al noroeste, la cuenca del río Tiltepec limita con la cuenca del río Lagartero. La cuenca del río Riíto inicia en los lomeríos de la Sierra Madre y se ubica entre las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco (Figura 1).

Las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto se localizan en la región administrativa Istmo-Costa. Según CONAGUA *et al.* (2012), la cuenca del río Tiltepec, forma parte de los Municipios de Tonalá (60%), Arriaga (35%) y Villaflores (5%). La cuenca del río Zanatenco, forma parte de los Municipios de Tonalá (95%) y Villaflores (5%). Por su parte, la cuenca del río Riíto se ubica totalmente en el municipio de Tonalá.

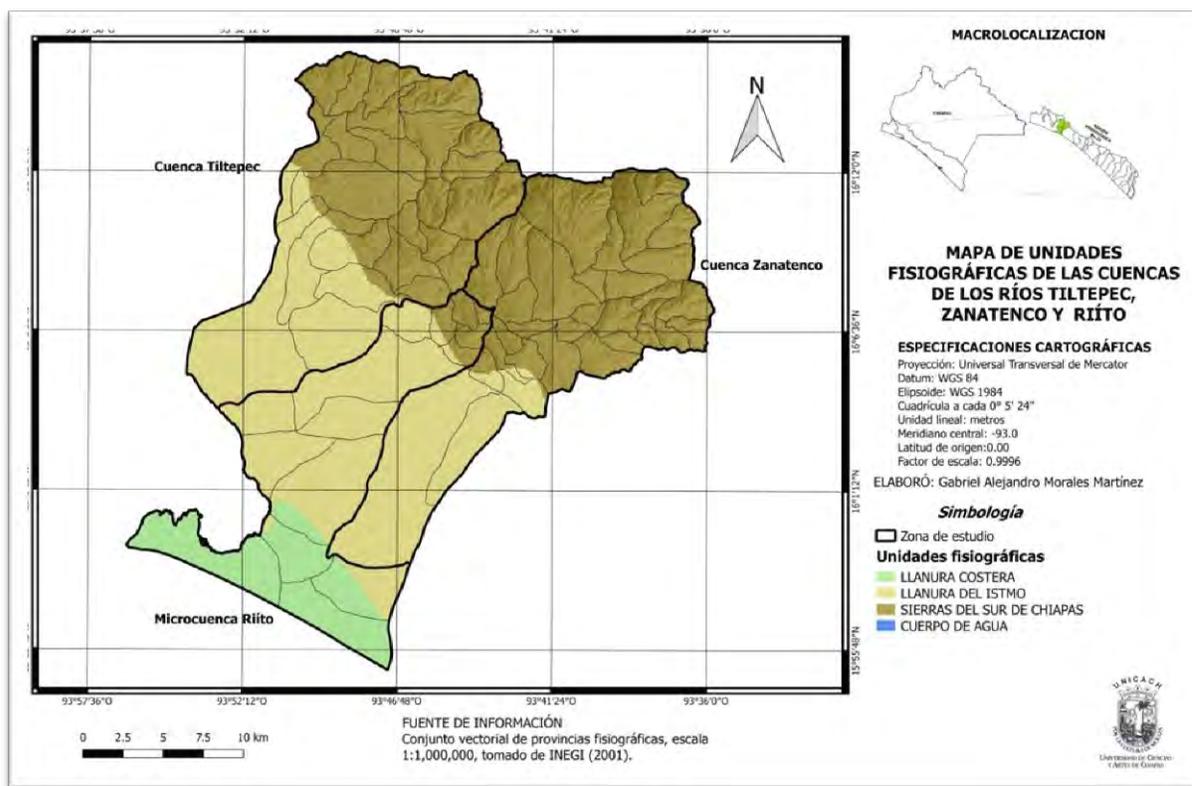
1.2 Las condiciones fisiográficas

Las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, forman parte de dos regiones fisiográficas: la Sierra del Sur o Sierra Madre de Chiapas en su parte media y alta y la Llanura Costera del Pacífico (Llanura costera del Istmo y Llanura costera de Chiapas y Guatemala) en su parte baja.

Según se muestra en el Cuadro 1, en las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco domina la unidad fisiográfica de las Sierras del Sur de Chiapas con el 62.32% y el 68.28% de su territorio respectivamente, mientras que en la cuenca del río Riíto, la unidad de las Llanuras costeras del Istmo representa un 59.08% y las Llanuras costeras de Chiapas y Guatemala el 34.29%.

La Provincia de la Sierra del Sur o Sierra Madre de Chiapas consiste de una franja de terrenos elevados, paralela a la Costa de Chiapas que atraviesa el estado de Chiapas y prosigue en terrenos de Oaxaca y Guatemala, con una longitud aproximada de 250 km y un ancho de 50 km en el noroeste y 65 km en el sureste, para alcanzar una extensión promedio de 14,000 km². La mayor elevación de esta Provincia y del estado de Chiapas se localiza en el Volcán Tacana (4,060 msnm), en promedio la Provincia en su extremo sureste es de 3,000 msnm, y desciende hasta los límites con Oaxaca a 1,500 msnm.

Figura 2. Unidades fisiográficas de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia.

A la Provincia de la Sierras del Sur de Chiapas o Sierra Madre de Chiapas se le conoce también como Macizo Granítico y Cristalino de Chiapas (Figura 2). Esta región fisiográfica, por su altura, constituye el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas dos: la Vertientes del Pacífico y la Vertiente Interior del Golfo. En la región Istmo Costa, destaca el cerro Tres Picos (Figura 3).

Cuadro 1. Las unidades fisiográficas de las cuencas de estudio.

Unidad fisiográfica	Superficie (hectáreas)			Totales	
	Tiltepec	Zanatenco	Riíto	Hectáreas	%
Sierras del Sur de Chiapas	15,158.410	15,775.484	1,119.177	32,053.071	49.27
Llanura costera de Chiapas y Guatemala	0.000	16.843	6,046.895	6,063.738	9.32
Llanura costera del Istmo	9,138.633	7,313.190	10,417.316	26,869.139	41.30
Cuerpos de agua	25.509	0.000	50.544	76.053	0.11
Totales	24,322.552	23,105.517	17,633.932	65,062.001	100.00

Fuente: Elaboración propia en base a información de INEGI

El declive hacia el Océano Pacífico es muy pronunciado, razón por la cual los ríos de esta vertiente son de régimen torrencial y cursos cortos, diferente al comportamiento hidráulico fluvial de los ríos y arroyos de la Vertiente del Golfo (Müllerried, citado por CONANP, 1999).

Figura 3. Cerro de Tres Picos, parteaguas de la cuenca del río Zanatenco



La Planicie Costera del Pacífico comprende una franja de 12 a 13 kilómetros de ancho entre el litoral y la cordillera de la Sierra Madre de Chiapas, la parte más angosta se localiza entre los municipios de Tonalá y Pijijiapan y la más ancha en el municipio de Acapetahua (Figura 2). El relieve de la planicie costera, presenta algunos montículos en forma de colinas compuestas por rocas entre los que sobresale el Cerro de Bernal (Figura 4).

La Planicie Costera se ha conformado superficialmente por los aportes constantes de material detrítico proveniente de la erosión de la Sierra Madre de Chiapas (Müllerried, citado por CONANP, 1999).

Por otra parte, las playas de la Costa de Chiapas no tienen formación coralífera y son modificadas constantemente por el golpe de las olas. Abundan los esteros ramificados y alargados, con fondos arenosos y lodosos con desembocaduras al mar (boca-barras). Las lagunas más grandes de esta zona de la Costa de Chiapas son: Mar Muerto, La Joya y Tembladeras (Figura 5). Sobresalen las albuferas y esteros de Paredón, Las Lagunas, Buenavista, La Polka, Cabeza de Toro, Capulín, Piñuelas y Ponte Duro (Contreras *et al.*, 1994; CONAGUA, *et al.*, 2009).

Figura 4. Panorámica de Cerro Bernal en la Costa de Chiapas.

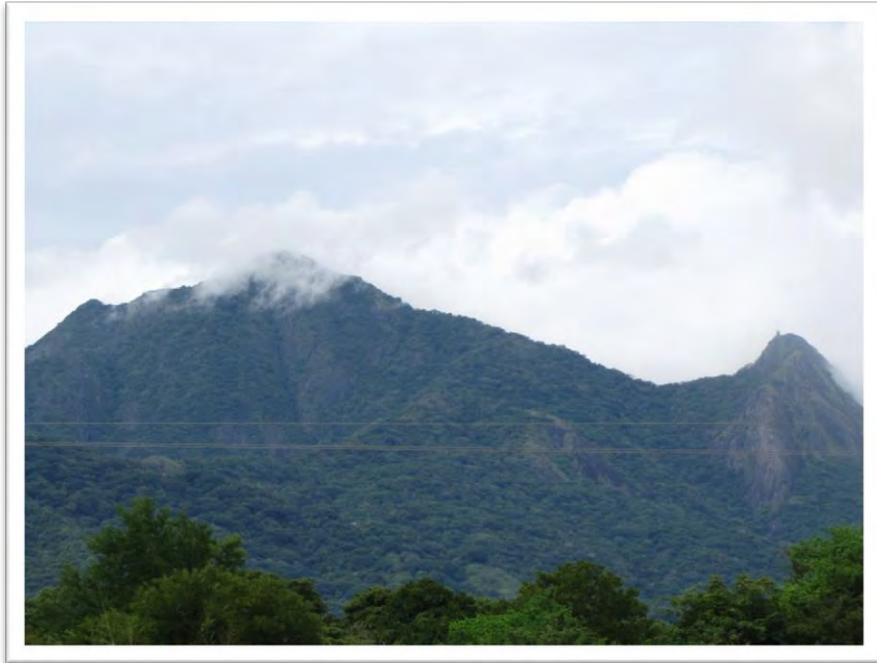


Figura 5. Panorámica del Sistema Lagunar de La Joya, Chiapas.



1.3 Los suelos de las cuencas de estudio

Los suelos de las Provincias Fisiográficas de las cuencas de estudio, están formados predominantemente por aluviones claros arenosos, arenas volcánicas oscuras, gravas de diferentes tamaños de granito, diorita, granodiorita y rocas plutónicas (Figura 6).

Cuadro 2. Las unidades geológicas de las cuencas de estudio.

Unidad geológica	Superficie (hectáreas)			Totales	
	Tiltepec	Zanatenco	Riíto	Hectáreas	%
Aluvial	8,440.206	6,171.876	9,506.881	24,118.963	37.07
Gneis	477.889	163.285	543.402	1,184.576	1.82
Granodiorita	822.915	3,321.717	1,141.388	5,286.020	8.12
Granito	14,419.597	13,386.127	0.000	27,805.724	42.74
Litoral	0.000	0.000	2,946.515	2,946.515	4.53
Cuerpo de agua	9.189	0.138	1,113.691	1,113.691	1.73
Lacustre	152.757	62.374	2,382.053	2,597.184	3.99
Totales	24,322.554	23,105.517	17,633.930	65,062.003	100.00

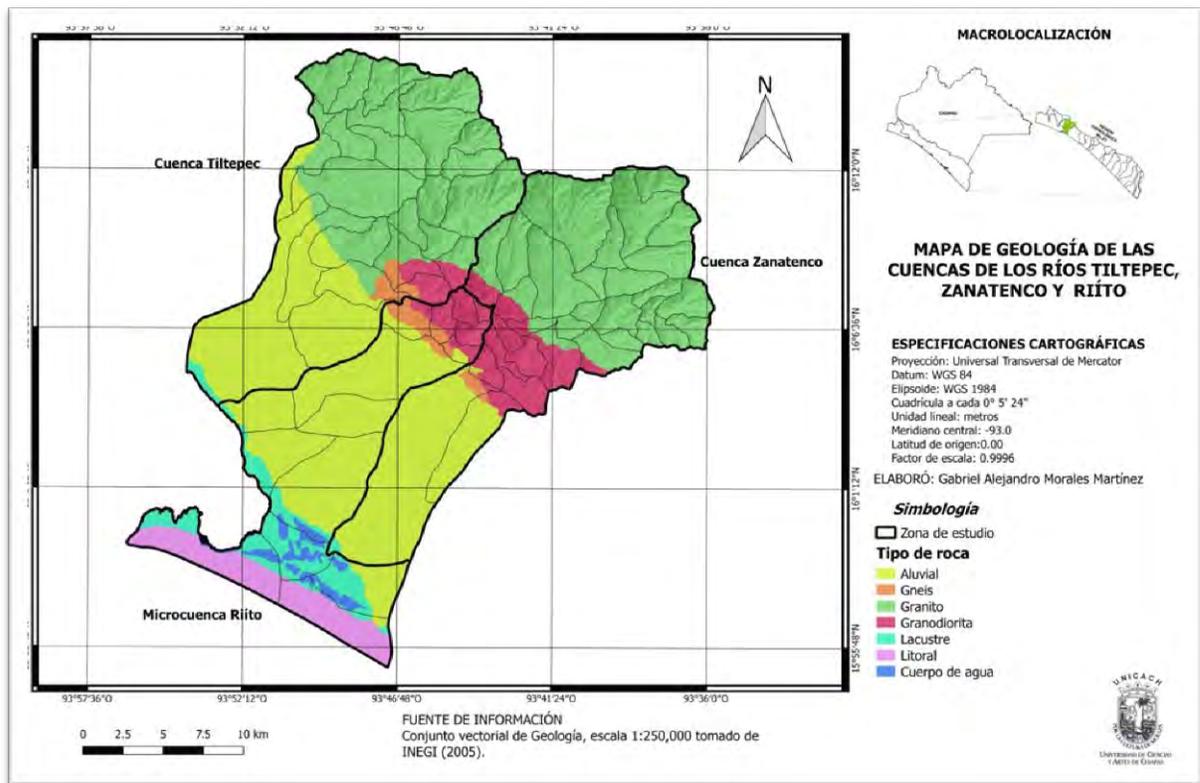
Fuente: Elaboración propia en base a información de INEGI.

Según se muestra en el Cuadro 2, en las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco domina la unidad geológica de rocas volcánicas (granítica) con el 59.28% y el 57.93% de su territorio respectivamente, mientras que en la cuenca del río Riíto, la unidad geológica dominante es el aluvial con un 53.91%. El área de estudio de las tres cuencas es un 42.74% granítico y un 37.07% aluvial (Figura 6).

Los suelos de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto están formados predominantemente por aluviones claros arenosos, arenas volcánicas oscuras, gravas de diferentes tamaños, granitos, diorita y rocas plutónicas (Müllerried e INEGI, citados por CONANP, 1999).

En la parte de la Planicie Costera de Chiapas, los suelos de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto son de origen aluvial, producto de la constante depositación de sedimentos de los ríos siendo los de mayor extensión e importancia los Solonchak y Regosol y en menor proporción los Cambisoles, fluvisoles, Gleysoles y Feozem; caracterizados por su textura arcillosa, arcillo-arenosa, arenosa y depósitos arenosos con guijarros.

Figura 6. Geología de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, Chiapas.

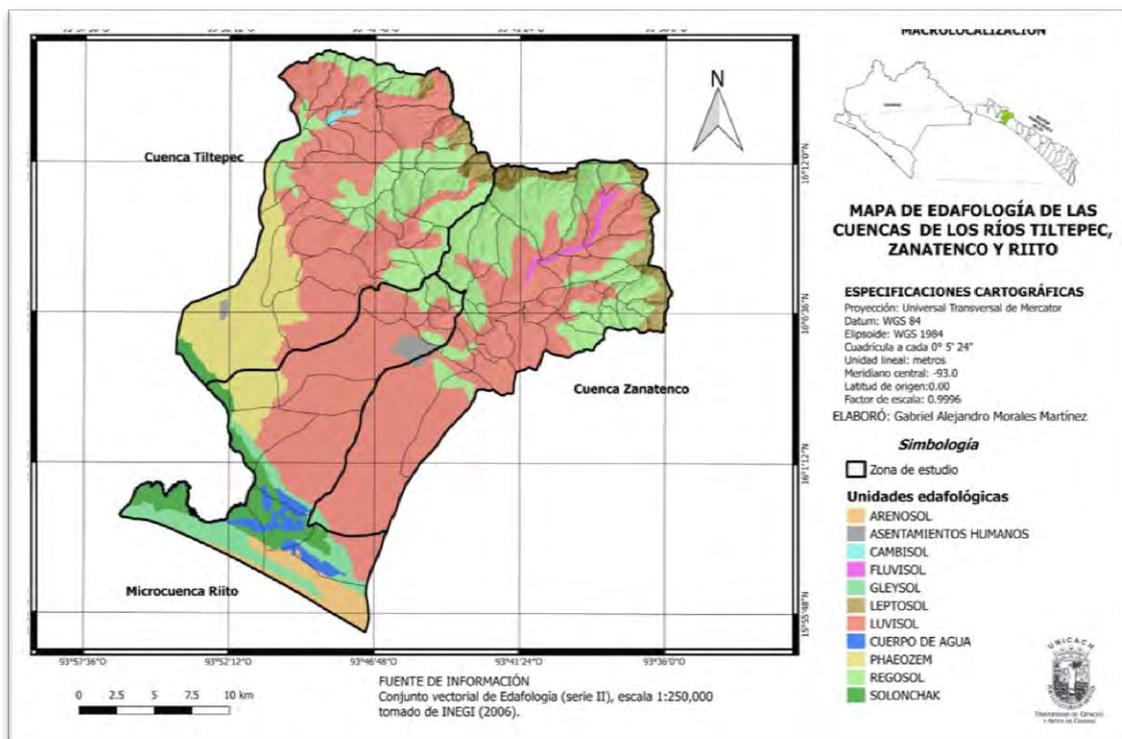


Fuente: Elaboración propia.

Los suelos de la parte alta de la Sierra Madre son derivados de rocas ígneas extrusivas, presentan una profundidad mayor de 60 cm., de color café oscuro, café y rojo amarillento. La permeabilidad de los suelos es de moderada a moderadamente lenta, el drenaje interno es bueno, el drenaje superficial muy rápido. En la planicie costera, son suelos derivados de materiales recientes, profundidades mayores de 200 cm y colores de café a grisáceo, presentan fluctuaciones del nivel freático; se localizan sitios con suelos moteados que indican inundaciones en algún periodo del año (Trujillo, 1998).

De esta forma, según se muestra en el Cuadro 3, en las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, dominan los suelos Luvisol en un 49.94%, 58.71% y 47.99% de su territorio. En las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco se presentan suelos Cambisol, Leptosol y Regosol que no se presentan o en menor proporción en la cuenca del río Riíto (Figura 7).

Figura 7. Suelos de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia.

En la cuenca del río Riíto, se presentan suelos característicos de áreas inundables como los Gleysol y los Arenosol en los abanicos aluviales que prácticamente no se presentan en las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco (Cuadro 3).

Cuadro 3. Las unidades de suelo de las cuencas de estudio

Unidad edafológica	Superficie (hectáreas)			Totales	
	Tiltepec	Zanatenco	Riíto	Hectáreas	%
Arenosol	0.000	0.000	1,549.228	1,549.228	2.38
Solonchak	262.788	2.849	2,054.139	2,319.776	3.57
Regosol	5,782.053	7,365.978	609.312	13,757.343	21.14
Leptosol	884.855	1,624.857	0.000	2,509.712	3.86
Luvisol	12,146.489	13,564.583	8,463.401	34,174.473	52.53
Cambisol	120.808	0.000	0.000	120.808	0.19
Phaeozem	5,033.375	0.000	1,171.437	6,204.812	9.54
Gleysol	0.000	111.542	2,496.256	2,607.798	4.01
Fluvisol	0.000	373.146	0.000	373.146	0.57
Poblaciones	66.736	62.563	323.521	452.82	0.70
Cuerpos de agua	25.449	0.000	966.636	992.085	1.52
Totales	24,322.554	23,105.517	17,633.932	65,062.003	100.000

Fuente: Elaboración propia en base a información de INEGI.

1.4 Las condiciones hidrológicas

Los ríos que fluyen en la región hidrológica Costa de Chiapas, tienen su origen en la Vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas con fuertes pendientes y lechos pedregosos con cauce reducido y poca profundidad; en su parte media se amplía el cauce, la pedregosidad disminuye o las rocas son de menor diámetro medio y aumenta la profundidad del cauce. De ésta forma, los ríos son de régimen torrencial y curso de corto trayecto; es decir de rápida respuesta hidrológica. En la parte baja, ya en la Planicie Costera, la pedregosidad es nula, la pendiente es muy suave y los cauces en época de lluvias, transportan gran cantidad de sedimentos (SRH, 1969; CONANP, 1999; Baumann, 2000).

Figura 8. Panorámica del río Zanatenco durante la temporada de lluvia



La región Istmo-Costa de la Región Hidrológica Número 23 denominada Costa de Chiapas esta drenada por los siguientes ríos principales: Lagartero, Tiltepec, Zanatenco, Amates, Horcones, Pedregal, Totomostle, Las Hermanas, Jesús, Chacalapilla, Los Patos, Siete Cigarros, San Isidro, San Diego, Urbina y Pijijapan (SRH, 1969).

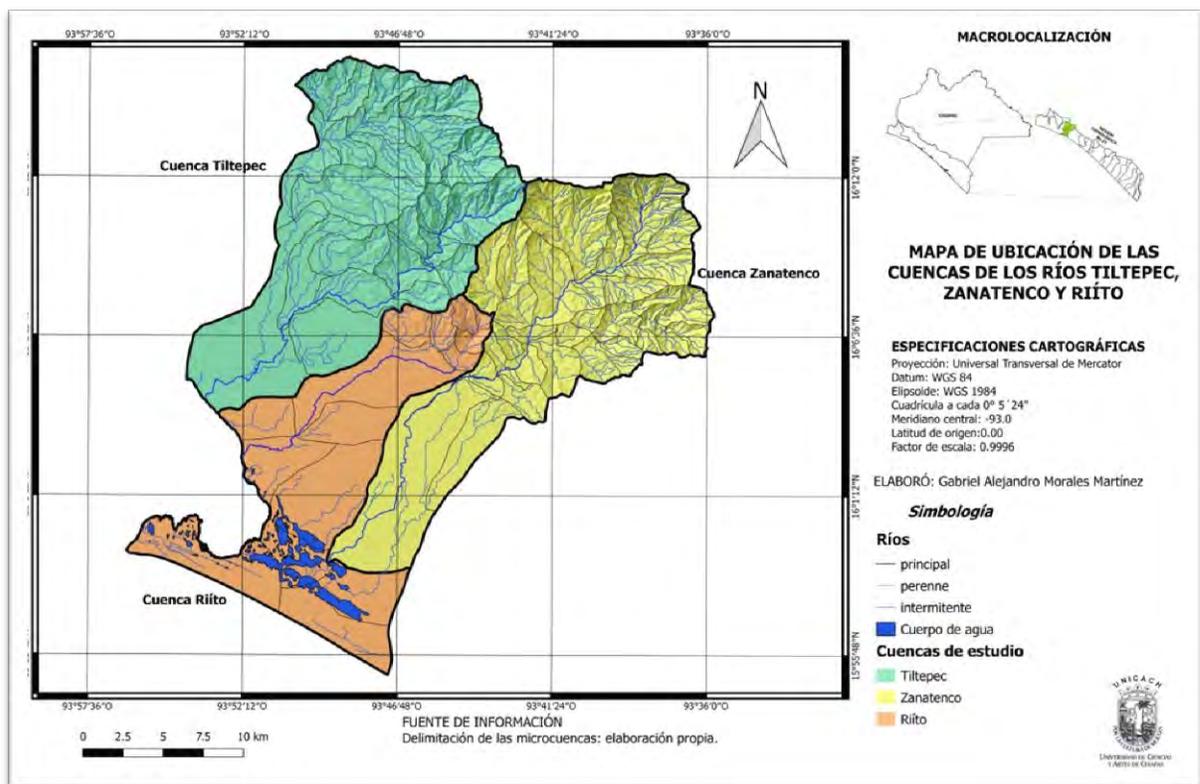
De acuerdo al estudio de disponibilidad media anual de aguas superficiales elaborado por SEMARNAT-CONAGUA (2007), las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, forman parte de la Subregión hidrológica Laguna del Mar Muerto (Figura 8).

A lo largo del año, el régimen hidrológico de los ríos de la Costa de Chiapas, es resultado del periodo de lluvias por lo que están bien definidos los periodos de lluvias y secas en el escurrimiento superficial de los ríos. Los gastos máximos de escurrimiento se presentan durante la temporada de lluvias (particularmente de septiembre a octubre), mientras que en la temporada de secas (de noviembre a mayo), algunos cauces de ríos como el Zanatenco incluso se secan (Baumann, 2000).

1.5 Caracterización hidrográfica

Las tres cuencas de estudio (Tiltepec, Zanatenco y Riíto), descargan sus aguas a la laguna del Mar Muerto (Figura 9). La laguna del Mar Muerto se ubica en el Istmo de Tehuantepec entre los estados de Oaxaca y Chiapas con una extensión aproximada de 60 km de este a oeste y 12 km de norte a sur. La zona oriental de la laguna del Mar Muerto está limitada por las puntas arenosas de la descarga de los ríos que conforman la barra de Tonalá: Punta, Lagartero, Guadalupe, Tiltepec y Zanatenco (Contreras *et al.*, 1994).

Figura 9. Las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia.

En el Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera de la Sepultura (REBISE), se considera la cuenca del río Zanatenco junto con el río San Isidro con un área conjunta de 222 Km² de los cuales 142,71 Km²; son parte de la REBISE. Por otra parte, a la cuenca del río Tiltepec, la consideran junto con el arroyo el Rosario y la denominan cuenca la Punta con una superficie de 226 Km² de las cuales 177.01 Km² son parte de la REBISE (CONANP, 1999).

En el Plan de Manejo de la cuenca del río Zanatenco (CONAGUA, *et al.*, 2009), considera a la cuenca del río Riíto como parte de la red de drenaje de la cuenca del río Zanatenco. Por su parte, en el Plan de Manejo de la cuenca del río Tiltepec (CONAGUA, *et al.*, 2012), incluye el arroyo La Candelaria como parte de la red de drenaje de la cuenca del río Tiltepec, cuando este último descarga directamente al Mar Muerto; asimismo, considera a los tributarios cercanos a la descarga del cauce principal del río Tiltepec como parte de su cuenca vertiente.

Para los propósitos de este trabajo y considerando que tanto el río Tiltepec como el Zanatenco provienen de la parte alta de la Sierra Madre, son cauces principales con mayor número de orden y que cuentan con datos de aforo, las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco se consideraron en el presente proyecto como —cuenca propias”; es decir, desde su parteaguas hasta su descarga con el objetivo de analizar su comportamiento hidrológico (relaciones precipitación-escurrencimiento), y el impacto de los cambios de uso del suelo en los servicios ecosistémicos que proveen éstas cuencas.

Por otra parte, considerando que la cuenca del río Riíto se origina en las estribaciones y lomeríos de la inter-fase de la Sierra Madre con la Planicie Costera entre las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco, que su cauce principal tiene un menor número de orden y atraviesa la Ciudad de Tonalá transportando sus aguas residuales hasta la población de Paredón, donde finalmente descarga al humedal y laguna del Mar Muerto junto con otros tributarios, para los propósitos de este estudio se consideró analizar la cuenca del Riíto por separado y no como parte de las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco.

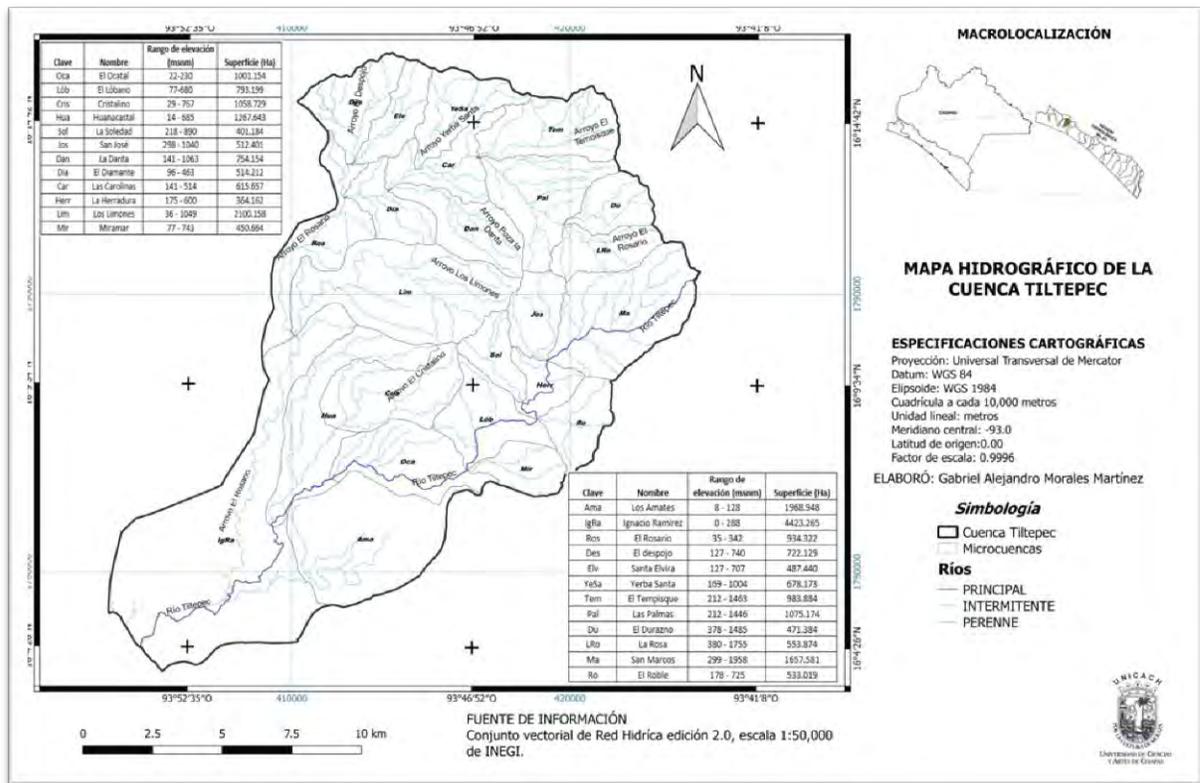
Por lo anterior, para los propósitos de este trabajo, se consideró pertinente hacer un nuevo trazo de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto mismo que se muestra a continuación y no utilizar la delimitación propuesta en los Planes de Manejo de las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco.

El nuevo trazo de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto y sus microcuencas se realizó mediante uso del sistema SIATL —Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas”. El sistema SIATL es un sistema de información cartográfica y estadístico georreferenciado de última generación elaborado por el INEGI. La información e interacción de los niveles de información que proporciona permite tener un instrumento unificado que reúne elementos de simulación con el objetivo de entender la dinámica de los ciclos de agua en sus sinergias con los procesos ambientales (Peniche y Guzmán, 2016).

