



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

ORIENTACIÓN AMBIENTAL

**LOS SERVICIOS AMBIENTALES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO
LOS PESCADOS FRENTE AL CAMBIO Y VARIABILIDAD
CLIMÁTICOS. POSIBLES PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

DIRECTORA DE TESIS: Dra. CECILIA CONDE ÁLVAREZ

2 0 0 7





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Para la realización de la presente tesis se contó con apoyo financiero recibido de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico – DGAPA – a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) bajo el proyecto PAPIIT IN-119106 “LOS SERVICIOS AMBIENTALES DE LA SUBREGIÓN CENTRAL DEL ESTADO DE VERACRUZ ANTE EL CAMBIO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICOS. POSIBLES PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN”

El trabajo contó con apoyo recibido del Fondo Sectorial SEMARNAT – CONACYT bajo el proyecto SEMARNAT-2002-CO1-0615 “VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: DIAGNÓSTICOS Y MECANISMOS DE ADAPTACIÓN POR SECTOR”.

AGRADECIMIENTOS

Dejo asentado mi amplio agradecimiento a todos los siguientes, quienes con su apoyo hicieron posible llegar al término de la presente investigación:

A **DIOS**, por haberme dado la vida, colocarme en la familia adecuada y darme la oportunidad de construir mi propia familia. Gracias PADRE por acompañarme y guiarme cada uno de mis días.

A todo el **pueblo de México**, quienes a través de sus contribuciones han permitido que pueda realizar mis estudios en instituciones públicas de inigualable prestigio.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Universidad Autónoma Chapingo**, por haberme dado la oportunidad de superarme.

A los **Catedráticos** de la Universidad Nacional Autónoma de México, por compartir conmigo sus conocimientos y así favorecer mi formación.

A la **Dra. Cecilia Conde**, excelente persona y destacada catedrática e investigadora del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por dirigir el trabajo de investigación con incansable paciencia, por la confianza recibida, por compartir conmigo sus amplios conocimientos y sobre todo por su amistad.

Al **Dr. Carlos Gay**, destacado investigador y catedrático del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por sus atinados aportes y comentarios que enriquecieron el contenido del trabajo de investigación.

A la **Dra. Lourdes Villers**, distinguida investigadora y catedrática del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, por sus pertinaces aportes y sugerencias que mejoraron y enriquecieron en mucho el trabajo.

A la **Dra. Laura Elena Maderey**, distinguida investigadora y catedrática del Instituto de Geografía de la UNAM, por sus aportes y sugerencias para enriquecer el trabajo de investigación.

A la **M.C. Maria de la Paz Media Barrios**, destacada catedrática del Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, por sus aportes y sugerencias para enriquecer el trabajo de investigación.

Y a todos aquellos productores y gente del campo que son más que un ejemplo a seguir, quienes continúan incansablemente trabajando y haciendo producir la tierra, a pesar de las inclemencias a las que son sujetos por aquellos en el poder.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo

A **DIOS**,
por permitirme alcanzar un objetivo más en la vida.

A mis **PADRES**,
Angélica y Neptalí, por todos sus sacrificios, su amor y apoyo que siempre me han otorgado en cada momento de mi vida. Gracias por darme la mejor herencia que se puede tener...

A mis **HERMANOS**,
quienes me han impulsado con su ejemplo y sabiduría por los caminos académicos y de la vida misma, en especial a vos Pablo, por ser como sos.

A **DIEGO** y **PAVEL**,
mi par de amados hijos, que sus travesuras cada día me alegran e inspiran a esforzarme más.

A **ALMA**,
mi amada cómplice en la vida, quien ha sido mi incansable apoyo en tiempos difíciles y mi entusiasta aliento en los mejores, caminemos juntos sin tropiezo el sendero de la vida hasta que nuestro PADRE nos llame a su regazo.

A **LIDIA** y **CARLOS**,
más que mis cuñados son mis hermanos, agradezco el tropiezo de la vida por haberlos conocido, seguir su ejemplo y aprender siempre de ustedes.

A **Jesús David Gómez Díaz**,
mi maestro y amigo, quien me ha abierto sus brazos y las puertas de su familia, de quien he aprendido invaluable lecciones, pero sobre todo, el valor de la amistad.

Contenido

<i>CONTENIDO</i>	V
<i>ÍNDICE DE CUADROS</i>	VII
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	VIII
<i>RESUMEN</i>	X
<i>ABSTRACT</i>	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES	3
1.2. CAMBIO CLIMÁTICO.....	13
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.4. OBJETIVOS	22
1.5. HIPÓTESIS	22
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN METODOLOGICA.....	23
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	25
2.2 EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES EN LA CUENCA	26
2.3 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	28
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
3.1 EL MEDIO FÍSICO.....	30
3.1.1 Localización Geográfica.....	30
3.1.2 Geología.....	32
3.1.3 Orografía	36
3.1.4 Edafología.....	45
3.1.5 Clima.....	47
3.1.6 Hidrología.....	49
3.1.7 Vegetación y Uso del suelo	50
3.2 EL MEDIO SOCIOECONÓMICO	56
3.2.1 Población.....	56
3.2.2 Vivienda	59
3.2.3 Educación	60
3.2.4 Actividad Económica	60
CAPÍTULO 4. CLIMA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA.....	63
4.1. EL CLIMA EN LA CUENCA	63
4.1.1 Temperatura.....	68
4.1.2 Precipitación.....	70
4.1.3 Ciclones tropicales.....	72
4.1.4 El Niño / Oscilación del Sur	74
4.2. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA	84

CAPÍTULO 5. LOS SERVICIOS AMBIENTALES EN LA CUENCA.....	92
5.1 INTRODUCCIÓN.....	92
5.2 LOS SERVICIOS AMBIENTALES.....	94
5.2.1 Regulación climática.....	95
5.2.1.1 Clima y vegetación en la cuenca.....	95
5.2.1.2 Cambio de uso de suelo.....	96
5.2.2 Regulación y protección hidrológica.....	100
5.2.2.1 Indicadores hidrológicos de la cuenca.....	101
5.2.3 Regulación hídrica por cobertura de la vegetación.....	112
5.2.3.1 Precipitación.....	112
5.2.3.2 Evapotranspiración.....	113
5.2.3.3 Escurrimiento.....	115
5.2.3.4 Infiltración.....	117
5.2.4 Retención del suelo.....	119
5.2.4.1 Erosión eólica.....	119
5.2.4.2 Erosión hídrica.....	121
5.3 SERVICIOS AMBIENTALES Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	123
5.3.1 Almacenamiento y provisión de agua.....	123
5.3.1.1 Balance hídrico general.....	123
5.3.1.2 Escenarios de cambio climático.....	124
5.3.2. Los servicios ambientales de producción.....	127
A) El caso del café.....	127
Cambio en los niveles de aptitud bajo escenarios de cambio climático.....	130
B) El caso del maíz.....	132
Cambio en los niveles de aptitud bajo escenarios de cambio climático.....	135
CAPÍTULO 6. PROPUESTAS DE ADAPTACION.....	137
6.1 INTRODUCCIÓN.....	137
6.2 VULNERABILIDAD ACTUAL.....	141
6.3 AMENAZA CLIMÁTICA.....	146
6.4 PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN.....	156
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	171
BIBLIOGRAFÍA.....	174
ANEXOS.....	181

Índice de cuadros

CAPITULO III

Cuadro 3-1. Geología de la cuenca y superficie ocupada.	34
Cuadro 3-2. Altimetría de la cuenca.	38
Cuadro 3-3. Rango de declives en la cuenca y superficie ocupada.	42
Cuadro 3-4. Uso de suelo y vegetación, superficie ocupada.....	53
Cuadro 3-5. Superficie sembrada y rendimiento de maíz en municipios seleccionados.	55
Cuadro 3-6. Localidades más importantes y su población al año 1995 y 2000.	57
Cuadro 3-7. Total de población Indígena y porcentaje por municipio.	59
Cuadro 3-8. Indicadores de vivienda por municipio, 2000.	60
Cuadro 3-9. Población Económicamente Activa por sector de ocupación al año 2000.	61

CAPITULO IV

Cuadro 4-1. Comparativo de temporadas más intensas de ciclones tropicales.	73
Cuadro 4-2. Temperatura normal y con cambio climático.	87
Cuadro 4-3. Precipitación normal y con cambio climático.	88
Cuadro 4-4. Cambios al 2050 en precipitación y temperatura para la región centro del estado.	88
Cuadro 4-5. Modelos de circulación y escenarios utilizados en la zona de estudio.	89
Cuadro 4-6. Razón de cambio para temperatura y precipitación por modelo para la zona de estudio.	90

CAPITULO V

Cuadro 5-1. Superficie ocupada en Hectáreas por tipo de uso del suelo y climas.	96
Cuadro 5-2. Cambio de uso de suelo (%) para el periodo 1980-2001.....	98
Cuadro 5-3. Número de orden de cauces y total de cauces.	101
Cuadro 5-4. Relación de confluencia de los cauces en la cuenca.....	103
Cuadro 5-5. Relación de longitud de los cauces en la cuenca.	105
Cuadro 5-6. Frecuencia de cauces por km ² en la cuenca.	109
Cuadro 5-7. Densidad de drenaje, longitud de los cauces y superficie ocupada.	110
Cuadro 5-8. Precipitación media y volumen total de agua en la cuenca.	112
Cuadro 5-9. Valores de Evapotranspiración (ET) total para cuenca.	114
Cuadro 5-10. Valores de ETP para la cuenca.	114
Cuadro 5-11. Valores del coeficiente de escurrimiento a partir de vegetación, pendiente y suelos.	115
Cuadro 5-12. Volumen total de escurrimiento en la cuenca.	116
Cuadro 5-13. Volumen total de escurrimiento en la estación hidrométrica Jalcomulco.	117
Cuadro 5-14. Volumen de agua infiltrado en la cuenca.....	118
Cuadro 5-15. Escenarios de cambio climático sobre el balance hídrico de la cuenca.	125
Cuadro 5-16. Cambio en porcentaje de acuerdo a los escenarios de cambio climático en la cuenca.	126
Cuadro 5-17. Requerimientos climáticos y de altura para el café.	127
Cuadro 5-18. Aptitud para café en porcentaje según escenarios de cambio climático y El Niño.	129
Cuadro 5-19. Categorías de cambio de aptitud. Escenario base vs escenario de cambio climático.	131
Cuadro 5-20. Cambio en la aptitud para café bajo escenarios de cambio climático.....	131
Cuadro 5-21. Requerimientos agroclimáticos para el maíz.....	132
Cuadro 5-22. Aptitud para maíz en porcentaje según escenarios cambio climático y El Niño.....	133
Cuadro 5-23. Cambio en la aptitud para maíz bajo escenarios de cambio climático.....	135

CAPITULO VI

Cuadro 6-1. Impactos probables del cambio climático sobre los servicios ambientales en la cuenca.	144
Cuadro 6-2. Vulnerabilidad y exposición de los servicios ambientales en la cuenca.	145
Cuadro 6-3. Eventos extremos registrados para la zona.	147
Cuadro 6-4. Riesgo actual en los servicios ambientales de la cuenca.	149
Cuadro 6-5. Grupos socioeconómicos y vulnerabilidad sobre los servicios ambientales bajo CC.	153
Cuadro 6-6. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de regulación climática.....	162
Cuadro 6-7. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de regulación hídrica.....	164
Cuadro 6-8. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de provisión de agua.....	165
Cuadro 6-9. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de retención del suelo.	166
Cuadro 6-10. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de provisión de alimentos.	167

Índice de figuras

CAPITULO II

Figura 2-1. Esquema metodológico propuesto por el NCAR (2004).....	24
Figura 2-2. Esquema metodológico seguido en el estudio.	24

CAPITULO III

Figura 3-1. Localización de la cuenca alta del río Los Pescados.....	31
Figura 3-2. Limite de municipios dentro de la cuenca.....	32
Figura 3-3. Geología de la cuenca.....	36
Figura 3-4. Principales elevaciones dentro y en el límite de la cuenca.....	37
Figura 3-5. Mapa Topográfico de la cuenca.....	38
Figura 3-6. Altimetría de la cuenca.....	39
Figura 3-7. Histograma de Frecuencias altimétricas.....	40
Figura 3-8. Curva Hipsográfica.....	40
Figura 3-9. Declives en la cuenca.....	42
Figura 3-10. Unidades básicas de relieve y superficie ocupada.....	44
Figura 3-11. Unidades básicas de relieve.....	45
Figura 3-12. Edafología en la cuenca de estudio.....	47
Figura 3-13. Corte transversal en las faldas del cofre de Perote (Tomado de Hoffman, 1993).....	51
Figura 3-14. Uso de suelo y vegetación.....	56

CAPITULO IV

Figura 4-1. El ciclo hidrológico en la cuenca. Tomado de Hoffmann (1993).....	65
Figura 4-2. Climogramas de estaciones seleccionadas en la cuenca.....	66
Figura 4-3. Climas predominantes en la cuenca.....	67
Figura 4-4. Calendario climático en la cuenca (Tomado de Hoffman, 1993).....	68
Figura 4-5. Estaciones meteorológicas y temperatura media anual en la cuenca.....	69
Figura 4-6. Precipitación total anual y estaciones meteorológicas en la cuenca.....	71
Figura 4-7. Ciclones tropicales (CT) que entraron a México (Tomado de Zarate, 2006).....	74
Figura 4-8. Número de incendios por temporada. Tomado de CONAFOR (2004).....	76
Figura 4-9. Comparativo de precipitación "normal" y con años Niño.....	79
Figura 4-10. Comparativo de precipitación en primavera con años Niño.....	80
Figura 4-11. Comparativo de precipitación en verano con años Niño.....	81
Figura 4-12. Comparativo de precipitación en otoño con años Niño.....	82
Figura 4-13. Comparativo de precipitación en invierno con años Niño.....	83
Figura 4-14. Familia de escenarios de emisiones del IPCC.....	85
Figura 4-15. Comportamiento de la temperatura sin (izquierda) y con (derecha) reducción de escala. (Palma, 2005).....	86
Figura 4-16. Comportamiento de la precipitación sin (izquierda) y con (derecha) reducción de escala. (Palma, 2005).....	87
Figura 4-17. Escenarios globales de cambios en temperatura. (IPCC, 2001a).....	89
Figura 4-18. Cambios en Temperatura y Precipitación por modelo.....	91

CAPITULO V

Figura 5-1. Clasificación de cauces según Strahler.....	102
Figura 5-2. Relación de confluencia de los cauces de la cuenca.....	104
Figura 5-3. Relación de longitud de los cauces de la cuenca.....	106
Figura 5-4. Clasificación de cauces según Shreve.....	107
Figura 5-5. Distribución geográfica de frecuencias de cauces.....	108
Figura 5-6. Densidad de drenaje en la cuenca.....	110
Figura 5-7. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca.....	116
Figura 5-8. Pérdida de suelo por erosión eólica.....	120
Figura 5-9. Pérdida de suelo por erosión hídrica.....	122
Figura 5-10. Distribución y balance hídrico de la cuenca.....	124
Figura 5-11. Porcentaje de cambio en aptitud para café bajo escenarios de cambio climático.....	130
Figura 5-12. Cambio en la aptitud para maíz de temporal según escenario de cambio climático.....	134

CAPITULO VI

<i>Figura 6-1. Espacios de amenaza para la estación de Atzalan, Veracruz.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 6-2. Umbrales y series históricas para maíz y café en la cuenca.</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6-3. Razón de cambio en temperatura y precipitación para los modelos de cambio climático en la cuenca.</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6-4. Estrategia general para el mantenimiento de los servicios ambientales.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 6-5. Consejo asesor propuesto y nivel de acción.....</i>	<i>160</i>

Resumen

Se evaluaron los servicios ambientales de regulación climática, regulación hídrica, provisión de agua, retención del suelo y provisión de alimentos en la cuenca alta del Río Los Pescados, en la región central del estado de Veracruz, bajo escenarios de cambio climático para llegar a establecer posibles medidas de adaptación. Se propone el enfoque de servicios ambientales ya que se considera viable para la evaluación integrada de los factores biofísicos (los ecosistemas) y el bienestar humano (las unidades vulnerables) al evaluarse escenarios de cambio climático. Se evaluaron los servicios ambientales de acuerdo a la capacidad de los ecosistemas de continuar otorgándolos al ser humano, se evaluó su vulnerabilidad actual y riesgo futuro bajo escenarios de cambio climático. Se aplicaron los Modelos de Circulación General conocidos como GFDL, ECHAM y HADLEY para obtener en conjunto la amenaza futura a la que están expuestos los servicios ambientales. Los resultados señalan que las tasas elevadas de deforestación en los bosques y selvas son de -0.13 y -0.8 por ciento anual, afectando a los servicios ambientales de regulación climática. Se observa además buena capacidad de regulación y protección hídrica debido al número de cauces con capacidad de transportar agua ante eventos extremos de lluvia. Sin embargo, los escenarios de cambio climático sugieren disminuciones en la precipitación con rangos que van del 10 al 20% respecto a los valores observados. La temperatura se incrementará desde 1°C al año 2020 hasta los 4°C para el 2050, en promedio para la cuenca, repercutiendo en la capacidad de infiltración al disminuir ésta en un 12% y hasta un 100% de acuerdo al escenario más drástico. La producción de alimentos como servicio ambiental sugiere ligeros incrementos en la aptitud agroecológica de los cultivos, por lo que es indispensable la implementación de propuestas. A partir de los resultados anteriores se proponen posibles medidas de adaptación.

Palabras clave: *adaptación, cambio climático, servicios ambientales.*

Abstract

The ecosystem services of climate and water regulation, fresh water provision, soils retention and food provision were evaluated in the "Los Pescados" high watershed, at the central region of the state of Veracruz, under climate change scenarios to establish possible adaptation measures. The ecosystem services framework is proposed since is considered viable for the integrated evaluation of biophysics (ecosystems) and the human wellbeing (vulnerable units) factors to be evaluated under climate change scenarios. The ecosystem services were evaluated according to the capacity of the ecosystems to continue providing those to human beings, it were evaluated their present vulnerability and future risk under climatic change. It were applied the General Circulation Models known as GFDL, ECHAM and HADLEY to obtain the future threat to which they are exposed. The results show the high deforestation rates in forests, from -0.13 to -0.8 percent, affecting to the ecosystem services of climate regulation. It was observed a good hydrologic regulation capacity owed to the great number of flows with capacity to transport water under extreme precipitation events. Nevertheless, the climatic change scenarios suggest decreases in precipitation with ranks that go from 10% to 20% with respect to the values observed. The temperature will increase from 1°C at 2020 to 4°C at the 2050, on average for the watershed, resulting in lower rates of infiltration capacity from -12% and even at -100%. The food production, as an ecosystem service, suggests a few increments in the natural aptitude of the crops, for which is indispensable the implementation of proposals. From the previous results, it was possible to establish adaptation measures.

Key words: *adaptation, climatic change, ecosystem services.*

Resumen

Se evaluaron los servicios ambientales de regulación climática, regulación hídrica, provisión de agua, retención del suelo y provisión de alimentos en la cuenca alta del Río Los Pescados, en la región central del estado de Veracruz, bajo escenarios de cambio climático para llegar a establecer posibles medidas de adaptación. Se propone el enfoque de servicios ambientales ya que se considera viable para la evaluación integrada de los factores biofísicos (los ecosistemas) y el bienestar humano (las unidades vulnerables) al evaluarse escenarios de cambio climático. Se evaluaron los servicios ambientales de acuerdo a la capacidad de los ecosistemas de continuar otorgándolos al ser humano, se evaluó su vulnerabilidad actual y riesgo futuro bajo escenarios de cambio climático. Se aplicaron los Modelos de Circulación General conocidos como GFDL, ECHAM y HADLEY para obtener en conjunto la amenaza futura a la que están expuestos los servicios ambientales. Los resultados señalan que las tasas elevadas de deforestación en los bosques y selvas son de -0.13 y -0.8 por ciento anual, afectando a los servicios ambientales de regulación climática. Se observa además buena capacidad de regulación y protección hídrica debido al número de cauces con capacidad de transportar agua ante eventos extremos de lluvia. Sin embargo, los escenarios de cambio climático sugieren disminuciones en la precipitación con rangos que van del 10 al 20% respecto a los valores observados. La temperatura se incrementará desde 1°C al año 2020 hasta los 4°C para el 2050, en promedio para la cuenca, repercutiendo en la capacidad de infiltración al disminuir ésta en un 12% y hasta un 100% de acuerdo al escenario más drástico. La producción de alimentos como servicio ambiental sugiere ligeros incrementos en la aptitud agroecológica de los cultivos, por lo que es indispensable la implementación de propuestas. A partir de los resultados anteriores se proponen posibles medidas de adaptación.

Palabras clave: *adaptación, cambio climático, servicios ambientales.*

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Un ecosistema es un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales y microorganismos interactuando entre ellos y con su ambiente físico no vivo como una unidad funcional (ONU, 1992). Agrupa los componentes bióticos y abióticos de un área como una unidad ecológica dinámica. Para comprender mejor que son los bienes y servicios ambientales, es importante estudiar al ecosistema es en términos de su *composición, estructura y función*.

Dentro de un ecosistema, su *composición* se refiere a todo aquello que se encuentra dentro del área funcional (Meffe, 2002), como por ejemplo la composición genética, las poblaciones, las especies, las comunidades y los paisajes. Mientras que la *estructura* de un ecosistema se refiere a las especies contenidas dentro de éste, su masa y su arreglo (Westman, 1977), es decir, como están distribuidas en el espacio y tiempo. La estructura genética, de poblaciones y de los hábitats así como el comportamiento del paisaje son algunos ejemplos.

La biodiversidad es la estructura biológica del ecosistema, es la variabilidad entre todos los organismos vivos y el complejo ecológico del cual son parte, incluye la diversidad dentro de las especies, entre las especies y de ecosistemas (ONU, 1992).

Debido a que la estructura y la composición de los ecosistemas se refiere a los elementos que componen al ecosistema mismo, éstos proveen múltiples beneficios al ser humano y han sido entendidos como los **bienes** que otorgan los ecosistemas o bienes ambientales. Son los recursos tangibles utilizados por el ser humano como insumos en la producción o consumo final, y que se gastan y transforman en el proceso (Barzev, 2002). Por su parte, Westman (1977) señala que respecto a los bienes ambientales pueden obtenerse dos tipos de beneficios: 1) de obtención o cosecha directa de productos con precios de mercado (por ejemplo peces, productos forestales y minerales) y la obtención de recursos genéticos de especies como insumos (por ejemplo semillas para plantas cultivadas o madera y animales para domesticación), y 2) el uso y apreciación de los ecosistemas para recreación, esparcimiento o estudio.

Por otro lado, la *función* de un ecosistema es la forma en que los componentes del sistema interactúan (Westman, 1977), se refiere a lo que realizan, por ejemplo los procesos genéticos, los procesos demográficos, interacciones específicas así como procesos y disturbios dentro del paisaje. Es la parte dinámica del ecosistema por lo que sus procesos han sido entendidos como los servicios que presta el ecosistema o **servicios ambientales** (Westman, 1977; MA, 2003) ya que el hombre obtiene algún tipo de beneficio a partir de estas funciones de los ecosistemas a cualquier escala, la mayoría no tiene precios de mercado y no pueden ser reemplazos por algún tipo de tecnología (Costanza, 1997).

En este sentido, en la presente tesis se planteó como objetivo central relacionar los servicios ambientales en la cuenca con el análisis de las variaciones en las condiciones climáticas presentes, así como también con el de las proyectadas

frente al cambio y variabilidad climáticos, identificando los posibles impactos sobre estos servicios, y así, junto con los dueños de la tierra y los tomadores de decisiones, encontrar las mejores medidas de adaptación frente a dichos cambios. Todo ello en la cuenca alta del Río Los Pescados, región central del Estado de Veracruz.

Así, el presente documento se encuentra dividido en cinco capítulos. El primero de ellos se refiere a la introducción general, marco teórico, planteamiento de los objetivos e hipótesis del trabajo. El segundo capítulo describe la metodología seguida y el tercer capítulo se concentra en la descripción de la zona de estudio, en su apartado físico y socioeconómico. Por su parte, el cuarto capítulo es donde se describe el clima y el cambio climático en la cuenca. El quinto capítulo es aquel donde se lleva a cabo la evaluación de algunos servicios ambientales frente al cambio y la variabilidad climática. Por último, en el sexto capítulo se establecen las medidas de adaptación propuestas resultado de la presente investigación y el séptimo capítulo describe las conclusiones.

1.1. Bienes y servicios ambientales.

Las primeras referencias sobre la función y los servicios de los ecosistemas datan de mediados de los años sesentas y principios de los setentas (de Groot, *et.al.*, 2002). A partir de entonces, ha habido una gran cantidad de publicaciones sobre los beneficios que los ecosistemas naturales proveen a la sociedad humana (Daily, 1997; Costanza, *et.al.*, 1997; de Groot, *et.al.*, 2002; Lobo, 2001).

El primer acercamiento sobre la clasificación del funcionamiento que los ecosistemas llevan a cabo en términos de otorgar servicios al ser humano fue en 1970 en el reporte del “Estudio de Problemas Ambientales Críticos” (SCEP, 1970, citado por Daily, 1997), donde se enlistan los siguientes servicios ambientales: control de parásitos y enfermedades, polinización por insectos, pesca, regulación climática, retención de suelo, control de inundaciones, formación de suelo,

reciclamiento de materia y composición de la atmósfera. Holdren y Ehrlich (1974) incluyeron como funciones del ecosistema al ambiente global el mantenimiento de la fertilidad del suelo y el mantenimiento del acervo genético. Con estos once servicios ambientales normalmente la lista estaba esencialmente completa (Mooney, 1997).

No obstante, en los últimos años han surgido nuevas formas de clasificar a los bienes y servicios ambientales, siempre a partir de algún criterio: Norberg (1999) toma como base de agrupación el *nivel de organización* dentro del ecosistema mientras que Moberg y Folke (1999) se enfocan en un agrupamiento más *descriptivo*. Pagiola (2003) por su parte los agrupa de acuerdo al grupo de personas que son beneficiados por dichos servicios y de Groot *et.al.*, (2002) y la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MA, 2003) clasifican a los bienes y servicios ambientales a partir de la *función* que los ecosistemas realizan.

Clasificación por nivel de organización.

Respecto a la agrupación por nivel de *organización*, Norberg (1999) señala la importancia de comprender los mecanismos ecológicos que unen a los servicios ambientales con el sistema que lo soporta: el ecosistema, por lo que bajo una perspectiva ecológica responde a tres criterios para clasificar los servicios ambientales: 1) ¿son los bienes o servicios ambientales internos del ecosistema mismo o se comparten con otros sistemas?, 2) ¿son los bienes o servicios bióticos o abióticos? y 3) ¿a que nivel en jerarquía ecológica son mantenidos los bienes y servicios? Bajo estos criterios ecológicos, distingue tres tipos generales de servicios que tienen similitudes en términos de propiedades ecológicas y en cómo estos son mantenidos:

1. Bienes o servicios que son asociados con ciertas especies o a un grupo similar de especies y por los cuales los bienes o servicios son internos al ecosistema. Estos servicios son comúnmente relacionados al crecimiento o mantenimiento de una especie en particular. Algunos ejemplos van a incluir

bienes que tienen precios de mercado como alimento, pesca, madera, químicos farmacéuticos y flores, ya sean estos producidos por especies naturales o cultivadas. Incluye también a insectos, abejas, pájaros y otros animales que polinizan a los cultivos o bien, ayudan a dispersar las semillas o que tienen algún control sobre plagas y enfermedades. Además, considera aquellas especies animales o vegetales que proveen belleza estética (flores, pájaros, zebras, etc) o belleza espiritual como el sentido de aventura (lobos, tigres, leones, etc).

2. Servicios que regulan entradas físicas o químicas exógenas al sistema, donde el sistema mismo no puede afectar dichas entradas. Para el autor, estos servicios están asociados con toda la comunidad o con el ecosistema mismo más que con alguna especie en particular. Estos servicios son resultado de los procesos internos respecto al material y la energía dentro del ecosistema. La biota funge como una parte muy significativa dentro de los ciclos globales de compuestos como el agua, bioxido de carbono y nitrógeno, entre otros. El autor señala que estos servicios pueden ser entendidos como una analogía a “filtros” que el ecosistema regula. La vegetación juega un papel importante en el balance hídrico y en la fertilidad del suelo, la polinización, el control biológico, la resistencia contra la invasión, la protección de rayos ultravioleta, la regulación climática, la captura de carbono, la prevención de la erosión y la regeneración de los nutrientes son algunos ejemplos.
3. Servicios relacionados a la organización de las entidades bióticas de un ecosistema. La organización biológica se refiere a un comportamiento no arbitrario, estructura o redes de interacción en el tiempo o espacio, morfología, color, etc. La organización de los genes a través de la selección natural, la distribución espacial de una población, la dispersión, competencia o el desarrollo de redes alimenticias son algunos ejemplos de la función de la naturaleza y capacidad del ecosistema a adaptarse a

cambios. El mantenimiento de las especies, regeneración, selección natural y variabilidad genética son algunos ejemplos. Este tipo de funciones son fundamentales para el ecosistema y para los servicios que proveen por lo que el autor también los reconoce como servicios de soporte.

Clasificación descriptiva.

En lo que se refiere a un agrupamiento de tipo *descriptivo*, Moberg y Folke (1999) se enfocan en cómo los bienes y servicios son generados y sostenidos por las comunidades biológicas, tomando como ejemplo las barreras coralinas en diferentes regiones del mundo definieron dos grandes grupos: bienes ecológicos y servicios ecológicos.

1. Bienes Ecológicos. Estos son divididos en recursos renovables y en recursos mineros. Respecto a los primeros se señala que su aprovechamiento puede ser sostenible, de ahí que sean entendidos como renovables, aunque la dinámica muy compleja de los ecosistemas coralinos implica que es extremadamente difícil estimar rangos adecuados de cosecha de estos productos. Dentro de estos ecosistemas, el hombre puede obtener una gran variedad de productos como peces, mariscos, crustáceos y algas, además de un gran número de productos farmacéuticos provenientes de algas, esponjas, moluscos, corales y anémonas. No menos importantes son los productos para joyería y ornato, así como colecciones de especies para acuarios o centros de investigación. En lo que se refiere a los recursos mineros, la explotación de los corales para la obtención de materiales para construcción como cemento, cal, bloques y arena, sirven como principales componentes de construcción en diferentes partes del mundo. En algunas ocasiones se producen fertilizantes a partir de estos productos coralinos o bien, recursos como gas y aceites.

2. Servicios Ecológicos. Las funciones que los ecosistemas coralinos llevan a cabo dentro de su ecosistema y la consecuente generación de servicios ambientales

generalmente es poco percibida. A estos servicios ecológicos se les han subdividido en: 1) Servicios de estructuras físicas, que se refieren a la protección que los corales realizan a las líneas costeras sobre corrientes y tormentas, disipan la energía de las olas y propicia la formación de vegetación marina. 2) Servicios bióticos, estos incluyen las funciones de protección física y soporte biológico, proveen la alimentación de gran cantidad de organismos, facilita la diversificación del nicho ecológico y así posibilita la evolución de nuevas especies, son fuente de alimento para peces y depredadores de estos. 3) Servicios biogeoquímicos ya que los corales fijan nitrógeno en ambientes pobres de nutrientes, asimilan el nitrógeno atmosférico y el dióxido de carbono atmosférico, tienen capacidad de inmovilizar o secuestrar contaminantes y transformar, desintoxicar y limpiar desechos humanos como servicios de limpieza. 4) Servicios de información, debido a que muchos ecosistemas coralinos son usados en monitoreo y como registradores de elementos químicos debido a su alta sensibilidad, también han sido usados como fuente de información respecto a registros climáticos. 5) Servicios socio-culturales como el valor recreacional y de ingresos por turismo, valor estético, valor espiritual y religioso, así como también forma parte del sustento de muchas comunidades.

Clasificación por grupo beneficiado.

Desde el punto de vista de quién es el beneficiado y con un enfoque forestal, Pagiola (2003) entiende a los servicios ambientales como a) aquellos que proporcionan beneficios a los usuarios directos del bosque, 2) los que brindan beneficio a escala nacional y 3) los que ofrecen beneficios a nivel global.

Clasificación por función de los ecosistemas

De acuerdo con De Groot, *et.al.*, (2002) el primer paso hacia la evaluación de los bienes y servicios de los ecosistemas involucra la traducción de la complejidad ecológica (estructuras y procesos) a un número limitado de funciones de los

ecosistemas. Estas funciones son las que proveerán de bienes y servicios que el hombre necesita para vivir y puede valorar.

Sin embargo, el término de “función de los ecosistemas” ha tenido varias interpretaciones, en ocasiones es usado para describir el funcionamiento interno de un ecosistema y en otras se relaciona más al beneficio derivado por el hombre de las propiedades y procesos del ecosistema. En este sentido, la *función* de los ecosistemas debe ser entendida como “la capacidad de los procesos y componentes naturales de proveer bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente”. Cada función es el resultado de procesos naturales de todo el subsistema natural del cual son parte. Los procesos naturales son la consecuencia de interacciones complejas entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema a través de fuerzas universales de materia y energía.

En este sentido, De Groot, *et.al.*, (2002) sugieren conveniente agrupar las funciones de los ecosistemas en cuatro categorías:

1. Función de regulación. Este grupo se relaciona a la capacidad de los ecosistemas naturales y seminaturales de regular los procesos ecológicos esenciales y los sistemas que soportan la vida a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos. Algunos de los procesos más importantes de regulación de los ecosistemas incluyen a la transformación de energía en biomasa, principalmente de radiación solar, almacenaje y transferencia de minerales y energía en productividad secundaria, los ciclos biogeoquímicos, mineralización de la materia orgánica en suelos y sedimentos, así como la regulación del sistema climático. Todos los procesos son regulados por la interrelación de los factores abióticos con los organismos vivos a través de la evolución y mecanismos de control. Es importante señalar que debido a los beneficios indirectos de estas funciones de regulación, no son reconocidos hasta que son degradados o perdidos.

2. Función de hábitat. Los ecosistemas proveen refugio y hábitat de reproducción a plantas y animales, en consecuencia contribuyen a la conservación de la diversidad biológica y genética. Provee espacio físico para plantas y animales silvestres, ya sean residentes o migratorios, por lo que los ecosistemas pueden ser vistos como depósitos o almacenes de información genética. También suministran áreas de alimentación y crecimiento para algunas especies, que de adultos, pueden ser cosechados por el hombre.

3. Función de producción. La fotosíntesis y la absorción de nutrientes por organismos autótrofos convierte la energía, bióxido de carbono, agua y nutrientes, en gran variedad de carbohidratos que pueden ser usados por productores secundarios para crear una mayor variedad de biomasa. Esta diversidad provee bienes para el ser humano como alimentos derivados de plantas cultivadas, animales domesticados o bien, plantas y animales silvestres. Obtención de materias primas para todo tipo de propósito industrial, combustible, químicos para ser usados como farmacéuticos, recursos ornamentales, fuerza animal y bioquímica así como alimento para animales son algunos ejemplos.

4. Función de información. Los ecosistemas pueden proveer funciones esenciales de referencia al ser comparados entre sí, además de contribuir al mantenimiento de la salud humana proveyendo oportunidad de reflexión, enriquecimiento espiritual, educación, investigación, desarrollo cognitivo, recreación y experiencia estética.

Por otra parte, la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MA, 2003) agrupa el concepto de bienes y servicios, entendiéndolos a ambos simplemente como servicios ambientales, ya que de manera directa o indirecta, la población humana se beneficia de éstos. De esta forma, define los servicios ambientales como todos aquellos beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas. Dentro de la definición se incluyen a los ecosistemas naturales y a los modificados por el hombre ya que indistintamente son la fuente de los servicios ambientales. Incluye

además los beneficios tangibles e intangibles de los ecosistemas, los cuales comúnmente son separados en “bienes” y “servicios ambientales” respectivamente, ya que el ser humano obtiene beneficios sin distinción entre ambos.

Así, la categorización de los servicios ambientales también es a partir de la función que los ecosistemas realizan, e incluye a los *servicios de provisión*, *servicios de regulación*, *servicios culturales* y *servicios de soporte*. Esta clasificación busca resaltar los servicios de soporte, imprescindibles para el mantenimiento de los ecosistemas, de aquellos que proveen beneficios directos a los seres humanos (MA, 2003).

Servicios de provisión. Comprenden los bienes producidos o proveídos por los ecosistemas, tales como comida, bioquímicos (medicina natural y farmacéutica), recursos genéticos, madera para combustible, fibra, recursos ornamentales, agua, minerales, entre otros.

Servicios de soporte. Son los servicios que mantienen las condiciones de vida en la tierra, los servicios de soporte son necesarios para que se produzcan los otros servicios de los ecosistemas. La producción primaria, producción de oxígeno, polinización, formación de suelo, retención de suelo, ciclo de nutrientes y la provisión de hábitat.

Los servicios de soporte difieren de los servicios de provisión, regulación y culturales porque su impacto en el ser humano es indirecto o bien ocurre sobre largos periodos de tiempo y escala, mientras que los cambios en los otros servicios son relativamente directos y en corto tiempo (MA, 2003). Por ejemplo, para el servicio ambiental de soporte *formación de suelo*, el hombre no lo usa directamente, sin embargo, cualquier cambio sobre éste puede afectar indirectamente a la población ya que afecta al servicio ambiental de producción de alimento, como es el caso de la producción de maíz y café, por ejemplo.

Servicios de regulación. Son los servicios del ecosistema que regulan el ambiente humano, como por ejemplo el mantenimiento de la calidad del aire, la regulación climática, la regulación del agua, el control de la erosión, la purificación de agua y residuos, regulación de enfermedades humanas, el control biológico, la desintoxicación y la protección hacia tormentas.

Servicios culturales. Son los beneficios no materiales que se obtienen del ecosistema a través del enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión, recreación y experiencia estética. Estos incluyen la diversidad cultural e identidad, valores espirituales y religiosos, sistemas de conocimiento (tradicional o formal), valor educacional, inspiración, valor estético, relación social, sentido de lugar, herencia cultural así como la recreación y ecoturismo.

Con el objetivo de determinar la significancia ecológica de diferentes áreas, Lobo (2001) considera clasificar los servicios de acuerdo a la función que los ecosistemas realizan y las divide en cuatro tipos:

1. Función de regulación. Este grupo es señalado de acuerdo a la capacidad de los ecosistemas de regular el ambiente humano. Incluye dentro de esta categoría la protección contra radiaciones peligrosas, polinización de cultivos agrícolas, regulación de la composición química de la atmósfera, regulación de composición química de los océanos, regulación del clima local y global, prevención de escurrimientos y prevención de inundaciones, recarga hídrica, prevención de la erosión y control de sedimentos, formación de suelo y mantenimiento de la fertilidad, fijación de energía solar y producción de biomasa, almacenaje y reciclamiento de materia orgánica, nutrientes y desechos humanos, regulación de mecanismos de control biológico, mantenimiento del hábitat y diversidad biológica.

2. Función de mantenimiento. Se refiere a la capacidad del ecosistema de mantener la vida sobre la corteza de la tierra, incluye en esta clasificación a la capacidad de proveer espacio y materiales para la construcción de habitaciones

humanas, otorgamiento de espacios y condiciones para cultivos, industria, caminos, conversión de energía así como para recreación y turismo.

3. Función de producción. La función de los ecosistemas en cuanto a producción de agua, comida, recursos genéticos y medicinales, materias primas para vestido, construcción, uso industrial, bioquímicos, energía y combustible, fertilización y forraje.

4. Función de información. Los ecosistemas proveen muchos valores estéticos que pueden ser usados por la sociedad otorgando condiciones únicas para las necesidades espirituales y religiosas de los grupos humanos. La información histórica (valor de herencia cultural) que la gente acumula con los años sobre el uso de plantas y animales así como la interacción con su medio ambiente ha sido motivo de investigaciones científicas y educativas en campos como agricultura, medicina y toxicología.

Como se ha observado, el entender y evaluar los servicios ambientales provee información que puede sustentar, hacia el futuro, la continuación sostenida de la provisión de dichos servicios ambientales hacia las generaciones futuras.

En el caso particular de la presente investigación, se escogieron, dentro del criterio de clasificación por función que los ecosistemas realizan, los servicios ambientales de regulación climática, de regulación hídrica, de provisión de agua, de retención del suelo y de producción de alimentos, para ser evaluados frente al cambio y variabilidad climáticos, determinando cuán importante serán dichos cambios y evaluar, junto con las personas involucradas en la zona de estudio, posibles medidas de adaptación.

1.2. Cambio climático

De acuerdo con la Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC, 1992) en su Artículo 1, define el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.”

Como se observa, dicha definición hace una distinción entre el “cambio climático” atribuible a 1) actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y 2) la “variabilidad del clima” atribuible a procesos naturales.

Los procesos naturales de variabilidad del clima pueden ser catalogados en causas externas e internas. Las causas externas se refieren por ejemplo a los cambios en la naturaleza de la órbita de la tierra alrededor del sol y variaciones en la energía recibida proveniente del sol. Los cambios en la órbita de la tierra ocurren regularmente, la excentricidad de la misma varía en ciclos de aproximadamente 95,800 años (Goodess *et.al.*, 1992). Como resultado de estas variaciones cíclicas la radiación que se recibe en la superficie terrestre es cambiante. En los últimos 5 millones de años ha cambiado de un patrón más circular a uno más excéntrico, coincidiendo con cambios en la radiación recibida entre +0.014 y -0.17% respectivamente, sobre los niveles actuales (Henderson-Sellers y McGuffie, 1987). Además, la inclinación del eje de la tierra varía con una periodicidad promedio de 41 000 años. Actualmente su inclinación es de 23.5°, pero tiene una fluctuación entre 22° y 24.5°. Sin embargo, la oblicuidad del eje no altera la cantidad de radiación recibida, solamente su distribución (Arhens, 1994). La combinación del efecto del cambio en la excentricidad de la órbita de la tierra alrededor del sol y de la oblicuidad del eje de la tierra conducen a calentamientos o enfriamientos globales con una periodicidad de 22 000 años (McGregor y Nieuwolt, 1998).

Por su parte, los factores internos incluyen procesos lentos pero de larga duración, relacionados con los cambios en la circulación oceánica, contenido gaseoso de la atmósfera y cambios en las condiciones de límites geográficos. Por su naturaleza, estos factores pueden cambiar los climas a plazos de decenas de miles a millones de años (Goodess *et.al.*, 1992). Por ejemplo, los cambios en la composición gaseosa de la atmósfera, especialmente en la concentración de CO₂ afecta la eficacia de este gas como cubierta termal (Genthon *et.al.*, 1987). También la concentración de metano en la atmósfera ha variado a lo largo de las distintas épocas geológicas, como reflejo del total de áreas pantanosas que son la principal fuente de metano atmosférico (Goodess *et.al.*, 1992). Otro componente involucrado en cambios climáticos son los aerosoles atmosféricos, ya sea de origen terrestre o marino, los que tienen un efecto en la temperatura ya que al incrementarse la concentración de aerosoles conlleva a un descenso de la temperatura (Arhens, 1994).

Las erupciones volcánicas pueden tener un impacto significativo en el clima, ya que durante las erupciones se emiten partículas finas de ceniza y polvo así como gases que pueden llegar a la estratosfera y permanecer allí por varios años (Kelly *et.al.*, 1996). Los cambios en los límites geográficos producidos por el movimiento de las placas tectónicas y el desarrollo de montañas y los cambios asociados en la distribución de tierras y aguas y el nivel del mar, todos desempeñan un papel muy importante en los cambios climáticos.

Por otro lado y no menos importantes, a las actividades humanas se les ha atribuido un grado de alteración a la composición de la atmósfera, ya sea directa o indirectamente. Lo anterior como resultado del aumento de la concentración de los gases efectos invernadero (GEI) tales como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos (N₂O) y los clorofluorocarbonos (CFC's) [Houghton *et.al.*, 1992].

Hay una amplia evidencia de que la concentración de los GEI se ha incrementado considerablemente en los últimos 100 años y una de las principales razones por las que los GEI continúa incrementándose es debido a que la emisión por actividades humanas exceden por mucho a su grado de absorción por el medio; el balance entre las diferentes fuentes y sumideros ha sido alterado, incrementándose debido al uso de combustibles fósiles y aumentando la deforestación (McMichel *et.al.*, 1996).

Aunque el CO₂ es el GEI dominante en volumen, los otros GEI (CH₄, N₂O y CFCs) colectivamente igualan al CO₂ en su habilidad de aumentar el efecto invernadero atmosférico (Lal *et.al.*, 2000). Por otra parte, los modelos predicen que al incrementarse la temperatura de los océanos se aumentará la evaporación y por tanto el vapor de agua atmosférico, el cual es el GEI más potente. La adición de más vapor de agua produce un mecanismo de retroalimentación positivo al acelerar el incremento de temperatura. Sin considerar este mecanismo de retroalimentación, la mayoría de los modelos predicen que al duplicar la actual concentración de CO₂ se produciría un calentamiento de 1 o 2°C (Arhens, 1994).

Unido a todo lo anterior, como evidencia, existen una serie de observaciones del conjunto global de la tierra que muestran fases de calentamiento y de cambios en el sistema climático (IPCC, 2001a), entre ellos, los siguientes:

La temperatura media mundial de la superficie ha aumentado en 0.6°C aproximadamente en el siglo XX. Durante el siglo XX el aumento de la temperatura ha sido de 0.6°C ± 0.2°C. Se señala que la mayor parte del calentamiento que se produjo en ese siglo tuvo lugar en dos periodos: de 1910 a 1945 y de 1976 al año 2000 y que dicho aumento de temperatura ha sido el mayor de todos los siglos en los últimos mil años. Además, es muy probable¹ que los

¹ En el resumen para responsables de políticas y en el resumen técnico del IPCC (2001) se utilizan las siguientes expresiones para indicar cálculos de confianza basados en apreciaciones: *prácticamente seguro* (más del 99 % de probabilidades de que el resultado sea verdad); *muy probable* (90 a 99 % de probabilidades); *probable* (66 a 90 % de probabilidades); *probabilidad media* (33 a 66 % de probabilidades); *improbable* (10 a 33 % de probabilidades); *muy improbable* (1 a 10 % de probabilidades); *excepcionalmente improbable* (menos del 1 % de probabilidades).

años noventa hayan sido el decenio más cálido y 1998 el año más cálido en el registro instrumental desde 1861.

Las temperaturas han aumentado durante los cuatro últimos decenios en los 8 kilómetros inferiores de la atmósfera. Desde finales de la década de los 50's, el aumento de la temperatura mundial general en los 8km inferiores de la atmósfera y en la temperatura de la superficie ha sido similar a 0.1°C por decenio. Desde el inicio de los registros de los primeros 8km de la atmósfera en 1979 la temperatura mundial ha cambiado en $+0.05 \pm 0.10^\circ\text{C}$ por decenio, principalmente en las regiones tropicales y subtropicales.

La extensión del hielo y de la capa de nieve ha disminuido. Los datos de los satélites muestran que es muy probable que haya habido disminuciones de un 10% en la extensión de la capa de nieve desde finales de los años 60, y las observaciones en tierra muestran que es muy probable que haya habido una reducción de unas dos semanas en la duración anual de la capa de hielo en lagos y ríos en latitudes medias y altas del hemisferio norte durante el siglo XX. También señala que ha habido una recesión generalizada de los glaciares de montaña en las regiones no polares durante el siglo XX y que la extensión del hielo marino en primavera y verano en el hemisferio norte ha disminuido de 10 a 15% desde los años cincuenta.

El nivel medio del mar en todo el mundo ha subido y el contenido de calor de los océanos ha aumentado. Los datos de los mareógrafos muestran que el nivel medio del mar en el mundo subió entre 0.1 y 0.2 metros durante el siglo XX y que el contenido de calor mundial de los océanos ha aumentado desde finales de los años cincuenta, período para el que se dispone de observaciones adecuadas de las temperaturas submarinas.

También se han producido cambios en otros aspectos importantes del clima. Es muy probable que las precipitaciones hayan aumentado de 0.5 a 1% por decenio

en el siglo XX en la mayoría de las latitudes medias y altas de los continentes del hemisferio norte y es probable que la cantidad de lluvia haya aumentado de 0.2 a 0.3 % por decenio en las regiones tropicales (de 10°N a 10°S). Los aumentos en los trópicos no son obvios en los últimos decenios. También es probable que la cantidad de lluvia haya disminuido en un 0.3% por decenio en gran parte de las zonas subtropicales (de 10°N a 30°N) del hemisferio norte durante el siglo XX. Contrariamente al hemisferio norte, no se han detectado cambios significativos en el hemisferio sur. Los episodios de calor del fenómeno El Niño (que frecuentemente influye en las variaciones regionales de precipitaciones y temperaturas en muchas zonas de los trópicos, de los subtrópicos y en algunas zonas de latitud media) han sido más frecuentes, persistentes e intensos desde mediados de los años 70 en comparación con los cien años anteriores.

Las causas del cambio climático y las evidencias de dicho cambio en el sistema climático terrestre descritas anteriormente, sugieren que bajo la influencia humana seguirá cambiando la composición atmosférica durante el presente siglo (IPCC, 2001a). Estos cambios proyectados son principalmente en:

Gases de efecto invernadero (GEI). El informe señala que es prácticamente seguro que las emisiones de CO₂ debidas a la quema de combustible de origen fósil constituirán la influencia dominante en las tendencias de concentración atmosférica de CO₂ durante el siglo XXI. Al aumentar las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, tierras y océanos absorberán una parte cada vez menor de las emisiones antropógenas de CO₂. Hacia el año 2100, los modelos del ciclo del carbono prevén concentraciones atmosféricas de CO₂ que van de 540 a 970 ppm para diversos escenarios. Además, se apunta que si todo el carbono liberado a raíz de los cambios históricos en el uso de la tierra pudiera ser reabsorbido por la biosfera terrestre en el transcurso de este siglo (por ejemplo mediante la reforestación), la concentración de CO₂ se reduciría en 40 a 70 ppm. Por lo tanto, es prácticamente seguro que las emisiones de CO₂ procedentes de los

combustibles de origen fósil seguirán siendo el factor dominante de las tendencias que regirán la concentración atmosférica de CO₂ durante este siglo.

Temperatura. La sensibilidad del clima es la respuesta de equilibrio de la temperatura de la superficie mundial a una duplicación de la concentración de CO₂ equivalente. Por ello, señala el informe que es probable que la sensibilidad del clima sea de entre 1.5 y 4.5°C. También, que es muy probable que en casi toda la superficie terrestre el calentamiento sea más rápido que el promedio mundial, sobre todo en las altas latitudes del hemisferio norte durante la estación fría. Los resultados de las últimas simulaciones indican que en el invierno, el calentamiento en todas las regiones septentrionales de latitudes altas supera en más de un 40% el índice medio de calentamiento mundial en cada uno de los modelos (que es de 1.3 a 6.3°C en toda la gama de modelos y escenarios considerados). Se proyecta que la temperatura media de la superficie mundial aumentará entre 1.4 y 5.8°C en el período comprendido entre 1990 y 2100. Estos resultados, obtenidos con varios modelos climáticos corresponden a los 35 escenarios del informe sin excepción.

Precipitaciones. Se proyecta que habrá un aumento de los promedios mundiales de vapor de agua, evaporación y precipitaciones. A escala regional, subraya el informe, se observan tanto aumentos como disminuciones. Los resultados indican una probabilidad de aumento de las precipitaciones tanto en verano como en invierno en las latitudes altas. Durante el invierno también se observan aumentos en las latitudes medias del hemisferio norte, mientras que en Australia, América Central y el África meridional se registra una disminución constante de las lluvias durante el invierno. Por último, señala el reporte que existe una estrecha correlación entre la variabilidad interanual de las precipitaciones y el promedio de las precipitaciones. Es decir, es probable que si el promedio de las precipitaciones aumenta en el futuro, también aumente la variabilidad. A la inversa, es probable que la variabilidad de las precipitaciones disminuya únicamente en las zonas en las que descienda el promedio de las precipitaciones.

Fenómenos extremos. Es muy probable que aumente el número de días calurosos y las olas de calor en casi toda la superficie terrestre. Se proyecta que estos aumentos serán más acentuados sobre todo en las zonas en las que disminuya la humedad del suelo. Se prevé que la temperatura mínima diaria aumentará en casi toda la superficie terrestre y que el ascenso será por lo general mayor en los lugares en que se retraiga la nieve y el hielo. Es muy probable que disminuya el número de días de heladas y las olas de frío. Se proyecta que los cambios en la temperatura del aire en la superficie y en la humedad absoluta en la superficie provocarán un aumento del índice de calor (medida que refleja los efectos combinados de la temperatura y la humedad). Se prevé que las precipitaciones extremas aumentarán hasta alcanzar valores superiores al promedio y que también aumentará la intensidad de los fenómenos de precipitaciones. Se proyecta que la frecuencia de las precipitaciones extremas se incrementará en casi todo el mundo. Las proyecciones indican una desecación general de la superficie continental en las latitudes medias durante el verano. Esto se atribuye a una combinación de temperaturas más altas con una mayor evaporación potencial, no compensada por un aumento en las precipitaciones.

Variabilidad natural. Respecto a la variabilidad natural, el reporte del IPCC señala que muchos modelos muestran una respuesta media similar al fenómeno El Niño en la zona tropical del Pacífico, con proyecciones que indican que el ascenso de las temperaturas en la superficie del mar en la región ecuatorial del Pacífico central y oriental va a ser mayor que en la región ecuatorial del Pacífico occidental, y traerá aparejado un desvío de las precipitaciones medias hacia el este. Las proyecciones actuales muestran poco cambio o un leve aumento en la amplitud de los episodios El Niño en los próximos 100 años. Sin embargo, aunque la amplitud de El Niño no cambie, o cambie muy poco, es probable que el calentamiento de la Tierra dé lugar a fenómenos más extremos de desecación y lluvias intensas y a un mayor riesgo de que se produzcan sequías e inundaciones a raíz de los episodios El Niño en muchas regiones. En este trabajo se utilizará al fenómeno de El Niño como ejemplo de variabilidad natural en la región de estudio.

Hielo terrestre. La recesión general de los glaciares y los casquetes de hielo continuará durante el siglo XXI y se proyecta que la capa de nieve y el hielo marino del hemisferio norte seguirán disminuyendo. Es probable que la capa de hielo de la Antártida adquiera mayor masa debido al aumento de las precipitaciones, y que la capa de hielo de Groenlandia pierda masa debido a que el volumen de escurrimiento será mayor que el de las precipitaciones.

El nivel del mar. En todos los escenarios del informe se proyecta un aumento del nivel del mar de entre 0.09 y 0.88 m en el período comprendido entre 1990 y 2100, fundamentalmente a causa de la expansión térmica y la pérdida de masa de los glaciares y los casquetes de hielo. El valor central del intervalo es de 0.48 m, lo que corresponde a una tasa media dos a cuatro veces mayor, aproximadamente, que la tasa registrada en el transcurso del siglo XX.

1.3. Planteamiento del problema.

De acuerdo a los análisis del comportamiento climático mundial y como lo señala el IPCC (2001a), “existen nuevas pruebas más fehacientes de que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se debe a las actividades humanas”. Por lo que, de acuerdo al mismo reporte, “la influencia humana seguirá cambiando la composición atmosférica durante el siglo XXI”.

En este sentido, es evidente que los cambios proyectados en los sistemas climáticos mundiales afectarán (de muchas y variadas formas) a los ecosistemas naturales y a los modificados por el hombre, con consecuencias en el otorgamiento de los bienes y servicios ambientales que éstos (los ecosistemas) proveen.