1.5.1 La cuenca del río Tiltepec

El río Tiltepec, nace en las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas, se origina en la microcuenca San Marcos a una altitud de 1,958 msnm. En la vertiente norte del cerro Chumpipe nace el arroyo Rosario a 1,755 msnm, el arroyo Rosario junto con el arroyo Tempisque descargan sus aguas en el cauce formado por los arroyos Despacio y Hierbasanta, ambos provenientes del cerro Potrero Escondido. A 1,100 msnm, en la parte media de la cuenca, el arroyo el Rosario recibe las aportaciones de los afluentes de las microcuencas de los Limones y Poza la Danta. Por su parte el Arroyo Cristalino desemboca sus aguas en el cauce del río Tiltepec. En la microcuenca Ignacio Ramírez el arroyo Rosario descarga al río Tiltepec (Figura 10).

Figura 10. Red hidrológica y microcuencas de la cuenca del río Tiltepec, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia.

La cuenca del río Tiltepec tiene una superficie total de 243.2255 km². En el Cuadro 4 se muestran las microcuencas que configuran la cuenca del río Tiltepec con su área de influencia y su ubicación altitudinal. De esta forma, según el Cuadro 4, las cuencas de mayor área de influencia corresponden a las microcuencas de Ignacio Ramírez con 4,423 hectáreas ubicada en la parte baja de la cuenca (de 0 a 288 msnm), seguida por la microcuenca de los Limones ubicada desde la parte media-

alta a la parte baja de la cuenca (36 a 1,049 msnm) y los Amates con 1,969 hectáreas ubicada en la parte baja de la cuenca (8 a 128 msnm).

Cuadro 4. Las microcuencas de la cuenca del río Tiltepec, Chiapas

CLAVE	NOMBRE	RANGO DE ELEVACIÓN (MSNM)	SUPERFICIE (HA)
Oca	El Ocatal	22 - 230	1,001.154
Lób	El Lóbano	77 - 680	793.199
Cris	Cristalino	29 - 767	1,058.729
Hua	Huanacastal	14 - 685	1,267.643
Sol	La Soledad	218 - 890	401.184
Jos	San Jose	298 - 1,040	512.401
Dan	La Danta	141 - 1,063	754.154
Dia	El Diamante	96 - 463	514.212
Car	Las Carolinas	141 - 514	615.657
Herr	La Herradura	175 - 600	364.162
Lim	Los Limones	36 - 1,049	2,100.158
Mir	Miramar	77 - 743	450.664
Ama	Los Amates	8 - 128	1,968.948
IgRa	Ignacio Ramírez	0 - 288	4,423.265
Ros	El Rosario	35 - 342	934.322
Des	El despojo	127 - 740	722.129
Elv	Santa Elvira	127 - 707	487.440
YeSa	Yerba Santa	169 - 1,004	678.173
Tem	El Tempisque	212 - 1,463	983.884
Pal	Las Palmas	212 - 1,446	1,075.174
Du	El Durazno	378 - 1,485	471.384
LRo	La Rosa	380 - 1,755	553.874
Ma	San Marcos	299 - 1,958	1,657.581
Ro	El Roble	178 - 725	533.019

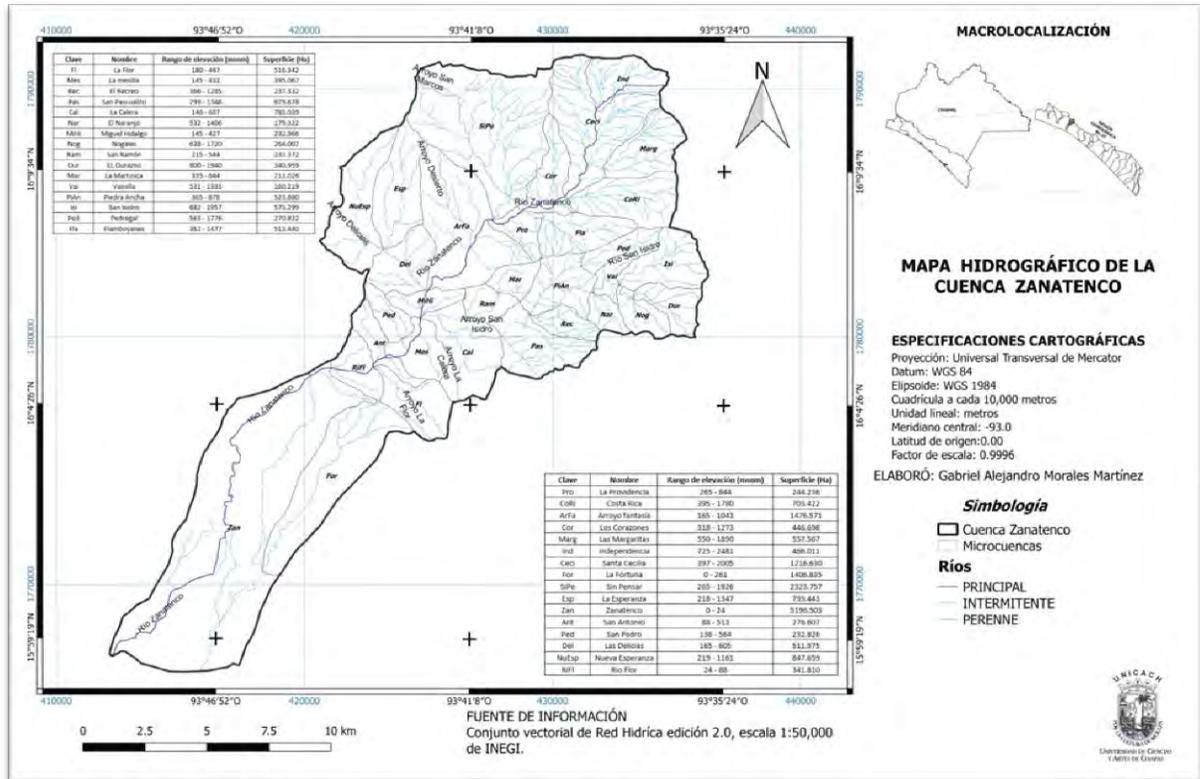
Fuente: Elaboración propia en base a la cartografía generada

1.5.2 La cuenca del río Zanatenco

La cuenca del río Zanatenco, tiene sus orígenes en el cerro Tres Picos, ubicado en la Sierra Madre de Chiapas a 2,481 msnm en la microcuenca Independencia, debido a lo accidentado del relieve, la parte alta de la cuenca tiene aportaciones significativas de afluentes intermitentes. En la porción noroeste de la cuenca, el arroyo San Marcos aporta sus aguas al cause principal del río Zanatenco a una altitud de 844 msnm en la microcuenca la Providencia, de igual manera el Arroyo Desierto descarga sus aguas al río Zanatenco. El arroyo las Delicias desemboca

sus aguas en la microcuenca Miguel Hidalgo debido a que el río Zanatenco atraviesa dicha microcuenca. Por el margen de la derecha de la cuenca, el río San Isidro tiene una aportación significativa, descarga sus aguas al cause principal del río por la parte media de la cuenca a una altitud de 432 msnm. Descargan también al cause principal los arroyos tributarios de la Calera y La Flor (Figura 11).

Figura 11. Red hidrológica y microcuencas de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia en base a la cartografía generada.

La cuenca del río Zanatenco tiene una superficie total de 231.0552 km². En el Cuadro 5 se muestran las 32 microcuencas que configuran la cuenca del río Zanatenco con su área de influencia y su ubicación altitudinal. De esta forma, las cuencas de mayor área de influencia corresponden a las microcuencas de Zanatenco con 5,196 hectáreas ubicada en la parte baja de la cuenca (de 0 a 5,196 msnm), seguida por la microcuenca de Sin Pensar ubicada en la parte media-alta de la cuenca (265 a 1,926 msnm), el arroyo la Fantasía con 1,476 hectáreas ubicada en la parte baja y media alta de la cuenca (165 a 1,043 msnm).

Trujillo (1998) considera para el río Zanatenco diez microcuencas entre las que destacan por su tamaño y volumen de aportación las de San Marcos, San isidro, Las delicias, La Meca y río La Flor.

Cuadro 5. Las microcuencas de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas

CLAVE	NOMBRE	RANGO DE ELEVACIÓN (MSNM)	SUPERFICIE (HA)
Fl	La Flor	180 - 467	516.342
Mes	La mesilla	145 - 432	395.067
Rec	El Recreo	366 – 1,285	237.332
Pas	San Pascualito	299 – 1,348	679.878
Cal	La Calera	146 - 637	781.039
Nar	El Naranja	532 – 1,406	179.322
MiHi	Miguel Hidalgo	145 - 427	232.966
Nog	Nogales	638 – 1,720	264.007
Ram	San Ramón	215 - 544	237.372
Dur	EL Durazno	800 – 1,940	340.959
Mar	La Martinica	335 - 844	211.026
Vai	Vainilla	531 – 1,333	160.219
PiAn	Piedra Ancha	365 - 878	523.880
Isi	San Isidro	682 – 1,957	573.299
Ped	Pedregal	563 – 1,776	270.822
Fla	Flamboyanes	362 – 1,477	513.440
Pro	La Providencia	265 - 844	244.236
CoRi	Costa Rica	395 – 1,780	703.422
ArFa	Arroyo Fantasía	165 – 1,043	1,476.571
Cor	Los Corazones	318 – 1,273	446.698
Marg	Las Margaritas	550 – 1,890	557.567
Ind	Independencia	725 – 2,481	466.011
Ceci	Santa Cecilia	397 – 2,005	1,216.630
For	La Fortuna	0 - 261	1,406.835
SiPe	Sin Pensar	265 – 1,926	2,323.757
Esp	La Esperanza	218 – 1,347	739.443
Zan	Zanatenco	0 - 24	5,196.503
Ant	San Antonio	88 - 513	276.607
Ped	San Pedro	136 - 564	232.826
Del	Las Delicias	165 - 605	511.975
NuEsp	Nueva Esperanza	219 – 1,161	847.659
RiFl	Rio Flor	24 - 88	341.810

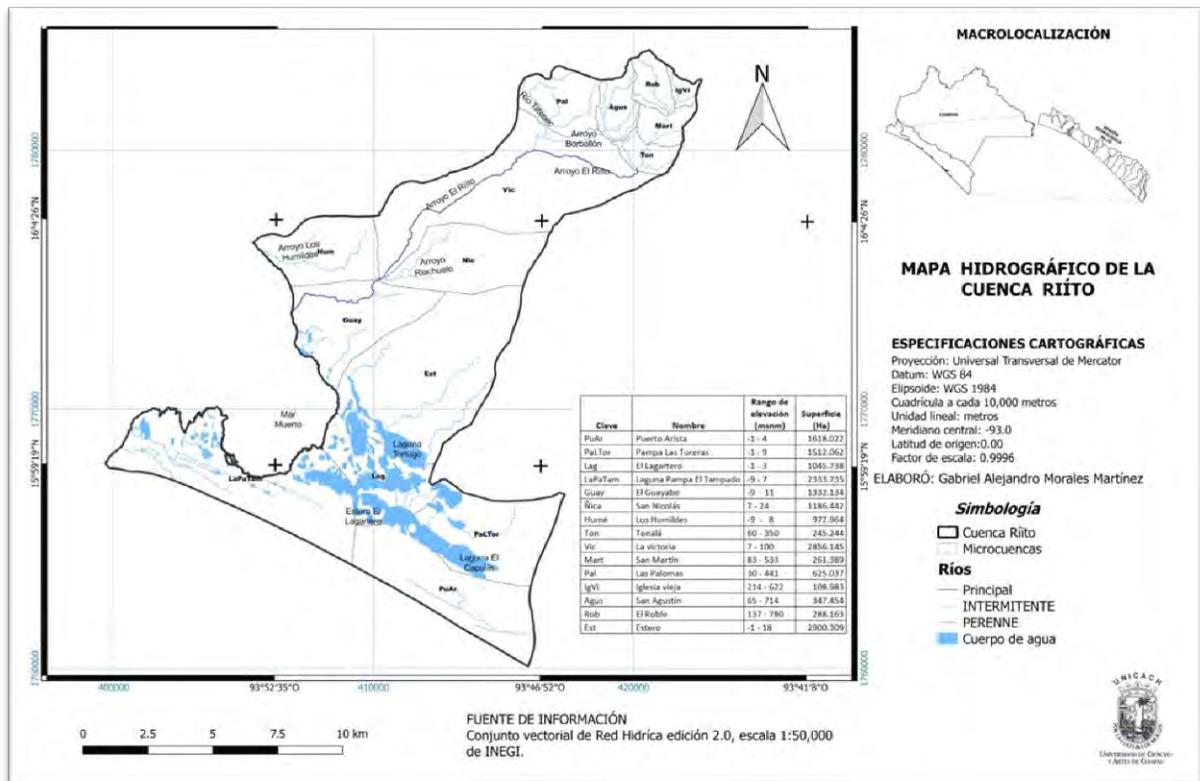
Fuente: Elaboración propia en base a la cartografía generada.

1.5.3 La cuenca del Riíto

El arroyo Riíto nace en los afluentes tributarios de la microcuenca Iglesia Vieja a una altitud de 622 msnm, de igual manera en los afluentes de la microcuenca El Roble, dichos afluentes descargan a una altitud de 350 msnm que corresponde a la microcuenca denominada Tonalá. El arroyo Borbollón ubicado en la zona noreste de la cuenca, descargan sus aguas en el cauce principal de la cuenca. La microcuenca Victoria es la que tiene mayor extensión del río denominado localmente Riíto a una altitud menor de 100 msnm.

En la cuenca del río Riíto se integran cuerpos de agua en su mayoría lagunas como la Laguna Tortugo, Laguna el Capulín y el Estero Lagartero. Las lagunas y cuerpos de agua, se ubican en las microcuencas de la parte baja a altitudes menores a los 18 msnm, donde todos los afluentes y cuerpos de agua desembocan sus aguas a través del estero y humedal del Mar Muerto al Océano Pacífico (Figura 12).

Figura 12. Red hidrológica y microcuencas de la cuenca del río Riíto, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia en base a la cartografía generada.

La cuenca del río Riíto tiene una superficie total de 176.339 km². En el Cuadro 6 se muestran las microcuencas que configuran la cuenca del río Riíto con su área de influencia y su ubicación altitudinal. De esta forma, las cuencas de mayor área

de influencia corresponden a las microcuencas denominadas Esteros, La Victoria y Laguna Pampa el Tampado con 2,900, 2,856 y 2,333 hectáreas respectivamente ubicadas todas en la parte baja de la cuenca (menores de 100 msnm).

Cuadro 6. Las microcuencas de la cuenca del río Rífto, Chiapas.

CLAVE	NOMBRE	RANGO DE ELEVACIÓN (MSNM)	SUPERFICIE (HA)
PuAr	Puerto Arista	-1 - 4	1,618.022
PaLTor	Pampa las Toreras	-1 - 9	1,512.062
Lag	El Lagartero	-1 - 3	1,045.738
LaPaTam	Laguna Pampa el Tampado	-9 - 7	2,333.735
Guay	El Guayabo	-9 - 11	1,332.134
Nica	San Nicolás	7 - 24	1,186.442
Hume	Los Humildes	-9 - 8	972.964
Ton	Tonalá	60 - 350	245.244
Vic	La Victoria	7 - 100	2,856.145
Mart	San Martín	83 - 533	261.389
Pal	Las Palomas	30 - 441	625.037
IgVi	Iglesia Vieja	214 - 622	108.983
Agus	San Agustín	65 - 714	347.454
Rob	El Roble	137 - 780	288.163
Est	Estero	-1 - 18	2,900.309

Fuente: Elaboración propia en base a la cartografía generada.



Cauce del río Tiltepec



Cauce del río Tiltepec en época de estiaje



Cauce del río Riño en estiaje

1.6 La red climatológica e hidrométrica en las cuencas de estudio

1.6.1 Estaciones climatológicas en las cuencas de estudio

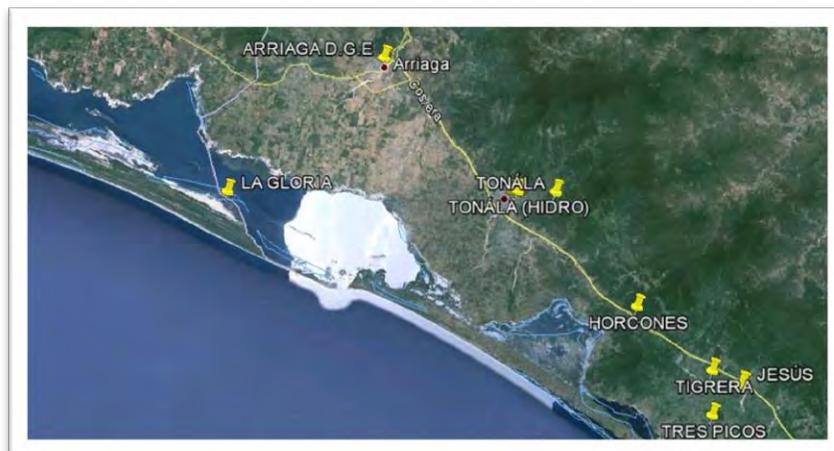
En la Vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas, la precipitación anual es mayor en la cuenca media alta que en la cuenca baja debido al efecto orográfico donde chocan los frentes de humedad (Arellano, 2010). Sin embargo, en las partes alta y media de las cuencas de estudio, no se dispone de estaciones climatológicas.

En el área de influencia de la cuenca de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, se cuenta con las estaciones climatológicas de Tonalá y Horcones. Para este estudio se tomaron los datos de la estación de Tonalá debido a que dispone de un mayor registro histórico de información climatológica que la de horcones, y para efectos de este estudio se considera como representativa del área de influencia de las cuencas de estudio. La estación climatológica Tonalá se localiza a 16°05' de latitud norte y 93°42' de longitud oeste a una elevación de 17 msnm, ubicada en el municipio de Tonalá, Chiapas.

1.6.2 Estaciones hidrométricas en las cuencas de estudio

Respecto a la información hidrométrica, se cuenta con datos de aforo de la estación ubicada en el río Zanatenco (estación 23011), la cual cuenta con una estación de aforo con la siguiente localización: Latitud 16° 04' 15" y longitud 93° 45' 00" con un área drenada a la estación hidrométrica de 157 Km² (SRH, 1969). Por su parte, el río Tiltepec cuenta con la estación de aforo número 23040 ubicada aproximadamente a 16° 04' 25" de latitud y 93° 52' 00" de longitud. La cuenca del río Riíto no cuenta con estación hidrométrica.

Figura 13. Estaciones climatológicas existentes en el área de influencia de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto Chiapas.



La estación hidrométrica de Zanatenco cuenta con registros de 1961-1966, 1968-1980, 1982-1986, 1989-1990 y 2003-2009, un registro total de 22 años. La estación hidrométrica de Tiltepec cuenta con registros de 1977-1979 y de 1981-1983, un total de 6 años de registro.

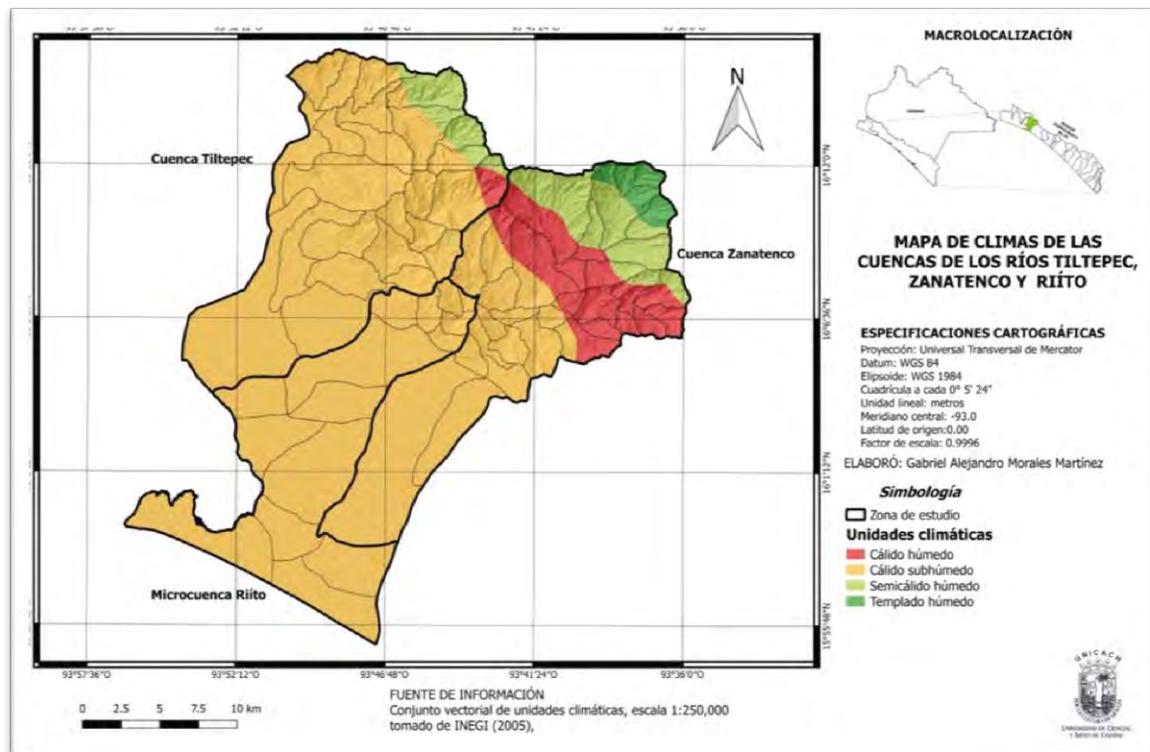
Las estaciones climatológicas e hidrométricas del área de influencia de las cuencas de estudio, se muestran en la Figura 13.

1.7 Climatología de las cuencas de estudio

1.7.1 Tipos de clima

Los tipos de clima que se reportan en las cuencas de los ríos Tiltepec y Zanatenco es semicálido corresponden al tipo A(w) cálido subhúmedo el cual representa el 79% del territorio de las cuencas (Cuadro 7). En la parte media de las cuencas corresponde al subtipo A(w₂): cálido subhúmedo con lluvias en verano, el más húmedo de los subhúmedos, mientras que en la parte baja de las cuencas se presenta el subtipo A(w₁): cálido subhúmedo con lluvias en verano, correspondiente al más húmedo de los subhúmedos (CONAGUA *et al.*, 2009; 2012).

Figura 14. Climas de las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia con base a información de INEGI.

Para el caso de la estación climatológica Tonalá, el tipo de clima corresponde al A(w₂): cálido subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con temperaturas máximas de 37C°, temperatura media anual mayor de 34C° y temperatura del mes más frío mayor de 33C°. La precipitación del mes más seco es menor de 1 mm con lluvias en verano y precipitaciones máximas de 400 mm en el mes de septiembre (CONAGUA, *et al.*, 2012).

Según se muestra en el Cuadro 7 y la Figura 14, el tipo A(w): cálido subhúmedo, es el clima dominante en las cuencas de los ríos Tiltepec, Zanatenco y Riíto en un 88.84%, 52.58% y 100% del área de cada cuenca respectivamente.

Cuadro 7. Los tipos de clima en las cuencas de estudio.

Unidad climática	Superficie (hectáreas)			Totales	
	Tiltepec	Zanatenco	Riíto	Hectáreas	%
Cálido subhúmedo	21,606.950	12,148.448	17,634.932	51,389.330	78.99
Semicálido húmedo	2,330.822	3,912.357	0.000	6,243.179	9.60
Cálido húmedo	384.782	5,790.746	0.000	6,175.528	9.49
Templado húmedo	0.000	1,253.966	0.000	1,253.966	1.93
Totales	24,322.554	23,105.517	17,634.932	65,062.003	100.00

Fuente: Elaboración propia con base a información de INEGI.

1.7.2 Balance hídrico

Los resultados de precipitación, evaporación y temperatura media mensual (Cuadro 8) definen el climograma (Figura 15) de la estación Tonalá para el periodo de registro de 1961 a 2013. Se observa que en la parte baja la precipitación media anual es de 1,723.8 mm, la evaporación media anual de 2,297.6 mm y la temperatura media anual de 28.7 °C.

Cuadro 8. Precipitación, evaporación y temperatura media mensual en la estación climatológica Tonalá, Chiapas (1961-2013).

Mes	Precipitación media (mm)	Evaporación media (mm)	Temperatura media (C°)
Enero	1.6	211.0	27.8
Febrero	5.3	209.7	28.3
Marzo	8.0	236.9	29.4
Abril	29.2	218.2	30.6
Mayo	166.6	181.2	30.2
Junio	328.7	156.6	28.6
Julio	290.2	167.4	28.7
Agosto	299.9	165.9	28.7
Septiembre	416.9	140.9	28.1
Octubre	148.2	182.6	28.4
Noviembre	27.9	208.0	28.5
Diciembre	1.3	219.3	27.8
Anual	1,723.8	2,297.6	28.7

Fuente: Elaboración propia en base en la información de la estación climatológica Tonalá

La precipitación media anual en la parte baja de las cuencas de estudio fue de 1,723.8 mm. El periodo de lluvias comprende de mayo a octubre con un promedio de 1,650.5 mm (el 95.7% de la lluvia promedio anual), con presencia de un periodo de sequía intraestival o canícula en el mes de julio.

En su estudio sobre el patrón de lluvias en la Costa de Chiapas, Escalante (2006) reporta para el periodo de 1960 a 1979 en la estación Tonalá, una precipitación anual promedio de 1,717.3 mm (valor muy cercano al obtenido en este estudio para 1961-2013); de 1980 a 1999 una precipitación media de 1,681.7 mm y; para el periodo de 1959 a 1999 de 1,695.5 mm. Lo que muestra la variación de la precipitación anual promedio según el periodo de estudio.

La canícula o sequía intraestival es característica de la Depresión Central de Chiapas (López, 1991). En Tonalá, la canícula, en promedio, no se había extendido hasta el mes de agosto; así mismo, no había sido tan intensa que la diferencia entre la evaporación y la lluvia representaran un déficit de humedad que implicara riesgos para los cultivos. En los planos del estudio de zonas potenciales para la producción sustentable de maíz en Chiapas (López *et al.*, 2008), la región Istmo-Costa presentaba una probabilidad de ocurrencia de sequía intraestival del 4 al 15% con una duración menor de 15 días. No obstante, en los últimos años, la canícula ha sido muy prolongada en la región, de alrededor de 40 días, misma que ya ha implicado pérdida de cosechas (Figura 15).

Figura 15. Efecto de la canícula de 2014 en el valle de Jiquipilas, Chiapas.

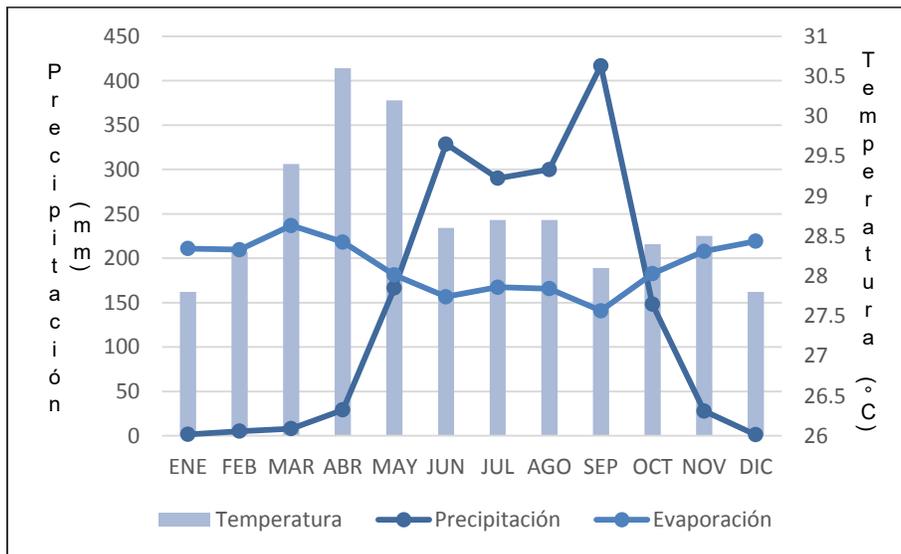


Por su parte, el periodo de secas o estiaje comprende los meses de noviembre a abril con un promedio de 73.3 mm (el 4.3% de la lluvia promedio anual). La precipitación máxima mensual se presenta en el mes de septiembre con 416.9 mm, y la mínima mensual en diciembre con 1.3 mm (Figura 16).

El balance de humedad del suelo se establece a partir de la diferencia entre la precipitación y la evaporación media mensual. En el Cuadro 9, se muestra el balance de humedad en la estación climatológica Tonalá.

La evaporación es un estimador de la evapotranspiración (ET) o consumo de agua de los cultivos. Considerando la relación entre la precipitación media mensual y la evapotranspiración mensual, se estima el balance del agua en el suelo a lo largo del año. El conocimiento del balance de humedad en el suelo permite evaluar los servicios hidrológicos, la disponibilidad de agua en el suelo para el desarrollo de los cultivos, realizar estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de repoblación forestal, el establecimiento del régimen de humedad de los suelos, así como establecer criterios de diferenciación climática.

Figura 16. Climograma de la estación Tonalá, Chiapas (1961-2013).

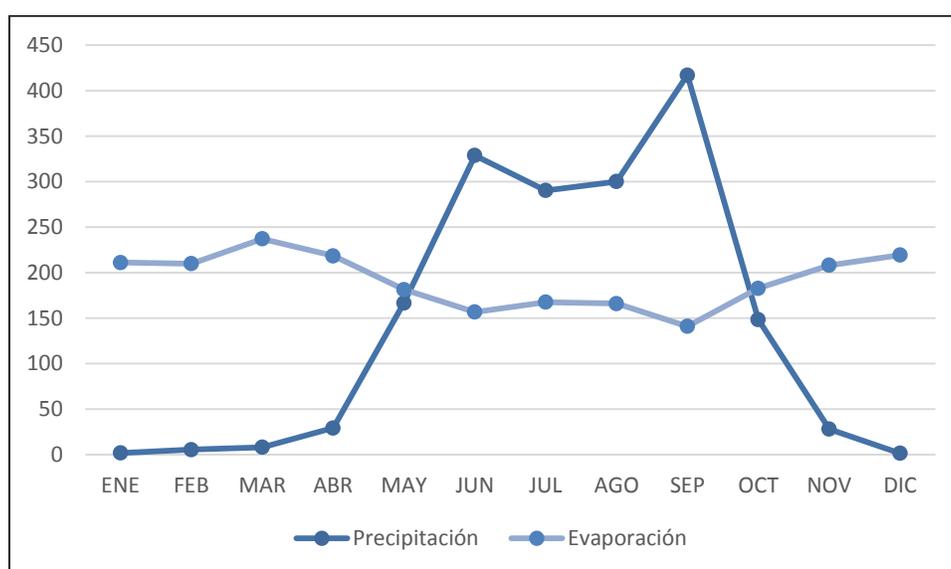


Fuente: Elaboración propia en base al análisis de la información

El balance hídrico consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (una lámina de un mm equivalente a un litro por m²): P es precipitación media mensual; ET es la evapotranspiración potencial o de referencia; R, es la reserva; VR, es la variación de la reserva; ETr, es la evapotranspiración real; (D), es el déficit de agua y Ex, es el exceso de agua.

La diferencia P-ET es el balance mensual de entradas y salidas de agua del suelo. La diferencia clasifica los meses en "secos" cuando $P - ET < 0$ y en "húmedos" $P - ET > 0$ según las entradas superen o no a las salidas; R es la reserva del suelo. Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas ($P > ET$), el agua excedente se almacenará en el suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas, se reducirá el almacenamiento de humedad en el suelo. Sin embargo, cuando el suelo alcance la capacidad total de almacenamiento, el agua añadida en "exceso" escurrirá superficialmente o se infiltrará profundamente (percolación profunda) hacia los acuíferos, contribuyendo al servicio ecosistémico hidrológico de producción de agua (Figura 17).

Figura 17. Balance de humedad en la estación Tonalá, Chiapas.



Fuente: Elaboración propia en base al análisis de la información

Por tanto, es fundamental conocer la capacidad de almacenamiento de humedad máxima del suelo o la cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar, en su perfil para estimar los servicios hidrológicos que proporciona la cuenca.

Cuadro 9. Balance de humedad promedio en la estación climatológica Tonalá, Chiapas (1961-2013).

Mes	Precipitación media (mm)	Evaporación media (mm)	Balance de humedad (mm)
Enero	1.6	211.0	-209.4
Febrero	5.3	209.7	-204.4
Marzo	8.0	236.9	-228.9
Abril	29.2	218.2	-189.0
Mayo	166.6	181.2	-14.6

Junio	328.7	156.6	+172.1
Julio	290.2	167.4	+122.8
Agosto	299.9	165.9	+134.0
Septiembre	416.9	140.9	+276.0
Octubre	148.2	182.6	-34.4
Noviembre	27.9	208.0	-180.1
Diciembre	1.3	219.3	-218.0
Anual	1,723.8	2,297.6	-573.8

Fuente: Elaboración propia en base al análisis de la información

De acuerdo a los datos presentados, se obtiene que de junio a septiembre se presenta exceso de humedad para el desarrollo de los cultivos (la evaporación es menor que la precipitación), con un mayor exceso de humedad en el mes de septiembre, con 276 mm. En contraste, de octubre a mayo se presenta déficit de humedad (la evaporación es mayor que la precipitación), con un mayor déficit de humedad en el mes de marzo de 228.9 mm. Por otra parte, de junio a septiembre se tiene un exceso de humedad de 704.9 mm, mientras que de octubre a mayo se tiene un déficit de humedad de 1,278.8 mm. En promedio, el mes con mayor déficit de humedad es marzo con -228.9 mm y el de mayor exceso de humedad es septiembre con +276 mm. El déficit de humedad promedio anual de 573.8 mm.

El balance de humedad del suelo define los periodos de disponibilidad de agua para los cultivos, las fechas de siembra y el itinerario tecnológico así como los requerimientos y periodos tanto de riego como de drenaje agrícola.

Como consecuencia inmediata y directa de los procesos de variabilidad climática, el régimen de humedad del suelo se está viendo afectado por el cambio en los patrones de precipitación, según se detallará en el próximo capítulo.

Ante el escenario de variabilidad climática, se proponen una serie de prácticas y estrategias de adaptación en los sistemas agrícolas de la región a las variaciones en la distribución de las lluvias y los cambios en el régimen de humedad del suelo, lo que se abordaran más adelante.

1.8 Conclusiones

De acuerdo a sus condiciones geológicas, fisiográficas, suelos, vegetación y clima, las cuencas de estudio son de rápida respuesta hidrológica; es decir, que las lluvias de la cuenca vertiente en la Sierra Madre llegan rápidamente en forma de escurrimiento a la planicie costera.

Para el periodo 1961-2013, la precipitación media anual en la cuenca baja es de 1,723.8 mm y una evaporación promedio anual de 2,297.6 mm, con una temperatura media anual de 28.7 °C. De mayo a octubre llueve un 95.7% del promedio anual. Más adelante se analizara la variabilidad interanual de estos parámetros.

Por otra parte, de junio a septiembre se presenta exceso de humedad en el suelo y de octubre a mayo se presenta déficit de humedad. En las cuencas de estudio, como consecuencia de la variabilidad climática observada en los últimos años, el régimen de humedad del suelo se está viendo afectado por el cambio en los patrones de precipitación.

2. LA VARIABILIDAD CLIMATICA

En este capítulo se hace un análisis estadístico de las tendencias de la variabilidad climática de la precipitación anual; la temperatura promedio anual, mínima, máxima y oscilación térmica; la evaporación anual y; el balance de humedad para el periodo con información climatológica disponible (1961-2013). Asimismo, se realiza el análisis probabilístico y el estudio estadístico de tendencias de la precipitación máxima en 24 horas, el escurrimiento máximo anual en los registros históricos de los ríos Zanatenco y Tiltepec y, el coeficiente de escurrimiento (la relación lluvia-escurrimiento), así como de la temperatura máxima diaria y la evaporación máxima diaria; eventos hidrometeorológicos extremos que definen la tanto la magnitud como la intensidad de los riesgos de inundaciones y sequías en las cuencas de estudio. Las tendencias de la variabilidad climática se relacionan con la prospectiva de los modelos de los escenarios de cambio climático para la región.

2.1 Precipitación anual

Según los modelos climáticos aplicados en México, ante los escenarios de incremento de la temperatura global en los próximos cien años, en general se incrementarían las láminas de precipitación y evaporación así como una mayor frecuencia de lluvias extremas. Sin embargo, algunas regiones del país pueden tornarse más húmedas, en otras, el efecto en un ciclo hidrológico más intensificado será la pérdida de la humedad del suelo y un incremento significativo de la erosión hídrica (Magaña, 2004; Hernández y Valdés, 2004).

En México en las últimas décadas, las tendencias en la variabilidad de la lluvia muestran en la mayor parte del territorio una tendencia a mayor precipitación, principalmente en los estados del norte. Por el contrario, en los estados donde las lluvias dependen en gran medida de la actividad del Océano Pacífico (ciclones tropicales y huracanes, actividad de la Zona Inter Tropical de Convergencia –ZITC–), en regiones como la Costa y Sierra Madre de Chiapas, parecen mostrar una tendencia a menores precipitaciones (Magaña, *et al.*, 2004).

Para el periodo 1901-2009, la precipitación anual en la región Istmo-Costa de Chiapas muestra pequeños decrementos en la precipitación anual de 0 a -0.5 mm/año. Por su parte, en la Planicie costera de Chiapas se reportan incrementos de 0 a 0.5 mm/año y en la Sierra Madre de Chiapas incrementos de 1.0 a 1.5 mm/año (Méndez y Magaña, 2010).

Por su parte, en el plano de tendencias del percentil 95% de la precipitación anual, elaborado por el INE (citado por SEMARNAT, 2012), reportan para la región Istmo-Costa de Chiapas pequeños decrementos en la precipitación anual de 0 a -0.5 mm/año, resultados que coinciden con los reportados por Méndez y Magaña (2010).

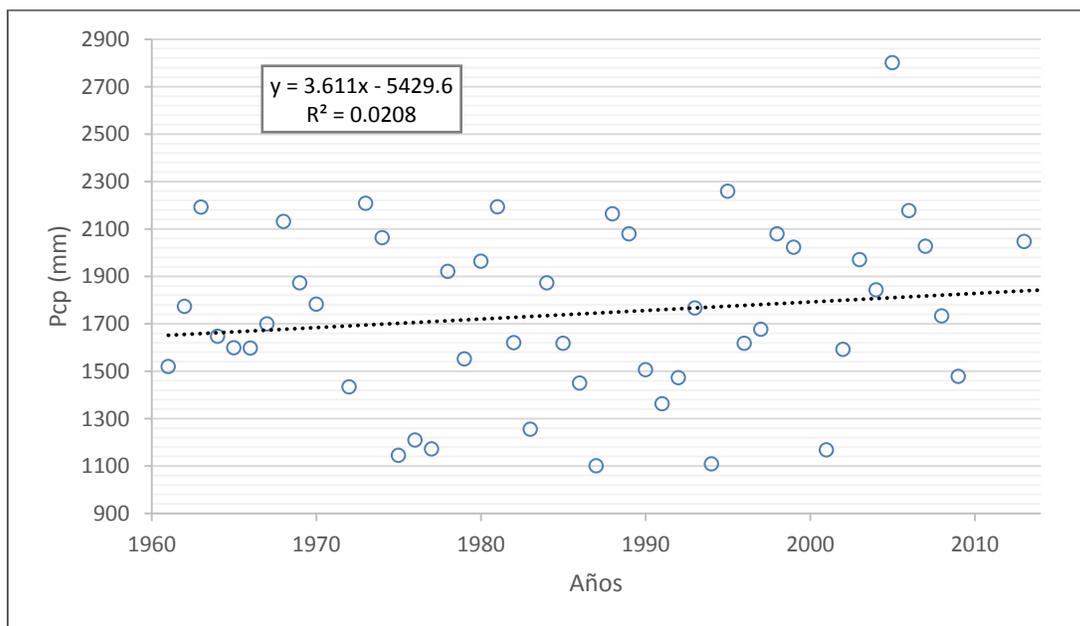
La mayoría de los modelos del IPCC aplicados en México, sugieren una disminución de las lluvias por efecto del calentamiento global; sin embargo, es contrario a las tendencias observadas en el último siglo debido a que es necesario incorporar a los modelos los efectos a mesoescala que determinan el clima como los ciclones tropicales, particularmente en la región Pacífico Sur (Méndez y Magaña, 2010).

En el plano de anomalías de la precipitación anual para los años 2020's en Centroamérica, elaborado por la USAID y CATHALAC (2008), en la región Istmo-Costa de Chiapas, se estima una disminución del 25% de la precipitación anual para el escenario A2 (crecimiento económico no sustentable y sin estrategias de adaptación).

Por su parte Morales *et al.*, citados por Martínez (2007), estiman para el periodo 2070-2099, un cambio porcentual en la precipitación en la Costa de Chiapas de -20 a -40% en invierno y de 0 a +20% en verano.

En los últimos años, las cuencas de la Sierra Madre y Costa de Chiapas, muestran perturbaciones en el ciclo hidrológico regional, se presentan tendencias de decrementos en la precipitación anual y los eventos de lluvias extremos en 24 horas son cada más intensos y frecuentes (Arellano, 2012).

Figura 18. Variabilidad de la precipitación anual (mm) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2013).



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la variación año con año de la precipitación anual en la estación Tonalá, Chiapas para el periodo de estudio 1961-2013, según se muestra en la gráfica de dispersión de la Figura 18, la precipitación anual muestra la variabilidad interanual de la precipitación.

Según la dispersión de estos datos, se presentan los siguientes periodos de disminución de la precipitación: 1963-1965, 1968-1972, 1981-1987, 1989-1994, 1995-2001 y, 2005-2009 con los siguientes periodos de aumento en la precipitación: 1961-1963, 1966-1968, 1972-1974, 1975-1981, 1987-1988, 1994-1995 y, 2001-2005.

Mediante regresión lineal se obtiene para el periodo de estudio, una tendencia general creciente en la precipitación anual con una tasa de +3.61 mm/año con una correlación muy baja (R^2 de 0.02) misma que muestra la gran variabilidad de los datos sin una tendencia clara.

Por su parte Escalante (2006), reporta una tendencia estable para la precipitación anual, un incremento en la tendencia del número de días con lluvia al año y, una tendencia estable en la lluvia acumulada de hasta 10 días. Lo anterior debido a que únicamente analizo datos hasta el año 1998, mismos que no incluyen los años lluviosos que se presentaron posteriormente.

Los resultados obtenidos en este trabajo, son análogos a los reportados por Imbach *et al.* (2013) para la estación Tonalá, Chiapas los cuales muestran aumentos y disminuciones de precipitación año con año mismos que muestran una variabilidad interanual de precipitación; sin embargo, no muestran una tendencia clara (creciente o decreciente). A nivel decenal (periodos de estudio 10 años), los datos reportan una tendencia decreciente.

Debido a su posición geográfica respecto a las trayectorias de humedad, el extremo suroeste de la Costa de Chiapas (en la subregión del Soconusco), las precipitaciones anuales son mayores mientras que en la zona noroeste (en la subregión Istmo-Costa), las precipitaciones anuales son menores.

Por lo condición anterior, en su estudio de variabilidad climática realizado en cuatro estaciones climáticas de la Costa de Chiapas, Imbach *et al.* (2013), obtienen tendencias crecientes en la precipitación interanual en las estaciones ubicadas en la subregión Istmo-Costa y decrecientes en las estaciones de la subregión Soconusco.

Así para la estación Huehuetán, ubicada en el Soconusco Arellano (2012), reporta para el periodo 1965-1997 una tendencia decreciente en la precipitación anual a una tasa de -1.39 mm/año.

Las tendencias de variabilidad de la precipitación interanual en la Costa de Chiapas, muestran el patrón general reportado por el IPCC para el Pacífico

mexicano en las zonas más lluviosas (como el Soconusco), las tendencias en la precipitación son decrecientes mientras que en las zonas menos lluviosas (como la región Istmo Costa), las tendencias son crecientes (Magaña *et al.* 2004).

Para el periodo 1961-2013, los años lluviosos en la estación Tonalá son los siguientes: 1963 (2,191.1 mm), 1968 (2,131.5 mm), 1973 (2,207.4 mm), 1974 (2,062.5 mm), 1980 (1,963.1 mm), 1981 (2,193.3 mm), 1988 (2,163.2 mm), 1989 (2,079.5 mm), 1995 (2,258.7 mm), 1998 (2,078.7 mm), 2005 (2,801.1 mm), 2006 (2,176.6 mm), 2007 (2,026.3 mm) y, 2013 (2,046.3 mm). El año 2005 es el año más lluvioso del registro histórico con una precipitación anual de 2,801.1mm (Figura 18).

Para el periodo 1964-2003, Imbach *et al.* (2013) reporta para la estación Tonalá, los siguientes años como los más lluviosos: 1980, 1981, 1989, 1993 y, 1995, mismos que coinciden con los reportados en éste trabajo.

Por otra parte, los años secos, con menor precipitación anual en la estación Tonalá corresponden a 1975 (1,145.0 mm), 1976 (1,209.3 mm), 1977 (1,171.2 mm), 1983 (1,254.6 mm), 1987 (1,101.3 mm), 1991 (1,362.6 mm), 1994 (1,108.9 mm), 2001 (1,168.1 mm) según se muestra en la Figura 18.

Cuadro 10. Comportamiento de la precipitación mensual en la estación climatológica Tonalá, Chiapas (1961-2013).

Mes	Precipitación máxima (mm)	Precipitación media (mm)	Precipitación mínima (mm)
Enero	47.0	1.6	0.0
Febrero	58.5	5.3	0.0
Marzo	135.5	8.0	0.0
Abril	151.8	29.2	0.0
Mayo	524.3	166.6	19.4
Junio	607.0	328.7	122.9
Julio	609.9	290.2	66.6
Agosto	651.3	299.9	98.1
Septiembre	982.5	416.9	117.1
Octubre	712.5	148.2	0.0
Noviembre	222.0	27.9	0.0
Diciembre	13.5	1.3	0.0
Anual	-	1,723.8	-

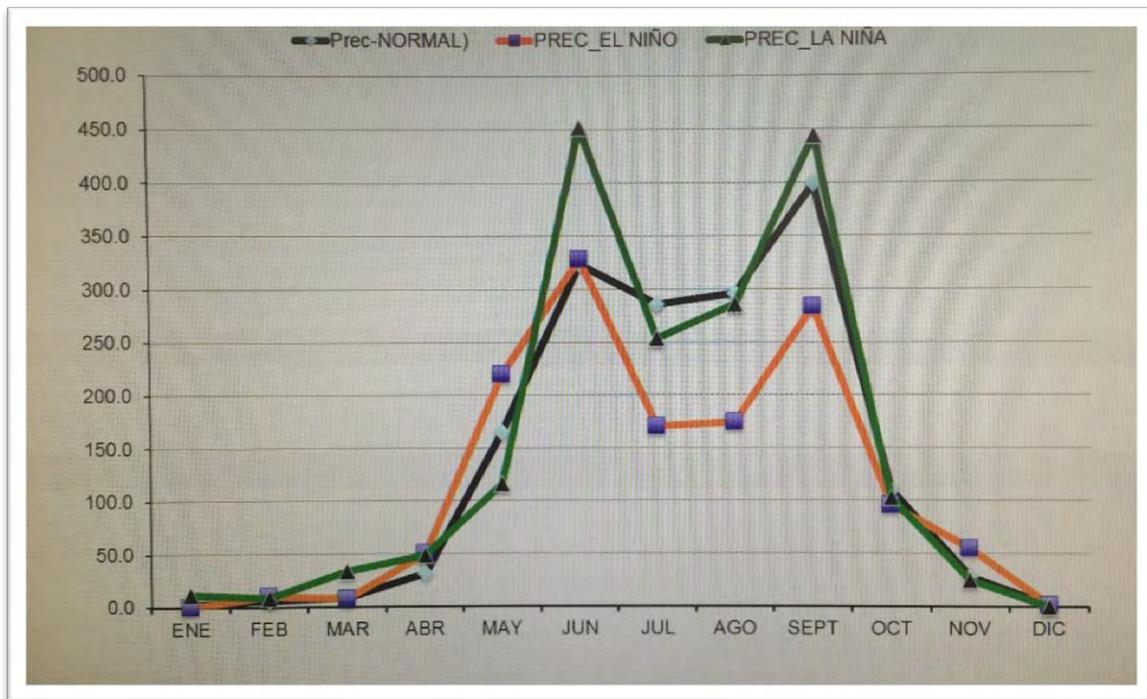
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la precipitación mensual durante el periodo de estudio (1961-2013), se muestra en el (Cuadro 10), donde se obtiene que la precipitación mensual acumulada máxima se presenta durante los meses de agosto, septiembre y, octubre con 651.3 mm, 982.5 mm y, 712.5 mm, ocurridos en los años lluviosos de 1969, 1963 y, 2005 respectivamente debido a los aportes de lluvia provenientes de los ciclones tropicales en estos meses y años.

En promedio los meses más lluviosos en la estación Tonalá son los meses de junio y septiembre con precipitaciones medias de 328.7 y 416.9 mm respectivamente que corresponden a las lluvias de verano y la presencia de ciclones tropicales en la región (Cuadro 10). Meses que también reporta Serrano *et al.* (2006) como los más lluviosos para su periodo de estudio (1961-1998): junio con 323.9 mm y septiembre con 399.4 mm.

Para el periodo de estudio (1964-2003), Imbach *et al.* (2013), reportan valores de precipitaciones mensuales mayores de 800 mm en los meses de agosto y septiembre de 1988 y 1989 asociados a periodos de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO). Según el Cuadro 10, los valores de precipitación máxima mensual correspondientes a los meses de agosto y septiembre son de 651.3 mm y 982.5 mm respectivamente que corresponden para septiembre a los reportados por Imbach *et al.* (*op. cit.*).

Figura 19. Pronóstico de precipitación para el año 2016 según diferentes escenarios ENSO en la estación Tonalá, Chiapas.



Fuente: López (2016).

En base a los pronósticos de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO), López (2016) estima el comportamiento de la precipitación en la estación Tonalá, Chiapas bajo los escenarios de El Niño (periodo muy seco) y La Niña (periodo muy lluvioso). En ambos escenarios (año Niño y año Niña), se espera que la precipitación este por debajo de la media según se muestra en la Figura 19, a excepción del mes de

mayo que serán mayores a la media en más de 100 mm. Durante la canícula de julio tanto para el escenario de La Niña como de El Niño, la precipitación será menor a la media en casi 50 mm y poco más de 100 mm respectivamente. Para la temporada de ciclones tropicales (septiembre), la lluvia se estima sea mayor a la media para el escenario de La Niña y para un escenario de El Niño se estima sea menor a la media (Figura 19).

De acuerdo a la actualización del 16 de mayo de 2016, el Centro de Predicción Climática (CPC) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) estiman condiciones océano-atmósfera que muestran un rápido debilitamiento de El Niño, lo que podría originar en los próximos meses una condición neutral o de transición que podría configurar una temporada de sequía extrema (CONAGUA, 2016).

2.2 Temperatura

Para el periodo 1901-2009, la temperatura superficial media anual de México mostro un incremento medio de menos de 2 °C. Algunas regiones como el noroeste del país, han experimentado incrementos mayores que la media nacional, y otras como la noreste, muestran una tendencia al enfriamiento. En este mismo estudio, para la Costa de Chiapas se reportan pequeños incrementos en la temperatura media anual de 0.5 a 1.0 °C/año (Méndez y Magaña 2010).

A partir de la simulación de datos del periodo 1961-1990 y mediante el uso de modelos de circulación general, se estiman incrementos para el periodo de 2070-2099 en la temperatura media anual en la región Istmo-Costa de Chiapas para el verano de 2 a 4 °C y para el invierno de 4 a 6 °C (Martínez, 2007).

En el estudio de Gobierno del Estado de Chiapas *et al.*, (2011), para el periodo 1951-2000 reportan en Chiapas incrementos en la temperatura media anual de hasta 0.4 °C/año.

Para el escenario 2015-2039, el Gobierno del estado de Chiapas *et al.*, (2011), estiman que se presentaran incrementos en la temperatura de 27 °C a 33 °C en las regiones Istmo-Costa, Soconusco y Frailesca con impactos negativos en los rendimientos de maíz, frijol y café.

Según el plano de anomalías en la temperatura media anual para la década de 2080 de Centroamérica, en la región Istmo-Costa de Chiapas, las temperaturas medias anuales serán por arriba de 4 °C para el escenario A2 que corresponde al de crecimiento económico no sustentable y sin estrategias de adaptación (USAID y CATHALAC, 2008).

Los escenarios de cambio climático del IPCC sugieren que el incremento en la temperatura media anual continuará en México con aumentos de 2 a 4 °C hacia

finales del siglo XXI, particularmente en el norte del país (Méndez y Magaña, 2010).

2.2.1 Temperatura promedio anual

Según se muestra en el Cuadro 11, en el periodo de estudio (1961-2009), la temperatura promedio anual en la estación climatológica Tonalá, Chiapas es de 28.7 °C, la máxima mensual de 34.8 °C y la mínima mensual de 22.7 °C. La temperatura promedio mensual máxima se ha presentado en abril con 37.3 °C, mientras que la mínima mensual se ha presentado en enero con 21.0 °C (Figura 20).

Cuadro 11. Comportamiento de la temperatura promedio mensual en la estación climatológica Tonalá, Chiapas (1961-2009).

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima (°C)
Enero	34.6	27.8	21.0
Febrero	35.3	28.3	21.3
Marzo	36.4	29.4	22.4
Abril	37.3	30.6	23.9
Mayo	36.2	30.2	24.2
Junio	33.9	28.6	23.3
Julio	34.4	28.7	23.0
Agosto	34.3	28.7	23.0
Septiembre	33.4	28.1	22.8
Octubre	33.8	28.4	23.1
Noviembre	34.2	28.5	22.7
Diciembre	34.1	27.8	21.5
Anual	34.8	28.7	22.7

Fuente: Elaboración propia.

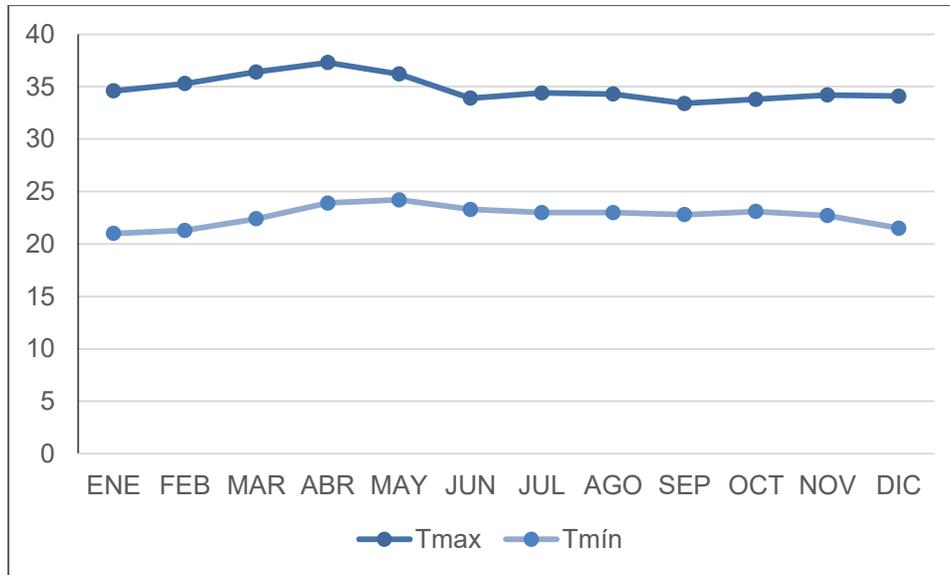
Para la misma estación climatológica, Imbach *et al.* (2013) reportan para el periodo de estudio de 1964-2003, los siguientes valores promedio de temperatura: valor medio de 34.6 °C, valor máximo de 42.5 °C y, un valor mínimo de 23.5 °C.

Mientras Imbach *et al.*, (2013) reportan los valores promedio de temperatura diaria media, máxima y mínima, en el presente trabajo, se reportan los valores de temperatura promedio mensual.

Para el periodo de registro del presente estudio (1961-2009), la temperatura media promedio anual, muestra los siguientes periodos decrecientes: 1961-1968, 1969-1971, 1972-1986 y, 2003-2009; así como los siguientes periodos crecientes: 1968-1969, 1971-1972, 1986-2003

Para la variabilidad interanual de la temperatura media anual en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009), se obtiene una tendencia general creciente a una tasa de 0.0121 °C por año con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.1189, lo cual equivale a un incremento promedio de 0.58 °C para el periodo de estudio de 48 años (Figura 21).

Figura 20. Temperatura máxima y mínima promedio mensual en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009), Chiapas.



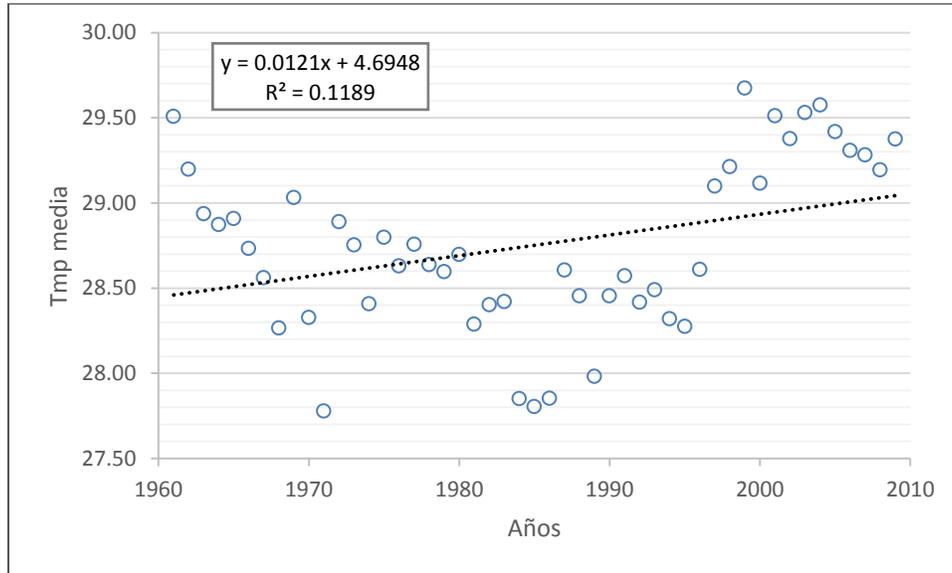
Fuente: Elaboración propia.

Este incremento de 0.58 °C en la temperatura media anual, se encuentra dentro del rango reportado en el Programa de Acción Ante el cambio Climático del Estado de Chiapas (Gobierno del Estado de Chiapas *et al.*, 2011), para el periodo 1951-2000 en Chiapas de hasta 0.4°C/año, así como del rango reportado por Méndez y Magaña (2010) para la Costa de Chiapas de 0.5 a 1.0 °C/año.

De seguir esta tendencia de crecimiento en la temperatura media anual en Tonalá, para el año 2050 y para el año 2100, se esperarían incrementos en la temperatura máxima de 0.6 °C y 1.2 °C respectivamente, valor que se encuentra por abajo del escenario de 2 a 4 °C para finales del siglo XXI propuesto por Méndez y Magaña (2010).

Como referencia, en el estado de Tabasco, Rivera *et al.*, (2016) obtienen también para el periodo 1961-2010 una tendencia general creciente en la temperatura promedio anual con una tasa de 0.0171 °C/año, casi la misma tasa que la obtenida para Tonalá, Chiapas en este trabajo (0.0121 °C/año), lo cual muestra cierta tendencia regional en el sur de México.

Figura 21. Variabilidad de la temperatura media anual (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

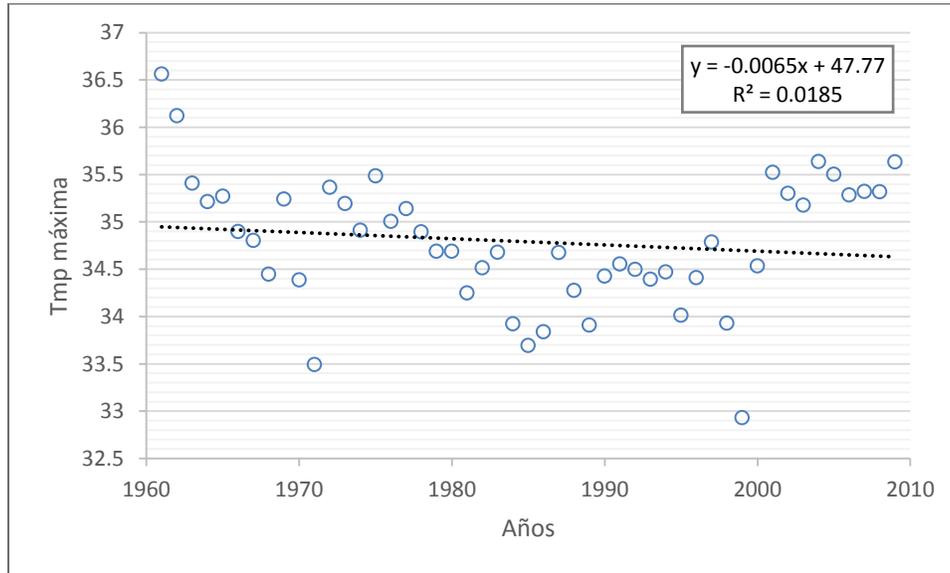
2.2.2 Temperatura máxima promedio anual

Estudios previos reportan como valores de temperatura promedio máxima la siguiente variación: un valor máximo de 37.5 °C y un valor mínimo de 32.0 °C (Imbach *et al.*, 2013), mientras que en el presente estudio, se obtiene un valor máximo de 36.6 °C en 1961 y un valor mínimo de 32.9 °C en 1999, prácticamente los mismos valores debido a que son diferentes periodos de estudio.