Así, se señala por ejemplo que los ecosistemas forestales (IPCC, 2002) se verán afectados directamente y también vía interacciones con otros factores, como lo es el cambio de uso del suelo. Directamente, porque se esperan cambios en la

fenología de muchas especies ya que dependen del comportamiento, entre otros, de variables climáticas como temperaturas máximas y mínimas. Los modelos de cambio climático sugieren que, a gran escala, las zonas climáticas aptas para las especies boreales y templadas, se desplacen en un rango de 200 a 1200 kilómetros hacia el norte para el año 2100 (de acuerdo a un incremento para estas latitudes de 2 a 8°C). Mientras que la evidencia paleoecológica señala que en el pasado las especies migraron sólo de 20 a 200 kilómetros por siglo de acuerdo a los rangos de cambio climático a esas fechas.

Es por ello que, si actualmente se tiene mayor certeza en los efectos que el cambio y variabilidad climáticos traerán consigo sobre los ecosistemas en los próximos años, se requiere de aumentar los estudios y los esfuerzos en las medidas de “adaptación” a dichos cambios. Ya que, como lo señala el IPCC (2001b) “la adaptación al cambio climático brinda la posibilidad de reducir en forma sostenible muchos de los impactos adversos de ese cambio y aumentar los impactos benéficos, aunque ambos tienen su costo y dejan daños residuales”.

La presente tesis se enfoca en evaluar la vulnerabilidad de la gente y los grupos sociales ante escenarios de cambio climático. Para llevar a cabo dicha evaluación, los factores biofísicos (los ecosistemas) y el bienestar humano (las unidades vulnerables) pueden evaluarse de manera aislada bajo diversos métodos y enfoques. Sin embargo, se considera que una forma de llevar a cabo la evaluación integrada es *bajo el enfoque de servicios ambientales*², ya que los factores biofísicos (los ecosistemas) son los que proveen bienes y servicios para el bienestar humano (las unidades vulnerables). Por ello, la presente tesis es entendida como una propuesta para evaluar el bienestar humano a partir de la obtención de servicios ambientales; es el punto de unión entre los dos elementos al evaluarse escenarios de cambio climático.

² Un *enfoque* es dirigir la atención o el interés hacia un asunto o problema desde unos supuestos previos, para tratar de resolverlo acertadamente. En el presente documento se utiliza el *enfoque de servicios ambientales* como la forma de dirigir el interés hacia los beneficios que prestan los ecosistemas, a partir de sus funciones biológicas y de los que el ser humano se beneficia a cualquier escala.

1.4. Objetivos

Los objetivos planteados en la presente tesis fueron los siguientes:

Analizar las variaciones en las condiciones climáticas presentes así como también las proyectadas frente al cambio y variabilidad climática para identificar los posibles impactos sobre los servicios ambientales en la cuenca alta del Río Los Pescados, región central del Estado de Veracruz.

Llegar a identificar las posibles medidas de adaptación frente al cambio y variabilidad climáticos que sean acordes al bienestar social y al entorno natural.

1.5. Hipótesis

Considerando que el cambio y la variabilidad climáticos son inminentes para el planeta, así también lo serán a nivel regional y local. Se espera que dichos cambios tengan efectos sobre la capacidad de otorgar bienes y servicios ambientales por los ecosistemas, por lo que será posible su evaluación a través de sus posibles impactos.

La forma de llevar a cabo la evaluación integrada es a través del análisis de los servicios ambientales que ofrece una determinada área o ecosistema, y es a través de éste análisis que se ligan los factores biofísicos (suelo, clima, vegetación, etc.), que son los que proveen bienes y servicios, con el bienestar humano (las unidades vulnerables).

El conocimiento que tiene la población local sobre su entorno permitirá contar con criterios más detallados para establecer medidas de adaptación frente a los cambios proyectados.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

En esta tesis, toda vez que se delimita la cuenca, ésta es caracterizada de acuerdo a sus componentes físicos y socioeconómicos. En dicha caracterización se describen los principales elementos del medio natural, tales como geología, suelos, climas y uso del suelo y vegetación. Por otra parte, para el medio socioeconómico se presenta una breve descripción de las características de la población, marginación, vivienda y actividad económica.

Se identifican los principales servicios ambientales en la cuenca para ser evaluados, estimando el estado actual en que se encuentran los ecosistemas en cuanto a su capacidad de continuar proveyendo dichos servicios ambientales. Una vez definidos los servicios ambientales, estos se confrontan de manera particular frente a escenarios de cambio climático de acuerdo a una modificación de lo sugerido por el National Center for Atmospheric Research (2004) cuya propuesta se esquematiza a continuación:

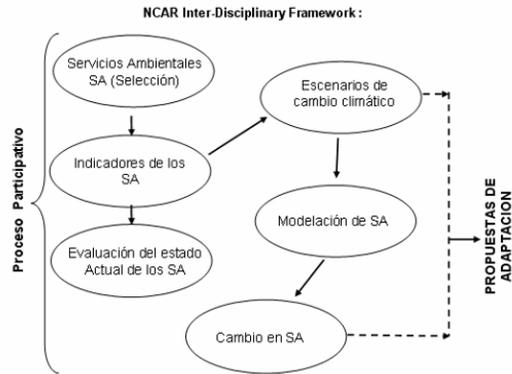


Figura 2–1. Esquema metodológico propuesto por el NCAR (2004).

A partir de lo anterior, los cambios que se podrían observar en el otorgamiento y en la calidad de los servicios ambientales por los ecosistemas son evaluados, para de esta manera poder estimar su posible comportamiento frente al cambio y variabilidad climáticos.

Finalmente, en este trabajo se identifican las posibles propuestas de adaptación al cambio y variabilidad climáticos, quedando el esquema metodológico como se señala en la Figura 2-2 y su descripción en los siguientes párrafos.

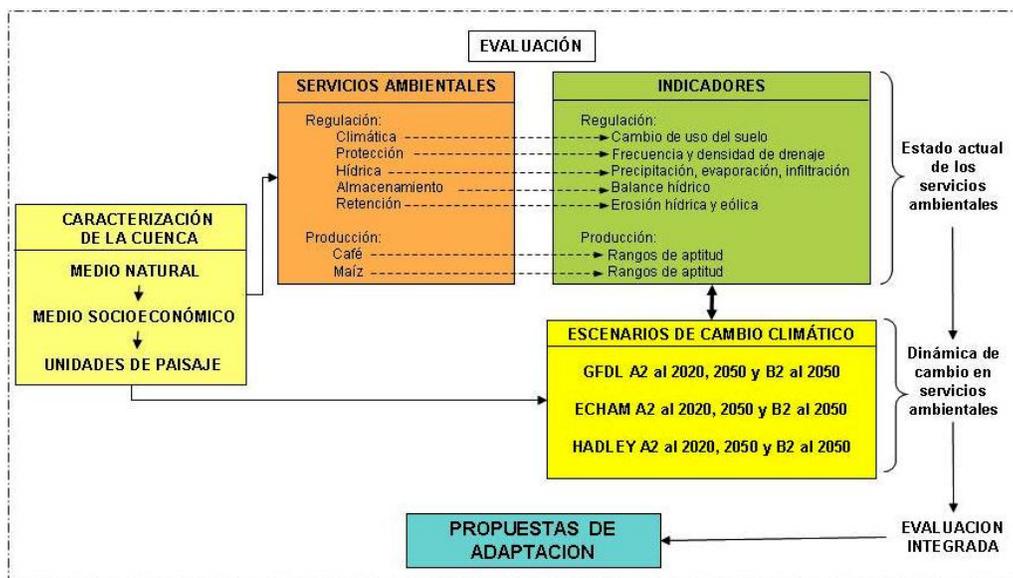


Figura 2–2. Esquema metodológico seguido en el estudio.

2.1 Caracterización de la cuenca

En la tesis se presenta una compilación de estudios previos sobre recursos naturales, actividades productivas y aspectos socioeconómicos. Se conjuntó la información existente y cartográficamente se obtuvieron mapas del sistema Internet en formato digital, otras coberturas se recabaron de mapas temáticos (escalas 1:250,000 y 1:50,000) haciendo los recortes respectivos para el polígono del límite de la cuenca.

Los mapas señalados se conjuntaron en un Sistema de Información Geográfica, conformando así toda la información base del Subsistema Natural. Se trabajó también en el recorte y manipulación de la imagen de Satélite (GeoCover, 2000, Orthorectified Landsat Enhanced Thematic Mapper ETM), que ayudó en la descripción física de la cuenca.

La base cartográfica se basó en la compilación de las características de la cuenca respecto al medio natural que comprendió el recorte de los mapas temáticos y su descripción de cada una de las características y propiedades, como son: fisiografía, geología, fallas y fracturas, climas, regiones hidrológicas, corrientes superficiales, tipos de suelos, uso del suelo y vegetación.

La delimitación de las unidades de paisaje se basó en la metodología del levantamiento fisiográfico (Ortiz y Cuanalo, 1984), adaptado para la caracterización de unidades del paisaje. Lo anterior fue únicamente con fines descriptivos de los recursos naturales de acuerdo a la propuesta de Gómez (2002).

La información social de la cuenca fue recabada a partir de los censos de población y vivienda del INEGI (1995 y 2000). Se identificaron y contabilizaron las localidades comprendidas dentro de los límites y fueron descritos algunos de los

atributos principales de la población, como población total, tendencias, grado de marginación y vivienda. Respecto a los aspectos económicos, estos fueron obtenidos del Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM, 2006).

2.2 Evaluación de los servicios ambientales en la cuenca

Se dividieron las funciones de los ecosistemas en cuatro principales categorías retomando la propuesta de De Groot, et.al. (2002), Lobo (2001) y MA (2003):

A) Servicios Ambientales con función de regulación. Este grupo se relaciona a la capacidad de los ecosistemas naturales y seminaturales de regular los procesos ecológicos esenciales y los sistemas que soportan la vida a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos.

B) Servicios Ambientales con función de hábitat. Los ecosistemas proveen refugio y hábitat de reproducción a plantas y animales, en consecuencia contribuyen a la conservación de la diversidad biológica y genética.

C) Servicios Ambientales con función de producción. La fotosíntesis y la absorción de nutrientes por autótrofos convierte la energía, bióxido de carbono, agua y nutrientes en gran variedad de carbohidratos que pueden ser usados por productores secundarios para crear una mayor variedad de biomasa.

D) Servicios Ambientales con función de información. Los ecosistemas pueden proveer funciones esenciales de referencia al ser comparados entre sí, además de contribuir al mantenimiento de la salud humana proveyendo oportunidad de reflexión, enriquecimiento espiritual, educación, investigación, desarrollo cognitivo, recreación y experiencia estética.

A partir de lo anterior, en la cuenca se evaluaron dentro de los servicios ambientales de regulación (inciso A): la regulación climática, la regulación y protección hidrológica, la regulación hídrica y de la vegetación, la regulación y el

almacenamiento de agua así como la retención del suelo. Por su parte, dentro de los servicios ambientales de producción (inciso C) se evaluaron la producción de alimentos caso del maíz y el café. Con la información obtenida se integró un breve análisis para evaluar el estado actual de los servicios ambientales de la cuenca.

Los límites de crecimiento de las especies se encuentran definidos por límites altitudinales, de temperatura, de precipitación y en consecuencia climáticos. Por lo anterior, para evaluar la capacidad de los ecosistemas de continuar otorgando servicios ambientales, se caracterizaron las medias mensuales de las variables climáticas: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación. Se caracterizó el clima de acuerdo a Köeppen modificado por García (2004) y se hicieron relaciones altura – clima – vegetación y se puso especial atención en los eventos climáticos extremos.

Así, para la evaluación de los *servicios ambientales de regulación climática* se consideró la relación entre el clima y la vegetación predominante así como el cambio de uso del suelo que se ha observado en la cuenca. Para la relación entre el clima y la vegetación se obtuvieron los usos del suelo para los años 1980 y 2001 y se relacionaron con los tipos climáticos existentes. Así mismo, con la cartografía se estimaron los cambios en el uso del suelo entre ambas fechas. Con lo anterior se pudo establecer la relación entre el clima y la vegetación así como estimar los cambios que se han observado a lo largo del tiempo, para establecer las tendencias y la capacidad en la cuenca para continuar regulando el clima.

Los *servicios ambientales de regulación y protección hídrica* fueron evaluados a partir de diversos indicadores hidrológicos en la cuenca, entre ellos se señalan las clasificaciones de cauces propuestos por Shreve y Strahler, frecuencia y densidad de cauces. Lo anterior permitió establecer la capacidad de regulación hídrica en la cuenca.

En lo que se refiere a los *servicios ambientales de regulación hídrica*, se definieron los indicadores de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración con lo que fue posible llevar a cabo un balance hídrico en la cuenca. En el balance hídrico se logró llegar a estimar la capacidad de almacenamiento de agua en la cuenca a partir de la infiltración.

Para evaluar *el servicio ambiental de retención del suelo* se estimaron las pérdidas por erosión hídrica y eólica actual y potencial, con lo que fue posible definir en qué magnitud se pierde suelo y en consecuencia determinar la capacidad de retención. Los valores actuales de erosión son un indicador de las pérdidas presentes, mientras que los valores potenciales son indicadores de la máxima capacidad de pérdida de suelo que se puede presentar.

Dentro del grupo de los *servicios ambientales de producción*, que se refieren a los que se proveen como bienes para el ser humano (entre los que se incluyen los alimentos derivados de plantas cultivadas), en el caso de la cuenca de estudio se seleccionaron el café y el maíz de entre algunos otros que se cultivan en la región. Para su evaluación se definieron rangos con distintos niveles de aptitud de crecimiento de las especies, de acuerdo a variables tales como temperatura, precipitación y altura. Además, junto con los escenarios de cambio climático para la zona de estudio, se evaluaron las zonas sensibles a los cambios proyectados por dichos escenarios, con lo que se obtuvo la sensibilidad al cambio en aptitud bajo cambio climático.

2.3 Escenarios de cambio climático

Se obtuvieron las salidas regionales actualizadas en cuanto a cambios en temperatura y precipitación de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera conocidos como ECHAM (ECHAM, 2006), GFDL (GFDL, 2006) y HADLEY (HADLEY, 2006). Además se obtuvo para cada modelo diferentes horizontes de

tiempo, que fueron los años 2020 y 2050, siendo estos tanto para los escenarios de emisiones A2 como para el grupo B2.

Los cambios en temperatura y precipitación obtenidos de las salidas de los modelos fueron entonces aplicados a las condiciones climáticas normales caracterizadas por los datos correspondientes al periodo 1961-1990 y de acuerdo al método de franja de lluvia para la precipitación y variables del balance hídrico. Dichas condiciones de cambio fundamentaron el re-análisis de los servicios ambientales citados, de tal manera que fue posible evaluar los posibles cambios en ellos.

Finalmente, se proponen las posibles propuestas de adaptación consistentes con los actores y procesos existentes en la actualidad, describiendo su posible viabilidad futura.

Lo anterior permitió contrastar el estado actual hidrológico de la cuenca frente a escenarios de cambio y variabilidad climática, y además, se tomaron las posibles condiciones de cambio climático proyectadas. La zonificación que se realizó para las condiciones presentes permitió incluir las variables climáticas proyectadas bajo escenarios de cambio y variabilidad climática.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 El Medio Físico.

3.1.1 Localización Geográfica

En el presente trabajo se estudia la cuenca alta del Río La Antigua, que aguas arriba se conoce como Río Los Pescados.

La cuenca alta del Río Los Pescados se encuentra en la zona central del estado de Veracruz, limitando al norte, sur y este con municipios de dicho estado; mientras que al oeste lo hace con el estado de Puebla. Las coordenadas en las que se encuentra son 19°10' y 19°35' de latitud norte; y 96°44' y 97°15' de longitud oeste. Cubre una superficie de 1,433.40 Km² lo que significan 143,340.4 hectáreas (Figura 3-1).

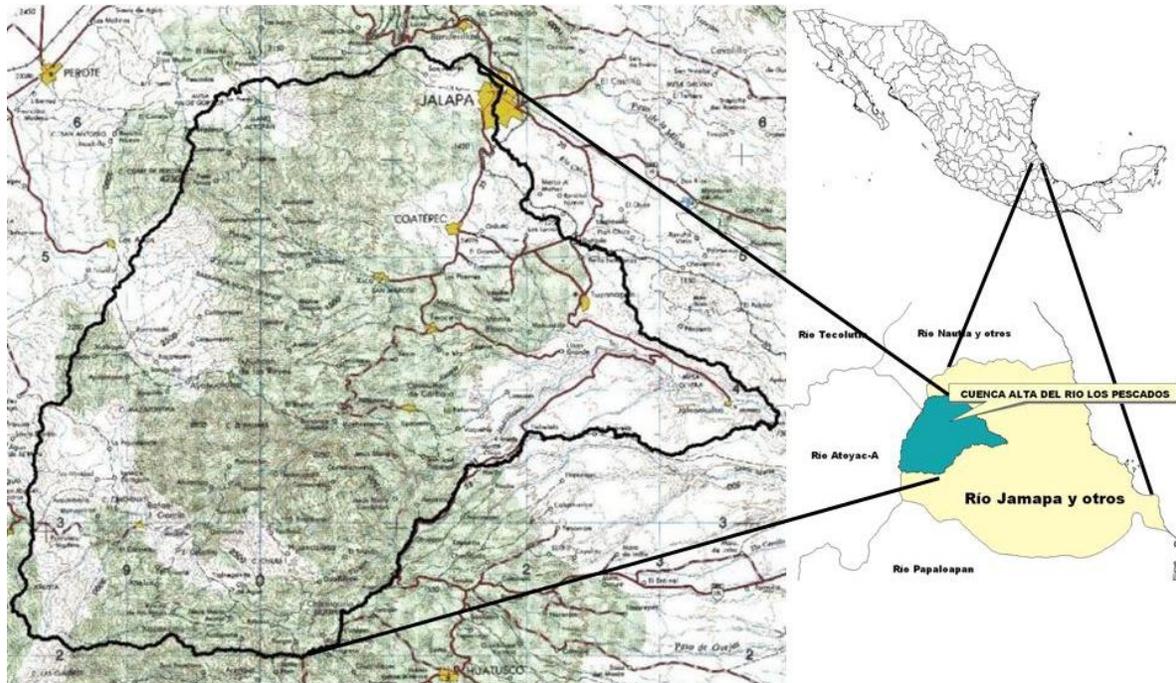


Figura 3-1. Localización de la cuenca alta del río Los Pescados.

Abarca completamente 7 municipios, siendo los municipios de Coatepec, Xico, Teocelo, Ixhuacán de los Reyes, del estado de Veracruz, así como Chichiquila, Quimixtlán y Chilchotla del estado de Puebla. Parcialmente comprende 11 municipios que son Las Vigas de Ramírez, Acajete, Tlalnahuayocan, Jalapa, Emiliano Zapata, Jalcomulco, Tlaltetela, Huatusco, Ayahualulco y Perote, del estado Veracruzano y una muy pequeña parte del municipio de La Fragua del estado Poblano (Figura 3-2).

Las áreas urbanas representativas en la cuenca son, entre otras: Jalapa, Coatepec, Xico, Teocelo, Jalcomulco, Tuzanapan, Cosautlán de Carvajal, Quimixtlán y Rafael J. García.

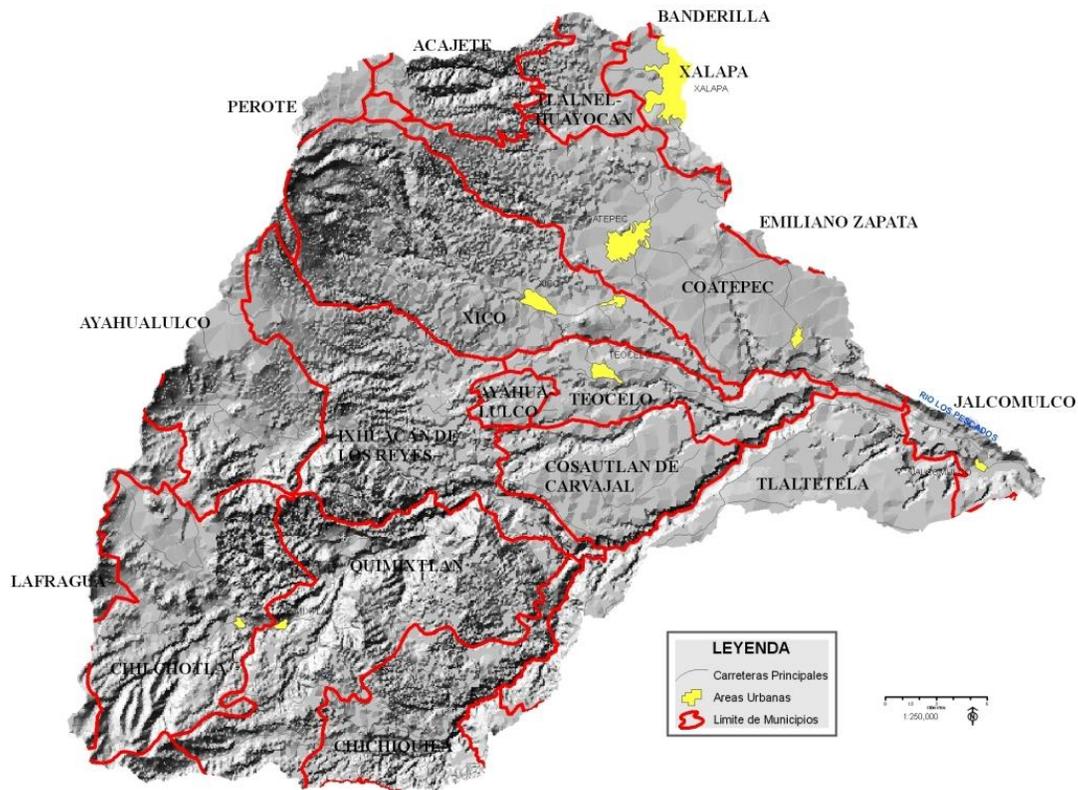


Figura 3-2. Limite de municipios dentro de la cuenca.

3.1.2 Geología.

La cuenca se encuentra ubicada en la zona central montañosa del Estado de Veracruz, fisiográficamente dentro de la Provincia Cordillera Transversal Mexicana y la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac. De acuerdo con el INEGI (1989b) la Provincia Cordillera Transversal Mexicana se puede caracterizar como una enorme masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acumulada en numerosos y sucesivos episodios volcánicos que se iniciaron a mediados de la era Terciaria (hace unos 35 millones de años), y continuaron hasta el presente. Uno de sus rasgos característicos es la franja de volcanes que se extienden de oeste a este, casi en línea recta, más o menos sobre el paralelo 19. Otro rasgo esencial lo dan las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos que tienen su origen en el bloqueo del drenaje original.

En lo que se refiere a la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, el INEGI (1989b) señala que es la mayor de las 14 subprovincias que integran la Cordillera Transversal Mexicana y que consta de sierras volcánicas y grandes aparatos individuales que se alternan con amplias llanuras, vasos lacustres en su mayoría. En esta subprovincia se encuentra el “Cofre de Perote” o Nauhcampatépétl (cerro de cuatro lados) que es un aparato volcánico muy antiguo y erosionado, cuya cima esta coronada por una estructura de forma cuadrangular constituida de rocas lávicas andesíticas. Su cumbre alcanza cerca de los 4300 metros sobre el nivel del mar y hacia el oriente de éste, hacia la capital del estado, es donde nace la cuenca de interés para el presente estudio.

De acuerdo con Capalcera (1978), en el Terciario surge la Cordillera Transversal Mexicana, que divide al país en dirección este-oeste. Ya en la región, la emersión de una enorme masa intrusiva (el Cofre de Perote) se da en el Mioceno (hace 11 millones de años) y es precedida de erupciones de aparatos volcánicos secundarios con emisión de lavas, brechas y cenizas, andesíticas y basálticas. Este proceso de emersión dio origen a un variado patrón de fallas y fracturas, cuyos sistemas preferidos van de norte a sur y de este a oeste, a lo largo de los cuales se encuentran localizados los aparatos volcánicos principales de la región, así como también las barrancas. Concluye señalando que “en periodos mas recientes los procesos aluviales han sido los más importantes, cubriendo las formaciones geológicas anteriores”.

De esta manera, en la cuenca se encuentran rocas de tipo sedimentario e ígneo. Respecto a las primeras se encuentran del tipo caliza y cubren aproximadamente el 16% de la superficie y respecto a las segundas cubren el restante 84% de la cuenca (INEGI, 2002a), como se presentan en el Cuadro 3-1 y se describen en los siguientes párrafos:

Cuadro 3-1. Geología de la cuenca y superficie ocupada.

Roca		Área km ²	Área %
Ki(cz)	Caliza	44.56	3.108
Ks(cz)		196.55	13.712
Q(ar-cg)	Arenisca-Conglomerado	63.30	4.416
Q(lgeb)	Ígnea extrusiva básica	746.20	52.058
Ts(lgei)		187.96	13.113
Q(tr)	Travertino	0.03	0.002
Q(Vc)	Volcanoclástico	3.27	0.228
Ts(lgeb)	Ígnea extrusiva intermedia	63.71	4.444
Q(lgei)		127.83	8.918
Total		1433.40	100

Fuente: Conjunto de datos vectoriales Geológicos, INEGI (2002a)

Caliza. Son rocas sedimentarias constituidas principalmente por carbonatos de calcio que se precipitan en lagos, lagunas, plataformas o cuencas marinas, bajo determinadas condiciones ambientales (Lugo, 1989). Consisten en calcita o residuos calcáreos de organismos, raras veces de aragonita. Generalmente son cristalinas y duras, pero se rayan con navaja y efervescen activamente con los ácidos. Su color es variable de acuerdo con las impurezas que contengan, desde el blanco lechoso al amarillento, gris café y negro. En la cuenca se presentan hacia el poblado de Jalcomulco al final de la cuenca y en la porción sur de ésta.

Arenisca. Las areniscas son rocas sedimentarias que consisten en granos de arena cementados por material arcilloso, calcáreo, por sílice u otros (Lugo, 1989). Por el tamaño del grano se clasifican en finas, medias y gruesas.

Conglomerado. Rocas de material detrítico consistente, esencialmente en guijarros cementados en una matriz de material más fino: limo, arena y grava. El cementante es óxido de hierro, carbonatos, material limoso y raras veces sílice (Lugo, 1989). Este y la anterior se encuentran en el lado sur-este de la cuenca hacia la parte baja, entre los 500 y los 1000 msnm.

Rocas Ígneas. Su principal característica es la de estar formada a partir de una masa caliente en fusión llamada magma (López, 1993). La lava es un magma que ha llegado a la superficie terrestre a través de fracturas y fisuras y se ha enfriado y

solidificado en forma de roca. Las rocas ígneas extrusivas pueden ser ácidas, intermedias o básicas. En la cuenca se tiene la presencia principalmente de andesitas y basaltos que se encuentran en toda la vertiente alta y central de la cuenca.

Andesitas. Son rocas ígneas de composición intermedia, color oscuro, compuestas de cristales de plagioclasas intermedias, minerales máficos y frecuentemente vidrios volcánicos (Lugo, 1989).

Basaltos. Son rocas de composición básica y color oscuro, consistentes de plagioclasas básicas, augita y con frecuencia olivino. Son rocas compactas y porosas, presentan estructuras de derrame y forma mesas de lava de gran tamaño (Lugo, 1989).

En las inmediaciones del Cofre de Perote dominan los materiales del terciario superior (Ts), las lavas andesíticas (TA), las rocas ígneas duras con relieve accidentado y abrupto. En el área de Xalapa – Coatepec – Teocelo se encuentran materiales más recientes del cuaternario (Q) como 1) espesas coladas de lava basáltica consolidada, relativamente planas y con ligera pendiente hacia el este Q(B); 2) cenizas poco consolidadas [Q(TB)] que cubren el sustrato anterior con una capa de espesor irregular llegando a varias decenas de metros entre Xalapa y Coatepec. Estas últimas proceden probablemente de aparatos volcánicos secundarios recientes, que están sujetas a una mayor erosión y modelado que las coladas, resultando así en un relieve con colinas más accidentadas, vertientes abruptas sin fondos aluviales.

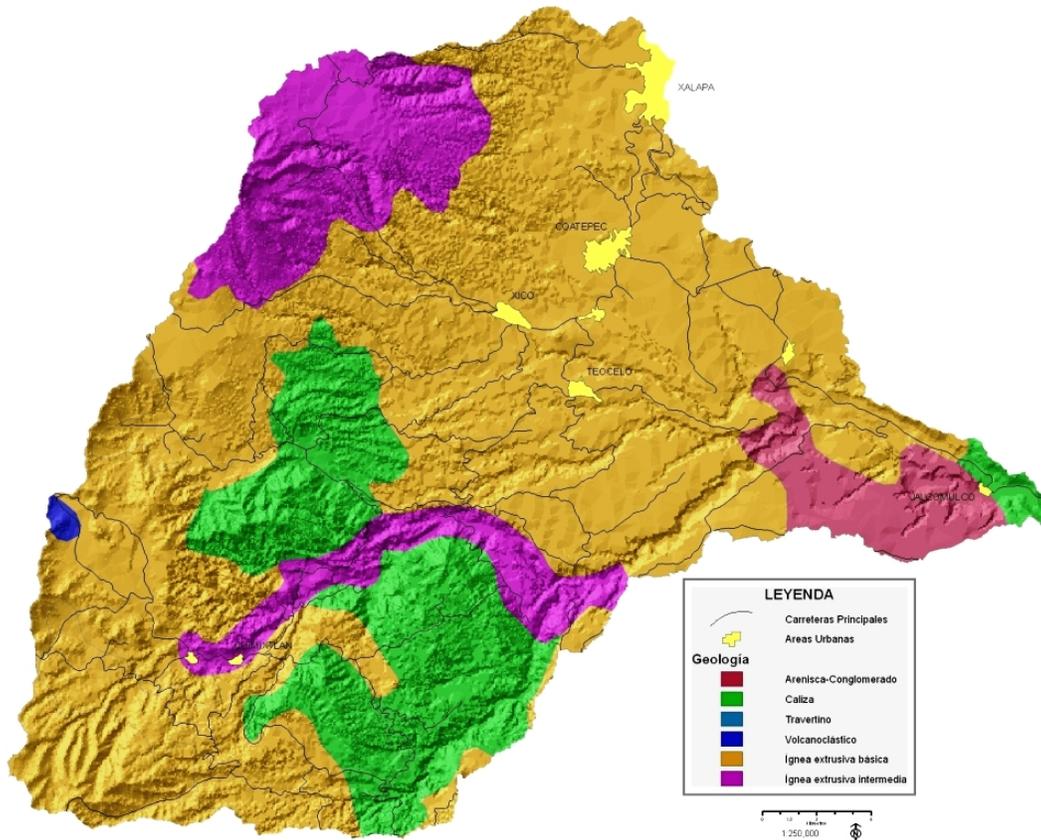


Figura 3-3. Geología de la cuenca.

Ya hacia la salida de la cuenca, en dirección este, se encuentra una combinación compleja de materiales del terciario, Ts(Ti), de aluviones del cuaternario Q(al) y también del cretácico (Ks). Estos últimos están presentes al sur del Cofre de Perote y también bajo las coladas volcánicas, algunas veces visibles en el fondo de las barrancas de Cosautlán y de Jalcomulco (Hoffmann, 1993).

3.1.3 Orografía

La cuenca presenta una gran variedad orográfica dentro de sus límites al estar ubicada en la zona central montañosa del Estado. Inicia en su parte alta hacia el noroeste en las estribaciones del Cofre de Perote con un relieve de cumbres y laderas altas, moviéndose hacia la parte sur del lindero sobre laderas altas de la Sierra Madre Oriental, que conforma el parteaguas de la cuenca. Hacia la parte

central de la cuenca se encuentra una diversidad de montañas internas y laderas suaves para llegar a la parte baja con algunas cañadas y valles.

El parteaguas de la cuenca hacia su parte alta, es decir del lado oeste, se define por las elevaciones que conforman la Sierra Madre Oriental y que coinciden en muchos linderos con la divisoria de los estados de Puebla y Veracruz. Las principales elevaciones que definen la parte alta de la cuenca se presentan en la Figura 3-4.

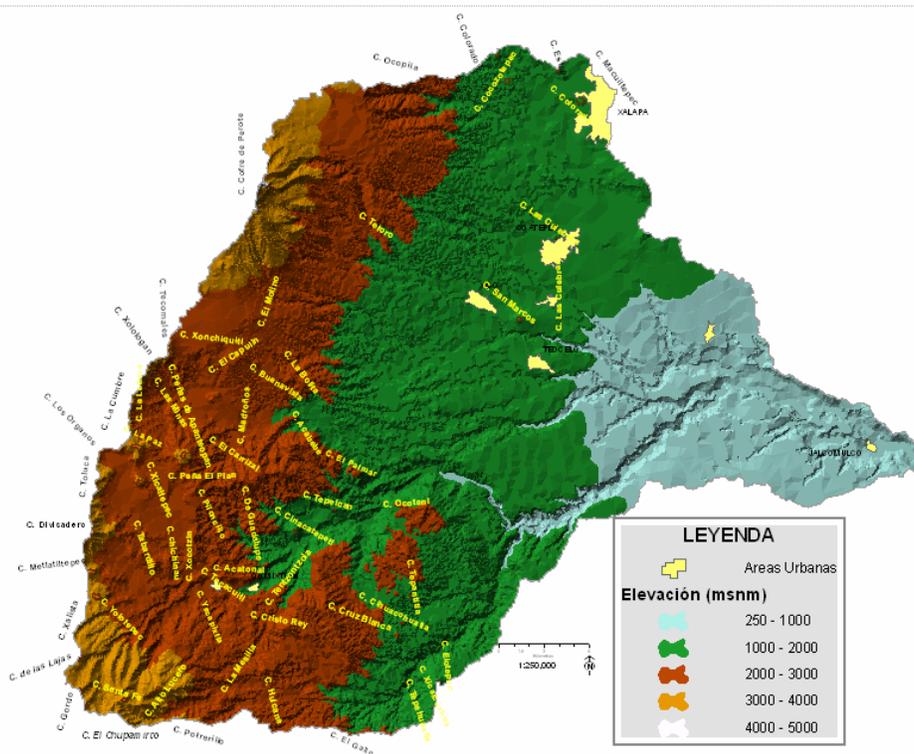


Figura 3-4. Principales elevaciones dentro y en el límite de la cuenca

3.1.3.1 Altimetría.

Respecto a la variación altimétrica de la cuenca, se tiene que la mayor altura se presenta hacia la porción oeste en la parte más alta del Cofre de Perote a 4200 metros sobre el nivel del mar; mientras que la menor elevación se encuentra al este de la cuenca a los 250 metros de altura sobre el nivel del mar (Figura 3-5), definiéndose así una diferencia altimétrica en la cuenca de 3950 metros, como se presenta en el Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2. Altimetría de la cuenca.

Rango de Altura	Diferencia altimétrica	Área Km ²	Área Acumulada km ²	Área %	Área Acumulada %
250-300 msnm	50	0.2	0.2	0.01	0.01
300-600 msnm	300	42.4	42.61	2.96	2.97
600-900 msnm	300	122.4	165.00	8.54	11.51
900-1200 msnm	300	211.4	376.45	14.75	26.26
1200-1500 msnm	300	212.9	589.33	14.85	41.11
1500-1800 msnm	300	158.2	747.56	11.04	52.15
1800-2100 msnm	300	164.9	912.48	11.51	63.66
2100-2400 msnm	300	157.8	1070.32	11.01	74.67
2400-2700 msnm	300	130.6	1200.92	9.11	83.78
2700-3000 msnm	300	133.1	1334.02	9.29	93.07
3000-3300 msnm	300	57.1	1391.17	3.99	97.05
3300-3600 msnm	300	26.9	1418.07	1.88	98.93
3600-3900 msnm	300	13.9	1431.93	0.97	99.90
3900-4200 msnm	300	1.5	1433.40	0.10	100.00
Total	3950	1433.4		100	

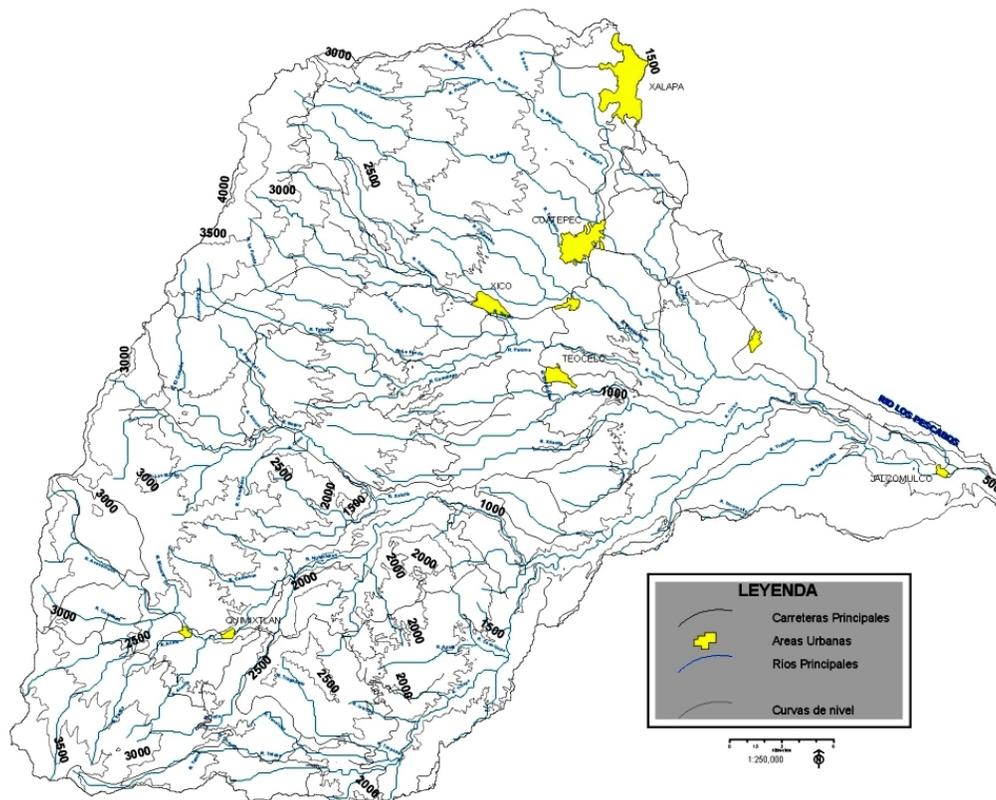


Figura 3-5. Mapa Topográfico de la cuenca.

Con ayuda del mapa de altimetría (Figura 3-6), se trazó el histograma de frecuencias altimétricas que se presenta en la Figura 3-7. Al relacionar las franjas altimétricas con sus respectivas áreas, se encontraron 4 grupos relativamente homogéneos de alturas.

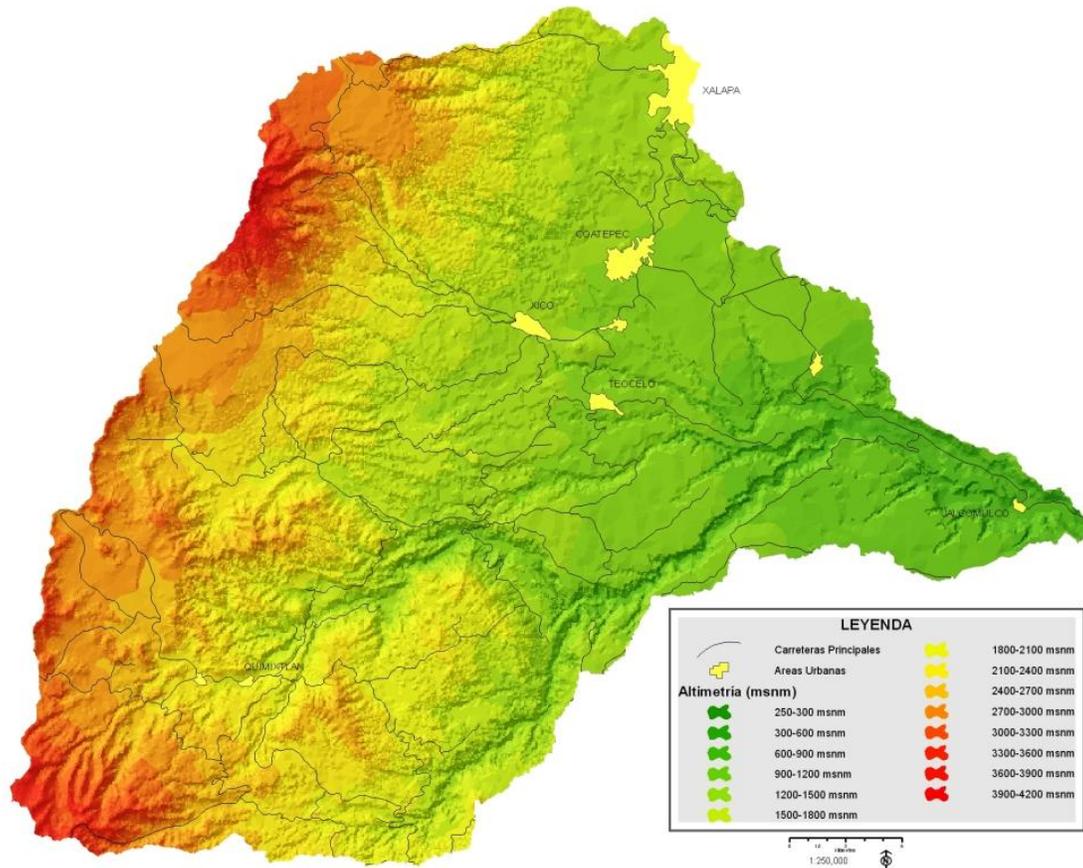


Figura 3-6. Altimetría de la cuenca.

El primer grupo inicia hacia la parte alta de la cuenca a partir de los 3000 metros de altura y hasta los 4200 msnm. En conjunto cubren un total de 99.4 Km² que representa un total de 6.9% del área de la cuenca y representa las principales cabeceras que forman un relieve de cumbres y laderas altas.

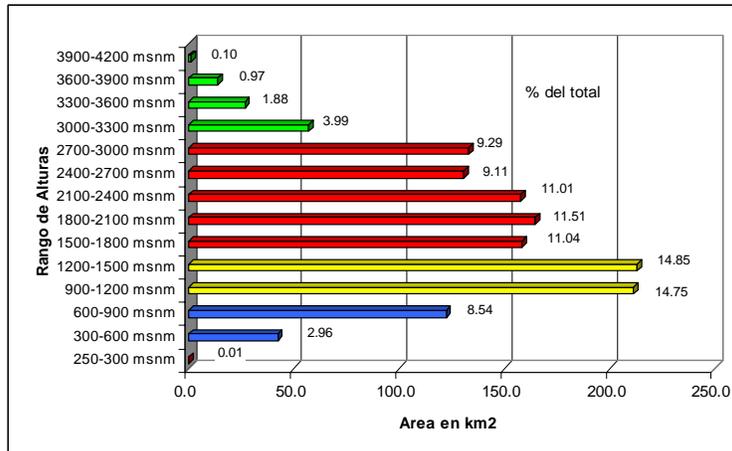


Figura 3-7. Histograma de Frecuencias altimétricas

Respecto al segundo grupo, su rango de alturas va de los 1500 metros a los 3000 metros sobre el nivel del mar, cubre un total de 51.9% de la cuenca (744.7 km²) y en ellos se representa la mayor parte de las cabeceras de las cañadas y las montañas internas de la cuenca. El tercer grupo representado por las laderas y cañadas bajas ve su formación desde los 900 hasta los 1500 metros de elevación, que representan el 29.6% de la cuenca o bien 424.3 km². El último grupo es aquél definido en las partes mas bajas de la cuenca (250 msnm) hasta los 900 metros de altura, en conjunto representan el 11.5% del total del área de la cuenca.

Además de lo anterior, se presenta la curva hipsográfica de la cuenca (Figura 3-8) donde se muestra de manera esquemática la superficie de cada piso altitudinal y a su vez un perfil topográfico de la cuenca.

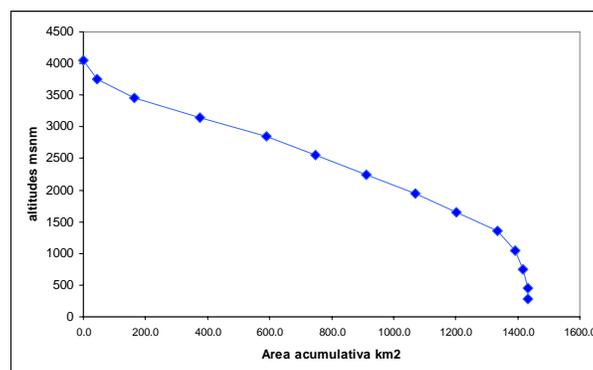


Figura 3-8. Curva Hipsográfica.

La distribución del área respecto a las altitudes de manera descendente va aumentando. Sin embargo, desde los 3000 msnm hasta el piso de los 1500 msnm se observa un comportamiento muy homogéneo de las áreas acumulativas de las alturas en la cuenca. Pero es a partir de este punto (1500 msnm) que la cuenca presenta una disminución del área por rango altitudinal hasta los 250 metros, que es la parte mas baja de la cuenca.

3.1.3.2 Declives.

En la cuenca, debido a las diferencias altitudinales presentadas anteriormente, se tiene gran variedad de declives. Estos fueron definidos a partir del estudio del comportamiento de las curvas de nivel derivadas del Modelo Digital del Terreno (MDT) del INEGI (2005).

A partir de lo anterior, fueron determinados siete distintos tipos de declives de acuerdo con Tricart y Killian (1982), donde el de mayor superficie ocupada es el que va de 12 al 24° de inclinación, seguido por el rango de 6 a 12°, como se presenta en el Cuadro 3-3 y Figura 3-9.

Declive muy escarpado o mayor de 45°. Es el rango de menor superficie ocupada en la cuenca con tan solo 1.26 km². Se encuentra en la parte central de la cuenca entre los poblados de Quimixtlán y Teocelo, en las laderas del Cerro Ocoteni. Por su superficie ocupada se define que no es representativo para la cuenca.

Declive escarpado o entre 24° y 45°. Es el tercero en orden de importancia en la cuenca ya que cubre un total de 17.5% de la superficie. Se encuentra la mayor parte en la zona centro sur de la cuenca, aunque también en las inmediaciones del cofre de Perote y hacia la parte norte oeste de la ciudad de Xalapa.

Declive algo escarpado o entre 12° y 24°. Es la principal categoría dentro de la cuenca ya que tiene el mayor porcentaje de cubrimiento en la zona con un 32.6% del total de superficie ocupada. Se encuentra en casi toda la cuenca por debajo

de los declives escarpados. Sin embargo su mayor presencia se nota desde lo alto del Cofre de Perote hacia el Golfo de México hasta antes de llegar a Xico y Coatepec.

Cuadro 3-3. Rango de declives en la cuenca y superficie ocupada.

Tipo	Rango de Declives	Área km ²	%
Muy Suave	< 1.3°	104.24	7.27
Suave	1.3 - 3°	103.98	7.25
Moderadamente Inclinado	3 - 6°	185.06	12.91
Muy Inclinado	6 - 12°	319.22	22.27
Algo Escarpado	12 - 24°	468.40	32.68
Escarpado	24 - 45°	251.26	17.53
Muy Escarpado	> 45°	1.26	0.09
Total		1433.40	100

Declive muy inclinado o de 6° a 12°. Al cubrir cerca del 22.3% de la superficie total de la cuenca es el segundo en importancia y al igual que el anterior se encuentra distribuido en casi toda la cuenca. Cubre un total de 319 km².

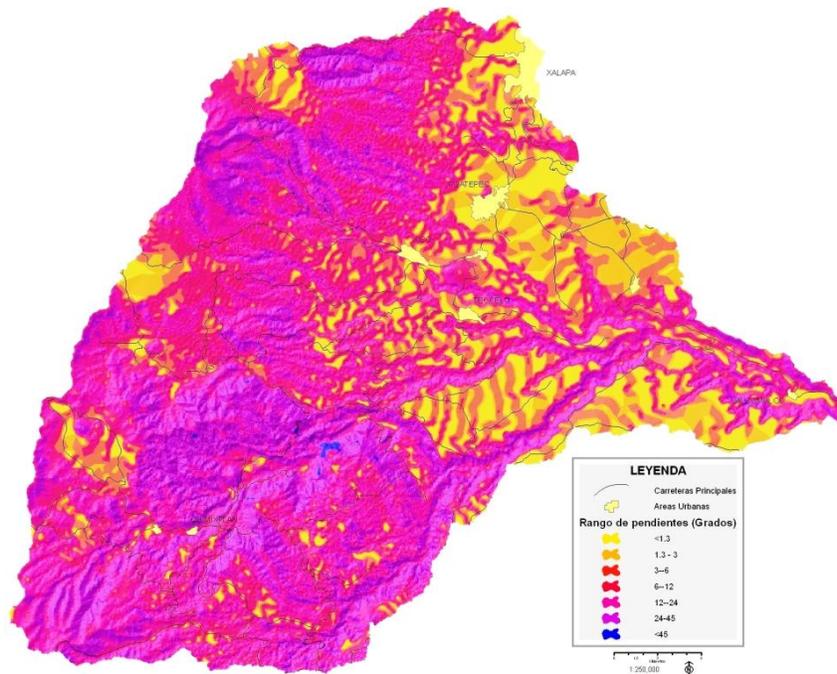


Figura 3-9. Declives en la cuenca.

Declive moderadamente inclinado o de 3° a 6°. A pesar de cubrir el 13% de la superficie de la cuenca representa zonas de mejor acceso para la población, se encuentra en las inmediaciones de la ciudad de Coatepec, Xico, Teocelo y hacia la parte sur de Xalapa.

Declive suave o de 1.3° a 3°. Cubre solamente el 7.2% de la cuenca o bien un poco más de cien kilómetros cuadrados, su mayor presencia se denota hacia el este de la ciudad de Coatepec en las inmediaciones de la ciudad de Tuzanapan.

Declive muy suave o menor de 1.3°. Al igual que el anterior cubre apenas el 7.2% de la cuenca y se encuentra en los alrededores de la ciudad de Xalapa y Coatepec, también hacia la parte sur de la cuenca.

3.1.3.3 Unidades Básicas de Relieve.

La delimitación de las unidades básicas de relieve fue a partir de la integración del mapa altimétrico, de declives, de las curvas de nivel y de la geología de la cuenca (Tricart y Killian, 1982). A partir de lo anterior se definieron 6 distintas unidades de acuerdo con los autores (Figura 3-11): 1) Cumbres y Laderas Altas, 2) Cabeceras de Barrancos o Cañadas, 3) Montañas Internas, 4) Laderas Suaves, 5) Cañadas Bajas y 6) Valles Bajos. Su superficie ocupada en la cuenca se presenta en la Figura 3-10.

Cumbres y Laderas Altas. Son aquellas partes que se encuentran sobre los 2500 metros sobre el nivel del mar y se pueden reconocer como las cabeceras de las cuencas. Representan al 18% de la cuenca y se presentan desde el límite del parteaguas hacia la parte alta y sobre la Sierra Madre Oriental. Desde el Cofre de Perote y bajando hacia el sur hasta el Cerro Xalista.

Cabeceras de Barrancos o Cañadas. Son las que se encuentran entre los 2000 y los 2500 metros sobre el nivel del mar. Es un relieve que ocupa un poco más de 180 km² y se distribuye en dos porciones principales en la cuenca: la primera

hacia las estribaciones del Cofre de Perote y la segunda hacia el centro sur de la cuenca.

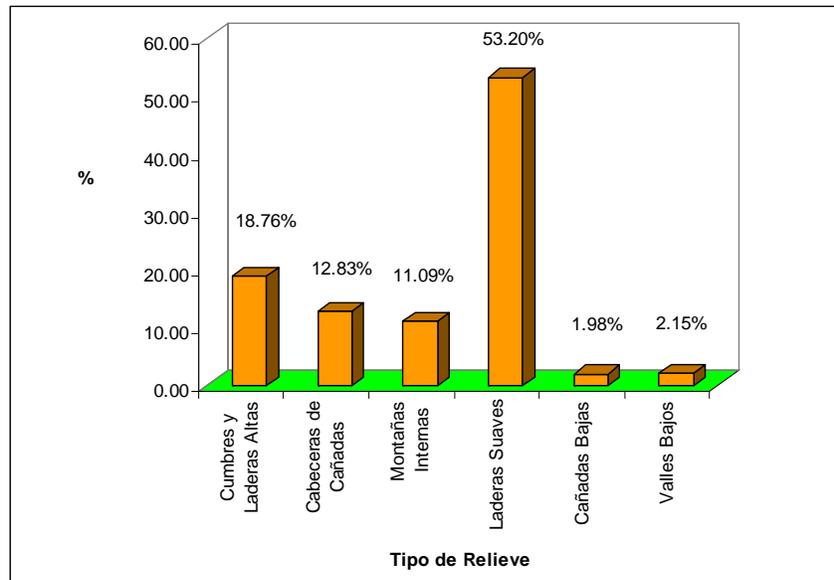


Figura 3–10. Unidades básicas de relieve y superficie ocupada.

Montañas Internas. Son elevaciones dentro de la cuenca que se encuentran separadas de la línea divisoria o parteaguas de la cuenca, cubren cerca del 11% de la superficie de la cuenca y se encuentran dispersas por toda la cuenca.

Laderas Suaves. Se encuentran dentro del talud de transición y van desde los 500 msnm, cubren una superficie de 53% de la cuenca por lo que son las más representativas al tener más de 760 km² de cobertura. Su pendiente es ligera y se presentan mayormente en la franja central y hacia las inmediaciones de la ciudad de Xalapa.

Cañadas Bajas. Se definen al tener declives más pronunciados y se encuentran al margen de las principales corrientes hídricas hacia el este de la cuenca. Cubre una superficie de aproximadamente 28 km² que representa un poco menos del 2% de la cuenca y se encuentran por debajo de los 1000 msnm.

Valles Bajos. Son zonas con muy poco declive y que se encuentran en la parte baja de la cuenca sobre los 500 msnm y por debajo de los 1000 msnm muy cerca de la comunidad de Jalcomulco. Cubren un poco mas del 2% de la cuenca.

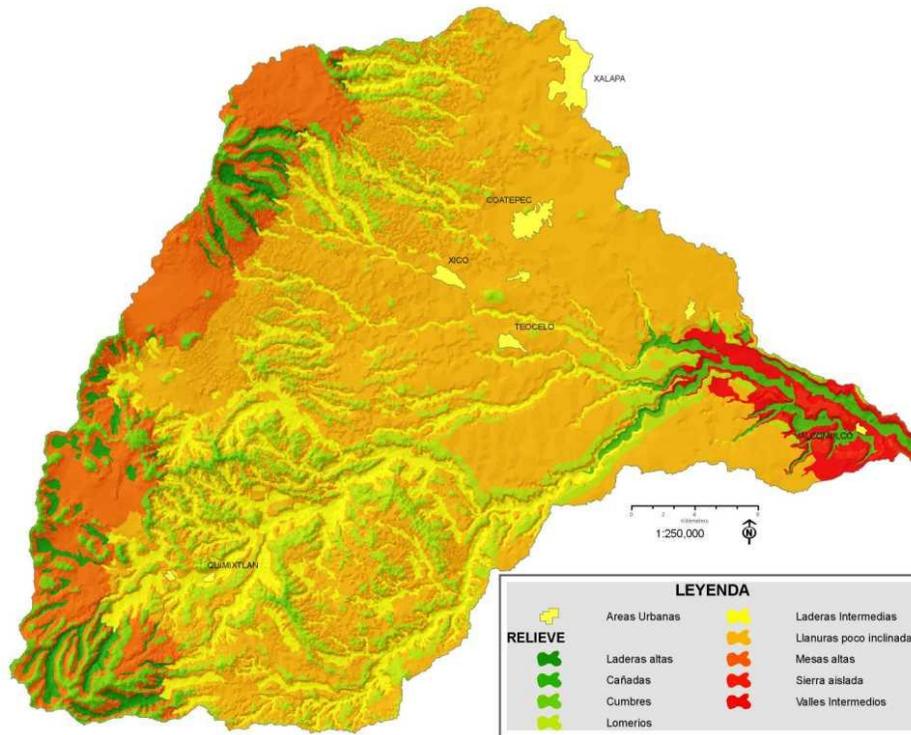


Figura 3–11. Unidades básicas de relieve.

3.1.4 Edafología

Son cinco los principales tipos de suelo que se presentan en la cuenca de acuerdo con INEGI (1989b): el andosol, luvisol, feozem, rendzina y cambisol (Figura 3-12).

Andosol. Son suelos propios de climas húmedos templados que se forman en las capas de ceniza volcánica. En el perfil se reconoce un horizonte de color negro, de humus, y otro de color ocre o pardo, de origen iluvial. Posee altos contenidos de humus (8-15%) compuestos minerales amorfos u organominerales complejos. Los suelos de este tipo se concentran en las partes altas de la cuenca, hacia las inmediaciones del Cofre de Perote y siguiendo el parteaguas hacia el sur, sobre las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Es el tipo de suelo con mayor superficie en la cuenca al presentar un 64% de la superficie.

Luvisol. Es el segundo en importancia dentro de la cuenca, cubre un 31% del área. Son suelos de contenido mediano a alto de bases con horizontes arcillosos. Se ubican en la cuenca por debajo de los andosoles, hacia la parte central y en la parte oriental de la cuenca. La mayoría de los suelos de este tipo poseen un alto potencial para la agricultura y aunque su porcentaje de saturación de bases es alto, generalmente necesitan tratamientos con cal y fertilizantes para obtener los máximos rendimientos (FitzPatrick, 1996).

Feozem. Suelos con superficie oscura, más lixiviada que los castañozem. Ocupan una porción importante hacia el oriente de la cuenca hacia el sur de la comunidad de Jalcomulco, cubre una superficie de 4%. Los suelos de tipo feozem en su mayoría son jóvenes y tienen un espesor de 30 a 35 centímetros (INEGI, 1989b) son de color pardo grisáceo o gris oscuro, con abundante materia orgánica y nutrientes, pH de ligeramente alcalino a ligeramente ácido, presentan textura de migajón arenoso y arcilloso además de estructura en forma de bloques angulares y subangulares de tamaño variable. Son suelos de buena fertilidad por lo que se dedican a cultivos de temporal en la cuenca y cubren un aproximado del 4% de la superficie.

Rendzina. Suelos poco profundos sobre piedra caliza. Son suelos de color gris, negro o rojizo con altos contenidos de materia orgánica (López, 1993). Se desarrollan sobre de ellos vegetación típica de matorrales con leguminosas y selvas bajas; se asocian con pastizales y ganadería. Aunque son suelos muy fértiles, son poco valiosos para la agricultura debido a su corta profundidad. Sin embargo, en las áreas con alta precipitación se puede cultivar una gran variedad de productos (FitzPatrick, 1996). Cubre una muy ligera superficie de 1% de la cuenca y se ubica también en el oriente de la cuenca.

Cambisol. Suelos boscosos de color café, con cambio de estructura o consistencia debido a la intemperización. Son muy fértiles y se encuentran bajo algunos bosques caducifolios en ciertas áreas templadas de clima frío. En la

superficie existe una capa de material orgánico suelto compuesto de hojas que yacen sobre un horizonte granular de color café, el cual contiene gran cantidad de lombrices (FitzPatrick, 1996). Ocupa una muy pequeña porción en la cuenca y se encuentra en el sur, por debajo de los suelos de tipo luvisol.

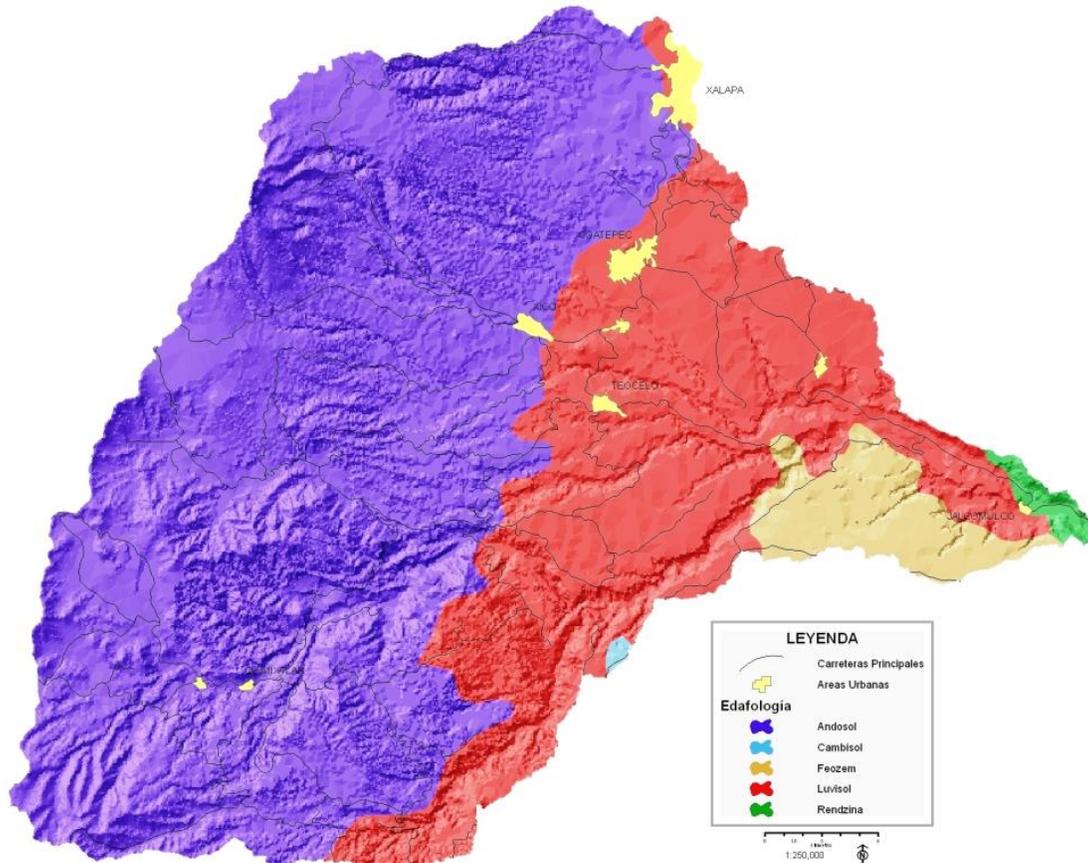


Figura 3-12. Edafología en la cuenca de estudio.

3.1.5 Clima

En este apartado se presenta una breve descripción ya que este tema se trata en extenso en el siguiente capítulo. CONABIO (1998) reporta una variedad de climas para la cuenca, desde los climas fríos hasta los cálidos húmedos, debidos principalmente al fuerte gradiente altimétrico en la cuenca (de 4240 msnm a 300 msnm), como se ha mencionado con anterioridad. La orientación norte-sur de la sierra, hace que esta se ubique frente a la penetración de las masas de aire húmedo provenientes del Golfo de México, dando como resultado dicho gradiente

climático muy diferenciado (Hoffmann, 1993). Los principales grupos climáticos definidos por el CONABIO (1998) se describen a continuación:

E(T)H. Son climas fríos cuya temperatura media anual se encuentra entre los -2°C y los 5°C . Su temperatura del mes más caliente es entre los 0°C y los 6.5°C . (García, 2004). Ocupan una muy pequeña superficie de la cuenca y se presentan en la parte alta del Cofre de Perote sobre los 3800 msnm.

C(E)(m) y ***C(E)(w2)(w)***. Son tipos de climas semifríos subhúmedos con régimen de humedad en verano, entre 5 y 10.2% de lluvia invernal para el primero y menor de 5% para el segundo. Su temperatura media anual se encuentra entre los 5°C y los 12°C . El segundo de ellos es el más húmedo de los subhúmedos. (García, 2004). Tipos de climas característicos de zonas altas en el país, se localizan hacia la parte alta de la cuenca, desde el Cofre de Perote siguiendo por el sur sobre el parteaguas de la cuenca, se encuentra sobre los 2800 msnm y cubre un poco más del 12% de la cuenca.

C(fm) y ***C(m)***. Estos son climas templados húmedos. El primero, es un clima templado con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, con menos de 18% de lluvia invernal respecto al total anual. El segundo, con régimen de lluvias de verano entre 5 y 10.2% de lluvias invernales. La temperatura media anual de ambos tipos oscila entre los 12°C y los 18°C (García, 2004). Se localizan en la región central de la cuenca, desde su porción norte al occidente de Xalapa hasta el sur de la cuenca, representa el 34% de la superficie total y se encuentra por encima de los 1500 msnm.

(A)C(fm) y ***(A)C(m)***. Climas semicálidos húmedos. Su temperatura media anual es mayor de los 18°C y la del mes más frío mayor de los 18°C . El primero, es un clima templado con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, con menos de 18% de lluvia invernal respecto al total anual. El segundo, con régimen de lluvias de verano entre 5 y 10.2% de lluvias invernales (García, 2004). Cubre

más del 45% de la superficie de la cuenca, son el tipo climático mas representativo y se encuentra en la región centro – oriente de la cuenca, Las ciudades de Xalapa, Coatepec, Xico y Teocelo se encuentran bajo este régimen climático.

Aw1(w) y Aw2(w). Son climas cálido subhúmedos, el segundo el más húmedo de los subhúmedos y el primero el intermedio. Ambos con régimen de lluvias en verano (García, 2004). Representa el 6% de la superficie de la cuenca y se encuentra localizado en el oriente de la cuenca sobre la comunidad de Jalcomulco, en los límites de la cuenca.

3.1.6 Hidrología

En materia hidrológica, la cuenca se encuentra dentro de la Región Hidrológica 28 del Río Papaloapan y en particular dentro de la sub cuenca del Río Jamapa y Otros (INEGI, 1989a). La sub cuenca, colinda al norte con la Región Hidrológica 27 Tuxpan – Nautla (cuenca del Río Nautla y otros), al oeste con la Región Hidrológica 18 del Río Balsas y al este con el Golfo de México (Figura 3-1).

Dentro de la clasificación nacional realizada por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2003) en el Programa Hidráulico Regional 2002 -2006, la cuenca se encuentra en la Región X “Golfo Centro”, dentro del Consejo de Cuenca “Tuxpan al Jamapa” y en la sub región “Centro”.

De manera general, el río la Antigua nace a 3850 msnm a 4 km al oriente de González Ortega, Puebla. Fluye hacia el sureste en terreno montañoso y a la altura del Rancho Calixitla varía su rumbo hacia el este-noreste hasta la confluencia con el Río Barranca Grande a 3 km al norte del cerro del mismo nombre, este afluente nace a 3400 m.s.n.m. en la población suroccidental del Cofre de Perote; fluye en terrenos de topografía accidentada de fuertes pendientes hasta su afluencia con el Río del Resumidero, por la margen izquierda a 1350 m.s.n.m.

En este sitio el colector general cambia su nombre a Río Pescados. Sigue un curso sureste y en los límites de los Estados de Puebla y Veracruz lo cambia a noreste; aguas abajo de este punto se sitúa la estación hidrométrica Amatitla y a 11.5 km de ella hacia el noreste fluye por la margen izquierda el Río Cozalapa, este y el Río Texolo capturan las corrientes formadas en la pendiente oriental del Cofre de Perote, tienen su origen en el Estado de Veracruz en la cima de la mencionada montaña; siguen un rumbo este-sureste y confluyen a 10 km al oriente de Teocelo, Ver.; a partir de este punto el Río Cozalapa continúa su curso hacia el sureste hasta su afluencia al colector.

Por su lado derecho recibe el afluente del Río Huixilapan y también por margen derecho recibe el afluente del Río Tlalapa. Más adelante es nombrado Río Los Pescados y finalmente, luego de la afluencia por margen izquierda del río de Cozalapa, cambia de nombre a río La Antigua. Pasa por el poblado de Jalcomulco, se localiza en su cause la estación hidrométrica del mismo nombre y siguiendo un curso oriente desemboca en el Golfo de México (IMTA, 2000).

3.1.7 Vegetación y Uso del suelo

Debido a la variabilidad fisiográfica de la cuenca y su consecuente variación climática, la cuenca presenta diferentes usos de suelo y vegetación. Hacia la parte alta de la cuenca se presentan zacatonales, seguidos de bosques templados y una ligera franja con bosque mesófilo de montaña; descendiendo se observan bosques de pino y encino, pastizales cultivados, selva baja caducifolia además de grandes zonas bajo algún tipo de agricultura, principalmente de café y maíz.

Así, los pisos altitudinales y perfiles de vegetación son muy diversos y conllevan una riqueza en biodiversidad (Figura 3-13). Los principales tipos de uso del suelo presentes en la cuenca se muestran en el Cuadro 3-4 y la Figura 3-14. Se describen brevemente a continuación.

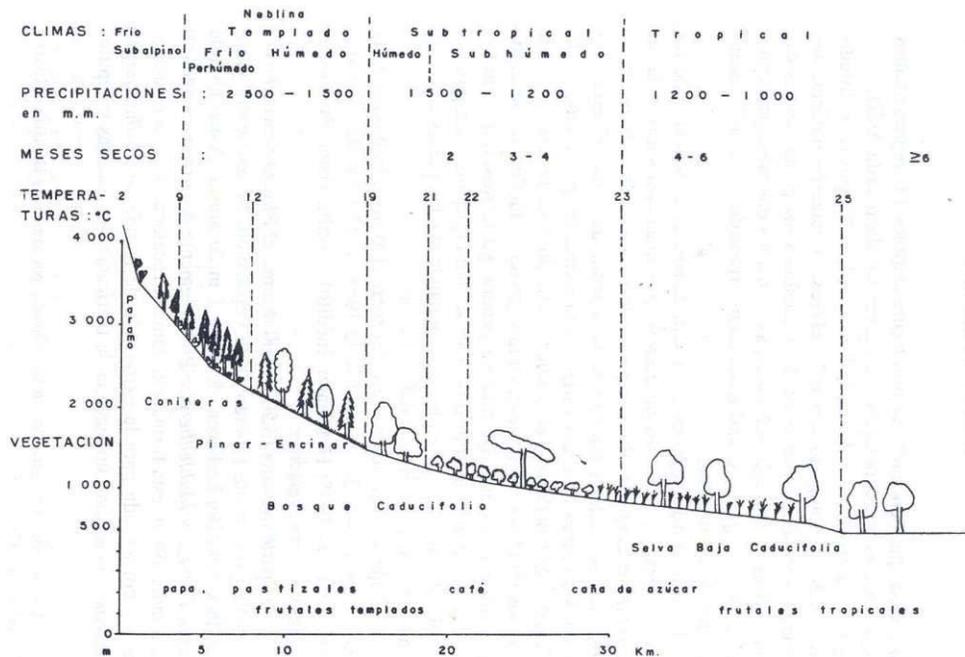


Figura 3-13. Corte transversal en las faldas del cofre de Perote (Tomado de Hoffman, 1993).

Pradera de alta montaña. Hacia la parte más alta de la cuenca (3500 a 4000 msnm) el bosque de pinos es el más representativo, siendo el *Pinus hartwegii* el último representante arbóreo de la vegetación (Hoffman, 1993). Este se encuentra junto con la vegetación herbácea de hasta 1 metro de altura, donde abundan *Stipa*, *Festuca* y *Muhlenbergia*, bien llamados zacatonal y que en ocasiones son manejadas y conservadas para la extracción de las raíces, especialmente de la última para la fabricación de escobas y cepillos. Challenger (1998) señala que estas comunidades bióticas alpinas y subalpinas son ecosistemas frágiles y no toleran las perturbaciones reiteradas. Señala que se debe tanto a que la media de la temperatura es baja así como a la escasa precipitación característicos de las altas montañas. Lo anterior se traduce en una temporada de crecimiento muy corta, de modo que la producción de biomasa y la regeneración natural después de las perturbaciones son procesos muy lentos.

Bosque templado subhúmedo (encino, oyamel y pino). Es hacia los 2800 msnm y hasta los 1900 msnm donde dominan los pinares (*Pinus patula*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. montezumae*), los cipreses (*Cupressus lindleyi*) y los

oyameles (*Abies religiosa*). Estos últimos muy escasos ya que sufrieron talas muy intensas, sobre todo los cipreses por su calidad y buen precio. Sin embargo, muchas de estas especies subsisten en las partes más altas de la cuenca en las zonas más accidentadas y menos accesibles (Hoffman, 1993).

Challenger (2003) señala que estos tipos de bosques se caracterizan por su biodiversidad impresionante. De hecho señala, en su conjunto estos ecosistemas son lo que más especies de flora y fauna albergan (aún cuando el número de especies por hectárea sea relativamente bajo)

Los encinos pueden llegar a tamaños considerables, aunque antes eran muy apreciados por su madera, su explotación se tornó cada vez menos redituable; su madera al ser dura y trabajada con herramientas rudimentarias hicieron que su precio aumentara. A pesar de ello, el pino ha representado una de las actividades más importantes en los lugares donde aún se conserva el bosque, a pesar de prohibiciones y multas aplicadas en los últimos años (Hoffman, 1993).

Después de las talas se han desarrollado escobillos y vegetación secundaria arbórea con *Alnus*, *Mirica* y *Carpinus*. Cuando la tala se asocia a una apertura de cultivos aparecen luego los helechos (Soto *et al.*, 1978). De acuerdo con Hoffman (1993), la sucesión de tala, escobillo y helechos no es bien conocida ya que intervienen la altitud, la calidad del suelo y las actividades humanas.

Dado que los ecosistemas de este tipo son los preferidos por los seres humanos para el establecimiento de sus asentamientos y para la siembra de muchos de sus cultivos más importantes, no es de sorprenderse que se consideren los ecosistemas que más han sido transformados por estos usos y, por lo tanto, que se encuentren entre los menos conservados del país (Challenger, 2003).

Cuadro 3-4. Uso de suelo y vegetación, superficie ocupada.

USO DE SUELO Y VEGETACION	Área km ²	Área %	Agrupada %
Agricultura de Riego	8.0	0.6	27.5
Agricultura de Temporal	386.0	26.9	
Bosque de Encino	11.9	0.8	35.2
Bosque de Oyamel	20.6	1.4	
Bosque de Pino	260.9	18.2	
Bosque Mesófilo de Montaña	212.3	14.8	
Pastizal	248.8	17.4	17.5
Pradera de Alta Montaña	1.6	0.1	
Selva Alta y Mediana Subp.	18.5	1.3	18.7
Selva Baja Cad.Y Sub.	14.6	1.0	
Selva Mediana Cad. Y Sub.	234.9	16.4	
Uso Urbano	15.4	1.1	1.1
Total	1433.4	100	100

Fuente: SEMARNAT-UNAM, 2001. Inventario Nacional Forestal.

Bosque mesófilo de montaña. De acuerdo con Challenger (2003), este tipo de bosque tiene una estructura y una composición de especies muy características, resultado de la migración y la entremezcla de las floras holártica y neotropical en el pasado geológico, de modo que en el dosel la mayoría de los árboles son especies caducifolias típicas de climas templados, mientras que en el sotobosque pueden predominar especies perennifolias de origen tropical. El mismo autor señala que es probable que los bosques mesófilos de México sean los más septentrionales del mundo, ya que el clima de estas latitudes, propenso a las bajas temperaturas invernales, es lo que fomenta la predominancia de árboles de afinidad templada.

En términos generales, los tipos de vegetación que predominan en esta zona ecológica son las “selva mediana o baja perennifolia”, el “bosque caducifolio” o el “bosque de pino, encino y *Liquidambar*”; o bien, el “bosque de niebla” que crece en áreas de gran precipitación pluvial y humedad atmosférica muy alta. También incluye el “bosque enano” o “selva baja perennifolia” que se desarrolla en cumbres expuestas de regiones húmedas donde el viento, el frío y otros factores se oponen al crecimiento de los árboles (Challenger, 1998).

Sin embargo, para 1993 en las inmediaciones de Xalapa, Williams (2002) señala que se cuenta con apenas el 10% del bosque mesófilo original de la región, cifra que seguramente ha disminuido en los últimos años. A pesar de lo anterior, Challenger (1998) señala que los bosques mesófilos de la montaña del centro de Veracruz continúan albergando una flora y una fauna muy diversa, incluso el árbol endémico *Magnolia dealbata* que se supone en peligro de extinción. El mismo autor continúa señalando que entre el 30% y el 40% del total de las especies de vertebrados mesoamericanos endémicos registrados en el bosque mesófilo están presentes en el bosque mesófilo de Veracruz.

Pastizales. Se pueden distinguir varios tipos de pastizales según la composición florística de las herbáceas y la presencia y naturaleza de un estrato arbóreo. De acuerdo con Hoffman (1993) la mayor parte de ellos son pastos inducidos, con el llamado “zacate grama” (*Paspalum notatum*). Forman una especie de césped con cobertura del 100% y con valor forrajero regular pero muy resistentes al pisoteo y pastoreo de animales y a las heladas. También se observan manchas de “zacate ancho” en terrenos pobres con pendientes, pero de bajo rendimiento forrajero. A menor altitud dominan los huizaches (*Acacia pennatula*), que es una especie de gran utilidad como combustible, madera para postes, sombra y abono para el suelo (Hoffman, 1993).

Agricultura (de riego y de temporal). Los principales productos que se obtienen por este tipo de uso son el maíz, frijol y papa en los municipios de Coatepec, Xico, Ixhuacan de los Reyes, Teocelo, Xalapa y Perote, en Veracruz; además de Chichiquila en el estado poblano; el sorgo y la soya en Teocelo; la caña de azúcar, naranja y café en los municipios de Xico, Coatepec, Teocelo y Xalapa; el mango (Teocelo) y el haba en Perote (INEGI, 2003).

De acuerdo con lo reportado en el Inventario Nacional Forestal (SEMARNAT-UNAM, 2001) en la cuenca se tienen identificadas alrededor de 800 hectáreas de riego mientras que en temporal se tienen un poco más de 38 mil hectáreas, todas

ellas comprendidas en el distrito de “Coatepec” de acuerdo al agrupamiento que otorga la SAGARPA en el estado de Veracruz (SIACON, 2005).

Sin lugar a dudas, por su carácter histórico y por su superficie sembrada, el maíz es el principal cultivo de temporal en la cuenca (Cuadro 3-5). De acuerdo con información del SIACON (2005) para diciembre del año 2005, en 14 municipios del estado veracruzano se habían sembrado cerca de 23 mil hectáreas de este grano básico para una producción total estimada de más de 21 mil toneladas, a un rendimiento promedio estimado de 1.22 Tn/Ha.

Cuadro 3-5. Superficie sembrada y rendimiento de maíz en municipios seleccionados.

Fecha: Información a Diciembre del 2005				
Ciclo: PRIMAVERA-VERANO				
Año Agrícola: 2005				
Modalidad: TEMPORAL				
Municipio	Superficie Sembrada (Ha)	Superficie Cosechable (Ha)	Producción Estimada (Ton)	Rendimiento Estimado (Ton/Ha)
Acajete	394.0	394.0	492.5	1.250
Acatlan	435.0	435.0	565.5	1.300
Coatepec	395.0	395.0	471.8	1.194
Cosautlan de Carvajal	210.0	210.0	255.8	1.218
Emiliano Zapata	3,593.9	3,593.9	4,133.1	1.150
Ixhuacan de los Reyes	563.3	563.3	563.3	1.000
Jalcomulco	813.1	813.1	1,016.7	1.250
Perote	13,715.0	9,127.0	10,226.1	1.120
Rafael lucio	207.0	207.0	265.0	1.280
Teocelo	227.0	227.0	272.4	1.200
Tlalnelhuayocan	354.9	354.9	478.9	1.349
Vigas de Ramírez	1,425.0	1,425.0	1,708.5	1.199
Xalapa	185.3	185.3	240.9	1.301
Xico	467.4	467.4	596.6	1.276

Fuente: SIACON, 2005

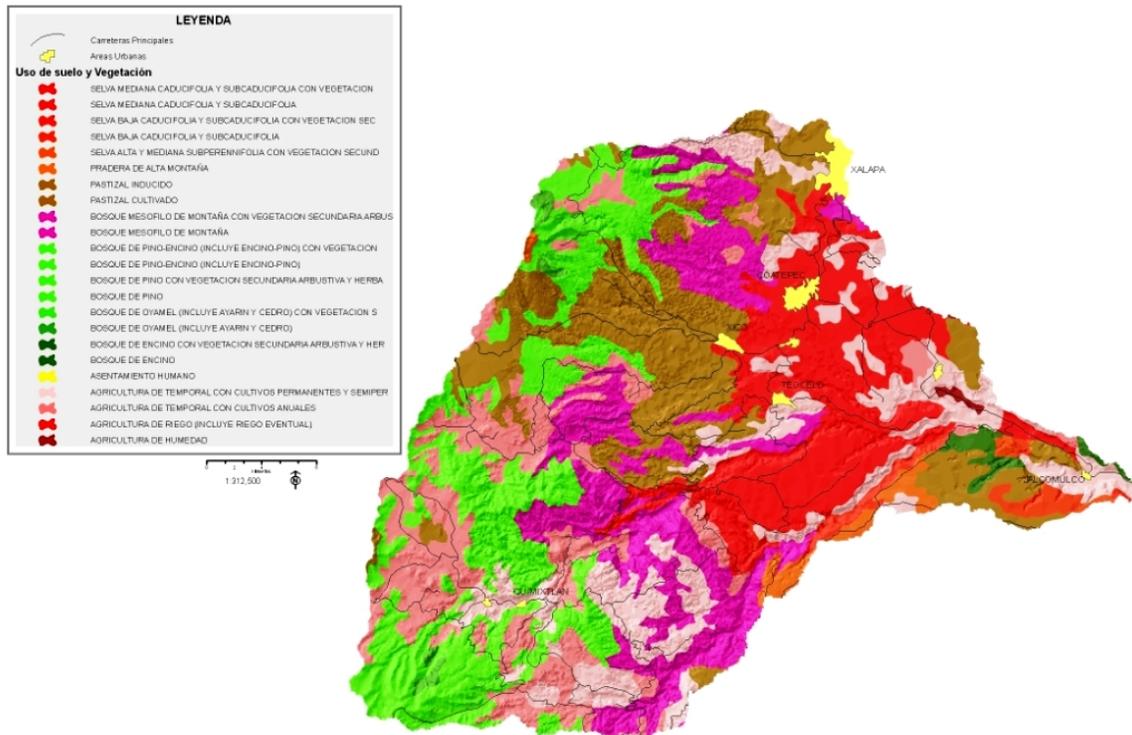


Figura 3–14. Uso de suelo y vegetación.

3.2 El Medio Socioeconómico.

3.2.1 Población

De acuerdo con el INEGI (2002b), dentro de la cuenca existen 558 localidades para un total de 604,428 habitantes al año 2000. Sin embargo, al no tomar en cuenta a la capital del estado Veracruzano, ya que no se encuentra totalmente dentro de los límites de la cuenca, la cifra se reduce a un poco más de 231 mil habitantes.

Del total de las localidades, sólo 38 de ellas presentan población igual o mayor a los 1,000 pobladores, siendo el resto con población menor a dicha cantidad. De acuerdo con CONAPO (2001), la población de los municipios de Acajete, Ayahualulco, Ixhuacán de los Reyes, Jalcomulco, Tlalnahuayocan, Chichiquila, Chilchotla, La Fragua y Quimixtlan vive en localidades con menos de 5000 habitantes (Cuadro 3-6).

Cuadro 3-6. Localidades más importantes y su población al año 1995 y 2000.

ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	POBLACION 1995	POBLACION 2000	
VERACRUZ	Ayahualulco	Ayahualulco	2437	2156	
		San Antonio Xoquitla	674	1707	
		Xololoyan	1658	1460	
		Xocotepec	1598	1375	
		Apanteopan	1122	1020	
	Coatepec	Coatepec	42462	45339	
		Tuzamapan	8241	6424	
		Pacho Viejo	3575	3794	
		Mahuixtlan	3369	3310	
		Orduña, la	1472	1447	
		Lomas, las	1360	1371	
		Bella Esperanza	1280	1336	
	Cosautlan De Carvajal	Cosautlan de Carvajal	4261	4478	
		Limonos	2279	2303	
		Piedra Parada	1625	1800	
	Ixhuacan De Los Reyes	Ixhuacan de los Reyes	2361	2342	
	Jalcomulco	Jalcomulco	2474	2405	
	Teocelo	Teocelo	8241	9062	
		Monte blanco	1710	1633	
		Llano grande	1149	1244	
Tlalnahuayocan	Guadalupe Victoria	3195	3949		
	Otilpan	1302	1624		
Tlaltetela	Tlaltetela	3803	4067		
Xalapa	Xalapa-Enríquez	324081	373076		
Xico	Xico	14203	14967		
	San Marcos de León	5645	6128		
	Colonia Ursulo Galván	1278	1374		
PUEBLA	Chichiquila	Chichiquila	2243	2338	
		Huaxcaleca	1930	2164	
	Chilchotla	Rafael j. García	4052	3997	
		Francisco I. Madero	2590	2803	
		Trinidad, la	1302	1241	
		Carmen, el	979	1064	
		San José Manzanitos	988	1051	
	Quimixtlan	Quimixtlan	1516	1526	
		Xacaxomulco	1288	1111	
		Tlanepantla	977	1107	
		Rincón de los Reyes	1096	1059	
	2 ESTADOS	13 MUNICIPIOS	38 LOCALIDADES	465,816	520,652

Fuente: CONAPO (1995) e INEGI (2002b).

Sin embargo, para el año 1995, el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 1995) señalaba que para la misma zona se tenían contadas 413 localidades, lo que sugiere un incremento de un poco más de 140 localidades en tan sólo 5 años. A partir de lo anterior, se observa que en la cuenca ha aumentado la población en la mayoría de las localidades, aunque existen algunas de ellas que muestran una disminución considerable. La CONAPO (2002) a través de sus proyecciones de la población al año 2050 presenta, para el conjunto de localidades dentro de la cuenca, un incremento en promedio de un 24% de su población.

Además del incremento de la población observada y estimada, es relevante señalar que el 64% de las localidades dentro de la cuenca al año 1995 (CONAPO, 1995) presentan un grado de marginación “muy alto” mientras que el 19% presenta un grado “alto”, el restante se encuentra dentro de las categorías medio, bajo y muy bajo. Lo anterior señala que dentro del área de estudio cerca del 83% de la población vive en condiciones muy por debajo de las deseables, siendo únicamente las zonas urbanas las que presentan la mejor calidad de vida para sus habitantes.

Ya para el año 2000 y a nivel municipal, el CONAPO (2001) presenta que de los 18 municipios que cubre la cuenca 10 de ellos presentan grado de marginación de alto a muy alto (62.5%), mientras que 6 de ellos lo conservan como medio a muy bajo.

El alto grado de marginación en las localidades dentro de la cuenca de estudio se comprende ya que buena parte de los pobladores con alta marginación son comunidades indígenas que han sido rezagadas del desarrollo de la región. Así, se tiene que de acuerdo con el Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM, 2006) aún se conserva la lengua náhuatl como lengua principal en un poco más de 2 mil habitantes y el chinanteco en un número considerablemente menor. Las segundas lenguas en la región son el huasteco, el mixteco, la totonaca y el zapoteco, tal como se presenta en el Cuadro 3-7.

Cuadro 3-7. Total de población Indígena y porcentaje por municipio.

MUNICIPIO	% Población Indígena en el Municipio	Total de población Indígena	Lengua principal	Segunda lengua principal
Acajete	0.23	18	Chinanteco	
Coatepec	0.38	285	Náhuatl	Totonaca
Cosautlan de Carvajal	0.29	45	Náhuatl	Mixteco
Emiliano Zapata	0.39	174	Náhuatl	Zapoteco
Huatusco	0.48	226	Náhuatl	Mixteco
Ixhuacan de los Reyes	0.51	49	Náhuatl	Chichimeca Jonaz
Xalapa	0.71	2776	Náhuatl	Totonaca
Jalcomulco	0.65	29	Náhuatl	
Xico	0.52	152	Náhuatl	Totonaca
Perote	0.61	333	Náhuatl	Totonaca
Las vigas de Ramírez	0.16	24	Náhuatl	Zapoteco
Rafael Lucio	0.5	27	Huasteco	Totonaca
Teocelo	0.18	27	Náhuatl	Maya
Tlalnahuayocan	0.44	51	Totonaca	Náhuatl

FUENTE: SNIM. 2006. Sistema Nacional de Información Municipal. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Fichas Básicas municipales. Secretaría de Gobernación. Consulta: febrero de 2006.

A pesar de que el porcentaje de población indígena en los municipios se puede considerar bajo (menor del 1%) se presenta en las urbes principales un número importante de población indígena, tal es el caso de Xalapa, Coatepec, Perote y Huatusco.

3.2.2 Vivienda

De manera general, en la cuenca los pobladores cuentan con servicio de drenaje en más de un 90%, aunque existen municipios como Jalcomulco y Acajete que su cifra disminuye a cerca de un 80%, de acuerdo con estimaciones de CONAPO (2001). Es de resaltar que el municipio con un porcentaje alto lo es Coatepec, con un 97% de sus viviendas que cuentan con dicho servicio y Xalapa, la capital del Estado con un 99%.

La energía eléctrica es también un servicio con que cuentan la mayoría de las comunidades, ya que, de acuerdo al mismo autor, sólo los municipios de Acajete y Huatusco presentan cobertura de este servicio en poco más de 90% mientras que todos los demás municipios lo tienen en más del 95%.

Cuadro 3-8. Indicadores de vivienda por municipio, 2000.

Municipio	% Ocupantes en viviendas sin energía eléctrica	% Ocupantes en viviendas sin agua entubada	% Viviendas con algún nivel de hacinamiento	% Ocupantes en viviendas con piso de tierra
Acajete	10.96	4.65	66.29	28.56
Ayahualulco	6.24	4.10	77.95	43.63
Coatepec	2.29	2.09	47.46	16.23
Emiliano Zapata	3.13	4.28	47.24	13.58
Huatusco	11.29	10.21	59.80	35.70
Ixhuacán De Los Reyes	8.93	6.84	72.38	50.53
Xalapa	0.97	1.27	36.83	6.41
Jalcomulco	3.70	1.92	55.90	45.44
Xico	5.64	2.56	61.91	31.26
Perote	3.41	0.90	60.72	12.84
Teocelo	2.25	0.86	53.56	34.92
Tlalnelhuayocan	5.91	8.21	73.61	36.29
Chichiquila	4.48	52.80	82.62	77.19
Chilchotla	4.54	8.83	84.11	35.58
Lafragua	2.04	8.95	65.88	27.91
Quimixtlán	3.27	39.49	80.43	46.62

Fuente: Estimaciones de CONAPO (2001) con base en el XII Censo General de Población y Vivienda, 2000.

3.2.3 Educación

Respecto a cifras de educación, la población de la cuenca se comporta de una manera muy irregular ya que, municipios como Ayahualulco y Chilchotla presentan un 48% y 46% de analfabetismo, respectivamente, en personas de 15 años y más. Contrastando con lo anterior, los municipios de Xalapa, Emiliano Zapata y Coatepec presentan cifras menores al 10%. Si estos datos se comparan con los de población sin primaria completa las cifras aumentan, ya que municipios como Ayahualulco, Ixhuacán de los Reyes, Chichiquila, Chilchotla y Quimixtlán tienen más del 70% de su población sin terminar sus estudios primarios.

3.2.4 Actividad Económica

En materia de ingreso, los pobladores de la cuenca reflejan un bajo nivel ya que en la mayoría de los municipios se tiene que más del 75% de la población tiene ingreso de hasta dos salarios mínimos, a excepción de la capital Veracruzana, con un 48% (CONAPO, 2001).

Lo anterior se puede deber a que en la mayoría de los municipios se tiene una tasa de más del 40% de la población que se dedica a las actividades primarias, con municipios donde incluso este valor supera el 60% de su población dedicada a dichas actividades, como lo es el caso de Cosautlán de Carvajal, Ixhuacan de los Reyes y Jalcomulco, como se presenta en el Cuadro 3-9.

Cuadro 3-9. Población Económicamente Activa por sector de ocupación al año 2000.

MUNICIPIO	SECTOR			No Especificado	PEA* Mayor de 12 Años
	PRIMARIO	SECUNDARIO	TERCIARIO		
Acajete	49.54	18.48	30.58	1.11	47.48
Coatepec	27.48	23.35	47.49	1.67	55.88
Cosautlan de Carvajal	73.38	13.49	10.63	0.48	62.83
Emiliano Zapata	47.34	13.22	37.67	1.75	53.63
Huatusco	44.5	15.69	38.84	0.95	54.68
Ixhuacan de los Reyes	75.46	11.75	12.55	0.22	49.15
Xalapa	4.15	18.65	74.73	2.45	54.91
Jalcomulco	68.09	8.06	22.36	1.48	50.17
Xico	51.69	15.19	31.84	1.25	54.01
Perote	20.33	35.19	43.19	1.27	51.64
Las Vigas de Ramírez	42.23	23.69	32.03	20.02	42.2
Rafael Lucio	20.68	27.11	50.36	1.82	50.87
Teocelo	57.45	12.02	29.62	0.89	59.87
Tlalnelhuayocan	23.78	28.29	45.62	2.3	51.05
Promedio	43.3	18.9	36.3	2.7	52.7

* PEA Se refiere a la Población Económicamente Activa. FUENTE: SNIM. 2006. Sistema Nacional de Información Municipal. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Fichas Básicas municipales. Secretaría de Gobernación.

Caso muy particular es el de la capital veracruzana, donde apenas el 4% de su población se dedica a las actividades primarias mientras que el 74% se dedica a las actividades terciarias.

Dentro de las actividades primarias, sin lugar a duda la producción agrícola de temporal es la predominante, aunque también se presentan actividades referentes a la ganadería y forestería. En las unidades de producción agrícola se obtienen productos como maíz, frijol, papa, café, caña de azúcar, ciruela, manzana, pera y verduras y legumbres de diferentes tipos, entre otros. Por su parte, las unidades de producción ganadera se dedican a la cría y engorda de ganado, predominantemente ganado bovino, porcino, ovino, caprino, avícola y apícola.

Las unidades de producción forestal se dedican a productos maderables y no maderables.

En lo que se refiere a las actividades del sector secundario, mayormente se presentan pequeñas industrias para autoconsumo, como queserías. Las grandes industrias se concentran en las beneficiadoras de café, embotelladoras, empacadoras de carnes frías, elaboración de productos lácteos (Nestle), industrias metalúrgicas y mecánicas.

En el sector terciario existe una gran cantidad de pequeños comercios como papelerías, ferreterías, tortillerías, carnicerías, zapaterías, sastrerías y funerarias, entre muchos otros. También se cuenta con restaurantes y hoteles, principalmente en las zonas turísticas y urbanas como Xalapa, Coatepec y Xico. Cuentan también algunos municipios con servicios tales como terminales de autobuses, bancos, mueblerías, materiales para construcción y arrendadoras.

Palma (2005) señala que para el año 2002 y a nivel nacional, el estado era considerado el tercer productor agropecuario del país; dentro de la producción agrícola ocupaba el tercer lugar en la producción de arroz, el séptimo lugar en la producción de maíz y el noveno lugar en la producción de frijol. Finalmente, menciona que el estado de Veracruz era productor a nivel nacional del 37.2% de la caña, 27.3% del café, 38.8% de la producción de azúcar y el 28.8% de la producción de frutales (72.1% piña, 56.9% naranja, 29.6% papaya, 19.3% limón, 14.7% plátano, 13.9% mango y 8.6% sandía).

CAPÍTULO 4. CLIMA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA.

El estado de Veracruz se encuentra dentro de la región tropical y es afectado a lo largo del año tanto por sistemas tropicales como extratropicales (Rodríguez *et.al.*, 1995). Así, durante el verano se presenta el paso de las masas de aire tropical, las ondas del este, las depresiones, tormentas tropicales y huracanes por lo general a partir de junio y en algunas ocasiones durante la segunda quincena de mayo (Palma, 2005). Durante el invierno, en los meses de octubre a mayo, se tiene el paso de las masas de aire polar en forma de frentes fríos llamados “nortes”, así como también la invasión de aire frío asociado al paso de vaguadas polares (Tejeda *et.al.*, 1989; Acevedo *et.al.*, 2006).

4.1. El clima en la cuenca

CONABIO (1998) reporta una variedad de climas para la cuenca, desde los climas fríos hasta los cálidos húmedos, debidos principalmente al fuerte gradiente altimétrico en la cuenca (de 4240 msnm a 300 msnm), como se ha mencionado

con anterioridad. La orientación norte-sur de la sierra, hace que ésta se ubique frente a la penetración de las masas de aire húmedo provenientes del Golfo de México, dando como resultado dicho gradiente climático muy diferenciado (Hoffmann, 1993).

En este sentido, para la zona centro del estado de Veracruz, Soto *et.al.*, (1989), identifica los siguientes factores climáticos como modificadores del clima de la región de estudio: 1) la latitud; 2) el efecto de barrera climática que ejerce la Sierra Madre Oriental; 3) la presencia del Cofre de Perote y del Pico de Orizaba, con sus efectos sobre la variedad de las condiciones climáticas de la zona; 4) la influencia de la corriente cálida del Golfo de México, los alisios y huracanes; y finalmente, 5) la saliente hacia el Golfo de México de la Sierra Madre Oriental, que provoca dos efectos en las inmediaciones del paralelo 20°N: a) de barrera contra Nortes, lo cual repercute en una menor variación en las temperaturas mínimas respecto a las regiones situadas al norte de ésta, y b) de “sombra de lluvia” para la región situada al sur del paralelo 20°N, la menos húmeda del estado.

También se señala la importante situación del estado en el área de influencia de los “ciclones tropicales” hacia fines de verano y en el otoño así como de los “nortes” en la época invernal (Soto, 1989; Tejeda, 2006). Los primeros influyen tanto en la dirección del viento como en el incremento de la precipitación especialmente en el mes de septiembre. Los segundos tienen influencia en la dirección que prevalece en el invierno y también en la cantidad de lluvia invernal.

De manera general, las masas de aire cargadas de vapor sobre el Golfo de México son empujadas por los vientos alisios hasta chocar con la sierra donde son obligadas a subir, enfriarse y condensarse rápidamente, provocando así fuertes precipitaciones. A este proceso se le debe de añadir uno más regional, la evapotranspiración debida a la vegetación, que participa en la saturación de vapor de agua en la atmósfera. Este proceso se presenta en la Figura 4-1, el ciclo hidrológico generalizado para la cuenca de estudio:

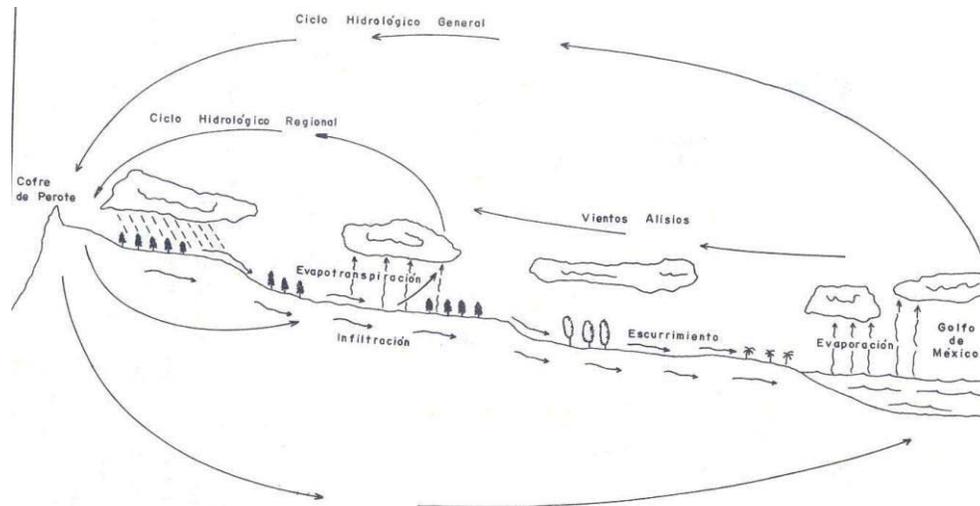


Figura 4-1. El ciclo hidrológico en la cuenca. Tomado de Hoffmann (1993).

Así, el fuerte gradiente altitudinal, el relieve y la vegetación son sólo algunos de los modificadores de las condiciones locales del clima en la cuenca, donde los principales grupos climáticos definidos por el CONABIO (1998) se describen a continuación:

E(T)H. Son climas fríos cuya temperatura media anual se encuentra entre los -2°C y los 5°C . Su temperatura del mes más caliente es entre los 0°C y los 6.5°C . (García, 2004). Ocupan una muy pequeña superficie de la cuenca y se presentan en la parte alta del Cofre de Perote sobre los 3800 msnm.

C(E)(m) y ***C(E)(w2)(w)***. Son tipos de climas semifríos subhúmedos con régimen de humedad en verano, entre 5 y 10.2% de lluvia invernal para el primero y menor de 5% para el segundo. Su temperatura media anual se encuentra entre los 5°C y los 12°C . El segundo de ellos es el más húmedo de los subhúmedos. (García, 2004). Tipos de climas característicos de zonas altas en el país, se localizan hacia la parte alta de la cuenca, desde el Cofre de Perote siguiendo por el sur sobre el parteaguas de la cuenca, se encuentra sobre los 2800 msnm y cubre un poco más del 12% de la cuenca.

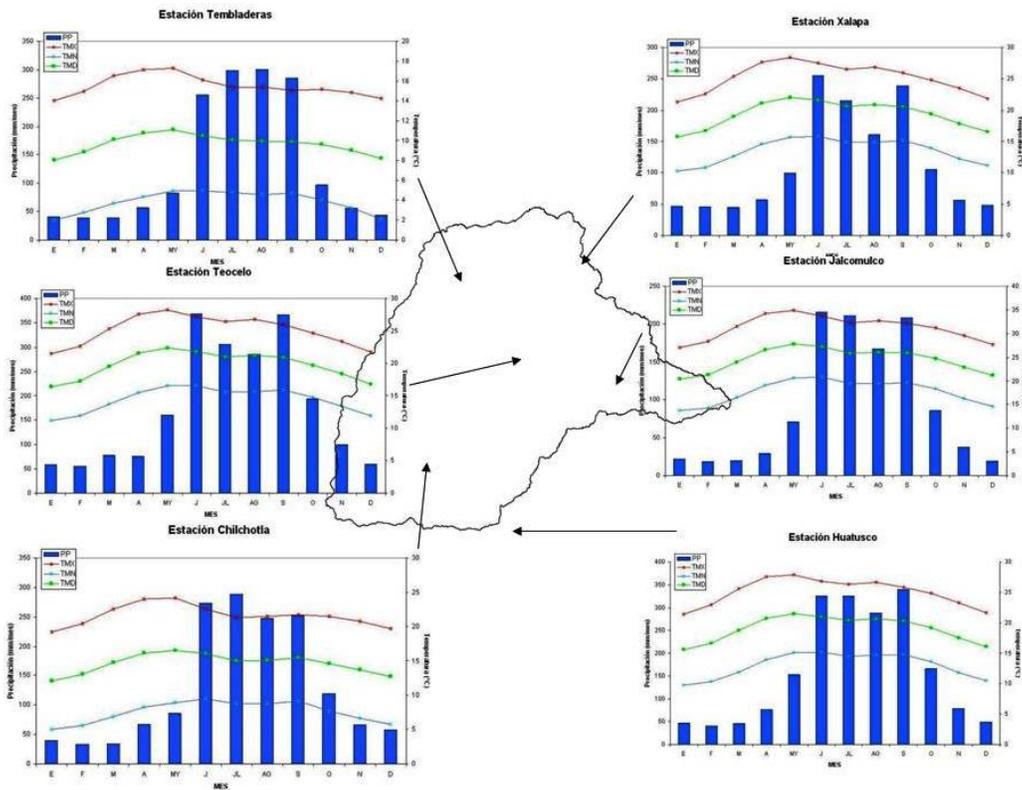


Figura 4-2. Climogramas de estaciones seleccionadas en la cuenca

C(fm) y C(m). Estos son climas templados húmedos. El primero, es un clima templado con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, con menos de 18% de lluvia invernal respecto al total anual. El segundo, es el más húmedo con régimen de lluvias de verano entre 5 y 10.2% de lluvias invernales. La temperatura media anual de ambos tipos oscila entre los 12°C y los 18°C (García, 2004). Se localizan en la región central de la cuenca, desde su porción norte al occidente de Xalapa hasta el sur de la cuenca, representa el 34% de la superficie total y se encuentra por encima de los 1500 msnm.

(A)C(fm) y (A)C(m). Climas semicálidos húmedos. Su temperatura media anual es mayor de los 18°C y la del mes más frío mayor de los 18°C. . El primero, es un clima templado con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, con menos de 18% de lluvia invernal respecto al total anual. El segundo, con régimen de lluvias de verano entre 5 y 10.2% de lluvias invernales (García, 2004). Cubre más del 45% de la superficie de la cuenca, son el tipo climático mas representativo

y se encuentra en la región centro – oriente de la cuenca, Las ciudades de Xalapa, Coatepec, Xico y Teocelo se encuentran bajo este régimen climático.

Aw1(w) y Aw2(w). Son climas cálido subhúmedos, el segundo el más húmedo de los subhúmedos y el primero el intermedio. Ambos con régimen de lluvias en verano (García, 2004). Representa el 6% de la superficie de la cuenca y se encuentra localizado en el oriente de la cuenca sobre la comunidad de Jalcomulco, en los límites de la cuenca.

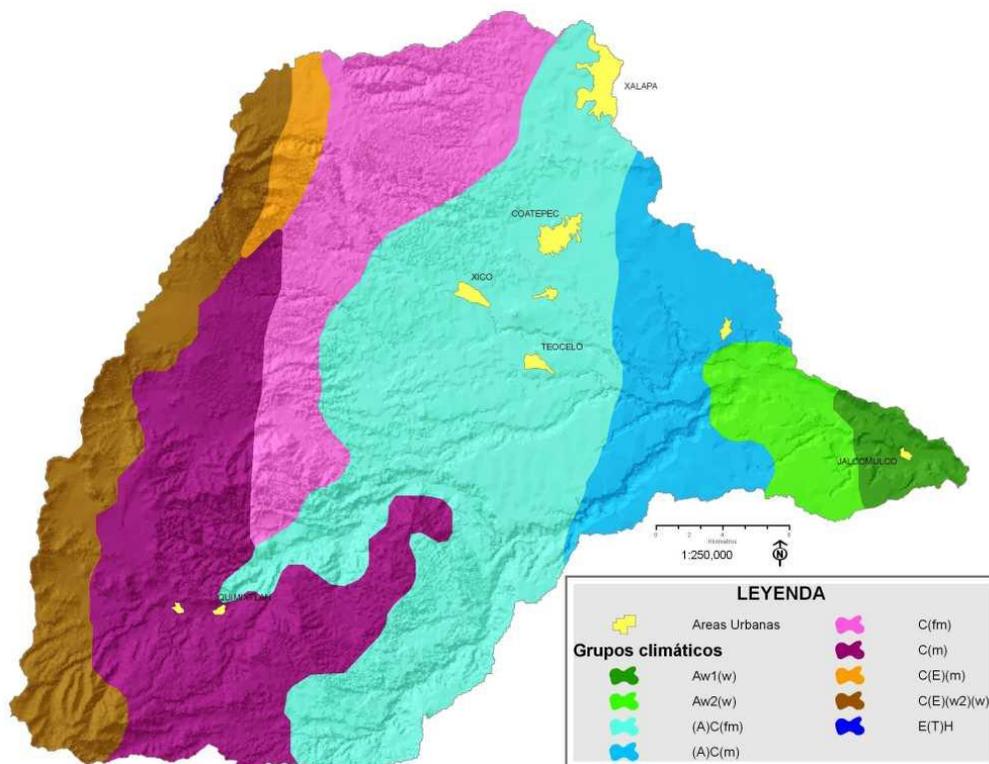


Figura 4-3. Climas predominantes en la cuenca.

A lo largo del año, Hoffmann (1993) encontró que para el municipio de Xico y sus alrededores se pueden definir tres temporadas climáticas: 1) la fría, que va de los meses de noviembre a finales de febrero, caracterizada principalmente por la llegada de los “nortes” o masas de aire polar 2) la temporada de sequía principalmente de abril a junio, con mucho “bochorno” y frecuentes granizadas a inicios junio y finales de mayo; y por último 3) el tiempo de agua, que comprende

del mes de junio hasta septiembre, propiciado por los vientos alisios del verano con lluvias abundantes (tempestades y tormentas) y ciclones tropicales.

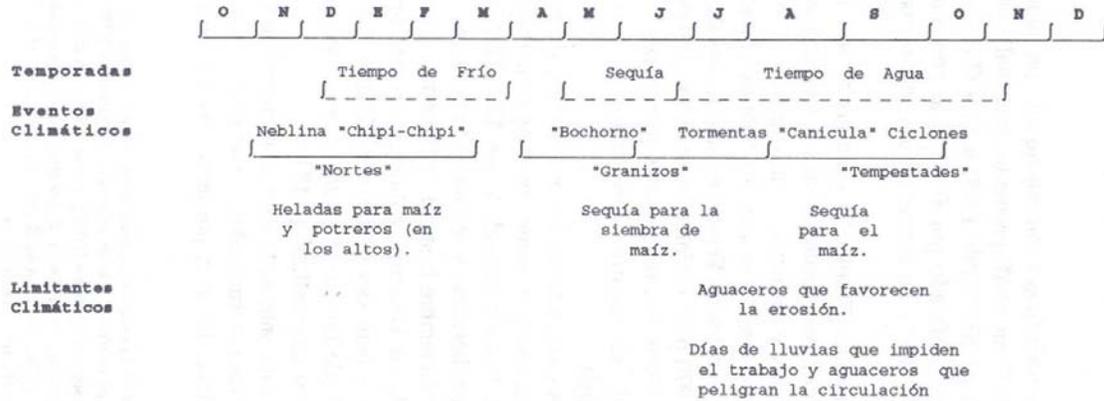


Figura 4-4. Calendario climático en la cuenca (Tomado de Hoffman, 1993).

El mismo autor señala que las principales limitantes climáticas en las zona son, hacia la parte alta en las inmediaciones del Cofre de Perote, las temperaturas bajas, con periodos de heladas o fríos intensos, queman los pastos, disminuyendo así las potencialidades forrajeras de los potreros, así mismo, dañan al maíz cuando éste todavía no ha madurado suficientemente (octubre-noviembre).

4.1.1 Temperatura

Como ya se ha apuntado, debido a las diferencias altitudinales y su particular relieve, en la cuenca se presenta una gran variación en los rangos de temperaturas (Figura 4-5). Para determinar los valores medios de temperatura se aplicó la propuesta de Gómez et.al., (2007), quienes sugieren la elaboración de modelos simples de temperatura (no interpolar) a partir del comportamiento de la variable en la zona, reportada en las estaciones meteorológicas. En el Anexo 1 se presenta la lista de las estaciones.