Por otra parte, en el presente estudio durante el periodo 1961-2009, la temperatura máxima promedio anual muestra los siguientes periodos decrecientes: 1961-1971, 1973-1985, 1997-1999 y, 2001-2003; así como los siguientes periodos crecientes: 1971-1973, 1985-1997, 1999-2001 y, 2003-2009 (Figura 22).

La variabilidad interanual de la temperatura máxima promedio anual en la estación Tonalá, Chiapas para el periodo de estudio (1961-2009), muestra una tendencia general decreciente a una tasa de -0.0065 °C por año con un R^2 de 0.0185, que equivale a un incremento promedio de 0.31 °C en el periodo de 48 años de estudio. De seguir esta tendencia en el futuro, para el año 2050 y para el 2100, se esperarían decrementos en la temperatura máxima de 0.6 y 0.9 °C para cada año (Figura 22).

Figura 22. Variabilidad de la temperatura máxima promedio anual (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

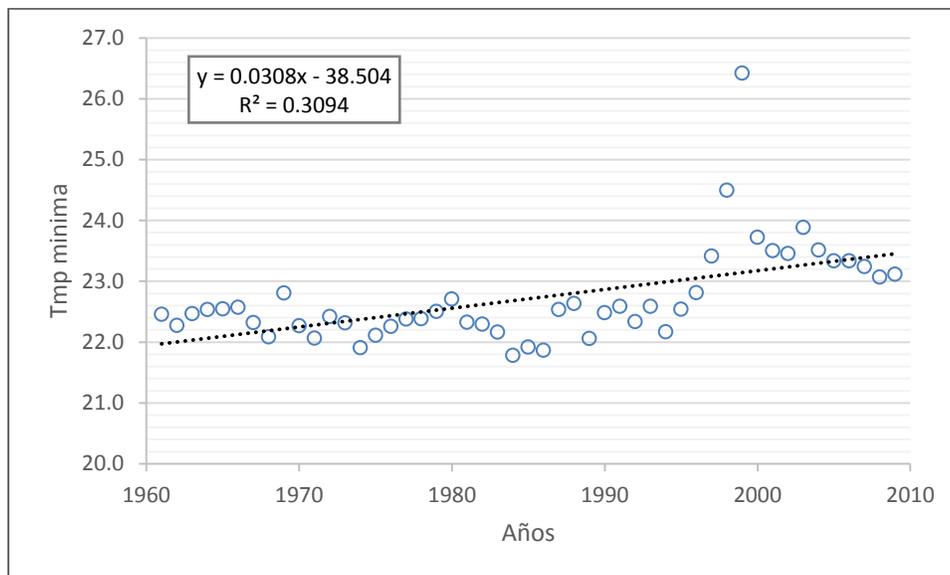
A diferencia de lo que encontramos para Tonalá, Chiapas con una tendencia decreciente de la temperatura máxima promedio anual de -0.0065 °C/año, en Tabasco prácticamente para el mismo periodo de estudio, se obtienen una tendencia general creciente en la temperatura máxima promedio anual con una tasa de 0.0222 °C/año (Rivera *et al.*, (2016). De esta forma, mientras en el océano Pacífico, la tendencia en la temperatura máxima promedio anual es decreciente, en el Golfo de México, la tendencia general es creciente.

Mientras en el presente estudio se obtiene mediante regresión lineal tendencias generales decrecientes en la variabilidad anual de la temperatura máxima promedio, Imbach *et al.* (2013) reportan con uso de funciones de distribución de probabilidades que la temperatura máxima en periodos decanales no muestran cambios significativos, únicamente destacan el incremento en la amplitud de la temperatura promedio anual máxima en la última década en comparación con la década de referencia 1964-1973.

2.2.3 Temperatura mínima promedio anual

Se presenta una tendencia general creciente en la variabilidad interanual de la temperatura mínima promedio anual en la estación Tonalá, Chiapas para el periodo de 1961-2009, a una tasa de 0.0308 °C/año con un R^2 de 0.3094 . Esta tasa equivale a un incremento promedio de 1.5 °C en el periodo de 48 años de estudio. De seguir esta tendencia en el futuro, para el año 2050 y para el 2100, se esperarían incrementos en la temperatura mínima promedio de 2.7 y 4.3 °C respectivamente (Figura 23).

Figura 23. Variabilidad de la temperatura mínima promedio anual (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, Imbach *et al.* (2013) reportan para el periodo de 1964-2003, como valores de temperatura promedio mínima la siguiente variación: un valor máximo de 24.5 °C y un valor mínimo de 20.5 °C.

Con uso de las funciones de distribución de probabilidades, Imbach *et al.*, (2013) reportan que la temperatura mínima en periodos decanales, mostraron un incremento en el periodo de estudio (1964-2003). De esta forma, las temperaturas mínimas se incrementan a lo largo de los 30 años.

Como referencia, en el estado de Tabasco, Rivera *et al.*, (2016) prácticamente para el mismo periodo de estudio obtienen también una tendencia general creciente en la temperatura mínima promedio anual con una tasa de 0.0114 °C/año, un poco menor a la obtenida para Tonalá, Chiapas de 0.0308 °C/año. Tanto en el Océano Pacífico como en el Golfo de México, la tendencia general en la temperatura mínima promedio anual es creciente.

2.2.4 Oscilación térmica

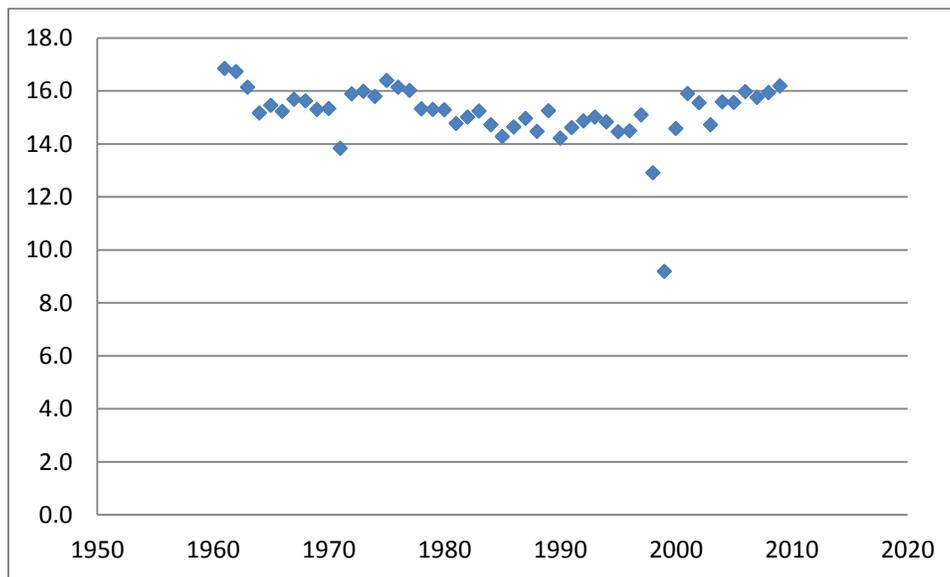
La oscilación térmica es la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima. El análisis de las oscilaciones térmicas a lo largo del periodo de estudio (1961-2009) permite discriminar si el cambio en la temperatura media anual se debe principalmente a los aumentos de la temperatura máxima o a la temperatura

mínima. Es decir si el calentamiento ambiental se debe a que se está calentando más el día que la noche, o bien que es la noche la que se está calentado más que el día. Esto es muy importante, pues un decremento en la oscilación térmica puede implicar que la temperatura mínima se ha incrementado más que la temperatura máxima; mientras que un incremento en la oscilación térmica puede implicar que la temperatura máxima se ha incrementado más que la temperatura mínima (Rivera *et al.*, 2016).

Como puede apreciarse en la Figura 24, la oscilación térmica promedio anual tiene un comportamiento periódico con variaciones entre periodos crecientes y decrecientes.

En los periodos decrecientes de oscilación térmica (1961-1971, 1977-1985, 1985-1994, 1994-1999 y, 2001-2003), donde la temperatura mínima se ha incrementado más que la temperatura máxima incluyen (a excepción de los años 1973 y 1974) a los años más lluviosos: 1963, 1968, 1980, 1981, 1989, 1990, 1993, 1995 y, 1998; mientras que en los periodos crecientes de oscilación térmica (1971-1977, 1999-2002, 2002-2009), donde la temperatura máxima se ha incrementado más que la temperatura mínima, corresponden a los años calurosos, secos y menos lluviosos de 1975, 1976 y, 1977.

Figura 24. Variabilidad de la oscilación térmica anual (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

Según se muestra en las Figura 20, la temperatura máxima promedio anual más baja fue de 35.6 °C así como la temperatura mínima promedio anual más alta de 26.4 °C, se presentaron el mismo año de 1999. Así la oscilación térmica del año

1999 es la mínima en todo el periodo de estudio con un valor de 9.2 °C. El año de 1999 fue un año muy extremo en temperaturas máximas extremas donde se presentaron tanto la temperatura máxima promedio anual más alta como la más baja.

Para el periodo de estudio de 1961 a 1998, Serrano *et al.* (2006) reportan una oscilación térmica promedio anual de 12.4 °C debido a que no se incluyó el año 1999.

En la estación climatológica Tonalá, Chiapas para el periodo de estudio 1961-2009 mientras la temperatura máxima promedio anual presenta una tendencia decreciente de -0.0065 °C/año, la temperatura mínima promedio anual presenta una tendencia creciente a una tasa mayor de 0.0308 °C/año. Lo anterior implica una tendencia decreciente en la oscilación térmica a una tasa de -0.046 °C/año (Imbach *et al.* (2013).

De esta forma, según las tendencias de variabilidad climática en Tonalá, Chiapas las temperaturas máximas promedio van disminuyendo gradualmente; mientras, que las temperaturas mínimas promedio van aumentando a una mayor tasa.

2.3 Evaporación

En estudios de variabilidad climática normalmente no se considera a la evaporación; sin embargo, en el presente estudio, se consideró pertinente su análisis debido a que en el proceso de evaporación se integran los efectos de la temperatura, la radiación solar, el viento y la humedad relativa.

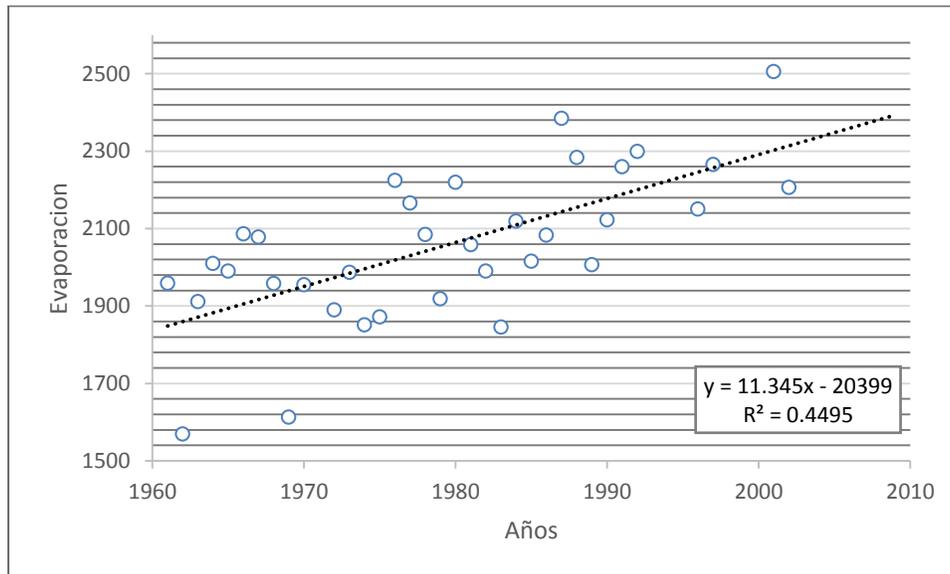
Asimismo, la evaporación es un estimador de la evapotranspiración o consumo de agua de los cultivos (Doorenbos y Pruitt, 1990), fundamental para el desarrollo del itinerario tecnológico de la agricultura. Finalmente, como se analizó anteriormente, en el apartado sobre balance de humedad, la evaporación junto con la precipitación, definen el régimen de humedad del suelo, la relación entre la oferta y la demanda de agua o balance hídrico en la cuenca.

El estudio de la variabilidad climática de la evaporación, permitirá conocer la integración de la variabilidad de la temperatura, la radiación solar, el viento y la humedad relativa. Asimismo, permitirá estimar el comportamiento de la demanda de agua de los cultivos.

Para la región Istmo-Costa de Chiapas, Martínez (2007) ha estimado una evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia anual de 640 mm. Asimismo, estima que para incrementos en la temperatura de 1 a 3C° se obtendrían valores de evapotranspiración potencial anual con incrementos de 40 mm (680 mm), lo cual afectaría negativamente el balance hídrico en la región, más

aún si se considera una disminución en la precipitación anual como el que se ha observado en los últimos años en la región.

Figura 25. Variabilidad de la evaporación anual (mm) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2002).



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 25 se muestra la gráfica de dispersión de la evaporación anual en la estación Tonalá, Chiapas. La evaporación anual máxima se presentó en 2001 con 2,505.24 mm y la mínima en 1962 con 1,569.6 mm.

Mediante regresión lineal se obtiene para el periodo de estudio con datos anuales completos (1961-2002), una marcada tendencia creciente en la evaporación anual con una tasa de +11.35 mm/año con un coeficiente de correlación R^2 muy bueno de 0.4495 mismo que muestra una clara tendencia. De esta forma, se observa en la región una mayor demanda de agua para el desarrollo de los cultivos así como un desequilibrio en el balance hídrico de la región (mayor demanda que oferta de agua).

Mundo (2008) con uso de la ecuación de Hargreaves y Samari, estima la evapotranspiración potencial en el noroeste del país en función de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (oscilación térmica), la temperatura media y, la radiación solar para los escenarios de cambio climático al 2030 y obtiene que incrementos en la temperatura de 0.1 a 0.45 °C representarían una mayor demanda de agua para los cultivos del orden del 2 al 7%.

La ecuación de Hargreaves y Samari fue también utilizada por Nigatu *et al.* (2016) para la estimación de la evapotranspiración potencial en su estudio sobre los

impactos de los escenarios de cambio climático en el balance de agua del lago Tana en Etiopía.

Con los incrementos en la temperatura máxima de 0.6 °C y 1.2 °C en Tonalá, Chiapas para el año 2050 y para el año 2100 respectivamente, mayores incluso a los estimados para el noroeste del país en 2030 por Mundo (2008), se esperarían con uso de la ecuación de Hargreaves y Samari incrementos en la demanda de agua para los cultivos mayores al 7%.

2.4 Balance de humedad

Al hacer el análisis de la variabilidad temporal del balance de humedad (la diferencia entre la precipitación y la evaporación anual) se encontró que solo 8 años fueron con exceso de humedad (32%), donde la evaporación anual fue menor que la precipitación mientras que 25 fueron años secos (68%), donde la evaporación anual fue mayor que la precipitación. Es decir, siete de cada diez años son secos (Cuadro 12).

Los años con exceso de humedad, fueron los siguientes: 1962, 1963, 1968, 1969, 1973, 1974, 1981 y, 1989. Por otra parte, los años con déficit de humedad o secos, fueron los siguientes: 1961, 1964, 1965, 1966, 1967, 1970, 1972, 1975, 1976, 1977, 1978, 1980, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1992, 1996, 1997 y, 2002 (Figura 26).

De esta forma según se muestra en la Figura 26, la tendencia del balance de humedad en la estación Tonalá es decreciente (con déficit de humedad o seco) a una tasa de -17.87 mm/año muy alta ($R^2=0.2227$).

Existe entonces en la región una tendencia hacia años cada vez más secos; es decir, con mayor demanda de agua para el desarrollo de los cultivos y una menor disponibilidad del agua que provee la cuenca a través de sus servicios hidrológicos. Esta mayor demanda hídrica de los cultivos es un efecto del cambio climático (Ojeda, *et al.*, 2008; 2011) que afecta particularmente a las unidades de riego que existen en la región donde el acuífero muestra ya signos de sobre-explotación (Arellano, 2013).

No se cuenta con datos para la zona de estudio, pero los disponibles en municipios cercanos indican que la producción de maíz de temporal por ejemplo en Ocozocauhtla es en promedio de 4.5 a 2.5 Ton/ha; pero en los años secos con presencia del fenómeno de El Niño, la producción se abate a menos de 2 Ton/ha. Asimismo, en los años con presencia del fenómeno de El Niño, se incrementaron las importaciones de maíz en Chiapas (Tiscareño *et al.*, 1991). Esto está sucediendo en la entidad y en la zona de estudio, pues los campesinos reportan tres años seguidos de sequía, con pérdidas de cosechas e incluso han dejado de cultivar el maíz.

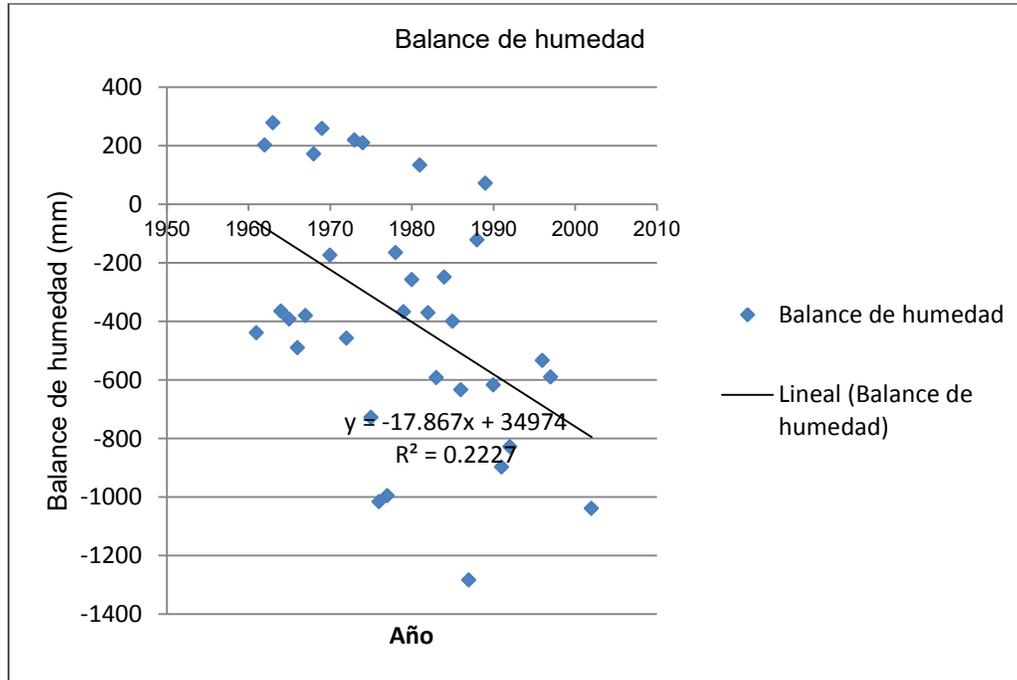
Cuadro 12. Balance de humedad anual en la estación climatológica Tonalá, Chiapas (1961-2002).

Año	Precipitación anual (mm)	Evaporación anual (mm)	Balance de humedad anual (mm)
1961	1520.0	1958.7	-438.7
1962	1772.8	1569.6	203.2
1963	2191.1	1911.4	279.7
1964	1646.2	2010.3	-364.1
1965	1598.6	1990.0	-391.4
1966	1597.2	2086.7	-489.5
1967	1699.2	2078.6	-379.4
1968	2131.5	1958.4	173.1
1969	1872.9	1613.3	259.6
1970	1781.9	1955.0	-173.1
1972	1433.4	1890.0	-456.6
1973	2207.4	1986.8	220.6
1974	2062.5	1851.5	211.0
1975	1145.0	1872.3	-727.3
1976	1209.3	2224.6	-1015.3
1977	1171.2	216.06	-994.8
1978	1920.6	2084.8	-164.2
1979	1552.1	1918.4	-366.3
1980	1963.1	2219.9	-256.8
1981	2193.3	2058.2	135.1
1982	1620.3	1990.0	-369.7
1983	1254.6	1846.0	-591.4
1984	1871.9	2119.6	-247.7
1985	1617.3	2016.0	-398.7
1986	1450.1	2082.9	-632.8
1987	1101.3	2384.8	-1283.5
1988	2163.2	2283.9	-120.7
1989	2079.5	2007.1	72.4
1990	1506.4	2122.5	-616.1
1991	1362.6	2259.7	-897.1
1992	1471.8	2299.1	-827.3
1996	1617.2	2150.4	-533.2
1997	1676.5	2265.8	-589.3
2002	1168.1	2206.6	-1038.5

Fuente: Elaboración propia.

El año con mayor exceso de humedad o año más húmedo fue 1963 con +279.7 mm. Por otra parte, el año con mayor déficit de humedad o año más seco fue 1987 con -1,283.5 mm; sin embargo, los años de 1976 con -1,015 mm y de 2002 con -1,038.5 mm también lo fueron. De esta forma, los años secos y las condiciones de sequía más que los años con exceso de humedad en la región se están haciendo más frecuentes.

Figura 26. Variabilidad del balance de humedad (mm) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2002)



Fuente: Elaboración propia.

2.5 Coeficiente de escurrimiento

La modelación lluvia-escurrimiento depende de las características geomorfológicas, topográficas, edafológicas y de cobertura vegetal principalmente. Asimismo, la relación lluvia-escurrimiento es altamente no lineal; es decir, que un cambio en la precipitación se magnifica en el escurrimiento (Martínez, 2007).

La relación lluvia-escurrimiento se estima con el coeficiente de escurrimiento. El coeficiente de escurrimiento (C_e) se define como la relación del volumen de escurrimiento respecto al volumen precipitado en una cuenca de aporte. De esta forma, el C_e expresa las relaciones precipitación-escurrimiento que dependen de entre otras, de las características geomorfológicas, las condiciones edafológicas, de uso del suelo y vegetación de la cuenca (Arellano, 2012).

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se expresa con la siguiente ecuación:

$$C_e = \text{Prec}/\text{Esc}$$

Dónde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento (adimensional).

Prec= Precipitación (mm).

Esc= Esgurrimiento (mm).

Solo se dispone de los datos de la estación hidrométrica de Zanatenco, misma que cuenta con un registro de 22 años de esgurrimiento superficial (1962-2002), mientras que la estación hidrométrica de Tiltepec cuenta con registros de únicamente 6 años. Por ello, únicamente se analizará la variabilidad del coeficiente de esgurrimiento para la cuenca del río Zanatenco por ser el periodo más largo disponible de datos.

Cuadro 13. Esgurrimiento anual (mm) y Coeficiente de esgurrimiento (%) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1962-2009).

Año	Precipitación anual (mm)	Esgurrimiento anual (mm)	Coeficiente de esgurrimiento (%)
1961	1520.0		
1962	1772.8	977.4	55.13
1963	2191.1	1,490.5	68.02
1964	1646.2	1,172.9	71.25
1965	1598.6	724.6	45.33
1966	1597.2	1,167.2	73.08
1967	1699.2		
1968	2131.5	690.1	32.38
1969	1872.9	1,574.1	84.05
1970	1781.9	1,327.0	74.47
1971		1,021.9	
1972	1433.4	407.5	28.43
1973	2207.4	1,153.6	52.26
1974	2062.5	685.8	33.25
1975	1145.0	371.7	32.46
1976	1209.3	157.9	13.06
1977	1171.2	151.0	12.89
1978	1920.6	536.6	27.94
1979	1552.1	429.8	27.69
1980	1963.1	759.4	38.68
1981	2193.3		
1982	1620.3	470.8	29.05
1983	1254.6	311.6	24.84
1984	1871.9	577.6	30.86
1985	1617.3	611.5	37.81
1986	1450.1	337.7	23.29
1987	1101.3		
1988	2163.2		
1989	2079.5	870.1	41.84
1990	1506.4	332.9	22.10
1991	1362.6		
1992	1471.8		
1996	1617.2		
1997	1676.5		
2002	1168.1		
2003		425.6	
2004		423.7	
2005		605.0	
2008		446.5	
2009		409.8	

Fuente: Elaboración propia.

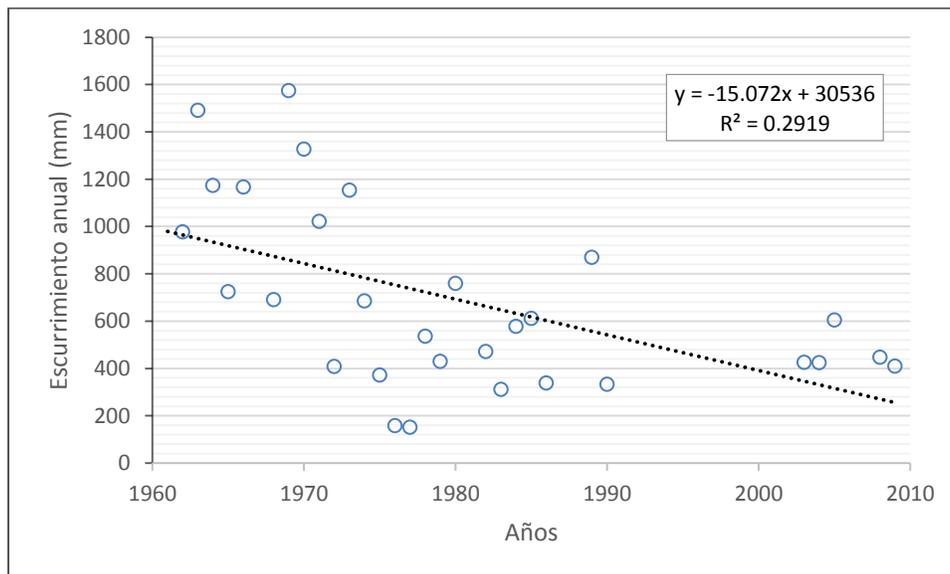
A partir de la información disponible en la base de datos BANDAS (IMTA, 2013) se obtiene la información hidrométrica para los años de registro completos de la estación de aforo del río Zanatenco correspondiente al volumen anual de escurrimiento expresado en miles de m³ (Esc). Para transformar el volumen de escurrimiento a mm, se divide entre el área de captación hasta la estación de aforo expresada en Km² (157). Los valores registrados de escurrimiento anual (mm) y de coeficiente de escurrimiento (adimensional), se muestran en el Cuadro 13.

Para el periodo de registro 1962-2009, los volúmenes anuales máximos de escurrimiento se presentaron en los años húmedos de 1969 (1,574.1 mm) que es el año más húmedo registrado; 1963 (1,490.5 mm) y; 1970 (1,327 mm).

Por su parte, los años con menores volúmenes de escurrimiento anual fueron los años secos de 1990 (332.9 mm); 1983 (311.6 mm) y 1977 (151 mm), el año más seco registrado del río.

Para el río Zanatenco, Trujillo (1998), reporta un volumen anual de escurrimiento medio de 94.29 millones de m³ (600.5 mm) con valores mensuales mínimos en febrero de 0.0 a 1.45 millones de m³ (9.2 mm) y máximos en julio de 4.96 a 100.73 millones de m³ (31.6 a 641.5 mm).

Figura 27. Variabilidad del escurrimiento anual (mm) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1962-2009).



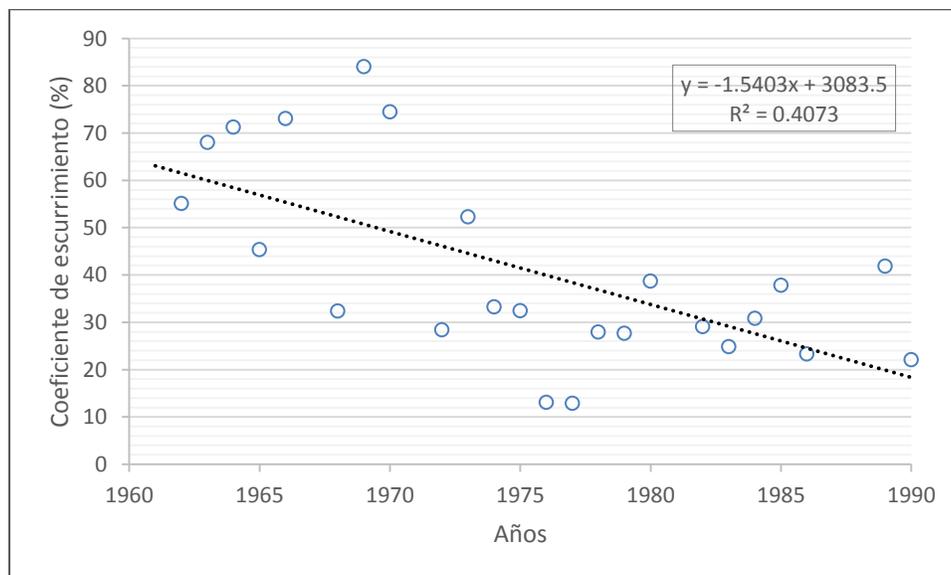
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad del escurrimiento anual (mm) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas para el periodo 1962-2009 se muestra en la Figura 27, donde la tendencia histórica del escurrimiento anual (mm) es decreciente con una disminución de -15.07 mm/año según el modelo de regresión lineal obtenido con un R^2 de 0.2919. Esta disminución de 15.07 mm/año equivale a una menor disponibilidad de 2.365 millones de m^3 de agua del río Zanatenco cada año.

Respecto a los valores obtenidos del coeficiente de escurrimiento (C_e) en la cuenca del río Zanatenco se obtienen un valor máximo de 84.05% en 1969 y mínimo de 12.89% en 1977 en los años con el régimen de escurrimiento más húmedo (1969) y el más seco (1977) respectivamente. Por otra parte, según se muestra en la Figura 28, la tendencia histórica del coeficiente de escurrimiento es decreciente con una disminución de -1.54 %/año según el modelo de regresión lineal obtenido con un R^2 de 0.4073.