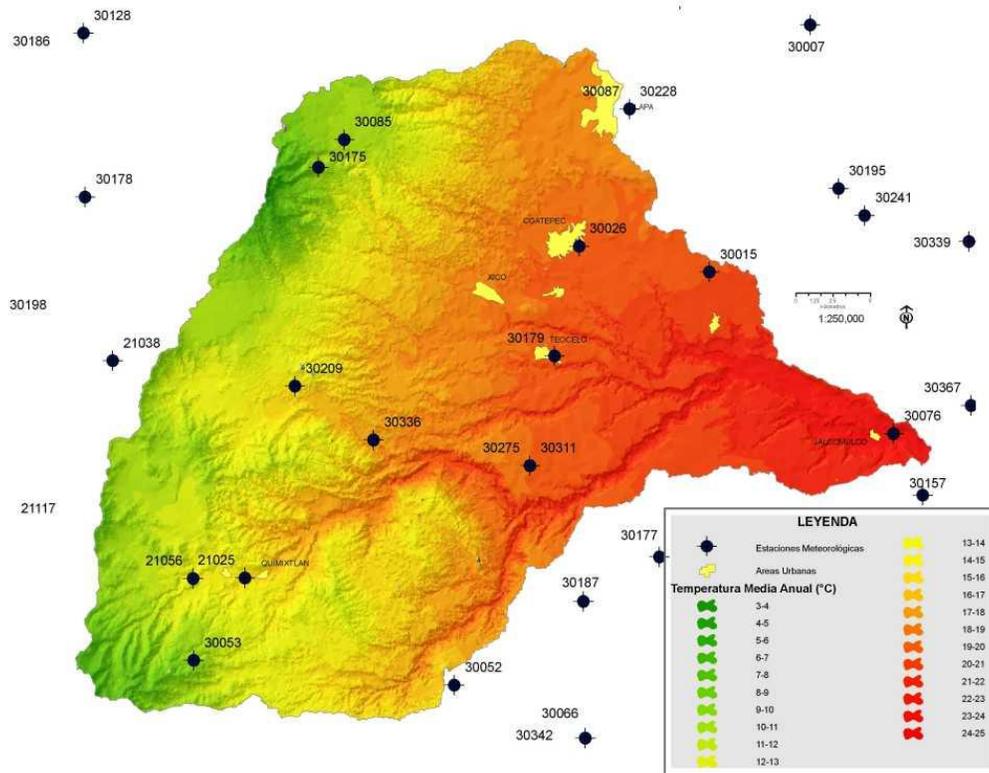


Figura 4-5. Estaciones meteorológicas y temperatura media anual en la cuenca.

Los valores más altos de temperatura media se presentan en mayo antes de la temporada de lluvias. Sin embargo, es en algunas estaciones como Coatepec y Teocelo donde el mes de junio es significativamente muy similar al anterior (Gómez, 1990; Medina, 1991b).

Por su parte, los valores más bajos de las temperaturas medias se presentan mayormente hacia inicios de año en el mes de enero, aunque desde el mes de diciembre se percibe ya la disminución de la temperatura (Medina, 1991a).

A partir del comportamiento de los datos anteriores, la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas medias (oscilación térmica) anuales se presenta como "poca" (entre 5 y 7°C) hacia el centro de la cuenca en los municipios de Coatepec (Gómez, 1990), Las Vigas de Ramirez (González-Capistrán, 1991), Xico (Gómez, 1991), Xalapa (Soto, 1990), Teocelo, Las Minas, Tatatila y Cosautlán de Carvajal (Medina, 1991a y 1991b).

En lo que se refiere a la temperatura máxima extrema que ha registrado el Servicio Meteorológico Nacional (2006), señala valores predominantes de entre 27 y 30°C en las zonas cercanas a la ciudad de Xalapa, Coatepec y Xico y menor de 27°C hacia las inmediaciones del Cofre de Perote. Por lo general los meses más calientes son mayo y abril (Soto, 1989).

Las temperaturas mínimas por su parte, alcanzan los valores más bajos hacia la época de invierno en que la superficie terrestre a estas latitudes recibe el mínimo de insolación. Por lo general la temperatura más baja se alcanza en el mes de enero y es en las inmediaciones de la capital Veracruzana que se tienen valores de entre 4 y 6°C disminuyendo conforme se incrementa la altura sobre el nivel del mar hasta alcanzar valores menores de 0°C en la parte alta del Cofre de Perote.

El número de días con heladas que reporta Soto (1989) es de entre 1 y 10 para la zona centro de la cuenca; mientras que de 10 a 20 días en la franja intermedia y de 20 a 30 días para la parte más alta de la cuenca y que corresponde al cofre de Perote.

4.1.2 Precipitación

Los principales factores señalados por Soto (1989) que influyen en la cantidad de lluvia que cae en un lugar son: la presencia de zonas de convergencia de viento, la cantidad de humedad de la atmósfera y su capacidad para contener vapor de agua, lo cual depende de la temperatura, la cercanía del lugar al océano y la presencia o ausencia de montañas. Considerando todo lo anterior y de acuerdo a Gómez *et.al.*, (2005) se trazaron las isoyetas para la cuenca de estudio, obteniendo el mapa que se presenta en la Figura 4-6.

En la zona, la precipitación está concentrada en los meses de verano. En cuanto a su distribución se tiene que la mayoría de las estaciones presentan sequía

intraestival o canícula, que es una disminución de la precipitación en la época lluviosa, generalmente en los meses de julio y agosto (Soto, 1989).

Para la cuenca de estudio, se tiene que las menores precipitaciones se reciben en un rango de 900 a 1000 milímetros anuales, mientras que las mayores precipitaciones llegan a valores superiores de los 3000 milímetros anuales.

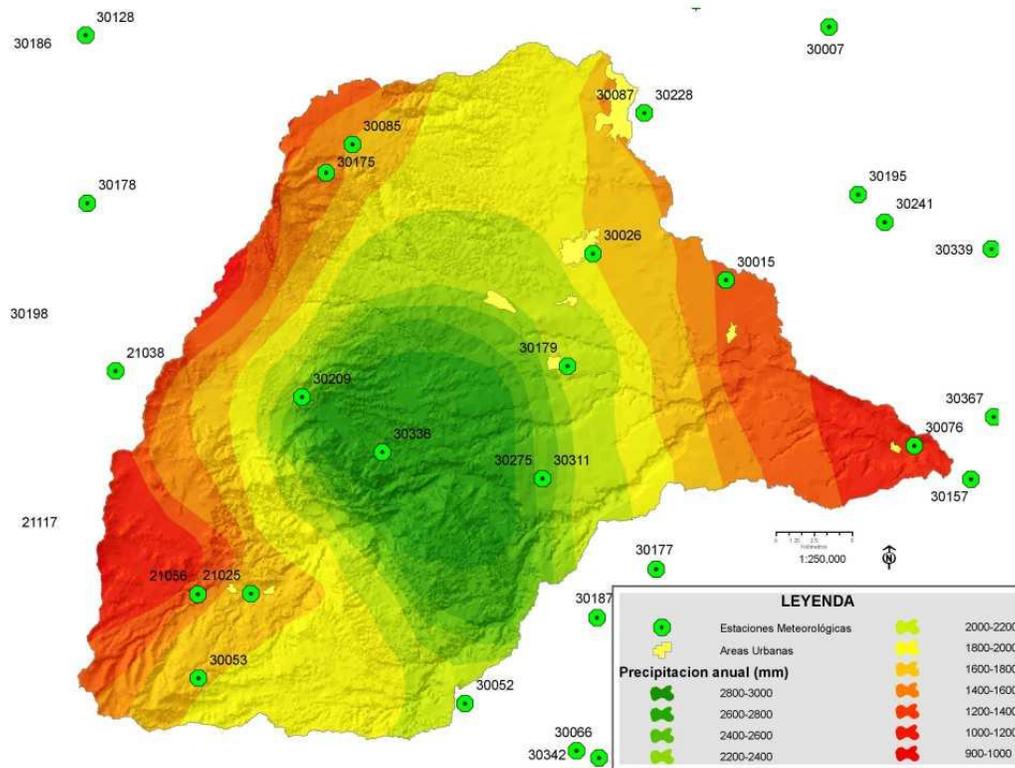


Figura 4-6. Precipitación total anual y estaciones meteorológicas en la cuenca.

Palma (2005) indica que el mes de septiembre es el que registra el valor más alto de precipitación en las estaciones de El Remolino, Martínez de la Torre, Tecuantepec, Atzalan, y Jalcomulco. Así también en Las Vigas de Ramírez (González-Capistrán, 1991), Las Minas, Tatatila y Cosautlán de Carvajal (Medina, 1991a y 1991b).

Sin embargo es para el mes de junio donde ocurre la precipitación más alta para las estaciones de Teocelo, Huatusco y Rinconada y en Xalapa para el mes de julio

(Palma, 2005) y de acuerdo con Gómez (1990) también en Coatepec para el mes de junio.

La lluvia máxima en 24 horas que ha registrado el Servicio Meteorológico Nacional (2006) señala valores predominantes de entre 30 y 40 mm por evento pluvial en las zonas cercanas a la ciudad de Xalapa, Coatepec y Xico y de 40 a 50 mm hacia la parte baja y alta del cofre de Perote. Sin embargo, en cuanto a las máximas totales registradas desde el inicio de los registros de las estaciones se tienen rangos muy superiores a los 100mm para la zona de Xalapa y de 200 a 300mm para la parte alta del Cofre de Perote.

Respecto al número de días con precipitación apreciable, Soto (1989) apunta que para la mayor parte de la cuenca se tienen más de 150 días al año y es hacia la parte baja de ésta que se presenta de 100 a 150 días.

Hoffman (1993) señala que la precipitación es insuficiente hacia abril y mayo, en tiempos de calor, daña al maíz cuando su siembra ha sido temprana; o bien, en la canícula de agosto sobre los suelos muy drenados. Por lo que se refiere a las precipitaciones excesivas en forma de granizo o aguaceros al inicio de la temporada de lluvias, pueden dañar a los cafetos en floración, favorecen la erosión en los caminos y suelos desnudos; por su volumen pueden provocar estancamiento de agua en los fondos aluviales. Los aguaceros frecuentes, señala, impiden el trabajo en el campo, los ríos pueden crecer por algunas horas impidiendo la circulación de personas.

4.1.3 Ciclones tropicales

De acuerdo con Acevedo y Luna (2006), “un ciclón tropical es un remolino gigantesco que cubre cientos de miles de kilómetros cuadrados y tiene lugar, primordialmente, sobre los espacios oceánicos tropicales. Cuando las condiciones

oceánicas y atmosféricas propician que se genere un ciclón tropical, su evolución y desarrollo puede llegar a convertirlo en huracán”.

El mismo autor señala que al comparar con algunos años de los considerados más activos, el año 1933 presentó 21 sistemas tropicales y para el año 2005 incluso se rebasó la lista de los nombres con los que se identifican cada uno de los sistemas tropicales, por lo que se tuvieron que tomar los primeros 6 nombres del alfabeto griego (Acevedo *et.al.*, 2006).

Cuadro 4-1. Comparativo de temporadas más intensas de ciclones tropicales.

Año	1933	1969	1995	2005
Total de tormentas y huracanes	21	18	19	27
Total de huracanes	10	12	11	14
No. de huracanes mayores	5	7	5	7
No. de huracanes categoría 5	0	1	0	3
Total de tormentas y huracanes que impactaron en Veracruz	4	0	0	4

Fuente: Tomado de Acevedo (2006)

Por su parte, Jáuregui (1995) señala que para México y sobre el Atlántico, en el periodo 1961-1990 se manifestaron 213 tormentas en total, de las cuales, 44 tocaron tierra. De estas últimas, 28 fueron huracanes y 16 tormentas. Para las costas del Pacífico la cifra se eleva a 328 tormentas de los cuales 86 tocaron tierra.

Tejeda (2006) señala que desde 1950 a la fecha han sido varias las depresiones y tormentas tropicales que han azotado al estado veracruzano. Para el año 2005 fueron cuatro los ciclones tropicales que impactaron al estado de Veracruz: las tormentas Bret, Gert, José y el huracán Stan. Continúa señalando que los huracanes que han tocado tierra desde 1950 son Jannet (septiembre de 1955), Abby (julio de 1960), Edith (septiembre de 1971), Diana (agosto de 1990), Roxana (octubre de 1995) y Stan (octubre de 2005).

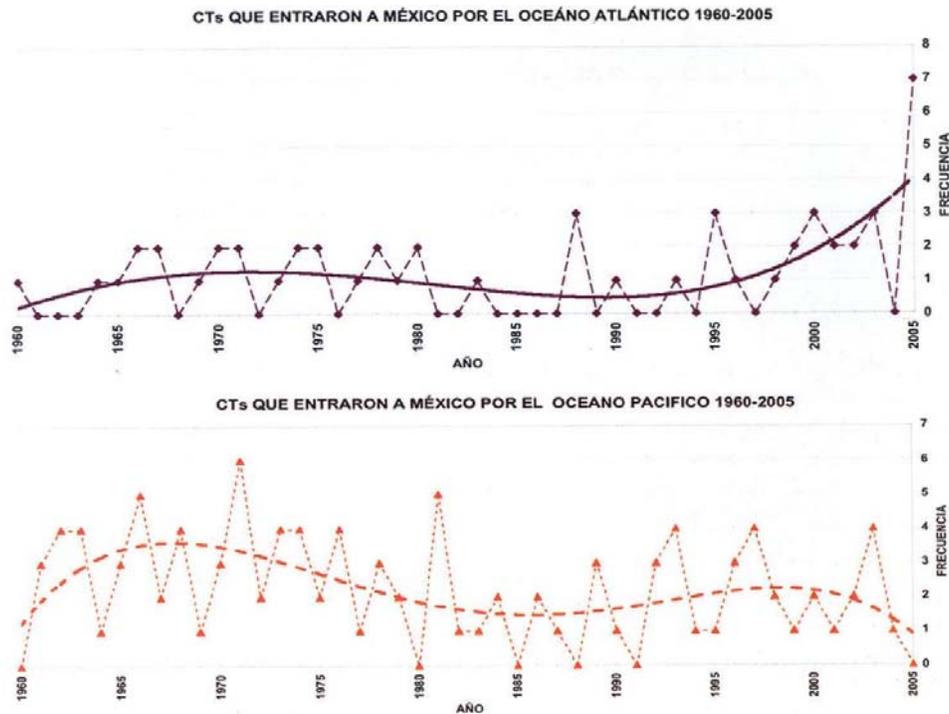


Figura 4-7. Ciclones tropicales (CT) que entraron a México (Tomado de Zarate, 2006).

Estos sistemas causaron daños considerables. De acuerdo con informes de la Presidencia de la República (Cruz-Hernández, 2006), los daños causados por el huracán Stan en el año 2005 para Veracruz fueron: “184 municipios afectados; 2073 comunidades, 137,116 viviendas, 125,750 personas evacuadas preventivamente; 1,298,000 personas afectadas; 13 personas lesionadas; 44 ríos desbordados; 26 arroyos desbordados; 11 sistemas lagunarios contaminados; 6 esteros desbordados; 3 canales desbordados; 12 bordos y muros de protección dañados; 178 escuelas afectadas; 35 unidades médicas afectadas; 592 tramos carreteros dañados y 176 puentes afectados”.

4.1.4 El Niño / Oscilación del Sur

De acuerdo con Conde (2003), el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el resultado del calentamiento-enfriamiento recurrente de la superficie del océano en el Pacífico del Este. El ciclo del ENSO puede darse aproximadamente cada 3 a 4 años, aunque sin una periodicidad regular. La

duración de este evento es de entre 12 a 18 meses, en promedio, iniciando entre junio o julio de un año, alcanzando su máximo en invierno (aunque algunos eventos, como el de 1982 – 1983, alcanzaron su máximo en el segundo año, durante o aún después de la primavera) y prolongándose hasta mediados del siguiente año.

En el caso de México, Magaña (1999) señala que dicho evento provoca que en el país se presenten condiciones de sequía durante el verano y lluvias torrenciales durante el invierno, particularmente en la región norte y costas del Pacífico. Las condiciones meteorológicas atribuidas al fenómeno de "El Niño", como las que se acentuaron durante la estación seca del ciclo 1997-1998 y, en particular, durante los primeros meses de 1998, propiciaron la ocurrencia de incendios forestales que rebasaron los registros de los años anteriores y causaron severos daños en varias regiones del país (Villers y López Blanco, 2004).

En el año 2002, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2004) señaló que se registraron en México más de 8,000 incendios forestales, 23% más que el promedio de conflagraciones ocurridas durante los últimos 31 años. Aunque, señala, no se han destruido por el fuego tantas hectáreas como ocurrió en 1998, cuando se afectaron 849,000 has por 14,445 siniestros y se perdieron 70 vidas humanas. Continúa señalando que el Distrito Federal llevó la delantera en cuanto a ocurrencia de siniestros forestales con 2,061; sin embargo Oaxaca y Chiapas fueron los estados más afectados en cuanto a superficie dañada, ya que en el primero se consumieron 37,000 ha y en el segundo 25,000. Les siguieron Chihuahua con 17,000 y Jalisco con 11,000 (Figura 4-8).

Los impactos de El Niño sobre la agricultura se han documentado (Magaña, 1999; Conde, 1999; Delgadillo, 1999) y las cifras señalan que en extensas áreas del país se tuvieron decrementos cercanos al 50% en las lluvias del verano de 1997. Si en 1991 cinco estados del país tuvieron pérdidas mayores al 40%, en 1997 fueron

más de diez los estados afectados (Conde, 1999). Los efectos se han traducido en disminuciones de la producción agrícola en el orden del 30%.

En el caso del maíz se menciona que en 1997-1998 se había perdido cerca de 3 millones 500 mil toneladas. Para el caso del frijol, se cosechó solamente la mitad de lo previsto, con pérdidas monetarias de cerca de 4 mil 600 millones de pesos. Entre otras causas, Delgadillo (1999) señala que al primer trimestre de 1998 el producto interno bruto (PIB) agrícola disminuyó en una proporción del 6%. El mismo autor estimó además que el PIB llegó a alcanzar una reducción histórica del 4.5% anualizado en 1998, cifra considerada por el Consejo Nacional Agropecuario como la caída más grande en los últimos 50 años. Termina señalando que de acuerdo a datos oficiales, en 1998 el PIB agrícola sufrió una contracción de 3.91%. Como se observa, el fenómeno de El Niño puede representar una grave amenaza climática.

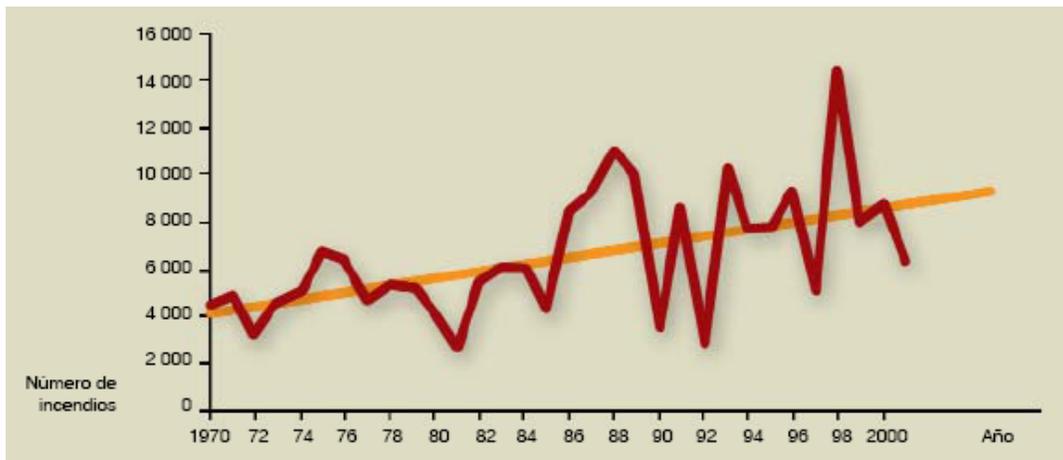


Figura 4-8. Número de incendios por temporada. Tomado de CONAFOR (2004).

Ante lo anterior, Conde *et.al.*, (2006) subrayan que “si bien no existe evidencia contundente, se ha observado que durante el fenómeno de El Niño, aumenta la posibilidad de huracanes intensos en el Pacífico, a la par de que se ha contabilizado un menor número de estos eventos en el Atlántico. También de manera general, para el caso del fenómeno de La Niña, es posible esperar más huracanes intensos en el Atlántico, con una posible disminución de éstos en el Pacífico”.

Jáuregui (1995) comparo diversos años bajo condiciones normales y bajo el fenómeno de El Niño, encontrando que en algunos casos la lluvia fue escasa durante la primavera, o se retrasó hasta el mes de julio, o la lluvia fue deficiente durante una considerable porción de la época lluviosa. Concluye que de los eventos estudiados (107), 48 fueron sequías observadas junto con el fenómeno de El Niño, mientras que las restantes ocurrieron uno o dos años antes o después del fenómeno climático, por lo que las sequías posiblemente se puedan asociar con un bajo índice de la Oscilación del Sur.

Para la región de estudio y a partir de la información meteorológica (Anexo 1) de la base de datos CLICOM (SMN, 2006) se obtuvieron los mapas de precipitación total anual para el año base (1961-1990) también llamado “normal” y para los años con presencia del fenómeno El Niño: 1982, 1983, 1988 y 1989 (Figura 4-9). Se obtuvieron también los comparativos para la precipitación en los meses de primavera (marzo, abril, mayo); verano (junio, julio y agosto); otoño (septiembre, octubre y noviembre) así como para los meses de invierno (diciembre, enero y febrero). Se presentan en las Figuras 4-10, 4-11, 4-12 y 4-13.

Los rangos de precipitación total anual para el periodo base 1961-1990 también definido como un “año normal” varían en la cuenca desde un mínimo de 900 mm hasta máximos de cerca de los 3000 mm de lluvia al año. Los mínimos de lluvia se presentan hacia la parte baja de la cuenca y también en lo más alto de ésta, en el parteaguas que divide la Sierra Madre Oriental la vertiente que ve hacia el Golfo de México de la que ve hacia el altiplano central. Es la franja del centro de la cuenca la que presenta mayores precipitaciones debido a la presencia de dicha Sierra, que sirve como barrera física a los vientos cargados de humedad provenientes del Golfo de México, que al penetrar en la zona tienden a subir al chocar con la Sierra, condensándose y precipitando sus aguas en esta zona central de la cuenca.

Este comportamiento de las masas de aire es homogéneo en todos los mapas, se observa una franja central con mayor precipitación comparada con la periferia en la región de estudio. Aún en los años con fenómeno de El Niño está presente la tendencia, sin embargo es de resaltar las disminuciones en precipitación que se han observado bajo este fenómeno. Para el año 1982 el máximo de precipitación observado en la cuenca fue de 2400 mm, lo que significó una disminución, en promedio, de 600 mm o bien de cerca de un 20% menos de lluvia. Un comportamiento similar al anterior se observó durante el año 1983. Sin embargo, para los años 1988 y 1989, la tendencia fue similar pero con valores inferiores a los antes señalados. La franja máxima de lluvia se presentó hacia los 2000 mm pero disminuyó su superficie ocupada, observándose que en la mayor parte de la cuenca para los dos años llovió únicamente el 50% de lo esperado bajo un año "normal". El comportamiento anual de la precipitación no es más que el reflejo del comportamiento estacional. Así, para los meses de primavera (marzo, abril y mayo) en un año "normal" se espera que llueva en promedio cerca de 300 mm en la cuenca. Para el año 1982 y durante los meses de primavera se presentaron valores muy similares a los normales, pero fue durante la primavera del año 1989 que se observó una disminución en aproximadamente el 50% de lo esperado de lluvia, ya que llovió, en promedio para la cuenca, poco más de 100 mm. Para los años 1988 y 1989 los meses de primavera fueron muy similares, llovió poco más de 150 mm en promedio, lo que significó una reducción de la mitad de lluvia esperada comparada con años "normales".

Esta variabilidad observada en la precipitación de primavera bajo la influencia del fenómeno de El Niño es de particular atención en el sector agrícola, ya que es durante estos meses que se lleva a cabo la siembra de los cultivos. Este punto se describe a mayor detalle en el siguiente capítulo.

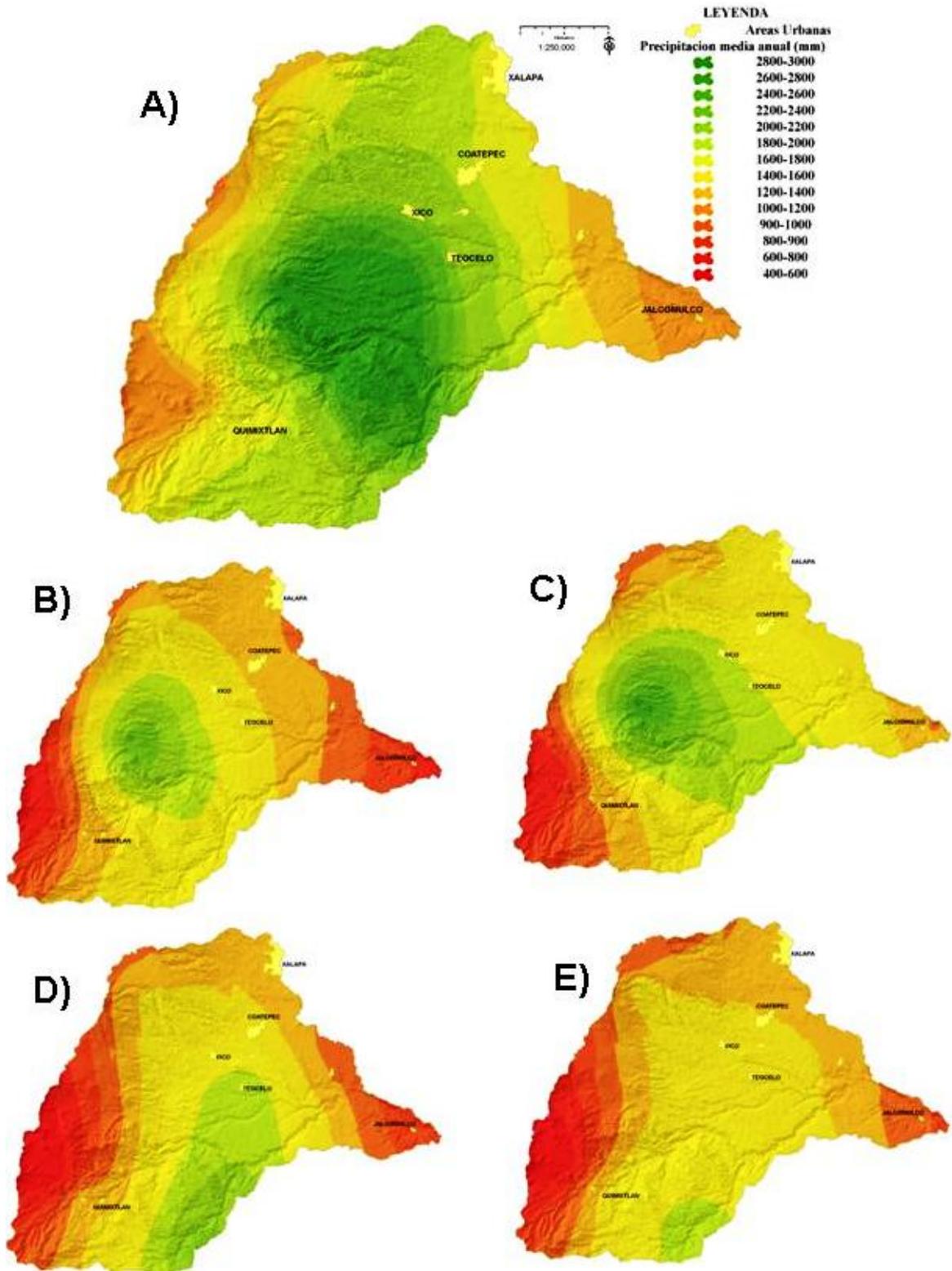


Figura 4-9. Comparativo de precipitación "normal" y con años Niño.
 A) Anual "normal", B) Anual 1982, C) Anual 1983, D) Anual 1988 y E) Anual 1989.

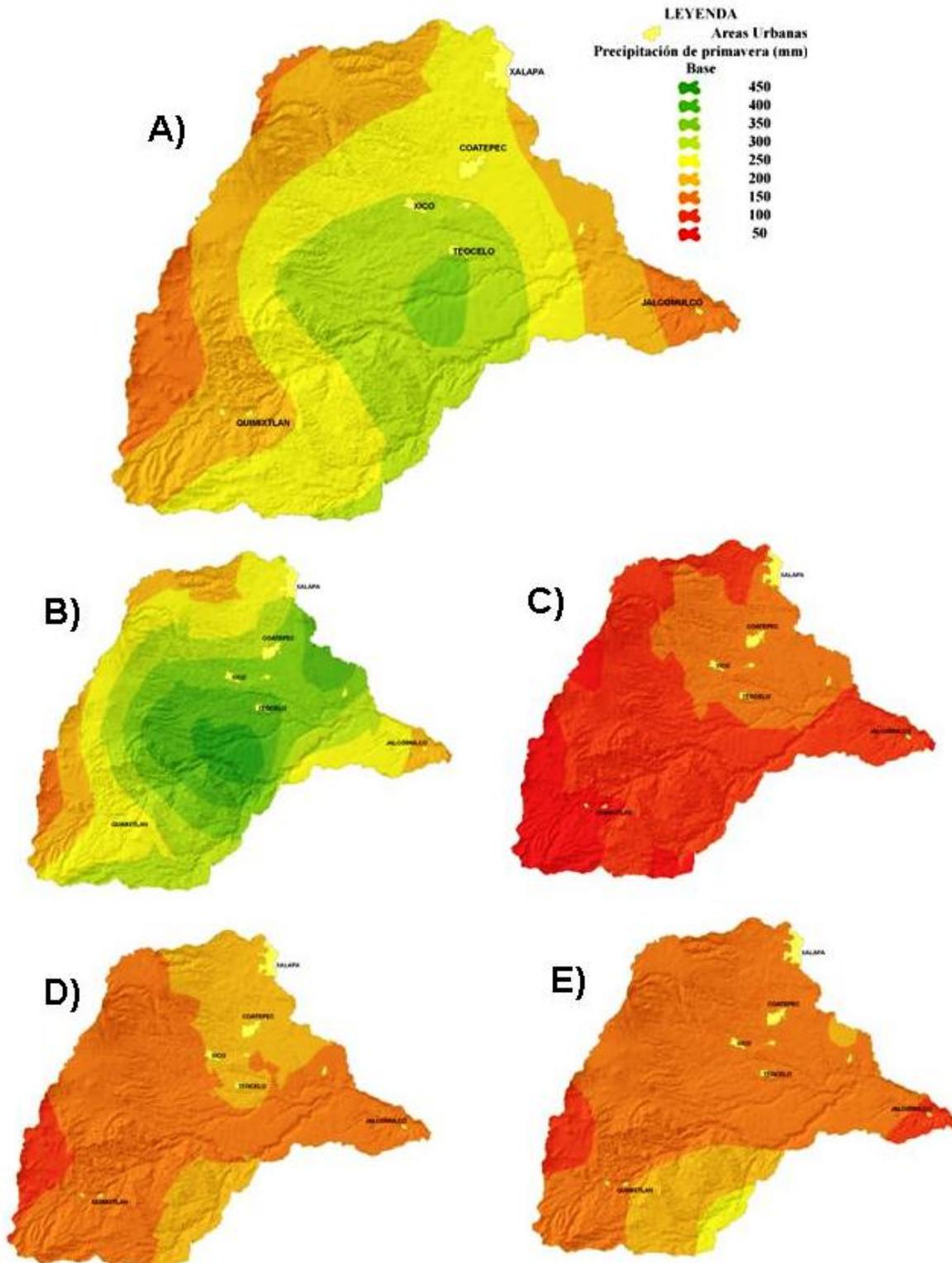


Figura 4–10. Comparativo de precipitación en primavera con años Niño.

A) Primavera "normal", B) Primavera 1982, C) Primavera 1983, D) Primavera 1988 y E) Primavera 1989.

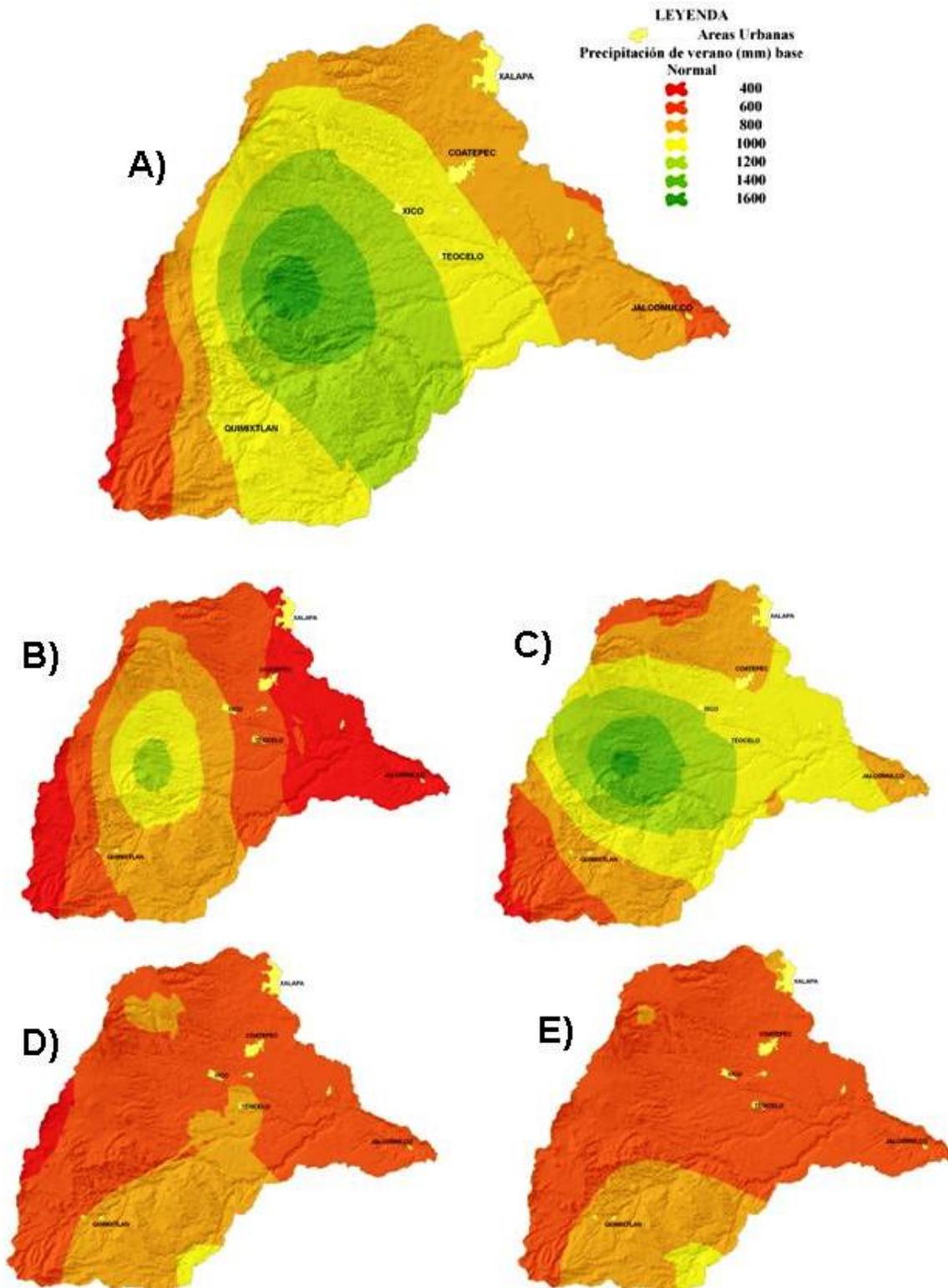


Figura 4-11. Comparativo de precipitación en verano con años Niño.
 A) Verano "normal", B) Verano 1982, C) Verano 1983, D) Verano 1988 y E) Verano 1989.

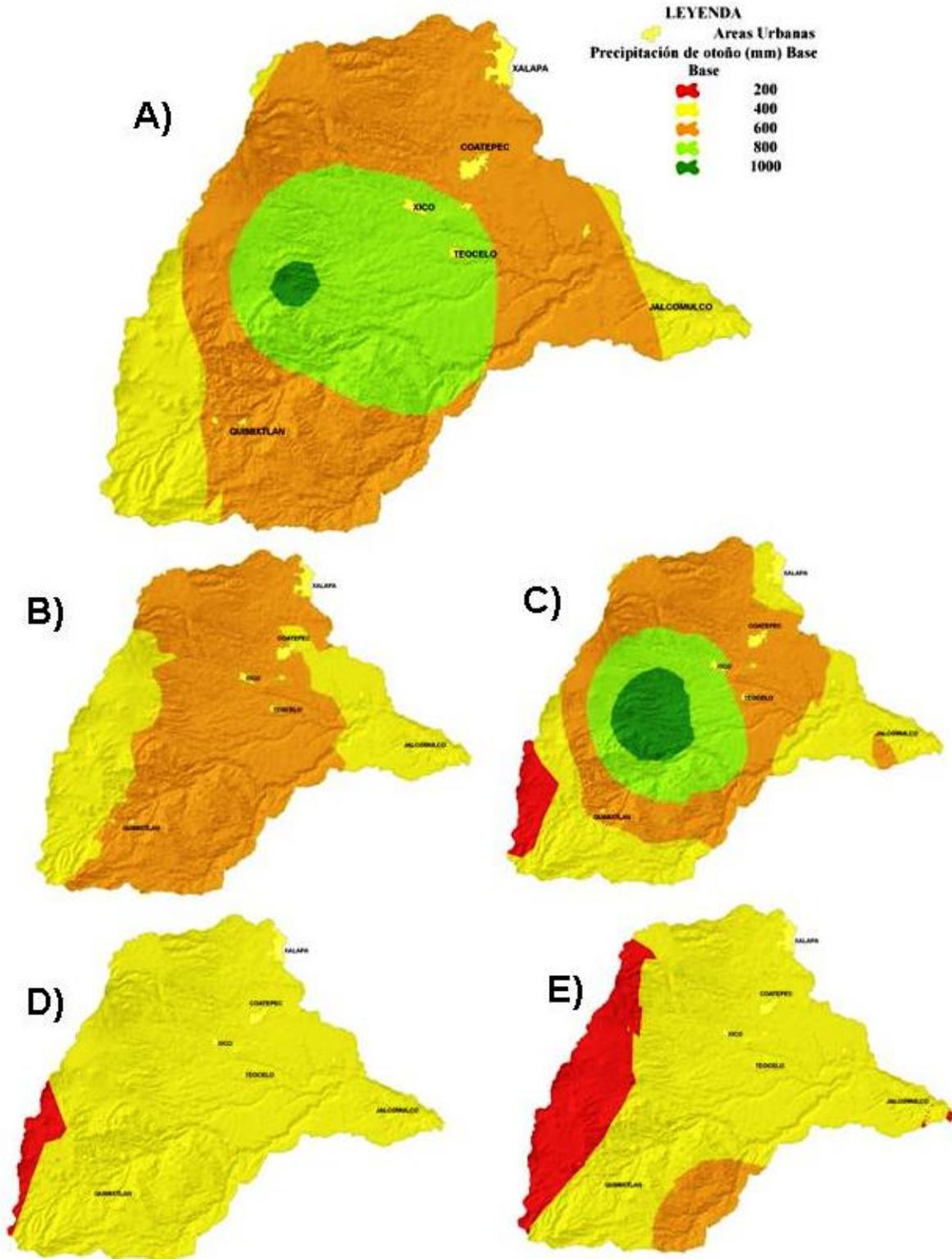


Figura 4-12. Comparativo de precipitación en otoño con años Niño.
 A) Otoño "normal", B) Otoño 1982, C) Otoño 1983, D) Otoño 1988 y E) Otoño 1989.

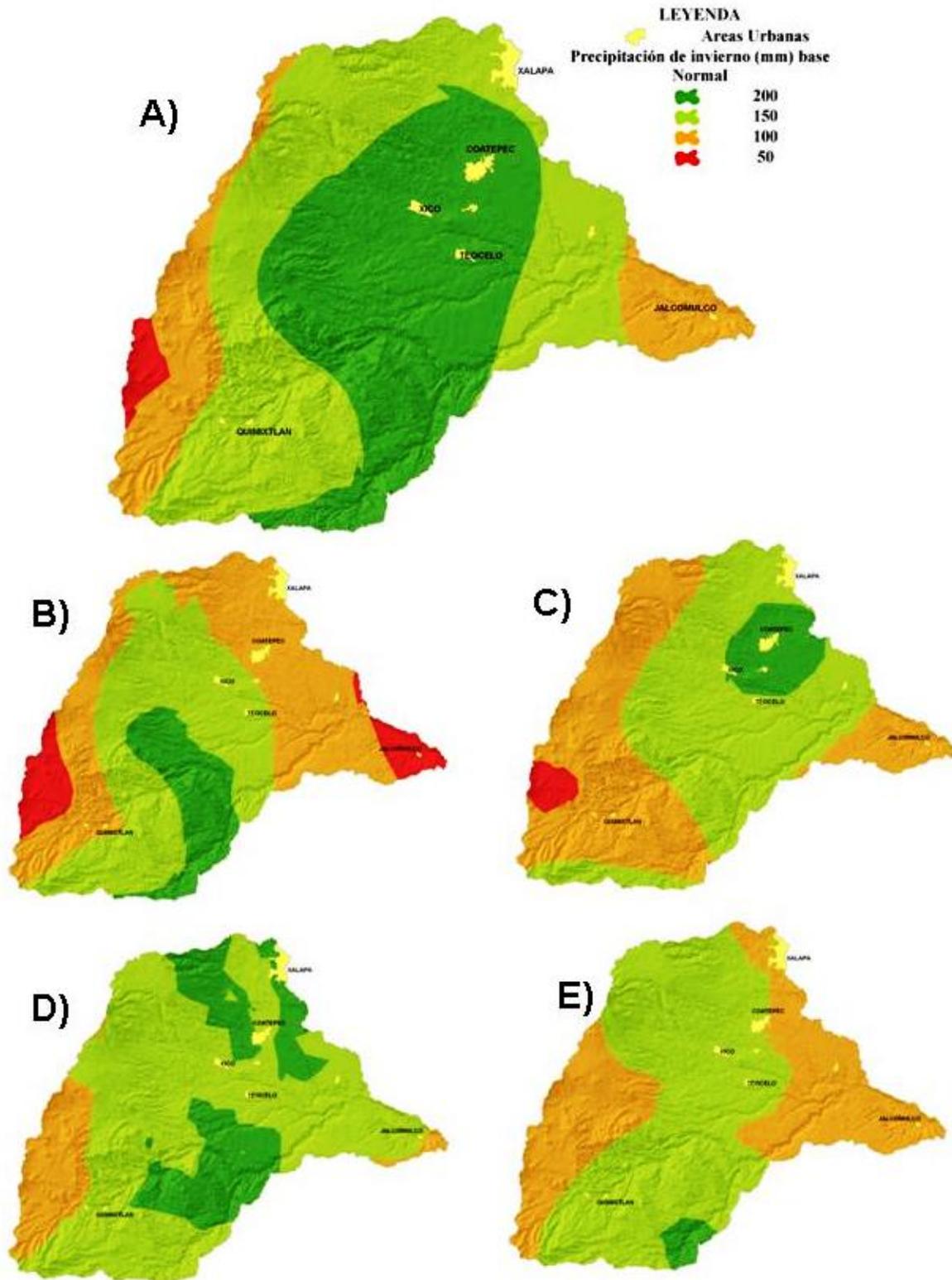


Figura 4-13. Comparativo de precipitación en invierno con años Niño.
 A) Invierno "normal", B) Invierno 1982, C) Invierno 1983, D) Invierno 1988 y E) Invierno 1989.

Durante los meses de verano se espera, bajo condiciones normales, que en la cuenca llueva en promedio 1000 mm, con máximos de 1600 mm y mínimos de 400 mm. Para el año 1982 la lluvia, en promedio, fue de 800 mm, lo que significó una reducción del 50% sobre la esperada. Para el año 1988 y 1989 representó una baja de 400 mm al precipitarse poco más de 600 mm en promedio para la cuenca, representando un 60% de la lluvia esperada bajo un año “normal”.

Estas disminuciones en lluvia en el verano se encuentran relacionadas además a eventos de lluvia torrenciales, ya que como lo señala Pereyra *et. al.*, (1994) al asociar el fenómeno El Niño con la sequía intraestival o de medio verano, encuentran que durante los eventos del Niño, este tipo de sequía desaparece o disminuye para casi todo el estado durante los meses de julio y agosto; con excepción de la región centro alta del estado que incluye Xalapa, Naolinco y Orizaba, en donde se incrementa. Además Pereyra *et.al.*, (1991) menciona que durante el periodo 1920-1985, las precipitaciones en la ciudad de Xalapa aumentaron en un 17.5% respecto a la media de los años sin Niño, y que las precipitaciones disminuyeron en un 14.4% y 11.1% en eventos Niño muy fuerte o muy débil, respectivamente.

4.2. Escenarios de cambio climático en la cuenca

Conde (2003), citando al IPCC señala que “los escenarios de cambio climático son una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo. No es un pronóstico ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro”.

Continúa señalando que “en realidad, se elaboran escenarios no sólo para el clima, sino también para algunos factores socioeconómicos, para el uso y cubierta de suelo, para las emisiones y concentraciones de CO₂, para la disponibilidad de agua, o para el nivel del mar, por ejemplo. Son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía.

Los nuevos escenarios de cambio climático se construyen a partir de escenarios de emisiones reportados en el “Reporte Especial de Escenarios de Emisiones” (SRES, por sus siglas en inglés [IPCC, 2001a]), subrayando que las emisiones de gases de efecto invernadero dependerán fundamentalmente del desarrollo socioeconómico futuro. Así, apunta que hay dos grandes familias de escenarios: los escenarios “A” que describen un mundo futuro con alto crecimiento económico; mientras que en los escenarios “B” ese crecimiento es más moderado.

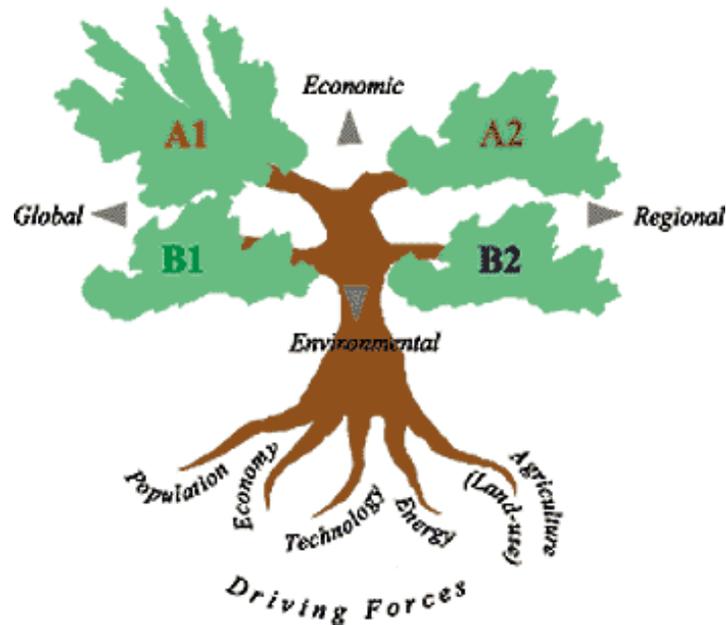


Figura 4–14. Familia de escenarios de emisiones del IPCC.

Por otra parte se tienen otros dos escenarios que hacen referencia al carácter del crecimiento económico, es decir, si habrá una tendencia a la globalización (escenarios 1) o si el desarrollo será más a nivel regional (escenarios 2). Se tiene entonces el conjunto de escenarios conocidos como A1, A2, B1 y B2.

Conde (2003) también señala que estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía) a nivel global y regional.

Para la zona de estudio se tienen diversos trabajos que han abordado ampliamente algunos escenarios de cambio climático (Palma, 2005; Conde, 2003).

Palma (2005) aplicó un método para adecuar las salidas de los modelos de circulación general (MCG) norteamericano GFDL (GFDL, 2006) y canadiense CCCma (CCCma, 2006) a escala regional, considerando la compleja topografía de la región central del estado Veracruzano.

En dicho trabajo, la autora encontró que los MCG no consideran en sus salidas la incorporación del factor altura y producen valores de salida similares para toda la región. Por lo anterior, aplicó un método para adecuar dichas salidas donde redujo la escala, método conocido como *downscaling*. Concluye que lo anterior permite generar eficientemente escenarios de cambio climático, ya que las simulaciones se apegan más al comportamiento de las variables estudiadas (precipitación y temperatura).

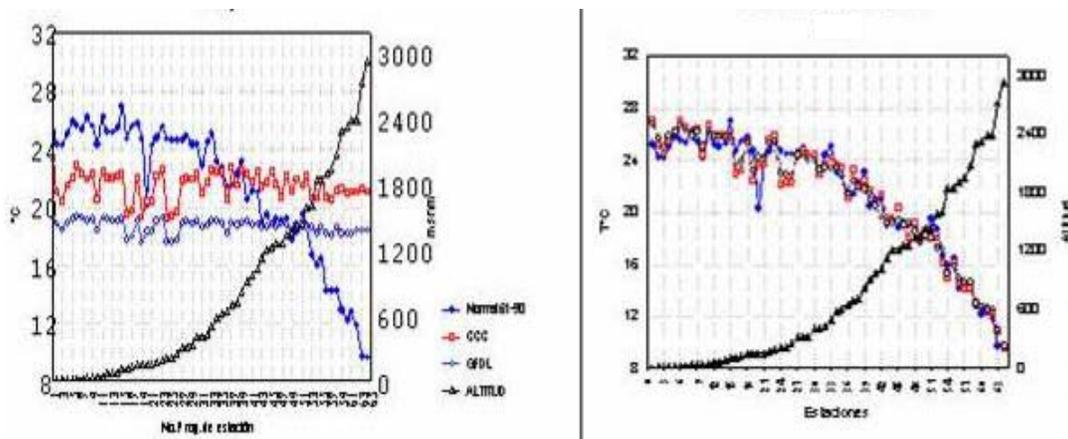


Figura 4-15. Comportamiento de la temperatura sin (izquierda) y con (derecha) reducción de escala. (Palma, 2005)

En la figura anterior se presentan, del lado izquierdo, el comportamiento de las temperaturas medias anuales de las estaciones meteorológicas estudiadas por Palma (2005) respecto a la altura sobre el nivel del mar para el periodo 1961-1990, en donde se incluyen las salidas de los modelos de cambio climático norteamericano (GFDL) y canadiense (CCC). Del lado derecho, el mismo comportamiento para las estaciones en el periodo normal 1961-1990 pero con las modificaciones realizadas de reducción de escala sobre los modelos de cambio climático.

De manera similar a lo anterior presenta los comportamientos de la precipitación total anual para la zona centro del estado de Veracruz en la Figura 4-16.

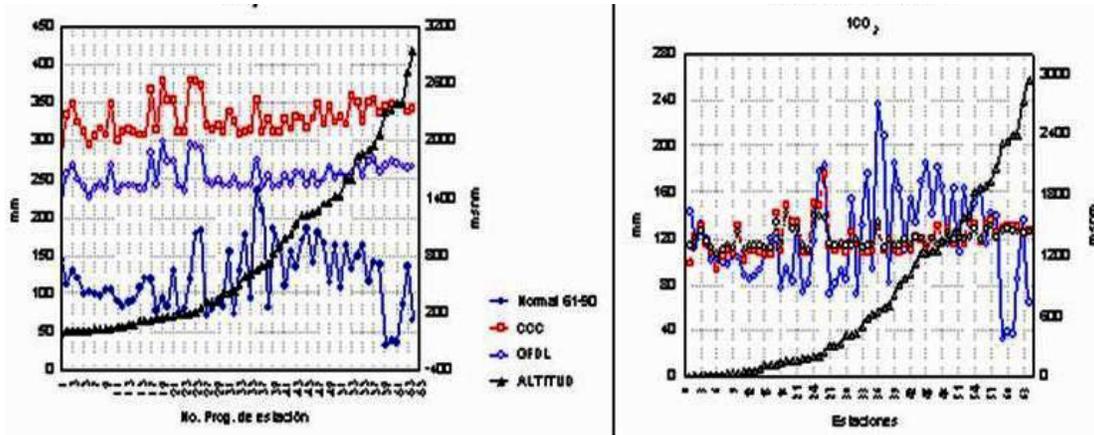


Figura 4-16. Comportamiento de la precipitación sin (izquierda) y con (derecha) reducción de escala. (Palma, 2005)

Así, del total de estaciones trabajadas por Palma (2005), se muestran en los siguientes cuadros aquellas que se encuentran dentro del área de estudio, definiéndose cinco de ellas con sus respectivas estimaciones de cambio en temperatura y precipitación:

Cuadro 4-2. Temperatura normal y con cambio climático.

Estación		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Jalcomulco	Normal	20.4	21.1	23.8	26.5	27.6	27.0	25.6	25.9	25.7	24.5	22.7	21.1	24.3
	CCC	22.1	23.1	25.7	29.1	29.9	28.8	27.7	28.2	28.2	27.5	25.3	23.1	26.5
	GFDL	23.8	25.5	28.0	30.4	30.7	30.8	29.5	29.8	29.9	28.5	26.8	25.7	28.3
Teocelo	Normal	16.1	17.2	19.3	21.3	22.1	21.5	20.8	21.0	20.7	19.6	18.5	16.9	19.6
	CCC	17.6	18.7	21.1	24.0	24.6	23.4	22.8	23.3	23.1	22.5	20.7	18.6	21.7
	GFDL	19.3	21.2	23.5	25.4	25.4	25.4	24.6	24.8	24.8	23.4	22.2	21.3	23.4
Huatusco	Normal	16.0	16.7	19.1	21.2	22.2	21.6	20.9	21.1	21.0	19.7	18.3	16.8	19.5
	CCC	17.7	18.7	20.7	23.4	24.3	23.4	23.0	23.5	23.3	22.8	20.9	18.9	21.7
	GFDL	19.4	21.1	23.2	24.9	25.1	25.5	24.7	25.0	25.0	23.8	22.4	21.5	23.4
Xalapa	Normal	15.9	16.5	19.6	21.2	22.2	21.2	20.5	20.8	20.8	19.5	18.0	16.8	19.4
	CCC	17.8	18.6	21.1	23.9	24.6	23.1	22.6	23.2	23.2	22.5	20.6	18.8	21.7
	GFDL	19.5	21.1	23.4	25.3	25.4	25.2	24.5	24.9	24.9	23.5	22.2	21.5	23.4
Las Vigas	Normal	8.7	9.9	12.4	13.8	14.6	13.3	12.5	12.5	12.2	11.1	10.1	9.3	11.7
	CCC	10.9	12.3	14.4	16.7	17.2	15.0	14.3	14.7	14.4	14.0	12.8	11.4	14.0
	GFDL	12.6	14.7	16.8	18.1	18.0	17.1	16.1	16.4	16.1	15.0	14.4	14.2	15.8

Nota: Normal se refiere al promedio de los años 1961-1990, CCC se refiere a la predicción de acuerdo al modelo canadiense de cambio climático y GFDL al modelo norteamericano de cambio climático. Fuente: Palma, 2005.

Cuadro 4-3. Precipitación normal y con cambio climático.

Estación		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Jalcomulco	Normal	17.3	22.2	21.6	28.3	69.1	215.7	220.4	167.2	221.7	77.4	35.0	19.9	1115.9
	CCC	0.0	0.0	0.0	77.5	86.0	134.1	166.6	169.1	125.0	125.5	42.4	0.0	924.0
	GFDL	42.2	14.4	34.7	27.3	76.0	288.5	252.5	260.6	285.4	88.1	43.9	29.1	1442.7
Teocelo	Normal	58.8	64.9	58.6	76.4	146.9	354.5	307.4	262.9	358.1	182.7	104.1	69.6	2044.8
	CCC	40.9	39.1	62.6	127.6	167.0	278.2	239.9	270.9	247.5	222.3	106.2	41.7	1844.1
	GFDL	91.6	58.2	99.5	75.5	156.6	434.5	332.8	365.4	411.3	183.4	111.4	75.9	2396.0
Huatusco	Normal	49.0	49.1	48.1	76.9	128.2	386.7	361.7	289.7	363.8	154.6	76.5	47.7	2031.8
	CCC	29.8	26.5	27.0	129.0	145.5	308.6	302.1	280.0	251.6	197.5	82.1	25.0	1804.5
	GFDL	75.0	40.8	61.9	78.4	137.4	471.1	395.4	374.9	413.5	160.1	85.4	55.3	2349.1
Xalapa	Normal	44.7	45.7	42.7	52.2	95.4	279.7	201.9	174.3	243.2	103.8	61.5	50.2	1395.1
	CCC	17.0	18.2	11.2	103.1	121.5	172.5	135.5	170.6	125.5	139.3	63.7	24.3	1102.4
	GFDL	67.7	35.9	51.5	51.0	109.1	323.9	227.9	264.8	291.5	100.9	68.9	60.0	1653.1
Las Vigas	Normal	26.4	28.8	20.7	34.1	52.2	146.6	148.4	128.8	232.1	110.6	68.3	39.5	1036.0
	CCC	0.0	0.0	0.0	88.0	72.4	62.5	86.9	130.7	114.7	153.5	70.2	9.6	788.4
	GFDL	56.3	21.9	35.9	34.1	63.5	219.8	188.2	229.8	289.6	118.9	78.7	49.1	1385.8

Nota: Normal se refiere al promedio de los años 1961-1990, CCC se refiere a la predicción de acuerdo al modelo canadiense de cambio climático y GFDL al modelo norteamericano de cambio climático. Fuente: Palma, 2005.

Una restricción que se encuentra en los MCG es que las salidas de los modelos no acoplados (Océano-Tierra) presentan resolución muy grande, por lo que las técnicas de *downscaling* permiten corregir y mejorar las resoluciones.

Por su parte, Conde (2003) citada por Palma (2005), aplicó los modelos de circulación general (MCG) conocidos como HadCM2 y ECHAM4 para el estado de Veracruz (Cuadro 4-4) mostrando cambios en la precipitación del verano que van desde -10% hasta +6%. Por su parte para la temperatura encontró incrementos que van de los 1.5°C hasta los 2.8°C.

Cuadro 4-4. Cambios al 2050 en precipitación y temperatura para la región centro del estado.

Modelo de Circulación General		Cambios en la precipitación de verano (%)	Cambios en la temperatura media del verano (°C)
HadCM2	Escenario sensibilidad media	-6 a -8	1.9 a 2.0
	Escenario sensibilidad alta	-6 a -10	2.7 a 2.8
ECHAM4	Escenario sensibilidad media	4 a 6	1.5 a 1.6

Nota: El signo negativo indica decremento. Fuente: Modificado de Conde (2006).

Dicha autora también analizó las salidas de catorce modelos MCG contenidos en el programa de cómputo Magicc/Scengen versión 2.4 y encontró que los modelos conocidos como CCC, GFDL-R15, ECHAM4 y HadCM2 son los más adecuados para generar escenarios de cambio climático para México. En sus resultados

menciona que podría haber un incremento en el riesgo climático del territorio mexicano debido a que se proyectan cambios en la temperatura y precipitación similares o mayores a los registrados en eventos extremos anteriores; el sector agrícola y los recursos hídricos por ejemplo, se pondrían en riesgo al enfrentar climas más secos y calientes especialmente en el verano, según lo proyectado por estos modelos (Palma, 2005). Para el presente trabajo se obtuvieron las salidas regionales actualizadas de los MCG acoplados conocidos como ECHAM (ECHAM, 2006), GFDL (GFDL, 2006) y HADLEY (HADLEY, 2006) para los años 2020 y 2050 y para los escenarios A2 y B2 tal como se muestra en el Cuadro 4-5.

Cuadro 4-5. Modelos de circulación y escenarios utilizados en la zona de estudio.

Modelo de Circulación General (GCM)	Escenario Socioeconómico A2 al año:		Escenario Socioeconómico B2 al año:
ECHAM	2020	2050	2050
HADLEY	2020	2050	2050
GFDL	2020	2050	2050

Es importante señalar que las diferencias entre los escenarios A2 y B2 no son significativas para el año 2020 (Figura 4-17), por lo que, en el cuadro anterior, sólo se presentan y aplicaron los resultados para los escenarios A2 para ese año. Los escenarios A2 y B2 que se aplicaron, fueron aquellos seleccionados por los economistas del proyecto AIACC (Gay, 2006) y que se definieron como los futuros más plausibles para México.

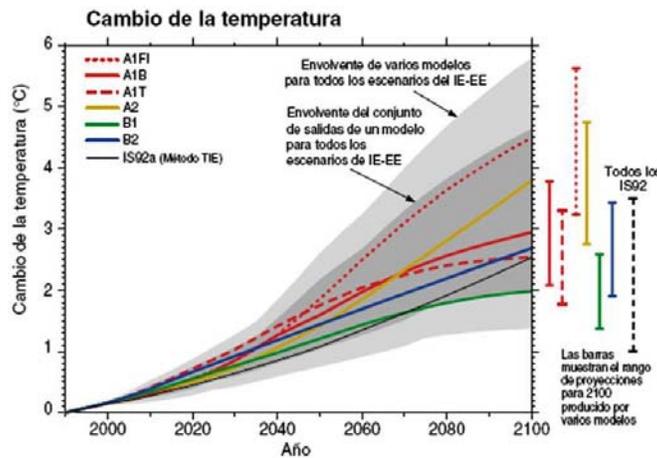


Figura 4-17. Escenarios globales de cambios en temperatura. (IPCC, 2001a)

Las razones de cambio para temperatura y precipitación de acuerdo a los escenarios seleccionados (GFDL, HADLEY y ECHAM), se obtuvieron a partir del software MAGICC/SCENGEN (2006). Dicho paquete permite investigar escenarios de cambio climático tanto para el planeta o para una región de interés en particular, mediante cálculos a nivel global aplicando los modelos que sugiere el IPCC. La forma en la que se diseñan las salidas globales o regionales de cambio climático es: 1) seleccionando y/o especificando las emisiones de gases de efecto invernadero, 2) definiendo los valores y parámetros para el grupo de modelos climáticos, que hacen referencia a incertidumbres relacionadas al ciclo del carbono, la magnitud de los aerosoles y cambios por la actividad humana, 3) seleccionado los modelos de circulación general (MCG's) a ser aplicados y 4) especificando para que periodo en el futuro se desean las salidas.

Resultado de lo anterior, se obtuvo para la zona de estudio diferentes razones de cambio tanto para precipitación como para temperatura (Cuadro 4-6). Dichos resultados no difieren significativamente a los utilizados por Conde (2003) y por Palma (2005).

Cuadro 4-6. Razón de cambio para temperatura y precipitación por modelo para la zona de estudio.

	ECHAM		HADLEY		GFDL	
	Temperatura °C	Precipitación %	Temperatura °C	Precipitación %	Temperatura °C	Precipitación %
A2 al 2020	3	-5	-1	-10	2	5
A2 al 2050	2.2	de -4 a -5	2.2	de -7 a -8	1.4	de 7 a 8
B2 al 2050	6	de -5 a -10	6	-5	4	10

Nota: El signo negativo indica decremento. Fuente: Elaboración propia a partir de MAGICC/SCENGEN, 2006.

Los escenarios para el año 2020 no son homogéneos respecto al posible comportamiento de la temperatura, tanto el modelo Echam como el GFDL señalan incrementos de 3 y 2°C respectivamente, mientras que el Hadley apunta una disminución de 1°C. Sin embargo, los escenarios al 2050 (A2 y B2) coinciden en signos positivos de la temperatura, ya que van desde los 1.4°C hasta los 6°C de incremento.

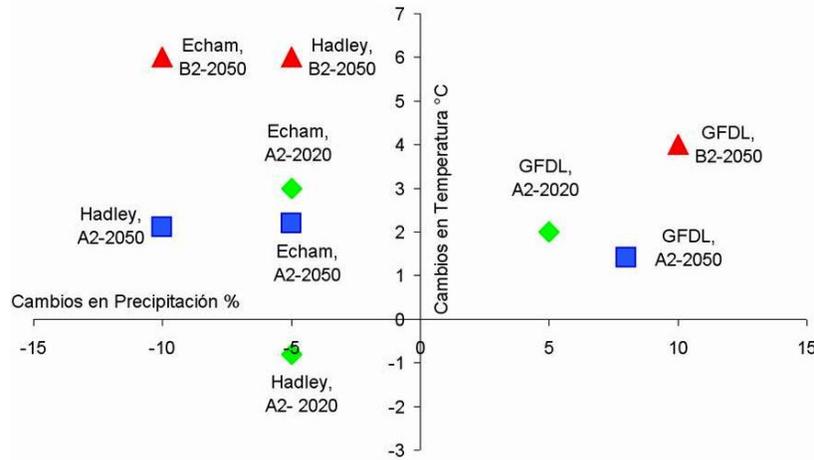


Figura 4–18. Cambios en Temperatura y Precipitación por modelo.

El comportamiento de la precipitación ante estos escenarios es también uniforme en los modelos Echam y Hadley al apuntar cambios negativos en la cuenca para el 2020 y 2050 que van del -4% hasta el -10% de precipitación. El modelo GFDL es el único que señala incrementos en las precipitaciones para la zona, ya que van del 5% más para el 2020 y de 7% al 10% para el 2050.

Estos escenarios de cambio climático se utilizarán para evaluar los posibles impactos del cambio climático en la región de estudio. También se analizarán los posibles impactos de El Niño en la región, considerando a este evento como fuente de variabilidad climática. Las condiciones climáticas extremas que se presentan durante fuertes eventos de El Niño pueden ser indicativas de las posibles respuestas de los ecosistemas en la cuenca.

CAPÍTULO 5. LOS SERVICIOS AMBIENTALES EN LA CUENCA

5.1 Introducción.

La evaluación de los servicios ambientales en cuencas hidrográficas se refieren especialmente a los beneficios obtenidos por el control y regulación hídrica dentro de estas. Myers (1997) señala que los bosques, por su particular estructura y abundante follaje, experimentan un “efecto esponja” al absorber la humedad proveniente de las precipitaciones y liberarla gradualmente a las corrientes hídricas. El mismo autor señala que un bosque cerrado puede interceptar el 35% de la precipitación, mientras que un bosque abierto menos del 20% y una plantación forestal sólo el 12%. La mayor parte del agua, que es interceptada por las hojas y el follaje forestal, disminuye su velocidad y reduce su tamaño, lo que hace posible que ésta caiga con menor fuerza y se evite así el desprendimiento del suelo, permitiendo una mejor percolación o una esorrentía gradual hacia las corrientes de agua.

Por otra parte, los servicios ambientales en cuencas hidrográficas además del control y regulación hídrica también comprenden de acuerdo con Pattanayak (2004): 1) el control de la erosión debido a la gruesa capa de materia orgánica en el piso forestal y por las raíces que desarrollan las especies forestales; 2) mejoramiento de la calidad de los suelos por la capa que los protege de la radiación solar y la fuerza de la precipitación; 3) la estabilización de la distribución de los flujos hídricos, al controlar por medio de la evapotranspiración las zonas forestadas y 4) control de sedimentos en corrientes ya que al reducir la erosión de los suelos, disminuye la sedimentación y al existir vegetación, se reduce la fuerza de las escorrentías.

Con objeto de primeramente identificar los principales servicios ambientales en la cuenca hidrográfica de estudio y de acuerdo con De Groot, *et.al.*, (2002) el primer paso hacia la identificación de los bienes y servicios ambientales involucra la traducción de la complejidad ecológica (estructuras y procesos) a un número limitado de funciones de los ecosistemas. Estas funciones son las que proveerán de bienes y servicios que el hombre necesita para vivir y que además se pueden valorar.

Como cada función es el resultado de procesos naturales de todo el subsistema natural del cual son parte, fue necesario separar los principales tipos de vegetación en la cuenca para llevar a cabo la identificación de estas funciones ecológicas que serán las proveedoras de bienes y servicios ambientales.

De tal manera que las principales funciones ecológicas estudiadas fueron 1) la regulación climática, evaluándose la capacidad de regular el clima a partir de la vegetación existente, considerando los procesos biológicos que la vegetación realiza y los cambios de uso del suelo observado; 2) la función de protección hídrica, evaluándose la capacidad que tiene la cuenca y la vegetación presente en cuanto a regular el drenaje; 3) la función de regulación hídrica, evaluándose a partir de los parámetros de precipitación, evaporación, escurrimiento e infiltración;

4) la función de almacenamiento o la función de infiltración y recarga hídrica, evaluada a partir de balances hídricos; 5) la función de retención del suelo, evaluándose a partir de las pérdidas de éste y 6) la función de producción, en este caso particular la de producción de café y maíz.

Debido a que los ecosistemas proveen refugio y hábitat a plantas y animales, en consecuencia contribuyen a la conservación de la diversidad biológica y genética, por lo que este servicio ambiental fue abordado de manera muy particular. Como se sabe, las especies que habitan los bosques, las selvas y las especies cultivadas, tienen hábitos de vida definidos mayormente por criterios físicos, entre ellos los climáticos (Ortiz Solorio, 1987).

Por ejemplo, en el caso del bosque mesófilo de montaña, Challenger (1998, pág. 462) señala que “los bosques mesófilos de Veracruz que ocupan alturas intermedias (1,400 – 1,600 msnm) exhiben gran diversidad en la vegetación del sotobosque pero poca entre las epífitas. Por el contrario, en el bosque mesófilo del mismo Estado pero ubicado a mayor altura (2,050 msnm) se observa menor diversidad y abundancia de plantas en el sotobosque, pero mayor diversidad de epífitas”. Lo anterior se debe, según el mismo autor, más que nada a un efecto de las diferencias en las medias anuales de temperatura y precipitación pluvial. De manera similar, los tipos climáticos de la clasificación de Köppen modificado por García (2004) en los que se desarrolla el bosque mesófilo de montaña se encuentran en el rango de alta humedad; el más característico es el Cf, pero también los climas Cw, Af, Am y Aw sustentan este tipo de vegetación (Rzedowski, 1978, pág. 317).

5.2 Los Servicios Ambientales.

Se refiere a la capacidad de los ecosistemas naturales y seminaturales de regular los procesos ecológicos esenciales y los sistemas que soportan la vida a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos (De Groot, *et.al.*, 2002). Algunos de los procesos más importantes de regulación de los ecosistemas incluyen a la

transformación de energía en biomasa, principalmente de radiación solar, almacenaje y transferencia de minerales y energía en productividad secundaria, los ciclos biogeoquímicos, mineralización de la materia orgánica en suelos y sedimentos, así como la regulación del sistema climático. Todos los procesos son regulados por la interrelación de los factores abióticos con los organismos vivos a través de la evolución y mecanismos de control. Es importante señalar que debido a los beneficios indirectos de estas funciones de regulación, éstos no son reconocidos hasta que son degradados o perdidos.

Los servicios ambientales de regulación que aquí son abordados son la regulación climática, la regulación y protección hídrica, el almacenamiento y provisión de agua y por último la retención del suelo.

5.2.1 Regulación climática

Los servicios ambientales de regulación climática se refieren, entre otros, a la influencia que tiene la cobertura vegetal, el uso del suelo y los procesos biológicos de mantener y regular los elementos del tiempo y el clima, como la temperatura y la precipitación (NRC, 2005).

5.2.1.1 Clima y vegetación en la cuenca

Los grupos climáticos ya han sido descritos anteriormente, sin embargo cabe resaltar que algunos ecosistemas asociados a éstos, como el bosque mesófilo de montaña, encuentran bien definidos sus rangos de crecimiento de acuerdo a tipos climáticos específicos, por lo que se vuelven ecosistemas más sensibles a cambios de uso de suelo (Challenger, 1998).

Para la cuenca en estudio, se tiene de manera general y a partir del mapa de uso de suelo y vegetación (SEMARNAT-UNAM, 2001) y del mapa climático (CONABIO, 1988) las siguientes relaciones clima-vegetación (Cuadro 5-1):

Cuadro 5-1. Superficie ocupada en Hectáreas por tipo de uso del suelo y climas.

USO DE SUELO	TIPO CLIMÁTICO y FORMULA					
	Frío	Semifrío subhúmedo	Templado húmedo	Semicálido húmedo	Cálido subhúmedo	Total
	E(T)H C(E)(m)	C(E)(w2)(w)	C(m) C(fm)	(A)C(m) (A)C(fm)	Aw2(w) Aw1(w)	
Agricultura de riego				0.6	794.8	795.4
Agricultura de temporal	443.9	4099.3	16742.2	14275.6	3043.6	38604.5
Bosque de encino				66.8	1119.1	1185.9
Bosque de oyamel	307.9	1181.5	565.6			2055.0
Bosque de pino	1539.4	7284.0	16505.0	690.6	2.7	26021.7
Bosque mesófilo de montaña			8629.2	12602.2		21231.4
Pastizal	284.7	2580.8	7551.0	12305.2	2159.3	24881.0
Pradera de alta montaña	2.2	142.6				144.8
Selva alta y mediana subp.				1851.1		1851.1
Selva baja cad.y subcad.					1463.2	1463.2
Selva mediana cad. y surcad.			18.9	22913.2	554.9	23487.0
Uso urbano			59.0	1450.2	31.2	1540.4
Total	2578.1	15288.1	50070.9	66155.7	9168.7	143,261

Fuente: Elaboración propia a partir de SEMARNAT-UNAM (2001) y CONABIO (1988)

A partir del cuadro anterior se observa que en la cuenca se llevan a cabo actividades agrícolas y ganaderas en todos los tipos climáticos, mayormente en los climas de tipo templado y semicálido, en menor grado en los grupos fríos y semifríos.

En lo que se refiere a los bosques, éstos presentan topes altitudinales y en consecuencia climáticos, como el bosque de encino, el bosque de oyamel y el mesófilo de montaña. Caso particular es el bosque de pino que se presenta hacia todos los tipos climáticos presentes en la cuenca.

5.2.1.2 Cambio de uso de suelo

Manson (2005) señala que el estado de Veracruz presenta la segunda tasa más alta de deforestación en el país, al perder el 35% de sus bosques entre el año 1984 y el año 2000, lo que ha significado cerca de 47,000 hectáreas por año. Cifras muy similares son presentadas por Gallina y Hernández (2005) y el Gobierno del Estado (2005) al señalar una pérdida de 36%.

Los principales factores del cambio de uso de suelo en México son muy complejos (Masera, 1996) ya que “incluyen aspectos económicos (por ejemplo, la ganancia esperada por usos alternativos del suelo), demográficos (como la presión por tierra para agricultura), políticos (las normas que regulan la tenencia de la tierra) y técnicos (como la aptitud de los terrenos para diferentes usos)”.

En el Cuadro 5-2 se presentan los cambios de uso del suelo para el periodo 1980 – 2001 elaborados a partir de INEGI (1980) y de SEMARNAT-UNAM (2001) para la zona de estudio. Sin embargo, se observaron algunas inconsistencias entre las coberturas como lo señala Velázquez (2002), ya que existen categorías denominadas «falsos cambios» que se pueden deber a dos razones: conversiones entre categorías no factibles (cambio de bosques a selvas, por ejemplo) que son producto de las inconsistencias entre las bases de datos, o bien al uso de criterios diferentes para tipificar a cada una de las categorías (por ejemplo un bosque abierto puede ser categorizado como pastizal natural, dependiendo del intérprete). Como lo señala Velázquez (2002), para estimar la tasa de cambio se aplicó la fórmula siguiente:

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

donde δ es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100),

S_1 superficie en la fecha 1,

S_2 superficie en la fecha 2,

n es el número de años entre las dos fechas.

En la columna “tasa de cambio” se señalan con valores negativos y en negritas, las formaciones vegetales que pierden superficie ocupada, mientras que con valores positivos las que ganan.

Cuadro 5-2. Cambio de uso de suelo (%) para el periodo 1980-2001.

		Uso de suelo 2001														TASA CAMBIO
		Agricultura		Bosque de					Pastizal		Pradera Alta Montaña	Selva			Zonas urbanas	
		Riego	Temporal	Pino	Pino Encino	Encino	Oyamel	Mesófilo	Cultivado	Inducido		Alta	Mediana	Baja		
Uso del suelo 1980	Agricultura de Temporal	1.1	40.9	2.9	9.2	0.1	0.2	12.6	7.7	2.0		0.04	20.5	1.3	1.4	-0.37
	Bosque de Pino		20.4	29.6	37.9		11.1	0.2	0.5	0.2						-0.13
	Bosque de Pino-Encino		5.5	38.8			0.8		33.1	20.2	1.6					3.14
	Bosque Mesófilo de Montana		13.1	5.2	19.8		1.9	34.5	8.2	2.4		3.1	11.5		0.4	-0.16
	Pastizal Cultivado		10.8	2.4	1.2			19.7	52.8			1.7	11.0		0.4	0.26
	Pastizal Inducido		31.3	7.0	16.1	1.3		2.4	2.1	23.3		2.9	13.6			-0.25
	Pradera de Alta Montana			44.5			30.5				25.0					-0.54
	Selva baja	0.7	15.4			9.6		0.5	24.6			5.0	37.9	5.7	0.6	-0.84
	Zonas Urbanas								0.3						99.7	3.49
Subtotal (Has)	795	38605	9300	16790	1186	2055	21231	20664	4217	156	1851	23487	1463	1540		
TOTAL DE HECTÁREAS															143,340	

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI 1980 y SEMARNAT-UNAM 2001.

Agricultura.

Para el año 1980 se definieron un poco más de 65 000 hectáreas destinadas a este uso en la zona de estudio, para el año 2001 la cifra disminuyó a un poco más de 38,000. Así, la tasa de cambio significó una disminución del 37% para dicho periodo. Se mantuvo la agricultura de temporal en un 41% mientras que los principales cambios de uso de suelo (disminuciones) se presentaron hacia selvas medianas (20%), hacia bosques (25%) y pastizales (9%). Lo anterior debido quizá al abandono de terrenos agrícolas, ampliación de terrenos ganaderos y esfuerzos de reforestación.

Bosques.

Para el año 1980 se definieron un poco más de 42 000 hectáreas destinadas a este uso en la zona de estudio, para el año 2000 la cifra aumentó a un poco más de 50 mil. La tasa de cambio significó una reducción de 0.13% anual para el bosque de pino mientras que un -0.16% para el bosque mesófilo, y finalmente un incremento en 3.14% para el bosque de pino-encino en dicho periodo. Para los dos primeros se puede entender una tasa de cambio en disminución del 29% aproximadamente y para el bosque de pino encino se tiene un caso particular ya que esta clase no se tenía para el primer año (1980) por lo que la tasa sugiere un aumento considerable.

Para el caso del bosque de pino, se mantuvo dicho uso en un 30% mientras que los principales cambios de uso de suelo se presentaron hacia bosques de pino encino (38%), hacia agricultura de temporal (20%) y bosque de oyamel (11%).

Para el caso del bosque de pino encino, se mantuvo dicho uso en un 39% mientras que los principales cambios de uso de suelo se presentaron hacia pastizales (53%) y hacia agricultura de temporal (6%).

Por último, para el bosque mesófilo, se mantuvo dicho uso en un 35% mientras que los principales cambios (disminuciones) de uso de suelo se presentaron hacia bosques de pino encino (20%), hacia agricultura de temporal (13%) y pastizales (11%).

Pastizales.

Los pastizales cultivados fueron de los que mayor superficie ganaron al presentar una tasa positiva de 0.26%, proviniendo dichos cambios del bosque mesófilo (20%), selvas (13%) y agricultura de temporal (11%).

Selvas

Las selvas fueron las que mayor superficie perdieron en el periodo comprendido entre el año 1980 y al año 2000 al presentar una tasa de cambio de -84%. El principal cambio fue hacia los pastizales cultivados (24.6%) y agricultura de temporal (15%).

Los cambios de uso de suelo en la región han estado presentes por muchos años, sin duda la presión social sobre los recursos naturales ha propiciado que las actividades humanas hayan aumentado a costa de la disminución de los ecosistemas primarios.

De continuar con la tendencia observada, las coberturas vegetales que continuarán perdiendo superficie serán las selvas (a mayor velocidad), el bosque

mesófilo y el bosque de pino a velocidad media y la agricultura de temporal a niveles menores de cambio. Por otro lado, las coberturas que seguirán ganando superficie, de acuerdo a las tendencias evaluadas, podrán ser los pastizales y los bosques de pino-encino.

Lo anterior sugiere que la capacidad de los ecosistemas de amortiguar cambios en los sistemas climáticos se podrá ver afectada. Al remover vegetación con mayor profundidad de raíces y mayor biomasa aérea se pierde la protección natural de los suelos que ésta provee, disminuyendo así la capacidad natural del ecosistema de proveer dicho servicio ambiental.

A mayor biomasa vegetal en los ecosistemas mayor absorción de energía proveniente del sol, debido a las necesidades de cada planta en el ecosistema. En consecuencia, esta energía es liberada a la atmósfera de manera gradual por los procesos naturales de fotosíntesis y respiración de las plantas, regulando de manera natural los ciclos de energía en el ecosistema. Este fenómeno, conocido como albedo, será entonces *menor* en coberturas vegetales con mayor biomasa y será *mayor* en coberturas de menor biomasa.

Al haber un cambio de estas coberturas hacia otras con menor porte (por ejemplo, de bosque mesófilo a pastizal), la energía absorbida es menor y en consecuencia se tendría una mayor energía en el ambiente, fenómeno conocido como “efecto Charney” (Levy, 2004)

5.2.2 Regulación y protección hidrológica.

Estos se refieren a la influencia que tiene la estructura de los ecosistemas para amortiguar algún cambio en su ambiente, como por ejemplo la protección hacia tormentas e inundaciones (NRC, 2005). En este sentido, la protección que ejercen los ecosistemas hacia estos fenómenos fue evaluada a partir de criterios hidrológicos en la cuenca descritos a continuación.

5.2.2.1 Indicadores hidrológicos de la cuenca

Como indicadores hidrológicos en la cuenca se definieron, primero, la clasificación de cauces según Strahler y Shreve con objeto de identificar todos los cauces capaces de llevar agua, sin importar si actualmente la transportan o lo hacen de manera temporal. Después se midieron algunos atributos de cada segmento de cauce como longitud, frecuencia y densidad por unidad de área. El número de cauces, su longitud y densidad permitió conocer la capacidad que presenta la cuenca de recibir, pero sobre todo, desalojar el agua de lluvia.

a) Clasificación de cauces según Strahler

El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación de corrientes de una cuenca, en este sentido se siguió la propuesta de Strahler (1952). El número de cauces y su densidad permitirá conocer la capacidad hidrológica en la cuenca en cuanto a la posibilidad de aportar mayor volumen de agua, cuenca abajo, en caso de fuertes eventos de lluvia. El anterior es un indicador relacionado a la capacidad de regulación hídrica en una cuenca. El autor señala que los cauces que no tienen afluentes son denominados de primer orden; con la unión de dos corrientes de primer orden se forma una corriente de segundo orden; con la unión de dos corrientes de segundo orden se forma una de tercer hasta completar todos los cauces y encontrar el cauce de mayor orden. En el siguiente cuadro (Cuadro 5-3) se presenta un resumen de los cauces, número de orden y total de cauces por orden para la cuenca alta del Río Los Pescados, que fue trabajada a escala 1:50,000:

Cuadro 5-3. Número de orden de cauces y total de cauces.

Numero de Orden (u)	Cauces por Orden (Nu)	Acumulativo
1	5951	
2	1191	7142
3	263	7405
4	75	7480
5	18	7498
6	5	7503
7	2	7505
8	1	7506
Total	7506	

Para la cuenca de estudio se obtuvieron de esta manera un total de 7506 cauces, que van desde el primer orden hasta el octavo orden (Figura 5-1).

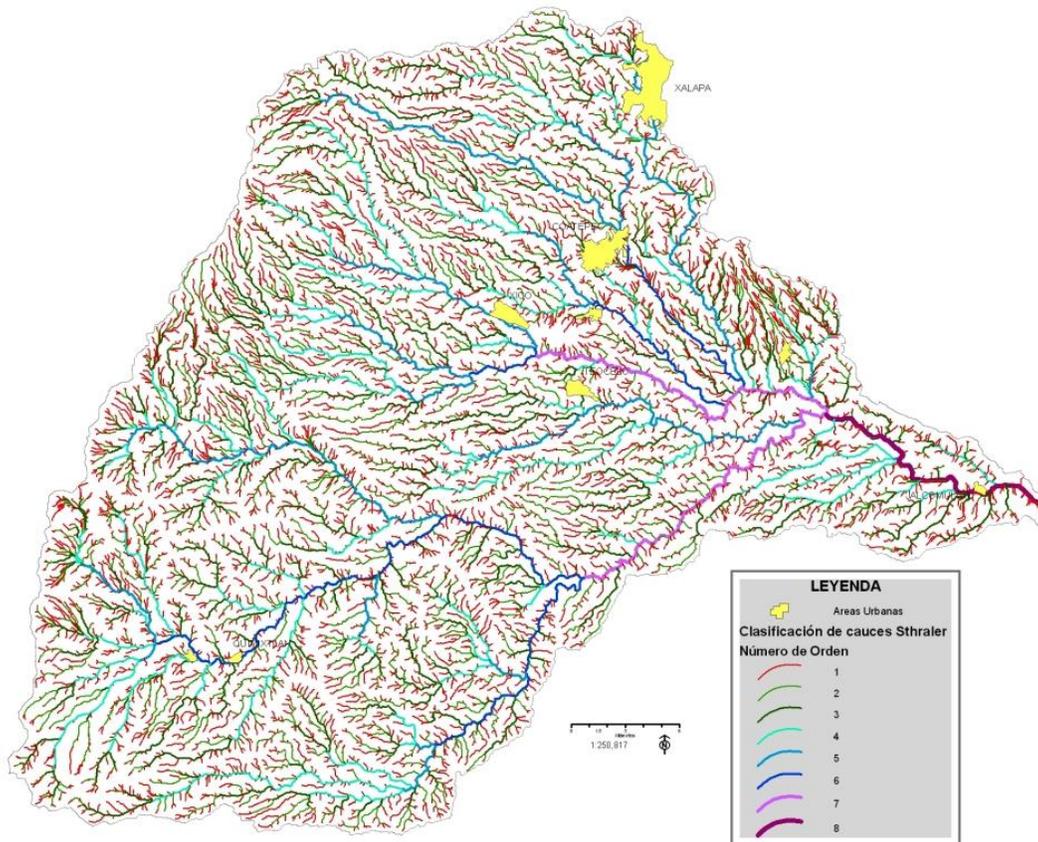


Figura 5–1. Clasificación de cauces según Strahler.

Para su descripción, iniciando desde la desembocadura del cauce principal y subiendo hacia la parte alta de la cuenca, el cauce de orden 8 es el cauce principal del Río Los Pescados, a él se unen dos cauces de séptimo orden: adentrándose hacia el centro de la cuenca se encuentra el Río Texolo y sobre su margen izquierda hacia el sur de la cuenca se encuentra el Río Los Pescados. Por lo anterior, se define que el río Los Pescados tiene dos grandes afluentes, el Texolo y Los Pescados.

Continuando por la parte sur de la cuenca, el Río Tlalapa y el Río Huitzilapan son cauces de sexto orden que al juntarse forman el Río Los Pescados. Por su parte

hacia la región central de la cuenca, el río los Pintores, el Río Paso de Limón y el Río Matlacoatl son de sexto orden que al unirse forman el afluente del Río Texolo.

El resto de los cauces son de 5to orden (18 cauces), de 4to orden (75 cauces), de 3er orden (263 cauces) de 2do orden (1191 cauces) y de primer orden (5951 cauces).

b) Relación de Confluencia

A partir de los datos anteriores se estableció la relación de confluencia de los cauces, la cual señala que, en promedio, por cada 5 cauces de 1er orden se tiene uno de 2do orden; por cada 4.5 cauces de 2do orden se tiene uno de 3er orden; por cada 3.5 cauces de 4to orden se tiene uno de 5to orden; por cada 4.2 cauces de 5to orden se tiene uno de 6to orden; por cada 2.5 cauces de 6to orden se tiene uno de 7mo orden y por cada 2 cauces de 7mo orden se tiene uno de 8vo orden.

Cuadro 5-4. Relación de confluencia de los cauces en la cuenca.

Numero de Orden (u)	Cauces por Orden (Nu)	Acumulativo	Relación de Confluencia (Rc)
1	5951		
2	1191	7142	5.0
3	263	7405	4.5
4	75	7480	3.5
5	18	7498	4.2
6	5	7503	3.6
7	2	7505	2.5
8	1	7506	2.0
Total	7506		

A partir de lo anterior se trazó la gráfica (Figura 5-2) de relación de confluencia de la cuenca alta del Río Los Pescados, en ella se observa que los cauces de 1ro, 2do y 3er orden se encuentran alineados, al igual que los de 4to, 5to y 6to orden, pero no así los de 7mo y 8vo orden, con relación a los primeros.

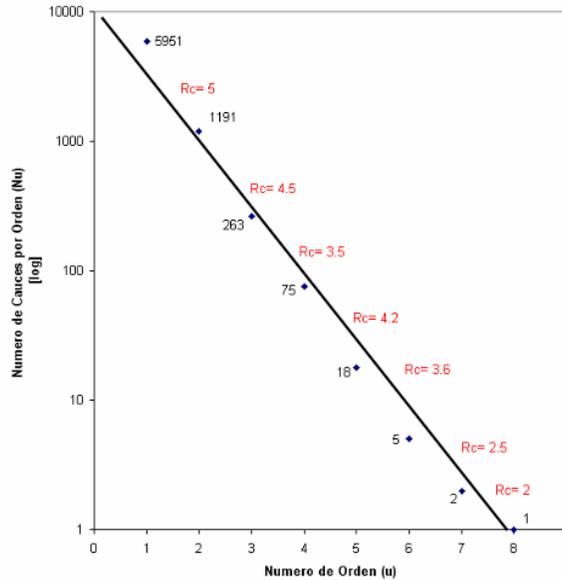


Figura 5–2. Relación de confluencia de los cauces de la cuenca.

La relación de confluencia se refiere al número de cauces de un determinado orden que confluye en el orden inmediato superior. En la figura y para la cuenca, se tienen 5 cauces de primer orden ($R_c=5$) por uno de segundo orden. .

Lo anterior sugiere que el desarrollo de la cuenca ha sido de alguna manera irregular, sobresaliendo el intervalo mayor entre los órdenes 2 y 3 de los cauces. El número de cauces es un indicador de la capacidad erosiva de la cuenca, a mayor cantidad de éstos mayor será la capacidad de transportar agua. El hecho de contar con órdenes que van del uno al ocho sugiere para la cuenca que el cauce final (el de orden ocho) transporta gran cantidad de agua y que sus afluentes más pequeños (de orden 1, 2 y 3) son capaces de aportar al cauce principal los excesos de agua en la cuenca. Esto es de particular atención al pensar que sucede bajo un evento de precipitación intensa: la lluvia, después de caer y saturar el suelo, busca su escurrimiento natural cuenca abajo, encontrándolo fácilmente (en los primeros órdenes) y escurriendo hacia las corrientes principales (los últimos órdenes).

c) Relación de longitud

La longitud media de los cauces de un cierto orden se obtiene al promediar todas las longitudes de dichos cauces. La relación de longitud es un coeficiente numérico que resulta de dividir el promedio de longitud de los cauces de un orden

dato (u) entre el promedio de longitud del orden inmediato anterior (u-1). Los resultados se presentan en el Cuadro 5-5.

Cuadro 5-5. Relación de longitud de los cauces en la cuenca.

Numero de Orden (u)	Numero de cauces (Nu)	Longitud de cauces Km. (Lu)	Longitud cauces acumulada (L _{ua})	Longitud media de cauces por orden (L/Km.)	Relación de Longitud (RL)
1	5951	2345	2345	0.4	2.5
2	1191	1152	3497	1.0	2.2
3	263	559	4056	2.1	2.2
4	75	349	4406	4.7	2.0
5	18	171	4577	9.5	1.7
6	5	82	4659	16.5	1.3
7	2	44	4702	21.8	0.8
8	1	17	4719	16.7	----
Total	7506	4719			

Los cauces de primer orden tienen en promedio 0.4 kilómetros de longitud; los de segundo orden 1 kilómetro de longitud; los de tercer orden 2.1 kilómetros de longitud; los de cuarto orden 4.7 kilómetros de longitud; los de 5to orden 9.5 kilómetros de longitud; los de 6to orden 16.5 kilómetros de longitud y los de 7mo y 8vo orden 21.8 y 16.7 kilómetros de longitud, respectivamente.

La relación de longitud es una indicación del número de veces en que proporcionalmente aumenta el largo de los cauces de una jerarquía a otra. De esta forma, para que los cauces de 1er orden (0.4 km longitud) crezcan para alcanzar la longitud de uno de 2do orden (1 km longitud) deben crecer 2.5 veces.

Es claro pues que el hecho de que los puntos no estén alineados significa que la longitud de los cauces no es homogénea, existen variaciones entre las longitudes de un orden de cauces a otro. Aunado a lo anterior se puede observar que la tendencia del crecimiento de los cauces es normal, ya que va aumentando la longitud de los cauces como aumenta el número de orden.

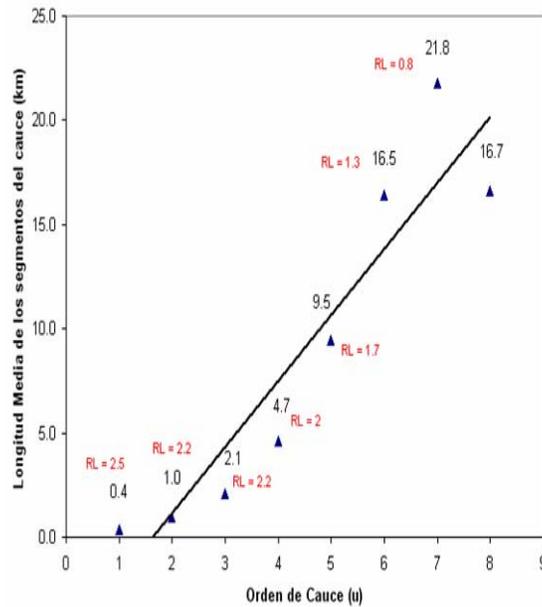


Figura 5-3. Relación de longitud de los cauces de la cuenca.

d) Clasificación de cauces según Shreve

Esta clasificación de cauces es similar a la propuesta por Strahler pero bajo la condición de que los segmentos de cauces siguen un sistema de suma acumulativo. Donde inicia un cauce es de 1er orden, si se le añade otro cauce será de 2do orden, si a este se junta otro cauce entonces será de 3er orden, así de manera consecutiva hasta finalizar en el afluente principal. De acuerdo a lo anterior, mientras más aumenta el número de orden de acuerdo a la clasificación, mayor será la capacidad erosiva y la posibilidad de un aporte mayor de agua. Para la cuenca alta del Río Los Pescados se obtuvo un total de 14,940 segmentos de cauces (Figura 5-4), desde los segmentos menores (valor 1) hasta el mayor que fue de 7590. Al igual que la clasificación anterior, el número de cauces es un indicador de la capacidad erosiva de la cuenca, a mayor cantidad de éstos mayor será la capacidad de transportar agua. Estos resultados sugieren para la cuenca que el cauce final transporta gran cantidad de agua y que sus afluentes más pequeños son capaces de aportar al cauce principal los excesos de agua que se pueden presentar en la cuenca.

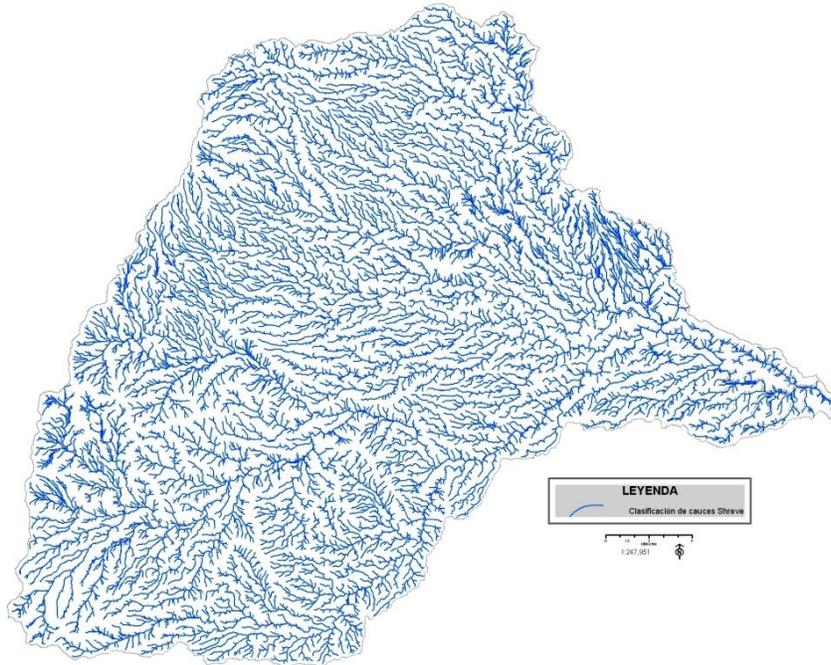


Figura 5-4. Clasificación de cauces según Shreve.

e) Frecuencia de cauces

La frecuencia de cauces es el número de segmentos de cauces de cualquier orden y longitud sobre una unidad de área (Campos, 1992), en este caso sobre el área de la cuenca. Esto permite establecer correlaciones con la naturaleza litológica del área drenada, la pendiente del terreno y la climatología de la cuenca, además de subrayar la eficiencia del desalojamiento del agua en la cuenca.

De acuerdo a lo anterior, la fórmula de la frecuencia absoluta de los cauces (F_c) es igual al número total de cauces de la cuenca (N_u) entre el área de la cuenca (A), quedando como sigue:

$$F_c = N_u / A$$

$$F_c = 14940 / 1433.4 \text{ km}^2 = 10.4 \text{ cauces} / \text{km}^2$$

Entonces, en promedio para toda la cuenca en estudio se tiene que existen 10.4 cauces por kilómetro cuadrado.

De manera específica se trazó un mapa donde se establece el área como una malla de cuadros de 1 km², donde se contabilizaron los segmentos de cauces sin importar el orden y la longitud (Figura 5-5).

Resultado de lo anterior se tiene que para la cuenca alta del Río Los Pescados la frecuencia que mayor presencia tiene es la “alta” (Cuadro 5-6), que va de 16 a 30 segmentos de cauces por km², con un 44% de la superficie total de la cuenca. Se encuentra esparcida en cuadros pequeños por toda la cuenca pero coincide con las zonas donde se juntan varios cauces; se pueden encontrar segmentos tanto en la parte alta como en la parte mas baja de la cuenca.

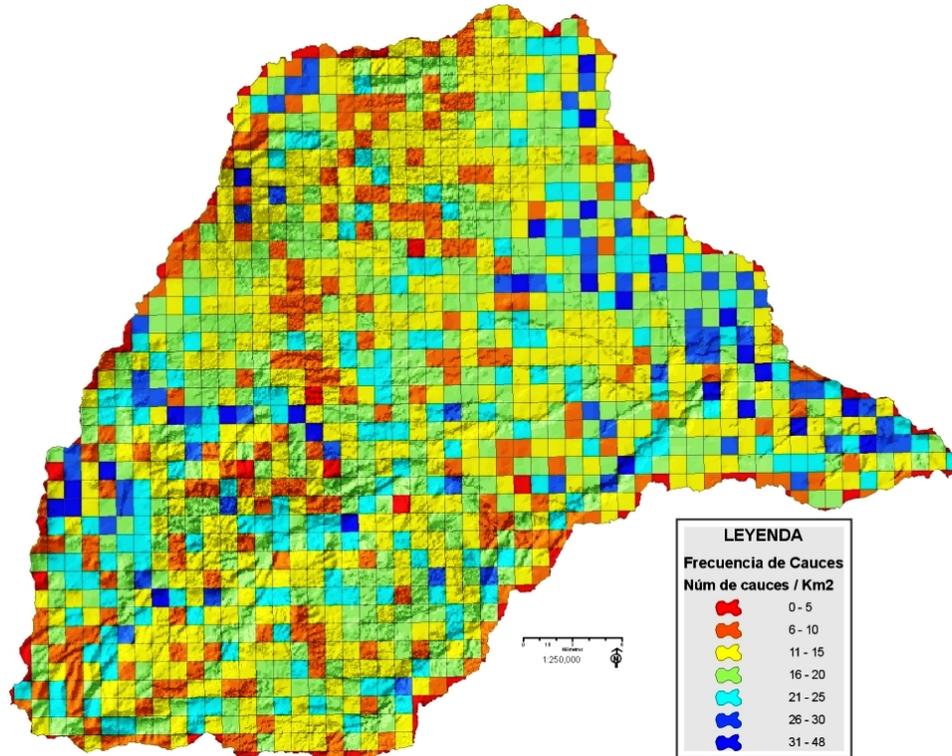


Figura 5-5. Distribución geográfica de frecuencias de cauces.

Al anterior parámetro le sigue en importancia la frecuencia “media” (de rango 11 a 15 segmentos de cauces por km²) con un 33% de superficie que representan un poco más de 470 kilómetros cuadrados de superficie, tal como se aprecia en el Cuadro 5-6.

Cuadro 5-6. Frecuencia de cauces por km² en la cuenca.

Segmentos de cauce por km ²	Frecuencia	Área km ²	Área %
menor de 2	NULA	17.8	1.2
de 2 a 5	MUY BAJA	53.3	3.7
de 6 a 10	BAJA	225.2	15.7
de 11 a 15	MEDIA	474.8	33.1
de 16 a 30	ALTA	631.3	44.0
mayor de 30	MUY ALTA	31.1	2.2
Total		1433.4	100

Las frecuencias que ocupan menor superficie en la cuenca son muy baja (3.7%); muy alta (2.2%) y nula con apenas un 1.2%.

f) Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (Dd) total es la longitud acumulada, expresada en kilómetros ($\sum L$), de los segmentos de cauces existentes dentro de la cuenca dividida entre el área total de drenaje (A), de acuerdo a $Dd = \sum L / A$.

De acuerdo a la anterior formula, para la cuenca alta del Río Los Pescados se tiene que la densidad de drenaje es:

$$Dd = 4719 \text{ Km} / 1433.4 \text{ Km}^2 = 3.29 \text{ Km} / \text{Km}^2.$$

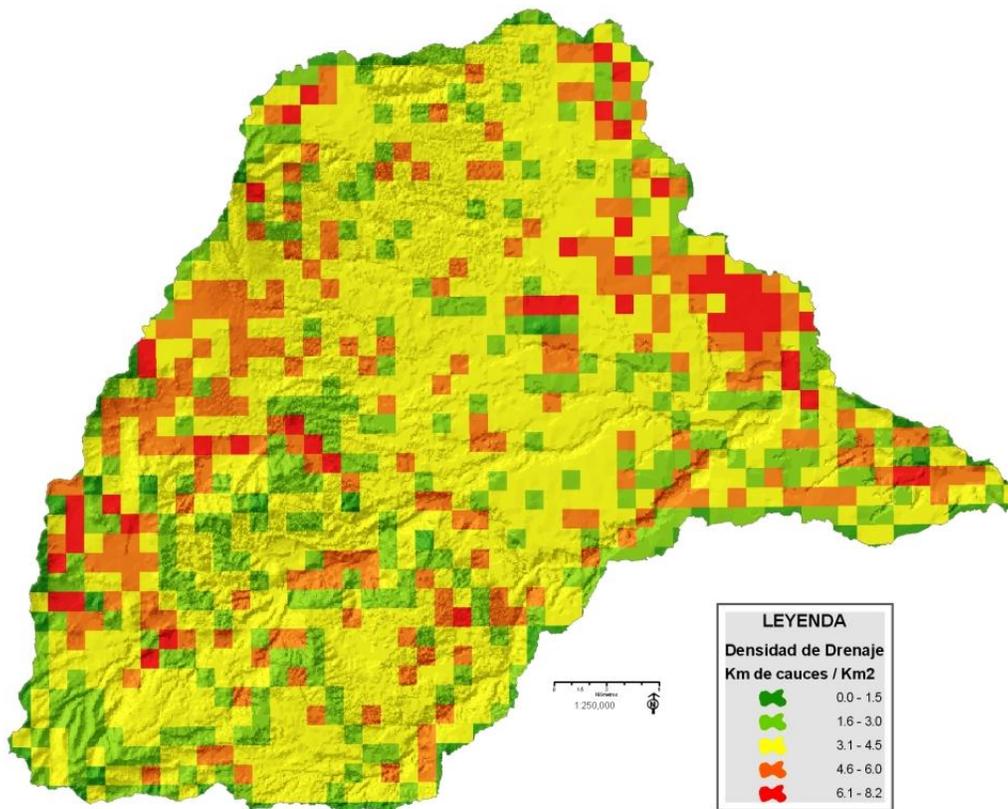
Por lo tanto, en promedio para la cuenca, se tienen 3.29 km de cauces por cada kilómetro cuadrado, lo que representa una densidad de drenaje media.

El parámetro muestra el grado de desarrollo del drenaje de la cuenca y la organización de éste se denomina sistema fluvial. De esta forma, el sistema fluvial de la cuenca se desarrolla mayormente dentro de las clases medias a altas, ya que en conjunto suman un total de 4233.8 Km. de longitud de cauces, que representan el 89% de la superficie ocupada y que significan más de 1200 km², como se muestra en el Cuadro 5-7.

Cuadro 5-7. Densidad de drenaje, longitud de los cauces y superficie ocupada.

Densidad drenaje	Rango Km. / km ²	Longitud total de los cauces Km.	Longitud de los cauces %	Superficie cubierta. km ²
NULA	menor de 1	29.5	0.63	63.2
BAJA	de 1 a 2	90.3	1.91	63.2
MEDIA	de 2 a 4	2315.4	49.06	795.5
ALTA	de 4 a 6	1918.4	40.65	451.5
MUY ALTA	mayor de 6	365.5	7.75	59.9
TOTAL		4719.1	100	1433.4

Es de importancia resaltar que las densidades de drenaje muy altas se concentran fuertemente en un grupo principal hacia las inmediaciones de la comunidad de Tuzanapan, a partir de ahí se presentan dispersas por toda la cuenca.

**Figura 5-6. Densidad de drenaje en la cuenca.**

A partir de todo lo anterior, se pueden esbozar algunas consideraciones respecto a la capacidad que tiene la cuenca de amortiguar efectos por tormentas fuertes e inundaciones.

De acuerdo a los resultados de las clasificaciones de cauces realizadas por los métodos de Strahler y Shreve, el primero arrojó un total de 7506 segmentos de cauces en la cuenca, mientras que el segundo un total de 7590. Se encontró que la longitud total acumulada es de 4719 kilómetros de segmentos de cauces en toda la cuenca. La longitud promedio de cada cauce va de los 400 metros a los 16 kilómetros. En este punto hay que recordar que la cuenca de estudio tiene un área total de 1433 km², por lo que se tienen en promedio 5.3 segmentos de cauces por cada kilómetro cuadrado. La frecuencia que mayor presencia tiene es la “alta”, que va de 16 a 30 segmentos de cauces por km². Resumiendo, por cada kilómetro cuadrado de superficie se tienen 5.3 cauces a una densidad de drenaje promedio de 3.29 km.

Así, se observa que en la cuenca existen gran cantidad de cauces que de acuerdo a su clasificación, tienen elevada capacidad erosiva y posibilidad de un aporte mayor de agua en caso de fuertes eventos de lluvia. Como lo señala Aparicio (2005) “un orden de corrientes alto o una densidad elevada refleja una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta”. A reserva de mayores estudios en la zona (por ejemplo estabilidad de laderas, riesgo de tormentas, probabilidad de lluvias, etc) por las diferencias altitudinales, pendientes y la capacidad de la cuenca de drenar el agua por sus cauces se puede establecer que ante eventos de lluvias extremos existe buena capacidad de drenaje en la cuenca.

Es importante subrayar que la cuenca aquí estudiada corresponde a la parte alta del Río Los Pescados, por lo que existen pendientes considerables y en resultado una gran cantidad de cauces capaces de transportar agua. Sin embargo, como lo señalan Pereyra y Pérez (2005), “cuando se presenta un fenómeno meteorológico como los ciclones tropicales, éstos suelen generar grandes cantidades de lluvia que al escurrir sobre suelos saturados, producen inundaciones, muchas veces, en las partes bajas de las cuencas ...” y probablemente también en las partes altas.

5.2.3 Regulación hídrica por cobertura de la vegetación.

Este tipo de servicio ambiental se refiere al papel que la cobertura y el uso del suelo juegan en regular el ciclo hidrológico, como por ejemplo en la escorrentía en laderas, drenaje y escurrimiento en ríos (NRC, 2005).

5.2.3.1 Precipitación

En la cuenca se tiene una lámina promedio de 1900 mm anuales. Esta lámina proviene de rangos mínimos de 900 mm anuales y máximos de un poco más de 3000 mm anuales. La zona centro de la cuenca es la que más precipitación recibe mientras que la parte baja de la cuenca es la que menor lluvia presenta, como se mencionó anteriormente.

De acuerdo a la superficie de la cuenca, aproximadamente de 1400 kilómetros cuadrados, la lámina total de lluvia significa un poco más de 2.7 millones X 10^3 metros cúbicos de agua, como se presenta en el Cuadro 5-8.

Cuadro 5-8. Precipitación media y volumen total de agua en la cuenca.

PRECIPITACIÓN ACTUAL			SUPERFICIE CUBIERTA m ²	VOLUMEN	
RANGO	MEDIA	EN METROS		m ³	10 ³ m ³
900-1000	950	0.95	3365491.4	3197216.8	3197.2
1000-1200	1100	1.1	91824701.5	101007171.6	101007.2
1200-1400	1300	1.3	138234455.6	179704792.3	179704.8
1400-1600	1500	1.5	134791403.7	202187105.5	202187.1
1600-1800	1700	1.7	223074167.1	379226084.1	379226.1
1800-2000	1900	1.9	300520661.4	570989256.6	570989.3
2000-2200	2100	2.1	185685745.8	389940066.1	389940.1
2200-2400	2300	2.3	63170063.4	145291145.9	145291.1
2400-2600	2500	2.5	63516960.3	158792400.9	158792.4
2600-2800	2700	2.7	79584956.4	214879382.2	214879.4
2800-3000	2900	2.9	141191521.2	409455411.4	409455.4
TOTAL			1424960127.8	2754670033.5	2,754,670.0

El total aproximado de 2.7 millones X 10^3 de metros cúbicos de agua será considerado como el total de volumen de agua que entra al sistema. Por su parte, la evapotranspiración, el escurrimiento y la infiltración (recarga subterránea) serán

consideradas como las salidas del sistema, completándose así el balance hídrico en la cuenca (Becerra, 2005).

5.2.3.2 Evapotranspiración

Ortiz Solorio (1987) señala que la Evaporación Potencial (Ev) es la cantidad de vapor de agua que puede ser emitida desde una superficie libre con agua, mientras que la Transpiración es la pérdida de agua liberada hacia la atmósfera a través de los estomas de las plantas. También señala que la Evapotranspiración (ET) es la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y transpirada por las plantas y concluye que la Evapotranspiración Potencial (ETP) es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo.