Para la cuenca del río Huehuetán, Chiapas Arellano (2012) obtiene también una tendencia histórica decreciente en el coeficiente de escurrimiento (Figura 29) con un rango de valores del C_e del 98.26% (1968) al 47.21% (1988) con una pendiente de -1.12 %/año. Este comportamiento en la cuenca del río Huehuetán, se atribuye al efecto de la cobertura vegetal particularmente del café bajo sobra en el régimen hidrológico de la cuenca. En el caso de la cuenca del río Zanatenco, el rango de valores del C_e es mayor del 74.47% (1970) al 12.89% (1977) y la pendiente mucho mayor: - 1.54 %/año.

Figura 28. Variabilidad del Coeficiente de escurrimiento (%) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1962-1990).

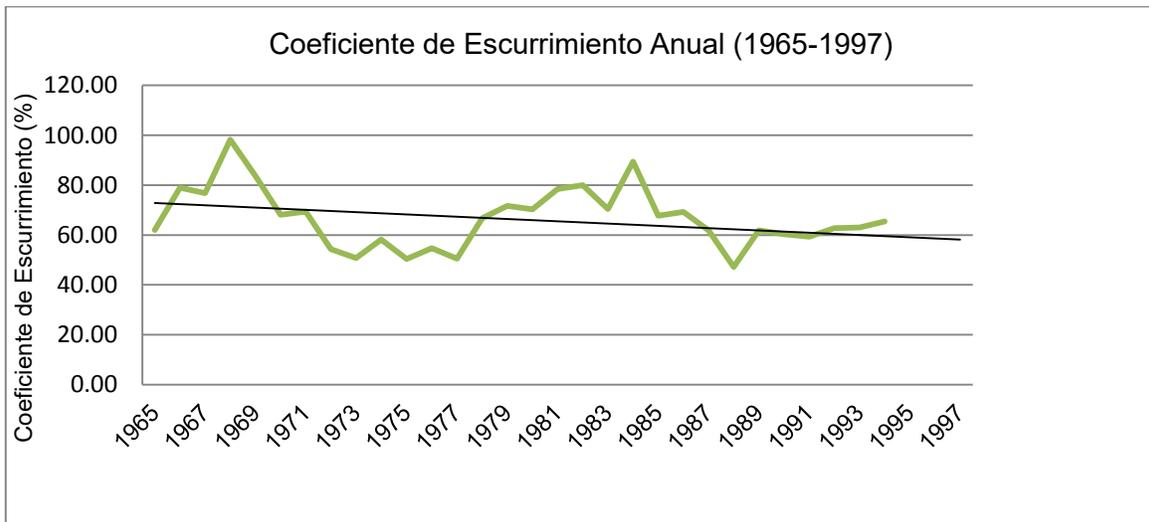


Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, los valores tan bajos obtenidos de coeficiente de escurrimiento en la cuenca del río Zanatenco son menores del 47% (por debajo del valor mínimo de la cuenca del río Huehuetán), incluso del 15%, por lo que junto con tan poca precipitación y el gran déficit de humedad de los últimos años, la mayor parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo de la cuenca y no alcanza a escurrir. Por otra parte, debido a que las cantidades de los eventos de precipitación de los años secos son tan pequeñas, el agua infiltrada no alcanza a percolarse profundamente como para incorporarse al acuífero o descargar después en la temporada de secas como flujo base.

El flujo base, representa el servicio hidrológico fundamental que permite el flujo de agua en el río durante la temporada de secas. Mientras en temporada de secas en el río Huehuetán todos los años fluye agua, el río Zanatenco frecuentemente se seca.

Figura 29. Variabilidad del Coeficiente de escurrimiento en la cuenca del río Huehuetán, Chiapas (1965-1997).



Fuente: Arellano (2012).

2.6 Conclusiones

El estudio revela que se ha estado gestando un proceso de creciente déficit, o desbalance de recursos hídricos en las cuencas de estudio. Cabe mencionar que hay condiciones geográficas que están en el origen, pues debido a la posición geográfica de la Costa de Chiapas respecto a las trayectorias de humedad, en la zona noroeste -donde se encuentran las cuencas de estudio- las precipitaciones anuales son menores, mientras que en el extremo suroeste (en la región del Soconusco), las precipitaciones anuales son mayores.

En la estación Tonalá, para el periodo 1961-2013, la precipitación anual muestra una tendencia creciente con una tasa de +3.61 mm/año.

Los años lluviosos con precipitaciones mayores a 2,000 mm anuales corresponden a los siguientes: 1963, 1968, 1973, 1974, 1980, 1981, 1988, 1989, 1995, 1998, 2005, 2006, 2007 y, 2013. El año más lluvioso del registro histórico fue 2005 con una precipitación anual de 2,801.1mm.

Por otra parte, los años con precipitaciones anuales menores a 1,300 mm, son: 1975, 1976, 1977, 1983, 1987, 1991, 1994 y, 2001. El año más seco, con menor precipitación fue 1987 con 1,101.3 mm.

Los años secos y lluviosos guardan relación con la presencia de periodos de años de El Niño y La Niña en la región.

En promedio, los meses más lluviosos son junio y septiembre con precipitaciones medias de 328.7 y 416.9 mm respectivamente, que corresponden a las lluvias de verano y la presencia de ciclones tropicales en la región.

La temperatura media anual presenta una tendencia general creciente a una tasa de 0.0121 °C por año, lo cual equivale a un incremento promedio de 0.58 °C para el periodo de estudio de 48 años. Este incremento de 0.58 °C en la temperatura media anual, se encuentra dentro del rango reportado por Méndez y Magaña (2010) para la Costa de Chiapas de 0.5 a 1.0 °C/año, así como por el Programa de Acción Ante el cambio Climático del Estado de Chiapas.

Por otra parte, la temperatura máxima promedio anual presenta una tendencia decreciente de -0.0065 °C/año, mientras que la temperatura mínima promedio anual presenta una tendencia creciente a una tasa mayor de 0.0308 °C/año. De esta forma, mientras las temperaturas máximas promedio van disminuyendo gradualmente, las temperaturas mínimas promedio van aumentando a una mayor tasa.

Asimismo, la evaporación anual muestra una marcada tendencia creciente con una tasa de +11.35 mm/año. Se observa en la región una mayor demanda de agua para el desarrollo de los cultivos, así como un desequilibrio en el balance hídrico de la región (mayor demanda que oferta de agua).

Respecto al balance de humedad (la diferencia entre la precipitación y la evaporación anual), se encontró que solo ocho años fueron con exceso de humedad (32%), mientras que 25 fueron años secos (68%). Es decir, siete de cada diez años son secos lo cual explica en parte la sequía que caracteriza a las cuencas.

Para el periodo 1962-2009, el escurrimiento anual del río Zanatenco muestra una tendencia decreciente, con una disminución de -15.07 mm/año. Esta disminución

de 15.07 mm/año equivale a una menor disponibilidad de 2.365 millones de m³ al año.

Al analizar la relación entre el escurrimiento respecto a la precipitación (coeficiente de escurrimiento) en la cuenca del río Zanatenco, se obtiene un valor máximo de 84.05% en 1969 y mínimo de 12.89% en 1977, en los años con el régimen de escurrimiento más húmedo (1969) y más seco (1977), respectivamente. Asimismo, la tendencia histórica del coeficiente de escurrimiento es decreciente con una disminución de -1.54 %/año.

Los valores tan bajos obtenidos de coeficiente de escurrimiento en la cuenca del río Zanatenco, incluso del 15%, dan cuenta del régimen hidrológico de la cuenca, por lo que junto con tan poca precipitación y el gran déficit de humedad de los últimos años la mayor parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo de la cuenca y no alcanza a escurrir. Por otra parte, debido a que las cantidades de los eventos de precipitación de los años secos son tan pequeñas el agua infiltrada no alcanza a percolarse profundamente como para incorporarse al acuífero o descargar después en la temporada de secas como flujo base.

Las condiciones anteriores, representan un desequilibrio en la disponibilidad de agua y los servicios hidrológicos que proporciona la cuenca del río Zanatenco.



Cauce del río Zanatenco durante el estiaje

3. EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS: INUNDACIONES Y SEQUÍAS

A partir del análisis y procesamiento estadístico de la información disponible en la estación climatológica Tonalá para el periodo de registro 1961-2013, se obtienen los datos máximos de precipitación (mm) en 24 horas, de evaporación (mm) y temperatura (°C) que se muestran en el Cuadro 14. Estos parámetros, están asociados a la incidencia de eventos hidrometeorológicos extremos en la región como las inundaciones, causadas por la precipitación máxima en 24 horas, y las sequías relacionadas con la evaporación y la temperatura máximas en 24 horas.

Desde un punto de vista estadístico, se define como evento extremo a aquel cuya probabilidad de ser igualado o superado es muy pequeña; sin embargo, la definición de “muy pequeña” es subjetiva. En el caso de inundaciones y sequías, la principal dificultad está en establecer la magnitud del evento al que se refiere; es decir, la cantidad de lluvia que cae en cierto intervalo de tiempo, la magnitud y duración de la creciente del río, etcétera. Es necesario referirse entonces a la magnitud de los eventos pero también a los impactos que eventualmente podría representar. Entonces la definición de eventos extremos está intrínsecamente relacionada a la magnitud del fenómeno natural perturbador pero también con las condiciones específicas de la zona expuesta a la ocurrencia del fenómeno perturbador (Arganis *et al.*, 2010).

Según los escenarios de cambio climático formulados por el IPCC, las condiciones de sequías e inundaciones en México van a ser más frecuentes y probablemente más intensas (Magaña, 2004).

Los años que presentaron los eventos máximos en 24 horas de precipitación fueron: 1963, 1980, 2005, 2006 y 2013; los de evaporación máxima diaria: 1970, 1993, 2001, 2003, 2005 y, 2008; y los de temperatura máxima diaria: 1962, 1969, 1997, 1998, 2002, 2004 y, 2006.

Asimismo, los eventos climatológicos extremos máximos históricos diarios y sus magnitudes se presentaron en las siguientes fechas: precipitación el 31 de julio 2006 con 312.7 mm, evaporación el 17 de mayo de 1970 con 17.5 mm y, temperatura el 5 de mayo de 1997 con 42.5 °C y el 16 de mayo de 1998 también se registraron 42.5 °C (Cuadro 14).

Entonces el año con el mayor evento de lluvias extremas máximas fue 2006 (periodo de La Niña), la mayor tasa de evaporación diaria extrema en 1970 comprendido entre los años Niño 1969 y 1972 y, la mayor temperatura máxima los años de 1997 y 1998 (periodo de El Niño).

Cuadro 14. Eventos climatológicos históricos extremos diarios en la estación climatológica Tonalá, Chiapas para el periodo 1961-2013.

Año	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	Temperatura (°C)
1961	96.0	10.8	41.0
1962	139.0	12.1	42.0
1963	290.0	13.1	41.5
1964	111.0	13.6	41.0
1965	90.0	13.8	40.5
1966	93.0	15.8	41.0
1967	148.0	15.0	41.5
1968	115.0	16.0	39.5
1969	125.8	16.3	42.0
1970	96.8	17.5	41.5
1971	66.0	N/D	38.5
1972	88.2	15.3	41.0
1973	151.0	14.0	41.0
1974	142.8	14.4	39.0
1975	54.2	12.6	41.5
1976	79.8	13.2	41.0
1977	84.0	15.7	41.0
1978	82.9	15.3	40.1
1979	74.8	15.6	40.5
1980	257.5	14.3	41.0
1981	217.1	14.3	40.5
1982	125.4	14.5	39.5
1983	76.0	12.2	40.0
1984	149.6	15.1	39.0
1985	95.4	16.0	40.0
1986	107.1	14.8	39.0
1987	75.8	15.1	40.5
1988	214.8	15.6	41.0
1989	208.5	16.1	40.0
1990	75.1	12.7	39.0
1991	105.3	13.5	39.0
1992	82.2	15.0	42.0
1993	171.7	17.2	40.0
1994	85.0	14.3	39.5
1995	230.6	13.8	40.5
1996	112.6	15.1	40.5
1997	165.2	14.9	42.5
1998	180.8	15.4	42.5
1999	96.0	13.6	38.1
2000	92.1	16.2	39.5
2001	57.1	16.7	41.5
2002	136.4	15.8	42.0
2003	115.4	17.4	41.5
2004	90.9	13.3	42.5
2005	269.6	16.7	41.0
2006	312.7	14.1	42.0
2007	144.8	14.9	41.0
2008	125.4	17.0	41.5
2009	128.0	N/D	41.0
2013	255.0	N/D	N/D

Por otra parte, del Cuadro 14 se obtienen los siguientes periodos con la presencia de eventos extremos: Precipitaciones de 2005 a 2013; evaporación de 2001 a 2008 y; temperatura de 1997 a 2006. Entonces, en los últimos años de 1997 a la fecha, los eventos hidrometeorológicos extremos de precipitación asociados a inundaciones así como de evaporación y temperaturas asociadas a sequías, se han presentado con mayor frecuencia e intensidad en la región.

Para los escenarios de cambio climático, se predicen en México cambios en el régimen hidrometeorológico, particularmente en la frecuencia de eventos extremos como las sequías y las inundaciones (Martínez, 2007).

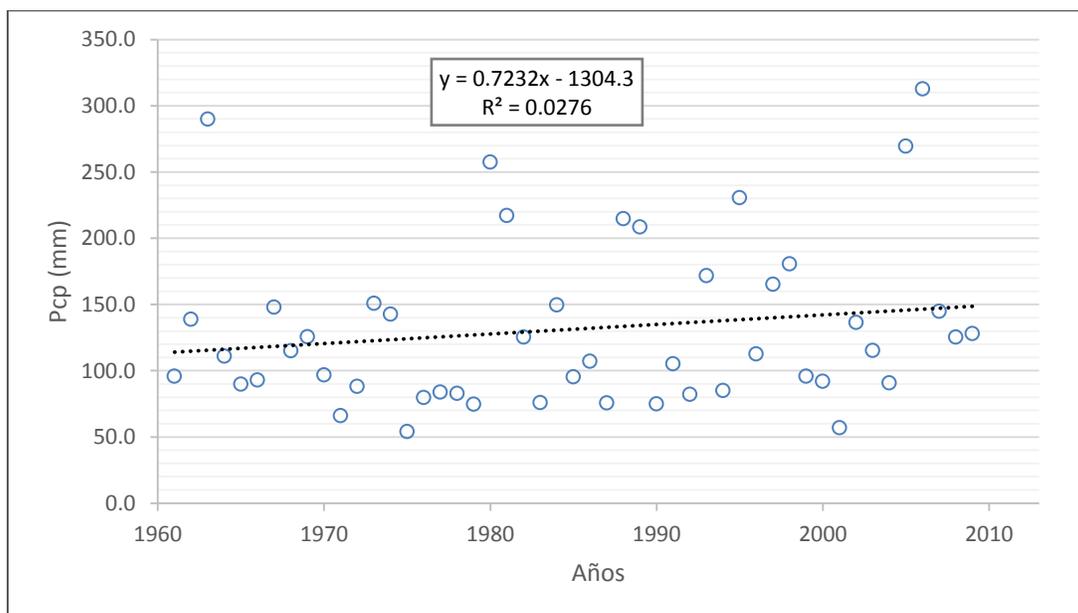
En este apartado, se abordaran las inundaciones que afectan a la región de estudio, posteriormente se dedica un apartado a las sequias, también recurrentes en la región.

3.1 Eventos extremos: Inundaciones

3.1.1 Precipitación máxima en 24 horas

La precipitación máxima en 24 horas es el evento hidrometeorológico extremo cuya magnitud y probabilidad de ocurrencia determina junto con las condiciones hidrológicas de la cuenca, la magnitud de las crecientes de inundación de un cauce o río.

Figura 30. Variabilidad de la precipitación máxima en 24 horas (mm) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2013).



Fuente: Elaboración propia.

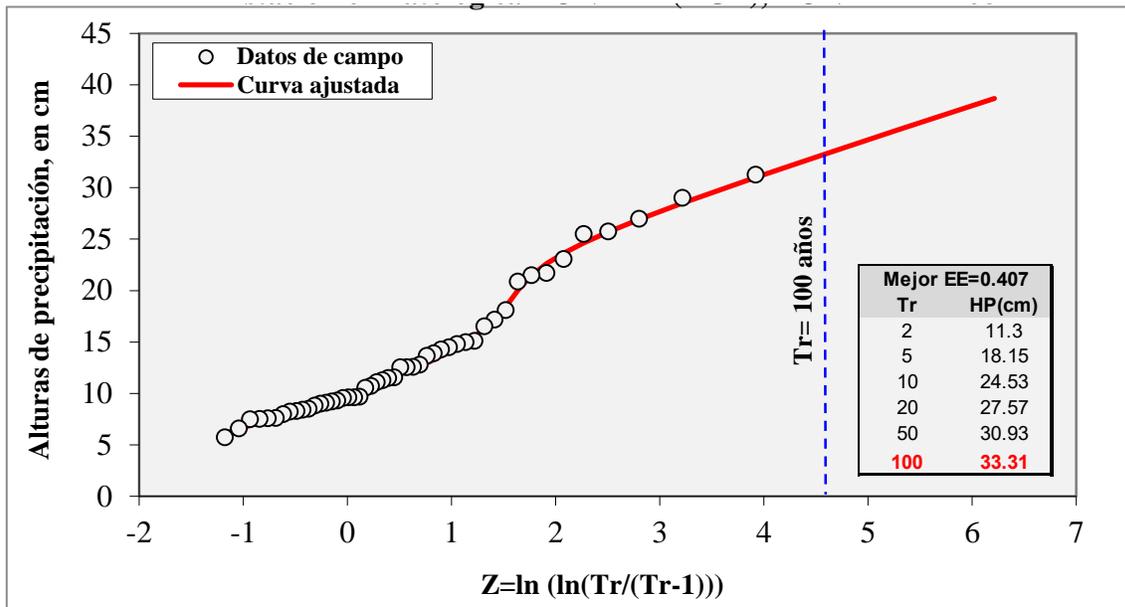
Para la estación Tonalá durante el periodo de registro (1959-2013), las precipitaciones máximas en 24 horas registradas fueron de 312.7 mm en 2006, de 290.0 mm en 1963 y de 269.6 mm en 2005 con el Ciclón Tropical *Stan* (Cuadro 14). Para la misma estación Imbach *et al.*, (2013) reportan para el periodo de estudio 1964-2003, una precipitación máxima en 24 horas de 257.5 mm correspondiente a 1980, debido a que su periodo de estudio no comprendió los eventos máximos de los años 1963, 2005 y 2006 mismos que fueron mayores al reportado para 1980.

En su estudio del patrón de lluvias de la Costa de Chiapas, Escalante (2006) reporta en la estación Tonalá, como los años con tormentas más severas a 1963 y 1998 con lluvias acumuladas en 10 días cercanas a los 800 mm.

En su análisis de precipitaciones diarias en periodos de diez años para la estación Tonalá, Imbach *et al.* (2013), reportan valores de precipitación en 24 horas

mayores de 150 mm asociados a fenómenos climáticos muy fuertes (en 1998 la precipitación máxima fue de 180.8 mm); sin embargo, en su periodo de estudio (1964-2003) según se observa en el Cuadro 14, quedaron fuera de su análisis años muy lluviosos como el 2005, 2006 y 2013 con precipitaciones máximas en 24 horas mayores de 260 mm asociados a fenómenos hidrometeorológicos extremos el Ciclón Tropical *Stan* de octubre de 2005 y las tormentas tropicales *Bárbara* de mayo de 2013 e *Ingrid* y *Manuel* de septiembre del mismo año.

Figura 31. Distribución probabilística de la precipitación máxima en 24 horas en la estación Tonalá, Chiapas (1961-3013).



Fuente: Elaboración propia.

Para el ajuste de datos históricos a diferentes funciones probabilísticas de precipitaciones máximas en 24 horas se aplicó el programa AX desarrollado por Jiménez, *et al.*, (1997).

La función de mejor ajuste corresponde a la doble Gumbel con un error estándar de 0.407. De esta forma, se obtienen los diferentes periodos de retorno que se muestran en el Cuadro 17. Las precipitaciones máximas en 24 horas como las de 1963 de 290.0 mm o las máximas históricas registradas de 2006 con 312.7 mm corresponden a periodos de retorno de alrededor de 50 años. Es decir, probabilísticamente se estima que precipitaciones mayores a 290 mm se presenten dentro de un periodo de 50 años.

Cuadro 15. Precipitaciones máximas en 24 horas para la estación Tonalá, Chiapas ajustadas a la función Gumbel para diferentes períodos de retorno (Tr).

Tr (años)	Prec max 24 horas (mm)
2	113.0
5	181.5
10	245.3
20	275.7
50	309.3
100	333.1

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Gastos máximos de escurrimiento en los ríos Zanatenco y Tiltepec

A partir de los datos históricos de gastos máximos anuales registrados en las estaciones de medición de escurrimiento de los ríos Tiltepec y Zanatenco, obtenidos de la base de datos BANDAS (CONAGUA, 2010b) que se muestran en el Cuadro 16, se aplica el programa AX (Jiménez, *et al.*, 1997), para su ajuste a diferentes funciones probabilísticas (Ordaz *et al.*, 2013).¹

Cuadro 16. Gastos máximos de escurrimiento anuales (m³/s) en los ríos Zanatenco y Tiltepec, Chiapas.

Año	Río Zanatenco	Río Tiltepec
1962	279.000	
1963	741.163	
1964	194.343	
1965	143.500	
1966	249.681	
1968	125.000	
1969	84.467	
1970	199.450	
1971	129.500	
1972	78.000	
1973	196.500	
1974	88.560	
1975	292.500	
1976	26.360	
1977	31.420	1.729
1978	100.857	6.147
1979	87.150	8.268
1980	158.650	
1981		18.680
1982	99.800	5.313

¹ BANDAS: Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, es la base de datos de medición de escurrimientos superficiales de los ríos con estaciones de aforo operadas por CONAGUA, a través de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos y Organismos de Cuenca.

1983	75.000	3.589
1984	96.440	
1985	137.400	
1986	68.022	
1989	234.560	
1990	45.655	
2003	21.832	
2004	13.169	
2005	48.182	
2008	16.010	
2009	16.040	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.1 Gastos máximos de escurrimiento en el río Zanatenco

Según se muestra en el Cuadro 18, los años con gastos de escurrimientos máximos en el río Zanatenco corresponden a 1963, 1966, 1975 y, 1989.

Para el río Zanatenco, la función de mejor ajuste corresponde a la Log Normal con un error estándar de 46.974, es decir con un buen ajuste. Según se muestra en el Cuadro 19, el gasto máximo de escurrimiento registrado en el río Zanatenco el 23 de septiembre de 1963 de 741.163 m³/s (SRH, 1969; CONAGUA, 2010a; 2015), corresponde a un periodo de retorno (Tr) cercano a los 100 años. Es decir, se estima que gastos de escurrimientos máximos mayores a 741.163 m³/s se presenten dentro de un periodo cercano a los 100 años.

Cuadro 17. Gastos máximos ajustados a la función Log Normal para diferentes períodos de retorno (Tr) en el río Zanatenco, Chiapas.

Tr (años)	Gastos máximos (m ³ /s)
2	90.27
5	201.03
10	305.50
20	275.70
50	431.64
100	825.78

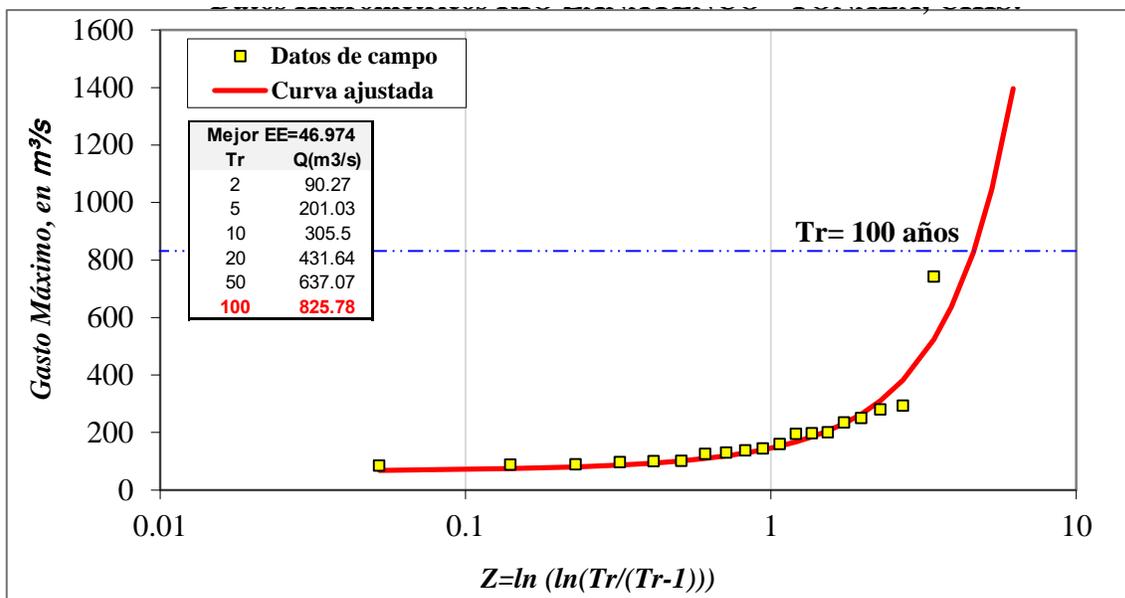
Fuente: Elaboración propia.

En su estudio hidrológico de la Costa de Chiapas, incluyendo las estimaciones de gasto de escurrimiento provocado por el impacto del huracán *Stan* de octubre de 2005, Domínguez *et al.* (2006) obtienen para el río Zanatenco los siguientes resultados: gasto de escurrimiento máximo (Qmax) de 741.2 m³/s; gasto de escurrimiento medio (Qmed) de 158.5 m³/s; desviación estándar de 142.5 y

coeficiente de variación de 0.90. Estos datos indican que el gasto de escurrimiento máximo estimado por el impacto del huracán *Stan* en el río Zanatenco fue menor al registrado en septiembre de 1963.

Domínguez *et al.*, (2006) ajustaron los datos hidrométricos del río Zanatenco (incluidos los datos estimados del huracán *Stan* de octubre de 2005) a una función doble Gumbel con la cual recomiendan los valores de gastos máximos y periodos de retorno (Tr) para el diseño de obras hidráulicas de protección contra inundaciones que se muestran en el Cuadro 20.

Figura 32. Distribución probabilística del escurrimiento máximo en el río Zanatenco, Chiapas (1962-2009).



Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, los valores obtenidos en este trabajo son similares a los reportados por Domínguez *et al.*, (2006), particularmente para los periodos de retorno de 5 y 100 años. Sin embargo, al incorporar los datos estimados del huracán *Stan* de octubre de 2005, los valores de caudal máximos para diferentes periodos de retorno de Domínguez *et al.*, (2006) son un mejor estimador para periodos de retorno mayores a 100 años.

Se puede concluir que los valores obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Domínguez *et al.*, (2006), particularmente para los periodos de retorno de 5 a 100 años, generalmente utilizados en el diseño de obras hidráulicas de protección contra inundaciones (CONAGUA, 2011).

Al incorporar los datos estimados del huracán *Stan* de octubre de 2005, los gastos máximos de escurrimiento para diferentes periodos de retorno reportados por Domínguez *et al.*, (2006) son un mejor estimador para periodos de retorno mayores a 100 años. Entonces los resultados obtenidos en este estudio se complementan con los de Domínguez *et al.*, (2006).

En su estudio sobre el efecto de los fenómenos climáticos extremos en los gastos de escurrimiento superficial extremos en los últimos 50 años en la cuenca del río Manas, provincia de Xinjiang, China, Tang y Lv (2016) ajustan los datos de escurrimiento a la función Person III y obtienen un gastos máximo de 1,116 m³/s para un periodo de retorno de 500 años. Para los autores, el incremento observado en la frecuencia de inundaciones en el río Manas a partir de 1990, probablemente se deba a las altas temperaturas que incrementan el deshielo de la nieve en la cuenca alta. De esta forma, el incremento del gasto de escurrimiento y el decremento de la precipitación anual, provocan la presencia de eventos extremos de inundaciones y sequías en la cuenca del río Manas.

Cuadro 18. Gastos máximos ajustados a una función doble Gumbel para diferentes periodos de retorno (Tr) en el río Zanatenco, Chiapas

Tr (años)	Gastos máximos (m ³ /s)
2	123.64
5	193.39
10	256.80
20	364.59
50	626.15
100	824.30
200	1,014.52
500	1,261.81
1,000	1,444.11
2,000	1,627.99
5,000	1,868.94
10,000	2,060.75

Fuente: Domínguez *et al.* (2006).

3.1.2.2 Gastos máximos de escurrimiento en el río Tiltepec

Según se muestra en el Cuadro 18, el año con escurrimiento máximo registrado en el río Tiltepec fue 1981 con 18.68 m³/s.

Para el río Tiltepec, la función de mejor ajuste corresponde a una función exponencial con un error estándar de 2.457. Los gastos ajustados a los diferentes periodos de retorno se muestran en el Cuadro 21.

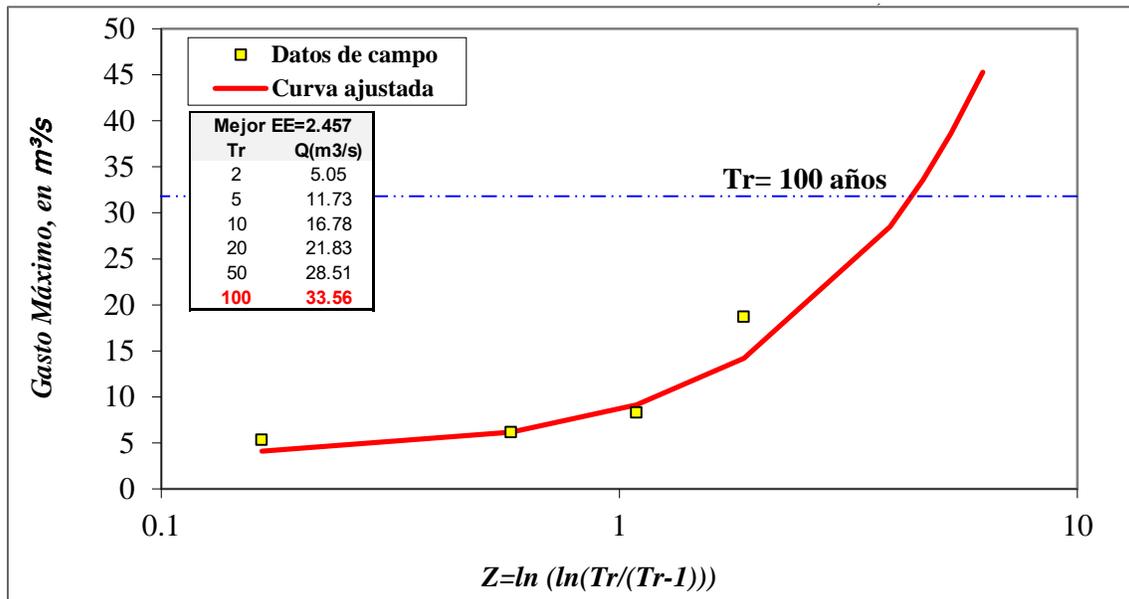
Cuadro 19. Gastos máximos ajustados a una función exponencial para diferentes períodos de retorno (Tr) en el río Tultepec, Chiapas.