A partir de lo antes mencionado, se obtuvieron los valores de ET real a partir de la fórmula de TURC (Sokolov et. al., 1981) y los de ETP de CONABIO (1990). Los primeros con el objeto de evaluar la cantidad de agua evaporada desde el suelo y transpirada por las plantas y la segunda como un indicador potencial de máxima evaporación en el sistema.

TURC encontró que para estimar la evapotranspiración se requieren únicamente los valores de temperatura media anual (T) y de precipitación media anual (P) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde $L = 300 + 25(T) + 0.05(T^3)$

De acuerdo a la fórmula anterior, los valores de ET estimados se presentan en el Cuadro 5-9, donde se observa que la cantidad de agua evapotranspirada asciende a un poco más de 1 millón $\times 10^3 \text{ m}^3$ de agua.

Cuadro 5-9. Valores de Evapotranspiración (ET) total para cuenca

Rango PP	Evapotranspiración (ET) 10 ³ m ³
900-1000	6430.9
1000-1200	40804.1
1200-1400	77178.4
1400-1600	100777.1
1600-1800	122205.2
1800-2000	142746.2
2000-2200	124608.5
2200-2400	107343.4
2400-2600	107119.9
2600-2800	106437.8
2800-3000	64892.6
Total	1,000,544.3

Por otro lado, la evapotranspiración potencial o máxima que se presenta en la cuenca presenta rangos desde los 500 mm anuales hasta un poco más de los 1000 mm anuales, resultando en una ETP promedio para la cuenca de 750 mm al año (Cuadro 5-10).

A partir de los rangos anteriores, se obtuvo el volumen total de agua que se evapotranspira en la cuenca, lo cual arroja una cifra de un poco mas de 1 millón x 10³ m³ de volumen de agua.

Cuadro 5-10. Valores de ETP para la cuenca.

ETP			Área ocupada m ²	Volumen	
Rango	Media	m		m ³	X 10 ³ m ³
500-600	550	0.55	188999546	103949750	103950
600-700	650	0.65	127786525	83061242	83061
700-800	750	0.75	525555204	394166403	394166
800-900	850	0.85	572778683	486861880	486862
900-1000	950	0.95	17881602	16987522	16988
Total general			1433001560	1085026797	1,085,027

Como se observa, entre los valores estimados con la formula de Turc y los observados a partir de la ETP no existe una considerable variación, por lo que se puede señalar que que la ET real es igual a la ET potencial.

5.2.3.3 Escurrimiento

Con los mapas de declives, edafológico y de uso del suelo y vegetación se estimaron los coeficientes de escurrimiento de acuerdo a lo propuesto por Becerra (2005) y como se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 5-11. Valores del coeficiente de escurrimiento a partir de vegetación, pendiente y suelos.

VEGETACIÓN	Textura del suelo:		
	Gruesa	media	Fina
Topografía			
BOSQUE			
Plano (0-5% de pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% de pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% de pendiente)	0.30	0.50	0.60
PASTIZAL			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Escarpado	0.22	0.42	0.60
TERRENOS AGRÍCOLAS			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Escarpado	0.52	0.72	0.82

Fuente: Tomado de Becerra (2005)

De esta forma, se obtuvieron 10 distintos coeficientes de escurrimiento entre los rangos de 0.3 y 0.82. A partir de lo anterior y bajo un promedio simple de los valores obtenidos, la cuenca presenta un coeficiente de escurrimiento medio de 0.5 (Figura 5-7).

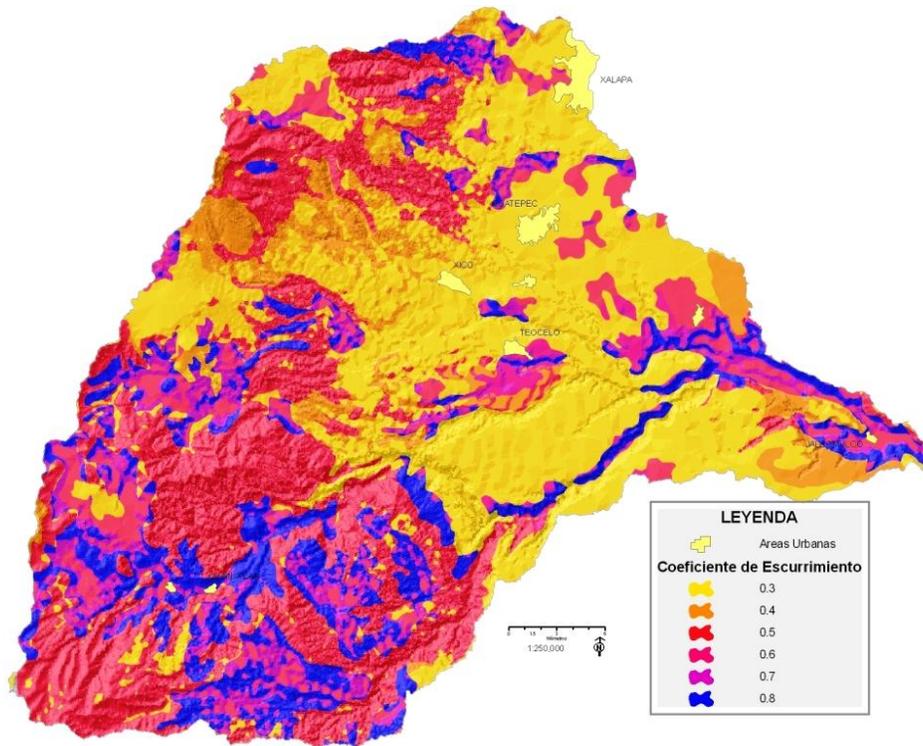


Figura 5-7. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca.

Con los coeficientes de escurrimiento antes señalados se obtuvo el escurrimiento medio en la cuenca. Como el coeficiente de escurrimiento representa la cantidad de agua que escurre, se obtuvo multiplicando la precipitación media (por franja de lluvia) por dichos coeficientes, presentando en conjunto para la cuenca un poco más de 1.3 millones $\times 10^3 \text{ m}^3$ de volumen de agua que se escurre. En el Cuadro 5-12 se presentan los valores de volumen escurrido por coeficiente de escurrimiento simplificado y el valor total para la cuenca.

Cuadro 5-12. Volumen total de escurrimiento en la cuenca.

Coeficiente de escurrimiento	Volumen Escurrido $\times 10^3 \text{ m}^3$
0.3	306585.0
0.4	76380.9
0.5	492070.5
0.6	17120.5
0.7	149542.6
0.8	264991.8
Total	1,306,691.6

El valor total antes mencionado fue comparado con el escurrimiento registrado en la estación hidrométrica ubicada en Jalcomulco (IMTA, 2005), a la salida de la cuenca. La estación hidrométrica ha recabado información del volumen escurrido en la cuenca desde el año 1960 y hasta el año 2000, aunque se tienen 5 años intermedios que no se tomó información.

Cuadro 5-13. Volumen total de escurrimiento en la estación hidrométrica Jalcomulco.

Estación Jalcomulco	Volumen mensual escurrido ($10^3 / m^3$)
Enero	68954.8
Febrero	58085.6
Marzo	58009.4
Abril	52989.6
Mayo	58568.2
Junio	147822.4
Julio	223912.7
Agosto	227497.5
Septiembre	292562.6
Octubre	190826.1
Noviembre	107787.7
Diciembre	84741.7
ANUAL	1,571,793.4

Fuente: IMTA, 2005

Se observa entonces que existe una diferencia de un poco más de 250 mil $\times 10^3$ m^3 de volumen de agua de diferencia. Aplicando el error promedio (Ortiz Solorio, 1987) entre lo observado y lo estimado se observa un error de 16.9, lo que sugiere que se tiene un grado de exactitud para lo calculado superior a un 83%.

5.2.3.4 Infiltración

La fórmula empírica para evaluar la cantidad de infiltración de agua en la cuenca es de acuerdo a lo sugerido por varios autores (DeBarry, *et.al.*, 2004; Becerra, 2005) y se señala a continuación:

$$I = P - ET - Esc$$

Donde I es la infiltración en cualquiera de sus formas, P es la precipitación, ET la evapotranspiración y Esc el escurrimiento. Se completa de esta forma el sistema y balance en una cuenca.

De manera general se observa que en la cuenca llueven un poco más de 2.7 millones $\times 10^3$ metros cúbicos de agua, se evapotranspiran un poco más de 1 millón y escurren un poco más de 1.3 millones $\times 10^3$ m³ de agua. De lo anterior se desprende que en la cuenca se infiltran aproximadamente un total de 447 millones de metros cúbicos de agua al año. Lo anterior señala que del total de agua que llega a la cuenca, el 36% se evapotranspira, el 47% se escurre y el restante 16% se infiltra, como se presenta en el Cuadro 5-14.

Cuadro 5-14. Volumen de agua infiltrado en la cuenca.

	Lamina (mm)*	Volumen (10 ³ m ³)	%
Escurrimiento	900	1,306,691.6	47.5
ET	690	1,000,544.0	36.3
Infiltración	310	447,434.4	16.2
Precipitación	1900	2,754,670.0	100

* Los valores de lámina media son únicamente de referencia

En un estudio reciente para la cuenca del Río Gavilanes, principal fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de Coatepec, García-Coll *et.al.*, (2004) encontraron que del total de agua que entra al sistema (80 mill. de metros cúbicos) el 9% se evapotranspira, el 47% se escurre y el restante 44% se infiltra. Los datos anteriores parecen subestimar el escurrimiento, ya que de los datos obtenidos de la estación hidrométrica establecida en la localidad de Jalcomulco por la CNA (IMTA, 2005) se observa que los valores de escurrimiento medidos corresponden a un 57% de lo que realmente entra al sistema como precipitación. Caso muy similar ocurre con la evapotranspiración, ya que García-Coll *et.al.*, (2004) señalan que este valor corresponde a un 9% mientras que lo obtenido a partir de los dos métodos antes señalados arrojan un 36% y un 39%. La diferencia de métodos utilizados para estimar el volumen de agua infiltrada varían por lo que es de esperarse diferencias considerables.

Dentro de una cuenca, uno de los factores más importantes que determinan la capacidad de ésta para regular el flujo de agua es la cobertura vegetal y la pendiente (Aparicio, 2005; DeBarry, *et.al.*, 2004; Becerra, 2005). Por ello, es de prestar atención a los cambios de uso del suelo dentro de la cuenca.

5.2.4. Retención del suelo

Es el servicio ambiental que juega la vegetación como protección ante la erosión, es el mantenimiento del suelo arable y la prevención de daños por la pérdida de suelo erosionado y transportado (NRC, 2005).

Para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) desarrollada por Wischmeier (1976) y adecuada para las condiciones de México por Figueroa, *et.al.* (1991).

5.2.4.1. Erosión eólica

La ecuación de predicción de erosión eólica se desarrolló para relacionar condiciones dadas de un terreno con las pérdidas anuales de suelo de los cinco factores, dos (I y C) se consideran fijos, mientras que los otros tres (K, L y V) se consideran variables o de manejo. De acuerdo con Figueroa *et.al.*, (1991) la ecuación básica para el cálculo de la erosión eólica es:

$$E = I \times K \times C \times L \times V$$

Donde: **E** es el promedio anual de pérdida de suelo (t/ha/año), **I** es el factor de erosionabilidad del suelo (t/ha/año), **K** es el factor de rugosidad del suelo (Adimensional), **C** es el factor climático (%), **L** es el factor de longitud equivalente del terreno (m) y **V** es el factor de cubierta vegetal (t/ha).

El grado de afectación que tiene la erosión por efecto del viento en la cuenca se presenta en la Figura 5-8, la cual señala que el 91% de la superficie total de la cuenca presenta una pérdida de suelo “nula” (de entre 0 a 5 toneladas por hectárea), la categoría “ligera” (5-10 tn/ha) y “moderada” (10-50 tn/ha) con 4% cada una y por último las clases de erosión alta (50 a 200 tn/ha) y muy alta (>200 tn/ha) no significan mas de un 1%.

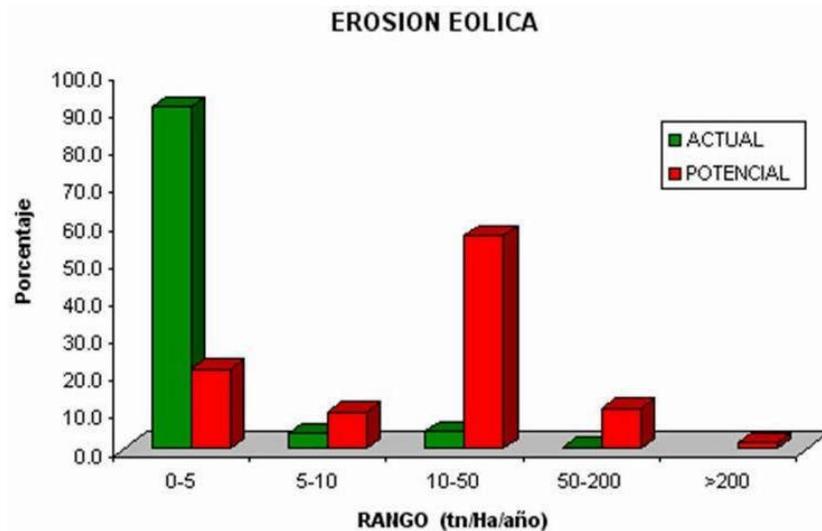


Figura 5–8. Perdida de suelo por erosión eólica.

Sin embargo, las condiciones de erosión eólica potencial (aquella que ocurre sin la intervención de la cobertura vegetal y prácticas de conservación) cobran importancia cuando se presentan cambios en la cuenca, específicamente de remoción de cobertura vegetal.

Así, se observa que en la cuenca se tienen cambios significativos que podrían ocurrir potencialmente, llegando a incrementarse la pérdida de suelo en sus categorías de moderada (10-50 tn/ha) y alta (50-200 tn/ha), que en su conjunto significan un 67% de superficie.

Si bien algunos modelos de circulación general incluyen los cambios en la velocidad e intensidad de los vientos, aquí no se construyeron escenarios de

cambio climático con las salidas de los modelos. Sin embargo, bajo escenarios de cambio climático se espera que los factores de erosión eólica *C* (climático) y *V* (cubierta vegetal) se alterarán, por lo que pueden suponerse incrementos en pérdidas de suelo por erosión eólica.

5.2.4.2. Erosión hídrica

Figuroa, *et.al.* (1991) establecieron la modificación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para las condiciones de México, especialmente los factores de erosividad de la lluvia y manejo del cultivo. La ecuación básica para el cálculo de la erosión hídrica es:

$$A = R K L S C P$$

Donde **A** es el promedio anual de pérdida de suelo (t/ha), **R** es el factor de erosividad de la lluvia (MJ mm/ha/hr), **K** es el factor de erosionabilidad del suelo (t ha hr/MJ mm ha), **L** es el factor de longitud de la pendiente (Adimensional), **S** es el factor de grado de la pendiente (Adimensional), **C** es el factor de manejo y cobertura de la vegetación (Adimensional) y **P** es el factor de prácticas de conservación (Adimensional)

Al aplicar dicha fórmula se observa, como lo muestra la Figura 5-9, que la erosión “nula” y “ligera” cubren aproximadamente el 31% de la cuenca, mientras que la categoría “moderada” representa un 23% y la “alta” y “muy alta” señalan actualmente pérdidas en mas del 45% de la superficie.

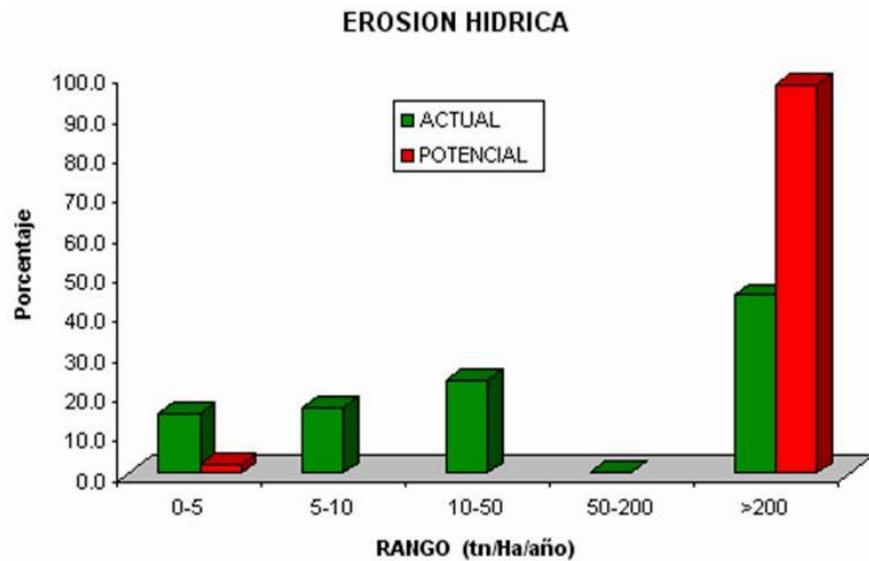


Figura 5-9. Perdida de suelo por erosión hídrica.

En este punto es muy importante señalar la importancia que tiene la cobertura vegetal, ya que el potencial de erosión que existe en la cuenca se dispara a más de un 97% de la superficie con pérdidas de más de 200 toneladas por hectárea. Respecto al factor R, de erosividad de la lluvia, se esperarían mayores pérdidas de suelo de presentarse mayores eventos de lluvia o con mayores intensidades de éstas y mayor superficie deforestada.

Al igual que con erosión eólica no se construyeron escenarios de cambio climático con las salidas de los modelos. A pesar de ello, bajo escenarios de cambio climático se espera que los factores de erosión hídrica R (erosividad de la lluvia) y C (manejo y cubierta vegetal) se modifiquen, por lo que pueden suponerse incrementos en pérdidas de suelo por erosión hídrica. Por lo anterior, tendrían que aumentar las prácticas de manejo (P) para contrarrestar el proceso de pérdidas de suelo bajo escenarios de cambio climático.

5.3 Servicios Ambientales y Cambio Climático

5.3.1 Almacenamiento y provisión de agua

Son aquellos relacionados a la filtración, retención y almacenamiento de agua como un servicio de provisión de agua fresca, disponible para el consumo humano (NRC, 2005).

5.3.1.1 Balance hídrico general

CNA (2003) señala que la región centro del estado veracruzano destaca por su escurrimiento natural, ya que a nivel nacional sólo es superada por la región frontera sur. En este sentido, apunta que para la cuenca de la región centro (con más de 1000 kilómetros de superficie que la aquí estudiada con 2827 km²), llueven en promedio 1451 mm anuales, se evaporan alrededor de 768 mm anuales y escurren un poco más de 1.7 millones X10³ de metros cúbicos.

A partir de lo anterior se observa que las cifras aquí presentadas no se alejan de lo encontrado por CNA (2003), ya que se estimó un escurrimiento de un poco más de 1.3 millones X10³ de metros cúbicos contra los 1.7 millones X10³ de metros cúbicos apuntados por CNA, quien considera sus cifras hasta la salida de la cuenca.

Los valores reportados por CNA significan entonces que el total de lluvia para la región centro es del orden de aproximadamente 4.1 millones X10³ de metros cúbicos, distribuidos el 52% (2.1 millones X10³ de metros cúbicos) en evapotranspiración, el 41% (1.7 millones X10³ de metros cúbicos) en escurrimiento y el restante 7% (230 mil X10³ de metros cúbicos) de recarga natural de acuíferos o infiltración.

De lo antes señalado, CNA (2003) reporta que los principales usos consuntivos de estos volúmenes de agua en la región son 39% agrícola, 37% industrial, 16%

público y 8% para otros usos, proviniendo de un 84% de agua superficial y un 16% de aguas subterráneas. Esta cifra, como se observa, hace referencia al servicio ambiental que se refiere a la provisión de agua fresca para el consumo humano, directa o indirectamente, en la cuenca.

Por ejemplo, para el sector público urbano se extraen 65% de fuentes superficiales y 35% de fuentes subterráneas. En el caso del sector agrícola se presenta que el 81% provienen de fuentes superficiales y el 19% de fuentes subterráneas. En lo que se refiere a las industrias las cifras ascienden a un 94% y 6% de fuentes superficiales y subterráneas, respectivamente (CNA, 2003). Se subraya entonces el uso que se da a las aguas superficiales como fuente y provisión del recurso hídrico.

Para el caso del presente estudio (Cuadro 5-14 y Figura 5-10), se encontró que el total de la lluvia asciende a un poco más de 2.7 millones $\times 10^3$ de metros cúbicos, distribuidos el 36% (1 millón $\times 10^3$ de metros cúbicos) en evapotranspiración, el 47% (1.3 millones $\times 10^3$ de metros cúbicos) en escurrimiento y el restante 16% (400 mil $\times 10^3$ de metros cúbicos) para la recarga de acuíferos, como se presenta en la siguiente figura:

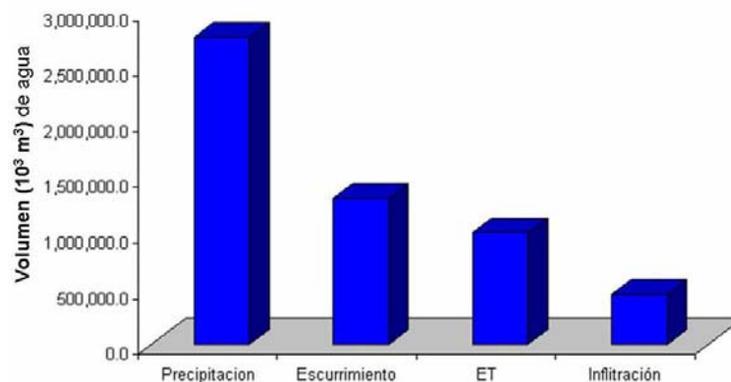


Figura 5–10. Distribución y balance hídrico de la cuenca.

5.3.1.2 Escenarios de cambio climático

Se aplicaron los escenarios de cambio climático (GFDL, ECHAM y HADLEY) ya señalados anteriormente. La forma en que se aplicaron fue mediante el método de franjas de lluvia (Francisco, 2003), el cual consistió en aplicar las razones de cambio señaladas por los modelos de cambio climático sobre las franjas de lluvia y todos los elementos del balance hídrico en la cuenca estudiada. De esta forma, las razones de cambio de los modelos fueron aplicadas sobre la precipitación e igualmente fueron consideradas para la evapotranspiración y escurrimiento. Con esta información se estimaron los valores para la infiltración. Los resultados se presentan en el Cuadro 5-15.

Cuadro 5-15. Escenarios de cambio climático sobre el balance hídrico de la cuenca.

Parámetro	Escenario	Volumen (10^3 m^3) de agua.			
		BASE	GFDL	ECHAM	HADLEY
Precipitación	A2 al 2020		3,305,604	2,203,736	2,479,203
	A2 al 2050	2,754,670	3,122,423	2,187,671	2,362,895
	B2 al 2050		3,030,137	2,463,953	2,203,736
Evapotranspiración	A2 al 2020		1,279,765	1,157,882	1,096,941
	A2 al 2050	1,000,544	1,316,329	1,157,882	1,133,506
	B2 al 2050		1,340,706	1,096,941	1,157,882
Escurrecimiento	A2 al 2020		1,372,026	1,241,357	1,176,022
	A2 al 2050	1,306,692	1,411,227	1,241,357	1,215,223
	B2 al 2050		1,437,361	1,176,022	1,241,357
Infiltración	A2 al 2020		653,813	0	206,240
	A2 al 2050	447,434	394,867	0	14,166
	B2 al 2050		252,071	190,989	0

NOTA: los valores señalados como cero son cifras que los modelos apuntan como valores negativos.

Se observa que el modelo GFDL refleja sobre la precipitación aumentos considerables, desde el 10% para el año 2050 hasta el 20% para el año 2020. Respecto a los modelos ECHAM y HADLEY concuerdan en reducciones también significativas respecto a la precipitación en la cuenca, el menor escenario apunta una disminución del 10% sobre el promedio mientras que el más drástico señala una disminución del 20% en el recurso hídrico.

De acuerdo a los escenarios, también es importante señalar que todos ellos, tanto para el año 2020 como para el 2050, señalan incrementos en la evapotranspiración que van desde el 10% y hasta el 34% sobre lo estimado como

base (Cuadro 5-16). Todos los escenarios señalan para toda la cuenca incrementos en temperatura, al ser la evapotranspiración dependiente del comportamiento de ésta, es de entenderse dichos resultados.

Cuadro 5-16. Cambio en porcentaje de acuerdo a los escenarios de cambio climático en la cuenca.

Parámetro	Escenario	Cambio en %		
		GFDL	ECHAM	HADLEY
Precipitación	A2 al 2020	20	-20	-10
	A2 al 2050	13	-21	-14
	B2 al 2050	10	-11	-20
Evapotranspiración	A2 al 2020	28	16	10
	A2 al 2050	32	16	13
	B2 al 2050	34	10	16
Esguerrimiento	A2 al 2020	5	-5	-10
	A2 al 2050	8	-5	-7
	B2 al 2050	10	-10	-5
Infiltración	A2 al 2020	46	-144	-54
	A2 al 2050	-12	-147	-97
	B2 al 2050	-44	-57	-144

NOTA: con color azul se resaltan los valores que apuntan incrementos y de color rojo aquellos que señalan disminuciones o incrementos que resultan negativos para el balance. Las disminuciones mayores a 100% son meramente ilustrativas del comportamiento calculado.

Respecto a los esguerrimientos, los escenarios de los modelos ECHAM y HADLEY señalan que éstos disminuirán en el orden de -5% como mínimo y -10% como máximo. Es el modelo GFDL el que al señalar incrementos en precipitación también apuntan incremento en los esguerrimientos superficiales, también entre un rango que va de un 5% a un 10% más.

Por último, es respecto a la infiltración de agua para la recarga de acuíferos, que los escenarios de cambio climático sugieren cambios muy significativos. En la escala de tiempo, solo el modelo GFDL para el año 2020 es el que sugiere un incremento en más de 200 mil x 10³ metros cúbicos de agua, que significan un 46% más de agua infiltrada. Sin embargo, para el mismo año los otros dos modelos son más drásticos al señalar disminuciones desde un 54% hasta un 144% menos de agua infiltrada. Para el año 2050, los escenarios son de disminución de capacidad de infiltración en la cuenca, el escenario más conservador señala una disminución del 12% para el modelo GFDL y el escenario

más grave se torna por una disminución de hasta 147% (según el modelo ECHAM) respecto de las condiciones actuales.

5.3.2. Los servicios ambientales de producción

La fotosíntesis y la absorción de nutrientes por autótrofos convierte la energía, bióxido de carbono, agua y nutrientes en gran variedad de carbohidratos que pueden ser usados por productores secundarios para crear una mayor variedad de biomasa. Esta diversidad provee bienes para el ser humano como alimentos derivados de plantas cultivadas, animales domesticados o bien, plantas y animales silvestres. Obtención de materias primas para todo tipo de propósito industrial, combustible, químicos para ser usados como farmacéuticos, recursos ornamentales, fuerza animal y bioquímica así como alimento para animales son algunos ejemplos (De Groot, *et.al.*, 2002).

Estos son los servicios ambientales que el hombre se apropia a partir de la conversión de energía solar en biomasa, ya sea vegetal o animal (NRC, 2005).

A) El caso del café

El café es un producto de importancia dentro de la cuenca por lo que se decidió evaluar su aptitud bajo escenarios de cambio climático. Los requerimientos climáticos fueron tomados a partir de Díaz (2001), citados por Palma (2005) y se señalan a continuación:

Cuadro 5-17. Requerimientos climáticos y de altura para el café.

Factores	Aptitud		
	Muy Buena	Media	No apta
Altura (msnm)	900 – 1300	600 – 900	< 600 > 7000
Temperatura (°C)	17 – 23	14 – 17 23 – 27	< 14 > 27
Precipitación (mm)	1800 – 2500	1 500 – 1800 2 500 – 3000	< 1500 > 3000

Fuente: Tomado de Díaz, 2001

Los escenarios de cambio climático ya fueron señalados en apartados anteriores por lo que aquí se muestran únicamente los resultados.

Dentro de la cuenca y como escenario base se tiene que el 27% de la superficie presenta un tipo de aptitud denominado “Muy Apto”, el 34% como “Apto” y el restante 38% como “No Apto”, que corresponde principalmente a las partes más altas y más bajas de la cuenca (Cuadro 5-18).

Durante los años de presencia del fenómeno El Niño los impactos se hacen presentes sobre la aptitud para el cultivo del café. Así por ejemplo para el año 1982 la superficie “No Apta” pasó de un 38% para el escenario base a un 59.2% de superficie, incremento que significó cerca de un 50% en la categoría No Apta. En el mismo sentido se obtuvo que para el año 1988 y 1989 las condiciones no fueron las adecuadas para el café, ya que la superficie “No Apta” representó un 53.2% y 55.2% respectivamente.

En lo que se refiere a la clase “Muy Apto” el escenario base sugiere que en la cuenca se presenta en un 27% de superficie, sin embargo bajo años con El Niño ésta se vio reducida en aproximadamente un 75% para el año 1982, 37% para 1983, 80% para el año 1988 y más del 90% de reducción para el año 1989. Como se observa, los impactos que la variabilidad climática representa durante la presencia del fenómeno de El Niño en la cuenca sobre la aptitud natural del café representan considerables reducciones en la superficie con potencial que se tiene para el cultivo.

El escenario A2 y para el año 2020 (Cuadro 5-18) apunta que la clase “Muy Apto” para la producción de café permanece en un 27.3% según el escenario GFDL, un 27.2% según el ECHAM y un 19.3% de acuerdo con el modelo HADLEY. La clase “Apto” también mejora para el escenario GFDL (39.4%) y para el ECHAM (39.5%), sin embargo el modelo HADLEY señala un decremento para esta clase al señalar aproximadamente un 23%. Por último, la superficie de la

cuenca bajo la clase “No Apto” disminuye en los dos primeros modelos, para un 33.3% de acuerdo a los escenarios GFDL y ECHAM, no así para el HADLEY que sugiere un aumento en esta clase al señalar un total del 57% de la superficie de la cuenca.

Cuadro 5-18. Aptitud para café en porcentaje según escenarios de cambio climático y El Niño.

ESCENARIO	APTITUD	BASE	GFDL	ECHAM	HADLEY
A2 AL 2020	Muy Apto	27.2	27.3	27.2	19.3
	Apto	34.8	39.4	39.5	23.6
	No Apto	38.0	33.3	33.3	57.1
A2 AL 2050	Muy Apto		61.6	27.2	27.2
	Apto		0.5	39.5	39.5
	No Apto		38.0	33.3	33.3
B2 AL 2050	Muy Apto		56.3	8.0	8.0
	Apto		12.1	60.7	60.7
	No Apto		31.6	31.3	31.3
EL NIÑO		1982	1983	1988	1989
	Muy Apto	6.5	17.2	4.5	1.7
	Apto	34.3	44.6	42.3	43.1
	No Apto	59.2	38.2	53.2	55.2

Por otra parte, **el escenario A2 pero para el año 2050** (Cuadro 5-18) apunta que la clase “Muy Apto” se mantiene en un 27% según el escenario ECHAM y HADLEY. Pero el escenario GFDL sugiere una mejora en las condiciones climáticas al obtenerse un 61% del total de la superficie de la cuenca. La clase “Apto” disminuye bajo el escenario GFDL a un 0.5%, aunque para el modelo HADLEY y ECHAM mejora un poco al pasar de 34% del año base a un 39% en ambos modelos. Por último, la superficie de la cuenca bajo la clase “No Apto” se mantiene en 38% para el escenario GFDL y disminuye en un 5% al pasar de 38% en el año base a un 33% bajo los modelos ECHAM y HADLEY, respectivamente (Figura 5-11)

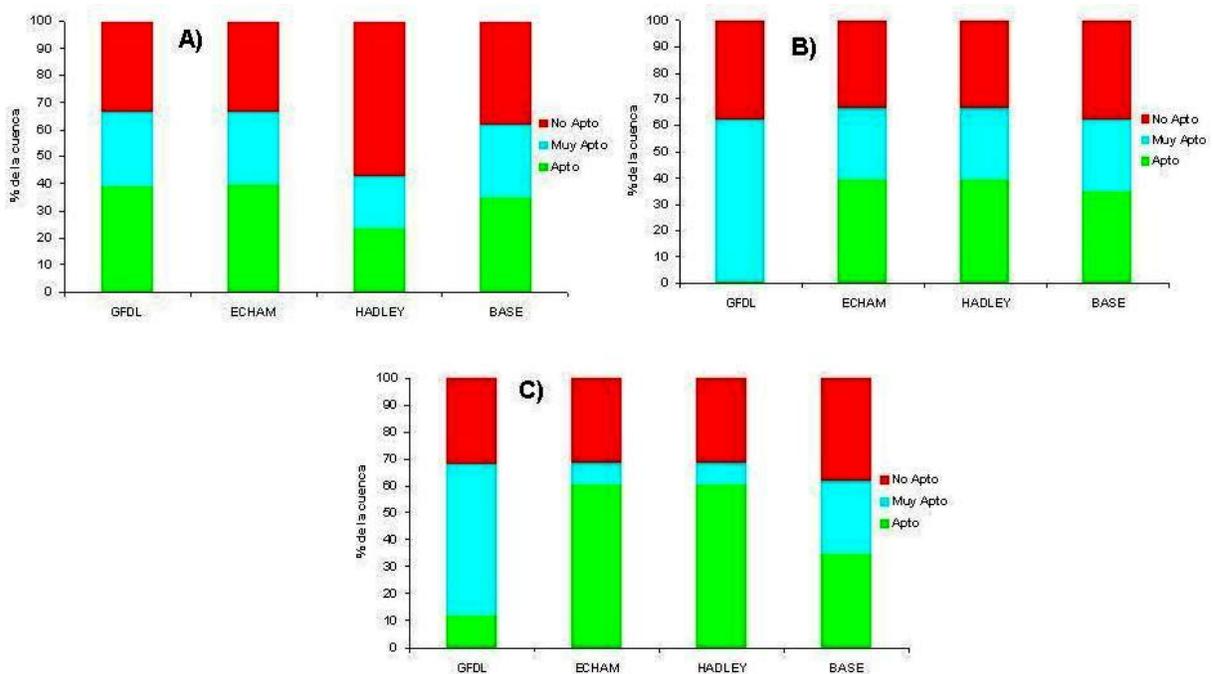


Figura 5-11. Porcentaje de cambio en aptitud para café bajo escenarios de cambio climático.
El escenario A) se refiere al escenario A2 para el año 2020, el B) al escenario A2 para el año 2050 y el C) para el escenario B2 al año 2050.

Para el **escenario B2 al año 2050** (Cuadro 5-18) se obtuvo que la clase “Muy Apto” mejora para el modelo GFDL en casi el doble, al pasar de un 27% a un 56% del total de la superficie de la cuenca. Los modelos ECHAM y HADLEY sugieren una disminución considerable al pasar de 27% en el año base a apenas un 8% según ambos modelos. La clase “Apto” aumenta considerablemente según el modelo HADLEY y ECHAM (60% cada uno) mientras que disminuye según el escenario GFDL (12%). Por último, la superficie bajo la clase “No Apto” disminuye en los tres escenarios al pasar de un 38% a un 31% de acuerdo a los escenarios GFDL, ECHAM y HADLEY.

Cambio en los niveles de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Con el objeto de identificar las zonas sensibles a los cambios señalados por los modelos, también se evaluó el cambio en la aptitud. Este se valoró al comparar los mapas de aptitud actual con los proyectados bajo escenarios de cambio climático, de acuerdo a si se observan aumentos, disminuciones o sin ningún cambio en la aptitud para el café en la cuenca. Es decir, cuando se presenta un

cambio en la aptitud, bajo escenarios de cambio climático, se evaluó si se mejoraba en una categoría denominándole “poco aumento” (por ejemplo de “apto” a “muy apto”), si se mejoraba en dos categorías “medio aumento” (por ejemplo de “no apto” a “apto”) o incluso en tres categorías “alto aumento”. Si no se presenta cambio en la aptitud se utilizó el término “no hay cambio”. Se aplicó el mismo criterio cuando en lugar de mejorar se observa una disminución en la aptitud (Cuadro 5-19).

Cuadro 5-19. Categorías de cambio de aptitud. Escenario base vs escenario de cambio climático.

		Escenario de Cambio Climático			
		Muy Apto	Apto	Marginalmente Apto	No Apto
Año base	Muy Apto	No hay cambio	Poca disminución	Media disminución	Alta disminución
	Apto	Poco aumento	No hay cambio	Poca disminución	Media disminución
	Marginalmente Apto	Medio aumento	Poco aumento	No hay cambio	Poca disminución
	No Apto	Alto Aumento	Medio aumento	Poco aumento	No hay cambio

Los resultados se presentan en el Cuadro 5-20, donde se observa que para el año 2020 y bajo el escenario A2 más del 80% de la superficie de la cuenca no presenta cambios en la aptitud para café. Sin embargo, el modelo GFDL apunta un aumento en la aptitud en cerca del 5% al igual que el ECHAM. Es el modelo HADLEY el que apunta una disminución en la aptitud para café en cerca de un 19%.

Cuadro 5-20. Cambio en la aptitud para café bajo escenarios de cambio climático.

	A2 AL 2020			A2 AL 2050			B2 AL 2050		
	GFDL	ECHAM	HADLEY	GFDL	ECHAM	HADLEY	GFDL	ECHAM	HADLEY
Medio Aumento	0.1	0.1			0.1	0.1	6.4	0.1	0.1
Poco Aumento	4.6	4.6		34.3	4.6	4.6	22.8	7.1	7.1
No Hay Cambio	95.3	95.2	80.9	65.7	95.2	95.2	70.7	73.1	73.1
Poca Disminución		0.1	11.2		0.1	0.1	0.1	19.8	19.8
Media Disminución			7.9						
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100

En lo que se refiere a los **escenarios al año 2050**, el primero de ellos (A2) señala que en al menos el 65% de la cuenca no se observarían cambios en la aptitud para el café. Sin embargo, es el modelo GFDL el que sugiere mejoras considerables en un 34% de la cuenca, aproximadamente. El modelo HADLEY

subraya también una mejora en un 5% al igual que el modelo ECHAM. Estos últimos dos modelos sugieren poca disminución en la aptitud en apenas el 0.1% de la superficie de la cuenca. Por su parte, el **escenario B2** es quizá el que indica que las condiciones para el café en la cuenca se verían más afectadas, ya que no existe cambio en aproximadamente el 70% de la superficie. El modelo GFDL sugiere que se mejorarán en un 29% de la cuenca la aptitud. El modelo ECHAM y el HADLEY por su parte sugieren que se tendrían disminuciones en aproximadamente el 20%.

De manera general se observa que las repercusiones del cambio climático en la aptitud para café se empezarían a observar mas marcadamente para el año 2050, donde de los 6 modelos de cambio climático aplicados (A2 y B2) 4 de ellos apuntan a algún tipo de cambio en la aptitud en aproximadamente el 30% de la cuenca. No es de dejar de poner atención al año 2020, donde ya se podrán observar cambios en la aptitud natural en la cuenca para el cultivo del café en al menos el 5% de la superficie.

B) El caso del maíz

Para establecer los niveles de aptitud para maíz se siguieron los requerimientos agroclimáticos generales par el país señalados por Gómez Rojas (2002), Sys *et.al.*, (1991), ECROPS de FAO (año), Ortiz-Solório (1987), Reyes (1990) y Flores *et.al.*, (2000). A partir de lo anterior se obtuvo el Cuadro 5-21, en el que se señalan algunos de los requerimientos climáticos, edáficos y ambientales para el maíz de temporal:

Cuadro 5-21. Requerimientos agroclimáticos para el maíz.

	TIPO DE APTITUD *						
	NA	mA	A	MA	A	mA	NA
Temperatura (°C)	<14	14-18	18-22	22-26	26-32	32-39	>40
Precipitación (mm)	<300	300-500	500-600	600-900	900-1200	1200-1600	>1600
Pendiente (%)	>30	16-30	8-16	0-8			
Profundidad Suelos (cm)	<20	20-75	75-100	>100			
Periodo de Crecimiento (días)	<90	90-119	120-149	150-224	225-284	285-365	

* NA = no apto, mA = marginalmente apto, A = apto y MA = muy apto.

Resultado de aplicar lo anterior se obtuvo que actualmente en la cuenca no se realiza agricultura de maíz de temporal bajo condiciones de “Muy Apto”. Pero si se obtuvo que en la cuenca se tienen presentes la categoría de “Apto” en un 7%, “Marginalmente Apto” en un 12% de la superficie y condiciones “No aptas” representa poco mas del 80% (Cuadro 5-22).

Cuadro 5-22. Aptitud para maíz en porcentaje según escenarios cambio climático y El Niño.

ESCENARIO	APTITUD	BASE	GFDL	ECHAM	HADLEY
A2 al 2020	Muy Apto		0.1	4.3	
	Apto	7.6	11.3	10.9	7.5
	Marginalmente Apto	12.3	13.6	14.7	12.3
	No Apto	80.1	75.0	70.1	80.2
A2 al 2050	Muy Apto		0.1	1.9	1.9
	Apto		11.3	9.4	9.4
	Marginalmente Apto		13.6	13.6	47.9
	No Apto		75.0	75.0	40.7
B2 al 2050	Muy Apto		1.1	4.7	4.8
	Apto		3.3	11.4	11.4
	Marginalmente Apto		25.6	55.7	14.7
	No Apto		70.1	28.1	69.2
El Niño		1982	1983	1988	1989
	Muy Apto				
	Apto	5.6	0.1	4.2	2.8
	Marginalmente Apto	39.1	29.8	41.3	52.5
	No Apto	55.3	70	54.5	44.7

Al aplicar **los escenarios de cambio climático** estos señalan que para el **año 2020** las condiciones permanecen semejantes a las actuales o podrían mejorar para la agricultura de temporal, en este caso para el maíz. El modelo HADLEY señala que la aptitud se mantendría muy parecida a la actual y los modelos GFDL y ECHAM sugieren pocas mejoras, sobre todo en la clase muy apta. La clase marginalmente apta se incrementa de un 12% para el año base, a un 13% y 14% según el modelo GFDL y ECHAM, respectivamente. La clase apta mejora en aproximadamente un 3% al pasar de 7% a 11% para ambos modelos.

Condiciones muy similares a las anteriores se observan para los **escenarios A2 al año 2050**, donde las condiciones no aptas disminuyen en aproximadamente un 5% para los modelos GFDL y ECHAM. Mientras que para el modelo HADLEY

estas disminuyen hasta en un 40% (Figura 5-12) y se observan aumentos considerables en la categoría de marginalmente apto al pasar de 12% a 47%.

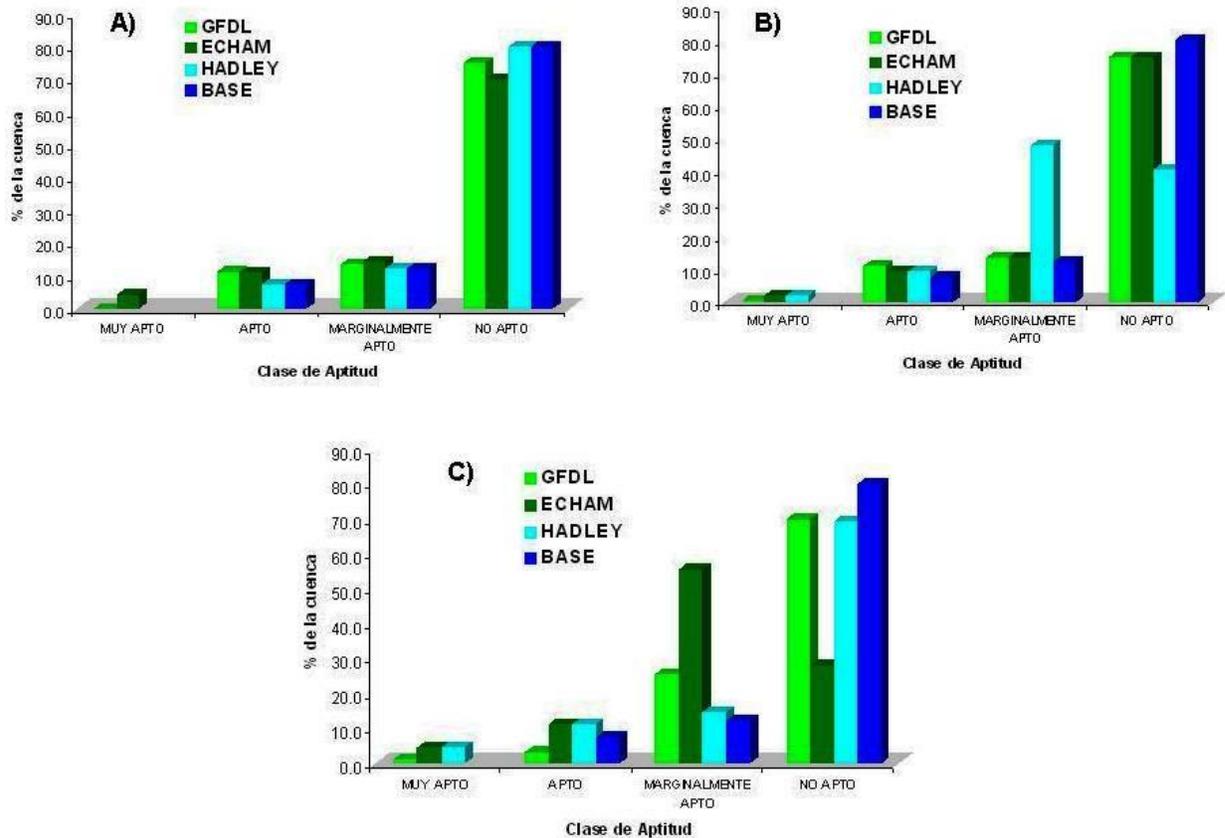


Figura 5-12. Cambio en la aptitud para maíz de temporal según escenario de cambio climático.
El escenario A) se refiere al escenario A2 para el año 2020, el B) al escenario A2 para el año 2050 y el C) para el escenario B2 al año 2050.

Por último y para los **escenarios B2 al año 2050**, los escenarios de cambio climático apuntan la misma tendencia ya comentada para los escenarios anteriores, disminución en las condiciones no aptas y su consecuente aumento en las otras clases. Así, de un 80% no apto en el escenario base el modelo GFDL señala una disminución de 10% al pasar a un 70% de la superficie de la cuenca, tendencia muy similar apunta el modelo HADLEY. El modelo ECHAM, por su parte, sugiere que esta clase pasará de 80% a 28% en la cuenca.

La condición de marginalmente apta aumenta para el modelo GFDL en un 100% al pasar de 12% a 25% de la superficie de la cuenca; muy similar al HADLEY que

supone un incremento de un 2% en la superficie al pasar de un 12% a un 14%. Es el escenario del modelo ECHAM el que apunta un incremento considerable en condiciones de marginalmente apto al pasar de un 12% a un 55% de la superficie de la cuenca, lo que significa un incremento de aproximadamente un 300%. La condición muy apta, que no se refleja en el escenario base, aparece en los escenarios de cambio climático para un 1% según el modelo GFDL y casi de 5% para los otros dos modelos.

Cambio en los niveles de aptitud bajo escenarios de cambio climático

Al igual que para el cultivo del café, se identificaron las zonas que son vulnerables a los cambios señalados por los modelos de cambio climático. Los resultados se presentan en el Cuadro 5-23 y de manera general se observa que para el año 2020 la mayor parte de la superficie de la cuenca (90% en promedio) las condiciones no cambian. Los cambios identificados señalan un aumento en las mejoras de la aptitud para el maíz según los modelos GFDL (5%) y HADLEY (0.05%), no así para el escenario ECHAM quién sugiere disminuciones en la aptitud en un total de 10% de la superficie de la cuenca.

Cuadro 5-23. Cambio en la aptitud para maíz bajo escenarios de cambio climático

	A2 al 2020			A2 al 2050			B2 al 2050		
	GFDL	ECHAM	HADLEY	GFDL	ECHAM	HADLEY	GFDL	ECHAM	HADLEY
Alto Aumento	0.1			0.1		1.9	1.1	4.7	4.7
Medio Aumento	3.7			3.7		1.9	3.2	3.9	3.9
Poco Aumento	1.4		0.05	1.4		35.7	5.8	43.5	2.5
No hay Cambio	94.8	89.9	99.95	94.8	94.8	60.5	82.4	47.9	89.0
Poca Disminución		2.5			1.4		7.5		
Media Disminución		3.4			1.9				
Alta Disminución		4.3			1.9				
	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Para el año 2050 y bajo el escenario A2 se mantienen las tendencias antes señaladas, aumento en la aptitud según los modelos GFDL y HADLEY así como disminución de acuerdo al modelo ECHAM. Es de resaltar que el modelo HADLEY sugiere poco aumento en el 35% de la superficie de la cuenca.

Para el **escenario B2** al mismo año, la aptitud para maíz cambia. El modelo GFDL sugiere que se mantendrán en un 82% las condiciones de aptitud actual o del año base, el modelo HADLEY sugiere un 89% pero el ECHAM supone un 48%, aproximadamente. De lo anterior se observa que los cambios de acuerdo a los 3 modelos sugieren algún tipo de aumento en las condiciones de aptitud para el cultivo del maíz. El modelo GFDL sugiere que se mejorará la aptitud en un 10%, el ECHAM en un 51% y el HADLEY en un 11% de la superficie de la cuenca.

De manera general se observa que las repercusiones del cambio climático en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal se empezarían a observar más marcadamente para el año 2050, donde de los 6 modelos de cambio climático aplicados (A2 y B2) 5 de ellos apuntan a algún tipo de aumento en la aptitud en el 33% de la cuenca como promedio.

Lo antes señalado en cuanto a ligeras mejoras para la producción de café y de maíz de temporal para la región de estudio bajo escenarios de cambio climático, es a partir de los criterios agrológicos utilizados. En este tipo de estudios, en específico para las regiones agrícolas, se considera que los suelos y su capacidad de contener humedad disponible para los cultivos, así como la vegetación capaz de amortiguar cambios, no cambian. Por ello, sólo se podrán potenciar las mejoras identificadas si se consideran medidas de adaptación adecuadas, que permitan incluir variables que en este documento no han sido consideradas, como lo es el aumento de plagas, de malezas y enfermedades. Tampoco se hicieron relaciones con otros factores biofísicos en la cuenca, como la pérdida de suelo por erosión, deforestación y recursos hídricos. Es por ello que, si en la cuenca se observan “oportunidades” frente al cambio y variabilidad climáticos, es menester contar con medidas de adaptación que permitan hacer frente a estos cambios negativos y/o que impulsen las oportunidades positivas. Bajo este orden de ideas es que se presentan, en el siguiente capítulo, posibles medidas de adaptación.

CAPÍTULO 6. PROPUESTAS DE ADAPTACION.

6.1 Introducción

La *adaptación* es el proceso por el cual las estrategias para moderar, enfrentar y tomar ventaja de los eventos climáticos, son mejoradas, desarrolladas e implementadas (Ebi *et.al.*, 2004). Por otro lado, la misma autora señala que la “*capacidad adaptativa*” es la propiedad de un sistema de ajustar sus características o su comportamiento, en orden de mejorar su respuesta bajo la existente variabilidad climática o futuras condiciones climáticas.

El termino adaptación también involucra los procesos por los cuales la gente reduce los efectos adversos del clima en su salud y bienestar, tomando además ventaja de las oportunidades que el ambiente le provee, como lo señala Burton (1997).

Smit (2000) argumenta en su definición que la adaptación implica ajustes en la mejora de las actividades sociales y económicas para reducir su vulnerabilidad al clima, incluyendo la variabilidad y eventos extremos así como cambios en el clima a largo plazo.

De acuerdo al tipo de reacción, el término adaptación, de acuerdo con Stakhiv (1993) citado por Smit (2000), significa cualquier ajuste, pasivo, reactivo o anticipatorio cuyo propósito es la disminución de las consecuencias adversas asociadas al cambio climático.

Este tipo de reacción puede ser planeada o espontánea, pudiendo llevarse a cabo como respuesta o anticipadamente a algún cambio en las condiciones prevalescentes (Watson, 1996).

Así, la adaptación se enfoca a los fenómenos adversos de cambio en el clima, pudiendo llevarse a cabo acciones antes, durante o después del cambio. Conde (2003) argumenta que “la adaptación sería entonces el ejercicio de la capacidad adaptativa, por lo que es el proceso mediante el cual el sistema finalmente puede enfrentar, manejar y sobreponerse a los riesgos u oportunidades climáticos”.

Por otro lado, Ebi *et.al.*, (2004) señalan también que en el desarrollo de proyectos de adaptación se deben considerar los siguientes objetivos: 1) Incrementar la robustez de la infraestructura, 2) Incrementar la flexibilidad y resiliencia de los ecosistemas naturales y los manejados, 3) Mejorar la capacidad adaptativa de los grupos vulnerables, 4) Revertir las tendencias que incrementan la vulnerabilidad, 5) Mejorar la capacidad de la sociedad para los posibles cambios en el clima futuros y 6) Integrar la adaptación en la planeación regional y nacional.

Es claro que podrán existir diferentes adaptaciones para una gran variedad de necesidades y de prioridades, por lo que puede cambiar el *enfoque* o el método seguido. Ebi *et.al.*, (2004) señalan la importancia de adoptar un método que se

esté llevando a cabo, o bien adoptar uno propio. Para ello recomiendan uno de los siguientes:

El método enfocado en riesgos. En éste se evalúa la vulnerabilidad climática o el riesgo en los sistemas presentes y se usan los escenarios para estimar cambios en la vulnerabilidad o el riesgo sobre el tiempo y el espacio. Por ejemplo se analizan los posibles efectos de un determinado riesgo.

El método enfocado en vulnerabilidad. Este se enfoca en la caracterización de un sistema vulnerable y se evalúa de qué manera las tendencias críticas de vulnerabilidad podrán excederse bajo un cambio climático. Por ejemplo, se determina cómo la vulnerabilidad actual puede ser afectada por riesgos climáticos futuros.

El método enfocado en políticas. En éste se prueban nuevas políticas para evaluar la robustez del sistema bajo condiciones de cambio climático, o bien se prueban políticas existentes para evaluar el manejo anticipado del riesgo bajo cambio climático. Se investiga la eficacia de una política actual o propuesta, por ejemplo, enfocada en un cambio del clima o en la exposición a este.

El Método enfocado en la capacidad adaptativa. Se refiere a la evaluación del sistema con respecto a su capacidad adaptativa actual y propone formas en las cuales la capacidad adaptativa puede incrementarse de modo que el sistema mejore sus condiciones para enfrentar el cambio climático, incluyendo la variabilidad. Un ejemplo es enfocarse en incrementar la capacidad adaptativa y remover posibles barreras de adaptación.

En el presente estudio se han utilizado los dos primeros ya que bajo el enfoque de riesgos se utilizaron los escenarios de cambio climático para estimar cambios en la vulnerabilidad de los servicios ambientales; y el enfoque de vulnerabilidad

porque se evaluaron los servicios ambientales y su vulnerabilidad bajo un cambio climático.

Un aspecto que se debe resaltar se refiere al concepto de vulnerabilidad. De acuerdo con Downing (2006), tradicionalmente se ocupó el término en materia de fenómenos naturales y epidemiología. Respecto a esta última, la definición se ocupaba del “grado de exposición al que se es susceptible por un daño debido a una exposición, perturbación o estrés y la capacidad de hacer frente, recobrase o adaptarse”. Por su parte, en lo que se refiere a los fenómenos naturales se refería al “grado de pérdida resultante de un fenómeno con potencial de daño”.