Tr (años)	Gastos máximos (m ³ /s)
2	5.05
5	11.73
10	16.78
20	21.83
50	28.51
100	33.56

Fuente: Elaboración propia.

El gasto máximo de escurrimiento registrado en el río Tultepec de 18.68 m³/s en 1981 corresponde a un periodo de retorno cercano a los 20 años.

Figura 33. Distribución probabilística del escurrimiento máxima en el río Tultepec, Chiapas (1977-1983).



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en este trabajo para los gastos máximos de escurrimiento del río Tultepec son solo referenciales debido a que se tienen únicamente disponibles seis años con registro.

3.1.3 Inundaciones

Por su posición geográfica y condiciones naturales, en la región Istmo-Costa de Chiapas, donde se encuentran las cuencas de estudio, se presentan los siguientes tipos de inundaciones: pluviales, fluviales y costeras (Arganis, *et al.* 2011):

Las inundaciones pluviales se presentan cuando el suelo se satura por el agua precipitada, la lluvia excedente comienza a acumularse y puede permanecer horas o días. El agua acumulada es el agua precipitada sobre la zona y no proviene de otra parte, por ejemplo de la cuenca alta.

Las inundaciones fluviales se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie del terreno adyacente. A diferencia de las inundaciones pluviales, el agua que se desborda corresponde a la que se precipita en la cuenca de aporte y no necesariamente a la lluvia sobre la zona afectada. Las inundaciones costeras se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea de tormenta (generada por los vientos de ciclones tropicales) y permite que éste penetre tierra adentro e invada grandes extensiones de terreno.

En las cuencas costeras de la región Istmo-Costa, las inundaciones que mayores daños provocan son las fluviales derivadas de los eventos de precipitaciones extremas sobre las cuencas vertientes de la Sierra Madre que provocan grandes escurrimientos instantáneas y crecientes de tipo torrencial que afectan gravemente a los centros de población ubicados en sus márgenes y zonas de riesgo. Por otra parte, debido al grado de azolvamiento de los cauces de los ríos principales (derivado del proceso de erosión-sedimentación), los riesgos de desbordamientos de ríos e inundación son mayores, particularmente en la zona de descarga de los ríos en la planicie inundable.

En el Cuadro 20 se muestra un registro histórico de eventos extremos para el periodo 1963-2010 en la Costa de Chiapas. Se puede apreciar que en los últimos 50 años, las lluvias extremas, sequías e inundaciones, han sido particularmente frecuentes en la región costera de Chiapas.

Las tendencias en la mayor frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones y sequías) en los últimos años en la región Istmo-Costa, particularmente desde 1997, coincide con los periodos de mayor frecuencia e intensidad en la presencia de eventos extremos: precipitaciones de 2005 a 2013; evaporación de 2001 a 2008 y; temperatura de 1997 a 2006 en la región (Cuadro 14).

El impacto de los eventos hidrometeorológicos de septiembre de 1998 y del ciclón tropical *Stan* de octubre de 2005, fueron particularmente significativos en la región Istmo-Costa, ambos desastres mostraron el grado de vulnerabilidad de las comunidades de la Sierra Madre y Costa de Chiapas, particularmente de las comunidades costeras de la planicie así como las de pescadores del municipio de

Tonalá (Cuevas, 2009). En el municipio de Tonalá, Chiapas se estimaron por el impacto del ciclón tropical *Stan* de octubre de 2005, daños directos por un monto estimado de \$372,729,300; daños indirectos por un monto de \$804,057,598 para un total de daños por un monto de \$1,176,786,898 (CONAGUA, 2013).

Cuadro 20. Lluvias extremas, sequías e inundaciones reportadas para la Costa de Chiapas para el periodo 1963-2010

FECHA	EVENTO Y MUNICIPIOS AFECTADOS	FUENTE
3 al 5 septiembre 2010	Depresión tropical 11E	<i>Periódico Cuarto Poder.</i>
7 al 9 agosto 2010	Lluvia severa. Onda Tropical 21	<i>Periódico Cuarto Poder.</i>
25 al 29 junio 2010	Lluvia severa. Tormenta tropical <i>Alex</i>	<i>Periódico Cuarto Poder.</i>
2008	Vientos fuertes	Taller rural
7 junio 2007	Tormenta tropical <i>Bárbara</i>	<i>Periódico Cuarto Poder.</i> Taller rural 6
1 al 6 octubre 2005	Ciclón tropical <i>Stan</i> . Inundación, derrumbes, desbordamiento de 93 ríos. 41 municipios afectados	<i>Periódico Cuarto Poder.</i> Taller rural
26 noviembre 2003	Tormenta tropical <i>Larry</i> . 30 Municipios afectados	<i>Prensa nacional</i>
18 octubre 2002	Huracán <i>Isidore</i> . 21 Municipios afectados	<i>Prensa nacional</i>
7 octubre de 2002	Inundación, se desborda el río Suchiate	Vásquez (Coord.), 2008:73
24-26 septiembre 2002	Huracán, se desbordan ríos Vado Ancho, San Nicolás, Madre Vieja, Margaritas	Vásquez (Coord.), 2008:73
9 mayo de 2002	Tormenta, lluvias y vientos intensos, se desborda río Cacahoatán	Vásquez (Coord.), 2008:73
Marzo - abril 2002	Sequía e incendios muy fuertes	Taller rural
29 septiembre 1999	Lluvias, crecida río Coatán, deslaves, se desbordaron los ríos Coatán, Huehuetán, Cintalapa, San Nicolás, Pijijapan	Vásquez (Coord.), 2008:73
6 al 10 septiembre 1998	Depresiones tropicales <i>Isis</i> y <i>Javier</i> . Inundación, derrumbes	<i>Periódico Cuarto Poder.</i> Taller rural
2 al 3 de octubre 1997	Lluvias intensas y abundantes. Se desbordaron ríos Suchiate, Coatán, Huixtla, Despoblado, Cintalapa	Vásquez (Coord.), 2008:73
28 al 29 septiembre 1997	Huracán, se desborda el río Coatán	Vásquez (Coord.), 2008:73
3 al 7 de julio 1996	Tormenta tropical <i>Cristina</i> .	<i>Periódico Cuarto Poder</i>
22 al 23 septiembre 1995	Tromba en Tapachula y Huixtla	<i>Periódico Diario de Chiapas</i>
5 al 7 agosto 1995	Lluvias extremas	<i>Periódico Cuarto Poder</i>
10 septiembre 1992	Creciente máxima río Huehuetán	Registros de caudal
12 agosto 1992	Lluvias intensas en Huixtla.	<i>Periódico República en Chiapas</i>
1990	Inundación	Taller rural
16 al 23 septiembre 1989	Tormenta tropical <i>Hugo</i> . Daños en Tapachula y Huixtla.	<i>Periódico República en Chiapas</i>
7 al 9 septiembre 1988	Tormenta tropical <i>Deby</i> . Daños en Huixtla y Motozintla.	<i>Periódico República en Chiapas</i>
2 al 4 septiembre 1988	Ciclón <i>Christy</i> . Daños en Huixtla.	<i>Periódico República en Chiapas</i>
31 agosto al 2 de septiembre 1988	Lluvias extremas.	<i>Periódico Cuarto Poder</i>
2 septiembre 1988	Creciente máxima río Huehuetán.	Registros hidrométricos
23 al 25 agosto 1985	Tromba en Huixtla.	<i>Periódico República en Chiapas</i>

2 julio 1985	Derrumbes por lluvias en Tapachula.	<i>Periódico Cuarto Poder</i>
Marzo 1985	<i>Ventarrón</i>	Taller rural
23 septiembre 1982	Huracán, daños en ríos Huixtla y Coatán	Vásquez (Coord.), 2008:72
16 septiembre 1982	Desbordamiento del río Suchiate	Vásquez (Coord.), 2008:72
8 septiembre 1978	Lluvias extremas.	Registros de lluvia
14 al 15 de agosto de 1978	Lluvia torrencial en Tapachula.	<i>Periódico República en Chiapas</i>
23 al 24 septiembre 1974	Huracán e inundaciones en Huixtla y Tapachula	Vásquez (Coord.), 2008:72
19 al 20 septiembre 1973	Lluvias extremas.	Registros de lluvia
24 al 31 de agosto de 1973	Huracán <i>Catalina</i> .	<i>Periódico República en Chiapas</i>
1970	Lluvias fuertes	Taller rural
8 septiembre 1969	Inundación en Tapachula	Vásquez (Coord.), 2008:72
7 septiembre 1968	Creciente máxima río Huehuetán	Registros de caudal
1968	Sequía	Taller rural
1964	Inundación	Taller rural
25 al 26 septiembre 1963	Lluvias extremas	Registros de lluvia

Fuente: Arellano (2012).

3.1.3.1 Vulnerabilidad a inundaciones

En México la periodicidad de las avenidas e inundaciones dependen principalmente del número de tormentas tropicales y huracanes que llegan al territorio nacional a la vez que se prevén disminuciones de la precipitación total anual en el sur del país (Martínez, 2007).

Los modelos climáticos globales predicen aumentos considerables en la temperatura de los océanos, lo cual afectara la formación, movimiento, intensidad y la precipitación asociada a los ciclones tropicales (Prieto, 2008).

La presencia de huracanes provenientes del Pacífico pueden tener incidencia en la disminución de la precipitación en el sur de México por la convergencia de la humedad sobre la superficie del mar y no en la zona continental. Las estadísticas indican que los huracanes intensos han aumentado en los últimos treinta o cuarenta años, lo que podría estar relacionado con la tendencia negativa de las precipitaciones en el sur de México (Magaña, *et al.*, 2004).

En el plano de zonas de impactos potenciales por inundación de México, incluido en la Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (SEMARNAT, 2012), la Costa de Chiapas presenta una frecuencia de inundaciones con periodos de recurrencia de 5 a 50 años y un riesgo alto de deslizamiento de laderas provocados por lluvia.

Según el mapa de peligro por inundación elaborado por el CENAPRED en 2011, la región Istmo-Costa presenta un índice de peligro por inundaciones alto y zonas con cambios importantes en el uso del suelo (SEMARNAT, 2012).

El Atlas Estatal de Peligros del Programa Estatal de Protección Civil (2013-2018) muestra las zonas vulnerables a inundación en la Costa de Chiapas, así como las localidades en peligro de inundación de la región Istmo Costa.

Específicamente para el municipio de Tonalá, en la Figura 34 se muestran las comunidades en riesgo de inundación, deslizamientos, obstrucción de caminos por deslizamientos y crecimiento de ríos.

3.1.3.2 Los riesgos climáticos

En los Cuadros 21 y 22 se muestra la relación de fenómenos climáticos que se presentaron en la región Istmo-Costa, incluyendo sus características así como daños provocados, estimación de su costo económico y acciones de respuesta por el Sistema Estatal de Protección Civil para la región Istmo-Costa de Chiapas para los periodos 2010-2011 y 2012-2013 según diferentes boletines de prensa.

Cuadro 21. Riesgos climáticos en la región Istmo-Costa 2010-2011.

Nombre del fenómeno climático	Fecha del fenómeno	Características	Daños provocados y su costo	Acciones de respuesta
Frente Frio N°. 21	5 y 8 Enero/2010	En Arriaga, Tonalá y Cintalapa se presentan dos frentes fríos. Precipitaciones de 20 a 70 mm.	Se espera la presencia de vientos fuertes para la región Istmo-Costa, Arriaga y Tonalá principalmente.	Se ubicaron los refugios temporales más cercanos.
Onda Tropical 17	22/Julio/2010	Las lluvias que se presentaron y la baja presión en el Pacífico Sur, dejaron afectaciones en algunos municipios.	Desbordamiento del río Cintalapa, afectando el tramo carretero federal Arriaga-Tapachula, a la altura del km 216.	Cerraron el paso de la vialidad entre Acacoyagua y Escuintla.
Frente Frio N° 11	30/Nov/2010	En las próximas 24 a 36 horas se estará generando "norte" fuerte a intenso en la región Istmo-Costa.	Vientos dominantes de 20 a 40 km/hr, con rachas de hasta 90 km/hr en la región Istmo-Costa de Chiapas.	Se activaron las alarmas Naranja, Amarilla, Verde para cada zona.
Fuertes marejadas	18-20/mayo/2011	En Puerto Arista, Tonalá. Se pronostica la	Se evacuaron 4 familias en la playa San Benito, inundadas por el fuerte	Se colocaron banderas rojas en coordinación con

		presencia de olas con altura de más de 3 metros de altura, con pronósticos de arribo, durante los días 18, 19 y 20 de mayo.	oleaje.	la Capitanía de Puertos para dar a conocer que se cierra la navegación a embarcaciones menores.
Onda Tropical <i>Arlete</i>	30/Jun/2011	Se encuentra a 75 km al norte de Tuxpan, Veracruz y mantiene vientos máximos sostenidos de 100 km/h. Se desplaza al oeste a 13 km/h y se espera que comience a disiparse dentro de las próximas 36 horas.	Se han ocasionado lluvias fuertes para la región Istmo-Costa sobre todo en los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan y Mapastepec. El SMN registró máximas precipitación de 95.8 mm en el municipio de Arriaga.	Se activaron los consejos municipales, regionales y brigadas comunitaria de protección civil.
Onda Tropical No. 6	11/Jul/2011	Derivado de la presente temporada de Lluvias y Ciclones Tropicales. En Arriaga, Tonalá y Pijijiapan.	730 viviendas con daños entre leves, moderados y severos de acuerdo a los reportes del Instituto de Protección Civil	Hay un total de 176 personas albergadas, se mantiene el monitoreo y se recomienda extremar precauciones.

Fuente: elaboración propia con base en los Boletines de prensa de la Secretaría de Protección Civil de Chapas

De 2010 a 2013 cada año se han presentado fenómenos climáticos en la región, en total se han presentado diez. Lo cual da cuenta tanto de la frecuencia e intensidad en los últimos años de estos fenómenos en la región.

Los eventos hidrometeorológicos de los últimos años en la región, están relacionados con el fenómeno de La Niña 2010, considerado como uno de los años más lluviosos en la Costa y Sierra Madre de Chiapas y 2013 como uno de los años más lluviosos en la región con 2,046.3 mm, según se mostró en el apartado correspondiente.

En 2010 se presentaron los siguientes fenómenos climáticos: Frente Frio N° 21, Onda Tropical 17, Frente Frío N° 11. En 2011, las fuertes marejadas del 18 al 20 de mayo en Puerto Arista, la Onda Tropical *Arlete* y la Onda Tropical No. 6. En 2012 la Tormenta tropical *Carlota* y en 2013 el Frente Frio N. 19, el huracán *Bárbara* y la Tormenta tropical *Ingrid* y Manuel.

Cuadro 22. Riesgos climáticos en la región Istmo-Costa 2012-2013.

Nombre del fenómeno climático	Fecha del fenómeno	Características	Daños provocados y su costo	Acciones de respuesta
Tormenta tropical <i>Carlota</i>	14/Junio/2012	Se ubica a unos 490 km al sur-suroeste de Arriaga, con vientos máximos sostenidos de 85 km/h	Se podría intensificar a Huracán Categoría 1, pudiendo impactar entre las costas de Oaxaca y Guerrero durante el transcurso de la noche o primeras horas del día sábado.	Se ubicaron los refugios temporales más cercanos.
Frente Frio N. 19	03/enero/2013	Las condiciones meteorológicas y el ingreso del Frente Frio N. 19, ocasiona vientos fuertes, con rachas superiores a los 80 km/h que favorecieron que el incendio avance hacia la REBISE.	El incendio se ubica a la altura del kilómetro 12 de la Autopista Arriaga – Ocozocoautla. Se tienen afectaciones en 20 hectáreas de arbolado adulto, pino y encino y 60 hectáreas de pasto mayor.	Se cuenta con una fuerza de tarea de 116 elementos, Brigadistas Comunitarios de Protección Civil.
La Tormenta Tropical Bárbara se convierte en Huracán.	30/Mayo/2013	Bárbara se intensificó a huracán categoría —1— Ubicado a 30 km al sur de barra San Francisco, Oaxaca, rumbo al nor-noreste; por lo que se prevén lluvias torrenciales en Chiapas y Oaxaca	Ante la presencia de vientos muy fuertes sobre la región de La Ventosa, pueden presentarse olas de hasta 5 metros de altura y vientos de 90 km por hora con rachas superiores a los 120 km/hr.	Se realizan evacuaciones en diversas comunidades de la costa en el municipio de Arriaga, en donde aproximadamente se espera la movilización de 4 mil 200 personas.
Tormenta tropical <i>Ingrid y Manuel</i>	14/Sept/ 2013	A causa de la interacción entre la Tormenta tropical <i>Ingrid y Manuel</i> , la lluvia acumulada en las últimas 48 horas supero los 300 mm en el municipio de Pijijiapan.	Se presentaron desbordamientos en los ríos Zanatenco en Tonalá, afectando la localidad de La Laguna e inundando diversos cultivos y potreros.	Los pobladores fueron trasladados a los refugios temporales previamente establecidos.

Fuente: Elaboración propia con base en los Boletines de prensa de Protección Civil.

3.1.3.3 Medidas de atención ante los riesgos climáticos

Después del impacto de las contingencias por inundaciones, a solicitud del gobierno estatal, y una vez valorada la intensidad y frecuencia de fenómeno hidrometeorológico, el gobierno federal emite la declaratoria de emergencia para atender la emergencia con recursos del Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN).

En el Cuadro 23 se muestra la relación de declaratorias de emergencia por lluvias extremas, sequías e inundaciones reportadas para los municipios de la región Istmo-Costa de Chiapas, en el periodo 2010-2014.

En solo cinco años se han emitido seis declaratorias de emergencia por lluvias severas, tormentas tropicales, huracanes e inundaciones. Los eventos más significativos por su magnitud e impacto de los daños ocasionados fueron las lluvias severas de septiembre de 2010 y el huracán *Bárbara* del 29 y 30 de mayo de 2013, que devastó con sus ráfagas de vientos una parte significativa de la Reserva de la Biósfera de la Sepultura (REBISE). Posteriormente, en septiembre de ese mismo año, se presentaron lluvias severas e inundaciones.

Cuadro 23. Declaratorias de emergencia por contingencias hidrometeorológica en la región Istmo-Costa de Chiapas para el periodo 2010-2014.

Fecha	Evento	Municipios afectados en la zona de estudio
1-5 junio 2014	Tormenta tropical <i>Boris</i>	Arriaga y Tonalá
12-15 septiembre 2013	Lluvia severa e inundación fluvial	Arriaga
29-30 mayo 2013	Huracán <i>Bárbara</i>	Arriaga y Tonalá
20 septiembre 2011	Lluvia severa	Arriaga
25-27 septiembre 2010	Lluvias severas	Pijijiapan
3-5 septiembre 2010	Lluvias severas	Arriaga y Tonalá

Fuente: Elaboración propia.

Una vez superada la emergencia, generalmente se realizan trabajos de reconstrucción de la infraestructura dañada con recursos provenientes del FONDEN.

En los ríos y cauces de la región, la CONAGUA ha realizado trabajos de limpieza y desazolve de ríos, de restitución de bordos de protección entre otros. En los Cuadros 18, 19 y 20, se muestra la relación de estos trabajos para cada una de las declaratorias de emergencia por lluvia severa del 20 de septiembre de 2011, del Huracán *Bárbara* del 29 al 30 de mayo de 2013 y, por lluvia severa e inundación fluvial del 12 al 15 de septiembre de 2013, respectivamente.

En la emergencia por lluvia severa del 20 de septiembre de 2011, CONAGUA invirtió un importe de \$9, 916, 653.91 de recursos provenientes del FONDEN en la limpieza y desazolve de ríos en la descarga del río Lagartero (5 kilómetros) y, el río Las Arenas (6 kilómetros), según se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 24. Trabajos de reconstrucción de infraestructura hidráulica a cargo de CONAGUA con recursos del FONDEN derivados de la declaratoria de emergencia por lluvia severa el día 20 de septiembre de 2011

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS	MONTO CONTRATADO (\$)	MUNICIPIO	LOCALIDADES
Limpieza y desazolve del cauce del río Lagartero en una longitud aproximada de 1.50 km. a la altura de la pesquería Punta Flor, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	1,489,787.28	Arriaga	Pesquería Punta Flor
Limpieza y desazolve del cauce del río las arenas en una longitud aproximada de 6.00 km. a altura de la ranchería Oxaquita, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	8,426,866.63	Arriaga	Ranchería Oxaquita

Fuente: Elaboración propia.

En las obras de reconstrucción del Huracán *Bárbara* del 29 al 30 de mayo de 2013, CONAGUA invirtió un importe total de \$58,157,556 de recursos del FONDEN en limpieza y desazolve de ríos, restituciones de bordos de protección marginal y formación de cauce en diferentes tramos de los ríos Lagartero, Zanatenco, Riíto, Agua Dulce, Las Hermanas y, Jesús los municipios de Arriaga y Tonalá, Chiapas (Cuadro 20).

En la reconstrucción de daños del Huracán *Bárbara*, CONAGUA invirtió \$17,770,160 en la limpieza y excavación del cauce (desazolve) de 11 kilómetros y restitución de 250 metros de bordo del río Zanatenco. Por otro lado, en el río Riíto invirtió \$8,555,774 en la limpieza y excavación del cauce (desazolve) de 10 kilómetros y \$3,398,834.26 en la restitución de 150 metros de bordo (Cuadro 20).

En la reconstrucción de los daños provocados por las lluvias severas e inundaciones fluviales del 12 al 15 de septiembre de 2013, CONAGUA invirtió en estudios, proyectos y supervisión de obras \$4,123,809 y; en la limpieza y desazolve de ríos y, restitución de bordos de protección \$39,755,897.95 en los ríos Las Arenas, Nicolás Bravo y, La Azteca municipio de Arriaga (Cuadro 21).

Cuadro 25. Trabajos de reconstrucción de infraestructura hidráulica a cargo de CONAGUA con recursos del FONDEN derivados de la declaratoria de emergencia por el Huracán *Bárbara* del 29 al 30 de mayo de 2013, que afectó a los municipios de Arriaga y Tonalá, Chiapas.

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS	MONTO CONTRATADO (\$)	MUNICIPIO	LOCALIDADES
Limpieza y excavación de cauce piloto para la restauración del cauce del río Jesús en una longitud aproximada de 1.3 kilómetros, desde 500 metros hacia aguas arriba y 800 metros hacia aguas abajo aproximadamente del puente del ferrocarril, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	3,454,272.25	Tonalá	Ejidos piedritas y varias rancherías
Restitución del barrote natural con protección marginal en 300 metros y limpieza y excavación de cauce piloto para la restauración del cauce del río Lagartero a la altura de la pesquera punta flor, en una longitud aproximada de 0.500 kilómetros, en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	6,072,377.15	Arriaga	Comunidad pesquería Punta Flor
Restitución del bordo con protección marginal, en 250 metros del cauce del río Zanatenco, a la altura del ejido la laguna y Villahermosa, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	4,139,411.24	Arriaga	Comunidades La Laguna y Villahermosa
Restitución del barrote natural con protección marginal en 150 metros a la altura de las colonias (colonia unidad magisterial costa chica, colonia San Miguel, colonia milenio y colonia evolución) en la cabecera municipal en el río Riíto, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	3,398,834.26	Tonalá	Cabecera municipal y Colonias varias
Limpieza y excavación de cauce piloto para la restauración del cauce del río Riíto en una longitud aproximada de 10.0 kilómetros, desde 500 metros aproximadamente antes de la descarga del río al estero de paredón, en el municipio de tonal, en el estado de Chiapas.	8,555,774.77	Tonalá	Rancherías varias
Limpieza y excavación del cauce piloto para la restitución del cauce del río Las Hermanas, en una longitud aproximada de 6.0 kilómetros, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	4,405,429.69	Tonalá	Ranchería El Jobo, ejido La Joyita y ejido Los Cocos
Limpieza y excavación de cauce piloto para la restitución del cauce del río Zanatenco en una longitud aproximada de 11.0 kilómetros, desde 500 metros aguas abajo del puente del libramiento de la carretera federal hasta el puente de la laguna y protección marginal en 100 metros, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	17,770,160.66	Tonalá	Comunidades varias
Restitución del barrote natural con protección marginal en 100 metros del cauce, río Agua Dulce, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	1,549,495.32	Tonalá	Comunidad Josefa Ortiz de Domínguez y varias
Limpieza y excavación de cauce piloto para la restauración del cauce del río Agua Dulce en una longitud aproximada de 6.0 kilómetros, en el municipio de Tonalá, en el estado de Chiapas.	8,811,801.39	Tonalá	Comunidad Josefa Ortiz de Domínguez y varias

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 26. Trabajos de reconstrucción de infraestructura hidráulica a cargo de CONAGUA con recursos del FONDEN derivados de la declaratoria de emergencia por lluvia severa e inundación fluvial del 12 al 15 de septiembre de 2013 en el municipio de Arriaga, Chiapas.

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS	MONTO CONTRATADO (\$)	MUNICIPIO	LOCALIDADES
Estudios y proyectos ejecutivos del río las arenas para las obras de restitución, limpieza y restauración ubicado en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	923,283.69	Arriaga	varias
Estudios y proyectos ejecutivos del río lagartero para las obras de restitución, limpieza y restauración ubicado en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	902,735.61	Arriaga	varias
Estudios y proyectos ejecutivos de los ríos Nicolás Bravo y La Azteca para las obras de restitución, limpieza y restauración ubicado en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	526,022.24	Arriaga	varias
Limpieza y restauración del cauce del río las arenas en una longitud aproximadamente de 4.00 kilómetros a partir del puente de la carretera federal Arriaga - Chahuites - Tapanatepec hacia aguas abajo, en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	6,226,589.77	Arriaga	Ejido Oaxaquita
Supervisión técnica y financiera de los contratos que se ejecutan para atender, los daños ocasionados por la lluvia severa del 12 al 15 de septiembre de 2013, en los municipios de Arriaga y Cintalapa, en el estado de Chiapas.	908,688.33	Arriaga y Cintalapa	varias
Limpieza y restauración del cauce del río lagartero en una longitud aproximada 2.50 kilómetros, a partir del puente del libramiento de Arriaga carretera Tapanatepec - Arriaga - Tonalá, 1.90 kilómetros hacia aguas abajo y 600 metros aguas arriba, en el municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	5,468,181.92	Arriaga	Comunidad Malpaso y Colonia La Azteca
Restitución del bordo en tramos dispersos, con protección marginal en la margen derecha del río azteca en una longitud aproximada de 350 metros, ubicado a partir del puente de la carretera federal Arriaga - chahuites - Tapanatepec hacia aguas abajo, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	5,297,759.46	Arriaga	Colonia La Azteca
Restitución del barrote natural con protección marginal de la margen izquierda del río lagartero en una longitud aproximada de 400 metros, ubicado entre las comunidades de la ranchería puntas flor y ejido villa de mar, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	9,624,029.49	Arriaga	Ejido Punta Flor
Restitución del bordo en tramos dispersos, con protección marginal de la margen derecha del río las arenas en una longitud aproximada de 400 metros, ubicados a partir del puente de la carretera federal Arriaga - Chahuites - Tapanatepec hacia aguas abajo, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	7,957,606.40	Arriaga	Ejido Oaxaquita
Estudio, gestión y verificación de términos y condicionantes según normatividad ambiental en los contratos que se ejecutan en los municipios de Arriaga y Cintalapa, en el estado de Chiapas.	863,079.29	Arriaga y Cintalapa	varias
Limpieza y restitución del cauce del río Nicolás Bravo en una longitud aproximada de 4.00 kilómetros, a partir del puente de la carretera Arriaga-Lázaro Cárdenas; 2.00 kilómetros hacia aguas arriba y 2.00 kilómetros hacia aguas abajo, municipio de Arriaga, en el estado de Chiapas.	2,829,689.37	Arriaga	Colonia Nicolás Bravo

Fuente: Elaboración propia.

Es importante anotar que como lo marcan las reglas de operación del FONDEN, los trabajos de reconstrucción de obras están orientados a restituir las condiciones de funcionamiento que tenían las obras antes del evento, por lo que no se autorizan trabajos de mejoramiento de infraestructura que en el caso de las obras de protección, las haga más seguras y/o resistentes a los impactos de las crecientes de los ríos como el colocar muros de protección con gaviones a los bordos, sobre-elevar bordos o construir por ejemplo nuevos tramos de bordos de protección con arcilla compactada.

A partir de la evaluación de los impactos del huracán *Bárbara* en la REBISE, que realizó el proyecto ECOSECHAS (Conservación Internacional, 2013), la CONANP ejerció recursos provenientes del FONDEN para realizar trabajos de reforestación, restauración y establecimiento de prácticas de conservación del suelo y agua.

3.2 Eventos extremos: Sequías

3.2.1 Temperaturas diarias extremas máximas

La “temperatura máxima” es la mayor temperatura registrada en un día y que se presenta generalmente entre las 14:00 y 16:00 horas; la “temperatura máxima media” constituye el valor normal o promedio histórico de la temperatura máxima del mes o periodo de estudio en cuestión; mientras que la “temperatura máxima *maximorum*” es el valor máximo presentado a nivel diario para el mes o periodo de estudio en cuestión durante la serie histórica de datos (Serrano *et al.*, 2006).

En este trabajo, la temperatura diaria extrema máxima se refiere a la “temperatura máxima *maximorum*” a nivel diario para cada año de la serie histórica de datos.

La variabilidad de los eventos de temperaturas máximas históricas en la estación climatológica Tonalá, se muestran en la Figura 18. Los eventos históricos de temperaturas máximas varían de 38.5 a 42.5 °C.

Los eventos máximos de temperatura diaria mayores de 42 °C se presentaron en Tonalá los años 1962, 1969, 1997, 1998, 2002, 2004 y, 2006 (Cuadro 14).

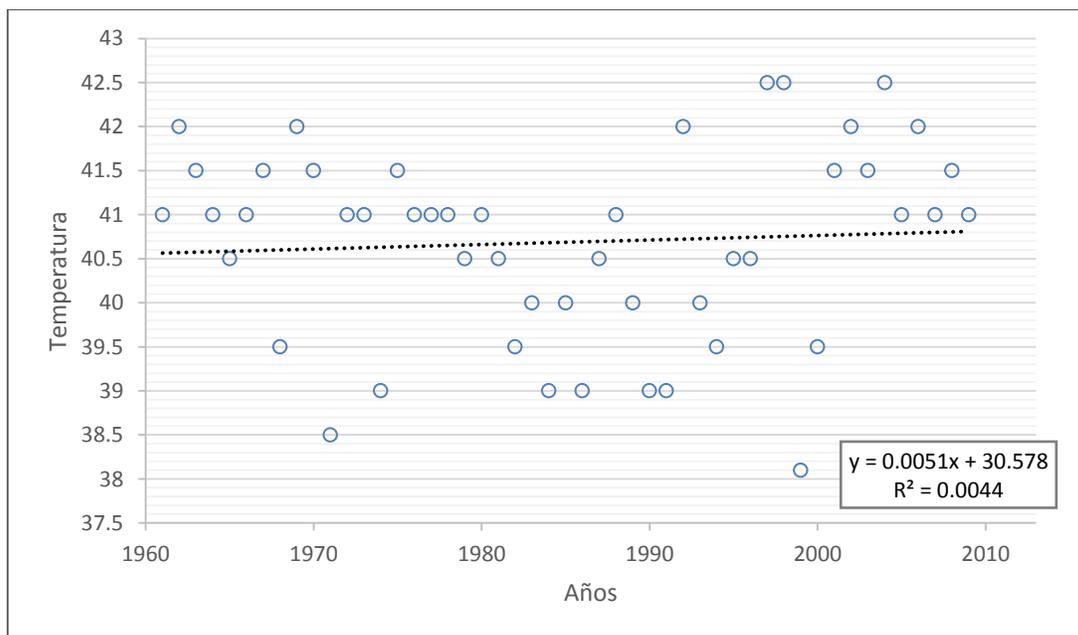
En los últimos años, a partir de 1997 los eventos de temperaturas máximas asociadas a sequías, se han presentado con mayor frecuencia e intensidad en la región. Los eventos extremos de temperatura diaria de 1962 están asociados a El Niño 1962-1963, de 1969 al fenómeno de El Niño de ese año, los de 1997-1998 al fenómeno de El Niño de ese periodo y las de 2004 y 2006 están asociadas a El Niño de 2005.

Imbach *et al.*, (2013) reportan, para el periodo de estudio de 1964-2003, valores de temperatura máxima mayores de 42 °C, se mantiene a lo largo del periodo analizado en el mes de febrero.

Las temperaturas máximas superiores a los 41.5 °C no se presentaron de 1970 a 1992. Debido a que el valor de R^2 del modelo lineal de regresión es muy bajo ($R^2 = 0.0044$), los datos históricos muestran una gran dispersión; sin embargo, se obtiene una tendencia creciente de 0.0051 °C/año. De seguir esta tendencia, en los próximos 100 años, se tendría un incremento de 0.51 °C.

En su estudio de índices climáticos en 16 estaciones climatológicas de Chiapas, de las cuales dos corresponden a la Costa de Chiapas (estaciones 7129 y 7113) para el periodo 1960-2009, De la Mora *et al.*, (2016) obtienen oscilaciones con tendencias crecientes en la temperatura máxima extrema con temperaturas mayores a 38 °C con promedios móviles de 4 años. Los autores reportan los años con temperaturas extremas mayores a 38 °C en 1986, 2003 y 2009.

Figura 35. Variabilidad de la temperatura extremas máximas diarias (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



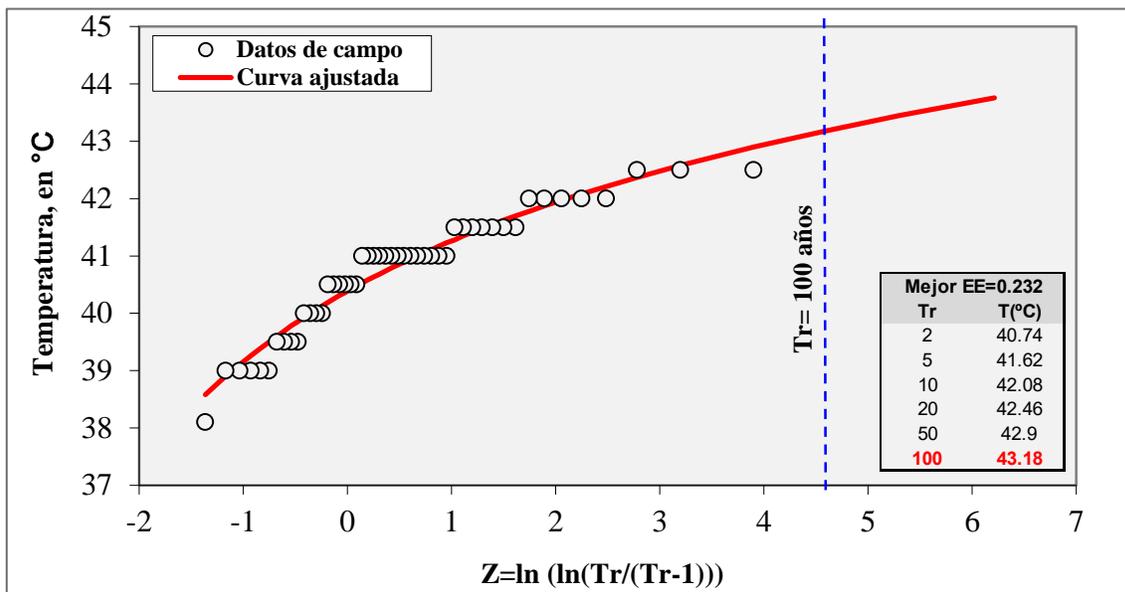
Fuente: Elaboración propia.

Otros estudios reportan que los meses con temperaturas máximas mayores a 42 °C, han correspondido a los meses de febrero a mayo, mismos que se mantienen a lo largo del periodo de estudio de 1964 a 2003 (Imbach, *et al.* 2013).

Para el ajuste probabilístico de los datos históricos de temperaturas máximas diarias se aplicando el programa AX desarrollado por Jiménez, *et al.* (1997). La función de mejor ajuste corresponde a la función normal con un error estándar de 0.232 (Figura 36). En el Cuadro 36 se muestran los resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno.

La temperatura máxima registrada del 01 al 16 de mayo de 2016 en la región Istmo-Costa corresponde a la estación Tres Picos, municipio de Tonalá, Chiapas de 38 °C. La cual no ha superado la máxima histórica de 41 °C en esa estación. En la estación de Arriaga se registraron 41 °C mismos que aún no supera el registro histórico de esa estación de 42 °C (CONAGUA, 2016).

Figura 36. Distribución probabilística de la temperatura extrema máxima diaria (°C) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-3013).



Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en el Cuadro 27, las temperaturas máximas diarias mayores de 40 °C, se presentan cada dos años, las mayores de 41 °C cada cinco y, las mayores de 42.5 °C cada 20 años como las registradas en 1997, 1998 y 2004.

Cuadro 27. Temperaturas extremas máximas diarias para la estación Tonalá, Chiapas ajustadas a la función Normal para diferentes períodos de retorno (Tr).

Tr, años	Temperatura máxima diaria (°C)
2	40.7
5	41.6
10	42.1
20	42.5
50	42.9
100	43.2

Fuente: Elaboración propia.

Es importante anotar que las temperaturas máximas en 24 horas registradas en la temporada de secas de 1997 y 1998 (año en transición El Niño – La Niña) corresponden a las del año de El Niño y su sequía extrema registrada. Después durante la temporada de lluvias (ya establecido como año de La Niña), se presentaron en la región, las lluvias extremas que derivaron en la contingencia hidrometeorológica de septiembre de 1998.

3.2.2 Evaporación máxima diaria

Considerando que la evaporación es un parámetro fundamental en el balance de humedad y que la tasa de evaporación es resultado de la temperatura, la radiación solar, el viento y la humedad relativa. Estos factores nos dan un panorama de la sequía, que es el tema que nos ocupa en este apartado.

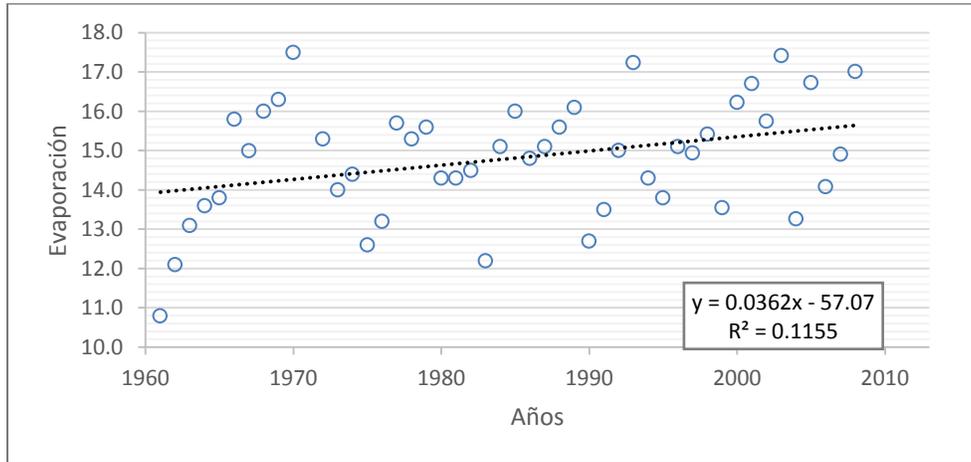
Se realizó el análisis de los eventos de evaporación máxima diaria durante el periodo de registro de 1961 a 2009 en la estación Tonalá, Chiapas (Figura 37).

Como se muestra en el Cuadro 14 y la Figura 37, los eventos máximos de evaporación diaria se presentaron en los años de 1970 (17.5 mm), 1983 (17.2 mm), 1993 (17.2 mm), 2001 (16.7 mm), 2003 (17.4 mm), 2005 (16.7 mm) y 2008 (17 mm).

En los últimos años, a partir de 2001 los eventos de evaporación máxima diaria asociadas a años secos o sequías, se han presentado con mayor frecuencia e intensidad en la región. Los eventos extremos de evaporación diaria de 1983 está asociado a El Niño 1982-1983 y la de 2005 a El Niño de ese mismo año. Es interesante anotar que la evaporación máxima diaria en los años 1997 y 1998 no fue tan alta (14.9 y 15.4 mm respectivamente) en estos años con presencia del fenómeno de El Niño de ese periodo 1997-1998.

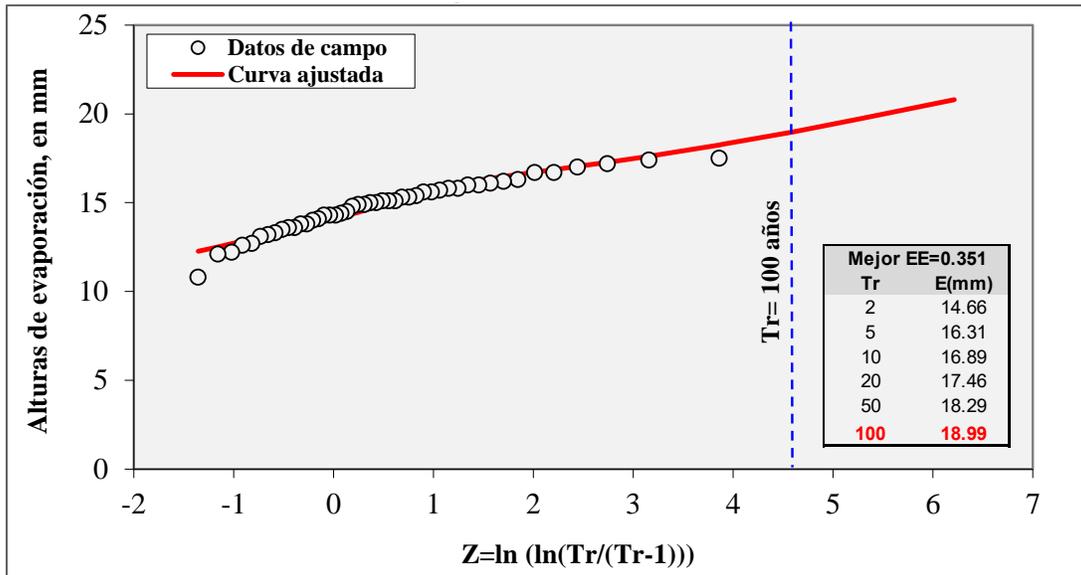
Para el ajuste probabilístico de los datos históricos de evaporación máxima diaria se aplicando el programa AX desarrollado por Jiménez, et al. (1997). La función de mejor ajuste corresponde a la función doble Gumbel con un error estándar de 0.351 (Figura 38). En el Cuadro 28 se muestran los resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno.

Figura 37. Variabilidad de la evaporación máxima diaria (mm) en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Distribución probabilística de la evaporación máxima en 24 horas en la estación Tonalá, Chiapas (1961-2009).



Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en el Cuadro 28, la evaporación máxima diaria de 17.5 mm, se presentan cada 20 años como las registradas en 1970, 1993 y, 2003.

Cuadro 28. Temperaturas máximas en 24 horas para la estación Tonalá, Chiapas ajustadas a la función Normal para diferentes períodos de retorno (Tr).

Tr, años	Evaporación max diaria (mm)
2	14.7
5	16.3
10	16.9
20	17.5
50	18.3
100	19.0

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Sequías

La sequía forma parte de la variabilidad natural del clima y es recurrente aunque sin un ciclo definido. La magnitud de sus impactos depende de la vulnerabilidad de los sistemas naturales y de la sociedad a esta condición. En las últimas décadas el aumento de la vulnerabilidad (hidrológica, agrícola y social) ante la sequía, se percibe como fenómenos cada vez más severos (SEMARNAT, 2012).

Considerando que la lluvia, como elemento natural del ciclo hidrológico, define por su magnitud y distribución temporal, las condiciones medias de humedad y las anomalías anuales (excesos, déficits). La intensidad de la sequía se estima como un déficit de lluvia (Velasco, 2012).

Para la caracterización de la sequía histórica en México generalmente se utiliza el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) propuesto por McKee *et al.* (Velasco, 2010 y CONAGUA, 2014).

El método del SPI consiste en ajustar el registro de lluvia mensual de una estación climatológica, a una función de distribución de probabilidad tipo Gamma incompleta (que en general es la que presenta mejor ajuste a los datos de lluvia), para después transformarla a una función de distribución de probabilidades normal estándar. Bajo esta transformación, los valores de la desviación estándar relativos a los valores transformados de lluvia, corresponden a los índices de sequía.

A partir de registros históricos de lluvia mensuales, el método permite hacer un análisis de la sequía a diferentes escalas temporales de meses, según la disponibilidad de datos y propósitos del estudio.

El valor del SPI representa la probabilidad de ocurrencia de una lámina de precipitación acumulada determinada. En índice SPI permite determinar la severidad y temporalidad de la sequía. Los valores del índice representan la condición de lluvia actual respecto a la serie histórica. De esta forma, láminas de precipitación mayores al promedio histórico del mes proporcionarían valores

positivos de SPI, mismos que indicaran exceso de humedad; por el contrario, láminas de precipitación menores al promedio histórico del mes definirán valores negativos de SPI, mismos que indicaran déficit de humedad. Los valores de SPI se clasifican como se muestra en el Cuadro 29.

Para la región hidrológica 023 Costa de Chiapas, aplico el SPI en las estaciones climatológicas con registros históricos mayores de 30 años (como es el caso de la estación Tonalá), en cuatro periodos de agregación: octubre-diciembre (SPI-3), octubre-marzo (SPI-6), octubre-junio (SPI-9) y octubre-septiembre (SPI-12).

Cuadro 29. Valores y fases del índice SPI.

VALOR	CARACTERÍSTICA
Mayor de +2	Extremadamente húmedo
+1.5 a +2	Muy húmedo
+1 a +1.5	Moderadamente húmedo
-1 a +1	Condiciones normales
-1 a -1.5	Sequía moderada
-1.5 a -2	Sequía severa
Menor de -2	Sequía extrema

Fuente: CONAGUA (2014), Velasco (2012).

En la estación climatológica Tonalá, considerada como representativa de la zona de influencia Istmo-Costa, la precipitación media anual obtenida es de 1,753.33 mm, mientras que Velasco (2012) reporta para la misma estación una precipitación media anual de 1,480.97 mm. Las diferencias entre ambos valores se deben a los diferentes periodos de análisis de información.

De acuerdo a los datos disponibles, los eventos de sequías históricas y su distribución entre fases o categoría de sequía, así como a los diferentes índices de precipitación estandarizados (SPI) aplicados, se muestran en el Cuadro 39.

Cuadro 39. Eventos de sequía en la estación Tonalá, Chiapas periodo 1961—2008

Fase o categoría de sequía	SPI			
	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12
Extremadamente húmedo	5	3	2	2
Muy húmedo	5	8	8	6
Moderadamente húmedo	21	23	21	29
Condiciones normales	124	114	120	112
Sequía moderada	9	11	5	6
Sequía severa	5	5	5	6
Sequía extrema	2	4	4	1

Fuente: CONAGUA (2014).

Según el estudio de CONAGUA (2014) con uso del SPI-12 (para el año hidrológico de 12 meses de octubre a septiembre), en el periodo de estudio (1961-2008), se

han presentado 46 eventos de sequía moderada, 44 de sequía severa y 6 de sequía extrema.

Los eventos de sequía extrema se presentaron los años 1971, 2000 y 2001. Sin embargo, los años de 1971 y 2000 reportados en el estudio de CONAGUA (2014) con sequía extrema, no cuentan con registros históricos completos de lluvia. Por su parte Imbach *et al.* (2013), reportan también para la estación Tonalá que el año 2000 no tiene datos de lluvia completos. Por lo anterior, no es correcto afirmar que en los años 1971 y 2000 fueron de sequía extrema, únicamente se presentó en el año 2001.

La incidencia de sequía está relacionada con las precipitaciones que se presentan por debajo de la media histórica en periodos de 2 a 10 años. Según los registros históricos de lluvia, para la estación Tonalá los años secos (con menor precipitación anual) por debajo de 1,200 mm fueron los de 1975 (1,145 mm), 1977 (1,171.2 mm), 1987 (1,101.3 mm), 1994 (1,108.9 mm) y, 2001 (1,168.1 mm).

Según el comportamiento de la precipitación promedio mensual (Cuadro 10), se obtiene que valores de precipitación mensual acumulada mínima igual a cero se presentan en siete meses: octubre, noviembre, diciembre, enero febrero, marzo y abril. Destacan los valores de precipitación mensual acumulada cero en el mes de octubre de los años 1987 y 2009 considerados como años secos.

En su estudio de sequía realizado a nivel nacional con uso del SPI en celdas que permiten entender la variabilidad espacial del fenómeno, Velasco (2012) reporta para la Costa de Chiapas anomalías de lluvia anual que indican sequía en el año 1991 así como los periodos de sequía de 1992 a 1994 y de 1998 a 2002.

Para Tiscareño *et al.*, (1998), los años de 1963, 1965, 1969, 1972, 1982, 1987 y, 1997 fueron años secos con presencia del fenómeno de El Niño.

Según Magaña, *et al.* (2004), los años El Niño de 1982-1983 y 1997-1998 fueron de lo más extremos en el siglo XX, cuando la anomalía en la temperatura de la superficie del mar superó los 4 °C.

Los registros de lluvia corroboran como año seco 1987 (1,101.3 mm) asociado al fenómeno de El Niño de ese año, el 2001 (1,168.1 mm) con el periodo seco del índice SPI de 1998-2002, asociado a El Niño de 1997-1998.

Los años 2005 y 2010 fueron también años de transición El Niño – La Niña; es decir, muy secos y muy lluviosos.

La sequía de 1997 y de la primera parte de 1998 fue tan grave que se presentaron enormes pérdidas en la agricultura y se registró un record histórico en la incidencia de incendios forestales. Los costos del fenómeno Niño 1997-1998 en México fueron aproximadamente dos mil millones de dólares (Magaña, *et al.*, 2004).

Según el Programa de Acción ante el Cambio Climático del estado de Chiapas (PACCCH), El Niño de 1997-1998 fue el evento climático más severo del periodo 1982-2000 en Chiapas, evento que provocó un incremento significativo de las temperaturas máximas y el déficit de precipitación que ocasionó una gran cantidad de incendios forestales con impactos en 198,808 hectáreas en Chiapas (Gobierno del Estado de Chiapas, *et al.*, (2011).

Los cambios experimentados en el clima con el Niño vivido de mediados de 1997 a mediados de 1998 se manifestaron básicamente como alteraciones en el ciclo hidrológico y, consecuentemente, en la disponibilidad de agua (Magaña, *et al.*, 2004).

Los incrementos en las temperaturas de las áreas oceánicas están asociados a grandes anomalías en la lluvia proveniente de eventos ciclónicos. El Istmo de Tehuantepec, como en la región (Istmo-Costa de Chiapas), sufre un déficit de precipitación cuando se presentan temperaturas más elevadas que la media en el Océano Pacífico, particularmente en años de El Niño, lo cual es resultado de que la humedad se mueve hacia el mar acarreada por los fenómenos ciclónicos del Pacífico (Prieto, 2008).

En la región Istmo-Costa las temperaturas extremas de los años 1997 y 1998 fueron las máximas registradas de 42.5 °C con un gran déficit de humedad y riesgos de incendios forestales en la temporada de secas.

Durante los meses de junio a octubre de 1997, año de El Niño (parte del ciclo primavera-verano), se estimaron anomalías de precipitación en la región Istmo-Costa de Chiapas del 10 al 50% por abajo del promedio de lluvia del cuatrimestre (Tiscareño *et al.* 1998).

Asimismo, el periodo de estiaje del año 1998 fue particularmente deficitario en precipitación en Chiapas. Meses más tarde, en septiembre de ese año, debido a la transición del fenómeno de El Niño a La Niña, se presentaron lluvias extremas en la región Sierra Madre y Costa de Chiapas que provocaron la contingencia hidrometeorológica de septiembre de 1998, misma que provocó los impactos más severos que se han registrado en la historia reciente en la región Istmo-Costa (Arellano, 2012).

Las anomalías de precipitación del año 1998, particularmente en el trópico húmedo, en los estados de Tabasco, Campeche y Chiapas, fueron también reportadas por Velasco (2012) en su estudio a nivel nacional del SPI a escala temporal de 12 meses.

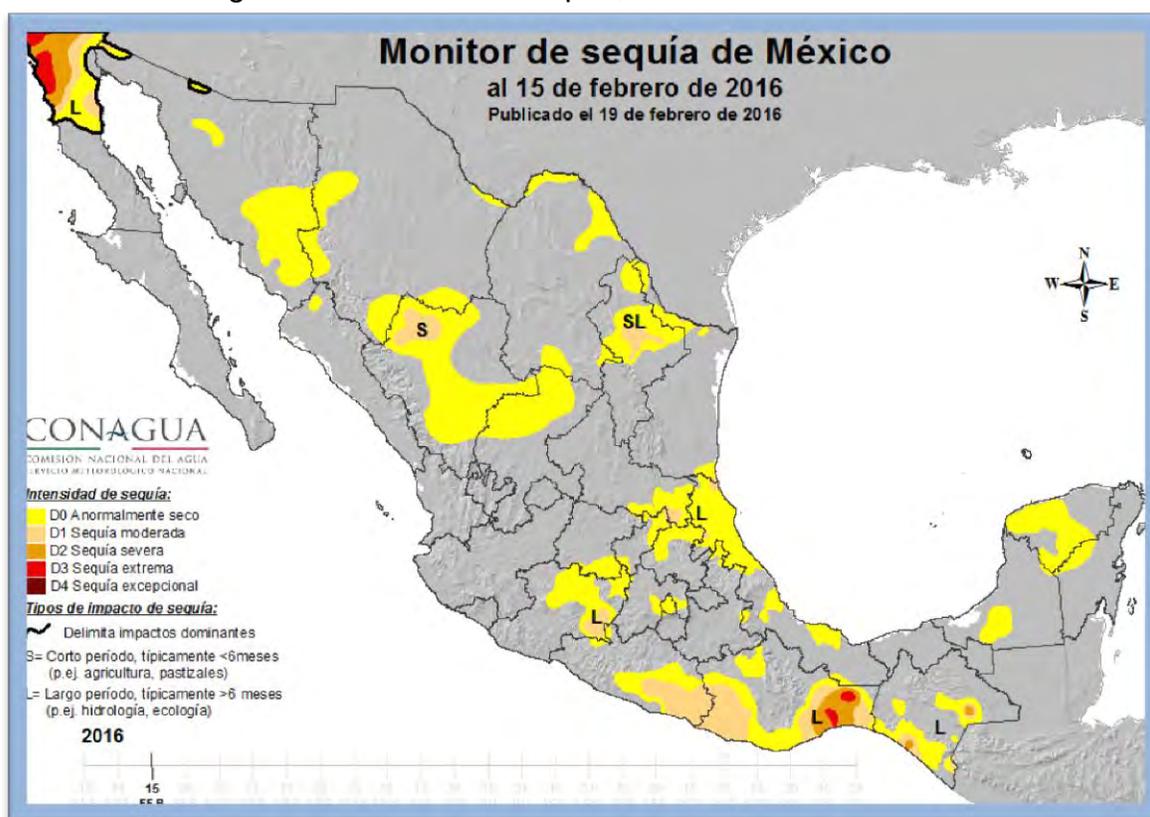
Según los registros hidrométricos disponibles del río Zanatenco, en once de los treinta años de registro considerados en el periodo de estudio de 1963 a 2009 (lo que representa el 33%), uno de casi cada tres años, el río Zanatenco se ha secado varios días en los años 1969, 1973, 1976-1978, 1982-1985, 1989, 2003-

2008. Así mismo, se registraron gastos mínimos muy pequeños de 0.001 m³/s (un litro por segundo) en los años 1979 y 1980.

En diferentes testimonios la población local refiere como años particularmente secos los de 1973, 1998, 2002, 2015 y la actual temporada de secas 2016. Ante la gravedad del problema del actual periodo de estiaje en la región, el 3 de mayo de 2016 el Gobierno del Estado de Chiapas declaró emergencia por sequía extrema.

Al inicio del año 2016, se pronosticaba que sería un de transición de El Niño a La Niña (López, 2016); es decir, particularmente seco en verano y muy húmedo en la temporada de ciclones tropicales y huracanes. Se estima que el evento de El Niño 2015-2016 sea el segundo más intenso desde 1950, únicamente por abajo de El Niño 1997-1998 (CONAGUA, 2016).

Figura 39. Monitor de sequía, 19 de febrero de 2016.



Fuente: CONAGUA (2016).

En la Costa de Chiapas de enero a abril de 2016 se presentó una anomalía de precipitación del 50 al 75%; es decir, por debajo de la media histórica para los mismos meses (CONAGUA, 2016).

En la página del monitor de sequía de México del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), se muestra el comportamiento de la sequía en todo el país. El 15 de febrero de 2016 (Figura 39), se reportaba ya la presencia de una sequía de anormalmente seca a sequía moderada con impactos de largo periodo (mayor a seis meses en la hidrología regional y los servicios ecosistémicos) en la Costa de Chiapas (CONAGUA, 2016).

3.2.3.1. Respuesta gubernamental ante la emergencia de sequia

El 30 de abril de 2016, la Secretaría de Protección Civil de Gobierno del Estado de Chiapas declaró que se trataba de una “sequia muy severa”, de tal forma que lanzo la declaratoria de emergencia, nunca antes establecida.

En enero de 2016 las autoridades municipales de Arriaga, Tonalá y Pijijiapan, solicitaron al Estado de Chiapas su intervención para gestionar ante la Secretaría de Gobernación la Declaratoria de Emergencia por sequía; sin embargo, el dictamen técnico de CONAGUA no fue favorable pues considero que la información climatológica a la fecha de solicitud en enero, no representaba condiciones de una sequía severa.

Posteriormente, en el marco de la Ley Estatal de Protección Civil del Estado de Chiapas, el 29 de abril de 2016 se emite declaratoria de emergencia preventiva en 36 municipios que ya presentaban daños por sequía, en cuatro de los cuales se declaró sequía severa; uno en la región Altos y tres en la región Istmo-Costa: Arriaga, Tonalá y Pijijiapan (Periódico La Voz, 29 de abril de 2016).

Con fecha 06 de mayo de 2016 se celebró reunión en la presidencia municipal de Tonalá entre la Secretaria de Protección Civil de Gobierno del Estado de Chiapas, los presidentes municipales y los Comités de Cuenca de los ríos Lagartero, Zanatenco y Tiltepec, con funcionarios de CONAGUA, para que ésta última dependencia gubernamental manifestara cuánto y cuando se ejercerían los recursos del FONDEN para atender la emergencia. Finalmente, la declaratoria de emergencia fue suspendida y no se dispuso de los recursos del FONDEN, pues la sequía – y los incendios- no está establecida como desastre por Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), ni en las reglas de operación del FONDEN (entrevista con Lic. Jaime Marroquín Solís, director del Centro Regional de Protección Civil, de la Secretaria de Protección Civil estatal).

En opinión del entrevistado, la sequía y los incendios son fenómenos que sí deberían ser considerados en el FONDEN, pues afectan el patrimonio de los hogares, y adquieren grandes dimensiones, con severos impactos. La Secretaría de Protección Civil del Estado apenas está empezando a considerar la sequía y los incendios como un riesgo de desastre ante la severa incidencia de estos fenómenos en la zona de estudio.

En el mes de junio, los presidentes municipales continuaban sin recibir respuesta de la CONAGUA para enfrentar el problema de sequía en el municipio.

En la 10ª sesión ordinaria del Consejo de Cuenca de la Costa de Chiapas celebrada en Tapachula, Chiapas el 20 de mayo de 2016, CONAGUA informa que la región Istmo-Costa presentaba valores de SPI de sequía severa a moderada con valores de SPI de -1.00 a -1.99, según el monitoreo de la sequía y el SPI de 12 meses al 15 de mayo de 2016. No obstante, continuaba sin presentar propuestas concretas para enfrentar la sequía. Las soluciones que ha planteado la CONAGUA hasta ahora para enfrentar la sequía es la rehabilitación de pozos y repartir agua en pipas a la zona urbana.

Respecto a la rehabilitación de pozos, el director del Centro Regional de Protección Civil mencionó en entrevista que de los pozos profundos para diversos usos solo se obtienen 50 lts/segundo, y debería de obtenerse más de 100 lts/segundo para atender la demanda de la población. La rehabilitación implica continuar con la perforación, pero no se pueden superar los 90 metros, pues ya se encuentra agua salada.

Entre las opciones, el Ayuntamiento de Tonalá ha propuesto la construcción de una presa para almacenar agua, con el aval de la CONAGUA; pero, ninguna instancia ha propuesto medidas de fondo para atender la reducción, tanto de las aguas superficiales como de las aguas subterráneas que aqueja al municipio de Tonalá. Actualmente el Ayuntamiento está dragando del río Zanatenco, para reducir el riesgo de inundación.