De acuerdo con el mismo autor, el término de vulnerabilidad se ha usado más comúnmente con el enfoque de riesgos naturales, enfocándose en el grado de exposición y de sensibilidad a las condiciones adversas. Generalmente corresponde a condiciones presentes (año base) aunque puede ser extendido al futuro como escenarios de referencia de la vulnerabilidad socioeconómica.

En materia de cambio climático, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001) ha promovido una definición alternativa de vulnerabilidad: “El grado al cual un sistema es susceptible de, o incapaz de hacer frente, a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y extremos” donde la vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rango de variación climática a la cuál un sistema es expuesto, su sensibilidad y su capacidad adaptativa.

Sin embargo, el enfoque del concepto de vulnerabilidad ha continuado bajo discusión científica y representa nuevas metas (Conde, 2003; Smit, 1999; O’Brian, 2004) Bajo los temas de pobreza y desarrollo una definición común es “Una medida agregada de bienestar humano que integra la exposición ambiental, social, económica y política a un rango de perturbación con capacidad de hacer daño”. De esta forma y bajo el enfoque de pobreza, *las unidades (la gente) o los sistemas*

(grupos sociales) son la unidad de exposición o los sujetos vulnerables, más que los sistemas biofísicos mismos (Downing, 2006).

La presente tesis se enfoca en evaluar la vulnerabilidad de la gente y los grupos sociales ante escenarios de cambio climático. Para llevar a cabo dicha evaluación, los factores biofísicos (los ecosistemas) y el bienestar humano (las unidades vulnerables) pueden evaluarse de manera aislada bajo diversos métodos y enfoques. Sin embargo, se considera que una forma de llevar a cabo la evaluación integrada es **bajo el enfoque de servicios ambientales**, ya que los factores biofísicos (los ecosistemas) son los que proveen bienes y servicios para el bienestar humano (las unidades vulnerables). Por ello, la presente tesis es entendida como una propuesta para evaluar el bienestar humano a partir de la obtención de servicios ambientales; es el “puente” o criterio de unión entre los dos elementos al evaluarse escenarios de cambio climático.

En el presente capítulo se describen, a partir de los resultados del capítulo anterior, la vulnerabilidad actual, el riesgo y amenaza climáticos así como las propuestas de adaptación.

6.2 Vulnerabilidad Actual

La *vulnerabilidad* “es el grado al cual una unidad de exposición o sistema es susceptible de, o es incapaz de, afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos extremos” (IPCC, 2001; Conde, 2003),

La autora señala que la vulnerabilidad “es función de la exposición del sistema, y depende también de la sensibilidad así como de la capacidad adaptativa del sistema”. Además señala que la vulnerabilidad se refiere a las amenazas climáticas que lleguen a representar daños a la economía, la vida humana, y/o el

ambiente del sistema bajo estudio (Conde, 2006a) como el caso de los servicios ambientales aquí estudiados.

De acuerdo con Downing (2004) en la evaluación de la vulnerabilidad es necesario identificar ¿quién es vulnerable?, ¿a qué?, ¿de qué forma? y ¿dónde? Lo anterior es importante en la toma de decisiones porque permite identificar qué tipo de intervención se requiere. Las respuestas a dichas preguntas y bajo el enfoque de servicios ambientales son descritas a continuación.

Los servicios ambientales estudiados en la presente tesis fueron la regulación climática, regulación y protección hídrica, provisión de agua, retención del suelo y producción de alimentos, caso del café y maíz. La regulación climática, como servicio ambiental, se refiere a la capacidad de los ecosistemas y sus procesos de mantener y regular los elementos del tiempo y del clima (NRC, 2005). Como se ha señalado en el capítulo anterior, la mayor amenaza que existe en la cuenca para el mantenimiento de dicho servicio son los cambios de uso de suelo que se han dado a lo largo de los años. Las fuertes tasas de cambio observadas en la cuenca han modificado la capacidad natural de los ecosistemas de regular los elementos del clima.

Además de lo anterior, para que los ecosistemas puedan desarrollarse y llevar a cabo sus funciones biológicas requieren de condiciones climáticas para ello. El comportamiento de las temperaturas (máximas, mínimas y medias) así como de la precipitación va a ser factor determinante del crecimiento de las plantas, la conformación de los ecosistemas y en consecuencia el otorgamiento de los servicios ambientales.

Respecto a la regulación hídrica, se refiere como servicio ambiental a la influencia que tiene la estructura de los ecosistemas para amortiguar algún cambio en su

ambiente, como por ejemplo la protección hacia tormentas e inundaciones (NRC, 2005). En este sentido, se observó que en la cuenca existen gran cantidad de cauces que tienen elevada capacidad erosiva y posibilidad de un aporte mayor de agua en caso de fuertes eventos de lluvia. Sin embargo, este servicio ambiental se encuentra ampliamente relacionado al mantenimiento de la cobertura vegetal, ya que en caso de ser removida o modificada, la capacidad de transporte de agua por sus cauces se podrá ver alterada.

Un aspecto importante es la capacidad erosiva de la lluvia sobre los suelos. De acuerdo a lo presentado en el capítulo anterior se obtuvo que en el 45% de la cuenca se presentan valores elevados de erosión del suelo a tasas mayores de 50 tn/ha. Esta pérdida de suelo por acción de la lluvia se torna en amenaza ya que los cauces transportan sedimentos y estos se van acumulando en las partes mas bajas de la cuenca.

La capacidad de provisión de agua en la cuenca depende directamente de la cantidad de lluvia que llega a ésta. Hacia donde se mueve el agua que ingresa al sistema se ha presentado en el capítulo anterior, de ahí se puede observar que del total de agua que llueve el 36 por ciento es utilizado por las plantas para sus funciones básicas, el 47% es de escurrimiento natural y el 16% es el que se estima que se infiltra para la recarga de los acuíferos.

Cualquier cambio en el comportamiento de la precipitación tendrá sus repercusiones sobre el balance hídrico en la cuenca. Asimismo, cualquier cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo también tendrá sus consecuencias. No menos importante es la sensibilidad de los ecosistemas a los comportamientos de las temperaturas, ya que de ellos también depende la capacidad de almacenamiento de agua por los suelos y su disponibilidad para las plantas.

Por último, el servicio ambiental de producción de alimentos, caso del café y maíz, señalan situaciones distintas (Cuadro 6-1). En lo que se refiere al café, se observa vulnerabilidad ya que podría disminuir la superficie con potencial natural para su cultivo. En promedio se obtuvo que para la cuenca estas disminuciones significan un 5% de la superficie para el 2020 y hasta el 30% para el 2050. Para el maíz se encontró que bajo los escenarios de cambio climático la aptitud para su cultivo se vería marginalmente mejorada hasta en un 33% para el año 2050.

Cuadro 6-1. Impactos probables del cambio climático sobre los servicios ambientales en la cuenca.

SERVICIO AMBIENTAL	IMPACTOS PROBABLES
Regulación climática	Disminución en la capacidad natural de regulación por cambio de uso del suelo Mayor albedo de la energía si hay deforestación Cambio en los regimenes regulatorios de haber migración de ecosistemas
Regulación hídrica	Seis de nueve escenarios sugieren disminuciones en la precipitación bajo cambio climático Modificación parcial en los regímenes de precipitación Mayor temperatura, por lo tanto mayor evapotranspiración Disminución en la capacidad natural de regulación de continuar con tasas elevadas de deforestación Alta capacidad de regulación por ser parte alta de la cuenca, no así para la parte media y baja.
Provisión de agua	Menor cantidad de escurrimientos superficiales por mayor evaporación Menor porcentaje de agua infiltrada Menor recarga natural de acuíferos a mediano plazo Mayor extracción de agua por crecimiento poblacional Menor capacidad de proveer agua para riego
Retención del suelo	Mayor cantidad de suelo erosionable Muy alto potencial de erosión por lluvias Potencial medio de erosión por vientos Mayor asolvamiento cuenca abajo
Producción de alimentos -café	Disminución de la superficie con potencial natural Aumento de condiciones marginales a mediano plazo
Producción de alimentos -maíz	Disminución en la aptitud natural en corto plazo Aumento de condiciones marginales para su cultivo

Por otro lado, estudios recientes para la zona (Gay, 2006) han encontrado que los cambios en el clima se manifiestan en incremento de la temperatura y aumento en la frecuencia de la sequía. También, de acuerdo con Tejeda (2006) las precipitaciones intensas se han vuelto mas frecuentes en los últimos años por el paso de huracanes y tormentas tropicales.

A partir de lo anterior se observa que la exposición a la que se encuentran sujetos los servicios ambientales en la cuenca es en general alta (Cuadro 6-2). Los servicios de regulación climática se encuentran muy expuestos a los cambios de uso del suelo y a la sequía. Hacia los primeros porque la tasa de deforestación es elevada y hacia los segundos porque se depende de la precipitación para las plantas, además de que las precipitaciones intensas no podrán ser reguladas por los ecosistemas.

Cuadro 6-2. Vulnerabilidad y exposición de los servicios ambientales en la cuenca.

SERVICIO AMBIENTAL	AMENAZA CLIMÁTICA			Cambio uso del suelo	Exposición
	Altas temperaturas	Precipitación intensa	Sequía		
Regulación climática	Medio	Medio	Alto	Muy Alto	Media-Alta
Regulación hídrica	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Baja-Alta
Provisión de agua	Medio	Alto	Alto	Alto	Alta
Retención del suelo	Bajo	Muy alto	Bajo	Medio	Baja-Media
Producción de alimentos	Alto	Alto	Alto	Medio	Alta

La regulación hídrica, del mismo modo que el anterior se encuentra expuesta hacia los cambios de uso del suelo y a las precipitaciones intensas. El cambio de cobertura vegetal primaria hacia cultivos o vegetación secundaria impide la capacidad original de regular el flujo hídrico. La provisión de agua y/o la recarga de acuíferos depende fuertemente de la precipitación y los cambios de uso del suelo, si las primeras son escasas disminuye la capacidad de infiltración, si son

intensas, la máxima capacidad de escurrimiento las conduce río abajo, además de si la cubierta vegetal disminuye o si la deforestación aumenta.

Respecto a la retención del suelo este servicio presenta una exposición de baja a media ya que las pérdidas causadas por erosión hídrica dependerán de la precipitación y su intensidad. La producción de alimentos, como servicio ambiental, es el que presenta la mayor exposición ya que depende de los comportamientos de las variables climáticas. Al tener los cultivos rangos de tolerancia en algunos casos muy definidos, si se llegaran a sobrepasar podrían estar en riesgo la productividad de éstos.

6.3 Amenaza Climática

Los espacios de amenaza propuestos por Conde (2006c) son una herramienta para visualizar aquellos años donde las anomalías en temperatura y precipitación (comparadas con el promedio del periodo 1961-1990) pueden ser de riesgo climático para algún sistema. De acuerdo con la autora (Conde, 2006b) los espacios de amenaza son contruidos usando los promedios (año base) y una medida de variabilidad (el rango inter cuartílico), el cual representa las condiciones climatológicas normales. Los años por fuera de estos rangos podrán entonces entenderse como un posible riesgo al sistema bajo estudio.

De acuerdo a lo anterior y para la estación de Atzalan, Conde *et.,al* (2006c) desarrollaron los espacios de riesgo para los meses de primavera (marzo, abril y mayo) para las anomalías en precipitación (%) y temperatura mínima (°C) (Figura 6-1). En dicha figura se presenta en un rectángulo el rango inter-cuartil del periodo 1961-1990, los años son representados por sus dos últimas cifras y los años con Niño fuerte se reconocen con una **N**. Así, los años que quedan fuera del cuadro serán aquellos que representaron algún riesgo sobre las condiciones normales. Sobre la figura anterior, es de subrayar los años Niño de 1982-1983 y de 1997-1998, que se presentaron en el capítulo 3.

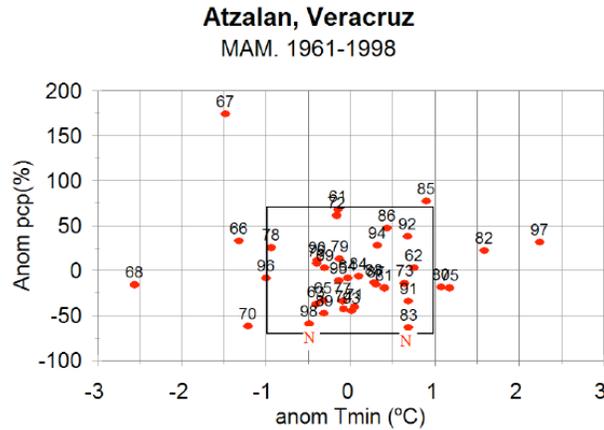


Figura 6–1. Espacios de amenaza para la estación de Atzalan, Veracruz.

Para conocer cómo fueron esos años climáticamente hablando, se pueden consultar fuentes históricas impresas. Una fuente documental que permite conocer el comportamiento y sus impactos es la base de datos DesInventar (LaRed, 2006). En el Cuadro 6-3 se presenta lo reportado por esta fuente, donde se observa que el año 1970 y 1971 fueron particularmente anormales y que en la Figura 6-1 el año 1970 se encuentra fuera del cuadro del rango inter-cuartílico.

Cuadro 6-3. Eventos extremos registrados para la zona.

Municipio	Año	Fecha	Fuente información	Evento	Observaciones
Acajete	1971	22/Mayo	El Universal	Forestal	
Coatepec	1970	25/Nov	Excélsior	Helada	Afectó a los cafetales, ocasionó grandes pérdidas a productores, el café al presentarse la helada no reúne la calidad necesaria para su comercio.
Coatepec	1971	26/Oct	El Universal	Helada	Afectó la cosecha de café, los agricultores pensaban en cambiar de producto
Coatepec	1971	26/Oct	El Universal	Sequía	
Coscomatepec	1970	25/Nov	Excélsior	Helada	Afectó a los cafetales, ocasionó grandes pérdidas a productores, el café al presentarse la helada no reúne la calidad necesaria para su comercio.
Emiliano Zapata	1970	25/Nov	Excélsior	Helada	Afectó a los cafetales, ocasionó grandes pérdidas a productores, el café al presentarse la helada no reúne la calidad necesaria para su comercio.
Huatusco	1970	25/Nov	Excélsior	Helada	Afectó a los cafetales, ocasionó grandes pérdidas a productores, el café al presentarse la helada no reúne la calidad necesaria para su comercio.
Huatusco	1972	15/Ags	El Universal	Inundación	Grandes extensiones cultivadas han resultado dañadas.
Huatusco	1970	1/NA	El Universal	Tempestad	Cerca de las tres de la tarde empezó a llover a torrentes lo que ocasionó una inundación
Perote	1970	21/May	El Universal	Helada	Campos de alfalfa dañados, varias hectáreas
Vigas de Ramírez, Las	1971	22/May	El Universal	Forestal	
Vigas de Ramírez, Las	1970	6/Ene	Excélsior	Nevada	
Xalapa	1970	25/Nov	Excélsior	Helada	Afectó a los cafetales, ocasionó grandes pérdidas a productores, el café al presentarse la helada no

Municipio	Año	Fecha	Fuente información	Evento	Observaciones
					reúne la calidad necesaria para su comercio.
Xalapa	1996	10/Ene	La Jornada	Helada	
Xalapa	1981	3/May	El Universal	Tempestad	
Xico	1999	11/Abr	La Jornada	Forestal	El fuego arrasó has. de árboles grandes.

Fuente: LaRed, 2006

De lo anterior se observa que los eventos fuertes que se han registrado históricamente en la zona son mayormente los referentes a disminuciones en la temperatura: heladas y nevadas; así como los relacionados a fuertes eventos de lluvia como tempestad e inundación.

Bajo un estudio en profundo en la zona Gay *et.al.*, (2006) encontraron por medio de una encuesta con productores que los eventos recordados con mayor frecuencia fueron la sequía de siete meses en el año 1988; helada en 1989; vientos fuertes o nortes y sequía en 1997; granizo y sequía en 1998; sequía y heladas en 2000; heladas y lluvias fuertes en 2001 y sequía en 2002. Concluyen que los eventos entre 1997 y 2002 así como la helada de 1989 coinciden con las tendencias en los registros climáticos, reportes escritos en periódicos y con información obtenida mediante entrevistas con expertos regionales.

A partir de lo anterior se obtuvieron los eventos climáticos a los que se tiene mayor riesgo en la cuenca y fueron evaluados junto con los servicios ambientales presentados en el capítulo anterior: regulación climática, regulación hídrica, provisión de agua, retención del suelo y producción de alimentos.

Para los servicios ambientales de regulación hídrica el mayor riesgo es hacia precipitaciones intensas, altas temperaturas, sequía y vientos fuertes. El primero ya que la capacidad de retención e infiltración de agua precipitada es sobre un coeficiente de escurrimiento de entre 0.3 y 0.8, observando una media de 0.5. De lo anterior se desprende que en la cuenca menos de la mitad del agua de lluvia es escurrida (41%) y ante eventos de precipitación intensa la capacidad de regulación de los ecosistemas impediría su regulación natural provocando mayores escurrimientos durante dichos eventos de precipitaciones fuertes. Caso muy

similar pero de manera inversa es hacia eventos fuertes de sequía, de no presentarse precipitaciones o disminuciones considerables en éstas, no se tendrían escurrimientos naturales en los cauces e infiltración hacia los mantos acuíferos.

Las altas temperaturas propician mayor evaporación y en consecuencia mayor evapotranspiración que para la cuenca representa poco más del 50%. El riesgo, de presentarse mayores temperaturas, sería que se presentaran desbalances en el comportamiento hídrico.

Cuadro 6-4. Riesgo actual en los servicios ambientales de la cuenca.

SERVICIO AMBIENTAL	Riesgo a:					Rango de Riesgo
	Altas temperaturas	Precipitación intensa	Sequía	Heladas	Vientos fuertes	
Regulación climática	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Regulación hídrica	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto
Provisión de agua	Alto	Medio	Alto	Bajo	Medio	Medio-Alto
Retención del suelo	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo-Alto
Producción de alimentos	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

El servicio ambiental de retención del suelo presenta riesgo alto a precipitaciones intensas y vientos fuertes, ya que son las variables detonadoras de la pérdida de éste. La erosión causada por la lluvia, *erosión hídrica*, dependerá de la duración e intensidad del evento de precipitación así como de la cobertura vegetal, entre otros. A mayor intensidad de precipitación, es mayor la capacidad erosiva de ésta, en la cuenca se encontró que las pérdidas por este factor significan más de 50 toneladas por hectárea para una superficie mayor del 40 por ciento de la cuenca estudiada. Situación muy semejante a la anterior es la que presenta la erosión causada por el viento o *erosión eólica*, donde se encontró que actualmente poco más del 90% de la cuenca no presenta este tipo de erosión, sin embargo podrá afectarse alrededor del 70 por ciento del total de la superficie si es afectada la cubierta vegetal.

En lo que se refiere a la producción de alimentos, como servicio ambiental, es el que mayor riesgo presenta a todas las variables climáticas ya que los cultivos son sensibles al comportamiento de éstas. En el caso del café los umbrales críticos en temperatura son los menores de 14°C y los mayores a 27°C; mientras que en precipitación serán los menores de 1500 mm anuales y los mayores de 3000 mm. Para el maíz, estos son los menores de 14°C y los mayores de 40°C así como los menores de 300 mm y los mayores de 1600 milímetros de lluvia anuales.

El comportamiento de la precipitación promedio anual dentro de la cuenca y para una serie histórica de años se presenta en la Figura 6-2, donde se señala de color rojo los umbrales para el cultivo del café y de color verde los propios para el maíz. Las estaciones presentadas corresponden para la parte alta y al norte de la cuenca la estación Tembladeras (2960 msnm); la parte media y al centro de la cuenca la estación Chilchotla (2220 msnm); al centro de la cuenca Teocelo (1218 msnm) y Xalapa (1399 msnm); al sur de la cuenca la estación Huatusco (1344 msnm) y por último hacia la parte baja y al este de la cuenca la estación Jalcomulco (330 msnm).

Hacia la parte centro de la cuenca se observa que el comportamiento de la precipitación y hacia el cultivo del café se encuentra dentro de los rangos antes señalados para las estaciones Teocelo y Huatusco, zonas reconocidas por su actividad agrícola. Es hacia la salida de la cuenca en la estación Jalcomulco que se observa como estos rangos para café no son los adecuados, por lo que son preferidos otros cultivos. Las estaciones Xalapa, Tembladeras y Chilchotla presentan un comportamiento más irregular para este cultivo.

Los escenarios de cambio climático para la cuenca sugieren para la temperatura incrementos que van desde 1.4°C hasta los 6°C, mientras que para la precipitación incrementos hasta un 10% y decrementos en un 10% también, como se presenta en la Figura 6-3.

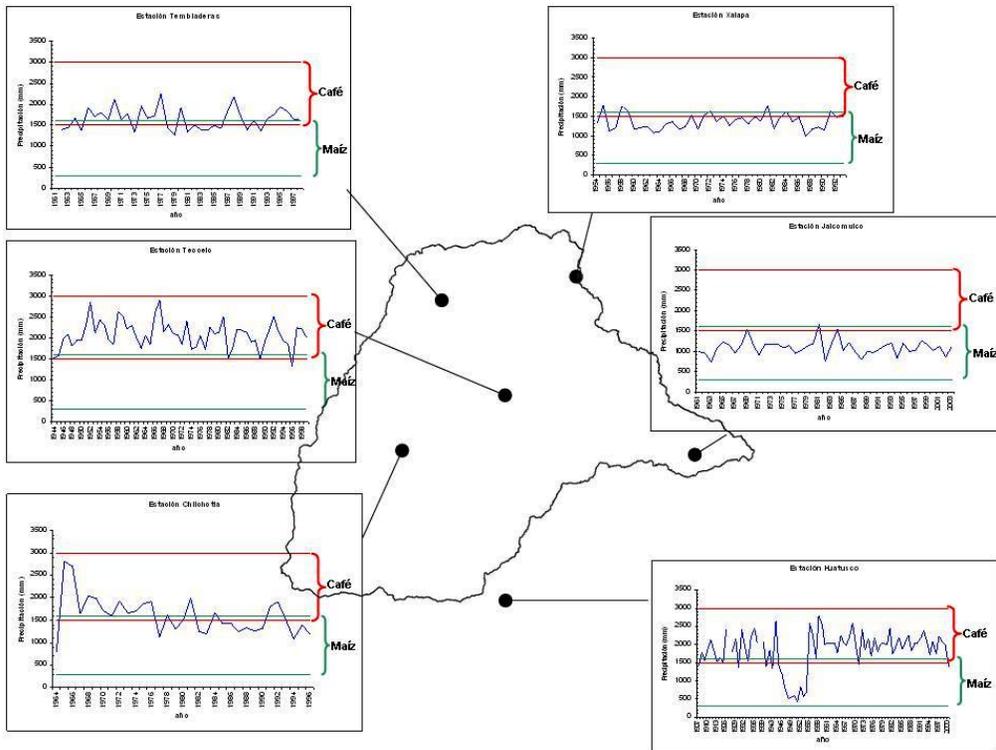


Figura 6–2. Umbrales y series históricas para maíz y café en la cuenca.

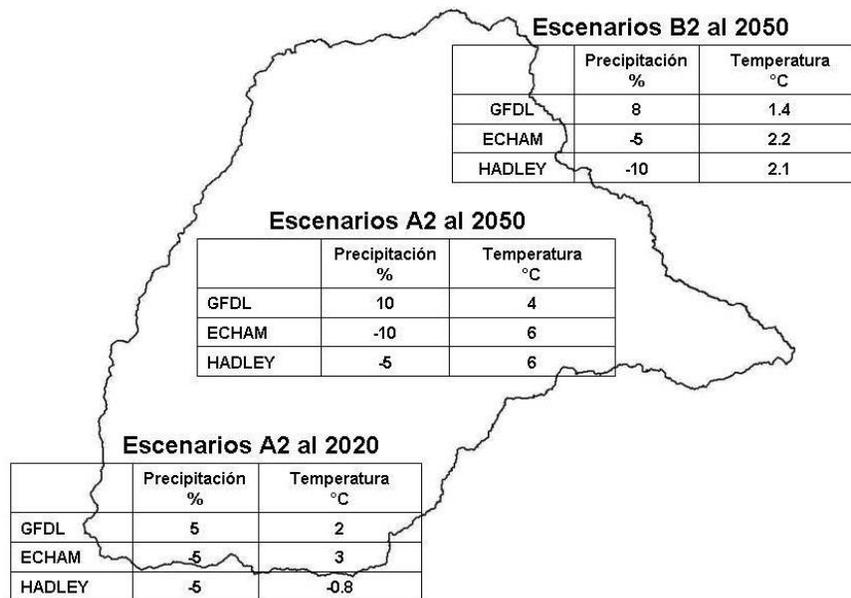


Figura 6–3. Razón de cambio en temperatura y precipitación para los modelos de cambio climático en la cuenca.

Este comportamiento de la precipitación bajo escenarios de cambio climático sugiere que la conducta que se tendrá en un futuro será dentro de los umbrales para los cultivos. Sin embargo, se encuentra oculto el comportamiento mensual y por evento de lluvia, que seguramente será el que se manifieste de una manera distinta a la actual y que no se refleja en los escenarios de cambio climático, mostrados en la Figura 6-3.

Por su parte, los servicios ambientales de regulación (climática e hídrica) y provisión (de agua) a lo largo de los años y debido a la variabilidad natural del clima, se han comportado dentro de los rangos o umbrales ya comentados. Es el servicio ambiental de retención del suelo el que requiere de mayor atención, ya que se requieren de mayores estudios para comprender el posible comportamiento de los eventos de lluvia, porque a partir de éstos se podrá evaluar cuantitativamente el riesgo a perder suelo y en consecuencia la capacidad de los ecosistemas de retenerlo.

El mayor riesgo observable bajo los escenarios de cambio climático será hacia los incrementos en la temperatura. Siendo que ésta es un reflejo del comportamiento de las temperaturas mínimas y máximas, los valores señalados apuntan a que la temperatura será una variable a ser sujeta de observación. En este sentido, los servicios ambientales de regulación (climática e hídrica) también se verán en mayor riesgo, ya que del comportamiento de la temperatura depende su condición futura. La provisión de agua, por su parte, también dependerá del balance hídrico en la cuenca.

Debido a que los servicios ambientales son entendidos como todos los beneficios otorgados a la población humana por los ecosistemas, toda la población de la cuenca recibe y se beneficia de éstos. En este sentido, los impactos probables que sobre los servicios ambientales se han identificado repercutirán sobre toda la población dentro de la cuenca e incluso más allá, cuenca abajo, pero sobre todo, en la población de alta marginalidad, ya que son ellos los que más dependen de los servicios ambientales. Algunos de estos impactos afectarán el bienestar

humano de los pobladores tanto a niveles casi imperceptibles como de mediana e intensa percepción (Cuadro 6-5).

Los impactos sobre los servicios ambientales de regulación climática se encuentran dentro del rango de casi imperceptibles por el ser humano, por lo que su vulnerabilidad futura fue evaluada como media. No así el caso de los servicios de regulación hídrica ya que el elemento agua es el factor primordial dentro de éste, cualquier modificación dentro del balance natural del ciclo hidrológico en la cuenca alterará la capacidad de proveer dicho servicio ambiental. El ser humano y sus actividades dependen del recurso hídrico por lo que su vulnerabilidad futura es alta.

Cuadro 6-5. Grupos socioeconómicos y vulnerabilidad sobre los servicios ambientales bajo CC.

SERVICIO AMBIENTAL	IMPACTOS PROBABLES	PRINCIPAL POBLACIÓN AFECTADA	VULNERABILIDAD FUTURA DE POBLACIÓN
Regulación climática	Disminución en la capacidad natural Mayor albedo de la energía Cambio en regimenes regulatorios	Toda la población en la cuenca	Media
Regulación hídrica	Disminuciones en la precipitación Modificación parcial en los regimenes de precipitación Mayor temperatura, Mayor evapotranspiración Disminución en la capacidad natural	Toda la población en la cuenca, principalmente la ocupada en el sector primario	Alta
Provisión de agua	Menor cantidad de escurrimientos superficiales por mayor evaporación Menor porcentaje de agua infiltrada Menor recarga natural de acuíferos Mayor extracción de agua Menor capacidad de proveer agua para riego	Toda la población en la cuenca, principalmente la ocupada en el sector primario.	Alta

SERVICIO AMBIENTAL	IMPACTOS PROBABLES	PRINCIPAL POBLACIÓN AFECTADA	VULNERABILIDAD FUTURA DE POBLACIÓN
Retención del suelo	Mayor cantidad de suelo erosionable Muy alto potencial de erosión por lluvias Potencial medio de erosión por vientos Mayor asolvamiento cuenca abajo	Población rural ocupada en el sector primario.	Media
Producción de alimentos - café	Disminución de la superficie con potencial natural Aumento de condiciones marginales a mediano plazo	Población dedicada al cultivo, comerciantes y consumidores	Alta
Producción de alimentos - maíz	Disminución en la aptitud natural en corto plazo Aumento de condiciones marginales para su cultivo	Población dedicada al cultivo, comerciantes y consumidores	Alta

El comportamiento de la retención del suelo como servicio ambiental se encuentra dentro de los niveles medianamente perceptibles bajo escenarios de cambio climático. La capacidad natural de retener suelo no se asimila sino hasta que se ha perdido el recurso o se presentan daños considerablemente visibles. Por su parte, cualquier cambio en el servicio ambiental de generación de alimentos será notablemente apreciable, por lo que su vulnerabilidad futura es alta.

Haciendo énfasis en las comunidades (un poco más de cuatrocientas para toda la cuenca) y en los municipios de la región de estudio, en el Anexo 1 y Anexo 2 se muestra el total de la población que puede verse afectada bajo escenarios de cambio climático sobre los cultivos del maíz y del café.

Así, en el caso del maíz y de acuerdo a los escenarios de cambio climático **A2 al año 2020**, el escenario GFDL señala que se pueden mejorar las condiciones de aptitud para el cultivo, siendo los municipios de Ayahualulco, Chilchotla y Xico los más beneficiados. Sin embargo para el escenario ECHAM las condiciones de aptitud pueden disminuir para los mismos municipios. El escenario HADLEY plantea que no habrá cambios en las aptitudes. Para los escenarios **A2 al año**

2050 los escenarios de cambio climático (GFDL y HADLEY) sugieren que las condiciones de aptitud se verán mejoradas en la mayor parte de las comunidades de la cuenca, sobre todo en los municipios de Coatepec, Cosautlan de Carvajal, Ixhuacan de los Reyes, Quimixtlan, Teocelo, Tlalnelhuayocan, Tlaltetela, Xalapa y Xico. Es el modelo ECHAM el que mantiene la tendencia de disminución de la aptitud en los mismos municipios señalados en el párrafo anterior. En el caso de los escenarios **B2 al año 2050**, los tres escenarios de cambio climático sugieren mejoras en las condiciones de aptitud para el cultivo del maíz, sólo el modelo GFDL señala que podrán presentarse pocas disminuciones en la aptitud en algunas de las localidades de los municipios de Ayahualulco, Chilchotla y Jalcomulco.

En lo que se refiere al café, los escenarios de cambio climático **A2 al año 2020**, señalan para el escenario GFDL que se mejoran ligeramente las condiciones de aptitud para el cultivo, siendo los municipios de Coatepec y Xico algunos de los mas los más beneficiados. Para el escenario ECHAM las condiciones de aptitud pueden mejorar también para los mismos municipios, a excepción de algunas localidades del municipio de Teocelo. Sin embargo el escenario HADLEY plantea que pueden haber cambios significativos en disminución de la aptitud del café en comunidades de los municipios de Acajete, Coatepec, Ixhuacán y Xico. Para los escenarios **A2 al año 2050** los escenarios de cambio climático (GFDL, ECHAM y HADLEY) sugieren que las condiciones de aptitud se verán mejoradas en la mayor parte de las comunidades de la cuenca, sobre todo en los municipios de Coatepec, Huatusco, Cosautlan de Carvajal, Ixhuacan de los Reyes, Quimixtlan, Teocelo, Tlalnelhuayocan, Tlaltetela, Xalapa y Xico. Para algunas localidades de Teocelo los modelos ECHAM y HADLEY sugieren que podría presentarse disminuciones en la aptitud. En el caso de los escenarios **B2 al año 2050**, el escenario cambio climático GFDL señala que podrán presentarse ligeros aumentos en la aptitud en algunas de las localidades de los municipios de Coatepec, Huatusco y Xalapa, no así para algunas localidades del municipio de Teocelo. Por su parte el escenario ECHAM sugiere condiciones de mejora en la

aptitud para algunas comunidades de los municipios de Acajete, Coatepec y Xico, pero también de disminución de la aptitud en municipios como Coatepec, Cosautlan, Teocelo y Xico. Por último, el modelo HADLEY señala una tendencia similar al modelo anterior, de mejora en la aptitud para localidades de los municipios de Acajete, Ayahualulco, Coatepec, Ixhuacán y Xico, y de disminución en la aptitud para Chichiquila, Cosautlán, Quimixtlan, Teocelo y Xico.

6.4 Propuestas de Adaptación

La *adaptación* es el proceso por el cual las estrategias para moderar, enfrentar y tomar ventaja de los eventos climáticos, son mejoradas, desarrolladas e implementadas (Ebi *et.al.*, 2004). Además señala que la “*capacidad adaptativa*” es la propiedad de un sistema de ajustar sus características o su comportamiento, en orden de mejorar su respuesta bajo la existente variabilidad climática o futuras condiciones climáticas.

De acuerdo con el IPCC (2001) en los sistemas naturales la adaptación se produce por reacción, mientras que en los sistemas humanos puede también ser previsor o planeada. También señala que “el mejoramiento de la capacidad de adaptación reduce la vulnerabilidad de sectores y regiones al cambio climático, incluidos los extremos y la variabilidad, y de esa forma promueve el desarrollo sostenible y la equidad”. Por ello, las propuestas aquí presentadas se inclinan sobre el cubrimiento de dos objetivos: el de fortalecer la capacidad adaptativa y el de disminuir el riesgo de la vulnerabilidad identificada. Mejorando la capacidad adaptativa se fortalecen los sistemas y mediante la disminución de la vulnerabilidad se disminuye el riesgo ante el cambio y la variabilidad climáticos.

En dicho informe del IPCC se señala que la adaptación a la pérdida de los servicios ambientales de algunos ecosistemas puede ser posible, especialmente en ecosistemas sometidos a gestión o manejados. No obstante, la adaptación a la pérdida de ecosistemas silvestres y biodiversidad puede ser difícil o imposible. En

este sentido, una primera fortaleza en la cuenca es que prácticamente toda el área se encuentra bajo alguna forma de manejo, ya sea agrícola, pecuaria o forestal, lo que supone que las acciones de adaptación pueden ser posibles.

De acuerdo con dicho informe pueden distinguirse diversos tipos de adaptación: anticipadora y reactiva, privada y pública, autónoma y planificada:

Adaptación anticipadora. Adaptación que se produce antes de que se observen impactos del cambio climático. También se denomina adaptación proactiva.

Adaptación autónoma. Adaptación que no constituye una respuesta consciente a estímulos climáticos, sino que es provocada por cambios ecológicos en los sistemas naturales y cambios en el mercado o el bienestar en los sistemas humanos. También se denomina adaptación espontánea.

Adaptación planificada. Adaptación que resulta de una decisión política deliberada, basada en la comprensión de que las condiciones han cambiado o están por cambiar y de que se requieren medidas para volver a un estado deseado, mantenerlo o lograrlo.

Adaptación privada. Adaptación iniciada y ejecutada por personas, familias o empresas privadas. La adaptación privada suele responder a un interés fundado de quienes la realizan.

Adaptación pública. Adaptación iniciada y ejecutada por cualquier nivel de gobierno. La adaptación pública suele orientarse a necesidades colectivas.

Adaptación reactiva. Adaptación que se produce después de haberse observado los impactos del cambio o variabilidad climáticos.

Las propuestas de adaptación aquí presentadas intentan ser anticipatorias, planificadas, privadas y públicas (Figura 5-4), dado el carácter del estudio. La adaptación autónoma será la que le corresponde a los ecosistemas mismos y su capacidad de continuar otorgando servicios ambientales. Las adaptaciones reactivas por su parte serán las que se buscan disminuir bajo la presente propuesta.

El primer paso hacia la formulación de la propuesta fue delimitar los servicios ambientales más representativos dentro de la cuenca. Después, se identificaron los componentes de variabilidad climática que son determinantes o estresantes dentro de los ecosistemas para el mantenimiento de los servicios ambientales. Así, se evaluó la vulnerabilidad actual y futura de los servicios ambientales ante el cambio y variabilidad climáticos, con lo que se obtuvieron los elementos críticos que son susceptibles al comportamiento climático.

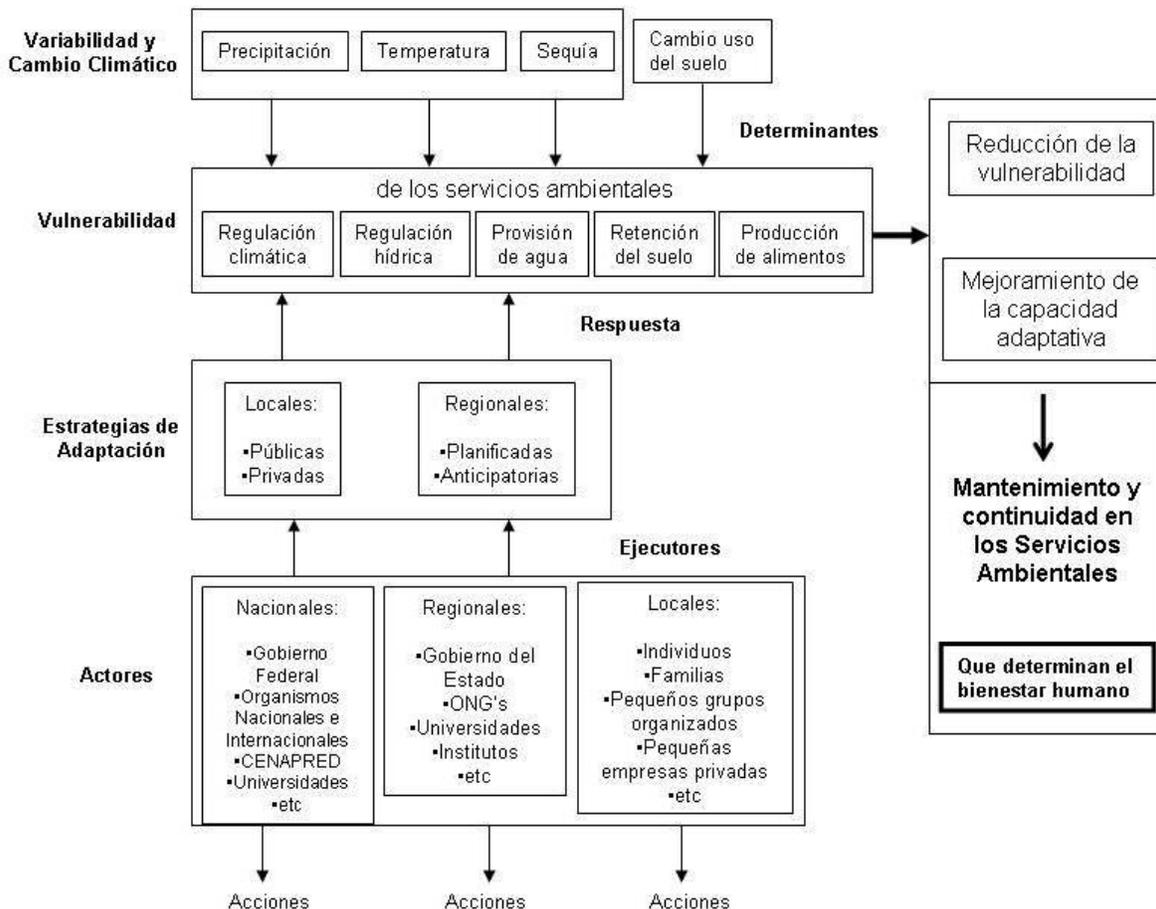


Figura 6-4. Estrategia general para el mantenimiento de los servicios ambientales.

Con lo anterior se definieron las estrategias de adaptación como una respuesta al posible comportamiento de los servicios ambientales bajo escenarios de cambio climático. Las estrategias son propuestas que podrán llevarse a cabo a nivel regional y local, a través de los ejecutores y de las acciones que éstos decidan llevar a cabo. Las metas planteadas bajo este enfoque serán entonces las de

mejorar la capacidad adaptativa y reducir la vulnerabilidad actual, para así lograr el mantenimiento y la continuidad en el otorgamiento de los servicios ambientales en la cuenca.

La primera propuesta se encamina en la creación de un organismo descentralizado a nivel estatal que funja como observador, evaluador y diseñador de propuestas de las acciones ejecutadas en el tenor del cambio y la variabilidad climáticos. Este organismo será el encargado de formular bases de datos de las investigaciones realizadas en el estado, conjuntarlas y darlas a conocer. Sus funciones también serán las de monitorear y presionar para que se cumplan las acciones que a los ejecutores les compete, así como su promoción ante la sociedad civil. Es decir, el organismo será una unidad que apoye en la planeación y toma de decisiones en todos los órganos de gobierno, principalmente a nivel estatal, para diseñar, inducir, formular y evaluar los proyectos que correspondan frente al cambio climático; para evitar acciones aisladas y conjuntar todos los esfuerzos. En adelante a este organismo propuesto se le denominará “Consejo Asesor Veracruzano en Materia de Cambio Climático” o bien “CAVC”. Quizá la base de este organismo puedan ser los Consejos Consultivos para el Desarrollo Sustentable incorporando estas nuevas atribuciones.

La intención principal es que todos los programas a nivel federal, estatal o municipal sean del conocimiento del CAVC. Así, a nivel federal los programas que tengan bajo instrumentación cada Secretaría, Comisión u otra, deberá saberlos el CAVC (Figura 6-5). La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por ejemplo, lleva a cabo diversos programas como el PROCIMAF (Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales en México); el PRONARE (Programa Nacional de Reforestación) y el PSHA (Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos), entre muchos otros, que tienen objetivos, reglas y áreas estratégicas de funcionamiento. Si el CAVC conoce estos y demás programas, el objetivo será entonces el de conocer a nivel estatal los alcances de cada programa de manera tal que permita evitar duplicidad de esfuerzos entre

instituciones en diversos niveles. Si se detectan espacios no cubiertos, entonces el objetivo será el de promover y gestionar su aplicación.

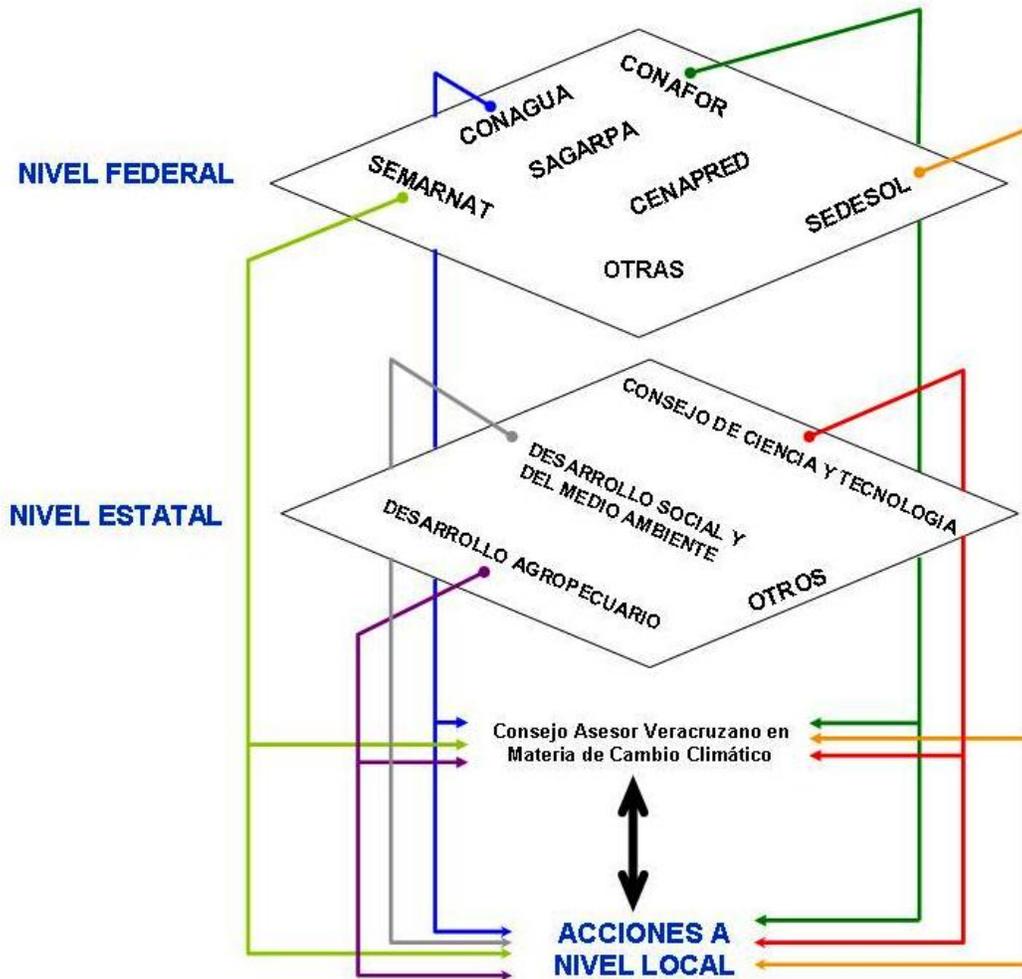


Figura 6-5. Consejo asesor propuesto y nivel de acción.

Toda vez que se ha conformado el CAVC se tendrán identificados los posibles actores y ejecutores, que en conjunto unirán esfuerzos y medidas para llevar a cabo las acciones de adaptación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático. En el caso de la presente propuesta se tomarán como caso de estudio los servicios ambientales estudiados. Las propuestas se presentan en los cuadros siguientes.

Las propuestas enfocadas a mantener y mejorar la capacidad de los ecosistemas de continuar otorgando servicios ambientales no son excluyentes entre sí, el llevar a cabo una propuesta apunta a que puede tener más de un beneficio, por lo que la columna denominada “beneficio” se limita a resaltar aquél que contribuye al servicio ambiental descrito. Además, se proponen algunos indicadores para llevar a cabo el monitorio de la acción propuesta, en este caso, el número de indicadores por propuesta puede ser mayor al expresado, puede cambiarse o diferir de acuerdo al criterio al que se le de prioridad.

En el caso de regulación climática, las propuestas se presentan en el Cuadro 6-6, donde los criterios de las propuestas son los de disminuir la vulnerabilidad identificada (Cuadro 6-5) y el de mejorar la capacidad adaptativa.

Es importante subrayar que algunos de los diferentes actores que se señalan en las propuestas cuentan, bajo sus objetivos de acción, con programas que llevan a cabo acciones similares a las propuestas. Dichas acciones no pudieron ser valoradas debido a que no son objeto del estudio, sin embargo, se proponen como una manera de continuidad en las metas de cada actor y para fortalecer sus programas.

En este sentido, es prioritario que las diferentes instituciones incorporen, como primer paso, el tema de cambio climático dentro de sus sistemas de planeación, para poder desarrollar acciones específicas de adaptación. Por ello, una propuesta para adaptación es, necesariamente, la incorporación del tema de cambio climático en todos los sectores.

En cuanto las instituciones incorporen el tema de cambio climático dentro de sus acciones, se contará con sistemas de evaluación en razón de **“adicionalidad”**, es decir, se podrá contar con mayores elementos que permitan juzgar las acciones de las instituciones separando lo que se realiza *ex profeso* en materia de cambio climático, con Recursos Humanos y Económicos explícitos.

Cuadro 6-6. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de regulación climática.

P	C	Propuesta	Actores principales			Beneficio	Indicador de monitoreo
			Federal	Estatad	Local		
C	Disminuye vulnerabilidad	Fortalecer programas de mantenimiento de la cubierta arbórea	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Aumenta la capacidad natural de regulación climática / Disminuye albedo de energía	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
C		Fortalecer programas de conservación de áreas de vegetación natural	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Aumenta la capacidad natural de regulación climática / Disminuye albedo de energía	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
C		Evitar Roza-Tumba-Quema	SAGARPA / SEMARNAT	2) 1)	C) D) E) F)	Mejora en regímenes regulatorios / Ayuda en capacidad natural	Número de incendios / Calidad del aire
C		Evitar extracción ilegal de productos forestales	PROFEPA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	C) D) E) F)	Mantiene la capacidad natural de regulación climática	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite
C		Control de tala	PROFEPA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	C) D) E) F)	Mantiene la capacidad natural de regulación climática	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite
C		Sustitución del uso de leña	SEMARNAT / CONAFOR / SEDESOL	1) 2) 3) 4)	C) D) E) F)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Verificación aleatoria en campo
C		Cartografía de riesgos y vulnerabilidades	SEMARNAT / INEGI	5) 6) 1) 2)	A) B) C)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Cartografía impresa e incluida en el programa de desarrollo
M		Establecimiento de corredores biológicos	SEMARNAT / CONABIO	6) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Mejora en regímenes regulatorios / Ayuda en capacidad natural	Numero de corredores impulsados y establecidos
M		Establecimiento de mecanismos de prevención y de respuesta a contingencias	CNA / SEGOB / SAGARPA	7) 6) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Documento impreso e incluido en el programa de desarrollo
M		Promoción de organización local y regional	SEDESOL / SAGARPA / SRA /	1) 2) 4) 5)	C) D) E) F)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Actas de reuniones, talleres con organizaciones
M		Monitoreo de contaminantes	CNA / SEMARNAT / SAGARPA / PEMEX	7) 6) 5)	A) B) C)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Análisis del comportamiento
M		Mejorar programas de aprovechamiento de maderas muertas	CONAFOR / SEMARNAT /	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Evita disminuir capacidad de regulación de los ecosistemas y mejora regímenes regulatorios	Participación de comunidades
M	Evitar la fragmentación de hábitat	SEMARNAT / CONAFOR / CONABIO	5) 6) 1) 2)	A) B) C)	Evita disminuir capacidad de regulación de los ecosistemas y mejora regímenes regulatorios	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite	
C	Mejora capacidad adaptativa	Mantenimiento de la cubierta arbórea	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
C		Prevención y control de incendios forestales	SAGARPA / SEMARNAT	2) 1)	C) D) E) F)	Evita disminuir la capacidad de regulación de los ecosistemas	Número de incendios / Calidad del aire
C		Reforestación de sitios claves	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
C		Impulso de investigaciones	CONACYT	6) 5)	A) B) C) D)	Para mantener la capacidad natural de regulación climática	Investigaciones realizadas
C		Reforestación con especies nativas	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
C		Restauración de ecosistemas	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
M		Fortalecer programas de difusión y divulgación de importancia de conservar ecosistemas	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
M		Programas de opciones productivas alternativas a los aprovechamientos forestales	CONAFOR / SAGARPA / SEMARNAT / SEDESOL	1) 2) 3) 6)	A) B) C) D)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Evaluación de los programas impulsados
M		Fortalecer programa de viveros	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Uso de suelo y vegetación / Has reforestadas
M		Fortalecer programa de educación ambiental	SEMARNAT / CONAFOR	4) 1) 2) 5)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Evaluación de los programas impulsados
M		Fortalecer programas de acceso a créditos	SEMARNAT / CONAFOR / FINANCIERA RURAL	3) 5) 6)	A) B) C) D)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Créditos otorgados
M		Fortalecer programas de participación de pobladores en administración de servicios	SECTUR / SEMARNAT /	1) 2) 3) 5)	A) B) C) D)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los	Participación de las comunidades

		Actores principales				
	turisticos	INMUJERES / SEDESOL			ecosistemas	

P=Plazo se refiere a corto (C) o mediano (M); **C=Criterio, Beneficio** se refiere al que recibe el servicio ambiental en cuanto a los impactos probables identificados; **Indicador de Monitoreo** es una propuesta para verificar el cumplimiento y logro de la propuesta planteada. **Actores estatales** se refiere a 1) Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2) Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca, 3) Secretaría de Desarrollo Económico, 4) Secretaría de Educación, 5) Universidad Veracruzana, 6) Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 7) Comisión de Agua. **Actores Locales** son A) Organizaciones de la Sociedad Civil, B) Organizaciones No Gubernamentales, C) Uniones de Ejidos, D) Ejidos, E) Familias y F) Individuos.

En materia de regulación climática, las diferentes propuestas antes señaladas están basadas en criterios de sustentabilidad, de buen manejo de los recursos naturales que garanticen la conservación y el mantenimiento de los servicios ambientales frente a escenarios de cambio climático. Sin embargo, se han planteado en esta tesis ya que se encontró que no han alcanzado el impacto necesario (por ejemplo en la reducción de las tasas de deforestación), por lo que surgen como un llamado a reforzar dichas acciones. Es deseable además que el tema de regulación climática junto con el de cambio climático se incorporen en los actuales programas que desempeñan las instituciones.

En lo que se refiere al servicio ambiental de regulación hídrica, las propuestas se presentan en el cuadro 6-7, donde los criterios de las propuestas son los mismos que para el servicio ambiental antes descrito.

El listado de propuestas o de acciones sustentables señaladas para el mantenimiento y conservación del servicio ambiental surge en el hecho de que bajo escenarios de cambio se encontró que podrán verse modificados en relación a su comportamiento actual, por lo que si no han alcanzado sus metas deberán de reforzarse dichas acciones. El fortalecimiento de las acciones en tiempo presente permite mejorar la capacidad adaptativa para un tiempo futuro. Así, las propuestas de adaptación aquí planteadas deberán de enmarcarse bajo un plan de acción que conlleve a la integración de esfuerzos con objetivos y metas claras para adaptarse a condiciones que marcan los escenarios de cambio climático.

El plan de acción propuesto deberá considerar las acciones que ya se realizan (continuidad) más un grupo de nuevas acciones (innovación) y deberá estar realizado con el respaldo de los actores y beneficiarios.

Cuadro 6-7. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de regulación hídrica.

P	C	Propuesta	Actores principales			Beneficio	Indicador de monitoreo
			Federal	Estatal	Local		
C		Fortalecer programas de manejo integral de cuencas	CONAFOR / SEMARNAT / CNA	7) 1) 2) 5) 6)	A) B) C) D) E) F)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Diferentes criterios de manejo de cuencas / No de obras
C		Evitar extracción de productos forestales	CONAFOR / SEMARNAT / PROFEPA	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite
C		Mantenimiento de cobertura arbórea	CONAFOR / SEMARNAT	2) 1)	C) D) E) F)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite
C		Evitar tala ilegal	PROFEPA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2)	C) D) E) F)	Evita que disminuya la capacidad natural de regulación hídrica	Análisis de cambio de uso de suelo con imágenes de satélite
C	Disminuye vulnerabilidad	Obras en ríos para aumentar infiltración	CNA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Número de obras
C		Barreras físicas para control de escorrentía	CNA / SEMARNAT / CONAFOR	1) 2) 3) 5)	C) D) E) F)	Evita que disminuya la capacidad natural de regulación hídrica / controla escurrimientos	Número de obras
C		Programa de acceso y difusión de información climática	CNA / SEMARNAT	5) 6) 7) 1) 2)	A) B) C) D)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Programa y su difusión / respuesta
M		Controlar el volumen del agua en los ríos	CNA / SEMARNAT / CONAFOR	7) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Evita que disminuya la capacidad natural de regulación hídrica / controla escorrentía	Información hidrométrica
M		Fortalecer programas de conservación de suelos	CONAFOR / CNA / SEMARNAT / SAGARPA	7) 6) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Programa y superficie apoyada
M		Fortalecer programas de conservación de agua	CNA / SAGARPA / SEMARNAT	1) 2) 5) 7)	A) B) C) D)	Evita que disminuya la capacidad natural de regulación hídrica	Programa y superficie apoyada
M		Obras para encauzamiento de escorrentía	CNA / SEMARNAT / SAGARPA	7) 5) 6)	A) B) C) D)	Evita que disminuya la capacidad natural de regulación hídrica	Número de obras
M		Mantenimiento de rastrojo en zonas agrícolas	SAGARPA / SEMARNAT	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Evita pérdidas por evapotranspiración / Mejora capacidad natural	Evaluación en campo
C	Mejora capacidad adaptativa	Control de cárcavas	CNA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5) 7)	A) B) C) D) E) F)	Evita pérdida del suelo / Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Número de obras
C		Impulso de cultivos en contorno	SAGARPA / SEMARNAT	2) 1)	C) D) E) F)	Evita pérdidas / Mejora capacidad natural	Número de obras / Programas
C		Fortalecer programas de terraceo	SAGARPA / SEMARNAT	1) 2)	C) D) E) F)	Evita pérdida del suelo / Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Programa y número de obras
C		Toma de decisiones participativamente	CONAFOR / SEMARNAT / SEDESOL	1) 2) 6) 5) 7)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Número de talleres participativos
M		Centros de producción y propagación de especies vegetales nativas y de interés	CONAFOR / SEMARNAT / CONABIO	6) 5) 1) 2) 3)	A) B) C) D) E) F)	Mejora la capacidad natural de regulación hídrica	Número de centros
M		Fortalecer programas de educación ambiental	SEMARNAT / CONAFOR	4) 1) 2) 5)	A) B) C) D) E) F)	Evita disminuir / aumenta la capacidad de regulación de los ecosistemas	Evaluación de los programas impulsados

P=Plazo se refiere a corto (C) o mediano (M); C= Criterio, Beneficio se refiere al que recibe el servicio ambiental en cuanto a los impactos probables identificados;

Indicador de Monitoreo es una propuesta para verificar el cumplimiento y logro de la propuesta planteada. Actores estatales se refiere a 1) Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2) Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca, 3) Secretaría de Desarrollo Económico, 4) Secretaría de Educación, 5) Universidad Veracruzana, 6) Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 7) Comisión de Agua. Actores Locales son A) Organizaciones de la Sociedad Civil, B) Organizaciones No Gubernamentales, C) Uniones de Ejidos, D) Ejidos, E) Familias y F) Individuos.

En lo que se refiere al servicio ambiental de provisión de agua, las propuestas se presentan en el cuadro 6-8, donde los criterios de las propuestas son los mismos que para el servicio ambiental antes descrito. Las acciones señaladas se encuentran muy relacionadas con el servicio ambiental de regulación hídrica por lo que las propuestas pueden integrarse con dicho servicio.

Cuadro 6-8. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de provisión de agua.

Plazo	Criterio	Propuesta	Actores principales			Beneficio	Indicador de monitoreo
			Federal	Estatal	Local		
C	Disminuye vulnerabilidad	Implementar / mejorar programas de captación de agua de lluvia	CONAFOR / CNA / SEMARNAT	1) 2) 5) 7)	A) B) C) D) E) F)	Aumenta la capacidad de proveer agua / disminuye la presión sobre el recurso	Número de obras y cantidad de agua captada
C		Fortalecer programas de vigilancia y control de uso de agua	CNA / CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 7)	A) B) C) D) E) F)	Evita extracción de agua / aumenta la capacidad de proveer agua	Programa y logros
C		Evitar extracción de productos forestales	SAGARPA / SEMARNAT / PROFEPA	7) 2) 1)	C) D) E) F)	Mejora la capacidad de infiltrar y proveer agua	Análisis de cambio de uso de suelo
M		Adopción de tecnologías de bajo consumo de agua	SAGARPA / SEMARNAT / CONAFOR	7) 6) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Aprovechamiento eficiente del agua	Eficiencia en el uso de agua
M		Obras de reducción de velocidad del viento	CONAFOR / CNA / SAGARPA	7) 6) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Evita evaporación	Número de obras
C	Mejora capacidad adaptativa	Reducción de la contaminación orgánica y de nitratos en ecosistemas acuáticos	SAGARPA / CNA / SEMARNAT	7) 1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Provee mejor calidad de agua	Estudios de calidad del agua
C		Construcción de infraestructura para potenciar la recarga de acuíferos	CONAFOR / CNA / SAGARPA / SEMARNAT	5) 7) 2) 1)	C) D) E) F)	Mayor porcentaje de agua que se infiltra en acuíferos	Número de obras
C		Fortalecer programas de difusión y divulgación de importancia de conservar ecosistemas	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5) 6)	A) B) C) D) E) F)	Mejora la calidad y cantidad de agua	Programas y difusión
C		Fortalecer los programas de educación ambiental	SEMARNAT / CONAFOR	4) 6) 5)	A) B) C) D)	Mejora la calidad y cantidad de agua	Programas y difusión
M		Plantas de tratamiento de agua	CNA / SEMARNAT	1) 2) 3) 5)	A) B) C) D) E) F)	Mejora la calidad y cantidad de agua	Número de plantas
M		Protección de fuentes de agua potable	CONAFOR / SAGARPA / SEMARNAT / SEDESOL	1) 2) 3) 6)	A) B) C) D)	Garantiza la disponibilidad de agua	Obras y Programas

Plazo se refiere a corto (C) o mediano (M); **Beneficio** se refiere al que recibe el servicio ambiental en cuanto a los impactos probables identificados; **Indicador de Monitoreo** es una propuesta para verificar el cumplimiento y logro de la propuesta planteada. **Actores estatales** se refiere a 1) Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2) Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca, 3) Secretaría de Desarrollo Económico, 4) Secretaría de Educación, 5) Universidad Veracruzana, 6) Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 7) Comisión de Agua. **Actores Locales** son A) Organizaciones de la Sociedad Civil, B) Organizaciones No Gubernamentales, C) Uniones de Ejidos, D) Ejidos, E) Familias y F) Individuos.

En el Cuadro 6-9 se presentan las propuestas para el mantenimiento y continuidad del servicio ambiental de retención del suelo. Como se ha señalado en párrafos anteriores, estas líneas de acción propuestas se centran en el hecho de que no se ha alcanzado la conservación del servicio ambiental a través del tiempo, por lo que es menester plantearlas como un llamado a su refuerzo como medida adaptativa. Así, la mejor propuesta de adaptación que se puede hacer para la conservación de este servicio ambiental esta soportada en el diseño y rediseño de los planes de

conservación de suelos que actualmente se puedan estar llevando a cabo. El diseño y rediseño de los planes deberá considerar incluyentemente el cambio climático.

Cuadro 6-9. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de *retención del suelo*.

Plazo	Criterio	Propuesta	Actores principales			Beneficio	Indicador de monitoreo
			Federal	Estatad	Local		
C	Disminuye vulnerabilidad	Reducir la posibilidad de escurrimientos destructivos e inundaciones cuenca abajo	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5) 7)	A) B) C) D) E) F)	Menor asolvamiento cuenca abajo	Asolvamiento cuenca abajo / número de eventos
C		Evitar extracción de productos forestales	CONAFOR / SEMARNAT / PROFEPA	1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Mayor capacidad de retención del suelo	Análisis de cambio de uso de suelo
M		Fortalecer los programas de manejo de escorrentía	CONAFOR / SEMARNAT / CNA	5) 1) 2) 7)	A) B) C) D)	Mayor capacidad de retención del suelo	Número de obras
M		Impulso de barreras vivas	CONAFOR / CNA / SEMARNAT	7) 5) 1) 2)	A) B) C) D)	Mayor capacidad de retención del suelo / evita pérdidas de suelo	Número de obras
M		Mantenimiento y mejora de barreras vivas	CONAFOR / CNA / SAGARPA	1) 2) 5)	C) D) E) F)	Mayor capacidad de retención del suelo / evita pérdidas de suelo	Número de obras
C	Mejora capacidad adaptativa	Fortalecer programas de conservación de suelos	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5)	A) B) C) D) E) F)	Mayor capacidad de retención del suelo / evita pérdidas de suelo	Número de obras
C		Mejorar la conservación de agostaderos	SAGARPA / SEMARNAT	5) 2) 1)	C) D) E) F)	Mayor capacidad de retención del suelo / evita pérdidas de suelo	Número de obras
C		Recuperación de suelos degradados	CONAFOR / SEMARNAT	1) 2) 5)	A) B) C) D) E) F)	Mantenimiento de suelos	Número de obras
M		Control de estabilidad de laderas	CONAFOR / SEMARNAT	5) 1) 2)	A) B) C) D) E) F)	Mantenimiento de suelos / Mayor capacidad de retención	Número de obras
M		Aumentar y/o mantener la cubierta vegetal	CONAFOR / SAGARPA / SEMARNAT /	1) 2) 5) 7)	A) B) C) D)	Mayor capacidad de retención del suelo	Análisis de cambio de uso de suelo / número de obras

Plazo se refiere a corto (C) o mediano (M); **Beneficio** se refiere al que recibe el servicio ambiental en cuanto a los impactos probables identificados; **Indicador de Monitoreo** es una propuesta para verificar el cumplimiento y logro de la propuesta planteada. **Actores estatales** se refiere a 1) Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2) Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca, 3) Secretaría de Desarrollo Económico, 4) Secretaría de Educación, 5) Universidad Veracruzana, 6) Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 7) Comisión de Agua. **Actores Locales** son A) Organizaciones de la Sociedad Civil, B) Organizaciones No Gubernamentales, C) Uniones de Ejidos, D) Ejidos, E) Familias y F) Individuos.

Por último, para el servicio ambiental de provisión de alimentos, las propuestas se presentan en el Cuadro 6-10. El grupo de propuestas presentadas están formuladas como base y transición hacia el desarrollo sustentable como marco general de adaptación a los efectos del cambio climático. Se propone como medida de adaptación el buen manejo de los sistemas agrícolas a través de diferentes acciones. Aunque los escenarios de cambio climático suponen ligeros aumentos en la aptitud para los cultivos, la transición hacia un manejo sustentable es la mejor medida adaptativa que se puede proponer.

Cuadro 6-10. Propuestas para el mantenimiento de los servicios ambientales de provisión de alimentos.

Plazo	Criterio	Propuesta	Actores principales			Beneficio	Indicador de monitoreo
			Federal	Estatal	Local		
C	Disminuye vulnerabilidad	Implementar cultivos y variedades resistentes	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mayor resistencia de los cultivos	Varietades y superficie
C		Evitar Roza-Tumba-Quema	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Disminuye riesgo de incendios	Monitoreo de incendios
C		Promover el cultivo de conservación	SAGARPA	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Superficie / número de obras
C		Periodos de descanso de suelos	SAGARPA	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Superficie / localización
M		Diversificación y reconversión de productos	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mayores oportunidades	Productos
M		Cambios en prácticas de cultivo	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Superficie / localización / talleres
M		Adopción de tecnologías de bajo consumo de agua en uso agrícola	SAGARPA / INIFAP / CNA	1) 2) 5) 6) 7)	C) D) E) F)	Mayor eficiencia en el uso	Programa y obras
M		Favorecer el control biológico de plagas	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Superficie / localización
M		Promoción de prácticas agrícolas sustentables	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural	Superficie / localización
M		Mejora capacidad adaptativa	Almacenamiento y conservación de alimentos	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mayores oportunidades
C	Fortalecer programas de conservación de suelos		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Programas y obras
C	Fortalecer programas de ahorro de agua		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Programas y obras
C	Rotación de cultivos		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Localización y monitoreo
C	Fortalecer sistemas de alerta temprana de eventos meteorológicos extremos		SAGARPA / INIFAP / CNA	1) 2) 5) 6) 7)	C) D) E) F)	Ayuda en toma de decisiones	Número de eventos / Difusión
C	Aumentar el contenido de materia orgánica en suelos		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Obras y superficie beneficiada
M	Identificación y determinación de cultivos más rentables		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mayores oportunidades	Estudios técnicos / implementación
M	Uso de plaguicidas orgánicos de baja residualidad		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Localización y monitoreo
M	Fortalecer programas de acceso a créditos		SAGARPA / FIANCIERA RURAL	1) 2)	A) B) C)	Mayores oportunidades	Programa y apoyos otorgados
M	Fomentar el establecimiento de cultivos orgánicos		SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Localización y monitoreo
M	Rotación de cultivos y métodos relacionados	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Localización obras y monitoreo	
M	Estimular actividad biológica de en suelos	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 5) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Programas y apoyos	
M	Favorecer el uso de abonos orgánicos	SAGARPA / INIFAP	1) 2) 3) 6)	C) D) E) F)	Mejora la aptitud natural / disminuye condiciones marginales	Programas y apoyos	

Plazo se refiere a corto (C) o mediano (M); **Beneficio** se refiere al que recibe el servicio ambiental en cuanto a los impactos probables identificados; **Indicador de Monitoreo** es una propuesta para verificar el cumplimiento y logro de la propuesta planteada. **Actores estatales** se refiere a 1) Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2) Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca, 3) Secretaría de Desarrollo Económico, 4) Secretaría de Educación, 5) Universidad Veracruzana, 6) Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 7) Comisión de Agua. **Actores Locales** son A) Organizaciones de la Sociedad Civil, B) Organizaciones No Gubernamentales, C) Uniones de Ejidos, D) Ejidos, E) Familias y F) Individuos.

No cabe lugar a duda que las acciones que llevan a cabo los diferentes actores e instituciones tienen sus objetivos claros y sus metas específicas, por lo que la principal propuesta para llevar a cabo medidas de adaptación exitosas se centra en el impulso de contar con una política nacional y estatal en cuanto a materia de cambio climático se refiere, que puedan incluir éstas y otras acciones enfocadas a esta materia.

Un esfuerzo reconocido ha sido el que se ha llevado a cabo a través del Consejo Consultivo de Cambio Climático, quien es el Órgano de Consulta de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, impulsado fuertemente por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), pero también con la presencia de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Secretaría de Economía (SE), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Relaciones Exteriores (SER). En él, se han llevado a cabo consultas públicas para lograr formular una “Estrategia Nacional de Acción Climática³” a nivel federal.

De acuerdo con el documento, se identifican diversas acciones y oportunidades de mitigación de emisiones en el sector forestal, agrícola y ganadero, sin embargo, muy pocas medidas de adaptación. Así por ejemplo, para el sector forestal se proponen, de acuerdo a los programas ya existentes: 1) La conservación del carbono (mediante el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable, Detección y Prevención de Incendios Forestales, Pago por Servicios Ambientales, Inspección, Vigilancia y Combate a la Tala Clandestina y Conservación de Ecosistemas Forestales); 2) La Captura de Carbono (mediante Reforestación y reconversión de terrenos forestales, Mecanismos de Desarrollo Limpio Forestal y Proyectos independientes); 3) Sustitución del Carbono y 4) Investigación y Desarrollo Forestal (mediante el Programa Mexicano de Carbono y el Fondo Sectorial SEMARNAT/CONACYT).

El documento es una estrategia donde se identifican diversas acciones de mitigación de emisiones y muy pocas de adaptación, pero es carente de un lineamiento general que marque las directrices y que sea la columna vertebral de las acciones a ejecutarse frente al cambio climático. No se señala de manera clara la diferencia entre las verdaderas acciones que en materia de cambio climático se deben ejecutar y las acciones que actualmente se desarrollan por las

³ <http://www.semarnat.gob.mx/spp/sppa/dgapcc/enac.html>

diferentes instituciones. Aunque lo anterior denota gran interés institucional, aún falta camino que recorrer para que se observen cambios que incorporen estos criterios.

A nivel estatal, el panorama también es alentador. Dentro del Plan Veracruzano de Desarrollo 2005-2010 impulsado por el actual gobernador⁴, y en el Capítulo VII “Medio Ambiente”, se hace especial énfasis como objetivo prioritario a “mantener los servicios de los ecosistemas, capacidad de producir agua, para conservar la fertilidad del suelo, regular el clima y sostener la máxima riqueza biológica posible”. Señala además líneas de acción muy similares a las propuestas aquí señaladas, además de proyectos detonadores que, de llevarse a cabo, contribuirían al cuidado y conservación sustentable de los servicios ambientales. No se encontró dentro del plan una línea clara en materia de cambio climático, aunque se sabe que el Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología así como la Universidad Veracruzana tienen ya grandes avances en esta materia, ya que de acuerdo a comunicación personal (Tejeda, 2006) se sabe que a la fecha se trabaja en la conformación de un Plan Estatal de Acción Climática.

Finalmente, la percepción social de un cambio en los patrones climáticos globales, regionales y locales se manifiesta constantemente, tanto en charlas informales como en la comunidad científica. Dentro del Consejo Consultivo de Cambio Climático se realizó una consulta electrónica enfocada en entender la percepción social que hay en el país sobre el clima y además del cambio climático. Los resultados son interesantes. Para el estado de Veracruz, todos los encuestados coincidieron que el clima ha cambiado a lo largo de su vida, particularmente en que hace más frío y más calor que antes.

Señalan también que, sin lugar a dudas, el sector primario será el más afectado, particularmente el de subsistencia. Las causas son varias, entre ellas las más sugeridas son a que inicien tarde las lluvias, mayor temperatura, a que llueva muy

⁴ <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/url/page/veracruz/Difusion/planveracruzanodedesarrollo>

fuerte y a los “nortes” o frentes fríos. En lo que se refiere al tiempo, la mitad de los encuestados sugieren que los mayores efectos se percibirán antes de 15 años y la otra mitad que se manifestarán entre 15 y 30 años.

Estos últimos resultados tienen especial significado para la cuenca estudiada, ya que el sector primario es aquél a partir del cuál más beneficios se obtienen de los ecosistemas: el sector agrícola (servicios ambientales de producción de alimentos) y el sector forestal (servicios ambientales de regulación climática e hídrica) son casos de estudio aquí presentados y reflejados por las personas como importantes dentro de la cuenca. Así mismo, los escenarios de cambio climático utilizados reflejan el sentir de la gente.

Por último, los resultados de esta tesis se presentarán a grupos de productores de café y maíz en la región, a investigadores involucrados en el Plan Estatal de Acción Climática así como a tomadores de decisiones de diversos organismos como SAGARPA, DDR, consejos de cuencas, etc. Para ello, se cuenta con recursos del “Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica” (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Las variaciones en las condiciones climáticas sobre la región de estudio se hacen presentes en años con fenómeno de El Niño así como también cuando hay presencia de tormentas tropicales. Esta variabilidad climática influye sobre el otorgamiento de los servicios ambientales por los ecosistemas. En presencia de años Niño la precipitación de primavera y verano disminuye aproximadamente la mitad de lo esperado. Sin embargo, cuando hay presencia de tormentas tropicales en el Golfo de México que tocan tierra, la precipitación que deja tras su paso es considerablemente mayor, sobre todo con eventos fuertes de lluvia.

Bajo escenarios de cambio climático, estas variaciones futuras son proyectadas para el año 2020 con incrementos en un 5% y disminuciones de hasta el 10% en los rangos de precipitación presentes en la cuenca. Para el año 2050 se prevén cambios que vayan desde un 10% más hasta un 10% menos para la misma variable. Aunque no fue objeto de estudio en el presente documento, estas variaciones suponen algún cambio en el comportamiento de los servicios ambientales bajo futuros eventos de fenómenos como tormentas tropicales y El Niño.

Los impactos probables de la variabilidad climática futura identificados sobre los servicios ambientales en la cuenca de estudio son:

Regulación climática. Disminución en la capacidad natural de regulación por cambio de uso del suelo, mayor albedo de la energía si hay deforestación y cambio en los regímenes regulatorios de haber migración de ecosistemas.

Regulación hídrica. Seis de nueve escenarios sugieren disminuciones en la precipitación bajo cambio climático, modificación en los regímenes de precipitación, mayor temperatura, por lo tanto mayor evapotranspiración, disminución en la capacidad natural de regulación de continuar con tasas elevadas de deforestación y alta capacidad de regulación por ser parte alta de la cuenca, no así para la parte media y baja.

Provisión de agua. Menor cantidad de escurrimientos superficiales, menor porcentaje de agua infiltrada, menor recarga natural de acuíferos a mediano plazo, mayor extracción de agua por crecimiento poblacional y menor capacidad de proveer agua para riego.

Retención del suelo. Mayor cantidad de suelo erosionable, muy alto potencial de erosión por lluvias, potencial medio de erosión por vientos y mayor asolvamiento cuenca abajo.

Producción de alimentos, café. Disminución de la superficie con buen potencial natural y aumento de condiciones marginales a mediano plazo.

Producción de alimentos, maíz. Disminución en la aptitud natural en corto plazo y aumento de condiciones marginales para su cultivo

Estos impactos probables identificados señalan que la exposición a la que se encuentran sometidos los servicios ambientales bajo escenarios de cambio climático es en general *alta*, repercutiendo sobre toda la población que en la cuenca habita, pero sobre todo en aquellos con alto grado de marginación

Ante estos impactos identificados, sólo se podrá mantener y potenciar el otorgamiento de los servicios ambientales por los ecosistemas si se consideran medidas de adaptación propias para la cuenca estudiada. Por ello, se proponen medidas que permiten reducir la vulnerabilidad a la vez que mejoran la capacidad adaptativa de los ecosistemas frente al cambio y variabilidad climáticos.

En este sentido, el enfoque de servicios ambientales aplicado permitió valorar los factores físicos de la cuenca, relacionándolos con el bienestar humano a partir de la obtención de dichos servicios, por lo que fue posible evaluar su interrelación.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Rosas Federico y Luna Díaz-Peón Antonio. 2006. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al estado de Veracruz en el año 2005. Pág. 53-67. En: Tejeda Martínez Adalberto Y Welsh Rodríguez Carlos. 2006. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz. Edición preliminar. Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología. Xalapa, Veracruz. 432 pp.
- Ahrens, C.D. 1994. Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment. 5th ed. West Publishing Co. St Paul, MN. 544 pp.
- Barzev Radoslav. 2002. Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. Corredor Biológico Mesoamericano. CCAD. Serie Técnica #4. Managua. Nicaragua. 150pp.
- Becerra Moreno Antonio. 2005. Escorrentía y Erosión de Suelos. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 248 pp.
- Burton, I. 1997. "Vulnerability and Adaptive Response in the Context of Climate and Climate Change." Climatic Change, 36: 185 – 196.
- Campos Aranda D.F. 1992. Proceso del ciclo Hidrológico. México. Universidad Autónoma de San Luís Potosí. México.
- Capalcera, F. 1978. El problema de abastecimiento de agua potable de Xalapa. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana. Veracruz, Veracruz. México.
- CCCma. 2006. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. Modelo Canadiense de Cambio climático. En Internet: http://www.cccma.ec.gc.ca/eng_index.shtml
- Challenger, Anthony. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, Pasado, Presente y Futuro. CONABIO, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre. S.C. México, D.F. 847 pp.
- Challenger, Anthony. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. Págs. 17-44. En: Sanchez, Oscar, Vega, E., Peters E. y Monroy Vilchis O. (Editores) 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. INE. México. 315 pp.
- CNA. (Comisión Nacional del Agua). 2003. Programa Hidráulico regional 2002- 2006 Gerencia Regional X Golfo Centro. Comisión Nacional del Agua. México. 116 pp.
- CONABIO. (Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad). 1988. Carta de Climas de la República Mexicana (Clasificación climática de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONABIO-Maderey Laura E. 1990. Carta de Evapotranspiración real. En: Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México. Vol. II Escala 1:4,000,000. Instituto de Geografía UNAM. México
- CONAPO. (Consejo Nacional de Población). 1995. Índices de marginación por entidad federativa. Resultados principales. Consejo Nacional de Población. CONAPO – Secretaría de Gobernación. México. 162 pp.
- CONAPO. (Consejo Nacional de Población). 2001. Población total, indicadores socioeconómicos, índice y grado de marginación, lugar que ocupa en el contexto nacional y estatal por municipio, al año 2000. Consejo Nacional de Población. CONAPO – Secretaría de Gobernación. México.
- CONAPO. (Consejo Nacional de Población). 2002. Proyecciones de la población de México. 2000-2050. Consejo Nacional de Población. CONAPO – Secretaría de Gobernación. México. 32 pp más anexos estatales.
- CONAFOR. (Comisión Nacional Forestal). 2004. Prevención y combate de incendios. Biodiversitas. Boletín bimestral de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO. Núm. 52.11-15. Internet: <http://www.conabio.gob.mx/otros/biodiversitas/doctos/pdf/biodiv52.pdf>
- Conde, Álvarez Cecilia, Ferrer Rosa María, Araujo Raquel, Gay Carlos, Magaña Víctor, Pérez José Luís, Morales Tomás y Orozco Saturnino. 1999. El Niño y la Agricultura. Pág. 103-136.

- En: Magaña, Víctor. (editor). 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. México. UNAM, IAI; SG. 228 pp.
- Conde, Álvarez Cecilia. 2003. Cambio y variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. UNAM. 300 p.
- Conde Cecilia y Palma Beatriz. 2006a. Escenarios de riesgo para el territorio Veracruzano ante un posible cambio climático. Págs. 285-299 En: Tejeda Martínez Adalberto Y Welsh Rodríguez Carlos. 2006. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz. Edición preliminar. Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología. Xalapa, Veracruz. 432 pp.
- Conde C., Ferrer R. y Orozco S. 2006b. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera* 19(3), 181-194.
- Conde C., Vinocur M., Gay, C., Seiler R. y Estrada F. 2006c. Climatic threat spaces as a tool to assess current and future risk: Case studies in México and Argentina. AIACC Working Paper No. 30. Washington. USA. 56 pp.
- Costanza, R., R. D'Arge, R.S. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260.
- Cruz Hernández Enrique, Rendón Hernández Rogelio Javier y Valencia Castillo Rosario. 2006. Valoración de pérdidas provocadas en el sector productivo por el huracán Stan en el estado de Veracruz. Pág. 123-134. En: Tejeda Martínez Adalberto Y Welsh Rodríguez Carlos. 2006. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz. Edición preliminar. Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología. Xalapa, Veracruz. 432 pp.
- Daily, G.C. 1997. Introduction: what are ecosystem services? In: *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. [Daily, G.C. (ed.)]. Island Press, Washington D.C. USA, pp 1-10. 392 pp.
- DeBarry, Paul. 2004. *Watersheds: Processes, Assessment and Management*. John Wiley & Sons, Inc. USA. 700 p.
- De Groot, R.S., M. Wilson and R. Boumans. 2002. A typology for description, classification and valuation of ecosystem function, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), pp 393-408.
- Delgadillo Macías Javier, Aguilar Ortega Teodoro y Rodríguez Velásquez Daniel. 1999. Los aspectos económicos y sociales de El Niño. Pág. 181-216. En: Magaña, Víctor. (Editor). 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. México. UNAM, IAI; SG. 228 pp.
- Downing Thomas and Patwardhan Anand. 2004. Assessing Vulnerability for climate Adaptation. Technical paper #3. "User's Guidebook for the Adaptation Policy Framework". United Nations Development Program UNDP. 23 pp.
- Downing, T.E., Aerts, J., Soussan, J., Barthelemy, O., Bharwani, S., Ionescu, C., Hinkel, J., Klein, R.J.T., Mata, L.J., Martin, N., Moss, S., Purkey, D. and Ziervogel, G. 2006. Integrating social vulnerability into water management. SEI Working Paper and Newater Working Paper No. 4. Oxford: Stockholm Environment Institute.
- Ebi Kristie, Lim Bo and Yvette Aguilar. 2004. Scoping and designing an Adaptation Process. Technical paper #1. "User's Guidebook for the Adaptation Policy Framework". United Nations Development Program UNDP. 14 pp.
- ECHAM. 2006. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg. En Internet: <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam.html>
- FAO. (United Nations Organization for Food and Agriculture). 1994. ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS. FAO. Rome, Italy.
- Figuroa S., B., A. Amante O., H. G. Cortes Torres, J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M., Rodríguez Olvera y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelos por erosión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Mex. 856 pp.
- FitzPatrick, Eward Adsil. 1993. Introducción a la ciencia de los suelos. Primera edición. Edit. Trillas. México DF. 288 pp.

- Flores, M., Araujo R., y Betancourt E. 2000. Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para Maíz de temporal en México ante el cambio climático. Págs. 103-118. En: Gay C. [compilador]. 2000. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los Estudios de la vulnerabilidad del país. INE-UNAM-US Study Program. 220 pp.
- Francisco Robles Janette. 2003. Factores Geográfico – Físicos que rigen el comportamiento fluvial y el balance hídrico de la cuenca alta del Río Sola de Vega, Estado de Oaxaca. Tesis profesional para obtener el grado de Lic. en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gallina Tessaro Sonia y Hernández Arturo. 2005. Diagnóstico de las principales problemáticas ambientales de Veracruz. Mesa de Medio Ambiente y Recursos Hídricos. Memorias del Foro Diagnóstico sobre Ciencia y Tecnología de Veracruz. 26 mayo de 2005. Gobierno del Estado de Veracruz. Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología. Xalapa, Veracruz.
- García, Enriqueta. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climático de Köppen con aplicaciones a la República Mexicana. 5ta Edición. Instituto de Geografía. UNAM. México D.F. 156 pp.
- García-Coll Isabel, Avelino Martínez A., Ramírez A., Niño Cruz A., Rivas A. J., y Domínguez Leticia. 2004. La relación agua – bosque: Delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del Río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. Pág. 99-115. En: Cotler, Helena. 2004. El manejo integral de cuencas en México. SEMARNAT - INE. México. D.F. 264 pp.
- Gay Carlos. 2006. Integrated Assessment of Social Vulnerability and Adaptation to Climate Variability and Change Among Farmers in Mexico and Argentina. Final Report to AIACC LA-29. AIACC. International START Secretariat. Washington, DC. USA. 239 pp.
- Genthon, C. J. Barnola, D. Raynaud, C. Lorius, N. Barkov, Y. Korotkevich and V. Kotlykov. 1987. Vostok ice core: climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*, 329: 414-418.
- Gobierno del Estado de Veracruz. 2005. Plan Veracruzano de Desarrollo 2005-2010. Capítulo VII Medio ambiente. Xalapa, Veracruz. 146 pp.
- GFDL. 2006. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Modelo Norteamericano de Cambio Climático. En Internet: <http://www.gfdl.noaa.gov/>
- Gómez C. Magda y Soto E. Margarita. 1990. Atlas Climático del municipio de Coatepec. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 27. Xalapa, Veracruz, México.
- Gómez C. Magda. 1991. Atlas Climático del municipio de Xico. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 7. Xalapa, Veracruz, México.
- Gómez, D. J. D., J. Etchevers, A. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martinez. 2007. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*. En prensa.
- Gómez Rojas J.C., y Esquivel Mota M. 2002. Agroclimatología del maíz de México. *Revista Geográfica* No.132 de Jul-Dic. Págs. 123-140.
- González-Capistrán M^a. Elena. 1991. Atlas Climático del municipio de Las Vigas de Ramírez. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 15. Xalapa, Veracruz, México.
- Goodess, C.M., J. Palutikof and T.D. Davies. 1992. *The Nature and Causes of Climate Change: Assessing and Long Term Future*. Belhaven Press, London.
- HADLEY. 2006. Hadley Centre for Climate Change. The Met Office. U.K. en Internet: <http://www.metoffice.com/research/hadleycentre/index.html>
- Henderson-Sellers, A. and K. McGuffie. 1987. *Climate Modeling: A Primer* John Wiley, Chichister.
- Hoffmann, Odile. 1993. Rumbos y Paisajes de Xico. Geografía de un Municipio de la Sierra de Veracruz. 1ra Edición. Instituto de Ecología A. C. – ORSTOM (Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Developpement en Cooperation). Xalapa, Veracruz. México. 130 pp.
- Holdren, J., and P. Ehrlich, 1974. "Human populations and the global environment" *American Scientist*. 62:282-292.

- Houghton J.T., G. J. Jenkins and J.J. Ephraums. 1992. *Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IMTA. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2005. Disco compacto de consulta: BANDAS. Banco Nacional de Información de Aguas Superficiales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Comisión Nacional del Agua. Jiutepec, Morelos. México. 8 Cd's.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1980. Carta de uso de suelo y vegetación. Escala 1:1,000,000. México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1989a. Guía para la interpretación de la cartografía: Hidrología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1989b. Síntesis Geográfica, Nomenclátor y Anexo Cartográfico del Estado de Veracruz. Aguascalientes, México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2002a. Conjunto de datos vectoriales Geológicos. Continuo Nacional Escala 1:1,000,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2002b. Localidades de la República Mexicana, 2000. a partir del XII Censo de Población y vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2003. Anuario Estadístico del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Tomo I y II. Edición 2003. INEGI – Gobierno del Estado de Veracruz. Aguascalientes, México.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Sistema de descarga del continuo de elevaciones Mexicano. Modelo de Elevación Digital del Terreno. Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. 3er Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001. Impactos Adaptación y Vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico. IPCC. 95pp.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001a. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002. *Climatic Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper 5. Working Group II Technical Support Unit. [H. Gitay, A. Suárez, R. T. Watson, D. J. Dokken (eds.)] WMO-UNEP. 86 pp.
- Jáuregui, Ernesto. 1995. Rainfall fluctuations and tropical store activity in México. *ERDKUNDE*, 49: 39-48
- Kelly, P.M., P. Jia and P.D. Jones. 1996. The spatial response of climate system to explosive volcanic eruptions. *Int. J. Climatol.* 16: 537-550.
- Lal, R. 2000. Land Use and Cropping System Effects on Restoring Soil Carbon Pool of Degraded Alfisols in Western Nigeria. In: R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 900 pp.
- LaRed. 2006. Bases de datos de desastres naturales en México: Software Desinventar. En Internet: <http://www.desinventar.org>
- Levy P.E., Friend A.D., White A. and Cannell M.G.R. 2004. The influence of land use change on global scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. *Climatic Change* 67: 185-209.
- Lobo, G. 2001. Ecosystem functions classification. Ecological Economics and Environmental Management Centre (ECOMAN). En Internet marzo 2005: <http://gasa.dcea.fct.unl.pt/ecoman/projects/delphi/index.asp>
- López Ramos Ernesto. 1993. *Geología General y de México*. 7ma Edición, Editorial Trillas. México, D.F. 288 pp.
- Lugo Hubp José, 1989. *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía, Coordinación de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM. México. 337 pp.
- MA. Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystem and human well being: A framework for assessment*. Island Press, Washington, D.C. 266 pp.

- Magaña, V. (editor). 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. México. UNAM, IAI; SG. 228 pp. En Internet: <http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/nino.htm> Julio de 2006.
- MAGICC/SCENGEN. 2006. Model for Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change and Regional Climate SCENario GENERator. The National Center for Atmospheric Research. USA. En Internet: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/index.html>
- Manson, Robert. 2005. Biodiversidad y los Agroecosistemas del Estado de Veracruz. Memorias de la Primer Reunión de trabajo hacia la estrategia estatal sobre Biodiversidad de Veracruz. 11 marzo de 2005. Gobierno del Estado de Veracruz – COEPA - CONABIO e INSTITUTO DE ECOLOGÍA A.C. Xalapa, Veracruz.
- Masera, O.R. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (gira). Documento de trabajo núm. 19. México.
- McGregor, G.R., and S. Nieuwolt. 1998. Tropical climatology: an introduction to the Climate of the Low Latitudes. Second edition. John Wiley and Sons. England.
- McMichel, A., A. Haines, R. Sloof and A. Kovats. 1996. Climate Change and Human Health. World Health Organization, Geneva.
- Medina A. M^a. Elena. 1991a. Atlas Climático de los municipios de Las Minas y Tatatila. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 12. Xalapa, Veracruz, México.
- Medina A. M^a. Elena y Soto E. Margarita. 1991b. Atlas Climático de los municipios de Teocelo y Cosautlán de Carvajal. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 13. Xalapa, Veracruz, México.
- Meffe Gary, Nielsen Larry A., Knight Richard and Schenborn Dennis. 2002. Ecosystem Management. Adaptive, Community-Based Conservation. 313 págs. Island Press. Washington D.C. USA.
- Moberg, F., and C. Folke. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), pp. 215-233.
- Mooney, H.A and P. Ehrlich. 1997. Ecosystem Services: A fragmentary History. In: Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. pp 11-19. [Daily, G.C. (ed.)]. Island Press, Washington D.C. USA., 392 pp.
- Myers, Norman. 1997. The world's forests and their ecosystem services. In: Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. pp 215-235. [Daily, G.C. (ed.)]. Island Press, Washington D.C. USA, 392 pp.
- Norberg, J. 1999. Linking Nature's services to ecosystems: some general ecological concepts. *Ecological Economics*, 29(2), pp. 183-202.
- NRC. (National Research Council). 2005. Valuing Ecosystem Services. Toward better environmental decision making. National Research Council of the National Academies. National Academic Press. Washington D.C. USA. 277 pág.
- O'Brian, K., S. Eriksen, A. Schjolden, L. Nygaard. 2004. What's in a word? Cicero working paper 2004:04. Center for International Climate and Environmental Research. Norway. 19 pp.
- ONU. (Organización de Naciones Unidas). 1992. Convenio de Diversidad Biológica.
- Ortiz Solório C.A. 1987. Elementos de Agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. 3ra edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 327 pp.
- Pagiola, Stefano, Joshua Bishop y Natasha Landell-Mills. 2003. La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Edición en español por INE-SEMARNAT. México D.F. 464 pp.
- Palma Grayeb Beatriz. 2005. Generación de escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, México. Tesis para obtener el grado de Maestría en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM. México D.F.
- Pattanayak, Subhrendu. 2004. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 104(2004): pp171-184
- Pereyra, D., Palma, B., y Barrientos, A. 1991. El Niño y su relación con las lluvias de Xalapa, Veracruz, México. *GEOS Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, 11: 11-15 pp.
- Pereyra, D., B Sánchez, y J.L. Aguilar. 1994. Effect of ENSO on the mid-summer drought in Veracruz State, México. *Atmósfera*. 7: 211-219 pp.

- Reyes Castañeda, P. 1990. El maíz y su cultivo. Ed. Agt. Editor, S.A. México. 460 pp.
- Rzedowsky, J. 1978. La vegetación de México. Limusa. México.
- SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario Nacional Forestal. Escala 1:250,000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- SIACON. (Sistema de Información Agropecuaria de Consulta). 2005. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta Ver. 1.1. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. México.
- Smit, B., I. Burton, R.J.T. Klein, R. Street. 1999. The Science of Adaptation: A Framework for Assessment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 4: 199-213.
- Smit, B., Burton, B., Klein, R.J.T., and Wandel, J. 2000. "An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability." *Climatic Change*, 45: 223 – 251.
- SMN. (Servicio Meteorológico Nacional) 2006. Base de Datos meteorológicos CLICOM en CD. Servicio Meteorológico Nacional. México D.F.
- SNIM. (Sistema Nacional de Información Municipal). 2006. Sistema Nacional de Información Municipal en CD. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Secretaria de Gobernación. México.
- Sokolov, A.A. y T.C. Chapman. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de métodos de investigación. Instituto de Hidrología de España-UNESCO.
- Soto, M. *et.al.* 1978. Mapping Tropical Vegetation zones in the State of Veracruz, México. 12th. International symposium on remote sensing of Environment, April 20-26. Michigan. USA, pp 1871-1881.
- Soto, M y García, E., 1989. *Atlas climático del estado de Veracruz*. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 25. Xalapa, Ver., 125 p.
- Soto E. Margarita y Gómez C. Magda. 1990. Atlas Climático del municipio de Xalapa. Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Serie Estudios Climáticos No. 29. Xalapa, Veracruz, México.
- Strahler, Arthur. 1952. Geografía Física. Edit. Omega. Barcelona, España.
- Sys, C, Van Ranst E, Debayete J. 1991. Land Evaluation Part I. Principles in land evaluation and crop production calculations. General administration for development cooperation. Brussels, Belgium.
- Tejeda Martínez A., F. Acevedo y E. Jáuregui. 1989. Atlas climático del estado de Veracruz. Colección Textos Universitarios. Universidad Veracruzana. 150 p. Xalapa, Veracruz.
- Tejeda Martínez Adalberto Y Welsh Rodríguez Carlos. 2006. Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz. Edición preliminar. Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología. Xalapa, Veracruz. 432 pp.
- Tricart, J., y Kilian, J. 1982. *La Ecogeografía y la ordenación del medio natural*. Anagrama, Barcelona, 288 pp.
- UNDP. (United Nations Development Program). 2004. User's Guidebook for the Adaptation Policy Framework.
- UNFCCC. 1992. Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Organización de las Naciones Unidas. Nueva York. USA.
- Velázquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra Y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecologica* #62. INE. México.
- Villers Ruiz Lourdes y López Blanco Jorge. Editores. 2004. Incendios Forestales en México. Métodos de Evaluación. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. 164 p.
- Watson, R.T., Zinyoera, M.C., and Moss, R.H. 1996. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Westman, W.E. 1977. How much are nature's services worth? *Science* 197:960-964

- Williams L. G., R.H. Manson y E. Isunza V. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques* 8(1):73-89.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Cons.* 31: 5-9
- Zarate Méndez Yassir. 2006. Ciclones Tropicales en México. *El Faro*: (66) 7-9

ANEXOS

ANEXO 1. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Identificador	Nombre	Longitud		Latitud		Altura
		Grados	Minutos	Grados	Minutos	
21025	CHILCHOTLA, CHILCHOTLA	19	15	97	10	2220.0
21038	EL PROGRESO,GPE.VICTORIA	19	23	97	15	2500.0
21056	LA TRINIDAD, CHILCHOTLA	19	15	97	12	2700.0
21117	GUADALUPE VICTORIA,(DGE)	19	17	97	21	2420.0
30003	ACTOPAN, ACTOPAN	19	30	96	37	311.0
30004	ACULTZINGO, ACULTZINGO	18	43	97	18	1660.0
30007	ALMOLONGA, NAOLINCO	19	35	96	48	710.0
30008	ALTOTONGA, ALTOTONGA	19	45	97	15	1899.0
30010	AMATITLA, AXOCUAPAN	19	13	96	35	905.0
30012	ATZALAN, ATZALAN	19	48	97	13	1842.0
30015	BELLA ESPERANZA,COATEPEC	19	26	96	52	975.0
30018	BUZON, MANLIO FABIO A.	19	12	96	18	63.0
30019	CAMELPO, COTAXTLA	18	44	96	26	91.0
30021	CARRIZAL,EMILIANO ZAPATA	19	20	96	30	174.0
30024	CERRO COLORADO, APAZAPAN	19	21	96	42	523.0
30026	COATEPEC, COATEPEC	19	27	96	57	1252.0
30031	COSAMALOAPAN CARPIO(SMN)	18	22	95	49	96.0
30032	COSCOMATEPEC BRAVO (SMN)	19	4	97	2	1588.0
30036	CUICHAPA, CUICHAPA	18	46	96	52	648.0
30040	CHICONQUIACO	19	46	96	52	2070.0
30042	CHILAPA, LA PERLA	18	59	97	9	225.0
30045	EL BARRIO, TIERRA BLANCA	18	32	96	8	35.0
30047	EL COYOL, COMAPA (CFE)	19	7	96	42	610.0
30050	EL FAISAN,PASO DE OVEJAS	19	18	96	22	20.0
30052	ELOTEPEC, HUATUSCO	19	11	97	2	1860.0
30053	EL PALMAR, ZONGOLICA	19	12	97	12	180.0
30056	EL TEJAR, MEDELLIN	19	5	96	9	10.0
30057	EL ZETAL, ACTOPAN	19	32	96	40	415.0
30061	FORTIN DE LAS FLORES	18	54	97	0	1016.0
30061	FORTIN DE LAS FLORES	18	54	97	0	1016.0
30062	FRANCISCO SARABIA	20	1	96	57	185.0
30066	HUATUSCO DE CHICUELLAR	19	9	96	57	1344.0
30068	IDOLOS, ACTOPAN	19	24	96	32	143.0
30069	IGNACIO DE LA LLAVE	18	44	95	58	8.0
30073	JUCHIQUE DE FERRER	19	50	96	41	810.0
30074	JALACINGO, JALACINGO	19	49	97	19	1944.0
30076	JALCOMULCO, JALCOMULCO	19	20	96	45	330.0
30078	JOACHIN, TIERRA BLANCA	18	38	96	14	40.0
30080	RIO BLANCO, LA CARBONERA	18	43	96	11	1260.0
30082	LA GRANJA, COSAMALOAPAN	18	22	96	18	40.0
30085	LA TEMBLADERA, JICO	19	31	97	6	2727.0
30086	LA VICTORIA, TLALIXCOYAN	18	46	96	15	45.0
30087	LAS ANIMAS, JALAPA	19	32	96	55	1399.0
30088	LAS CHARCAS, T. BLANCA	18	35	95	55	5.0
30089	LAS MINAS, LAS MINAS	19	41	97	8	1365.0
30091	LAS PRIETAS, T. BLANCA	18	30	96	25	69.0
30092	LAS VIGAS, TLALIXCOYAN	18	46	96	13	37.0
30093	LOMA FINA,PASO DE OVEJAS	19	10	96	18	30.0
30094	LOS CAPULINES, COTAXTLA	18	52	96	20	18.0
30096	LOS NARANJOS	18	22	96	12	25.0
30097	LOS PESCADOS, PEROTE	19	38	97	8	2938.0
30099	MADEREROS, TLALIXCOYAN	18	44	96	10	24.0
30100	MALTRATA, MALTRATA (DGE)	18	49	97	16	1695.0
30101	MANLIO FABIO ALATAMIRANO	19	9	96	20	44.0
30104	MATA ANONA, SOLEDAD D.	19	8	96	17	250.0
30105	MATA TENATITO, OMEALCA	18	44	96	39	271.0
30108	MISANTLA, MISANTLA	19	56	96	50	410.0

Identificador	Nombre	Longitud		Latitud		Altura
		Grados	Minutos	Grados	Minutos	
30109	MORENO SUR, TIERRA BLANCA	18	35	96	14	32.0
30111	MOTZORONGO, TEZONAPA	18	39	96	44	250.0
30112	MOZOMBOA, ACTOPAN	19	30	96	27	70.0
30114	NAOLICO DE VICTORIA	19	39	96	52	1605.0
30115	NARANJAL, FORTIN (CFE)	18	49	96	57	697.0
30119	OMEALCA, OMEALCA	18	44	96	45	430.0
30123	PALO GACHO, TLALIXCOYAN	18	46	96	18	67.0
30126	PASO DEL CEDRO, ACTOPAN	19	32	96	22	15.0
30128	PEROTE, PEROTE	19	35	97	16	2394.0
30129	PIEDRAS NEGRAS	18	45	96	10	35.0
30133	PRESA OTAPA, T. BLANCA	18	41	96	20	51.0
30136	PUENTE JULA, PASO OVEJAS	19	14	96	15	13.0
30137	PUENTE NACIONAL	19	20	96	24	110.0
30139	PUNTA LIMON, A. LUCERO	19	51	96	31	220.0
30141	RINCONADA, EMILIANO Z.	19	21	96	33	313.0
30142	RINCON PACHECO	18	23	96	12	20.0
30144	RODRIGUEZ TEJEDA	18	38	96	25	110.0
30145	SAN ALEJO, PASO DEL MACHO	18	56	96	46	495.0
30150	SAN MIGUEL, ACULA	18	34	95	44	3.0
30151	SAN MIGUELITO, CORDOBA	18	52	96	53	817.0
30155	SANTA ANITA, ATOYAC	18	56	96	48	585.0
30156	SANTA INES, CUICHAPA	18	45	96	46	450.0
30157	SANTA MARIA TATETLA	19	17	96	43	350.0
30158	SANTA ROSA, ACTOPAN	19	27	96	27	68.0
30163	SOLEDAD DOBLADO	19	3	96	25	183.0
30164	SUMIDERO, ORIZABA	18	52	97	4	1227.0
30165	TAMARINDO, PUENTE NAL.	19	23	96	29	80.0
30174	TEHUIPANGO, TEHUIPANGO	18	32	97	3	2820.0
30175	TEMBLADERAS, JICO	19	30	97	7	2960.0
30177	TENAMPA, TENAMPA	19	15	96	53	1100.0
30178	TENEXTEPEC, PEROTE	19	29	97	16	2660.0
30179	TEOCELO, TEOCELO	19	23	96	58	1218.0
30181	TETELZINGO, COSCOMATEPEC	19	3	97	6	1970.0
30182	TIERRA BLANCA, (SMN)	18	27	96	21	60.0
30183	TLACOTALPAN, TLACOTALPAN	18	37	95	40	5.0
30184	TLALIXCOYAN, TLALIXCOYAN	18	48	96	3	84.0
30186	TOTALCO, PEROTE	19	35	97	20	2330.0
30187	TOTUTLA, TOTUTLA	19	14	96	57	1426.0
30192	VERACRUZ, VERACRUZ	19	12	96	8	16.0
30193	JOSE CARDEL, LA ANTIGUA	19	23	96	23	29.0
30195	EMILIANO ZAPATA	19	29	96	47	425.0
30197	VISTA HERMOSA, ZONGOLICA	18	36	96	47	335.0
30198	ZALAYETA, PEROTE	19	25	97	21	2300.0
30199	ZEMPOALA, URSULO GALVAN	19	30	96	30	25.0
30200	ZONGOLICA, ZONGOLICA	18	40	96	59	1294.0
30202	SAN PEDRO AMATITLAN	18	27	95	45	5.0
30205	COSAMALOAPAN CARPIO(DGE)	18	22	95	49	6.0
30206	COSCOMATEPEC BRAVO (DGE)	19	4	97	2	1588.0
30209	IXHUACAN DE LOS REYES	19	22	97	8	1785.0
30211	LAS VIGAS, LAS VIGAS	19	39	97	6	2400.0
30212	MALTRATA, MALTRATA	18	49	97	16	1797.0
30219	PUENTE ENRIQUEZ (TOMATA)	19	56	97	12	650.0
30222	SANTA ANA, ALTO LUCERO	19	51	96	31	12.0
30225	PASO DEL MACHO	18	58	96	43	479.0
30227	TUXPANGO, IXTACZOQUITLAN	18	49	97	1	836.0
30228	JALAPA ENRIQUEZ, JALAPA	19	32	96	55	1999.0
30231	SAN JOAQUIN, ALTOTONGA	19	47	97	2	547.0

ANEXO 2. Población total por Municipio afectado de acuerdo a escenarios de cambio climático para el cultivo de *maíz* en la región de estudio.

Escenario		Municipio		Escenarios A2 al año 2020						
				AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
				Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Ayahualulco	398	903							
	Chilchotla		19							
	Xico			437						
	Resto de municipios				602671					
ECHAM	Ayahualulco						559	882		
	Chilchotla						19	9		
	Xico					483				
	Resto de municipios				602476					
HADLEY	Total de municipios				604428					
Escenario		Municipio		Escenarios A2 al 2050						
				AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
				Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Ayahualulco	398	903							
	Chilchotla		19							
	Xico			437						
	Resto de municipios				602671					
ECHAM	Ayahualulco						559	742		
	Chilchotla						19			
	Xico					437				
	Resto de municipios				602671					
HADLEY	Acajete			1305						
	Ayahualulco	742	559	3056						
	Chichiquila			847						
	Chilchotla		19	869						
	Coatepec			60786						
	Cosautlan de carvajal			7787						
	Ixhuacan de los reyes			1439						
	Quimixtlan			3370						
	Teocelo			3955						
	Tlalnelhuayocan			11484						
	Tlaltetela			5851						
	Xalapa			682						
Xico			9926							
	Resto de municipios				491751					
Escenario		Municipio		Escenarios B2 al 2050						
				AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
				Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Ayahualulco	398	484	559			3663			
	Chilchotla		9	19			10180			
	Ixhuacan de los reyes						30			
	Jalcomulco						2474			
	Xico			483						
	Resto de municipios				586129					
ECHAM	Acajete			1305						
	Ayahualulco	882	559	3056						
	Chichiquila			11845						
	Chilchotla	9	19	1079						
	Coatepec			60786						
	Cosautlan de carvajal			7787						
	Huatusco			135						
	Ixhuacan de los reyes			1439						
	Quimixtlan			10447						
	Teocelo			3955						
	Tlalnelhuayocan			11484						
	Tlaltetela			5850						
Xalapa			682							
Xico			9972							
	Resto de municipios				473137					
HADLEY	Ayahualulco	882	559							
	Chilchotla	9	19							
	Xico			483						
	Resto de municipios				602476					

ANEXO 3. Población total por Municipio afectado de acuerdo a escenarios de cambio climático para el cultivo de café en la región de estudio.

Escenario	Municipio	Escenarios A2 al 2020						
		AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
		Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Acajete			534				
	Ayahualulco			819				
	Coatepec			263				
	Ixhuacan de los reyes			904				
	Xico			2339				
	Resto de municipios				599565			
ECHAM	Acajete			534				
	Ayahualulco			819				
	Coatepec			263				
	Ixhuacan de los reyes			904				
	Teocelo						9062	
	Xico			2339				
Resto de municipios				590503				
HADLEY	Acajete						673	
	Ayahualulco						2237	
	Chichiquila						2056	2714
	Chilchotla						1079	
	Coatepec						527	24
	Ixhuacan de los reyes						426	2754
	Quimixtlan						10078	4303
	Tlalnahuayocan						4073	
	Xico						327	1115
Resto de municipios				572038				

Escenarios	Municipio	Escenarios A2 al 2050						
		AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
		Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Acajete			673				
	Ayahualulco			2237				
	Chichiquila			11845				
	Chilchotla			1079				
	Coatepec			60346				
	Cosautlan de carvajal			7787				
	Huatusco			135				
	Ixhuacan de los reyes			535				
	Quimixtlan			10447				
	Teocelo			2711				
	Tlalnahuayocan			11484				
	Tlaltetela			5851				
	Xalapa			682				
Xico			6832					
Resto de municipios				481780				
ECHAM	Acajete			534				
	Ayahualulco			819				
	Coatepec			263				
	Ixhuacan de los reyes			904				
	Teocelo						9062	
	Xico			2339				
Resto de municipios				590503				
HADLEY	Acajete			534				
	Ayahualulco			819				
	Coatepec			263				
	Ixhuacan de los reyes			904				
	Teocelo						9062	
	Xico			2339				
Resto de municipios				590503				

Escenarios	Municipio	Escenarios B2 al 2050						
		AUMENTO			No hay cambio	DISMINUCION		
		Alto	Medio	Poco		Poca	Media	Alta
GFDL	Acajete		632	673				
	Ayahualulco		819	2237				
	Chichiquila			11845				
	Chilchotla			1079				
	Coatepec		439	50801				
	Huatusco			135				
	Ixhuacan de los reyes		904	426				
	Quimixtlan			10447				
	Teocelo					9062		
	Tlalnahuayocan			11484				
	Tlaltetela			667				
	Xalapa			682				
Xico		2598	6455					
Resto de municipios				493039				
ECHAM	Acajete			632				
	Ayahualulco			819		791		
	Chichiquila					2561		
	Coatepec			439		228		
	Cosautlan de carvajal					7516		
	Ixhuacan de los reyes			904		5086		
	Quimixtlan					4485		
	Teocelo					12189		
	Xico			2657		17675		
	Resto de municipios				548442			
HADLEY	Acajete			632				
	Ayahualulco			819		791		
	Chichiquila					2561		
	Coatepec			439		228		
	Cosautlan de carvajal					7516		
	Ixhuacan de los reyes			904		5086		
	Quimixtlan					4485		
	Teocelo					12189		
	Xico			2657		17675		
	Resto de municipios				548442			