Hasta ahora, solo el Ayuntamiento de Arriaga, se ha planteado tomar medidas para la restauración hidrológica-ambiental de la cuenca del río Lagartero, como solución de fondo para la rehabilitación de los servicios hidrológicos en el territorio municipal.

En el marco de las acciones de prevención de riesgos ante la presente temporada de huracanes, en el municipio de Tonalá se han instalado 70 “Comités de Prevención y Participación Ciudadana de Protección Civil”, en ese número de localidades, de las 115 localidades del municipio de Tonalá. Cada Comité está integrado por seis personas y tiene cuatro comisiones: 1) Identificación y análisis de riesgos, 2) Reducción de riesgos, 3) Administración de emergencias, 4) Comisión de Desarrollo sustentable y resiliencia. Estos Comités están en comunicación permanente con Centro Regional de Protección Civil, en Tonalá.

Los Comités tienen la labor de monitorear el río Zanatenco durante la época de lluvias para identificar la erosión de los márgenes del río que generan las inundaciones en la parte baja de las cuencas. En la Ranchería El Congreso, ubicada al margen del Río Zanatenco, se reúnen cada semana algunos Comités para capacitarse y monitorear el río.

Para conocer la respuesta del gobierno local ante el desabasto de agua en la cabecera municipal de Tonalá, se entrevistó al titular del Sistema de Agua Potable

y Alcantarillado Municipal (SAPAM), el Ing. Rosalino Gordillo Trujillo, el 15 de abril de 2016.

El entrevistado informó que el problema de la escasez del agua se puede identificar 10 años atrás. Este año 2016 es el más seco registrado en la historia reciente. En su opinión las causas son la deforestación y el cambio en el clima que se ha estado experimentando en la zona en los últimos años. La duración del estiaje se ha estado prolongando, pues en años anteriores la escasez de agua se presentaba de 15 a 30 días; este año ya son tres meses sin agua en el río para abastecer a la población de la ciudad; algo nunca experimentado.

En años anteriores no era necesario usar el agua de pozos profundos. Del río se obtenían 70 litros/segundo, y —tadeado” se podría dar agua a la población. Los pozos se usaban solo en casos de emergencias. Este año es el primero en el que el río está totalmente seco. Se tuvo que elevar la toma de agua en la parte alta de la cuenca para obtener al gua desde los manantiales.

El entrevistado sostiene que desde hace varios años se presenta la tala ilegal en la parte alta de la cuenca para establecer pastizales. Se estima que se han desmontado 300 has en el último año, información que coincide con la aportada por equipo técnico de la Reserva de la Biosfera la Sepultura (REBISE). Además de la deforestación, varios entrevistados coinciden en señalar que la carretera construida a mediados de 1990 para comunicar la cabecera de Tonalá con la cabecera municipal de Villaflores, generó mucho azolvamiento en la parte baja del río; carretera que estuvo a cargo del ejército, quien no tuvo el cuidado al hacer los cortes adecuados; técnicamente no se hizo bien y provocó mucha erosión. Esta carretera no opera, pero sigue siendo fuente de erosión.

El Ing. Gordillo indica con preocupación que el Consejo de Cuenca de la Costa de Chiapas, informó en abril de 2016, que se esperan tres años más de sequía en el municipio, por lo que sugiere que se busquen soluciones de fondo al problema. Por el fenómeno del NIÑO-NIÑA, se estima que la precipitación esperada para este año se presentará en unos cuantos días, a manera de precipitaciones extremas, lo que no permitirá la recarga de acuíferos.

En abril el río se había quedado sin agua. Durante el periodo de estiaje se obtenían solo 20 litros/segundo del río, pero para abastecer las necesidades de la ciudad eran necesarios al menos 120 litros/segundo. Esta escasez no se presenta en las zonas rurales, pues casi todos los hogares rurales tienen su noria. Las tensiones sociales por la escasez de agua eran notablemente agudas durante el mes de abril de 2016.

Ante esta severa sequía, la solución que el Ayuntamiento puso en práctica es la apertura de nuevos pozos.

Actualmente hay cuatro pozos que operan las 24 horas del día, de los que se obtienen 20 litros /segundo. Recientemente se equipó un pozo más, del que se

obtienen 28 litros/seg, los que sumados a los 20 litros de los cuatro pozos y a los 20 del río, solo se obtienen 68 lts/segundo. Esto significa un déficit de 52 lts/seg para abastecer la demanda urbana de la ciudad de Tonalá, que requiere 120 litros/seg. Ante ello, se estaba planificando perforar tres pozos más para su operación a fines de abril.

La perforación se hace a 60 y hasta 90 metros de profundidad, pues los mantos acuíferos se están reduciendo. Antes se encontraba agua a 20 y 30 metros de profundidad.

Los mantos acuíferos se están agotando, nos informa el entrevistado; pero se carecen de estudios y datos sobre el estado de los mantos freáticos. Una de las preocupaciones más fuertes de SAPAM es que se sequen los mantos freáticos.

La operación de los pozos no es sostenible ni en términos ambientales ni económicos. De los cuatro pozos en operación se paga a la CFE un consumo de energía de \$ 134,700.00 al mes. A este monto se sumará una cantidad semejante por los nuevos cuatro pozos que se están perforando y estarían en operación. En total se estima un pago mensual de 300 mil pesos, monto que se suma a la deuda municipal y que podría ser destinado a la restauración de la cuenca.

A este gasto se suma la inversión que implica la perforación y equipamiento de cada pozo, que se estima en tres millones de pesos, para lo cual el Ayuntamiento ha contratado créditos con la banca comercial, pues no se recibe apoyo estatal ni federal. La suma de la deuda por este concepto asciende a 12 millones.

Los ingresos que recibe SAPAM por las cuotas son exiguos, dado que la tarifa por vivienda es de \$ 25 pesos/mes por el servicio de agua y drenaje. Se trata de una sola tarifa, independientemente del volumen consumido. Solo el 30% de los consumidores en la ciudad paga la cuota de agua, el 70 % no paga su recibo, y han proliferado las tomas clandestinas. Se estima que solo el 20% de los hogares en la ciudad tiene noria para el abasto doméstico, hogares que enfrentan la sequía con menores problemas, aunque si bien en años anteriores se encontraba el agua a dos o tres metros, actualmente se encuentra el agua a los 10 metros durante la época de estiaje.

Junto a la apertura de nuevos pozos, SAPAM estuvo distribuyendo agua, gratuitamente, con nueve pipas de 10 mil litros cada una, pero no logró cubrir el abasto. Estuvieron recorriendo localidades rurales para obtener el agua de sus norias. Los demandantes de agua, tenían que esperar hasta tres días para ver atendido su pedido de pipa hecho a SAPAM.

Fueron los vendedores particulares de agua en pipa quienes atendieron la demanda cobrando de 400 y 500 pesos por pipa de 3,000 litros, más del doble del costo regular de una pipa. Quienes vendan agua en pipas tiene noria en su casa. Ni SAPAM, ni los vendedores de pipa potabilizan el agua, la cual se distribuye directamente del río.

Se carecen de otras propuestas de solución a esta problemática, lo cual es muy grave, nos informa el entrevistado, quien indica que el Consejo de Cuenca de la Costa de Chiapas no tiene una propuesta clara. Por su parte el Comité de Cuenca del río Zanatenco se ha planteado reforestar la cuenca, pero se carece de financiamientos para iniciar los trabajos. “El Instituto Estatal del Agua (INESA) del Gobierno de Chiapas señala que viene una millonada de pesos para la reforestación, pero no hemos visto nada”, reclama el entrevistado, “ni CONAGUA ni CONAFOR tienen propuestas”.

Indica que la solución no es la apertura de más pozos, que se requiere de una restauración de toda la cuenca; pero no tienen respuesta de las autoridades federales y estatales. Tampoco se han impulsado acciones de coordinación con los otros municipios de la región para realizar gestiones comunes frente al Gobierno del Estado y el Gobierno Federal. Los programas de reforestación carecen de un seguimiento adecuado, por lo que no prospera la reforestación. Los árboles llegan tarde y con las pobres lluvias se secan. Se necesitan viveros propios para la reforestación. Por su parte, la PROFEPA no ha podido controlar al ganadero que está talando en la parte alta de la cuenca.

A partir del 5 de mayo empezó a llover, y SAPAM empezó a suministrar agua directamente del río, sin potabilizar.

La cuenca de Tiltepec tiene más vegetación, pero su volumen de captación es menor que Zanatenco. Hace tres años cuando se presentaron las primeras sequías, se hicieron estudios para considerar trasvasar agua de Tiltepec para el abasto de Tonalá, pero no obtuvieron el volumen que se requería, ya que solo se podían captar 10 litros/segundo, “dejando seco y muerto todo el río, implicaba matar a toda esa gente de la Ranchería Tiltepec” (entrevista con el Ing. Gordillo).

La red de drenaje y alcantarillado en la ciudad de Tonalá tiene una cobertura de solo el 50% de lo requerido. La planta de tratamiento de aguas residuales está en proyecto. Son 140 millones de inversión. Las aguas residuales se van directas a la Bahía de Paredón, en el Mar Muerto, donde se practica la pesca y se abastece de pesado a la región y al estado. Ante ello, su construcción y operación parece ser una prioridad del presidente municipal.



Desazolve del río Zanatenco para reducir el riesgo de inundaciones



El Ayuntamiento de Tonalá y la CONAGUA han ejecutado obras de desazolve y restitución de bordos en el río Zanatenco para reducir el riesgo de inundaciones



Obra de restitución de bordo en el cauce del río Zanatenco



CONAGUA ha realizado obras de limpieza y desazolve en el río Riito para reducir riesgo de inundaciones



CONAGUA distribuyó agua a la población de la ciudad de Arriaga para enfrentar la emergencia de sequía



Perforación de pozos profundos para atender la emergencia de sequía

3.3 Conclusiones

En la región, los eventos climatológicos extremos máximos históricos diarios y sus magnitudes se presentaron en las siguientes fechas: precipitación el 31 de julio 2006 con 312.7 mm, evaporación el 17 de mayo de 1970 con 17.5 mm y, temperatura el 5 de mayo de 1997 con 42.5 °C y el 16 de mayo de 1998 también de 42.5 °C.

El año con el mayor evento de lluvias extremas máxima fue 2006 (periodo de La Niña). La mayor tasa de evaporación diaria extrema se presentó en 1970, comprendido entre los años Niño 1969 y 1972 y, la mayor temperatura máxima se registró en los años de 1997 y 1998 (periodo de El Niño).

Los eventos extremos de precipitación se presentaron en el periodo de 2005 a 2013; los de evaporación de 2001 a 2008 y; los de temperatura de 1997 a 2006. Entonces, a partir de 1997, los eventos hidrometeorológicos extremos de precipitación están asociados a inundaciones, así como los de evaporación y temperaturas lo están a las sequías. Tanto las inundaciones como las sequías, se han presentado con mayor frecuencia e intensidad en la región desde 1997.

Los eventos extremos de precipitación en 24 horas fueron de 312.7 mm en 2006, de 290.0 mm en 1963 y de 269.6 mm en 2005 con el Ciclón Tropical *Stan*. Sin embargo, los años 2006 y 2013 también fueron muy lluviosos con precipitaciones máximas en 24 horas mayores de 260 mm asociados a las tormentas tropicales *Bárbara* de mayo de 2013 e *Ingrid y Manuel* de septiembre del mismo año.

Tanto las precipitaciones máximas en 24 horas registradas en 1963 de 290.0 mm como las máximas históricas de 2006 de 312.7 mm, corresponden a periodos en los que se presentarían de alrededor de 50 años.

El gasto máximo de escurrimiento registrado en el río Zanatenco fue el 23 de septiembre de 1963, de 741.163 m³/s, que corresponde a un periodo de retorno cercano a los 100 años. Es decir, se estima que estos gastos de escurrimiento se presenten dentro de un periodo cercano a los 100 años.

En los últimos 50 años, las lluvias extremas, sequías e inundaciones, han sido particularmente frecuentes en la región costera de Chiapas.

Las tendencias en la mayor frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones y sequías) en la región Istmo-Costa, particularmente desde 1997, coincide con los periodos de mayor frecuencia e intensidad en la presencia de eventos extremos: precipitaciones de 2005 a 2013; evaporación de 2001 a 2008 y; temperatura de 1997 a 2006 en la región.

Los eventos hidrometeorológicos de septiembre de 1998 y del ciclón tropical *Stan* de octubre de 2005, fueron particularmente reveladores en la región, ambos mostraron el grado de vulnerabilidad de las cuencas y comunidades de la Sierra Madre y Costa de Chiapas.

De 2010 a 2013, cada año se han presentado algún fenómeno climático en la región; en total se han presentado cuatro. Lo cual da cuenta de la alta frecuencia de estos fenómenos en la región en los últimos años.

Estos eventos hidrometeorológicos están relacionados con el fenómeno de La Niña 2010 (año considerado como uno de los más lluviosos en la Costa y Sierra Madre de Chiapas) y La Niña 2013, siendo este uno de los años más lluviosos en la región con 2,046.3 mm.

Con respecto a las temperaturas, se puede afirmar que a partir de 1997, los eventos de temperaturas máximas asociadas a sequías se han presentado con mayor frecuencia e intensidad en la región. Los eventos extremos de temperatura de 1962 están asociados a El Niño 1962-1963, el evento de 1969 al fenómeno de El Niño de ese año, y los de 1997-1998 al fenómeno de El Niño de ese periodo. Las temperaturas máximas de 2004 y 2006 están asociadas a El Niño de 2005.

Las temperaturas máximas en 24 horas registradas en la temporada de secas de 1997 y 1998 (año en transición El Niño – La Niña) corresponden a las del año de El Niño y su sequía extrema registrada. En 1998, durante la temporada de lluvias (ya establecido como año La Niña), se presentaron, las lluvias extremas que derivaron en la contingencia hidrometeorológica de septiembre de 1998.

Las temperaturas máximas superiores a los 41.5 °C no se presentaron de 1970 a 1992. Se obtiene una tendencia creciente de 0.0051 °C/año. De seguir esta tendencia, en los próximos 100 años, se tendría un incremento acumulado de 0.51 °C.

Las temperaturas máximas diarias mayores de 40°C, se presentan cada dos años. Las mayores de 41 °C cada cinco y, las mayores de 42.5 °C en un periodo de 20 años como las registradas en 1997, 1998 y 2004.

En cuanto a la evaporación diaria máxima, esta se ha presentado en los años de 1970, 1983, 1993, 2001, 2003, 2005 y, 2008.

Los registros de lluvia corroboran como año seco 1987 (1,101.3 mm) asociado al fenómeno de El Niño de ese año, así como el año 2001 (1,168.1 mm) con el periodo seco del índice de precipitación estandarizado (SPI) de 1998-2002 y a El Niño de 1997-1998.

Según los registros hidrométricos disponibles del río Zanatenco, en once de los treinta años de registro considerados en el periodo de estudio de 1963 a 2009 (lo que representa el 33%), uno de cada tres años, el río se ha secado varios días en los siguientes años y periodos: 1969, 1973, 1976-1978, 1982-1985, 1989, 2003-2008. Así mismo, se registraron gastos mínimos muy pequeños de 0.001 m³/s (un litro por segundo) en los años 1979 y 1980.

En diferentes testimonios la población local refiere como años particularmente secos los de 1973, 1998, 2002, 2015 y la actual temporada de secas 2016. Ante la aguda sequía del actual periodo de estiaje en la región, el 3 de mayo de 2016 el Gobierno del Estado de Chiapas emitió Declaratoria de emergencia por sequía extrema.

Los años 2005 y 2010 fueron también años de transición El Niño – La Niña; el presente año 2016 se pronostica como un año de transición; es decir, un año muy seco y muy lluvioso.

LITERATURA CITADA

- Arellano Monterrosas, José Luis. 2012. Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos por Deslizamientos e Inundaciones en la Cuenca Superior del río Huehuetán, Chiapas. Tesis para obtener el grado de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos. 447 páginas.
- Arellano, Monterrosas José Luis. 2010. Gestión Integral de Recursos Hídricos para reducir la Vulnerabilidad a Deslizamientos e Inundaciones en las Cuencas de la Sierra Madre de Chiapas. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. Vol. 2 Núm 1. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp. 29-37.
- Arganis, Juárez Maritza; Domínguez M. Ramón; Jiménez Espinosa Martin y; Guichard R. Delva. 2010. Eventos extremos. En: Jiménez, Cisneros Blanca; Torregrosa y Armentia Maria Luisa y; Aboites, Aguilar Luis (editores). El agua en México: Cauces y encauces. Academia mexicana de ciencias. CONAGUA. pp. 563-594.
- Ayuntamiento de Tonalá. 2016. Plan de protección civil municipal para la temporada de lluvias y ciclones. Tonalá, Chiapas.
- Baumann, Jürgen. 2000. Plan de conservación de suelos y agua para la costa de Chiapas. Comisión Nacional del Agua y Centro para Migración y Desarrollo Internacional. México D.F. 148 pp.
- CENAPRED. 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas nacional de riesgos de la República Mexicana. CENAPRED. México, D. F. 225 pp.
- CONAGUA. 2016. Pronóstico climatológico y condiciones hidrometeorológicas en la región. Presentación en la 10ª sesión ordinaria del Consejo de Cuenca de la Costa de Chiapas. Tapachula, Chiapas. 20 de mayo de 2016.
- CONAGUA. 2015. Proyecto de Acuerdo de Creación y organización de usuarios del Distrito de Temporal Tecnificado 019 Jesús Diego, ubicado en los municipios de Tonalá y Pijijiapan, Chiapas. Informe final del contrato SGIH-OCFS-CHS-14-IH-134-RF-I3. Organismo de Cuenca Frontera Sur. Grupo de Asesores Agropecuarios ATITAB S. C. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- CONAGUA. 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en la cuenca de la Costa de Chiapas. Informe final. Organismo de Cuenca Frontera Sur. UNICACH. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 127 pp.
- CONAGUA. 2014. Programa Nacional Hídrico 2014–2018. SEMARNAT. CONAGUA. México, D. F. 139 pp.

- CONAGUA. 2013. Estudio de identificación y priorización de acciones a gran visión para el uso sustentable del agua en zonas rurales y la mitigación ante la vulnerabilidad hidrometeorológica en zonas prioritarias del estado de Chiapas. Informe final. Organismo de Cuenca Frontera Sur. Malla 200 Ingeniería Especializada S.A. de C.V. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- CONAGUA. 2012. Programa Hídrico Regional. Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XI Frontera Sur. Comisión Nacional del Agua. México. D. F. 206 pp.
- CONAGUA. 2011. Manual para el control de inundaciones. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. 326 pp.
- CONAGUA. 2010a. Proyecto ejecutivo para el desarrollo de infraestructura de temporal tecnificado del proyecto Jesús-Diego, en los municipios de Pijijiapan y Tonalá, estado de Chiapas. Informe final del contrato número SGHI-OCFS-CHS-10-P-205-RF-13. Trugor Ingeniería, S. A. de C. V. Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- CONAGUA. 2010b. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). México, D. F.
- CONAGUA, UNICACH, Instituto Estatal del Agua y Ayuntamiento de Tonalá. 2012. Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Tiltepec, Chiapas. Tonalá, Chiapas. 147 pp.
- CONAGUA, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C., The Nature Conservancy, INESA. 2010. Aplicación de la Tarjeta de Evaluación de Cuencas Hidrográficas en la cuenca del río Lagartero, Chiapas. Informe Final.
- CONAGUA, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C., The Nature Conservancy, INESA. 2010. Aplicación de la Tarjeta de Evaluación de Cuencas Hidrográficas en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. Informe Final.
- CONAGUA, INESA y Ayuntamiento de Tonalá. 2009. Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 63 pp.
- CONANP. 1999. Programa de Manejo Reserva de la Biósfera La Sepultura, México. SEMARNAP. CONANP. México, D. F. 247 pp.
- Conservación Internacional. 2013. Evaluación del huracán Bárbara en la Reserva de la Biósfera de la Sepultura. Informe final. Conservación Internacional. INIFAP. Proyecto ECOSECHAS. 12 pp.

- Contreras, Francisco; Castañeda, Ofelia; García, Nagaya Arnoldo y; Ángel, Pérez Miguel. 1994. Las lagunas costeras. En: Toledo, Alejandro (Coordinador). Riqueza y pobreza en la costa de Chiapas y Oaxaca. Centro de Ecología y Desarrollo, A. C. México, D. F. pp. 129-181.
- Cruz, Rodríguez Martín. 2003. Plan Rector de Producción y Conservación de las microcuencas La Mica y Poza Galana en la Subcuenca del río Lagartero del Municipio de Arriaga, Chiapas. En: En: Arellano, Monterrosas José Luis y López, Martínez Jaime. (Coordinadores). Memorias del 3er Seminario sobre Manejo y Conservación del Suelo y Agua en Chiapas. Manejo Integral de Cuencas. Consejo Ciudadano del Agua en Chiapas, A. C.; SEMARNAT; INIFAP; The Nature Conservancy. Tuxtla, Gutiérrez, Chiapas. pp. 135-140.
- Cuevas, Portilla Jimena. 2009. Vivir el desastre. Análisis de la vulnerabilidad frente a inundaciones. El caso de una comunidad de pescadores en Chiapas. En: Vera, Cortes Gabriela (coordinadora). Devastación y éxodo. Memoria de seminario sobre reubicaciones por desastres en México. CIESAS. SEDESOL. CONACYT. México, D. F. pp. 215-227.
- Cherrington, Emil. 2013. Modelación hidrológica espacial considerando cambio de uso del suelo y cambio climático. Presentación CATHALAC, Panamá, Panamá.
- De la Mora, O. C.; Ruíz, C. J. A.; Flores, L. H. E.; Zarazúa, V. P.; Ramírez, O. G; Medina, G. G.; Rodríguez, M. V. M. y Chávez, D. A. 2016. Índices de cambio climático en el estado de Chiapas, México, en el periodo 1960-2009. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp. Núm. 13. Pp. 2523-2534.
- Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G. E., López, E. J. G., Herrera, A. J. L. y, Echeverri, V. C. A. 2006. Estudio para definir las obras de control contra inundaciones en las cuencas altas de los ríos del estado de Chiapas. Estudio hidrológico. Informe final. Elaborado por Proyecto 6307 realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la CONAGUA. México, D. F. abril de 2006. 87 Pp.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1991. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. No. 24. Roma, Italia. 194 pp.
- Escalante, Sandoval Carlos. 2006. Análisis del patrón de lluvias en la Costa de Chiapas. Quehacer científico en Chiapas. UNACH. Vol. 1. Núm. 1. pp. 39-64.
- Gellida, Esquinca Carlos; Montesinos, Núñez Silvia; Díaz, Galdámez Ignacio y; Reyes, Díaz José. 2012. Delimitación oficial, determinación de cauces y usos del suelo en la cuenca del río Tiltepec. Informe final. Proyecto de investigación. UNICACH. Campus del Mar. Tonalá, Chiapas. 28 pp.

- Gobierno del Estado de Chiapas. 2010. Atlas de Riesgos de Chiapas. Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres. Servicio Geológico Mexicano. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Gobierno del Estado de Chiapas. 2013. Plan específico de Protección Civil para la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Gobierno del estado de Chiapas, SEMARNAT, Embajada Británica, INE, UNICACH, ECOSUR, CP, CEMDA, MDGIF, CI. 2011. Programa de Acción ante el Cambio Climático del estado de Chiapas. SMAHN. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 137 pp.
- Hernández, Cerda María Engracia y Valdez, Madero Gonzalo. 2004. Sequía meteorológica. En: Martínez, Julia y Fernández, Bremauntz Adrián (compiladores), Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT. INE. México, D. F. pp. 315-325.
- IHNE. 2004. Ordenamiento Ecológico Territorial de la Subcuenca del Rio Zanatenco, Tonalá, Chiapas, México. Instituto de Historia Natural y Ecología. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Imbach, Alejandro. 2014. Análisis comparativo de escenarios hidrológicos y de sedimentación de tres cuencas de la Sierra Madre de Chiapas- Pijijiapan, Coapa y Cuxtepec. Aplicación del modelo SWAT para escenarios. CATIE, TNC. Costa Rica.
- Imbach, Alejandro; Pérez, Junior; Ulloa, Diana y Díaz, Ángela. 2013. Análisis de la variabilidad climática en la costa de Chiapas, México. CATIE. TNC. Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania. 86 pp.
- IMTA. 2013. ERIC III. Extractor rápido de información climática. Ver 3.2.
- INEGI. 2015. Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie V. Aguascalientes, Ags. 195 pp.
- INEGI. 2015. Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. Escala 1:250,000. Aguascalientes, Ags. pp. 11-24.
- Jiménez, E. M.; Domínguez, M. R. y Cruz, M. M. 1997. Manual de operación de los programas AX.AXE y CARACHID.EXE. CENAPRED. México, D. F.
- López, B. W.; López, L. A.; Coutiño, E. B.; Camas, G. R.; Villar, S. B.; López, M. J. Serrano, A. V.; Cadena, I. P.; Zamarripa, M. A. y; Sandoval, M. C. 2008. Zonas potenciales y recomendaciones técnicas para la producción sustentable de maíz en Chiapas. Libro Técnico No. 1. Campo Agrícola

Experimental Centro de Chiapas. INIFAP. Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas. 228 pp.

López, Luna Aurelio. 2016. El cambio climático y su efecto en el comportamiento de la lluvia: Estrategias de mitigación y adaptación. Colegio de Ingenieros Agrónomos de Chiapas. Conferencia presentada el día 22 de febrero de 2016 en Tonalá, Chiapas.

López, Luna Aurelio. 1991. Análisis climatológico de la región Centro de Chiapas y zonificación de áreas con riesgo de sequía intraestival. SARH. INIFAP. Publicación Especial No. 1. Campo Agrícola Experimental Centro de Chiapas. Ocozocuautla, Chiapas.

Magaña, Rueda Víctor O. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, Julia y Fernández, Bremauntz Adrián (compiladores), Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT. INE. México, D. F. pp. 19-27.

Magaña, Víctor; Matías, Méndez Juan; Morales, Rubén y Millán, Cecilia. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En: Martínez, Julia y Fernández, Bremauntz Adrián (compiladores), Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT. INE. México, D. F. pp. 203-213.

Martínez, Austria Polioptro. 2007. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos México. 745 pp.

Méndez, J. y Magaña, R. V. 2010. Regional aspects of prolosced meteorological droughts over Mexico. *Journal Climate*. Núm. 23. pp. 1175-1188.

Mundo, Molina Martín. 2008. Efectos del cambio climático en la ETo en México. En: Martínez, Austria Polioptro y Aguilar, Chávez Ariosto (editores). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen II. SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos México. pp. 85-91.

Nigatu, Zemedie Mulushewa; Rientjes, Tom y; Haile, Alemseged Tamiru. 2016. Hydrological impact assessment of Climate Change on lake Tana's water balance, Ethiopia. *American Journal of Climate Change*. Núm. 5. pp. 27-37.

Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Íñiguez, C. M. y Montes, M. M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. 45:1-11.

Ojeda, Bustamante Waldo; Martínez, Austria Polioptro y Hernández, Barrios Leonardo. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. En: Martínez, Austria Polioptro y Aguilar, Chávez Ariosto (editores).

Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen II. SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos México. Pp. 73-83.

Ordaz, Mario; Torres, Marco Antonio y; Domínguez, Ramón. 2013. Vulnerabilidad y riesgo por inundaciones. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y Carso Infraestructura y construcciones. México, D. F. 71 pp.

Peniche, C. S. y Guzmán, A. H. 2016. Herramientas de georreferenciación para la sustentabilidad: El Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL). Expresión económica. Núm. 36. Universidad de Guadalajara. Pp. 21-29.

Prieto, González Ricardo. 2008. Lluvia ciclónica y cambio climático en México. En: Martínez, Austria Polioptro y Aguilar, Chávez Ariosto (editores). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen II. SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos México. Pp. 23-35.

Rivera, H. B.; Aceves, N. L.; Arriete, R. A.; Juárez, L. J. F.; Méndez, A. J. M.; y Ramos, A., C. 2016. Evidencias del cambio climático en el estado de Tabasco durante el periodo 1961-2010. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp. Núm. 14. Pp. 2645-2656.

SEMARNAT. 2012. México. Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. INECC. México, D. F. 399 pp.

Serrano, Altamirano Víctor; Díaz, Padilla Gabriel; López, Luna Aurelio; Cano, García Miguel Ángel; Báez, González Alma y; Garrido, Ramírez Eduardo. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Chiapas (periodo 1961-2003). Libro Técnico No. 1. Campo Agrícola Experimental Centro de Chiapas. INIFAP. Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas. 187 pp.

SRH. 1969. Boletín Hidrológico Número 23 (Costa de Chiapas) y Número 29 (Coatzacoalcos). Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). Jefatura de irrigación y Control de Ríos. México, D. F.

Tang, Xiangling y Lv, Xin. 2016. The effect of extreme climatic events on extreme runoff in the past 50 years in the Manas river basin, Xinjiang, China. American Journal of Climate Change. Núm. 5. pp. 15-26.

Tiscareño, L. M.; Rosenberg, N. J.; Legler, D. M.; Ruíz, C. A.; Shrnvasan, R.; Brown, R. A.; García, M. G.; Velázquez, V. M. y; Izurralde, C. 1991. Algunos efectos del fenómeno El Niño en la agricultura mexicana. Ciencia y Desarrollo. Vol. XXV. Número 139. pp. 3-12.

Trujillo, Herrera Silvestre. 1998. Experiencias en el control de la erosión en la cuenca del río Zanatenco, costa de Chiapas. En: Memorias del Seminario sobre manejo de suelos tropicales en Chiapas. Cuadernos de Divulgación. 2º Seminario. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. Pp. 161-166.

USAID, CATHALAC. 2008. Potential impacts of Climate Change on Biodiversity in Central America, Mexico, and the Dominican Republic. Panamá, Panamá. 105 pp.

Velasco, Israel. 2012. Sequía y Cambio Climático en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. 137 pp.

CARTOGRAFÍA IMPRESA CONSULTADA.

INEGI. 1983. Carta fisiográfica. Escala 1:1,000,000.

INEGI. 1985. Carta edafológica. Escala 1:250,000.

INEGI. 1985. Carta de Climas. Escala 1:1,000,000.

INEGI. 2008. Carta de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250,000.

CARTOGRAFIA ANEXA

Anexo	Descripción del plano
1	Ubicación general
2	Geología
3	Fisiografía
4	Edafología
5	Altimétrico
6	Climas
7	Cuenca Tiltepec
8	Cuenca Zanatenco
9	Cuenca Riíto
10	Localidades
11	Incendios forestales
12	Erosión Hídrica Potencial
13	Erosión Hídrica Actual 1985
14	Erosión Hídrica Actual 1993
15	Erosión Hídrica Actual 2002
16	Erosión Hídrica Actual 2007
17	Erosión Hídrica Actual 2011
18	Usos del agua: subterráneas
19	Usos del agua: superficiales